



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

FERNANDO CÉSAR DE BARROS FARIA JÚNIOR

**ANÁLISE TRIDIMENSIONAL POR ELEMENTOS FINITOS DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE INCISIVOS E PRÉ-MOLARES
COM RIZOGÊNESE INCOMPLETA APÓS APICIFICAÇÃO E
PROCEDIMENTO REGENERATIVO**

FERNANDO CÉSAR DE BARROS FARIA JÚNIOR

**ANÁLISE TRIDIMENSIONAL POR ELEMENTOS FINITOS DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE INCISIVOS E PRÉ-MOLARES COM
RIZOGÊNESE INCOMPLETA APÓS APICIFICAÇÃO E PROCEDIMENTO
REGENERATIVO**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE pelo Programa de Pós-Graduação em ODONTOLOGIA RESTAURADORA.

Área: Endodontia. Linha de Pesquisa: Traumatismo dentário e tratamento restaurador

Orientadora: Prof. Tit. Márcia Carneiro Valera

São José dos Campos

2022

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2023]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Faria Júnior, Fernando César de Barros

Análise tridimensional por elementos finitos do comportamento mecânico de incisivos e pré-molares com rizogênese incompleta após apicificação e procedimento regenerativo / Fernando César de Barros Faria Júnior. - São José dos Campos : [s.n.], 2022.

53 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Odontologia Restauradora) - Pós-Graduação em Odontologia Restauradora - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2022.

Orientadora: Márcia Carneiro Valera.

1. Endodontia regenerativa. 2. Apicificação. 3. Tratamento do canal radicular. 4. Análise de elementos finitos. I. Valera, Márcia Carneiro, orient. II. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - Unesp. IV. Universidade Estadual Paulista (Unesp). V. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi e Seção Técnica de Informática,

ICMC/USPcom adaptações - STATI, STRAUD e DTI do ICT/UNESP.

Renata Aparecida Couto Martins CRB-

8/8376

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Marcia Carneiro Valera (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus São José dos Campos

Profa. Dra. Flávia Goulart da Rosa Cardoso

Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP)

Campus São José dos Campos

Prof. Dr. Felipe Nogueira Anacleto

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus São José dos Campos

São José dos Campos, 05 de agosto de 2022

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	11
2.1 Apicificação e procedimentos endodônticos regenerativos de dentes imaturos e sua resistência mecânica	11
2.2 Ferramentas Biomecânicas	15
3 PROPOSIÇÃO	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1 Pré-processamento	18
4.1.1 Modelagem geométrica.....	18
4.1.2 Exportação da geometria.....	22
4.1.3 Confeção da malha.....	22
4.1.4 Condições de contorno e carregamento	23
4.1.5 Propriedades dos materiais.....	24
4.2 Processamento	25
4.3 Pós-processamento	25
4.4 Análise das tensões de von Mises.....	26
5 RESULTADOS.....	28
5.1 Análise de resultados do incisivo central superior	28
5.1.1 Análise comparativa entre os incisivos centrais superiores (2D).....	29
5.2 Análise de resultados do primeiro pré-molar inferior (3D)	33
5.2.1 Análise comparativa entre os primeiros pré-molares inferiores (3D)	36
6 DISCUSSÃO	40
7 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS.....	44

Faria Júnior FCB. Análise tridimensional por elementos finitos do comportamento mecânico de incisivos e pré-molares com rizogênese incompleta após apicificação e procedimento regenerativo [dissertação]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2022.

RESUMO

O tratamento endodôntico de dentes com rizogênese incompleta e necrose pulpar é considerado um desafio para a endodontia. Técnicas de apicificação e procedimentos endodônticos regenerativos têm sido empregados com o objetivo de preservar e/ou restabelecer as estruturas comprometidas por tal condição. Entretanto, não existe consenso na literatura a respeito da manutenção da resistência mecânica após ambas as técnicas. Ferramentas computacionais foram inseridas na odontologia para auxiliar na interpretação de determinadas condições dentárias. Dentre tais ferramentas, a análise por elementos finitos (FEA) tem sido executada garantindo a reprodução de modelos que representem características físicas semelhantes à estrutura real. Assim, este estudo analisou o comportamento mecânico de dentes incisivos (I) e pré-molares (PM) com rizogênese incompleta submetidos aos tratamentos de apicificação e procedimento endodôntico regenerativo através da metodologia de FEA. Os modelos foram elaborados em software CAD Rhinoceros 7.0® com base em tomografias computadorizadas, e foram compostos por esmalte, dentina, polpa, ligamento periodontal, osso cortical, osso medular, guta-percha, MTA, coágulo sanguíneo e resina composta. Os grupos do estudo foram: a) I-Controle positivo; b) I-Controle negativo; c) I-Procedimento endodôntico regenerativo; d) I-Apicificação; e) PM-Controle positivo; f) PM-Controle negativo; g) PM-Procedimento endodôntico regenerativo e h) PM-Apicificação. Com os modelos finalizados, foi realizada a exportação para software de análise por elementos finitos Ansys® (version 13.0; Ansys, Canonsburg, PA). Após o modelamento das estruturas, as geometrias foram exportadas no formato STEP 214 Automotive Design (STP) e importadas para o CAE (Computer Aided Engeneering) do Ansys® (version 13.0; Ansys, Canonsburg, PA). Os modelos foram submetidos a cargas de 200 N no terço incisal palatino e em um ponto localizado no terço médio da região palatina. O carregamento foi direcionado a 45° em relação ao plano oclusal. O pré-processamento e pós-processamento foram realizados pelo programa Ansys® v.13.0. Os resultados estão apresentados em gráficos de tensão máxima principal, com seus valores numéricos representados em escala de cores. Foi observado, no grupo dos incisivos, melhores resultados de força de tração e compressão para o tratamento com apicificação quando comparado ao tratamento de revascularização. No grupo dos pré-molares, foi observado que o grupo de revascularização foi, tanto para tração quanto para compressão, melhor avaliado quando comparado ao grupo de apicificação.

Palavras-chave: Endodontia regenerativa. Apicificação. Tratamento do canal radicular. Análise de elementos finitos.

Faria Júnior FCB. Three-dimensional finite element analysis of the mechanical behavior of incisors and premolars with incomplete root formation after apexification and revascularization [dissertation]. São José dos Campos (SP): Paulista State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2022.

ABSTRACT

The endodontic treatment of teeth with incomplete root formation is considered a challenge for endodontics. Apexification techniques and regenerative endodontic procedures have been used in order to preserve and/or restore the structures compromised by this condition. However, there is no consensus in the literature regarding the maintenance of mechanical strength after both techniques. Computational tools have been introduced into dentistry to assist in the interpretation of certain dental conditions. Among such tools, finite element analysis (FEA) has been performed ensuring the reproduction of models that represent physical characteristics similar to the real structure. Thus, this study analyzed the mechanical behavior of teeth with incomplete root formation submitted to apexification treatments and regenerative endodontic procedure through the FEA methodology. The models were elaborated in Rhinoceros 7.0® CAD software based on computed tomography, and were composed of enamel, dentin, pulp, periodontal ligament, cortical bone, medullary bone, gutta-percha, MTA, blood clot and composite resin. The study groups were: a) I-Positive Control; b) I-Negative control; c) I-Regenerative endodontic procedure; d) I-Apexification; e) P-Positive control; f) P-negative control; g) P-Regenerative endodontic procedure and h) P-Apexification. With the finished models, they were exported to Ansys® finite element analysis software (version 13.0; Ansys, Canonsburg, PA). After modeling the structures, the geometries were exported in STEP 214 Automotive Design (STP) format and imported into Ansys® Computer Aided Engineering (CAE) (version 13.0; Ansys, Canonsburg, PA). The models were subjected to loads of 200 N in the palatal incisal third and at a point located in the middle third of the palatal region. The loading was directed at 45° to the occlusal plane. Pre-processing and post-processing were performed by the program Ansys® v.13.0. The results are presented in graphs of maximum principal tension, with their numerical values represented in a color scale, where it was observed, in the incisor group, better results of traction and compression force for the treatment with apexification when compared to the revascularization treatment. In the premolar group, it was observed that the revascularization group was, for both traction and compression, better evaluated when compared to the apexification group.

Keywords: *Regenerative endodontics. Apexification. Root canal treatment. Finite element analysis.*

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos o tratamento endodôntico em dentes imaturos e necrosados tem sido frequentemente estudado devido aos inúmeros desafios. Tais dificuldades se refletem a presença de ápice aberto e espessura delgada das paredes radiculares caracterizando estruturas frágeis (Lawley et al., 2004). O ápice com formação incompleta é considerado uma das complexidades mais relevantes do tratamento endodôntico, uma vez que a ausência da constrição apical favorece a extrusão dos materiais obturadores durante a condensação vertical, podendo comprometer o resultado do tratamento a longo prazo (de Castro et al., 2011). Para contornar esse problema, é preconizado a apicificação que consiste na formação de uma barreira apical de tecido mineralizado (Kaiser, 1964), induzido por um material que possui essa capacidade. Para essa indução, a utilização do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) é a técnica mais tradicional e tem sido amplamente utilizada (Kaiser, 1964).

Apesar de seus benefícios, a técnica de apicificação com Ca(OH)_2 apresenta algumas desvantagens, como por exemplo a redução de resistência à fratura de dentes com rizogênese incompleta (Valera et al., 2015). Esta redução se justifica pelo fato do Ca(OH)_2 aumentar o pH dentinário levando a redução do conteúdo orgânico da matriz de dentina, que conseqüentemente, reflete em fragilidade dentinária. Além disso, a apicificação não promove o aumento na espessura das paredes radiculares e continuidade do crescimento da raiz, favorecendo assim a ocorrência de fraturas (de Castro et al., 2011). Sendo assim, novos materiais foram desenvolvidos a fim de substituir o uso de Ca(OH)_2 no processo de apicificação. Dentre eles, tem se destacado o agregado trióxido mineral (MTA) (Martin et al., 2007).

A técnica de apicificação com MTA apresenta inúmeras vantagens que vão desde suas propriedades, como biocompatibilidade, ótima capacidade de vedamento e selamento apical, fácil manipulação, radiopacidade e estimulador de reparação tecidual (Torabinejad, Chivian, 1999; Economides et al., 2003), como o próprio procedimento que torna o tratamento mais simples por ser possível de ser realizado em poucas consultas de atendimento. De acordo com estudos de

Shabahang et al. (1997), a aplicação de MTA em dentes de cães com rizogênese incompleta permitiu a formação de uma barreira de tecido duro apical (Shabahang et al., 1997). Além de tal fato, estudos na literatura tem demonstrado que o MTA apresenta capacidade de selamento superior a qualquer outro material endodôntico (Martin et al., 2007). E, contrariamente ao $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sua aplicação não diminuiu a resistência a fratura de raízes imaturas. Porém, a técnica do plug apical com MTA, de forma semelhante ao $\text{Ca}(\text{OH})_2$, não permite o engrossando das paredes radiculares, o que implica em manutenção da fragilidade radicular (Al-kahtani et al., 2005; de Castro et al., 2011).

Outra alternativa para o tratamento endodôntico de dentes com rizogênese incompleta e necrose pulpar são os procedimentos regenerativos da polpa. Esta técnica consiste na desinfecção dos canais radiculares e posterior indução de sangramento na região periapical. Este sangramento por sua vez, preencherá o canal com coágulo sanguíneo e células-tronco, capazes de induzir a atividade cementoblástica com posterior formação de tecido mineralizado nas paredes dentinárias (Silva et al., 2017; Shah et al., 2008). Sendo assim, a vitalidade das células-tronco da papila apical é fundamental. No entanto, estas células podem sobreviver à necrose pulpar mesmo que a infecção atinja a região periapical (Kim et al., 2012).

Embora os procedimentos regenerativos ainda tenham curto tempo de acompanhamento, os estudos mostram que estes procedimentos apresentam alto índice de sucesso, equivalente ao tratamento de apicificação (Jeeruphan et al., 2012; Lin et al., 2017; Torabinejad et al., 2017; Casey et al., 2022). No entanto, poucos estudos tratam sobre a resistência mecânica de dentes submetidos a esses tratamentos, especialmente quanto aos procedimentos endodônticos regenerativos.

Quando se avalia a resistência da estrutura dental observa-se que há um aumento da resistência de raízes imaturas pelo método de apicificação com MTA e queda nessa resistência quando se utiliza técnica de revascularização (Al-kahtani et al., 2005; de Castro et al., 2011; Ali et al., 2019). Mello et al. (2020) avaliaram a resistência a fratura de dentes submetidos a apicificação ou revascularização seguidos de diferentes técnicas de restauração, verificando haver diferenças na resistência à fratura entre os diferentes procedimentos e técnicas. Assim, os estudos

publicados não mostram um consenso sobre a questão (Andreasen et al., 2002; Kusgoz et al., 2009; Lawley et al., 2004; Mello et al., 2020).

Na atualidade, a análise de elementos finitos (AEF) é a ferramenta computacional mais comumente empregada para a resolução de problemas de engenharia, sendo implementada com sucesso em diversas áreas da bioengenharia. Este método é eficaz pois permite, além de outras finalidades, visualizar o campo de tensões, fundamental para a compreensão dos mecanismos de falha de um sistema que é submetido a uma carga (Versluis, Tantbirojn, 2009), se destacando na odontologia a fim de analisar condições dentárias com diferentes comprometimentos (Rocha, 2016).

A FEA pode ser realizada em modelos bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D). A escolha do número de dimensões depende de fatores inter-relacionados, tais como: a complexidade da geometria, as propriedades do material, o modo de análise, a precisão requerida, a aplicabilidade dos resultados e, finalmente, o tempo e os custos envolvidos (Romeed et al., 2004; Poiate et al., 2011). Modelos 3D são mais realistas pois permite a reprodução de geometrias complexas (por exemplo, estruturas biológicas). No entanto, a criação de um modelo tridimensional exige maior custo, tempo de trabalho e requer tecnologia adicional para adquirir dados geométricos na geração dos modelos sólidos (Soares et al., 2012).

Dentro desta perspectiva, o propósito deste trabalho foi avaliar a resistência mecânica de dentes incisivos e pré molares com rizogênese incompleta por meio da metodologia de FEA, comparando os métodos de apicificação e procedimentos endodônticos regenerativos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Apicificação e procedimentos endodônticos regenerativos de dentes imaturos e sua resistência mecânica

A causa mais frequente de perda de função da polpa dentária e do desenvolvimento da raiz em dentes imaturos é a necrose pulpar causada por cárie dental (Cvek, 1992). Esta por sua vez, acontece quando dentes com rizogênese incompleta são acometidos por fatores intrínsecos e/ou extrínsecos, como cáries, trauma dentário, dentre outras causas. Por esta razão, o desenvolvimento radicular se torna comprometido, prejudicando a completa constrição apical (Diogenes et al., 2013). Com as paredes dentinárias finas dos dentes imaturos, o tratamento endodôntico e restaurador representa um grande desafio para ser executado, além do elemento dentário estar mais propenso a fraturas por pequenos traumas ou até mesmo pela mastigação (Valera et al., 2004). Sendo assim, o selamento apical como forma de tratamento do canal radicular é bastante promissor, porém trata-se de um grande obstáculo a ser ultrapassado durante o tratamento de dentes imaturos (Eram et al., 2020).

O traumatismo dentário é motivo de grande preocupação para os dentistas, pois este acontecimento pode causar problemas emocionais, físicos e estéticos ao paciente (Zaror et al., 2018). Para a dentição decídua e permanente os incisivos centrais superiores são os dentes mais acometidos por traumas (Rocha, Cardoso, 2001; Bastone et al., 2000; Zhang et al., 2014). O trauma físico pode acarretar uma variedade de danos à estrutura dentária como na coroa, raiz, polpa e até mesmo nos tecidos de suporte (osso alveolar e ligamento periodontal) (Zerman, Cavalleri, 1993). Dentre os sinais e sintomas decorrentes do trauma, destacam-se a perda dentária, descoloração, reabsorção radicular, anquilose, fístulas, edema, mobilidade, perda de vitalidade e infecção (Sharif et al., 2015).

Considerando a dentição permanente, os pacientes do gênero masculino entre 6 e 13 anos de idade são mais propensos a eventos que causam trauma dentário (Rocha, Cardoso, 2001; Zerman, Cavalleri, 1993). Dentro desta faixa etária

de maior risco, os incisivos centrais superiores se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento radicular (Hegde, Sood., 2002). Isso pode levar a diferentes consequências nas estruturas dentinárias submetidas aos tratamentos dentários. Porém, poucos estudos abordam as características biomecânicas das lesões traumáticas, assim como as reações com os tecidos de suporte que o trauma acarreta (Oskui et al., 2018; Bucchi et al., 2019).

O tratamento endodôntico de dentes imaturos não vitais apresenta muitos desafios. As paredes dentinárias delgadas e o ápice aberto, levam a incidência de fratura de raízes relatada acima de 60% após medicação intracanal por longo prazo com Ca(OH)_2 e as dificuldades de realização do correto tratamento endodôntico, (Cvek, 1992; Glendor, 2008).

Durante muitos anos, a apicificação foi considerada a terapia padrão para dentes com rizogênese incompleta. Esta técnica foi originada a fim de se criar uma barreira apical induzida principalmente por Ca(OH)_2 e assim estimular a formação de uma barreira calcificada no ápice de um dente com polpa necrótica que não completou o total desenvolvimento radicular. Essa barreira pode ser constituída de dentina, osso, osteodentina ou cimento (Annamalai, Mungara, 2010; Walton, Torabinejad, 2002). O principal objetivo desta técnica é evitar a extrusão de materiais obturadores para os tecidos periapicais a partir do canal radicular, obtendo assim uma barreira apical eficaz. Portanto, o procedimento de criar mecanicamente esta barreira é definido como “apicificação” (Alobaid et al., 2014). Este procedimento não deve ser confundido com apicigênese, o qual se trata de um dente vital com o objetivo principal de estimular o desenvolvimento fisiológico da raiz do dente e da formação do ápice radicular (Selden, 2002; Pereira et al., 2016).

Diversos materiais foram utilizados na tentativa de criar uma barreira apical, como a pasta de Ca(OH)_2 e o pó de Ca(OH)_2 (Schumacher, Rutledge., 1993; Yoshida et al., 1998). Tradicionalmente, o Ca(OH)_2 foi o material de escolha mais utilizado para a realização das técnicas de tratamento em dentes com rizogênese incompleta, na tentativa de formação da barreira apical. Entretanto seu uso foi sendo reduzido (Sheehy, Roberts, 1997; Andreasen et al., 2002), uma vez que tratamentos a longo prazo com Ca(OH)_2 levam a fragilização das raízes imaturas que tornam-se mais suscetíveis a fraturas verticais e a diminuição significativa nas propriedades intrínsecas da dentina exposta ao Ca(OH)_2 (Andreasen et al., 2002; Jonker et al.,

2017). Assim, a realização da apicificação com Ca(OH)_2 torna o dente suscetível à fratura (de Castro et al., 2011). Desta forma, a utilização deste material no processo de apicificação acabou sendo substituída por novos cimentos endodônticos, como o agregado trióxido de mineral (MTA) (Silujjai, Linsuwanont, 2017).

Com a introdução do MTA na odontologia, surgiram novas perspectivas na prática odontológica. Por proporcionar alta capacidade de vedação, esse cimento a base de silicato de cálcio induz a formação de uma barreira apical em tratamentos de dentes imaturos sem vitalidade pulpar (Parirokh, Torabinejad, 2010; Porter et al., 2010; Silva et al., 2017). O MTA também é usado em obturações retrógradas, perfurações e possui propriedades antimicrobianas (Parirokh, Torabinejad, 2010; Kusgoz et al., 2009). De acordo com estudo de Bidar et al. (2010), quando utilizado na apicificação com a finalidade de induzir a formação de um tampão apical, o MTA não reduziu a resistência à fratura de dentes imaturos. Além disso, este material é capaz de estimular a formação de um novo cimento. Sendo assim, o uso do MTA como tampão apical nos procedimentos de apicificação em dentes com rizogênese incompleta tem sido indicado como material substituto ao Ca(OH)_2 , para induzir o fechamento das raízes de dentes permanentes imaturos (Annamalai, Mungara 2010; Bidar et al., 2010).

Em procedimentos de apicificação, uma das vantagens do uso do MTA é a redução no tempo de tratamento (Andreasen et al., 2002; Sheehy, Roberts, 1997). Além disso, é observado na fase de maturação do MTA, depósitos interfaciais semelhantes a apatita que preenchem possíveis áreas vazias as quais aparecem durante a fase de presa do material, melhorando assim o selamento entre as paredes do canal radicular e o MTA. Portanto, a formação desses depósitos são responsáveis pelo melhor selamento apical promovido pelo MTA (Franklin, Pashley, 2007), além de possuir excelente biocompatibilidade, e menor citotoxicidade quando comparado a outras matérias para esta mesma finalidade (Lee, Bogen, 2001).

Ao longo dos anos, conforme estudos científicos e o consequente desenvolvimento de técnicas endodônticas, uma nova alternativa ao tratamento de dentes imaturos com comprometimento radicular foi sendo originada. Sendo assim, atualmente os procedimentos endodônticos regenerativos (PERs) são considerados uma das opções para tratamento de dentes com rizogênese incompleta (Diogenes et al., 2013). Estes procedimentos contribuem para a remissão de sinais e sintomas

clínicos, aumento na espessura das paredes radiculares, continuidade na formação radicular associado ao fechamento apical e eventualmente resposta positiva aos testes clínicos de vitalidade pulpar (Glynis et al., 2021; Nagy et al., 2014; Diogenes, Hargreaves, 2017). Tal técnica recebe diferentes terminologias, dentre elas a revascularização pulpar, uma vez que após provocar o sangramento apical, células mesenquimais indiferenciadas da região apical penetram nos tecidos dos canais radiculares (Chepa et al., 2015). O procedimento de revascularização pulpar tem como definição “procedimentos de base biológica projetados para substituir estruturas danificadas, incluindo dentina e estruturas radiculares, bem como células do complexo dentino-pulpar” (Murray et al., 2007). Este tipo de procedimento já foi considerado de alta complexidade. Contudo, quando aplicado sobre dentes com ausência de infecção intracanal e com a presença de uma estrutura dentária que auxilie no crescimento interno do tecido, é possível promover a regeneração pulpar (Cvek et al., 1990).

A revascularização pulpar tem como objetivo induzir a formação de novo tecido no canal radicular estimulando o fechamento apical de dentes com rizogênese incompleta. Entretanto, tal método ainda apresenta grandes desafios (Pimentel et al., 2017). A técnica se baseia na desinfecção do canal, sem instrumentação mecânica e com abundante irrigação de hipoclorito de sódio. Após o sucesso da desinfecção e com os sinais e sintomas clínicos da infecção inexistentes, segue-se com uma sobreinstrumentação do ápice. Após este processo, o espaço do canal radicular será preenchido com um coágulo sanguíneo rico em células mesenquimais indiferenciadas. Estas por sua vez, se diferenciarão em cementoblastos garantindo a formação de tecido mineralizado nas paredes dentinárias. (Silva et al., 2017; Ding et al., 2009; Bose et al., 2009; Miltiadous, Spyros, 2015).

Procedimentos endodônticos regenerativos podem solucionar diversos desafios na endodontia, como a periodontite apical, e, conseqüentemente permitir a maturação contínua da raiz (Sridharan, Neelakantan, 2014). Thomson e Kahler, 2016 explicam que o coágulo sanguíneo formado no canal radicular contendo células mesenquimais diferenciadas, pode promover significativo crescimento radicular, e a vitalidade pulpar pode ser restabelecida (Thomson, Kahler, 2010)

Para se alcançar o sucesso nos procedimentos de regeneração pulpar, após a indução de sangramento radicular, deve-se realizar o selamento coronário.

Estudos apontam que a aplicação de MTA na porção cervical promoveu excelente selamento coronário, mantendo o espaço do canal radicular livre de bactérias, que é fundamental para o sucesso dos procedimentos regenerativos (Ding et al., 2009; Bose et al., 2009; Miltiadous, Spyros, 2015). Além disso, verifica-se resposta tecidual favorável nas áreas em que o tecido vivo entra em contato com o MTA (Tawfik et al., 2013), que se deve a excelente capacidade seladora desse cimento associado à sua capacidade indutora de mineralização (Sonmez et al., 2013; Torabinejad et al., 1995).

No estudo retrospectivo de Jeeruphan et al. (2012) para avaliar resultados clínicos e radiográficos de tratamento de dentes permanentes jovens com necrose pulpar, os autores verificaram que a taxa de sobrevivência dos dentes tratados com apicificação com Ca(OH)_2 (77,2%) foi significativamente menor do que as taxas de sobrevivência dos dentes com um tratamento regenerativo (100%) e apicificação com MTA (95%) (Jeeruphan et al., 2012). Os autores observaram que o grupo com tratamento regenerativo, aumentou a espessura da raiz (28,2%) e comprimento radicular (14,9%), enquanto o grupo com apicificação com MTA não apresentou aumento de espessura, porém teve aumento do comprimento radicular de 6,1%. Para o grupo com apicificação com Ca(OH)_2 , o aumento de espessura e do comprimento radicular, foi respectivamente (1,5% e 0,4%).

Com base nestes resultados, o tratamento de revascularização tem se destacado com resultados promissores, sendo uma opção viável para tratamentos de dentes imaturos não vitais (Miltiadous et al., 2015).

2.2 Ferramentas Biomecânicas

Com o passar dos anos, recursos computacionais foram sendo desenvolvidos a fim de analisar e solucionar problemas dentre as diferentes condições de casos clínicos de difícil mensuração in vivo (Rocha, 2016). A análise por elementos finitos (FEA) é uma ferramenta computacional utilizada na bioengenharia, para avaliar aspectos mecânicos dos biomateriais e dos tecidos humanos além de analisar as estruturas e as tensões a elas impostas (Poiate et al., 2009).

A análise por FEA transforma uma estrutura contínua em unidades individuais, sendo capaz de modelar matematicamente estruturas geométricas irregulares como os dentes e materiais odontológicos. A modelagem das estruturas é o processo mais importante no desenvolvimento da metodologia de elementos finitos, e se baseia na estereolitografia (STL) que gera uma malha, que, posteriormente irá gerar o módulo tridimensional (Magne, Douglas, 1999).

A FEA é muito utilizada na implantodontia, onde muitos pesquisadores a aplicam para avaliar como será dada a distribuição de forças em um implante dental, bem como nos tecidos circundantes a ele. Na literatura, sua simulação vem sendo comumente considerada como material linearmente elástico e isotrópico homogêneo (Littuma et al., 2017)

A metodologia por FEA permite a leitura dos resultados dos valores representados por mapas coloridos, que favorecem a visualização bem como a interpretação dos dados (Soares et al., 2012). Dentre as vantagens do FEA destacam-se: fácil de obtenção de um modelo matemático, que permite simular várias situações como aplicação de cargas, sem danificar os tecidos além de fácil interpretação dos resultados (Bucchi et al., 2019). Por trabalhar com materiais não homogêneos e formas complexas permite avaliar níveis de tensões nos dentes, no entanto, para permitir a análise correta dos dados, a interpretação dos resultados deve levar em consideração que a própria ferramenta possui suposições e simplificações para solucionar os problemas (Soares et al., 2012).

Com a FEA é possível verificar o comportamento de um modelo computacional de determinadas estruturas em relação as tensões quando o mesmo é submetido a uma carga. Observa-se os locais mais susceptíveis à falhas pois mostra os locais de concentração de tensão e os pontos críticos de maior sobrecarga (Soares et al., 2008). Assim, o modelo tridimensional obtido fornece maior riqueza de informações, uma vez que reproduz as estruturas anatômicas e a aplicação de forças de modo mais fácil, o que torna a simulação matemática mais próxima da realidade (Bucchi et al., 2019).

Assim, a análise por FEA pode ser aplicada na avaliação da resistência mecânica de dentes imaturos apicificados e revascularizados. Dados de tensões para a fratura foram obtidos auxiliando na previsibilidade do desempenho mecânico dos elementos do estudo.

3 PROPOSIÇÃO

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento mecânico por meio da análise por elementos finitos (FEA) de modelos bidimensionais e tridimensionais de dentes incisivo central superior direito e pré-molar (PM) inferior direito respectivamente, com rizogênese incompleta e submetidos às técnicas de apicificação e procedimento endodôntico regenerativo. As análises do comportamento mecânico do incisivo central superior foram comparadas entre si após a execução das duas técnicas, assim como para o primeiro pré-molar inferior direito com rizogênese incompleta e hígido.

As hipóteses a serem testadas neste estudo foram:

H₀: Não haverá diferença no comportamento mecânico entre ambas as técnicas de apicificação e procedimento endodôntico regenerativo do incisivo central superior direito e do primeiro pré-molar inferior direito com rizogênese incompleta.

H₁: O procedimento endodôntico regenerativo em ambos os dentes apresentará melhor comportamento mecânico quando comparada a técnica de apicificação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este projeto foi encaminhado e aprovado ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Estadual Paulista, cumprindo os preceitos éticos de autonomia, não maleficência, beneficência e justiça em investigação com seres humanos conforme constam na Resolução nº 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde e Comissão de Ética, sob número CAAE: 52309021.9.0000.0077.

Parecer Consubstanciado do CEP (Certificado de Comitê de Ética)

O parecer consubstanciado do CEP (certificado de comitê de ética) se encontra no ANEXO A deste trabalho.

Critérios de inclusão e exclusão

Os critérios de inclusão usados para selecionar o exame tomográfico que deu origem aos modelos de estudo foram baseados em dentes com rizogênese incompleta com desenvolvimento em estágio 4 (Classificação de Cvek, 1992) e hígidos. Enquanto os critérios de exclusão foram aqueles que não atenderem aos critérios de inclusão do estudo. Dentes incisivos centrais superiores direito com rizogênese incompleta e pré-molar inferior direito com rizogênese incompleta.

4.1 Pré-processamento

4.1.1 Modelagem geométrica

Para a elaboração dos modelos 2D (incisivo central superior direito) e 3D (primeiro pré-molar inferior direito) ambos com rizogênese incompleta, as medidas e proporções das geometrias dos dentes foram obtidas por meio de tomografia

computadorizada de feixe cônico (TCFC) aplicando técnicas de engenharia reversa (Figura 1).

Figura 1 – Tomografia computadorizada de incisivo central superior (sentido mesio-distal)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os modelos foram confeccionados seguindo o protocolo Bio-CAD (Noritomi et al., 2012) desenvolvido no Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – Campinas-SP. Esse protocolo descreve o procedimento utilizado para obtenção de um modelo geométrico de uma estrutura com referências anatômicas, sendo utilizado para a modelagem 3D de estruturas orgânicas (Soares et al., 2012). Esta metodologia

envolve a criação de um modelo baseado no formato STL (estereolitografia).

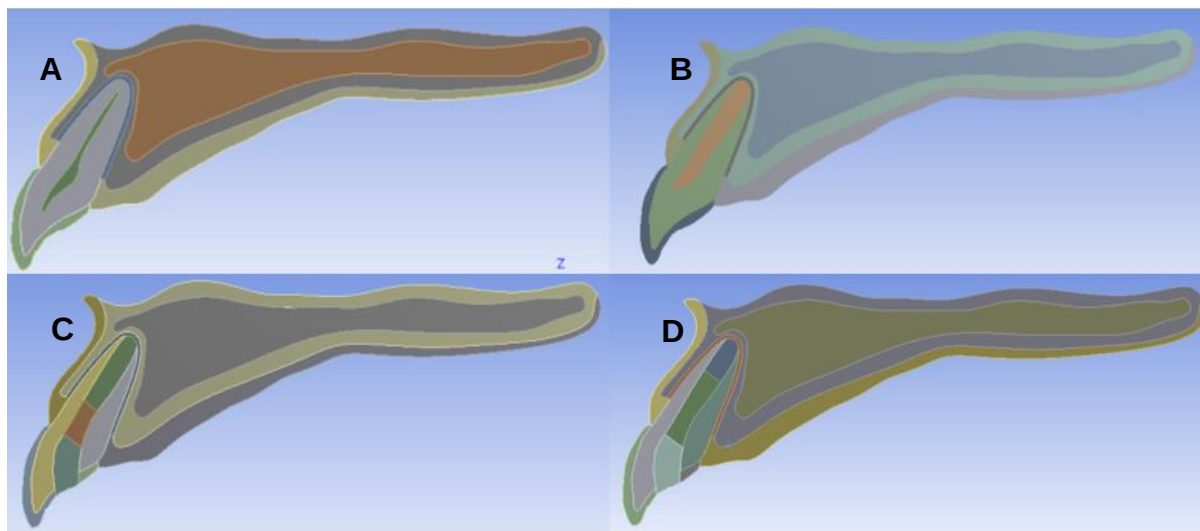
Os modelos sólido tridimensional e bidimensional foram elaborados no software CAD Rhinoceros 7.0® (McNeel North America, Seattle, WA), que dentre os vários métodos possíveis para a construção geométrica de modelos, utiliza a modelagem NURBS (Non Uniform Rational Bézier Spline). As curvas NURBS são definidas seguindo os detalhes anatômicos da estrutura e elas determinam a qualidade geométrica e consequentemente da malha e do modelo de elementos finitos (Soares et al., 2012).

A modelagem dos grupos do estudo consistiu das seguintes etapas: criação de curvas de referência, construção das superfícies sobre essas curvas e no fechamento dessas, resultando em um volume para a geração dos sólidos que caracterizam a entidade geométrica.

A construção geométrica simulou as condições utilizadas para realização de um teste experimental no qual os modelos 2D e 3D foram constituídos por esmalte, dentina, polpa e ligamento periodontal. Foi estabelecida uma hipótese de simplificação de contato perfeitamente colado (nós coincidentes).

A Figura 2 representa imagens de modelos elaborados no programa Rhinoceros, o qual se constitui de incisivo central superior hígido, incisivo central superior com rizogênese incompleta, com apicificação e incisivo com procedimento endodôntico regenerativo.

Figura 2 - Modelamento em 2D de incisivo superior nas diferentes condições a serem estudadas



Legenda: Incisivo central superior: a) com ápice completo (maduro); b) com rizogênese incompleta; c) com rizogênese incompleta e procedimento endodôntico regenerativo.; d) com rizogênese incompleta e apicificação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Divisão dos grupos experimentais

Para a análise do procedimento endodôntico regenerativo. e apicificação, os modelos utilizados foram:

Modelo 2D:

- a) (I-Controle positivo): Incisivo central superior maduro (formação radicular completa);
- b) (I-Controle negativo): Incisivo central superior hígido com rizogênese incompleta (Estágio 4 – Classificação de Cvek);
- c) (I-Procedimento endodôntico regenerativo): Incisivo central superior com rizogênese incompleta (Estágio 4 – Classificação de Cvek), com 5mm de MTA na porção cervical e selamento coronário com resina composta;
- d) (I-Apicificação): Incisivo central superior com rizogênese incompleta (Estágio 4 – Classificação de Cvek), com o canal radicular preenchido por guta-percha, 5mm de MTA na região apical e selamento coronário com resina composta.

Modelo 3D:

- e) (P-Controle positivo): Pré-molar inferior com rizogênese incompleta e hígido;
- f) (P-Controle negativo): Pré-molar inferior com rizogênese incompleta (Estágio 4 – Classificação de Cyek) e abertura coronária;
- g) (P-Procedimento endodôntico regenerativo): Pré-molar inferior com rizogênese incompleta (Estágio 4 – Classificação de Cyek) com 5mm de MTA na porção cervical e selamento coronário com resina composta;
- h) (P-Apicificação): Pré-molar inferior com rizogênese incompleta (Estágio 4 – Classificação de Cyek) com o canal radicular preenchido por guta-percha e 5mm de MTA na região apical e selamento coronário com resina composta.

Todos os materiais utilizados nos grupos do estudo foram criados em modelo 3D por FEA, sob as mesmas dimensões do modelo real e no mesmo software.

Com os modelos intactos finalizados, foi realizada a exportação da geometria para um software de análise por elementos finitos Ansys® (version 13.0; Ansys, Canonsburg, PA).

4.1.2 Exportação da geometria

Após serem concebidas no ambiente CAD (Computer- Aided Design) do Rhinoceros®, as geometrias foram exportadas no formato STEP 214 Automotive Design (STP) e posteriormente importadas para o CAE (Computer Aided Engeneering) do Ansys® (version 13.0; Ansys, Canonsburg, PA). Este formato foi escolhido em função da maior compatibilidade do arquivo STEP com o Ansys® ao se utilizar geometrias com volumes.

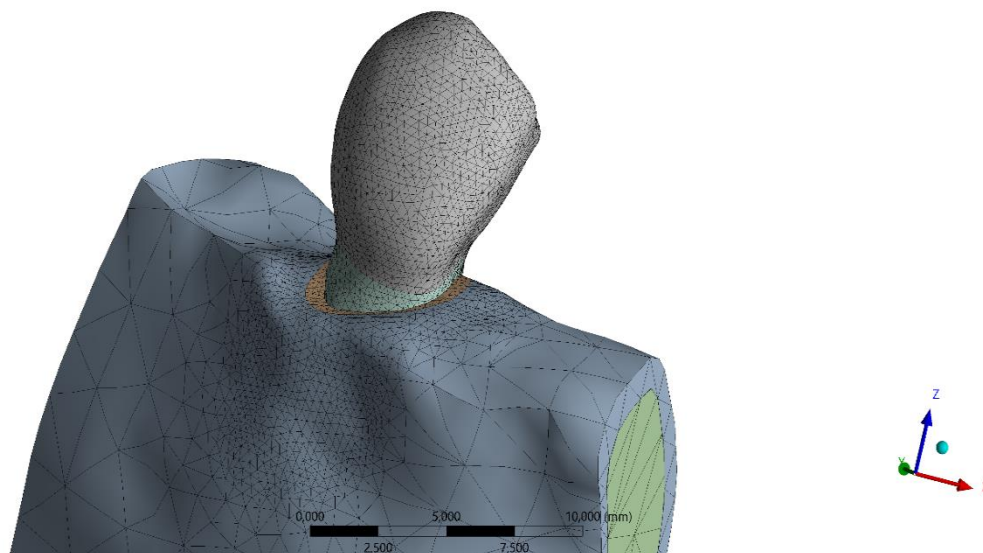
4.1.3 Confeccção da malha

Após a definição e importação da geometria, foi realizada a confeccção das malhas. A densidade da malha foi ajustada de forma a se obter resultados suficientemente precisos até se obter a convergência de 10%.

Foi utilizada uma malha controlada definida por elementos tetraédricos quadráticos caracterizados por uma pirâmide de base triangular, com um nó em cada vértice e outro no centro de cada aresta, totalizando 10 nós por elemento (Chander, Padmanabhan, 2009; Yamamoto, 2011). O número total de entidades do modelo base (controle) foi de 271683 nós e 155429 elementos (Figura 3).

A interface entre as distintas partes do modelo foi representada da forma mais simples, por nós coincidentes, e a relevância de contato entre todas as geometrias foi de 50% (Figura 3).

Figura 3 - Geometria e malha do primeiro pré-molar inferior tridimensional



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4 Condições de contorno e carregamento

Os modelos do incisivo central superior e pré molar inferior obtidos foram fixados tomando como base as estruturas ósseas ao redor do dente. Para o incisivo central superior, foram aplicadas cargas de 200 N em três partes da região palatina: inciso-palatina, terço médio da região palatina e entre a incisal e o terço médio. O carregamento foi direcionado a 45° em relação ao plano oclusal. (Poiate et al., 2011). As cargas aplicadas no terço médio foram posicionadas sobre a estrutura dental. Para o primeiro pré-molar inferior, as cargas foram aplicadas em duas regiões distintas do dente, sendo elas a cúspide vestibular e o sulco distal da face oclusal.

A carga de 200 N foi baseada em estudos anteriores (Bucchi et al., 2019; Dezzen-Gomide et al., 2021) que utilizaram modelos de dentes imaturos. Esta força foi estabelecida uma vez que forças superiores a 200 N já poderiam gerar danos aos tecidos de suporte do dente. (Bucchi et al., 2019; Dezzen-Gomide et al., 2021).

4.1.5 Propriedades dos materiais

Todos os elementos foram considerados isotrópicos, lineares e elásticos. As propriedades elásticas, linear e homogênea dos dentes foram assumidas para o esmalte (Gialain et al., 2016), dentina (Gloria et al., 2018), cimento (Malek et al., 2003), polpa (Lin et al., 2014), osso cortical, osso esponjoso (Weinstein et al., 1980), guta-percha (Ruse, 2008), MTA (Haecker et al., 2005) e resina composta (Sabbagh et al., 2002) (Tabela 1). Um material hiperelástico não linear foi assumido para o ligamento periodontal usando nove parâmetros – Equação constitutiva de Rivlin (1) (Hoss., 2009) (Tabela 2):

$$W = C_{10}(I_3 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_2 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (1)$$

Onde W é a função da energia de terceira ordem de deformação armazenada; I_1 , I_2 e I_3 são as deformações invariáveis e C_{10} , C_{01} , C_{11} , C_{20} e C_{30} são parâmetros materiais descritos na Tabela 2.

Tabela 1- Módulo de Young e coeficiente de Poisson dos tecidos dentais (esmalte, dentina, cimento e polpa), de suporte (osso cortical e esponjoso) e dos materiais utilizados nos tratamentos propostos (guta-percha, MTA e resina composta)

Tecido	Módulo de Young (Mpa)	Coeficiente de Poisson
Esmalte	84 100	0.31
Dentina	18 600	0.31
Cimento	8200	0.3
Osso cortical	13 700	0.31
Osso esponjoso	1370	0.3
Polpa	6.8	0.45
Guta-percha	140	0.45
MTA	11 760	0.314
Resina composta	16 400	0.28

Fonte: Bucchi et al., 2019; Liu et al., 2021.

Tabela 2- Propriedades hiperelásticas do ligamento periodontal determinadas pela equação constitutiva de Mooney-Rivlin com constantes listadas [Mpa]

C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{21}	C_{12}	C_{03}
-0.0048	0.00505	0.008	0.0012	0	0.004	0	0	0

Fonte: Bucchi et al., 2019.

Os modelos completos foram construídos com um adaptador de malha de cerca de 1,8 milhões de elementos hexaédricos. Essas malhas encontram as condições definidas por Bucchi et al. (2019) para criar uma malha quase ideal (QIM), que permite análise estatística dos valores.

4.2 Processamento

Nesta etapa, o software (Ansys 13.0) montou a matriz de rigidez e o vetor de carregamento, a partir das informações obtidas pelo pré-processador. Essa matriz foi então invertida propiciando a obtenção dos deslocamentos de cada ponto nodal. Com base nas leis de formação dos elementos empregados, foram calculadas as deformações sofridas em cada ponto da estrutura (nós) e determinado o seu estado de tensão, que no caso de um modelo tridimensional não simétrico, é necessariamente triaxial.

4.3 Pós-processamento

Na etapa de pós-processamento foi realizada a análise dos resultados anteriormente derivados.

Para comparação dos grupos foi realizada uma análise do tipo estrutural estática, com a finalidade de obter resultados de tensões e deslocamentos das geometrias estudadas. Essas análises e o processamento foram feitos pelo programa de elementos finitos Ansys® através do solver Mechanical APDL onde foram verificadas a distribuição de tensões e a coerência dos resultados. O critério para análise de falha foi o de Tensão Máxima Principal, de forma que os valores positivos correspondem a tensões de tração e os negativos a tensões de compressão. O esmalte e dentina apresentam comportamento frágil, ou seja, iniciam o processo de falha sob tensão de tração, por isso o critério de tensão máxima principal é o mais indicado para avaliar o local mais provável de ocorrer o início da falha. Por fim, foram realizados os cálculos e o processamento dos dados. Os resultados foram apresentados por meio de gráficos de tensão, com a distribuição de tensões e seus respectivos valores numéricos.

Entre as formas mais comuns de pós-processamento se destaca a geração de gráficos de deslocamentos, plots vetoriais e plots de grandezas escalares, tais como deformações, energia de distorção e tensões invariantes (Von Mises, Tensão Máxima e Mínima Principal, Tensão principal de Cisalhamento, Tensão Octaédrica, etc). Essas tensões invariantes são geralmente apresentadas em escalas de cores para melhor entendimento do campo da variável estudada.

4.4 Análise das tensões de von Mises

As distribuições de tensões de von Mises foram avaliadas em todos os grupos. Tais análises foram constituídas da comparação entre os seguintes grupos de estudo:

- a) (I-Controle positivo) e (I-Controle negativo);
- b) (I-Controle positivo) e (I-Procedimento endodôntico regenerativo);
- c) (I-Controle positivo) e (I-Apicificação);
- d) (I-Controle negativo) e (I-Procedimento endodôntico regenerativo);
- e) (I-Controle negativo) e (I-Apicificação);

- f) (I-Procedimento endodôntico regenerativo) e (I-Apicificação)
- g) (P-Controle positivo) e (P-Controle negativo)
- h) (P-Controle positivo) e (P-Procedimento endodôntico regenerativo);
- i) (P-Controle positivo) e (P-Apicificação);
- j) (P-Controle negativo) e (P-Procedimento endodôntico regenerativo);
- k) (P-Controle negativo) e (P-Apicificação);
- l) (P-Apicificação) e (P-Procedimento endodôntico regenerativo).

Medidas quantitativas da resistência relativa foram usadas para resumir a resistência de todo o modelo. As malhas quase ideais recentemente propostas (QIM) e seus valores percentuais foram usados como base para a análise (Bucchi et al., 2019), uma vez que o uso de um QIM facilita a comparação entre os modelos e inclui correções para contabilizar para a não uniformidade da malha.

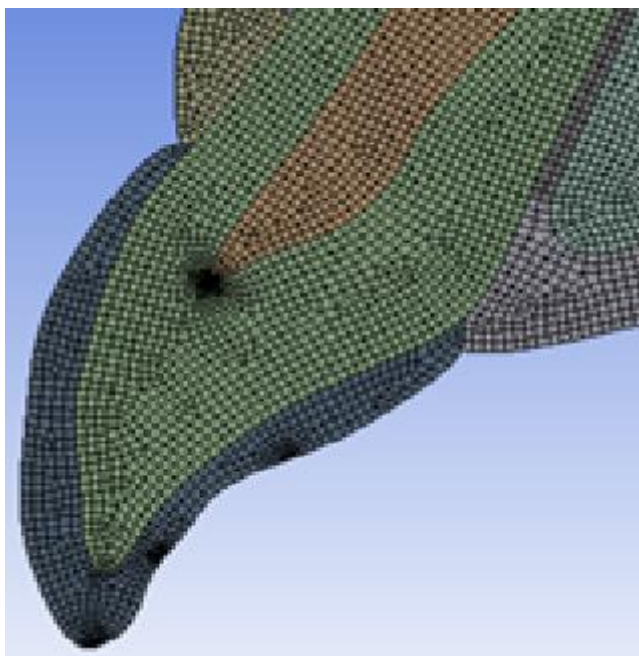
5 RESULTADOS

5.1 Análise de resultados do incisivo central superior

Para a análise do comportamento em FEA do incisivo central superior foram avaliadas as condições do elemento dentário hígido, com rizogênese incompleta sem tratamento, com procedimento endodôntico regenerativo e com apicificação. O incisivo central superior com rizogênese incompleta foi elaborado em software Rhinoceros 7.0.

Após a confecção dos modelos tridimensionais foi verificada a coerência dos dados por meio da análise criteriosa do deslocamento total e pelas tensões de von Mises (Figura 4). Os resultados estão apresentados em gráficos e figuras que representam as tensões máximas principais (Mpa) em cada região a ser estudada.

Figura 4- Modelo bidimensional de corte sagital do incisivo central superior com rizogênese incompleta; confecção da malha



Legenda: A cor azul na imagem representa o esmalte, a cor verde a dentina e a laranja a polpa. Nota-se a presença dos nós que compõem a malha da estrutura geométrica.
Fonte: Elaborado pelo autor.

As tensões principais mínimas e máximas mais elevadas do osso cortical e esponjoso foram calculadas para interpretar os resultados da análise.

As tensões principais e de von Mises foram utilizadas para avaliar a superfície da dentina radicular. O valor mínimo de tensões negativas na superfície palatina e máximo de princípios (tensões de tração) na superfície vestibular foram registrados numericamente.

Nas interpretações, as escalas de cores foram utilizadas para cada tipo de tensão. As cores vermelhas apresentam as maiores áreas de concentração de tensões para tensões máximas principais e von Mises enquanto as cores azuis apresentam os maiores valores para as tensões mínimas. Isto é, os valores negativos de tensões indicam tensões compressivas enquanto os valores positivos representam tensões de tração.

Após o ensaio nos modelos de estudo, foram obtidos os resultados que estão representados nas figuras 5 e 6.

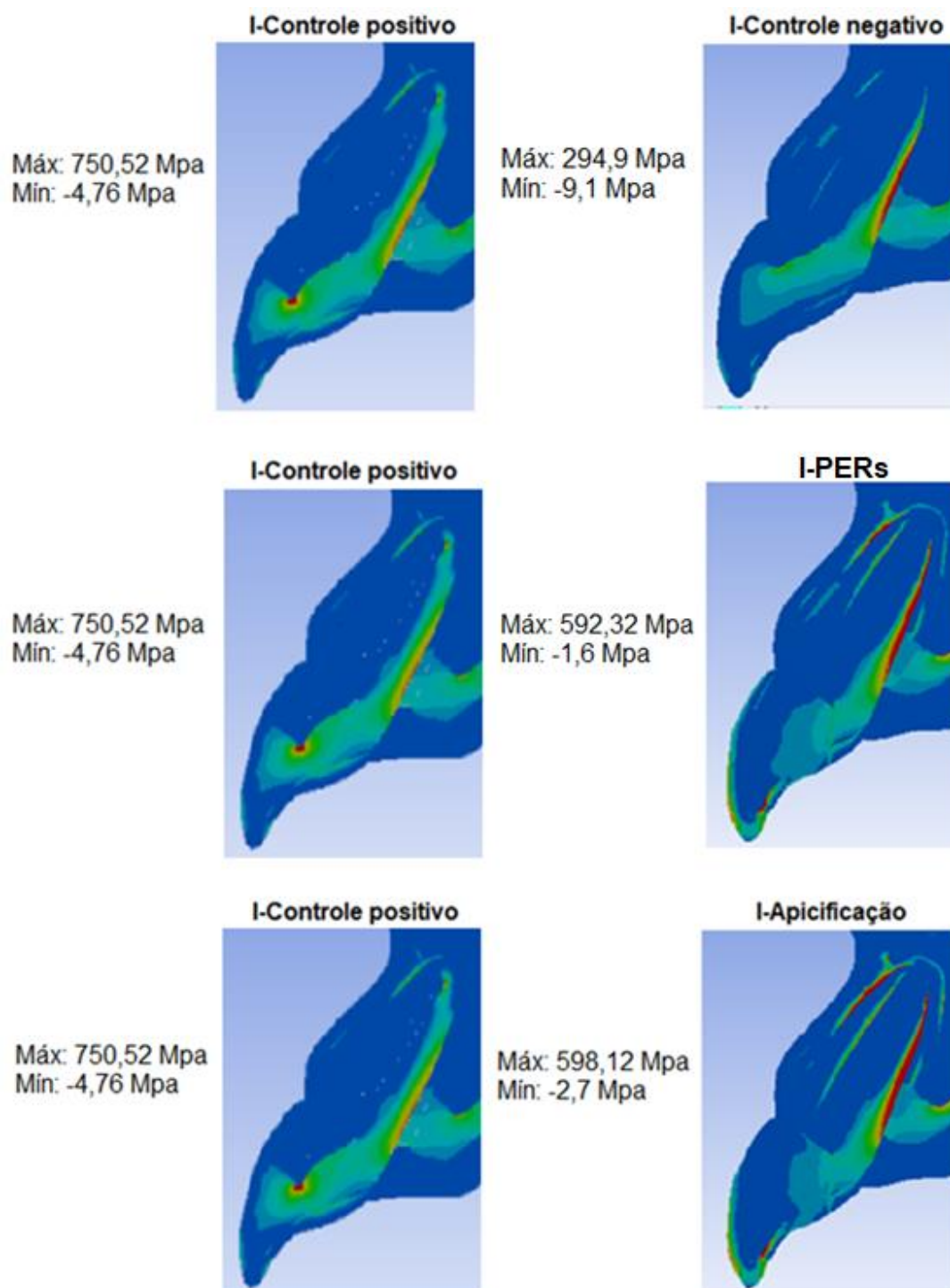
Para avaliar os resultados de tensão (Figuras 5 e 6) as raízes dentárias foram divididas em terços (cervical, médio e apical). No dente com rizogênese incompleta sem tratamento, verificou-se que as distribuições de tensões apresentaram valor máximo nos terços cervical e médio na superfície palatina da raiz.

Os dentes submetidos a tratamento, tanto procedimentos regenerativos quanto de apicificação, verificou-se diminuição na resistência desses dentes uma vez que maiores tensões foram observadas na superfície palatina da raiz desde o terço cervical até o apical e no terço apical da superfície vestibular das raízes. Essa concentração de tensões foi maior no dente que recebeu o procedimento de apicificação.

5.1.1 Análise comparativa entre os incisivos centrais superiores (2D)

As Figuras 5 e 6 apresentam a comparação entre os valores máximos (tração) e mínimos (compressão) (Mpa) das tensões exercidas sobre cada grupo do estudo para o incisivo central superior. Também estão representados os valores de todos os grupos dos incisivos na tabela 2 em Mpa.

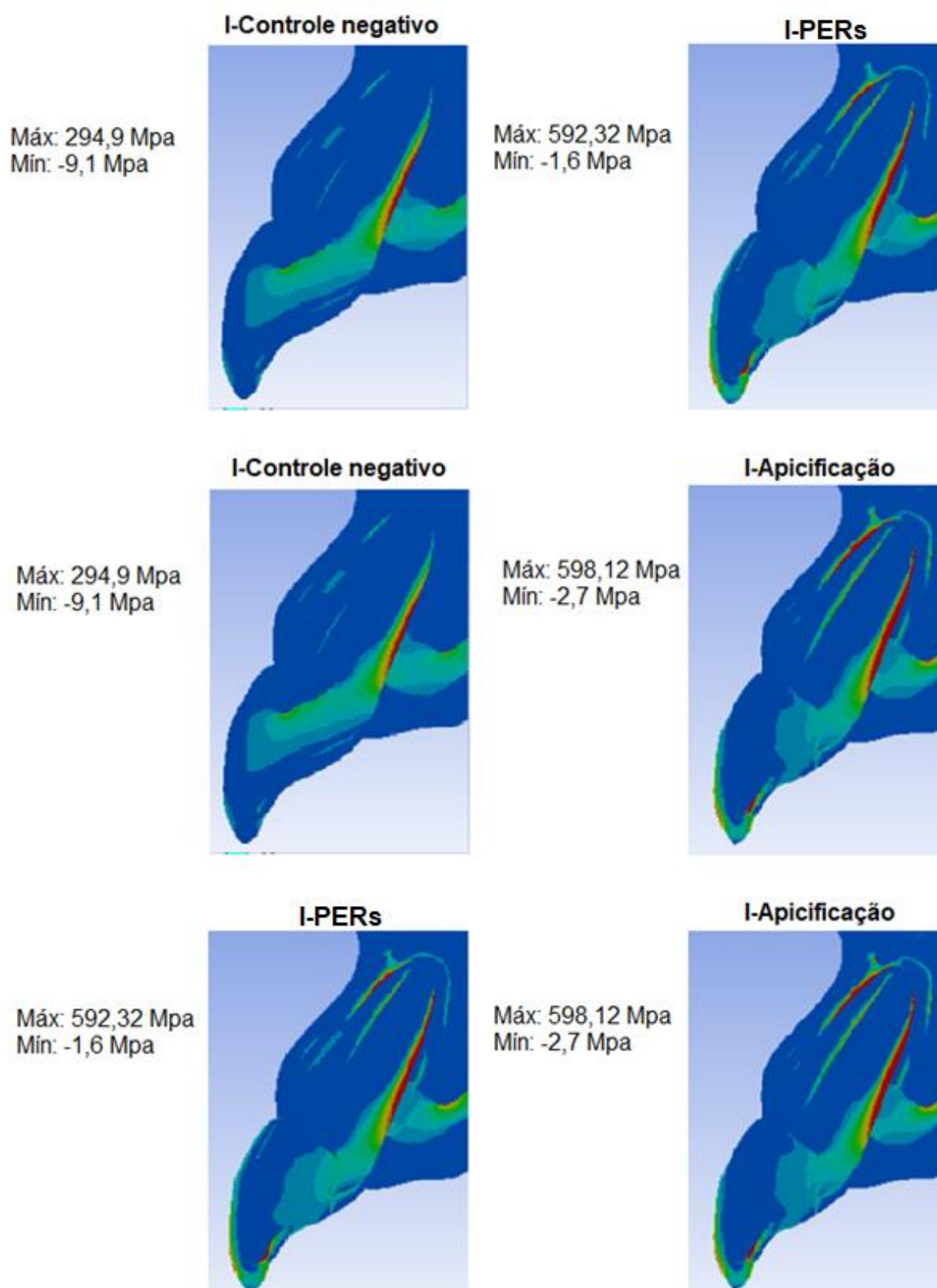
Figura 5- Comparação entre as tensões de tração e compressão entre os grupos (a, b e c) apresentados no tópico 4.4 deste trabalho representadas pelo mapa de cores



Legenda: Tensões máximas de tração são representadas pela cor vermelha (Máx) e tensões mínimas de compressão em cor azul (Mín). Comparação entre os grupos do incisivo central apresentados no tópico 4.4 deste trabalho.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6- Comparação entre as tensões de tração e compressão entre os grupos (d, e e f) apresentados no tópico 4.4 deste trabalho representadas pelo mapa de cores



Legenda: Tensões máximas de tração são representadas pela cor vermelha (Máx) e tensões mínimas de compressão em cor azul (Mín). Comparação entre os grupos do incisivo central apresentados no tópico 4.4 deste trabalho.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 1 mostra os valores de tensão máxima e mínima

Quadro 1- Valores de tensão máximo e mínimo em Mpa para o dente incisivo central

Tensão	Máximo (Mpa)	Mínimo (Mpa)
I-Controle positivo	750,52	-4,76
I-Controle negativo	294,9	-9,1
I-Revascularização	592,32	-1,6
I-Apicificação	598,12	-2,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao realizar a análise qualitativa das figuras e da tabela, observa-se variações no gradiente de tensões, as quais são representadas pelas cores, onde os valores positivos representam tração e os negativos, compressão. As zonas de concentração de tensão foram registradas em Mpa. A análise foi realizada de acordo com o item 4.4 deste trabalho:

Grupo I-Controle positivo: Após a análise das tensões simuladas, foi possível observar que o dente hígido suportou maiores forças de tração se comparado ao grupo I-Controle negativo (hígido com rizogênese incompleta). Em contrapartida, após a análise de forças de compressão, foi observado que o grupo I-Controle negativo (hígido com rizogênese incompleta) suportou maiores forças de compressão em comparação com o I-Controle positivo (hígido com formação radicular completa).

O Grupo I-Controle positivo suportou maiores forças de tração e de compressão em comparação ao grupo I-Procedimento endodôntico regenerativo e do que o grupo I-Apicificação.

Após análise das tensões simuladas, foi possível observar que o grupo I-Procedimento endodôntico regenerativo suportou maiores forças de tração quando comparado ao grupo I-Controle negativo (hígido com rizogênese incompleta), enquanto em tensões mínimas, o grupo I-Controle negativo (hígido com rizogênese incompleta) suportou maiores forças de compressão.

Foi possível ainda observar que o grupo I-Apicificação suportou maiores forças de tração se comparado ao grupo I-Controle negativo (hígido com rizogênese incompleta). Em contrapartida, o grupo I-Controle negativo (hígido com

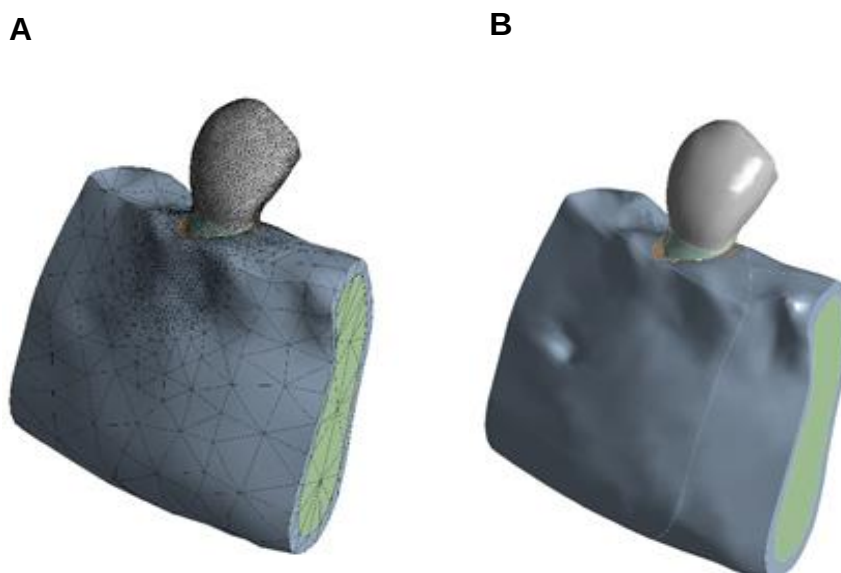
rizogênese incompleta) suportou maiores forças de compressão se comparado ao grupo I-Apicificação.

Os grupos I-Procedimento endodôntico regenerativo e I-Apicificação apresentam elevados números de forças de tração nas regiões palatinas e vestibulares das raízes em comparação aos outros grupos do estudo sendo esse valor ligeiramente menor no grupo procedimento regenerativo.

5.2 Análise de resultados do primeiro pré-molar inferior (3D)

Após a elaboração dos modelos tridimensionais foi verificada a coerência dos dados por meio da análise criteriosa do deslocamento total e pelas tensões de von Mises (Figura 7). Os resultados foram apresentados em gráficos e figuras que representam as tensões máximas principais (Mpa) em cada região a ser estudada.

Figura 7- Modelo tridimensional de corte sagital da mandíbula com primeiro pré-molar inferior



Legenda: A cor azul na imagem representa o osso cortical enquanto a cor verde o osso medular da mandíbula. A) nota-se a presença dos nós que compõem a malha da estrutura geométrica. B) corresponde a estrutura finalizada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

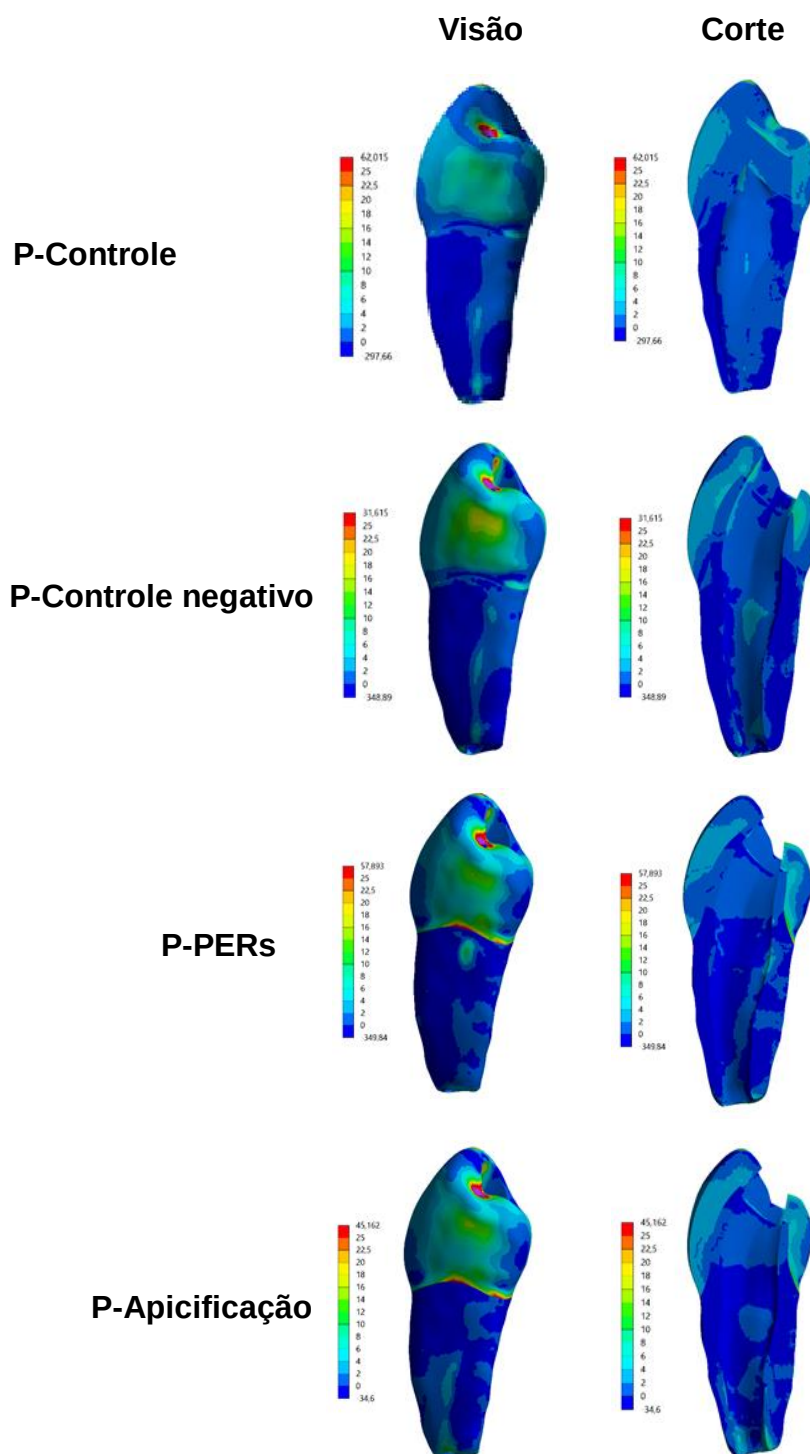
As tensões principais mínimas e máximas mais elevadas do osso cortical e esponjoso foram calculadas para interpretar os resultados da análise.

As tensões principais e de von Mises foram utilizadas para avaliar a superfície da dentina radicular. O valor mínimo de princípios na superfície palatina e máximo de princípios na superfície vestibular foram registrados numericamente.

Nas interpretações, as escalas de cores foram utilizadas para cada tipo de tensão. As cores vermelhas apresentam as maiores áreas de concentração de tensões para tensões máximas principais e von Mises enquanto as cores azuis apresentam os maiores valores para as tensões mínimas. Isto é, os valores negativos de tensões indicam tensões compressivas enquanto os valores positivos representam tensões de tração.

Após o ensaio nos modelos do estudo, foram ocultados os materiais intra-radiculares para melhor visualização da concentração de tensões (Figura 8).

Figura 8- Representação tridimensional do primeiro pré-molar inferior em mapa de cores após aplicação das tensões em seus respectivos grupos de estudo



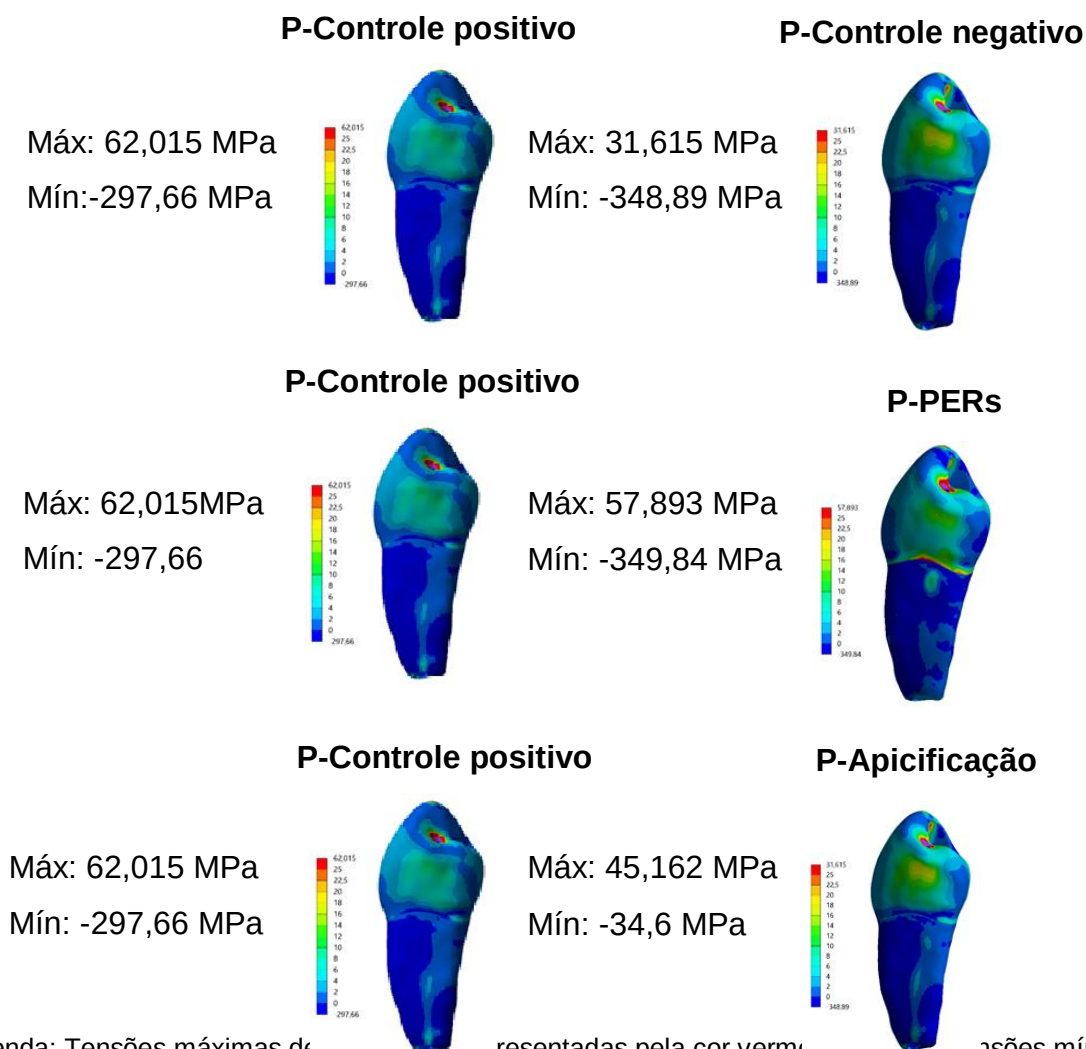
Legenda: P-Controle positivo: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e hígido; P-Controle negativo: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e abertura coronária; P-Procedimento endodôntico regenerativo: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e Procedimento endodôntico regenerativo; P-Apicificação: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e apicificação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Análise comparativa entre os primeiros pré-molares inferiores (3D)

As Figuras 9 e 10 apresentam a comparação entre os valores máximos (tração) e mínimos (compressão) (Mpa) das tensões exercidas sobre cada grupo do estudo, estão também representados os valores de todos os grupos no quadro 1 em Mpa.

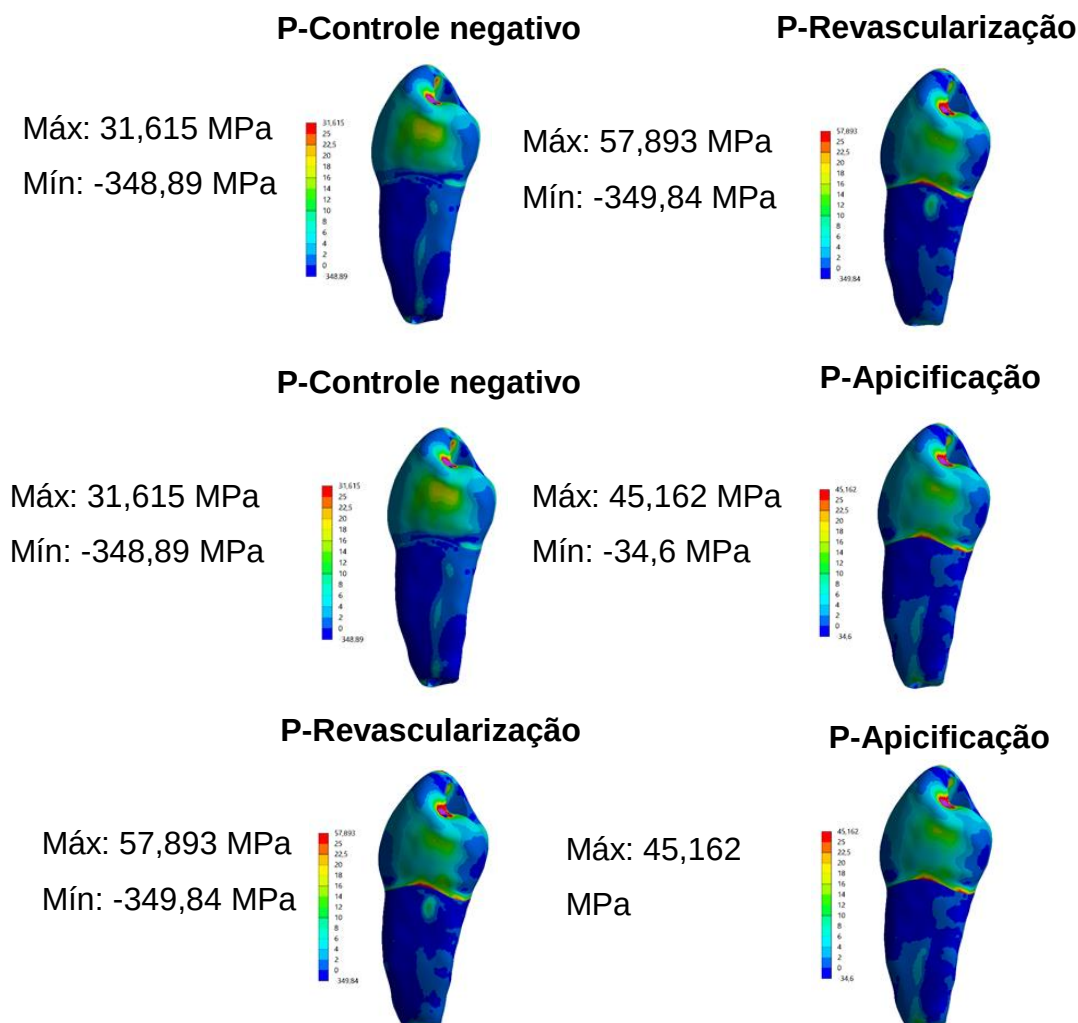
Figura 9- Comparação entre as tensões de tração e compressão representadas pelo mapa de cores comparadas ao controle positivo



Legenda: Tensões máximas de tração representadas pela cor vermelha (Máx) e tensões mínimas de compressão em cor azul (Mín). P-Controle positivo: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e hígido; P-Controle negativo: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e abertura coronária; P-Procedimento endodôntico regenerativo: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e procedimento endodôntico regenerativo; P-Apicificação: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e apicificação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10- Comparação entre as tensões de tração e compressão representadas pelo mapa de cores



Legenda: Tensões máximas de tração são representadas pela cor vermelha (Máx) e tensões mínimas de compressão em cor azul (Mín). P-Controlle negativo: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e abertura coronária; P-Procedimento endodôntico regenerativo: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e procedimento endodôntico regenerativo; P-Apicificação: pré-molar inferior com rizogênese incompleta e apicificação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 2 mostra os valores de tensão máxima e mínima

Quadro 2- Valores de tensão máxima e mínima em Mpa para o dente pré-molar inferior

Tensão	Máximo (Mpa)	Mínimo (Mpa)
P-Controle positivo	62,015	-297,66
P-Controle negativo	31,615	-348,89
P-Revascularização	57,893	-349,84
P-Apicificação	45,162	-34,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao realizar a análise qualitativa dos gráficos de pizza e dos gráficos de calor, observa-se variações no gradiente de tensões, as quais são representadas pelas cores, onde os valores positivos representam tração e os negativos, compressão. As zonas de concentração de tensão foram registradas em Mpa. A análise foi realizada de acordo com o item 4.4 deste trabalho:

Após a análise das tensões de tração simuladas, foi possível observar que o grupo P-Controle positivo (PM com rizogênese incompleta hígido) suportou maiores forças de tração se comparado ao grupo P-Controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária), suportou maiores forças de tração em comparação com o grupos P-Procedimento endodôntico regenerativo e grupo P-Apicificação.

Já referente a força de compressão, o grupo P-Controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária) suportou maiores forças de compressão em comparação com o P-Controle positivo (PM com rizogênese incompleta hígido) e grupo grupo P-Apicificação.

Em contrapartida, o grupo P-Procedimento endodôntico regenerativo suportou maiores forças de compressão em comparação com o grupos P-Controle positivo (PM com rizogênese incompleta hígido), suportou maiores forças de tração quando comparado ao grupo P-Controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária). Ao comparar as tensões mínimas não houve diferença significativa entre os grupos P-procedimentos regenerativos e P- controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária)

Comparando os grupos P-Apicificação e o P-Controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária), P-Apicificação suportou maiores forças de tração e P-Controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária) suportou maiores forças de compressão.

Ao comparar os grupos de tratamento verificou-se que o grupo P-Procedimento endodôntico regenerativo suportou maiores forças de tração e de compressão se comparado ao grupo P-Apicificação.

O grupo P-Controle positivo (PM com rizogênese incompleta hígido) obteve o maior valor geral de tensão equivalente de Von Mises, seguido por P-Procedimento endodôntico regenerativo, P-Apicificação e P-Controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária). Os menores valores de tensão de Von Mises foram de P-Procedimento endodôntico regenerativo, seguido de P-Controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária), P-Controle positivo (PM com rizogênese incompleta hígido) e P-Apicificação.

Os grupos P-Revascularização e P-Apicificação apresentam elevados números de forças de tração na região cervical em comparação aos outros grupos do estudo.

As forças de tração na região coronária dos grupos P-Procedimento endodôntico regenerativo e P-Apicificação possuem similaridade com o grupo P-Controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária), com aumento da tração em comparação com o grupo P-Controle positivo (PM com rizogênese incompleta hígido).

Ao comparar o Incisivo com o Pré-molar, verificou-se que o grupo I-Apicificação suportou maiores forças de tração e de compressão se comparado ao grupo P-Apicificação, porém com pouca diferença entre eles.

O grupo I-Controle positivo (incisivo com formação radicular completa hígido) obteve o maior valor geral de tensão equivalente de Von Mises, seguido por I-Apicificação, I-Procedimento endodôntico regenerativo e P-Controle negativo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária). Os menores valores de tensão de Von Mises foram de I-Controle negativo (incisivo com rizogênese incompleta hígido), I-Controle positivo (incisivo com formação radicular completa hígido), seguido de I-Apicificação, e, I-Procedimento endodôntico regenerativo.

6 DISCUSSÃO

No presente estudo, foi analisado o desempenho de um incisivo central superior direito e de um primeiro pré-molar inferior direito, ambos em diferentes estágios de desenvolvimento, hígidos e com rizogênese incompleta, frente a forças de tração e compressão em diferentes tipos de tratamento, Procedimento endodôntico regenerativo e apicificação.

De acordo com os resultados obtidos, foi observado que os grupos se comportam de diferentes formas em algumas avaliações e semelhante em outras. Sendo assim, foi possível responder a todas as questões do estudo.

A obtenção dos modelos 2D e 3D apresentados neste estudo foi baseada em TCFC, ambos com rizogênese incompleta. As medidas e proporções das geometrias dos dentes foram feitas utilizando técnicas de engenharia reversa.

Os modelos de experimento neste estudo ressaltam o efeito imediato dos tratamentos de procedimento endodôntico regenerativo e apicificação em dentes imaturos tratados com o material obturador MTA. Com isso, implementamos um modelo de carga de força contínua e crescente para medir a resistência à fratura por tração e compressão após os processos de tratamento dos dentes.

Os dentes anteriores são os principais envolvidos em lesões traumáticas (Glendor, 2008), e com isso, podemos observar nos resultados apresentados nas figuras 6 e 7 e nos gráficos 1 e 2 dos incisivos que, após os tratamentos, houve uma perda de resistência a tração dos grupos I-Procedimento endodôntico regenerativo e I-Apicificação em comparação ao grupo I-Controle positivo, com o grupo I-Controle negativo com a menor resistência a tração entre todos os grupos; entretanto, os resultados do pré-molar há uma perda de resistência a tração dos grupos P-Procedimento endodôntico regenerativo e P-Apicificação em comparação ao grupo P-Controle positivo, porém com ganho de resistência em comparação ao grupo P-Controle negativo, dados apresentados nas figuras 10 e 11 e nos gráficos 3 e 4.

Os dentes com formação radicular completa possuem parede de dentina suficiente que proporciona a resistência adequada para esses elementos. No entanto, os dentes imaturos (com rizogênese incompleta) por não possuírem polpa dentária, mantêm as paredes radiculares finas devido a não deposição de dentina

secundária. Dessa forma, tornam-se mais propensos a fraturas (Valera et al., 2004), sendo assim, preconizamos os tratamentos com procedimento endodôntico regenerativo e apicificação para testar suas resistências. Verificou-se que para o incisivo central e o pré-molar, os tratamentos de apicificação e o procedimento endodôntico regenerativo obtiveram uma perda de resistência quando comparado ao grupo controle positivo, porém com resistência maior quando comparado ao grupo controle negativo.

De acordo com o estudo de Bidar et al. (2010), quando o MTA é utilizado na apicificação com a finalidade de induzir a formação de um tampão apical, esse material não reduz a resistência à fratura de dentes imaturos, porém, como foi demonstrado neste estudo para o incisivo central (Figuras 6 e 7; gráficos 1 e 2), o grupo I-Apicificação obteve a maior resistência a tração quando comparado aos outros grupos, observando inferioridade de forças de tração somente ao grupo I-Controle positivo, que é um dente maduro (com formação radicular completa).

Já para o pré-molar, os resultados mostram que o grupo P-Apicificação só possui maiores forças de tração quando comparado ao grupo P-Controle negativo.

No entanto, os autores Ali et al. (2019) e de Castro et al. (2011), quando avaliaram a resistência da estrutura dental em diferentes tipos de tratamento, observaram que há um aumento da resistência de raízes imaturas pelo método de apicificação com MTA e queda nessa resistência quando se utiliza técnica de Procedimento endodôntico regenerativo. Se compararmos os resultados encontrados no presente estudo, observa-se que para os grupos dos incisivos, houve uma diminuição de resistência dos grupos de apicificação e Procedimento endodôntico regenerativo, quando comparados ao grupo I-Controle positivo, porém com expressivo aumento de resistência quando comparado ao grupo I-Controle negativo (dente com rizogênese incompleta sem tratamento). No grupo dos pré-molares encontramos resultados semelhantes, onde os grupos P-Procedimento endodôntico regenerativo e P-Apicificação obtiveram resistência a tração menores que o grupo P-Controle positivo (PM com rizogênese incompleta e abertura coronária), porém maiores quando comparados ao grupo P-Controle negativo (PM hígido com rizogênese incompleta). Ao comparar os grupos de apicificação com os grupos de procedimento endodôntico regenerativo, no incisivo o I-Apicificação obteve resultados minimamente melhores, enquanto no grupo do pré-molar, P-

Procedimento endodôntico regenerativo obteve resultados melhores quando comparado ao P-Apicificação.

Mello et al. (2020) avaliaram a resistência a fratura de dentes submetidos a apicificação ou procedimento endodôntico regenerativo seguidos de diferentes técnicas de restauração, verificando haver diferenças na resistência à fratura entre os diferentes procedimentos e técnicas. Assim, os estudos publicados não mostram um consenso sobre a questão (Andreasen et al., 2002; Kusgoz et al., 2009; Lawley et al., 2004; Mello et al., 2020). Entretanto, ao observar os grupos desse estudo que possuem tratamentos e estão restaurados (I-Apicificação, I-Procedimento endodôntico regenerativo, P-Apicificação e P-Procedimento endodôntico regenerativo) em comparação ao dente que não possui nenhum tipo de tratamento e estão com rizogênese incompleta (I-Controle negativo e P-Controle negativo), podemos observar que há maior resistências tanto para os incisivos quanto para os pré-molares, enquanto nas forças de compressão, os incisivos possuem menores forças de compressão e nos pré-molares o grupo P-Controle negativo obteve resultado igual ao P-Procedimento endodôntico regenerativo e resultado melhor quando comparado ao grupo P-Apicificação.

Ao observar os resultados apresentados neste estudo, verificou-se que o procedimento endodôntico regenerativo apresentou melhores comportamentos mecânicos de tração e compressão quando comparada a técnica de apicificação no grupo dos pré-molares, enquanto no grupo dos incisivos, podemos concluir que a técnica de apicificação apresentou melhores comportamentos mecânicos de tração e compressão quando comparada ao procedimento endodôntico regenerativo.

Diante dos resultados obtidos, nota-se que houve diferença no comportamento mecânico entre ambas as técnicas de apicificação e procedimento endodôntico regenerativo do incisivo central superior direito e do primeiro pré-molar inferior direito com rizogênese incompleta tanto nas forças de tração quanto de compressão. Além disso, o procedimento endodôntico regenerativo no pré-molar apresentou melhor comportamento mecânico quando comparada a técnica de apicificação, observado o oposto quando falamos do incisivo central, porém com diferença mínima.

7 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que:

Houve diferença no comportamento mecânico entre as técnicas de apicificação e procedimento endodôntico regenerativo do incisivo central superior direito e do primeiro pré-molar inferior direito com rizogênese incompleta.

O procedimento endodôntico regenerativo melhorou o comportamento mecânico no pré-molar quando comparada a técnica de apicificação.

O procedimento endodôntico regenerativo foi ligeiramente inferior quando comparado à apicificação no dente incisivo.

REFERÊNCIAS

Al-Kahtani A, Shostad S, Schifferle R, Bhambhani S. In-vitro evaluation of microleakage of an orthograde apical plug of mineral trioxide aggregate in permanent teeth with simulated immature apices. *J Endod*. 2005 Feb;31(2):117-9. doi: 10.1097/01.don.0000136204.14140.81.

Ali MRW, Mustafa M, Bårdsen A, Blets A. Fracture resistance of simulated immature teeth treated with a regenerative endodontic protocol. *Acta biomater*. 2019 Jan;5(1):30-7. doi: 10.1080/23337931.2019.1570822.

Alobaid A, Cortes L, Lo J, Nguyen T, Albert J, Abu-Melha A, et al. Radiographic and clinical outcomes of the treatment of immature permanent teeth by revascularization or apexification: a pilot retrospective cohort study. *J Endod*. 2014 Aug;40(8):1063-70. doi: 10.1016/j.joen.2014.02.016. Epub 2014 Jun 13. PMID: 25069909; PMCID: PMC4159254.

Andreasen JO, Farik B, Munksgaard EC. Long-term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of root fracture. *Dent Traumatol*. 2002 May;18(3):134–7. doi: 10.1034/j.1600-9657.2002.00097.x.

Annamalai S, Mungara J. Efficacy of mineral trioxide aggregate as na apical plug in non-vital young permanent teeth: preliminary results. *J Clin Pediatr Dent*. 2010 Mar;35(2):149-55. doi: 10.17796/jcpd.35.2.9061h7g718834017.

Bastone EB, Freer TJ, McNamara JR. Epidemiology of dental trauma: a review of the literature. *Aust Dent J*. 2000 Mar;45(1):2–9. doi: 10.1111/j.1834-7819.2000.tb00234.x.

Bidar M, Disfani R, Gharagozloo S, Khoyneshad S, Rouhani A. Medication with calcium hydroxide improved marginal adaptation of mineral trioxide aggregate apical barrier. *J Endod*. 2010 Oct;36(10):1679-82. doi: 10.1016/j.joen.2010.06.010. PMID: 20850677 .

Bose R, Nummikoski P, Hargreaves K. A retrospective evaluation of radiographic outcomes in immature teeth with necrotic root canal systems treated with regenerative endodontic procedures. *J Endod*. 2009 Oct;35(10):1343-9. doi: 10.1016/j.joen.2009.06.021. Epub 2009 Aug 15. PMID: 19801227.

Bucchi C, Marcé-Nogué J, Galler KM, Widbiller M. Biomechanical performance of an immature maxillary central incisor after revitalization: a finite element analysis. *Int Endod J*. 2019 May;52(10):1508–18. doi: 10.1111/iej.13159.

Casey SM, Fox D, Duong W, Bui N, Latifi N, Ramesh V, et al. Patient centered outcomes among a cohort receiving regenerative endodontic procedures or apexification treatments. *J Endod*. 2022 Mar;48(3):345-54. doi: 10.1016/j.joen.2021.11.013. Epub 2021 Dec 3. PMID: 34871631.

Chander NG, Padmanabhan TV. Finite element stress analysis of diastema closure with ceramic laminate veneers. *J Prosthodont*. 2009 Sep;18(7):577-81. doi: 10.1111/j.1532-849X.2009.00490.x.

Cvek M, Cleaton-Jones P, Austin J, Lownie J, Kling M, Fatti P. Effect of topical application of doxycycline on pulp revascularization and periodontal healing in reimplanted monkey incisors. *Endod Dent Traumatol* 1990 Aug;6(4):170–6. doi: 10.1111/j.1600-9657.1990.tb00413.x.

Cvek M. Prognosis of luxated non-vital maxillary incisors treated with calcium hydroxide and filled with gutta-percha. A retrospective clinical study. *Dent Traumatol*. 1992 Apr;8(2):45–55. doi: 10.1111/j.1600-9657.1992.tb00228.x.

Castro AN, Oliveira DCRS, Diniz LN, Eulalia AS, Paulillo LAMS, Silveira GDP. Avaliação da utilização de MTA como plug apical em dentes com ápices abertos. *Rev Bras Odontol*. 2011 Jun;68(1):59-63. doi: 10.18363/rbo.v68n1.p.59.

Dezzen-Gomide AC, de Carvalho MA, Lazari-Carvalho PC, de Oliveira HF, Cury AADB, Yamamoto-Silva FP, et al. A three-dimensional finite element analysis of permanent maxillary central incisors in different stages of root development and trauma settings. *Comput Methods Programs Biomed*. 2021 Aug;106195. doi:10.1016/j.cmpb.2021.106195.

Ding RY, Cheung GS, Chen J, Yin XZ, Wang QQ, Zhang CF. Pulp revascularization of immature teeth with apical periodontitis: A clinical study. *J Endod*. 2009 May;35(5):745-9. doi: 10.1016/j.joen.2009.02.009.

Diogenes A, Henry MA, Teixeira FB, Hargreaves KM. An update on clinical regenerative endodontics. *Endod Topics*. 2013 Jun;28(1):2–23. doi: 10.1111/etp.12040.

Diogenes A, Hargreaves. Microbial modulation of stem cells and future directions in regenerative endodontics. *J Endod*. 2017 Sep;43(9):S95–S101. doi: 10.1016/j.joen.2017.07.012.

Economides N, Pantelidou O, Kokkas A, Tziafas D. Short-term periradicular tissue response to mineral trioxide aggregate (MTA) as root-end filling material. *Int Endod J*. 2003 Jan;36(1):44-8. doi: 10.1046/j.0143-2885.2003.00611.x.

Eram A, Zuber M, Keni LG, Kalburgi S, Naik R, Bhandary S, et al. Finite element analysis of immature teeth filled with MTA, Biodentine and Bioaggregate. *Comput Methods Programs Biomed*. 2020 Jul;190:105356. doi: 10.1016/j.cmpb.2020.105356.

Franklin RT, Pashley DH. Monoblocks in root canals: a hypothetical or a tangible goal. *J Endod*. 2007 Apr;33(4):391-8. doi: 10.1016/j.joen.2006.10.009.

Gialain IO, Coto NP, Driemeier L, Noritomi PY, Dias RB. A three-dimensional finite element analysis of the sports mouthguard. *Dent Traumatol*. 2016 Mar;32(5):409–15. doi: 10.1111/edt.12265.

Gloria A, Maietta S, Martorelli M, Lanzotti A, Watts DC, Ausiello P. FE analysis of conceptual hybrid composite endodontic post designs in anterior teeth. *Dent Mater*. 2018 Jul;34(7):1063–71. doi: 10.1016/j.dental.2018.04.004.

Glendor U. Epidemiology of traumatic dental injuries - a 12 years review of the literature. *Dent Traumatol*. 2008 Nov;24(6):603–11. doi: 10.1111/j.1600-9657.2008.00696.x.

Haecker CJ, Garboczi EJ, Bullard JW, Bohn RB, Sun Z, Shah SP, et al. Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste. *Cem Conc Res*. 2005 Oct;35(10):1948–60. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.05.00.1.

Hegde RJ, Sood PB. Dental maturity as an indicator of chronological age: radiographic evaluation of dental age in 6 to 13 years children of Belgaum using Demirjian methods. *J Indian Soc Pedod Prev Dent*. 2002 Dec;20(4):132–8. PubMed PMID: 12587748.

Hoss L. Modelos constitutivos hiperelásticos para elastômeros incompressíveis: ajuste, comparação de desempenho e proposta de um novo modelo [dissertação]. Porto Alegre (RS): Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); 2009.

Iwaya S, Ikawa M, Kubota M. Revascularization of an immature permanent tooth with apical periodontitis and sinus tract. *Dent Traumatol*. 2001 Dec;17(4):185–7. doi: 10.1034/j.1600-9657.2001.017004185.x.

Jeeruphan T, Jantararat J, Yanpiset K, Suwannapan L, Khewsawai P, Hargreaves KM. Mahidol study 1: comparison of radiographic and survival outcomes of immature teeth treated with either regenerative endodontic or apexification methods: a retrospective study. *J Endod* 2012 Oct;38:1330-1336. doi: 10.1016/j.joen.2012.06.028.

Jonker CH, Van der Vyver PJ. Apexification of immature teeth using an apical matrix and MTA barrier material: Report of two cases. *S Afr dent J*. 2017 Oct;72(9):414-9. doi: 10.17159/2519-0105/2017/v72no9a3.

Kaiser JH. Management of wide-open canals with calcium hydroxide. Paper presented at the meeting of the American Association of Endodontics, Washington, DC. 1964 Apr 17. Citado por: Steiner JC, Dow PR, Cathey GM. Inducing root end closure of non vital permanent teeth. *J Dent Child* 1968;35:47.

Kim DS, Park HJ, Yeom JH, Seo JS, Ryu GJ, Park KH, et al. Long-term follow-ups of revascularized immature necrotic teeth: three case reports. *Int J Oral Sci*. 2012 May;4(2):109-13. doi: 10.1038/ijos.2012.23.

Kusgoz A, Yildirim T, Tanriver M, Yesilyurt C. Treatment of horizontal root fractures using MTA as apical plug: report of 3 cases. *Oral Radiol Endod*. 2009 May;107(5):e68-72. doi: 10.1016/j.tripleo.2009.01.031.

Lawley GR, Shindler WG, Walker WA, Kolodrubetz D. Evaluation of ultrasound placed MTA and fracture resistance with intracanal composite in a model of apexification. *J Endod*. 2004 Mar;30(3):167-72. doi: 10.1097/00004770-200403000-00010.

Lee DSDJ, Bogen G. Multifaceted use of ProRoot™ MTA root canal repair material. *Pediatric Dent*. 2001 Aug;23(4):326-30. PubMed PMID: 11572491.

Lin J, Zeng Q, Wei X, Zhao W, Cui M, Gu J, et al. Regenerative endodontics versus apexification in immature permanent teeth with apical periodontitis: a prospective randomized controlled study. *J Endod* 2017 Nov;43(11):1821–7. doi: 10.1016/j.joen.2017.06.023.

Lin SL, Lee SY, Lin YC, Huang YH, Yang JC, Huang HM. Evaluation of mechanical and histological properties of cryopreserved human premolars under short-term preservation: a preliminary study. *J Dent Sci*. 2014 Sep;9:244–8. doi: 10.1016/j.jds.2013.04.010.

Littuma GJS, Lopez CAV, Engler MLPD, de Souza RM, Meurer E. Análise tridimensional de elementos finitos da distribuição de tensões em implantes inclinados: uma revisão de literatura. *Rev odontol Univ Cid Sao Paulo*. 2017 Jan;29(1):48-56. doi: 10.26843/ro_unid.v29i1.196.

Liu Y, Liu H, Fan B. Influence of cavity designs on fracture behavior of a mandibular first premolar with a severely curved h-shaped canal. *J Endod*. 2021 Jun;47(6):1000-6. doi: 10.1016/j.joen.2021.03.012.

Magne P, Douglas WH. Design optimization and evolution of bonded ceramics for the anterior dentition: a finite-element analysis. *Quintessence Int*. 1999 Oct;30(10):661-72. PubMed PMID: 10765850.

Malek S, Darendeliler MA, Rex T, Kharbanda OP, Srivicharnkul P, Swain MV, et al. Physical properties of root cementum: part 2. Effect of different storage methods. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2003 Nov;124(5):561–70. doi: 10.1016/S0889-5406(03)00398-6.

Martin RL, Monticelli F, Brackett WW, Loushine RJ, Rockman RA, Ferrari M, et al. Propriedades de vedação de tampões apicais ortogrados agregados de trióxido mineral e obturações radiculares em um modelo de apexificação in vitro. *J Endod*. 2007 Oct;33(3):272-5. doi: 10.1016/j.joen.2006.11.002.

Mello I, Michaud PL, Butt Z. Fracture resistance of immature teeth submitted to different endodontic procedures and restorative protocols. *J Endod*. 2020 Oct;46(10):1465-9. doi: 10.1016/j.joen.2020.06.015.

Miltiadous MEA, Floratos SG. Regenerative endodontic treatment as a retreatment option for a tooth with open apex-a case report. *Braz Dent J*. 2015 Oct;26(5):552-6. doi: 10.1590/0103-644020130218.

Murray PE, Garcia-Godoy F, Hargreaves KM. Regenerative endodontics: a review of current status and a call for action. *J Endod*. 2007 Apr;33(4):377–90. doi: 10.1016/j.joen.2006.09.013.

Namour M, Theys S. Pulp revascularization of immature permanent teeth : a review of the literature and a proposal of a new clinical protocol. *Sci World J*. 2014 Oct;2014. doi: 10.1155/2014/737503.

Noritomi PY, Xavier TA, Silva JVL. A comparison between BioCAD and some know methods for finite element model generation. In: da PJ Silva da Bártolo (ed) *Innovative developments and physical prototyping*. Londres: Taylor and Francis Group. 2012. p.685-90.

Oskui IZ, Hashemi A, Jafarzadeh H, Kato A. Finite element investigation of human maxillary incisor under traumatic loading: Static vs dynamic analysis. *Comput Methods Programs Biomed*. 2018 Mar;155:121–5. doi: 10.1016/j.cmpb.2017.12.007.

Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review—Part I: chemical, physical, and antibacterial properties. *J Endod*. 2010 Jan;36(1):16-27. doi: 10.1016/j.joen.2009.09.006.

Pereira AC, Morante DRH, Cerqueira ACCL, Nagata JY, Lima TFR, Soares JA. Alternativas clínicas para el tratamiento de dientes traumatizados con rizogénesis incompleta: una visión actualizada. *Rev Est Hered*. 2016;26(4):271-80.

Pimentel L, Barros K, Pachêco A. Revascularização Pulpar. *RevACBO*. 2017 Dec;26(2):83-91.

Poiate IA, Vasconcellos AB, Mori M, Poiate E Jr. 2D and 3D finite element analysis of central incisor generated by computerized tomography. *Comput Methods Programs Biomed*. 2011 Nov;104(2):292-9. doi: 10.1016/j.cmpb.2011.03.017.

Poiate IAVP, Vasconcellos AB, Santana RB, Poiate Jr E. Three-dimensional stress distribution in the human periodontal ligament in masticatory, parafunctional, and trauma loads: finite element analysis. *J Periodont*. 2009;80(11):1859-67. doi: 10.1902/jop.2009.090220.

Rocha MC. Análise das tensões biomecânicas no tecido ósseo periodontal pelo método de elementos finitos [dissertação]. Lagarto (Sergipe): Universidade Federal de Sergipe (UFS); 2016.

Rocha MJ, Cardoso M. Traumatized permanent teeth in Brazilian children assisted at the Federal University of Santa Catarina, Brazil. *Dent Traumatol*. 2001 Dec;17(6):245–9. doi: 10.1034/j.1600-9657.2001.170601.x.

Romeed SA, Fok SL, Wilson NHF. Finite element analysis of fixed partial denture replacement. *J Oral Rehabil*. 2004 Dec;31(12): 1208-17. doi: 10.1111/j.1365-2842.2004.01354.x

Ruse ND. Propagation of erroneous data for the modulus of elasticity of periodontal ligament and gutta-percha in FEM/FEA papers: a story of broken links. *Dent Mater.* 2008 Dec;24(12):1717–9. doi: 10.1016/j.dental.2008.04.006.

Sabbagh J, Vreven J, Leloup G. Dynamic and static moduli of elasticity of resin-based materials. *Dent Mater.* 2002 Jan;18(1):64–71. doi: 10.1016/S0109-5641(01)00021-5.

Schumacher JW, Rutledge RE. An alternative to apexification. *J Endod.* 1993 Oct;19(10):529-31. doi: 10.1016/s0099-2399(06)81497-4.

Selden HS. Apexification: an interesting case. *J Endod.* 2002 Jan;28(1):44-5. doi: 10.1097/00004770-200201000-00011.

Shabahang S, Torabinejad M, Boyne PP, Abedi H, Mc Millan P. Apexification of immature dog teeth using osteogenic protein-calcium hydroxide, and mineral trioxide aggregate in dogs. *J Endod.* 1997 Oct;23(4):265. doi: 10.1155/2014/673127.

Shah N, Logani A, Bhaskar U, Aggarwal V. Efficacy of revascularization to induce apexification/apexogenesis in infected, nonvital, immature teeth: a pilot clinical study. *J Endod.* 2008 Aug;34(8):919-25. doi: 10.1016/j.joen.2008.05.001.

Sharif MO, Tejani-Sharif A, Kenny K, Day PF. A systematic review of outcome measures used in clinical trials of treatment interventions following traumatic dental injuries. *Dent Traumatol.* 2015 Dec;31(6):422–8. doi: 10.1111/edt.12227.

Sheehy EC, Roberts GJ. Use of calcium hydroxide for apical barrier formation and healing in non-vital immature permanent teeth: a review. *Br Dent J.* 1997 Oct;183(7):241–6. doi: 10.1038/sj.bdj.4809477.

Silujjai J, Linsuwanont P. Treatment outcomes of apexification or revascularization in nonvital immature permanent teeth: a retrospective study. *J Endod.* 2017 Feb;43(2):238–45. doi: 10.1016/j.joen.2016.10.030.

Silva JP, Barcelos CA, Wagner MH, Reis MS. Revascularização pulpar: uma realidade promissora. In: VIII Salão de Ensino e Extensão, Inovação na Aprendizagem [Internet]; 2017, 93; Santa Cruz do Sul, RS: Universidade de Santa Cruz do Sul; 2017. Disponível em: https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/salao_ensino_extensao/article/view/17048.

Soares CJ, Verluis A, Valdivia ADCM, Bicalho AA, Veríssimo C, Barreto BCF, et al. Finite element analysis in dentistry: improving the quality of oral health care. *InTech.* 2012 Mar;2012. doi:10.5772/37353.

Soares JC, Santana FR, Castro CG, Santos-Filho PCF, Soares V, Qianb F et al. Finite elemento analysis and bond strenght of a glass port to intraradicular dentin: comparison between microtensile and push-out tests. *Dent Mater.* 2008 Oct;24(10):1405-11. doi: 10.1016/j.dental.2008.03.004.

Sonmez IS, Akbay AB, Almaz ME. Revascularization/Regeneration Performed in Immature Molars: Case Reports. *J Clin Pediatr Dent*. 2013 Jul;37(3):231-48. doi: 10.17796/jcpd.37.3.j6007761g8811453.

Sridharan S, Neelakantan P. Revascularization in endodontics. *Int J Clin Dent*. 2014;7(2):139–45.

Tawfik H, Abu-Seida AM, Hashem AA, Nagy MM. Regenerative potential following revascularization of immature permanent teeth with necrotic pulps. *Int Endod J*. 2013 Feb;46(10):910–22. doi: 10.1111/iej.12079.

Thomson A, Kahler B. Regenerative endodontics – Biologically-based treatment for immature permanent teeth: A case report and review of the literature. *Aust Dent J*. 2010 Dec;55(4):446–52. doi: 10.1111/j.1834-7819.2010.01268.x.

Torabinejad M, Chivian N. Clinical applications of mineral trioxide aggregate. *J Endod*. 1999 Mar;25(3):197-205. doi: 10.1016/S0099-2399(99)80142-3.

Torabinejad M, Nosrat A, Verma P, Udochukwu O. Regenerative endodontic treatment or mineral trioxide aggregate apical plug in teeth with necrotic pulps and open apices: a systematic review and meta-analysis. *J Endod* 2017;43(11):1806–20.

Valera MC, Albuquerque MTP, Yamasaki MC, Vassallo FNS, da Silva DAESA, Nagata JY. Fracture resistance of weakened bovine teeth after long-term use of calcium hydroxide. *Dent Traumatol*. 2015 Jun;31(5):385-9. doi: 10.1111/edt.12185.

Valera MC, Oliveira LDD, Carvalho CAT, Camargo CHR. Avaliação da ocorrência de fraturas em dentes submetidos ao tratamento de apicificação. *Rev odontol Univ Cid Sao Paulo*. 2004 Jun;16(3):229-34.

Walton RE, Torabinejad M. Management of incompletely formed roots. In: Walton RE, Torabinejad M. *Principles and practice of endodontics*. 3rd ed. Philadelphia, PA: WB Saunders. 2002. p. 388-404.

Weinstein AM, Klawitter JJ, Cook SD. Implant-bone interface characteristic of bioglass dental implants. *J Biomed Mater Res*. 1980 Jan;14(1):23–9. doi: 10.1002/jbm.820140104.

Yamamoto ETC. Estudo de preparos e da forma da infra-estrutura na distribuição de tensões em prótese parcial fixa [tese]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho (UNESP); 2011.

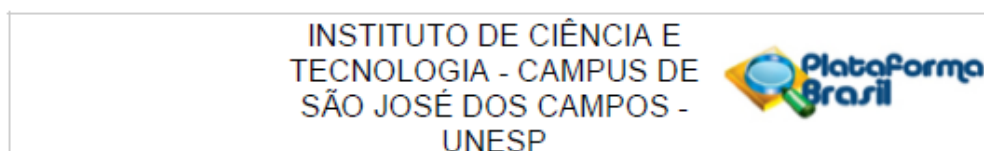
Yoshida T, Itoh T, Saitoh T, Sekine I. Histopathological study of the use of freeze-dried allogenic dentin powder and True Bone Ceramic as apical barrier materials. *J Endod*. 1998 Sep;24(9):581-6. doi: 10.1016/S0099-2399(98)80114-3.

Zaror C, Martínez-Zapata MJ, Abarca J, Díaz J, Pardo Y, Pont À, et al. Impact of traumatic dental injuries on quality of life in preschoolers and schoolchildren: A

systematic review and meta-analysis. *Community Dent Oral Epidemiol.* 2018 Sep;46(1):88–101. doi: 10.1111/cdoe.12333.

Zerman N, Cavalleri G. Traumatic injuries to permanent incisors. *Endod Dent Traumatol.* 1993 Apr;9(2):61–4. doi: 10.1111/j.1600-9657.1993.tb00661.x.

Zhang Y, Zhu Y, Su W, Zhou Z, Jin Y, Wang X. A retrospective study of pediatric traumatic dental injuries in Xi'an, China. *Dent Traumatol.* 2014 Jun;30(3):211–5. doi: 10.1111/edt.12075.

ANEXO A – Parecer Consubstanciado do CEP (Certificado de Comitê de Ética)**PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP****DADOS DO PROJETO DE PESQUISA**

Título da Pesquisa: ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS FINITOS DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE INCISIVOS CENTRAIS SUPERIORES COM RIZOGÊNESE INCOMPLETA APÓS APICIFICAÇÃO E REVASCULARIZAÇÃO

Pesquisador: Marcia Carneiro Valera

Área Temática:

Versão: 3

CAAE: 52309021.9.0000.0077

Instituição Proponente: Instituto de Ciência e Tecnologia de São José dos Campos - UNESP

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 5.533.737

Apresentação do Projeto:

O tratamento endodôntico de dentes com rizogênese incompleta é considerado de grande desafio para a endodontia. Sendo assim, técnicas de apicificação e revascularização têm sido empregadas com o objetivo de restabelecer as estruturas comprometidas por tal condição. Entretanto, ainda não existe consenso na literatura a respeito da manutenção da resistência mecânica entre ambas as técnicas

Objetivo da Pesquisa:

O objetivo do presente trabalho será analisar o comportamento mecânico (pela análise por elementos finitos - FEA) de dentes anteriores com rizogênese incompleta através da técnica de apicificação com MTA (5 mm no ápice) e revascularização também com MTA (5 mm na cervical). A análise do desempenho mecânico após a execução das duas técnicas será comparada com a resistência ao trauma do incisivo central superior direito maduro.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Os riscos aos pacientes são mínimos, pois será utilizado somente a tomografia do mesmo para reprodução do dente em software computadorizado, reduzindo a possibilidade de danos imediatos ou posteriores, no plano individual ou coletivo, havendo risco de exposição a constrangimento por

Endereço: Av. Engº Francisco José Longo 777 - Ramal 9028
Bairro: Jardim São Dimas **CEP:** 12.245-000
UF: SP **Município:** SAO JOSE DOS CAMPOS
Telefone: (12)3947-9078 **Fax:** (12)3947-9000 **E-mail:** ceph.ict@unesp.br

**INSTITUTO DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA - CAMPUS DE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS -
UNESP**



Continuação do Parecer: 5.533.737

utilizarmos seus documentos como base.

Os participantes serão beneficiados exclusivamente de forma indireta, considerando as dimensões físicas, psíquicas, morais, intelectuais, sociais, culturais e espirituais dos mesmos.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Trata-se de uma pesquisa nacional que será realizada no ICT UNESP, e terá a duração de 1 mês.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Os termos foram apresentados.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

As pendências foram respondidas.

Considerações Finais a critério do CEP:

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_1836501.pdf	27/06/2022 16:58:58		Aceito
Parecer Anterior	formulariorespend.doc	27/06/2022 16:58:20	Marcia Carneiro Valera	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_Fernando.pdf	20/11/2021 18:31:02	Marcia Carneiro Valera	Aceito
Folha de Rosto	folha_de_rosto.pdf	01/10/2021 17:52:26	Marcia Carneiro Valera	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	declaracao.pdf	01/10/2021 17:52:16	Marcia Carneiro Valera	Aceito

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

Endereço: Av. Engº Francisco José Longo 777 - Ramal 9028
Bairro: Jardim São Dimas CEP: 12.245-000
UF: SP Município: SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
Telefone: (12)3947-9078 Fax: (12)3947-9000 E-mail: cep@ict@unesp.br

INSTITUTO DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA - CAMPUS DE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS -
UNESP



Continuação do Parecer: 5.533.737

SAO JOSE DOS CAMPOS, 18 de Julho de 2022

Assinado por:
Denise Nicodemo
(Coordenador(a))

Endereço: Av. Engº Francisco José Longo 777 - Ramal 9028
Bairro: Jardim São Dimas CEP: 12.245-000
UF: SP Município: SAO JOSE DOS CAMPOS
Telefone: (12)3947-9078 Fax: (12)3947-9000 E-mail: ceph.ict@unesp.br