



**Laminados cerâmicos em pré-molares:
análise tridimensional pelo método dos
elementos finitos**

CARLOS MARCELO ARCHANGELO

CARLOS MARCELO ARCHANGELO

**Laminados cerâmicos em pré-molares:
análise tridimensional pelo método dos
elementos finitos**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Odontologia de Araçatuba da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Ass. Dr. Eduardo Passos Rocha

ARAÇATUBA

2008

DEDICATÓRIA

A DEUS,

Por ter me proporcionado a Vida, e me acompanhar em todos os momentos.

Aos meus pais, JOSÉ CARLOS e EVERLY,

Por estarem sempre ao meu lado, contribuindo com carinho, amor, e amparo nos momentos mais difíceis em mais esta etapa de minha vida.

À minha irmã, KAREN,

Agradeço pelos momentos em que me ajudou, e por estar sempre ao meu lado dedicando carinho e amor. Peço a Deus que ilumine você sempre.

À minha esposa, ANA PAULA,

Pela compreensão, nos momentos em que fiquei distante, e pelo carinho e amor dispensado a mim desde o dia que nos conhecemos, não poderia existir uma mulher companheira melhor que você.

A minha sogra, SELMA FERRAZ ANTUNES,

Por se mostrar companheira em todos os momentos. Peço a Deus de que ilumine sempre seus caminho.

À minha família,

Peço perdão pelos momentos em que estive ausente, porém sou muito grato pelos poucos momentos que estive com vocês neste tempo.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Passos Rocha,

Agradeço pela paciência e dedicação que teve comigo na confecção deste trabalho. Ao final destes

3 anos posso lhe afirmar que outra pessoa não poderia ter sido melhor orientador que você.

Construímos nesses anos uma amizade sadia e honesta, saiba que em todos os momentos procurei absorver todos os ensinamentos que me passou e tenha certeza de que levarei isso para toda minha vida. Vejo você como uma pessoa muito inteligente e com objetivos traçados para ser o melhor.

Ao meu amigo, Manoel,

A você meu amigo, que é o irmão que não tenho, e compartilha comigo dos momentos bons e ruins da minha vida, está presente ao meu lado quando preciso, e não se nega em me ajudar.

Aos meus cunhados Ricardo, Raquel, Tiago e Eduardo,

Obrigado pela ajuda em todos os momentos que precisei vocês fazem parte da minha vida, e, com certeza cada um tem um pedacinho desta tese.

Prof. Dr. Ching-Chang Ko (The University of North Carolina at Chapel Hill) e Prof. Dr. Paolo

M. Cattaneo (The University of Aarhus)

Pela contribuição prestada ao estudo

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Odontologia de Araçatuba, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, na pessoa do seu diretor , Prof. Dr. Pedro Felício Estrada Bernabé, pelas condições oferecidas para a realização desta pesquisa.

Ao coordenador do curso de Pós-Graduação em Odontologia, Prof. Dr. Idelmo Rangel Garcia Júnior, pelo empenho, dedicação e respeito com que desenvolve sua atividade de coordenador.

Tenho certeza que sua dedicação contribuiu muito para nosso curso de Pós-Graduação.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Prótese Dentária (2006/2009), nível de Doutorado, Cesar Zazi, Eduardo, José Vitor, Lucas, Manoel e Michele, pelas experiências trocadas, pelo apoio nos momentos oportunos e convivência nesta caminhada.

Aos colegas dos cursos de Pós-Graduação das outras áreas de concentração (Cirurgia, Ortodontia, Estomatologia e Periodontia), pelos momentos que passamos juntos e pelas experiências trocadas.

Aos meus amigos residentes em Londrina, por me apoiarem sempre nestes dois anos, Vitor, Luciano, Gabriel, Alexandre, Roger, José Orlando, Calisto, Wilson, Carlos Beraldo e Marcus.

Ao meu amigo e companheiro de trabalho, José Augusto, por se desdobrar no atendimento aos meus clientes na minha ausência.

Aos docentes do Departamento de Materiais Odontológicos e Prótese, Prof. Dr. Eduardo Passos Rocha, Prof. Dr. Eduardo Piza Pellizzer, Prof. Dr. Paulo Renato Junqueira Zuim, Prof. Dr. Alício Rosalino Garcia, Prof. Dr. Marcelo Coelho Goiato, Prof. Dr. Wirley Gonçalves Assunção, Prof. Dr. Renato Salviato Fajardo, Prof^a. Dr^a. Débora Barros Barbosa, Prof. Dr. Humberto Genari Filho, Prof. Dr. Cícero Eleutério da Silva Filho, Prof^a. Dr^a. Eulália Maria Martins da Silva, Prof^a. Dr^a. Adriana Cristina Zavanelli, Prof. Dr. Stefan Fiúza de Carvalho Dekon e Prof. Dr. Paulo Henrique dos Santos pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários do Departamento de Materiais Odontológicos e Prótese, Ana Lúcia, Maria Lúcia, Eduardo, Carlos Alberto, José Baleeiro, Sérgio, Jânder e Ana Marcelina, pelo carinho, atenção e companheirismo que dispensaram a mim.

Aos funcionários da Seção de Pós-Graduação, Marina Midori Sakamoto Kawagoe e Valéria de Queiroz Marcondes Zagatto e Diogo, pela competência, disponibilidade e atenção.

Aos funcionários da Biblioteca da Faculdade de Odontologia de Araçatuba, pela gentileza com que sempre me trataram e o esforço que sempre tiveram para atender minhas solicitações.

A todos os docentes do curso de Pós-Graduação em Odontologia pelo empenho e dedicação com que ministraram suas aulas.

Ao Centro de Educação Continuada de Odontologia (INTEGRALE), pela confiança em mim depositada para coordenação de cursos de especialização e aperfeiçoamento.

Aos meus amigos e parceiros do curso de especialização de Implantodontia em Londrina, Norberto, Paulo e Leonardo, pelo companheirismo nas horas mais difíceis.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“MUITO OBRIGADO”

Altos e Baixos

Chegadas e partidas

Muitas pedras pelo caminho

Somos o que **QUISEMOS** ser,

Somos o que **CONSEGUIMOS** ser,

Somos o que **ESCOLHEMOS** ser.

Não importa o quanto você já andou no caminho errado.

Você pode recomeçar.

Mais um ciclo se completa.

Outro está por vir.

ESCOLHA !!!!!!!

Escolha ter um projeto de vida.

Se você não sabe para onde vai qualquer caminho serve.

Escolha estar no controle de seu presente e futuro.

O passado é a única coisa que não se pode mudar.

Escolha fazer sua própria sorte.

Quer transformar possibilidade em **REALIDADE**.

Escolha preservar sua essência.

De um jeito ou de outro a natureza o levará a isso.

Escolha expandir suas capacidades.

Você ficará mais forte diante da vida.

Escolha se divertir sempre.

Essa é a verdadeira fonte da juventude.

Escolha insistir, persistir.

Ainda que haja tropeços e quedas.

Escolha sonhar com o futuro.

Visualize-o com certeza e assim será.

Escolha ter coragem e ousadia.

Boa intenção, nem sempre, é o suficiente.

Escolha o trabalho em equipe.

Muitas vezes a soma das partes é maior que o todo.

Escolha estar em sintonia com o seu tempo.

Tudo muda e é preciso estar preparado para novas situações.

Escolha descobrir o que você tem de melhor.

Isso será seu melhor auxílio diante das adversidades.

Escolha alcançar objetivos estimulantes.

Insegurança e ceticismo só atrapalham.

Escolha aprender e reaprender todos os dias.

Sabedoria se conquista com paciência e tempo.

Escolha ser estratégico.

Crie sempre alianças promissoras.

Escolha ser criativo.

Para isso é preciso experimentar coisas novas.

Escolha ser racional, organizado, chato.

Desde que esteja crescendo com isso.

Escolha vencer sem deixar para trás seus valores.

Caso contrário, mais cedo ou mais tarde, se arrependerá.

Escolha dizer obrigado.

Demonstrando gratidão conquistamos aliados.

Escolha ter paixão e entusiasmo em tudo.

Isso fará de você um ser humano excepcional.

Escolha chegar ao fim de cada batalha com a consciência do dever cumprido.

O sentimento de auto-realização é a melhor recompensa

E LEMBRE-SE !!!!!!!!!!!

VOCÊ É, ESSENCIALMENTE, FRUTO DE SUAS ESCOLHAS.

ENTÃO ESCOLHA.

SER O MELHOR QUE PUDER !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

ARCHANGELO, C. M. **Laminados cerâmicos em pré-molares: análise tridimensional pelo método dos elementos finitos** 2008. 73 f. Dissertação (Doutorado) - Faculdade de Odontologia, Universidade Estadual Paulista, Araçatuba, 2008.

RESUMO

Objetivo: O objetivo do presente estudo foi avaliar através do método dos elementos finitos tridimensional (3D FEA), o comportamento mecânico de uma faceta laminada de cerâmica e do cimento resinoso em um 1º pré-molar maxilar, variando a redução (parcial ou total) da cúspide vestibular.

Material e método: Baseado em imagens micro-tomográficas (μ CT), 2 modelos (M) tridimensionais foram construídos no programa Solidworks 2007 variando a redução da cúspide vestibular, sendo Mp o modelo composto pelo dente pré-molar restaurado com uma faceta laminada de cerâmica, com redução parcial da cúspide vestibular e Mt, o modelo semelhante ao Mp, porém com redução total da cúspide vestibular. O programa de elementos finitos ANSYS Workbench 10.0 foi utilizado para realizar as análises. O carregamento (150 N) foi aplicado próximo à ponta de cúspide vestibular, com 45º de inclinação. Foram utilizados os critérios da máxima tensão principal ($\sigma_{\max}$) e da máxima tensão cisalhante (σ_{shear}) na faceta laminada e na camada de cimento resinoso.

Resultados: O Mt mostrou menor σ_{shear} em 9 das 12 áreas analisadas quando comparado ao Mp. O Mp mostrou menor variação da $\sigma_{\max}$ (de -3,13 para 14,4 MPa) que o Mt para a lâmina de cerâmica (de -2,08 para 24,3 MPa). A camada de cimento apresentou variação de $\sigma_{\max}$ semelhante entre os Mp e Mt. Os critérios de tensões utilizados não evidenciaram valores além dos limites estabelecidos para a falha estrutural do material estudado.

Conclusão: O laminado cerâmico e a camada de cimento resinoso apresentaram comportamento mecânico favorável para a restauração do pré-molar frente ao carregamento adotado. O tipo de redução de cúspide não influenciou no aumento expressivo das tensões principal e cisalhante. O Mp apresentou menores valores de $\sigma_{\max}$ em tração quando comparado ao Mt. O Mp e o Mt apresentaram comportamento favorável com relação as forças cisalhantes, sendo as maiores tensões encontradas no modelo Mp.

Palavras-Chaves: Faceta dentária; Estética dentária; Porcelana dentária; Análise de elemento finito

ARCHANGELO, C. M. **Laminate veneers in premolars. A 3-D FEA.** 2008. 73 f. Dissertação (Doutorado) - Faculdade de Odontologia, Universidade Estadual Paulista, Araçatuba, 2008.

ABSTRACT

Objectives: Using 3-D finite element analysis (FEA) and μ CT data, the aim of this study was to evaluate the behavior of the laminate veneer and the resin luting cement in a maxillary premolar with the buccal cusp partially or completely covered.

Material and method: 2 3-D FEA models of a maxillary premolar were built from μ CT data. All models were restored with a feldspathic laminate veneer using Solidworks. A similar tooth reduction (0.5mm) was applied for two models. The buccal cusp reduction of the premolar followed two configurations: Model (Mt) - buccal cusp completely covered by veneer; and Model (Mp) - buccal cusp partially covered by veneer. The loading (150N, in 45°) was performed on the buccal cusp of each premolar. Appropriate boundary condition was applied at the periodontal ligament surfaces and ANSYS (10.0) was used to obtain the maximum shear stress (σ_{shear}) and maximum principal stress (σ_{max}) for the laminate veneer and resin luting cement layer.

Results: The Mp showed higher σ_{shear} than Mt in 9 to 12 analyzed areas. The Mp showed smallest variation of σ_{max} in laminate veneer (from -3,13 to 14,4 MPa) compared with Mt (from -2,08 to 24,3 MPa). The resin luting cement showed similar variation of σ_{max} between Mp and Mt (from -3.13 to 12.2 MPa) and (from -1.61 to 14.1 MPa), respectively. None of the structures exceeded the ultimate tensile strength or the shear bond strength to dentin and enamel.

Conclusion: The laminate veneer and the resin luting cement layer showed an adequate behavior when veneer was applied in premolars. Cusp reduction did not affect significant increase in σ_{max} and σ_{shear} . In general, the Mp showed better behavior (σ_{max}) than Mt. The Mt showed better behavior (σ_{shear}) than Mp.

Keywords: Dental Veneers, Esthetics dental, Dental porcelain; Finite element analysis

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	22
LISTA DE TABELAS	25
LISTA DE GRÁFICOS	26
LISTA DE ABREVIATURAS	27
1. INTRODUÇÃO	29
2. PROPOSIÇÃO	32
3. MATERIAL E MÉTODO	34
4. RESULTADOS	41
4.1 Tensões de cisalhamento (σ_{shear})	41
4.2 Máxima tensão principal (σ_{max})	42
5. DISCUSSÃO	47
6. CONCLUSÃO	51
7. REFERÊNCIAS	53
8. ANEXOS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visualização de alguns slices obtidos através do micro-tomógrafo (CT40, Scanco Medical, Bassersdorf, Switzerland).	34
Figura 2 – Dente reconstruído no programa SolidWorks 2007 (SolidWorks Corp., Concord, MA, USA) com todas as estruturas inerentes ao dente natural (esmalte, dentina e polpa dental), exceto pela não criação da camada de cimento.....	35
Figura 3 – Visualização da quantidade de desgaste para confecção da faceta laminada de cerâmica.	36
Figura 4 – Modelo Mp (restaurado com uma faceta laminada de cerâmica, com redução parcial da cúspide vestibular) e Mt (restaurado com uma faceta laminada de cerâmica, com redução total da cúspide vestibular), com a malha de elementos finitos gerada e aplicação de força de 150N.	37
Figura 5 - Visualização das áreas (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) que foram utilizadas para obtenção da máxima tensão principal ($\sigma_{\max}$) e das tensões de cisalhamento (σ_{shear}) na lâmina de cerâmica e camada de cimento.....	39
Figura 6 - Mapa geral das tensões de cisalhamento para o Mp.	59
Figura 7 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor das tensões de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mp.....	59
Figura 8 - Mapa individualizado com o maior valor da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mp.....	60
Figura 9 - Mapa individualizado com o menor valor da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mp.....	60
Figura 10 - Mapa individualizado da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso no Mp.....	61
Figura 11 – Mapa geral da tensão máxima principal ($\sigma_{\max}$) para o Mp.....	61

Figura 12 – Mapa individualizado com o menor e o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mp.....	62
Figura 13 – Mapa individualizado com o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mp.	62
Figura 14 - Mapa individualizado com o menor valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mp.	63
Figura 15 - Mapa individualizado da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mp.	63
Figura 16 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mp.	64
Figura 17 - Mapa individualizado com o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mp.	64
Figura 18 - Mapa individualizado com o menor valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mp.	65
Figura 19 - Mapa individualizado da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mp.	65
Figura 20 - Mapa geral das tensões de cisalhamento para o Mt.	67
Figura 21 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor das tensões de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mt.....	67
Figura 22 - Mapa individualizado com o maior valor da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mt.....	68
Figura 23 - Mapa individualizado com o menor valor da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mt.....	68
Figura 24 - Mapa individualizado da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso no Mt.....	69
Figura 25 - Mapa geral da máxima tensão principal ($\sigma_{\max}$) para o Mt.	69
Figura 26 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mt.....	70

Figura 27 - Mapa individualizado com o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mt.	70
Figura 28 - Mapa individualizado com o menor valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mt.	71
Figura 29 - Mapa individualizado da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mt.	71
Figura 30 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mt.	72
Figura 31 - Mapa individualizado com o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mt.	72
Figura 32 - Mapa individualizado com o menor valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mt.	73
Figura 33 - Mapa individualizado da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mt.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Apresentação dos modelos, da forma de redução da cúspide vestibular, a força aplicada e as características de união entre a dentina, a camada de cimento resinoso e a lâmina de cerâmica.	36
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais (E e ν).	38
Tabela 3 – Valores estabelecidos em Mpa para a falha da lâmina de cerâmica e da camada de cimento em forças de tração e compressão ($\sigma_{\max}$) e tensões de cisalhamento (σ_{shear}).	39
Tabela 4 - Valores das tensões de cisalhamento em MPa, observados na camada de cimento resinoso no Mp e Mt.	41
Tabela 5 - Valores da $\sigma_{\max}$ em tração e compressão em MPa, para o Mp e o Mt e suas respectivas localizações.	43
Tabela 6 – Valores da $\sigma_{\max}$ em tração em MPa observados na faceta laminada de cerâmica no Mp e Mt.	43
Tabela 7 - Valores da $\sigma_{\max}$ em tração em MPa observados na camada de cimento no Mp e Mt.....	45

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** - Valores das tensões de cisalhamento na camada de cimento resinoso no Mp e Mt e os respectivos valores máximos da força de adesão em dentina (SBSD) e no esmalte (SBSE)42
- Gráfico 2** - Valores da $\sigma_{\max}$ em tração na faceta laminada de cerâmica no Mp e Mt, e o valor de ruptura (UTS).....44
- Gráfico 3** – Valores da $\sigma_{\max}$ em tração na camada de cimento resinoso para o Mp e Mt e o valor de ruptura (UTS).....45

LISTA DE ABREVIATURAS

3D FEA = Método dos elementos finitos tridimensional.

μ CT = Micro-tomográficas.

3D = Tridimensional.

M = Modelo.

Mp = Modelo composto pelo dente pré-molar restaurado com uma faceta laminada de cerâmica com redução parcial da cúspide vestibular.

Mt = Modelo composto pelo dente pré-molar restaurado com uma faceta laminada de cerâmica com redução total da cúspide vestibular.

N = Newtons.

$\sigma_{\max}$ = Máxima tensão principal.

σ_{shear} = Máxima tensão cisalhante

MPa = Megapascal

UTS = Ultimate Tensile Strength

UCS = Ultimate Compressive Strength

SBSE = Shear Bond Strength Enamel

SBSD = Shear Bond Strength Dentin

E = Módulo de elasticidade

ν = Coeficiente de Poisson

% = Porcento

1. INTRODUÇÃO

Com a evolução dos materiais restauradores e dos procedimentos de adesão, as facetas laminadas de cerâmica têm sido aplicadas nas correções e reconstruções dentais com elevada previsibilidade de sucesso [1]. Peumans et al. [2] evidenciam índices de sucesso de 92% após 5 anos e 64% após 10 anos de avaliação clínica. Fradeani et al. [3], em 2005, mostra resultados ainda melhores, com índice de sucesso de 94,4% após 12 anos de avaliação.

O sucesso das facetas laminadas está condicionado a um correto preparo, à adesão ao substrato [4] e à evolução dos sistemas cerâmicos. Dessa forma, sempre que possível, o preparo deve apresentar suas margens restritas ao esmalte, reduzindo a possibilidade de falhas pelas limitações da adesão à dentina [5]. O cimento resinoso deve ser capaz de absorver as cargas de tração, reduzindo os efeitos adversos sobre a cerâmica, atuando de forma a manter a estabilidade do complexo dente-restauração [6].

A despeito do aprimoramento tecnológico dos sistemas cerâmicos, com propriedades mecânicas melhoradas [7, 8], percebe-se que o uso das facetas laminadas em cerâmica está restrita à região anterior, não havendo um consenso no uso de laminado cerâmico na região posterior. Isto porque os sistemas cerâmicos, ainda que melhorados, apresentam limitações mecânicas quando utilizados na região posterior devido à incapacidade inerente das cerâmicas em absorver satisfatoriamente as forças de tração por deformação plástica, acarretando o surgimento de pequenas trincas, fraturas e defeitos que evoluem para falhas do sistema [9].

Porém, quando os procedimentos de adesão dentária são bem estabelecidos, a camada adesiva proporcionada pelo agente cimentante absorve parcialmente as tensões atuantes, redistribuindo-as no interior da estrutura dentária de suporte, melhorando o comportamento mecânico da cerâmica e preservando a integridade da interface dente-restauração, semelhante ao ocorrido em restaurações parciais de cerâmica do tipo inlay [6]. Nesse sentido, Magne e Douglas [10], em 1999, e à semelhança de Stokes e Hood [11], em 1993, observaram que os dentes tratados

com lâminas de cerâmica na região anterior reproduziam o comportamento mecânico e estrutural de um dente intacto quando o laminado era colado ao substrato dentário.

Uma das situações clínicas que demandam o uso de laminados cerâmicos na região posterior é aquela caracterizada por alterações de forma ou cor em dentes hígidos não sujeitos a outra modalidade de correção estética [12]. Entretanto, a literatura não é conclusiva sobre o comportamento mecânico de facetas laminadas de cerâmica em dentes pré-molares, não havendo indicativo a cerâmica deve recobrir parcial ou totalmente a cúspide vestibular. Muito embora sem comprovação clínica, suspeita-se que a ocorrência de falhas não seja grande em virtude da melhora dos procedimentos de adesão e dos materiais restauradores, os quais já caracterizam restaurações do tipo “onlay” na região posterior.

Fennis et al. [13] demonstraram que a cobertura total das cúspides vestibular e palatina em dentes restaurados com resina composta melhorou a retenção e a resistência da resina, diminuindo a ocorrência de falhas. Assim, suspeita-se que a cobertura total da cúspide vestibular na confecção das facetas laminadas de cerâmicas em pré-molares proporcione maior retenção e resistência ao conjunto aumentando a previsibilidade de sucesso.

Baseado no exposto, o objetivo do presente estudo foi avaliar utilizando o método dos elementos finitos tridimensional, o comportamento mecânico de uma faceta laminada e do cimento resinoso em um 1º pré-molar maxilar, variando a redução da cúspide vestibular (parcial ou total).

2. PROPOSIÇÃO

O objetivo do presente estudo foi avaliar o comportamento mecânico de uma faceta laminada em cerâmica e do cimento resinoso em um 1º pré-molar maxilar, segundo as seguintes características:

- 1 – pré-molar com redução parcial da cúspide vestibular.
- 2 – pré-molar com redução total da cúspide vestibular.

3. MATERIAL E MÉTODO

Após a aprovação do projeto pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da Faculdade de Odontologia de Araçatuba – UNESP (Processo nº 200801845 em anexo), um dente pré-molar maxilar extraído foi obtido do banco de dentes do Departamento de Materiais Odontológicos e Prótese para a obtenção da imagem micro-tomográfica (μ CT).

De um total de 720 slices obtidos após o escaneamento do dente em micro-tomógrafo (CT40, Scanco Medical, Bassersdorf, Switzerland), 82 slices (**Figura 1**) foram selecionados para a reconstrução tridimensional no programa SolidWorks 2007 (SolidWorks Corp., Concord, MA, USA), com todas as estruturas inerentes ao dente natural (esmalte, dentina e polpa dental), exceto pela não criação da camada de cimento (**Figura 2**).

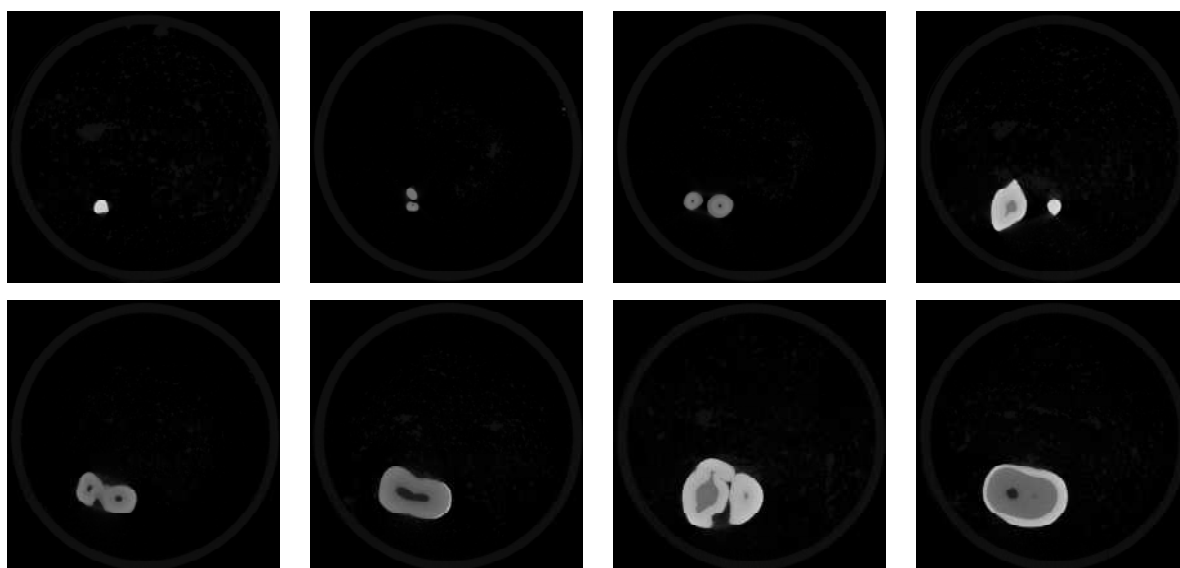


Figura 1 - Visualização de alguns slices obtidos através do micro-tomógrafo (CT40, Scanco Medical, Bassersdorf, Switzerland).



Figura 2 – Dente reconstruído no programa SolidWorks 2007 (SolidWorks Corp., Concord, MA, USA) com todas as estruturas inerentes ao dente natural (esmalte, dentina e polpa dental), exceto pela não criação da camada de cimento.

A partir deste modelo (M), foram elaborados 2 modelos geométricos variando a redução da cúspide vestibular, sendo: Mp – composto pelo dente pré-molar restaurado com uma faceta laminada de cerâmica (IPS e-Max Press – Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichtenstein), com redução parcial da cúspide vestibular e Mt – semelhante ao Mp, porém com redução total da cúspide vestibular envolvendo a vertente triturante (**Tabela 1 e Figura 4**).

As características comuns de cada modelo foram similares entre si, como a redução da face vestibular correspondente ao preparo para faceta laminada de cerâmica (0,5 mm), redução da cúspide vestibular de forma parcial ou total (0,5 mm de espessura) (**Figura 3**), a camada do agente cimentante (50 μ m), a espessura do laminado (0,45mm) e do ligamento periodontal (0,25mm).

<i>Dente</i>	<i>Cúspide Vestibular</i>	<i>Força</i>	<i>Característica de união entre a dentina, a camada de cimento resinoso e a lâmina de cerâmica</i>
1º Pré-molar modelo Mp	Redução parcial de cúspide	150 N	Completamente unida
1º Pré-molar modelo Mt	Redução total de cúspide		

Tabela 1 - Apresentação dos modelos, da forma de redução da cúspide vestibular, a força aplicada e as características de união entre a dentina, a camada de cimento resinoso e a lâmina de cerâmica.

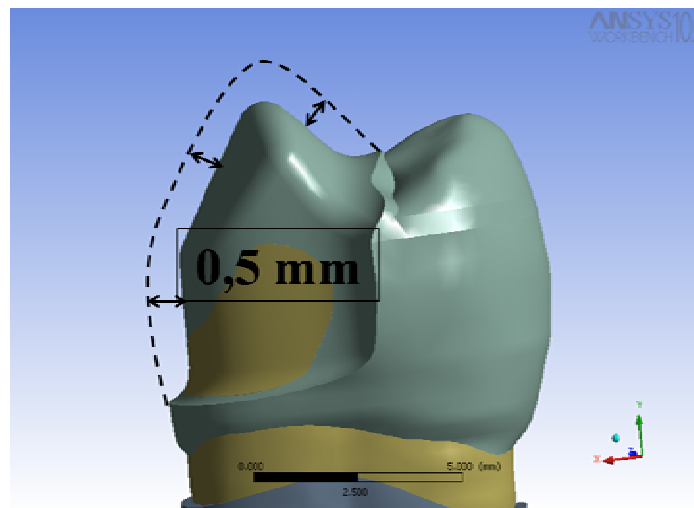


Figura 3 – Visualização da quantidade de desgaste para confecção da faceta laminada de cerâmica.

Os modelos criados no programa SolidWorks 2007 (SolidWorks Corp., Concord, MA, USA) foram exportados para o programa de elementos finitos Ansys Workbench10.0 (Swanson Analysis Inc., Houston, PA, USA) para o reconhecimento das regiões, determinação das propriedades mecânicas e a geração da malha de elementos finitos (**Figura 4**).

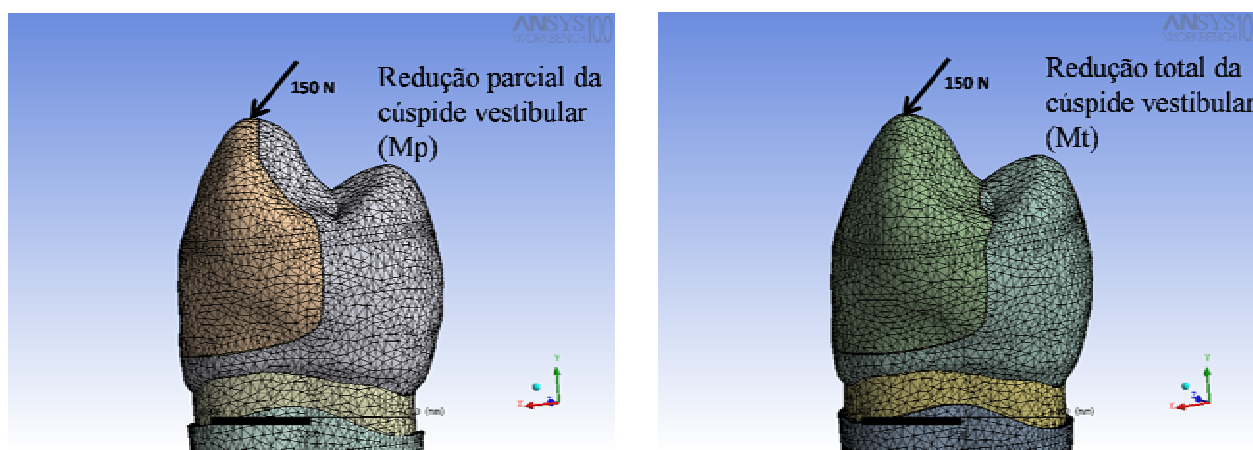


Figura 4 – Modelo Mp (restaurado com uma faceta laminada de cerâmica, com redução parcial da cúspide vestibular) e Mt (restaurado com uma faceta laminada de cerâmica, com redução total da cúspide vestibular), com a malha de elementos finitos gerada e aplicação de força de 150N.

Todos os materiais envolvidos no estudo foram considerados homogêneos e isotrópicos com propriedades mecânicas (Módulo de elasticidade (E) e coeficiente Poisson (ν)) estabelecidas de acordo com a literatura específica (**Tabela 2**). O Mp e o Mt não apresentaram os limites do preparo em dentina, embora esta tenha sido parcialmente exposta no 1/3 cervical após a simulação do preparo do dente. A união entre a lâmina de cerâmica e o substrato dental através do cimento resinoso (Variolink II – Ivoclar Vivadent) foi considerada perfeita nos dois modelos estudados.

Para a convergência da análise [14], a malha foi composta por elementos tetraédricos com 0,2 mm de dimensão (Ansys Workbench 10.0, Houston, PA, USA). Os modelos apresentaram 379974 (Mp) e 383431 (Mt) elementos e 248275 (Mp) e 249819 (Mt) nós (**Figura 4**).

<i>Estrutura</i>	<i>Módulo de Elasticidade E (Mpa)</i>	<i>Coefficiente de Poisson (ν)</i>	<i>Referências</i>
Esmalte	80000	0,41	[15]
Dentina	18000	0,31	[15]
Ligamento Periodontal	1750	0,3	[16]
Porcelana (IPS e-Max Press)	65000	0,24	*
Cimento resinoso	8300	0,31	[17]
Polpa Dentária	2	0,3	[18]

* Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson fornecidos pelo fabricante (Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichtenstein)

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais (E e ν).

Como condição de contorno, um deslocamento igual a zero foi considerado para as direções ortogonais ($x=z=y=0$), aplicados à superfície externa correspondente ao ligamento periodontal em cada modelo.

Simulando a guia de desocclusão em grupo parcial, ou em grupo total, com contato dentário entre arcos durante o movimento lateral de trabalho mandibular, um carregamento de 150N foi aplicado em 45° de inclinação com a cúspide vestibular [19] (**Figura 4**).

Após o carregamento, a análise das tensões foi realizada segundo o critério da máxima tensão principal ($\sigma_{\max}$) e das tensões cisalhantes (σ_{shear}). Segundo Dejak, Mlotkowski [17], estes critérios de análise são apropriados para prever falhas em materiais não-ducteis, como a cerâmica e o cimento resinoso. Dessa forma, a previsibilidade de sucesso da lâmina de cerâmica e da camada de cimento foi estabelecida comparando-se os valores de $\sigma_{\max}$ obtidos no estudo com os valores para a carga de ruptura em tração (UTS) e os valores de σ_{shear} aos valores de força de união no esmalte e dentina estabelecido em testes de cisalhamento (**Tabela 3**).

	<i>Lâmina de Cerâmica</i>	<i>Camada de cimento</i>
$\sigma_{\max}$ (<i>tração e compressão</i>)	(UTS: 40 MPa [17])	UTS: 45,1 MPa; UCS: 178 MPa [17]
<i>Tensões de cisalhamento</i>		SBS, esmalte: 32,8 MPa [17]
(σ_{shear})		SBS, dentina: 15,1 MPa [17]

Tabela 3 – Valores estabelecidos em MPa para a falha da lâmina de cerâmica e da camada de cimento em forças de tração e compressão ($\sigma_{\max}$) e tensões de cisalhamento (σ_{shear}).

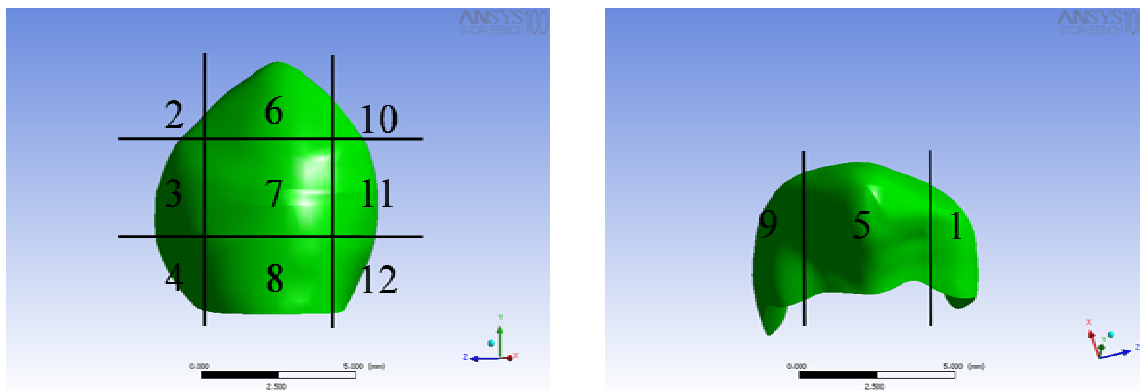


Figura 5 - Visualização das áreas (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) que foram utilizadas para obtenção da máxima tensão principal ($\sigma_{\max}$) e das tensões de cisalhamento (σ_{shear}) na lâmina de cerâmica e camada de cimento.

4. RESULTADOS

Após a obtenção das tensões em tração para a lâmina de cerâmica e camada de cimento resinoso, e as tensões de cisalhamento para a camada de cimento resinoso, possibilitando uma análise comparativa entre os dois modelos (Mp e Mt)

Em virtude da grande quantidade de figuras, as mesmas foram agrupadas no item Anexo.

4.1 Tensões de cisalhamento (σ_{shear})

As máximas tensões de cisalhamento (σ_{shear}) nas áreas individualizadas estão agrupadas na

Tabela 4.

	Áreas											
Modelos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mp	2,79	2,79	5,57	4,65	7,43	8,36	8,36	8,36	7,43	8,36	8,36	9,29
Diferença (%)	60%	54%	37%	44%	5%	6%	6%	6%	6%	17%	17%	25%
Mt	6,97	6,1	3,49	2,61	7,84	7,84	7,84	7,84	6,97	6,97	6,97	6,97

Tabela 4 - Valores das tensões de cisalhamento em MPa, observados na camada de cimento resinoso no Mp e Mt e a diferença percentual entre os modelos.

De forma geral, o Mt apresentou menores σ_{shear} em 9 das 12 áreas analisadas quando comparado ao Mp. A área 5 foi a que apresentou a menor variação entre os dois modelos (5%), e a área 1 foi a que apresentou a maior variação (60%) (**Gráfico 1 e Figuras 6, 7, 8, 9, 10, 20, 21, 22, 23 e 24**).

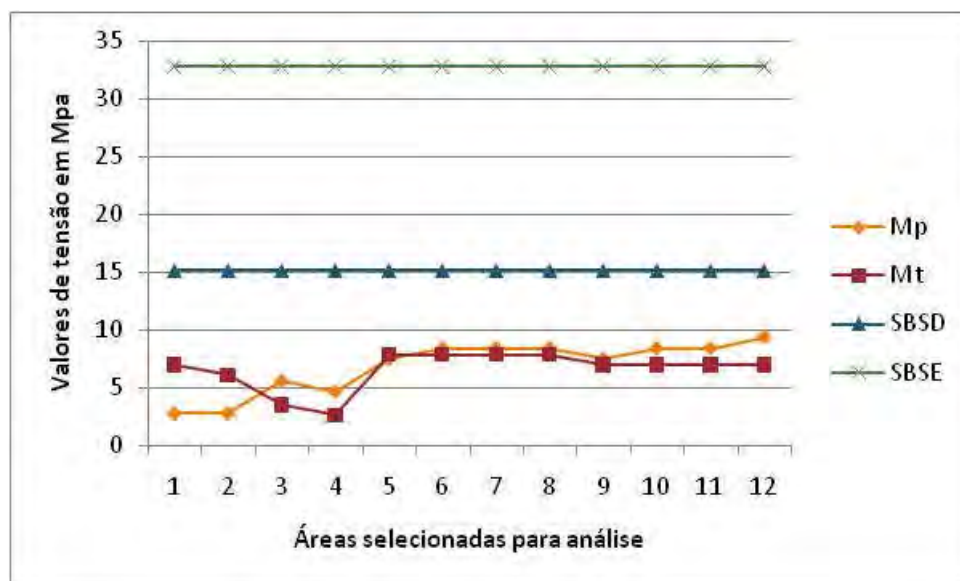


Gráfico 1 - Valores das tensões de cisalhamento na camada de cimento resinoso no Mp e Mt e os respectivos valores de resistência de adesão na dentina (SBSD) e no esmalte (SBSE)

4.2 Máxima tensão principal ($\sigma_{\max}$)

Os valores da $\sigma_{\max}$ em tração e compressão para o Mp e Mt, estão representados na **Tabela 5** e nas **Figuras 10** e **24**. Observou-se que o modelo com cobertura parcial de cúspide apresentou maiores valores de compressão e tração respectivamente (-27,258 a 192,095 MPa) quando comparado ao modelo com proteção total de cúspide (-26,399 a 176,254 MPa).

<i>Modelos</i>	<i>($\sigma_{\max}$) (Valor máximo de compressão e tração respectivamente)</i>		<i>Localização ($\sigma_{\max}$)(tração)</i>	<i>Localização ($\sigma_{\max}$)(compressão)</i>
Mp	-27,258	192,095	Esmalte (Face palatina União da JCE) (Figura 11)	Esmalte (Face vestibular União da JCE) (Figura 11)
Mt	-26,399	176,254	Esmalte (Face palatina União da JCE) (Figura 25)	Esmalte (Face palatina União da JCE) (Figura 25)

Tabela 5 - Valores da $\sigma_{\max}$ em tração e compressão em MPa, para o Mp e o Mt e suas respectivas localizações.

Lâmina de cerâmica

Os valores da $\sigma_{\max}$ em tração na lâmina de cerâmica nas áreas individualizadas estão representados na **Tabela 6** e no **Gráfico 2**.

	<i>Áreas</i>											
<i>Modelos</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
Mp	5,65	7,84	3,45	12,2	7,84	3,45	3,45	5,65	5,65	14,4	3,45	7,84
Diferença (%)	30%	23%	14%	17%	68%	43%	14%	6%	44%	44%	14%	3%
Mt	8,05	6,03	4,0	10,1	24,3	1,97	4,0	6,03	10,1	8,05	4,0	8,05

Tabela 6 – Valores da $\sigma_{\max}$ em tração em MPa observados na faceta laminada de cerâmica no Mp e Mt e a diferença percentual entre os dois modelos.

De forma geral, o Mt apresentou os maiores valores de $\sigma_{\max}$ (-2,08 a 24,3 MPa) (**Gráfico 2**, **Tabela 6** e **Figuras 12, 13, 14, 15, 26, 27, 28 e 29**) quando comparado ao Mp (-3,13 a 14,4 MPa).

O Mt apresentou maiores valores de $\sigma_{\max}$ em tração em 8 das 12 áreas analisadas quando comparado com as respectivas áreas do Mp (**Gráfico 2**). A área 8 foi a que apresentou a menor variação de $\sigma_{\max}$ entre os dois modelos (6%), e a área 5 foi a que apresentou a maior variação (68%) (**Gráfico 2**). O Mt apresentou maiores valores de $\sigma_{\max}$ nas áreas 1, 5 e 9, sendo maior em 30%, 68% e 44% respectivamente quando compara-se o Mp com o Mt.

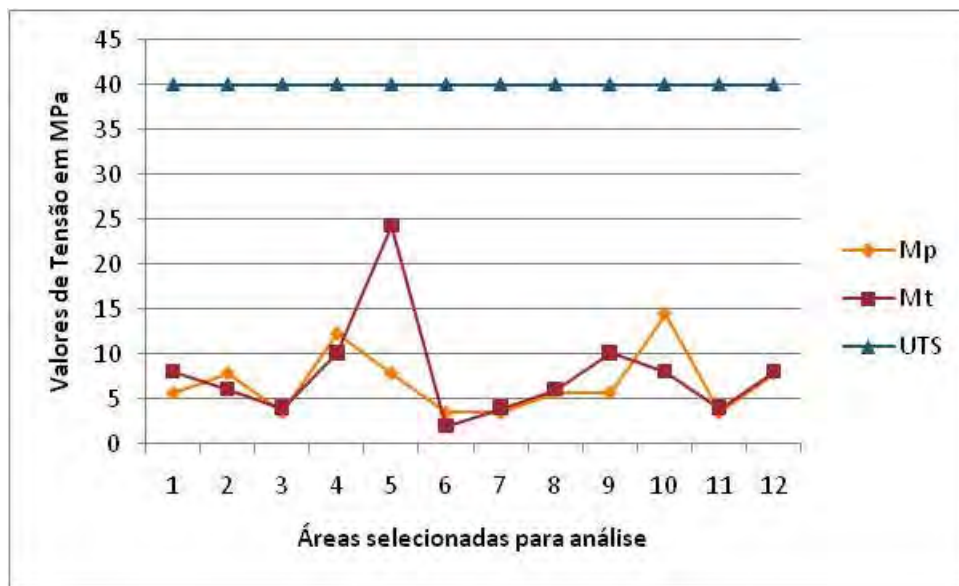


Gráfico 2 - Valores da $\sigma_{\max}$ em tração na faceta laminada de cerâmica no Mp e Mt, e o valor de ruptura (UTS).

Camada de cimento

Os valores da máxima tensão principal ($\sigma_{\max}$) na camada de cimento resinoso nas áreas individualizadas estão representados na **Tabela 7** e no **Gráfico 3**.

	Áreas											
Modelos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
M_p	3,45	3,45	5,65	3,45	7,84	7,84	5,65	12,2	7,84	7,84	7,84	7,84
Diferença (%)	57%	14%	29%	43%	3%	23%	6%	13%	3%	23%	3%	3%
M_t	8,05	4,0	4,0	1,97	8,05	6,03	6,03	14,1	8,05	6,03	8,05	8,05

Tabela 7 - Valores da $\sigma_{\max}$ em tração em MPa observados na camada de cimento no M_p e M_t e a diferença percentual entre os dois modelos.

A variação da $\sigma_{\max}$ entre o M_p (-3,13 a 12,2 MPa) e M_t (-1,61 a 14,1 MPa) para o cimento resinoso foi menor que as encontrada para a lâmina de cerâmica (**Tabela 7 e Figuras 16, 17, 18, 19, 30, 31, 32 e 33**). A área 8 foi a que apresentou os maiores valores de $\sigma_{\max}$ independente do modelo. O modelo M_t apresentou os maiores valores (tração) de $\sigma_{\max}$ nas áreas 1, 5 e 9 a semelhança do ocorrido com a lâmina de cerâmica (**Gráfico 3**).



Gráfico 3 – Valores da $\sigma_{\max}$ em tração na camada de cimento resinoso para o M_p e M_t e o valor de ruptura (UTS).

5. DISCUSSÃO

A utilização clínica de facetas laminadas de cerâmica em dentes pré-molares é limitada. Suspeita-se que a ocorrência de falhas seja elevada, comprometendo o sucesso da restauração. Por sua vez, os resultados obtidos no presente estudo indicam uma possibilidade de uso dos laminados cerâmicos em dentes pré-molares com previsibilidade de sucesso.

Os valores de $\sigma_{\max}$ e σ_{shear} para a faceta laminada de cerâmica e a camada de cimento resinoso não ultrapassaram os valores estabelecidos para a carga de ruptura destes materiais, bem como os valores de adesão ao esmalte e dentina (**Gráficos 1, 2 e 3**).

Os resultados do estudo mostraram que a faceta laminada de cerâmica apresentou o maior valor de $\sigma_{\max}$ em tração para o Mt, próximo ao ponto de aplicação de força (área 5: 24,3 MPa) sendo 40% menor que a carga de ruptura para a cerâmica (UTS: 40 MPa), concordes a Dejak; Mlotkowski [17] e Troedson; Derand [20] que evidenciaram em seus estudos maior estresse perto do ponto de aplicação de força em inlays e facetas laminadas de cerâmicas, respectivamente.

Como o carregamento considerado neste estudo foi de 150N, os valores de tensão em tração não se aproximaram da carga de ruptura. Para representar o risco de falha da lâmina de cerâmica e do cimento resinoso, o carregamento deveria ser de 400N e 500N, respectivamente. E para que houvesse falhas na camada de cimento resinoso unido à dentina, a força deveria ser de 300N.

Neste sentido, um paciente que apresente parafunção com forças oclusais excursivas e de apertamento variando de 400 a 700N [19], poderia sobrecarregar a cerâmica e a camada de cimento além dos limites estabelecidos para a carga de ruptura destes materiais. Na análise dos dois modelos, observou-se um melhor comportamento mecânico do Mp em relação ao Mt perante forças de tração para ambos os materiais (cerâmica e cimento resinoso), sugerindo que a lâmina de cerâmica e a camada de cimento do Mt sejam mais susceptíveis a ocorrência de falhas quando comparados ao Mp (**Tabela 6**).

Dessa forma, a concentração de $\sigma_{\max}$ em tração ocorreu na interface dente-restauração para os dois modelos estudados. Comportamento semelhante também ocorreu em dentes anteriores restaurados com coras totais de cerâmica feldspática [21]. Acredita-se que a concentração de tensão na interface dente-restauração (margem cervical) possa influenciar a ocorrência de falhas para as duas situações estudadas (Mp e Mt), concordes com Troedson; Dérand [20], uma vez que, defeitos na linha de cimentação diminuem as propriedades físicas do material, a resistência, a rigidez, alteram a cor e aumentam a absorção de água na interface adesiva [22], sendo potencializado pela força atuante no local.

No presente estudo, as margens da faceta laminada de cerâmica estiveram limitadas ao esmalte. Isto, associado ao estudo linear, explica o bom comportamento mecânico da faceta laminada e da camada de cimento resinoso para os modelos Mp e Mt. Duas áreas (8 e 12) apresentaram exposição de dentina, entretanto os valores da $\sigma_{\max}$ em tração e das tensões de cisalhamento nestas duas áreas não foram discrepantes em relação aos valores encontrados nas outras áreas selecionadas para análise, mantendo o bom comportamento mecânico da faceta e da camada de cimento perante o carregamento adotado no estudo (**Gráficos 1, 2 e 3**).

Avaliando o critério adotado para prever falha frente a forças de cisalhamento (SBS), o Mp apresentou a maior tensão cisalhante na área 12 (9,29 MPa) e o Mt apresentou a maior tensão cisalhante na área 8 (7,84 MPa), valores 38% e 47% menores que o estabelecido para falha [17]. Clinicamente há uma preocupação em relação às falhas presentes nas facetas laminadas de cerâmica, como exemplo a delaminação [12]. Neste sentido, os resultados encontrados para tensões de cisalhamento representam dados concretos e positivos quando da utilização de facetas laminadas de cerâmica em pré-molares perante o carregamento adotado.

Ainda assim, o estudo é linear com todas as estruturas unidas de forma ideal, com uma linha de cimentação de espessura constante ao longo de toda a superfície. Esta situação não apresenta

referencial clínico, e, uma vez que falhas no procedimento de adesão, como a contaminação por saliva aconteçam, a adesão dente, cimento e porcelana pode ser diminuída em até três vezes [23].

Vale salientar que a situação evidenciada no estudo representou uma situação limite pela reduzida espessura da cerâmica. Clinicamente, isto poderia ser representado pela necessidade de correção de cor. Nesse sentido, Peumans et al. [5] e Rouse [24] salientaram que as facetas laminadas de cerâmica para dentes com alterações severas de cor necessitariam de desgastes superiores a 0.7 mm, caso contrário, produziriam restaurações opacas e sem vida, e, conseqüentemente sem a mesma translucência de um esmalte dental íntegro.

Caso houvesse a necessidade de corrigir a forma da cerâmica, esta poderia adotar diferentes espessuras, gerando diferentes comportamentos aos aqui obtidos. Ressalta-se também que uma redução maior da cúspide, rotineiramente preconizada em 1,5 mm [10] quando da redução oclusal, resultaria em diferentes intensidades e distribuição de tensão. Claramente, aspectos que necessitam de maior investigação.

Dessa forma, acredita-se que o uso de laminados cerâmicos possa ser realizado com previsibilidade de sucesso. Além disso, a utilização de sistemas cerâmicos reforçados associados a maior proteção de cúspide com desgaste vertical maior que 0,5 mm possa influenciar positivamente a distribuição das tensões, aumentando a resistência do conjunto e melhorando o comportamento mecânico do laminado diante das forças atuantes.

6. CONCLUSÃO

- O laminado cerâmico e a camada de cimento resinoso apresentaram comportamento mecânico favorável para a restauração do pré-molar frente ao carregamento adotado.
- O tipo de redução de cúspide não influenciou no aumento expressivo das tensões máximas principal e cisalhante.
- O Mp apresentou menores valores de $\sigma_{\max}$ em tração quando comparado ao Mt.
- O Mp e o Mt apresentaram comportamento favorável perante forças de cisalhamento, sendo as maiores tensões encontradas no modelo Mp.

7. REFERÊNCIAS

- 1 Belser UC, Magne P, Magne M. Ceramic laminate veneers: continuous evolution of indications. *J Esthet Dent* 1997;9:197-07.
- 2 Peumans M, DeMunck J, Fleuws S, et. A prospective ten-year clinical trial of porcelain veneers. *J Adhes Dent* 2004;6:65–76.
- 3 Fradeani M, Redemagni M, Corrado M. Porcelain laminate veneers: 6-to 12-year clinical evaluation – A retrospective study. *Int J Periodont Rest Dent* 2005;25:9-17.
- 4 Gürel G. Porcelain Laminate Veneers: Minimal Tooth Preparation by Design. *Dent Clin N Am* 2007;51:419-31.
- 5 Peumans M, Van Meerbeek B, Lambrechts P, Vanherle G. Porcelain veneers: a review of the literature. *J Dent* 2000;28:163-77.
- 6 Ausiello P, Rengo S, Davidson CL, Watts DC. Stress distributions in adhesively cemented ceramic and resin-composite Class II inlay restorations: a 3D-FEA study. *Dent Mater* 2004;20:862-872.
- 7 Addison O, Marquis PM, Fleming GJP. The impact of modifying alumina air abrasion parameters on the fracture strength of a porcelain laminate restorative material. *Dent Mater* 2007;23:1332-41.
- 8 Atsu SS, Kilicarslan MA, Kucukesmen HC, Aka S. Effect of zirconium-oxide ceramic surface treatments on the bond strength to adhesive resin. *J Prosthet Den* 2006; 95:430-6.
- 9 Kim B, Zhang Y, Pines M, Thompson VP. Fracture of porcelain-veneered structures in fatigue. *J Dent Res* 2007;86:42-6.
- 10 Magne P, Douglas WH. Additive contour of porcelain veneers: a key element in enamel preservation, adhesion, and esthetics for aging dentition. *J Adhes Dent*

- 1999;1:81-92.
- 11 Stokes AN, Hood JAA. Impact fracture characteristics of intact crown human central incisors. *J Oral Rehabilitation* 1993;20:89-95.
 - 12 Kina S e Brugera A. Invisível – restaurações estéticas cerâmicas. Maringá: Dental Press International, 2008, 420p.
 - 13 Fennis WMM, Kuijs RH, Barink M et al. Can internal stresses explain the fracture resistance of cusp-replacing composite restorations. *Eur J Oral Sci* 2005;113:443-448.
 - 14 Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E. (2001) Concepts and applications of finite element analysis. 542-573. New York: John Wiley e Sons.
 - 15 Rees JS, Hammadeh M. Undermining of enamel as a mechanism of abfraction lesion formation: a finite element study. *Eur J Oral Sci* 2004;112:347-52.
 - 16 Atmaram GH and Mohammed H. Estimation of physiologic stresses with a natural tooth considering fibrous PDL structure. *J. Dent. Rest*, 1981; 60:873-877.
 - 17 Dejak B, Mlotkowski A. Three-dimensional finite element analysis of strength and adhesion of composite resin versus ceramic inlays in molar. *J Prosthet Dent*, 2008;99:131-40.
 - 18 Tortopidis D, Lyons MF, Baxendale RH, et al. The variability of bite force measurement between sessions, in different positions within the dental arch. *J Oral Rehabil* 1998;25:681-6.
 - 19 Okeson JP. Management of temporomandibular disorders and occlusion. St. Louis: Mosby-Year Book, c1993, 624 p.
 - 20 Troedson M, Dérand T. Effect of margin design, cement polymerization and angle of loading on stress in porcelain veneers. *J Prosthet Dent* 1999;82:518-24.
 - 21 Zarone F, Sorrentino R, Apicella D, Valentino B, Ferrari M, Aversa R et al.

- Evaluation of the biomechanical behavior of maxillary central incisors restored by means of endocrowns compared to a natural tooth: a 3D static linear finite element analysis. *Dent Mater* 2006;22:1035-44.
- 22 Tunc EP. Finite element analysis of heat generation from different lightpolymerization sources during cementation of all-ceramic crowns. *J Prosthet Dent* 2007;97:368-74.
- 23 Aboush YE. Removing saliva contamination from porcelain veneers before bonding. *J Prosthet Dent* 1998;80:649-653.
- 24 Rouse JS. Full veneer versus traditional veneer preparation: a discussion of interproximal extension. *J Prosthet Dent* 1997;78(6):545-549.

8. ANEXOS

As figuras utilizadas para a realização do presente estudo estão aqui relacionadas. Os modelos foram separados de acordo com as características citadas anteriormente com os mapas de tensão gerais e estruturas individualizadas.

A apresentação dos modelos segue a ordem seguinte:

Modelo Mp (com proteção parcial de cúspide)

Modelo Mt (com proteção total de cúspide)

Modelo Mp

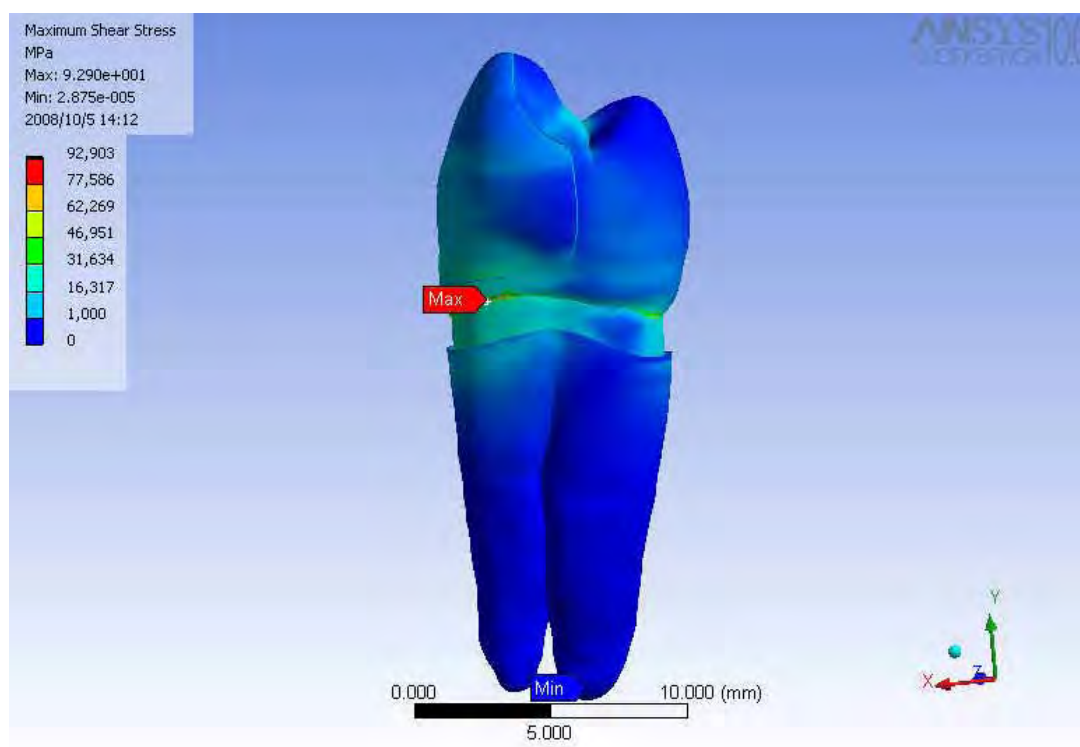


Figura 6 - Mapa geral das tensões de cisalhamento para o Mp.

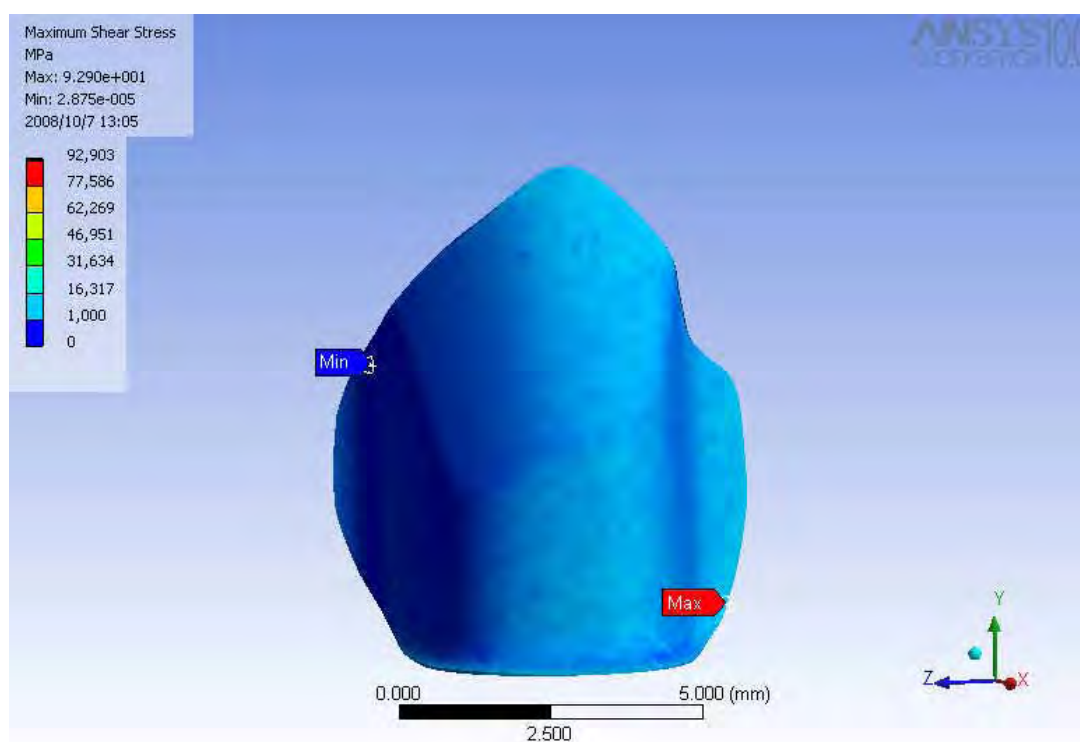


Figura 7 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor das tensões de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mp.

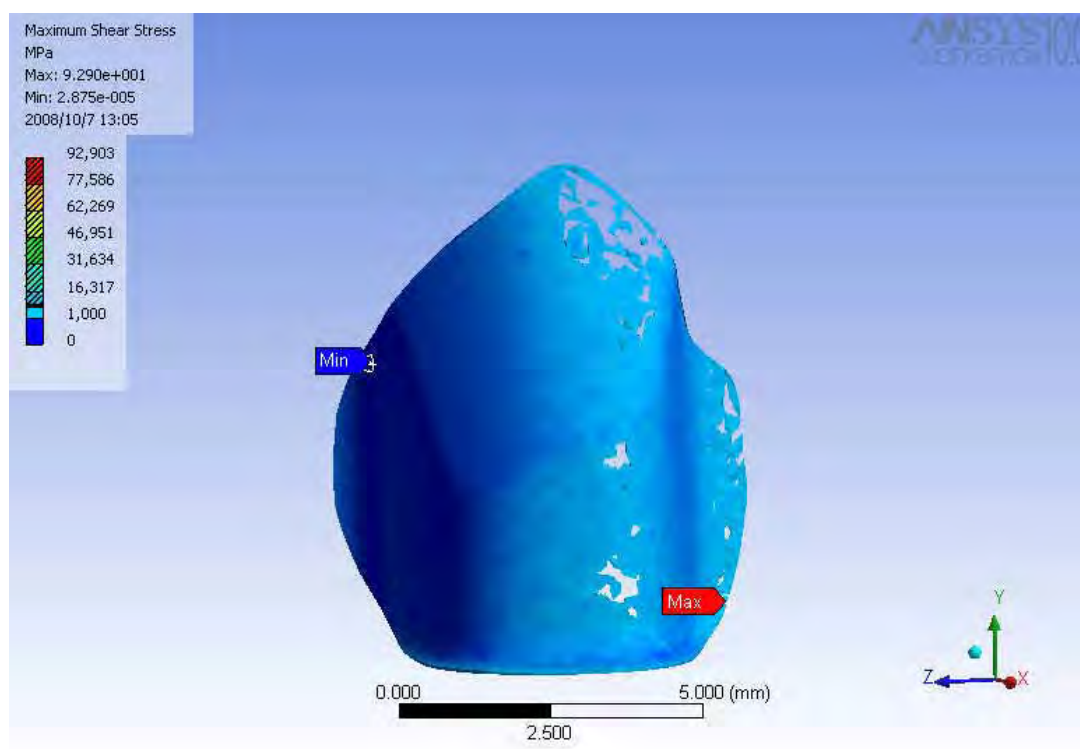


Figura 8 - Mapa individualizado com o maior valor da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mp.

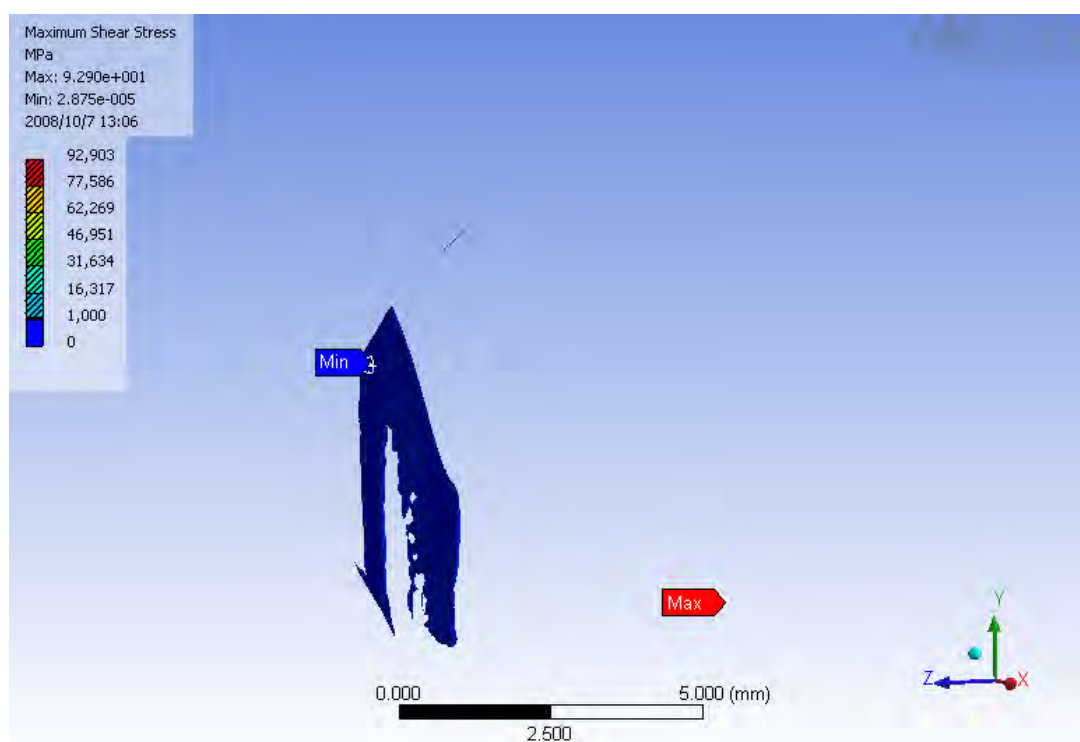


Figura 9 - Mapa individualizado com o menor valor da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mp.

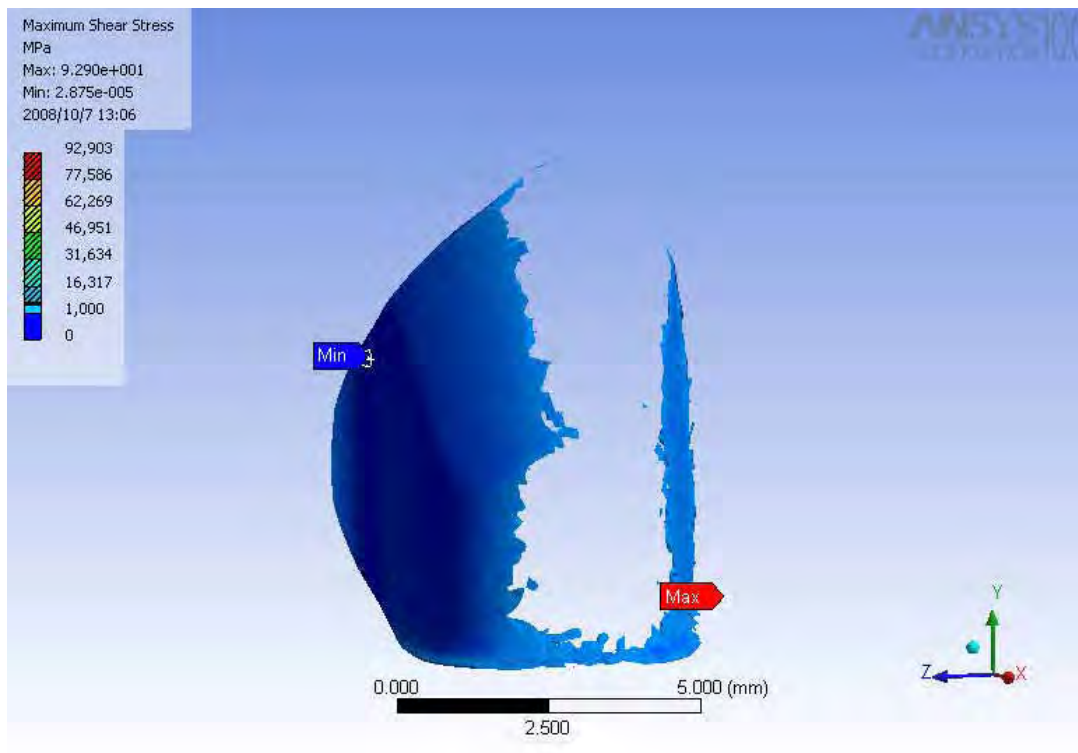


Figura 10 - Mapa individualizado da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso no Mp.

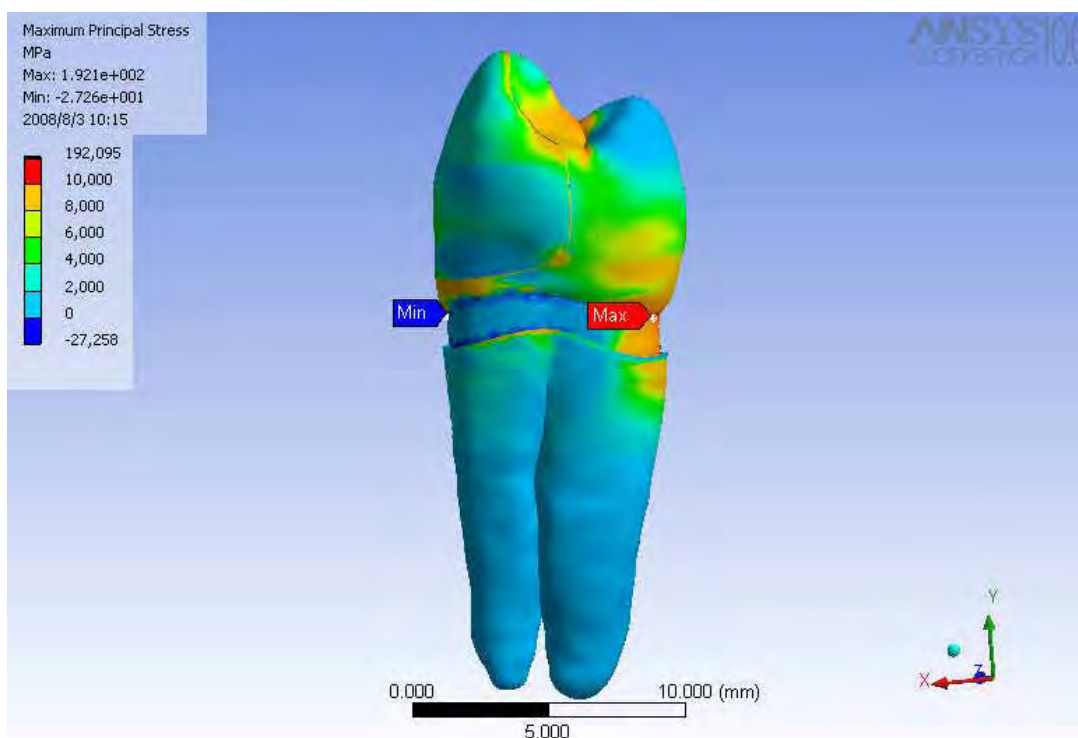


Figura 11 – Mapa geral da tensão máxima principal ($\sigma_{\max}$) para o Mp.

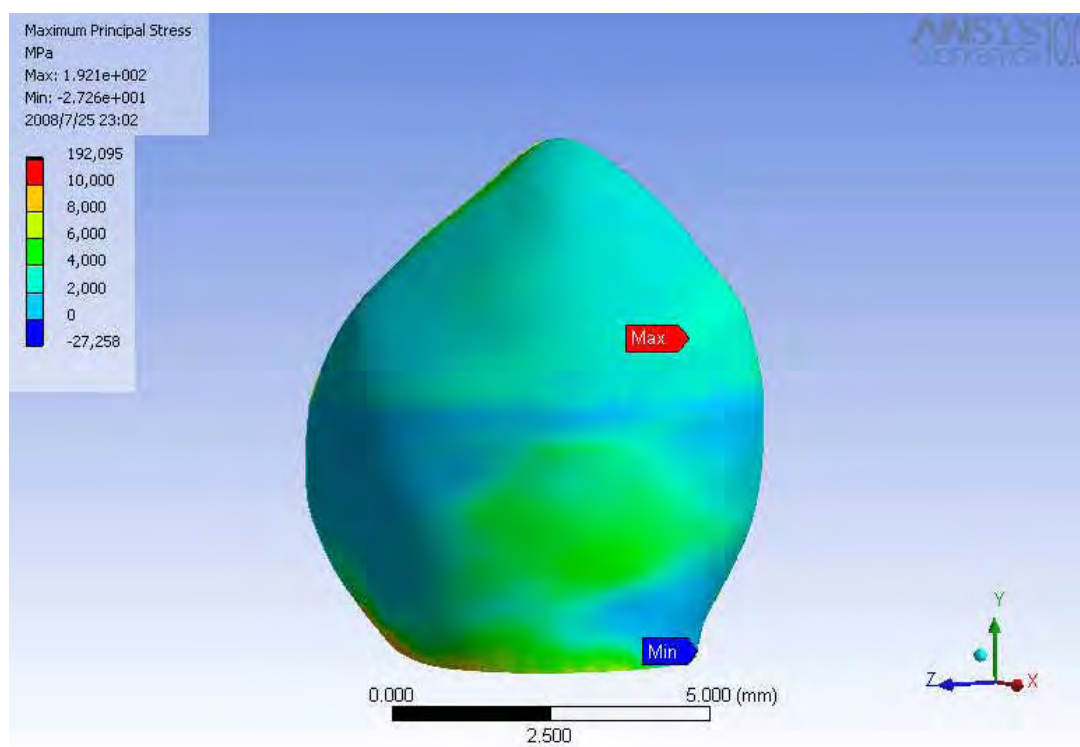


Figura 12 – Mapa individualizado com o menor e o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mp.

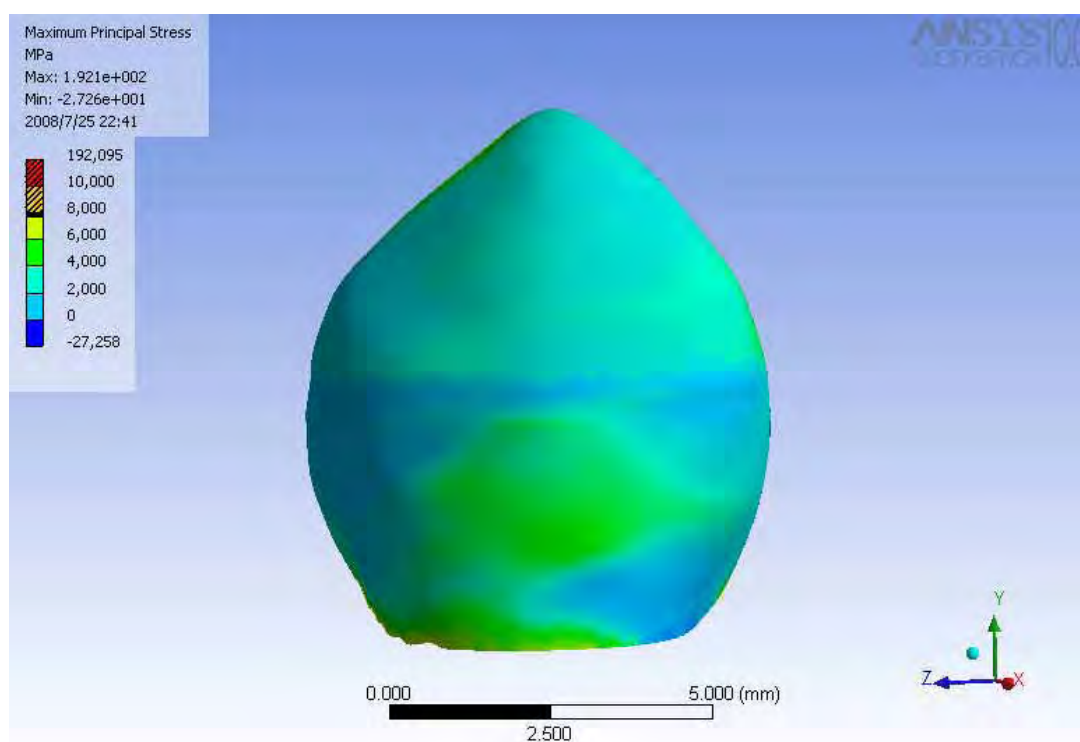


Figura 13 – Mapa individualizado com o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mp.

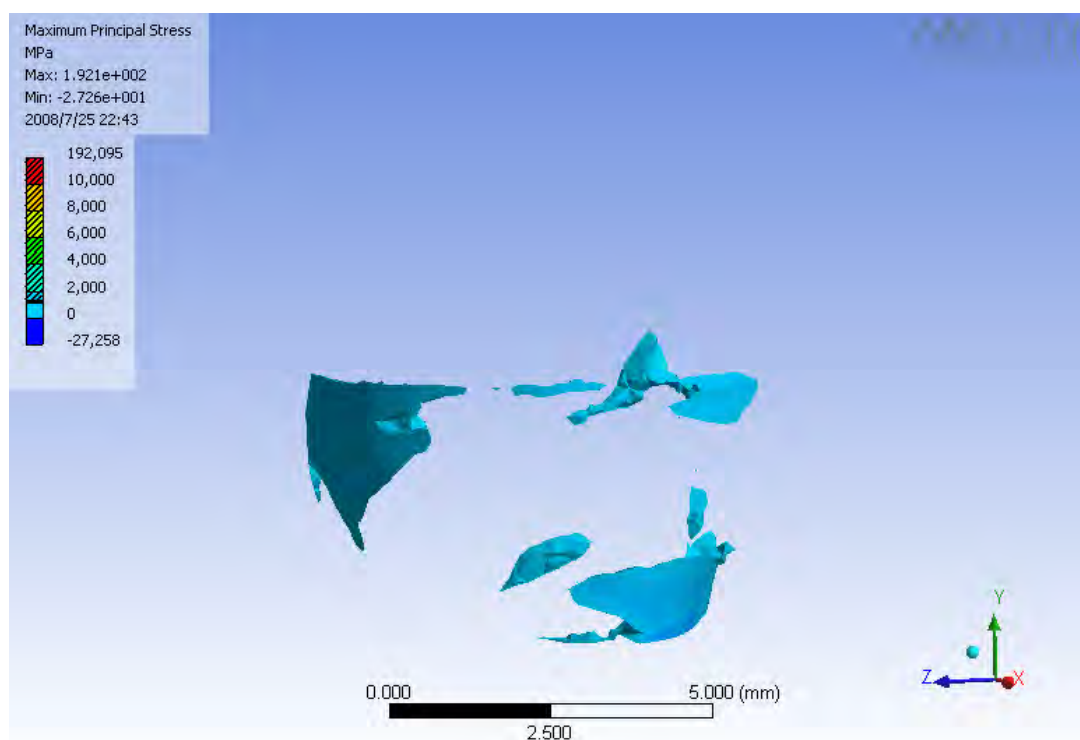


Figura 14 - Mapa individualizado com o menor valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mp.

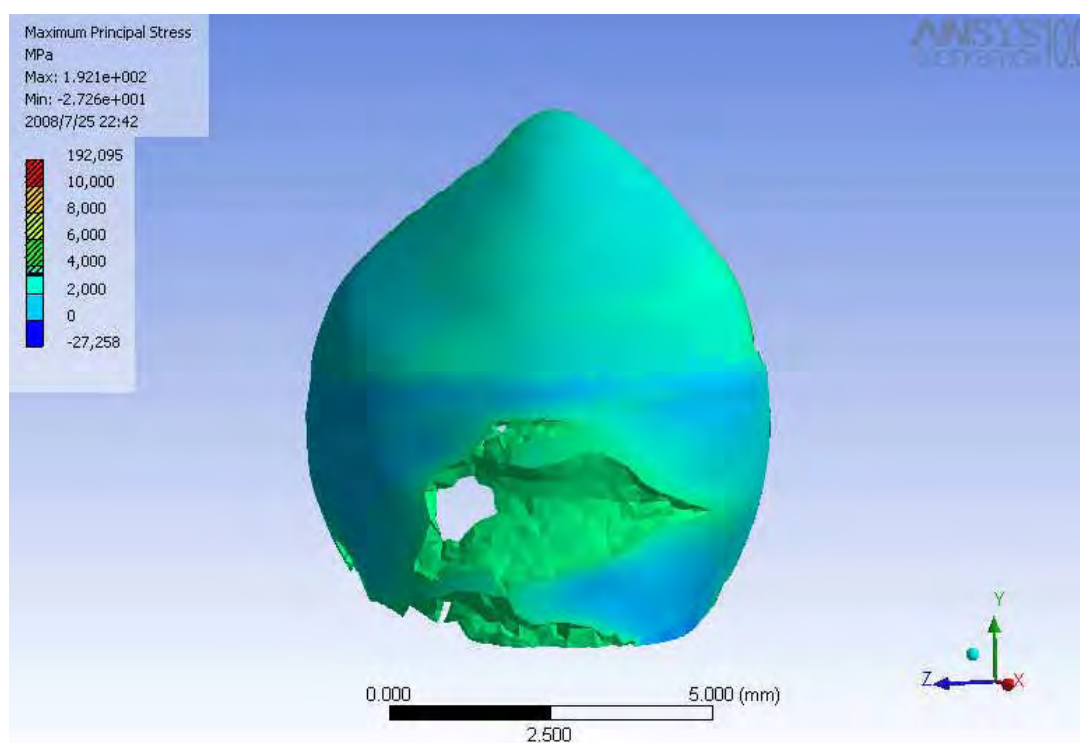


Figura 15 - Mapa individualizado da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mp.

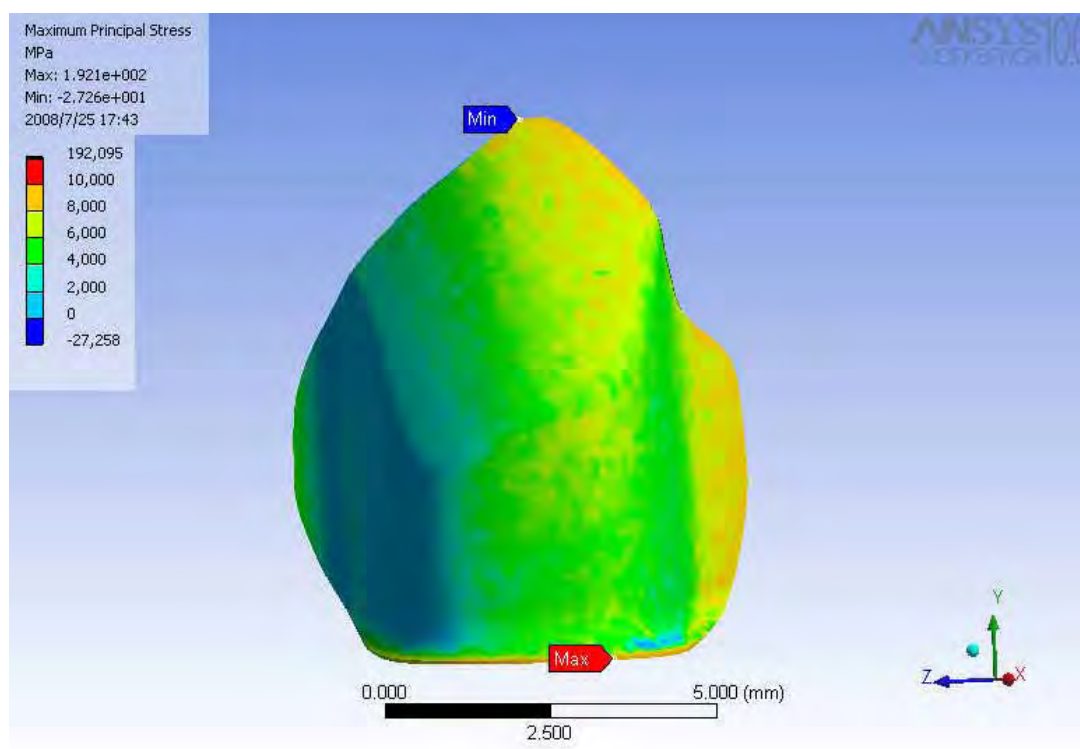


Figura 16 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mp.

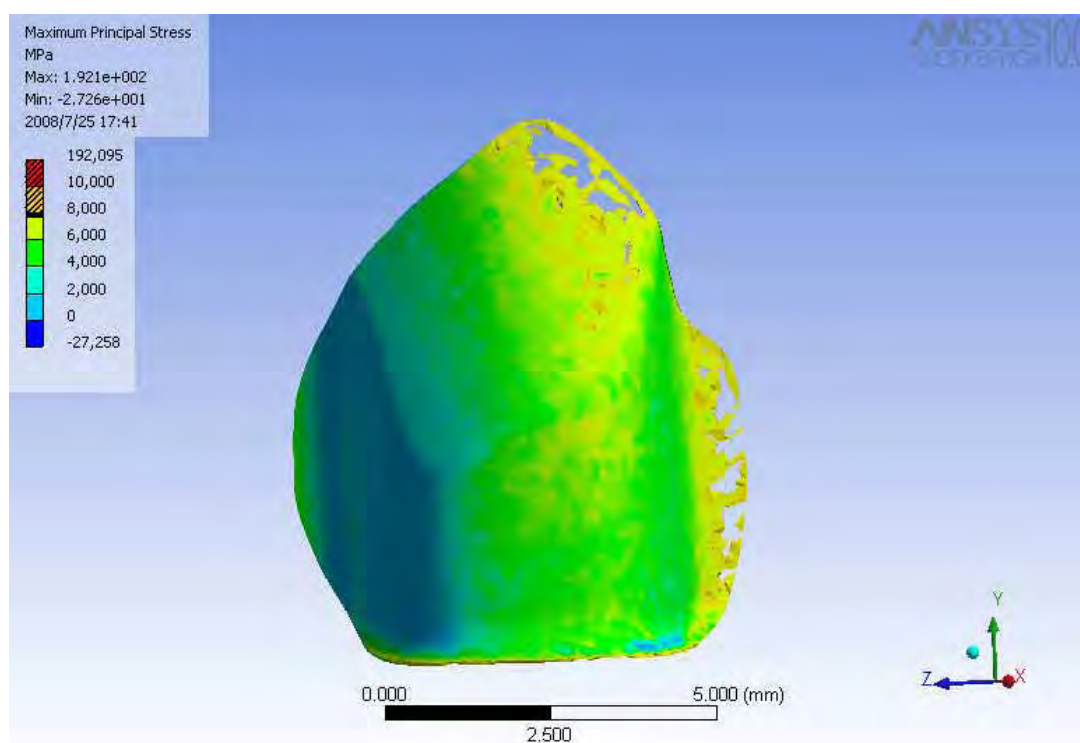


Figura 17 - Mapa individualizado com o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mp.

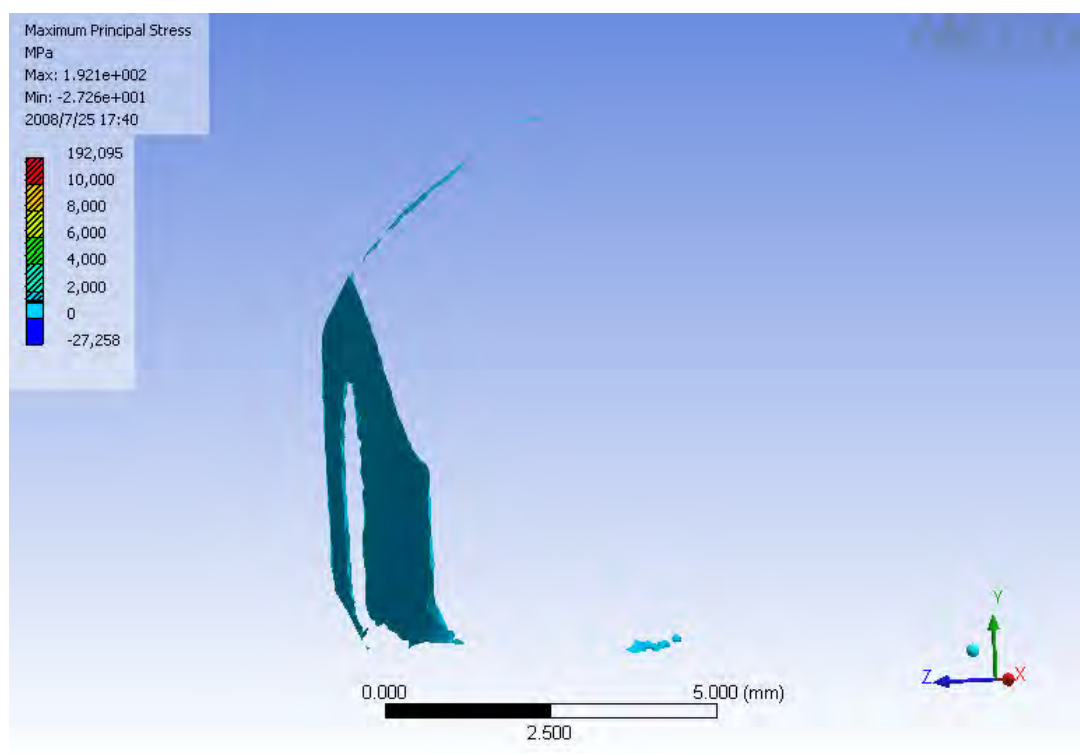


Figura 18 - Mapa individualizado com o menor valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mp.

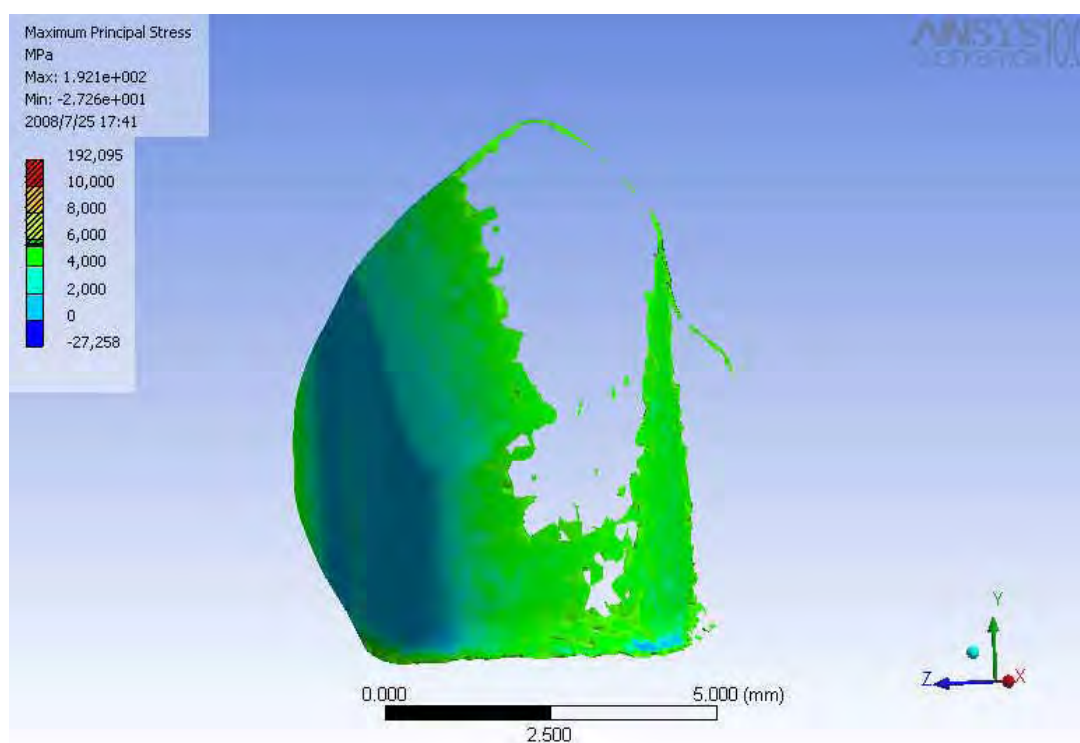


Figura 19 - Mapa individualizado da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mp.

Modelo Mt

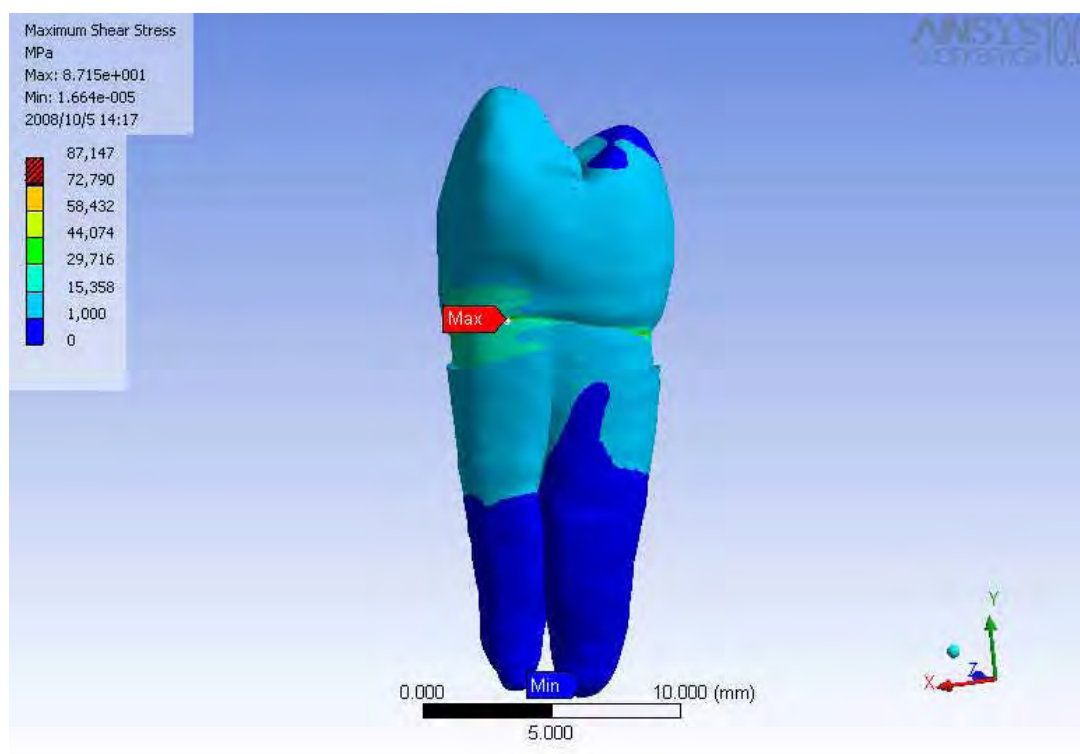


Figura 20 - Mapa geral das tensões de cisalhamento para o Mt.

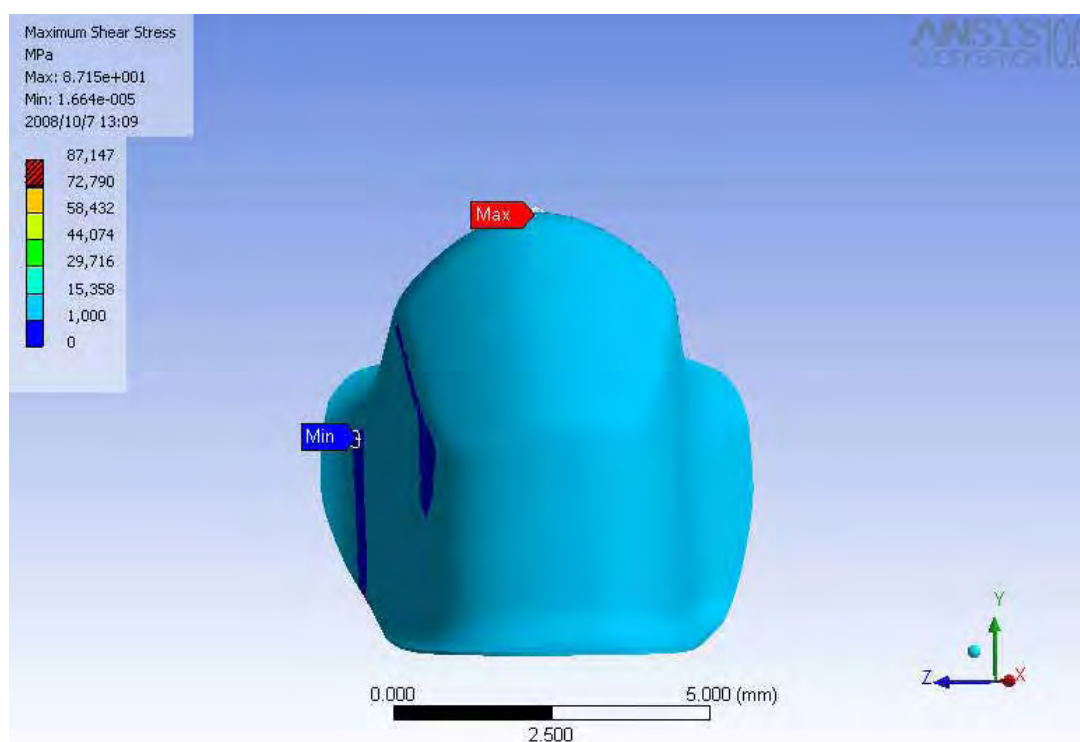


Figura 21 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor das tensões de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mt

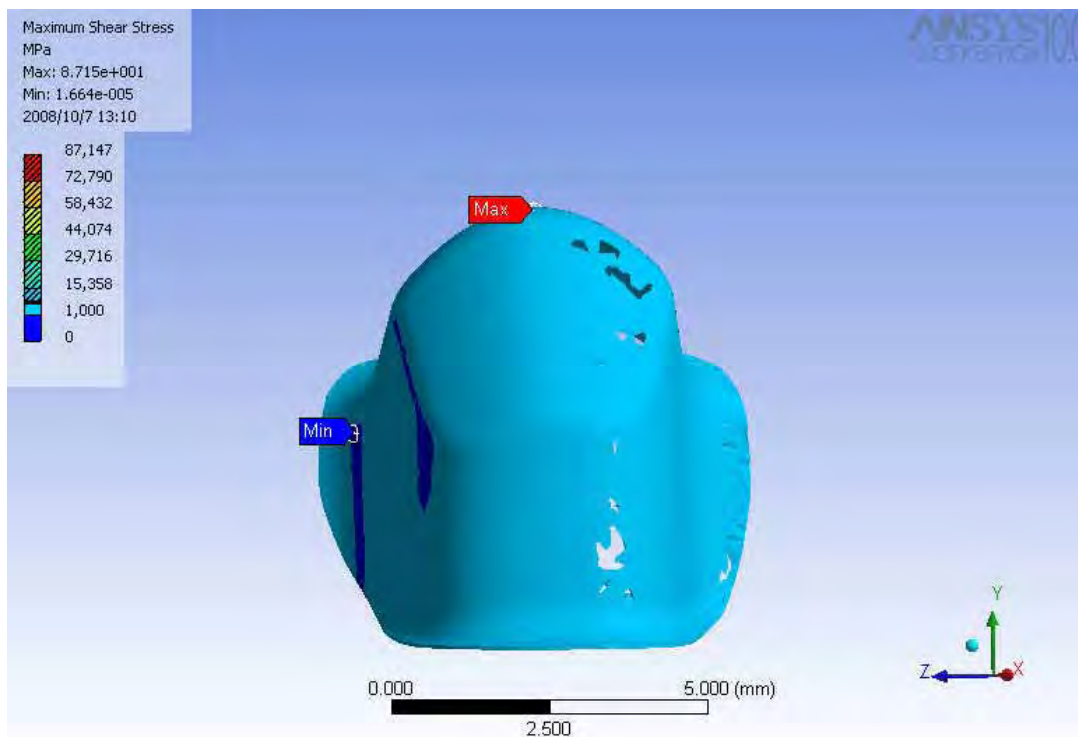


Figura 22 - Mapa individualizado com o maior valor da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mt

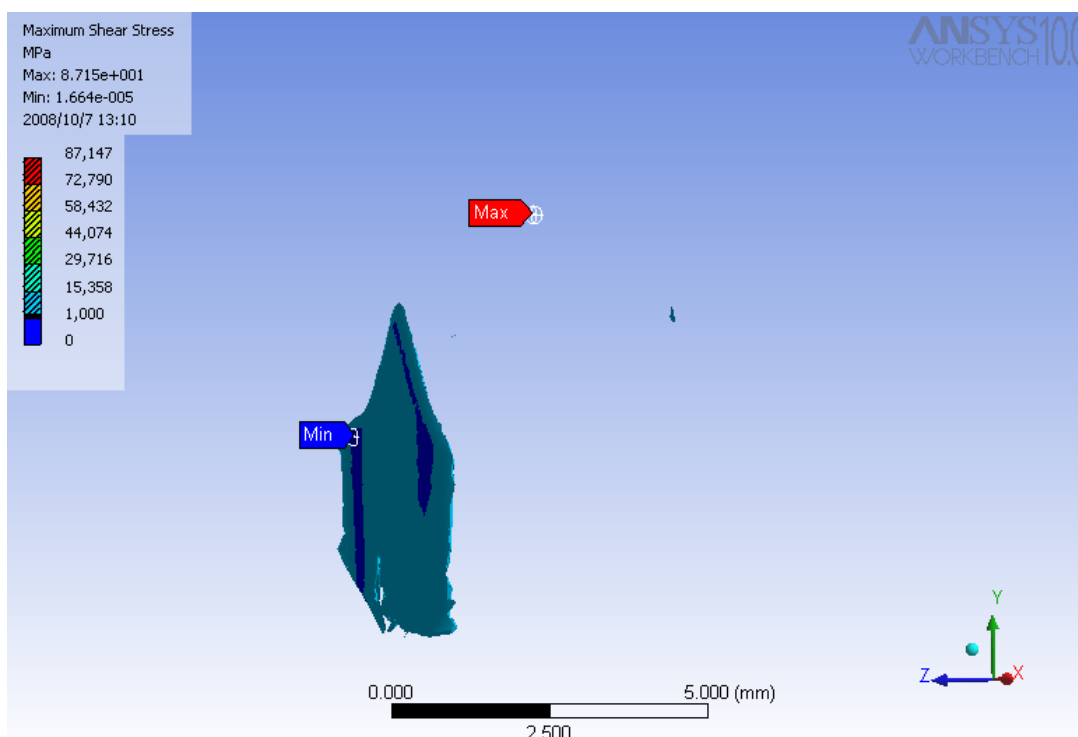


Figura 23 - Mapa individualizado com o menor valor da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso do Mt.

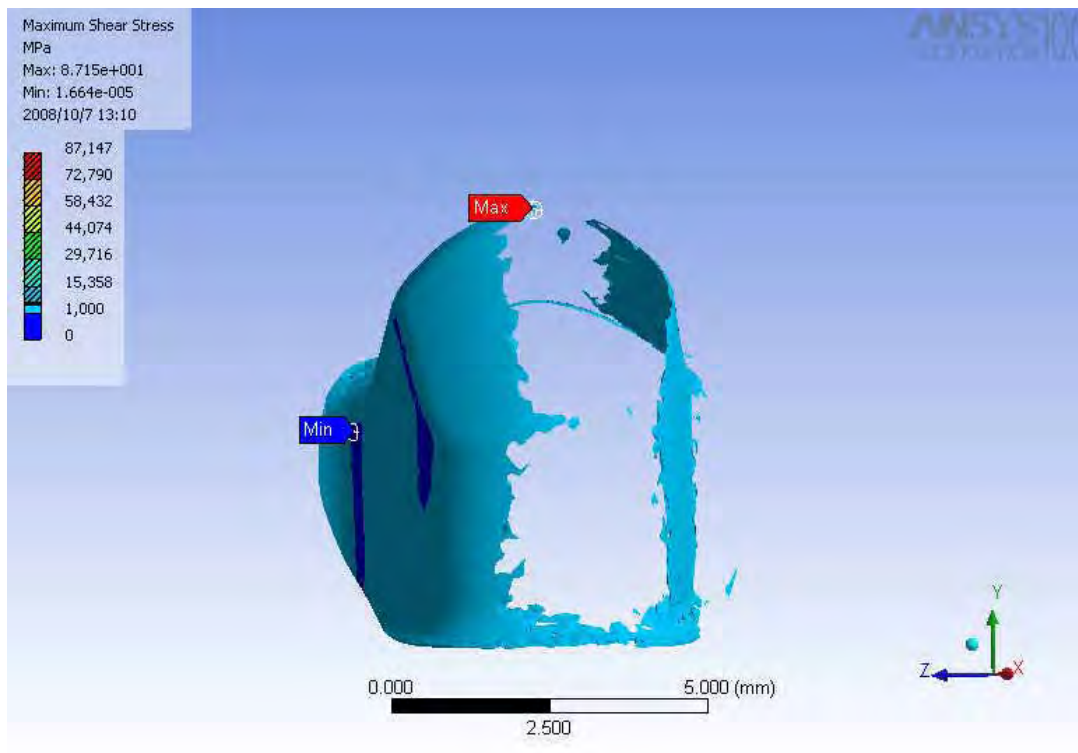


Figura 24 - Mapa individualizado da tensão de cisalhamento observado na camada de cimento resinoso no Mt.

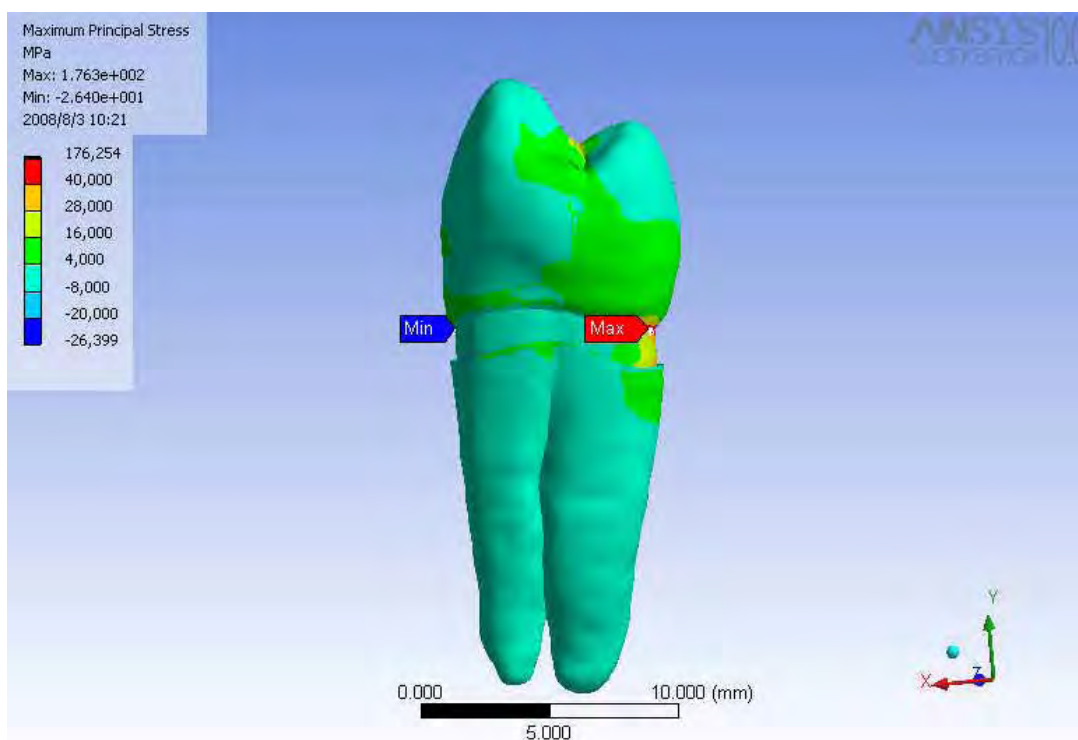


Figura 25 - Mapa geral da máxima tensão principal ($\sigma_{\max}$) para o Mt.

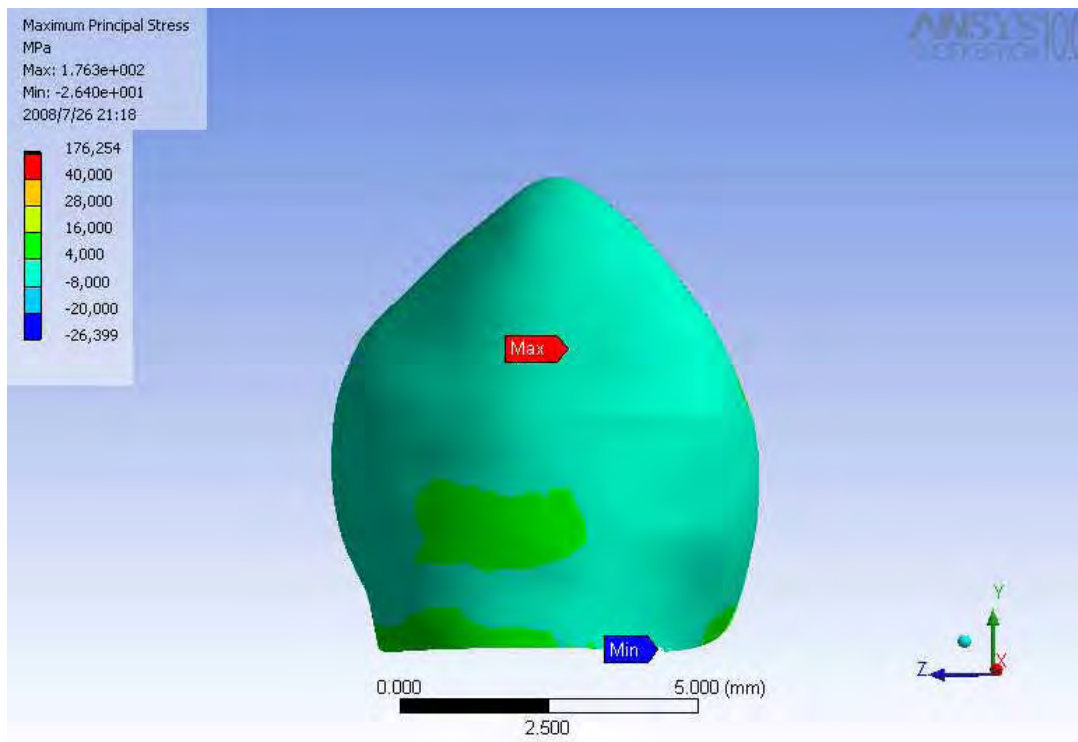


Figura 26 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mt.

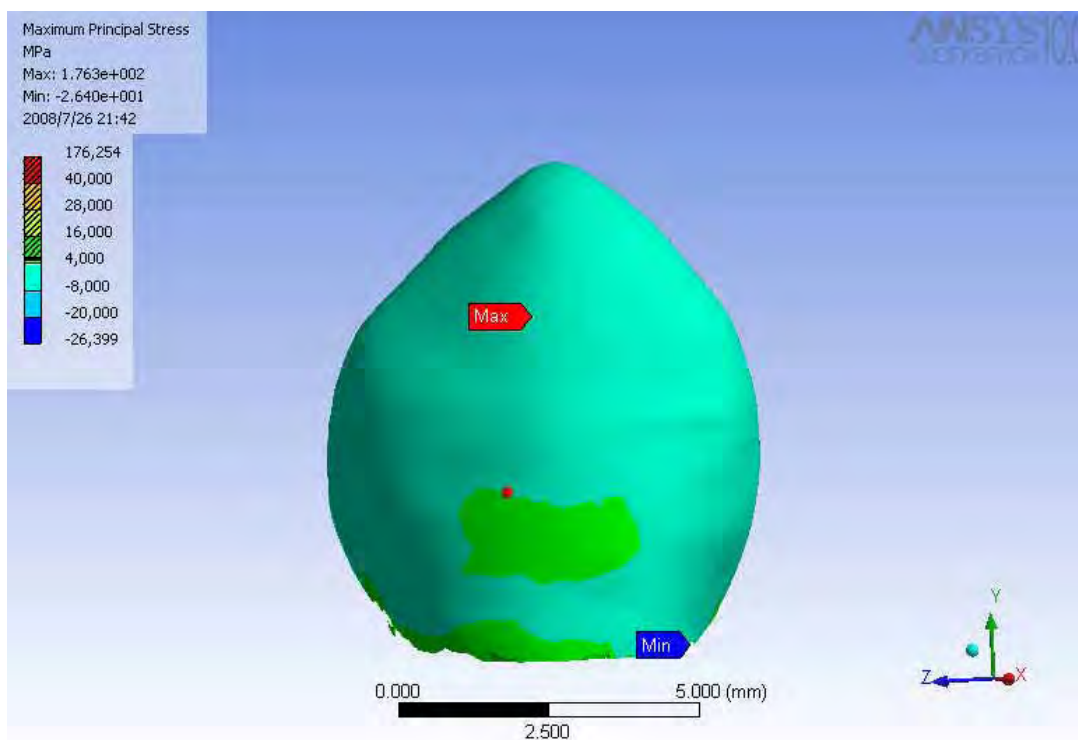


Figura 27 - Mapa individualizado com o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mt.

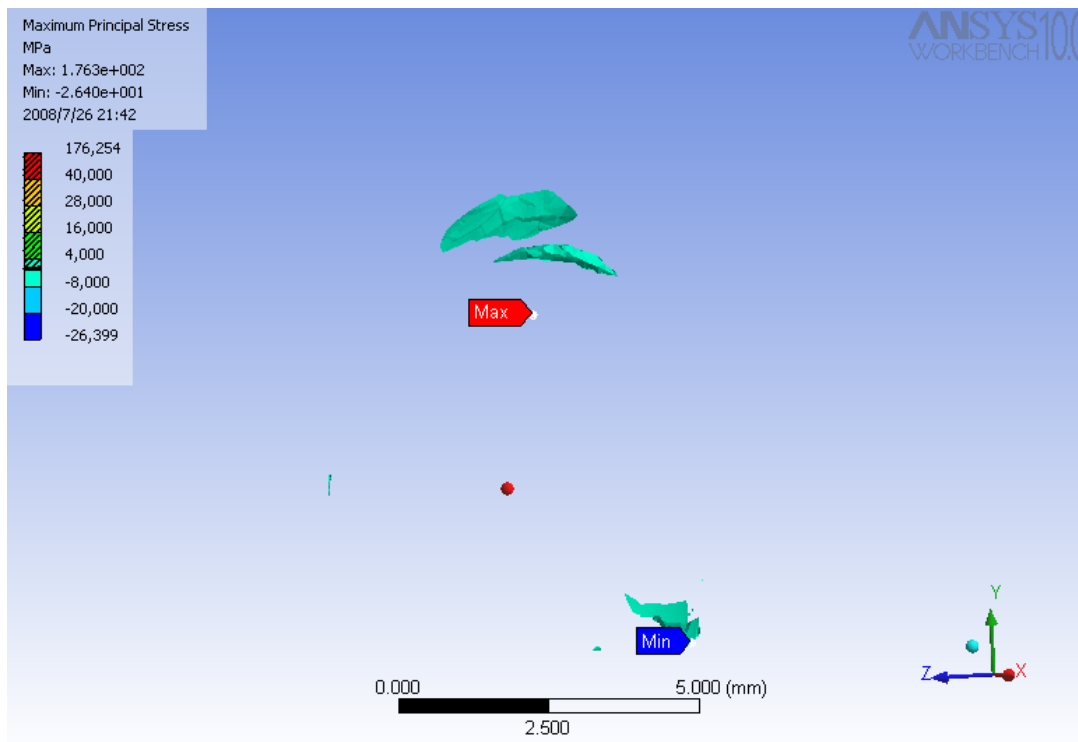


Figura 28 - Mapa individualizado com o menor valor da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mt.

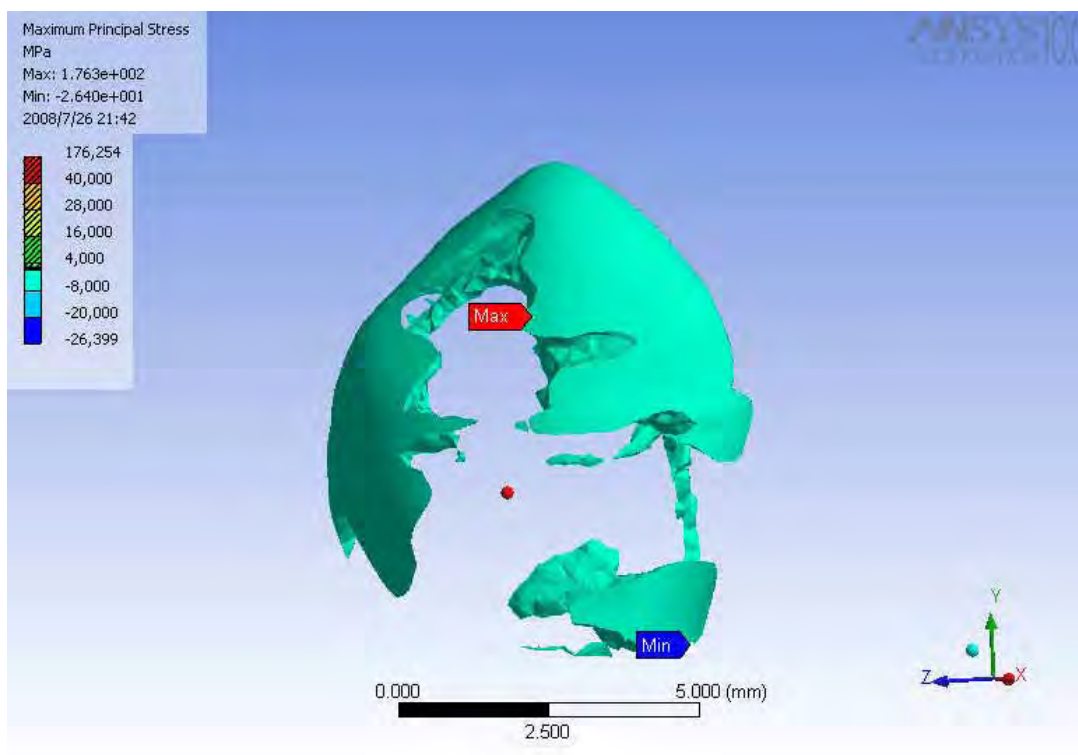


Figura 29 - Mapa individualizado da $\sigma_{\max}$ observado na lâmina de cerâmica do Mt.

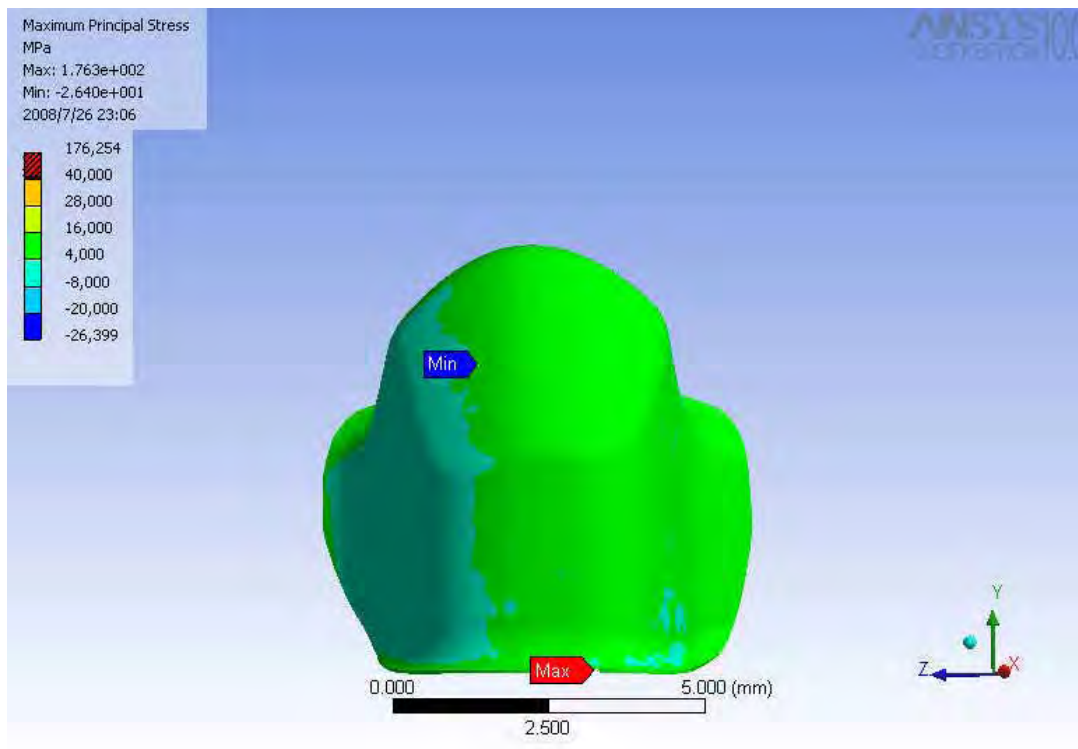


Figura 30 - Mapa individualizado com o menor e o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mt.

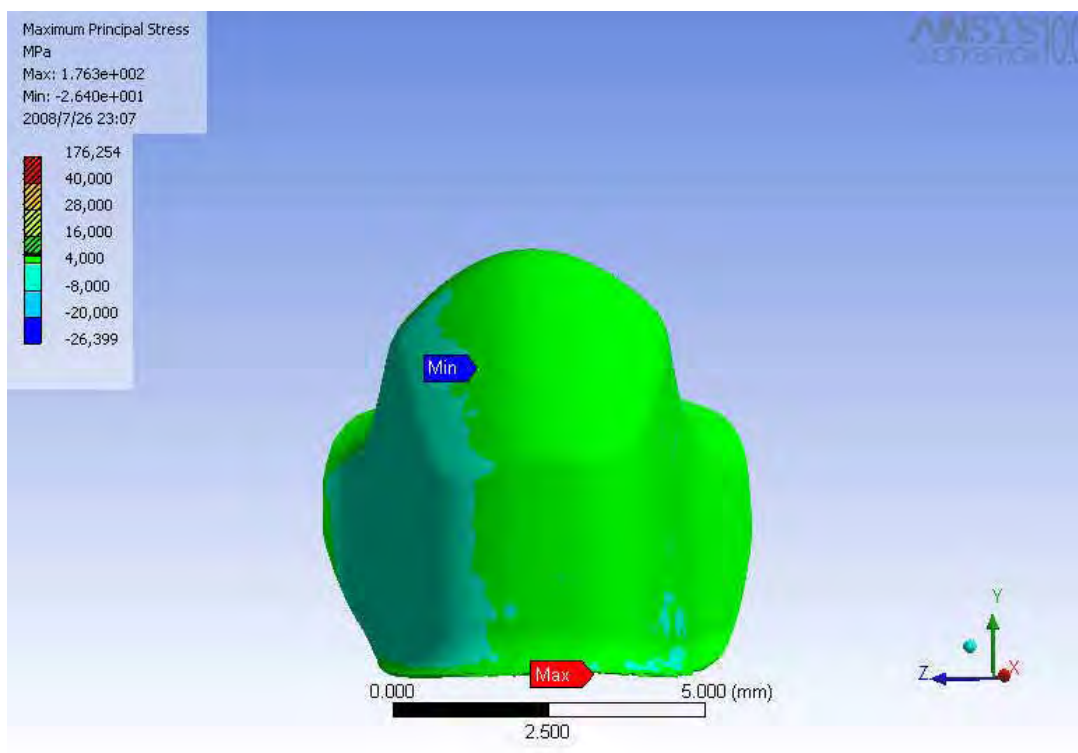


Figura 31 - Mapa individualizado com o maior valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mt.

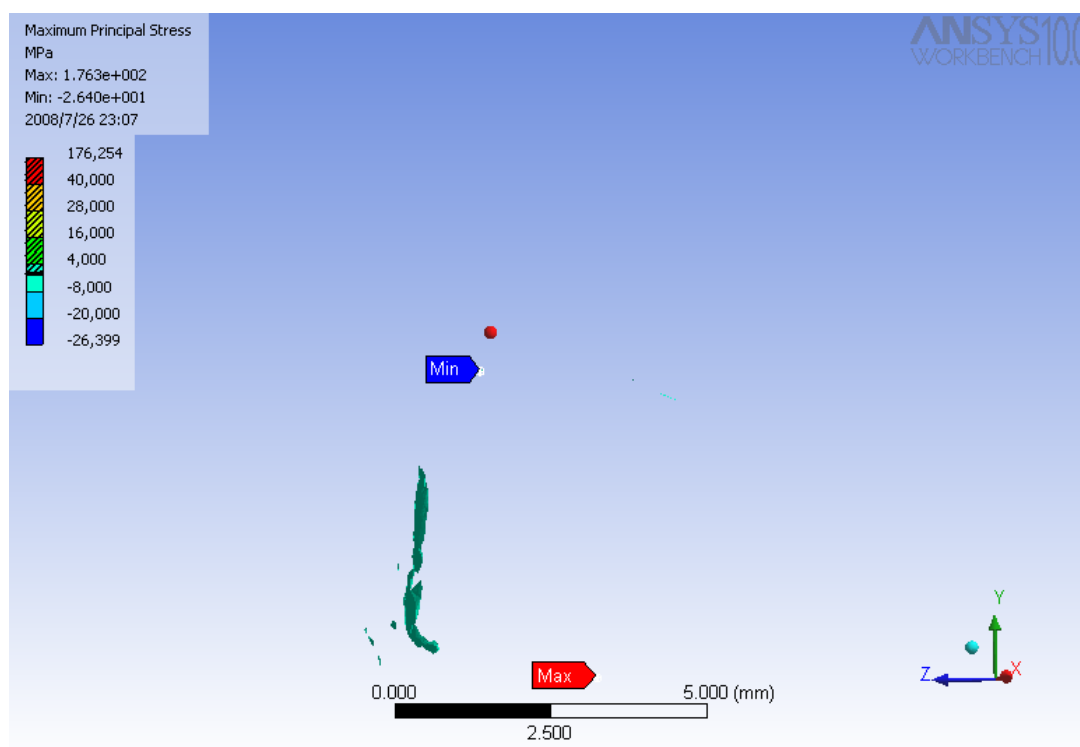


Figura 32 - Mapa individualizado com o menor valor da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mt.

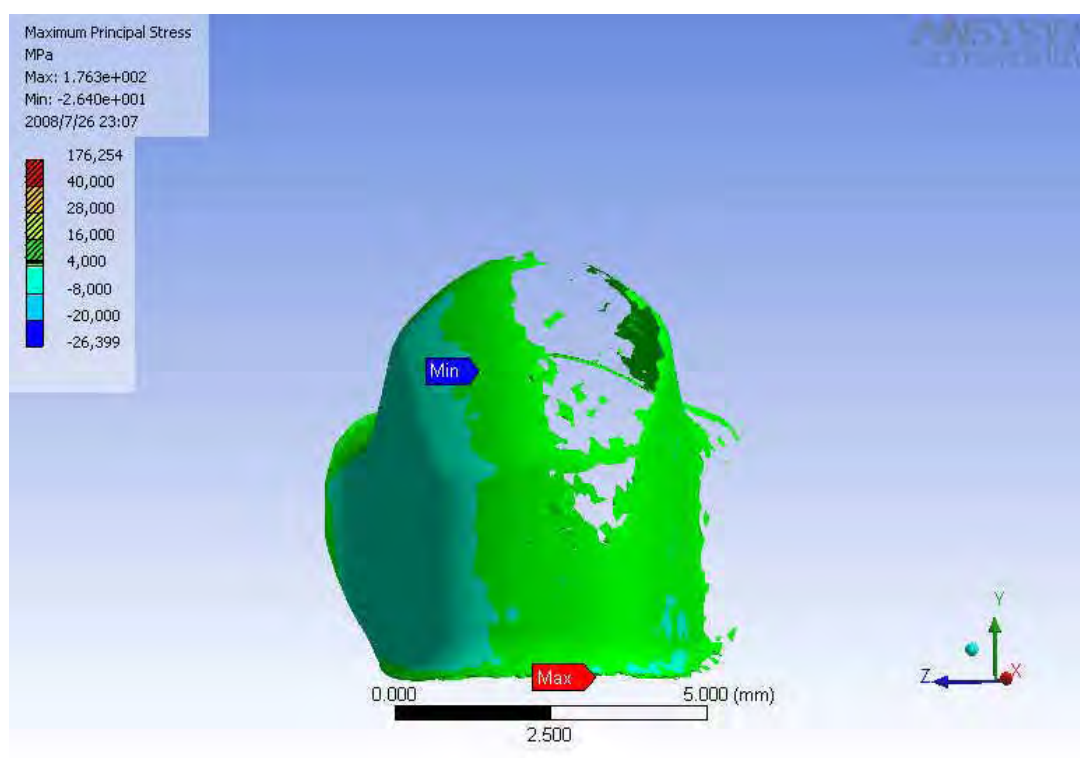


Figura 33 - Mapa individualizado da $\sigma_{\max}$ observado na camada de cimento do Mt.