



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Miguel António Mendes Pinto Monteiro Poço

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DE JUNTAS COLADAS DE
MATERIAIS DISSIMILARES**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na área de Produção e Projeto orientada pela Professora Doutora Maria Augusta Neto e pelo Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

Setembro de 2022

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Avaliação Numérica da Resistência Mecânica de Juntas Coladas de Materiais Dissimilares

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Numerical Evaluation of the Mechanical Strength of Bonded Joints of Dissimilar Materials

Autor

Miguel António Mendes Pinto Monteiro Poço

Orientadores

Professora Doutora Maria Augusta Neto

Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco

Júri

	Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes
Presidente	Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra
	Professora Doutora Maria Augusta Neto
Orientador	Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
	Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro
	Professora Auxiliar com Agregação da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Rui Isidro Falacho da Fonseca Almeida
	Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2022

Obstacles don't have to stop you. If you run into a wall, don't turn around and give up. Figure out how to climb it, go through it, or work around it.

Michael Jordan.

Aos meus pais, família e amigos.

Agradecimentos

A realização desta dissertação marca o final do meu ciclo académico, não podendo deixar de agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente me apoiaram na concretização de todos os objetivos.

Começo por agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Maria Augusta Neto, que sem a ajuda dela a realização deste trabalho não teria sido possível. Deixo o meu agradecimento por todo o apoio, disponibilidade, motivação e conhecimentos transmitidos não só no desenvolvimento deste estudo, mas também ao longo destes anos que frequentei a Universidade de Coimbra.

Um agradecimento especial aos meus pais, Paulo e Cristina, por tudo o que fizeram por mim ao longo destes cinco anos, todo o apoio, motivação e compreensão nos momentos mais difíceis desta etapa. Gostaria de agradecer também ao meu irmão Rodrigo e restante família, avós e tios, por me darem força e acreditarem sempre nas minhas capacidades em qualquer circunstância.

Aos meus colegas de faculdade, que se tornaram grandes amigos, o meu eterno obrigado pelos momentos incríveis vividos em Coimbra e pela paciência, ajuda e conselhos durante os momentos menos bons. Levo-os comigo para a vida.

Aos meus amigos da Guarda, por terem estado presentes sempre que possível, por todos os momentos que passámos juntos e por todos os que iremos ainda passar.

Por fim, um agradecimento ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) por todos os conhecimentos adquiridos, que serão extremamente úteis no mercado de trabalho e à cidade de Coimbra que me acolheu durante todos estes anos, à qual irei deixar sempre muita saudade.

Resumo

O objetivo principal desta dissertação consiste na avaliação numérica da resistência mecânica de juntas coladas nas restaurações dentárias. Atendendo à grande variedade de materiais, formas de restauração e tipo de adesão que podem ser utilizados na restauração dentária, têm sido desenvolvidos vários estudos que visam reduzir a possibilidade da rotura da restauração do dente e melhorar o seu procedimento.

Na presente dissertação irão ser apresentados os resultados de três análises numéricas. Numa primeira análise (convergência), é estudada a influência da alteração do tamanho de elemento nos resultados dos deslocamentos e das tensões máximas. Na segunda análise (não linear), são avaliados os resultados obtidos considerando duas situações diferentes: dentina isotrópica e linear e dentina não linear. Por fim, é feita uma comparação do desempenho de três colas diferentes aplicadas no provete.

O estudo centrou-se na modelação de modelos geométricos de provetes compostos por dentina, cola e compósito, usando o programa comercial de elementos finitos ADINA®. Para cada simulação numérica, o provete encontra-se totalmente encastrado numa extremidade e com uma carga axial na outra extremidade.

Com os resultados, foi possível concluir que, quanto menor o tamanho do elemento, obtém-se resultados mais próximos de outros estudos e que há diferenças nos resultados alterando o comportamento da dentina. Cada cola, apresenta instantes de rotura e valores de tensão máxima diferentes. A cola Optibond Solo Plus é a que apresenta melhores resultados.

Palavras-chave: Restauração Dentária, Elementos Finitos, Dentina, Cola, Tensão.

Abstract

The main objective of this dissertation consisted in the numerical evaluation of the mechanical strength of bonded joints in dental restorations. Given the wide variety of materials, restorations and adhesive types can be used in dental restoration, several studies have been developed to reduce the possibility of rupture of the tooth restoration and improve its procedure.

In this dissertation the results of three numerical analyses will be presented. The study focused on the modeling of geometric models of specimens composed of dentin, adhesive and composite, using the finite elements commercial program ADINA®. For each numerical simulation the specimen is fully attached at one end and axially loaded at the other end.

In the first analysis (convergence), the influence of changing the element size on the results of maximum displacements and stresses is studied. In the second analysis (non-linear), the results obtained considering two different situations are evaluated: isotropic, linear dentin and non-linear dentin. Finally, a performance comparison of three different adhesives applied to the specimen is made.

With the results, it was possible to conclude that as the element size becomes smaller, the numerical result becomes closer to the results obtained in other studies. Also, there is little difference in the results, in terms of changing the behaviour of the dentin. Each adhesive presents different failure instants and maximum stress values. The Optibond Solo Plus adhesive gives the best results.

Keywords: Dental Restoration, Finite Elements, Dentin, Adhesive, Stress.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia	xiii
Siglas	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Estrutura da Dissertação	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Introdução às Juntas Coladas	3
2.2. Resistência das Juntas Coladas	4
2.3. Adesivos e as suas Propriedades	6
2.4. Estrutura e Composição do Dente	7
2.5. Restaurações Dentárias	10
2.5.1. Restauração Direta	10
2.5.2. Restauração Indireta	11
2.6. Adesão nas Restaurações Dentárias	12
2.7. Avaliação da Resistência de Restaurações Dentárias	13
3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO	15
3.1. Metodologia Numérica	16
3.2. Validação do Modelo Numérico	16
3.3. Modelação dos Parâmetros	17
3.3.1. Materiais Utilizados nos Modelos	18
3.3.2. Condições de Apoio	20
3.3.3. Solicitações Aplicadas	21
3.4. Análise de deslocamentos e tensões	21
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	23
4.1. Análise de Convergência	23
4.2. Análise Não Linear	25
4.2.1. Análise de Deslocamentos	25
4.2.2. Análise de Tensões	27
4.3. Comparação de várias colas	29
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	33
5.1. Proposta para Trabalhos Futuros	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
APÊNDICE A – Composição dos materiais	39
APÊNDICE B – Seleção dos nós na interface	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de esforços existentes em juntas coladas[8].....	4
Figura 2.2. Modos de rotura em juntas coladas [9]	5
Figura 2.3. Identificação dos Dentes [15].....	8
Figura 2.4. Composição do Dente Humano[16].....	9
Figura 2.5. Classificação e estratégias adesivas [28].....	13
Figura 3.1. Esquema da metodologia numérica desenvolvida para o estudo	16
Figura 3.2. Modelo geométrico do provete.	17
Figura 3.3. Representação da malha utilizada nos modelos	18
Figura 3.4. Diagrama tensão-deformação da dentina [33].	19
Figura 3.5. Diagrama tensão-deformação da cola	20
Figura 3.6. Condições de fronteira aplicadas no conjunto	20
Figura 3.6. Carregamento na estrutura na análise de convergência	21
Figura 4.1. Vários tamanhos de elementos na cola utilizados na análise de convergência: a) 0,05 mm; b) 0,04 mm; c) 0,03mm; d) 0,02mm; e) 0,01mm	23
Figura 4.2. Localização da tensão máxima na estrutura.....	25
Figura 4.3. Distribuição do deslocamento segundo a direção do eixo y da estrutura considerando a dentina como linear e isotrópica.....	26
Figura 4.4. Distribuição do deslocamento na direção do eixo y da estrutura com a lei de comportamento não linear da dentina.....	26
Figura 4.5. Distribuição das tensões no provete, considerando a dentina isotrópica e linear.	27
Figura 4.6. Distribuição das tensões no provete, considerando a dentina com comportamento não linear.	28
Figura 4.7. Comparação da variação da tensão de von Mises na interface dentina-cola ...	29
Figura 4.8. Distribuição das tensões para as diferentes colas: a) Clearfil S3 Bond Plus; b) Clearfil SE Bond; c) Optibond Solo Plus	30
Figura 4.9. Comparação da variação da tensão de von Mises na interface dentina-cola nas diferentes colas em estudo.....	32
Figura B.1. Nós selecionados (a preto) para o estudo da variação da tensão na interface. .	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades dos materiais poliméricos [11].....	7
Tabela 3.1. Esquema representativo da classificação dos tipos de fratura. R- Resina composta; D - dentina.....	15
Tabela 3.2. Propriedades dos materiais utilizados utilizado.....	19
Tabela 4.1. Comparação dos parâmetros para diferentes tamanhos de malha.	24
Tabela 4.2. Propriedades das diferentes colas.	29
Tabela 4.3. Comparação do desempenho das diferentes colas.....	31
Tabela A.1. Composição química da dentina [17].	39
Tabela A.2. Composição química do adesivo[1].....	39
Tabela A.3. Composição química do compósito.....	40

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

ν – Coeficiente de Poisson

Y – Coordenada Horizontal Global

Z – Coordenada Vertical Global

E – Módulo de Elasticidade

σ_c – Tensão Normal de cedência

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MEF – Método dos Elementos Finitos

TAST – *Thick Adherent Shear Test*

1. INTRODUÇÃO

A utilização de colas, enquanto elementos de ligação, tem aumentado nos últimos anos na indústria. Este aumento está associado ao baixo custo, redução de peso (comparativamente a outros materiais) e possibilidade de união de materiais dissimilares. As colas têm também diversas aplicações na indústria dentária, nomeadamente, para restaurações dentárias. Este procedimento foca-se na conservação da estrutura dos dentes usando colas e materiais restauradores. O sistema de adesivos proporciona uma ligação douradora entre o compósito, a dentina e o esmalte [1].

O princípio fundamental da adesão ao substrato dentário é baseado numa troca, onde a matéria inorgânica do dente é substituída pela resina adesiva. Este processo envolve duas fases. A primeira fase consiste na remoção de fosfatos de cálcio, havendo uma exposição de microporosidades nas superfícies do esmalte e da dentina. Numa segunda fase, ocorre a hibridização, que envolve a infiltração da resina adesiva pelas microporosidades já formadas, seguida da sua polimerização [2]. O maior desafio dos sistemas adesivos reside em promover uma adesão à dentina com uma eficácia e durabilidade idêntica à do esmalte [3].

Assim, este trabalho visa avaliar e estudar as forças de adesão nas interfaces adesivas desenvolvidas nos sistemas dentários. Uma vez que a avaliação da distribuição de tensões nas restaurações dentárias é muito difícil, devido à sua geometria complexa, neste trabalho utiliza-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual é uma ferramenta importante e frequentemente utilizada, pois possibilita a obtenção de respostas para inúmeros problemas complexos de engenharia. Este permite modelar estruturas com geometrias complexas, considerando as suas propriedades mecânicas reais [4].

1.1. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste na avaliação numérica pelo MEF de juntas coladas utilizadas nas reconstruções dentárias. Nesta análise pretende-se avaliar onde surgem as maiores tensões num provete. Neste sentido, com base na modelação numérica, foram desenvolvidos modelos geométricos com o objetivo de perceber a influência do tamanho de elementos nos resultados e como as diferentes características dos materiais

utilizados podem afetar os resultados obtidos. Por fim, foi feita uma comparação de três colas utilizadas na medicina dentária.

O estudo numérico foi realizado usando o programa comercial ADINA®, que possui elementos coesivos que simulam a ligação adesiva entre o compósito e o dente.

1.2. Estrutura da Dissertação

A dissertação, a fim de alcançar os objetivos referidos, está dividida em cinco capítulos, sendo este da introdução o primeiro. O capítulo 2 é composto pela revisão bibliográfica, de forma a abordar alguns conceitos teóricos sobre as juntas coladas, as restaurações dentárias, os adesivos e as suas propriedades. No capítulo 3 é desenvolvida e apresentada a metodologia implementada para a obtenção dos resultados numéricos. No capítulo 4 é feita a análise e discussão dos resultados obtidos. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões desta dissertação e são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se a informação essencial adquirida pela leitura de documentos existentes na literatura. Numa primeira fase é feita uma introdução às juntas coladas. É mencionada a resistência mecânica das juntas coladas. De seguida, é descrita a estrutura da dentição humana e é feita uma referência às diferentes restaurações dentárias. Por fim, são apresentadas as propriedades dos adesivos e é demonstrado a aplicação destes nas restaurações dentárias.

2.1. Introdução às Juntas Coladas

Desde a pré-história que o Homem sentiu necessidade de unir materiais com características distintas. A primeira cola composta surge na Idade da Pedra, na África do Sul, formada por uma mistura de goma de plantas e ocre vermelho utilizada em lanças de madeira [5]. Mais tarde, os Gregos e os Romanos desenvolveram o cimento pozolânico feito à base de cal, cinza vulcânica e areia, utilizado para as suas construções, dando assim início à ciência da tecnologia das juntas coladas [6].

No início do século XX, as aeronaves começaram a utilizar um material polimérico chamado caseína. Este material apresentava boas propriedades mecânicas no geral, exceto quando exposto a ambiente húmidos. Passado alguns anos, este material foi substituído por materiais poliméricos sintéticos a fim de responder a esta limitação. No entanto, estes materiais continuavam a ser muito frágeis. Em 1957, Bruyne e a sua equipa fizeram alterações na composição química, originando polímeros com melhor tenacidade [7].

Junta colada ou junta adesiva, são os termos normalmente utilizados para se designar uma união por intermédio de um adesivo. Atualmente, devido às suas propriedades mecânicas, as colas são muito aplicadas na indústria aeronáutica, na indústria automóvel, na indústria naval e na indústria dentária. Estas vieram substituir outros modos de ligação mais tradicionais, como a soldadura, rebiteagem e aparafusamento. A sua crescente utilização deve-se ao fator económico (inclusive nos custos de manutenção) e ao bom desempenho, visto que permitem uma distribuição de ligações uniforme ao longo da área de ligação, permitindo um aumento da rigidez na estrutura. Possibilitam também, uma ligação de materiais de composição e coeficiente de expansão térmico distintos. No entanto, como em

todos os casos a aplicação destes materiais também apresenta algumas desvantagens tal como as limitações de resistência devido ao calor e à humidade, a preparação prévia e cuidadosa das superfícies de contacto e a inexistência de um critério universal de dimensionamento [7].

2.2. Resistência das Juntas Coladas

As juntas coladas são estruturas de ligação que possuem certas particularidades, que devem ser estudadas, tais como os parâmetros que influenciam a sua resistência.

A principal função das juntas coladas é a de transmitirem a carga entre dois componentes. Estas podem estar sujeitas a vários tipos de esforços, entre os quais o esforço de tração/compressão, a clivagem, o arrancamento e o esforço de corte. Na Figura 2.1 encontram-se esquematizados os tipos de esforços que podem existir numa junta colada.

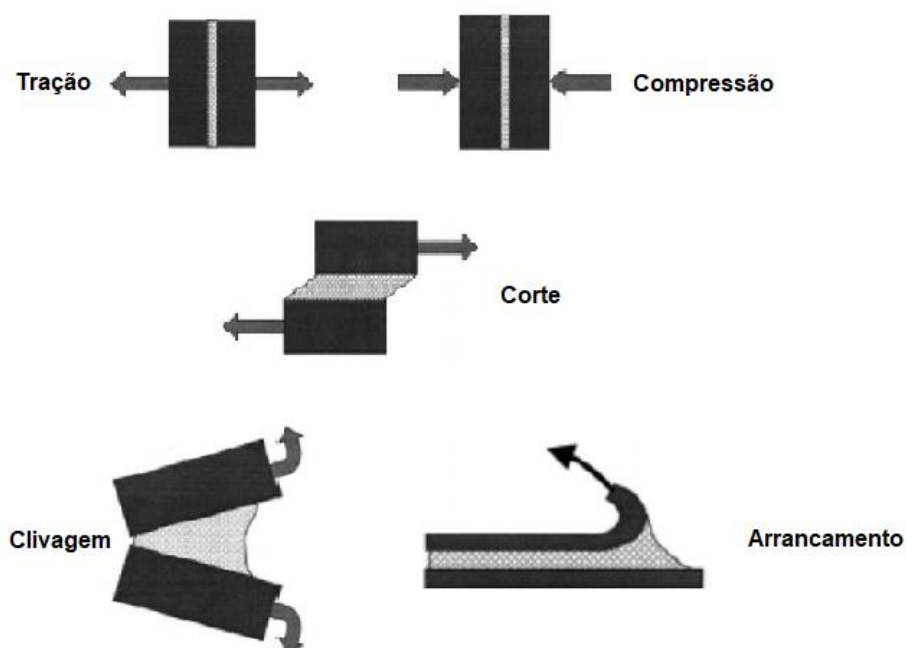


Figura 2.1. Tipos de esforços existentes em juntas coladas[8].

Para garantir um bom funcionamento das juntas é necessário conhecer os tipos de rotura que esta ligação está sujeita. Existem quatro modos de rotura numa ligação adesiva: a rotura adesiva, a rotura coesiva, a rotura mista e a rotura de um dos aderentes. A rotura adesiva ocorre quando o adesivo e um dos aderentes se separam na totalidade, não restando nenhum vestígio de adesivo na superfície. A rotura coesiva surge quando a ligação entre o

adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, estando ambas as superfícies dos aderentes cobertas por adesivo. A rotura mista é uma combinação entre os modos de falha coesiva e adesiva. Este tipo de rotura pode indicar uma limpeza deficiente das superfícies a ligar. A rotura de um dos aderentes verifica-se quando a resistência mecânica do aderente é inferior à resistência da ligação colada. Uma junta corretamente projetada é aquela onde a rotura acontece no próprio aderente [9]. A Figura 2.2 representa os diferentes modos de rotura.



Figura 2.2. Modos de rotura em juntas coladas [9]

A resistência de uma junta colada é influenciada pelas propriedades mecânicas e térmicas dos materiais que a constituem, pela espessura do substrato, do adesivo, pelo comprimento de sobreposição total, pelo tipo de geometrias de ligação dos materiais e pelo seu tratamento superficial e condições de serviço [7].

O comportamento do adesivo a utilizar, irá influenciar a resistência global da ligação. Nos adesivos frágeis a sensibilidade à propagação de fendas é superior, enquanto, nos adesivos dúcteis, devido à sua flexibilidade e tenacidade, existe uma resistência global superior ao corte e ao arrancamento [7].

Alguns autores estudaram o efeito da geometria do substrato e do adesivo e verificaram que esta alteração originava alterações na resposta global da estrutura. A esta alteração de geometria do substrato e do adesivo nas extremidades da sobreposição é denominado de *taper* [7].

Outras características importantes na influência da resistência global da junta colada são as espessuras. Em Silva *et. al.* [10] é referido que um aumento da razão do comprimento da sobreposição total com a espessura do adesivo conduz a um limite máximo da resistência da ligação.

2.3. Adesivos e as suas Propriedades

Ao longo dos anos, os métodos de ligação de materiais têm sofrido algumas alterações, havendo uma grande variedade de ligações apropriadas para cada tipo de aplicação e também para o(s) tipo(s) de material(ais) que se pretende ligar. Cada método de ligação tem as suas vantagens e desvantagens, por isso, a escolha do método de ligação depende sempre do tipo de estrutura que se pretende ligar, bem como das restrições de acessibilidade das juntas ou o tipo de materiais que se vai ligar.

Os adesivos utilizados nas diferentes aplicações estruturais são materiais poliméricos e podem ser classificados de diversas formas, mas podem ser distinguidos como produtos naturais ou sintéticos [10]. Quando um adesivo é de origem natural, este é um subproduto de origem animal ou agrícola, sendo aplicado na colagem de papel ou madeira, pois são adesivos biodegradáveis. Um adesivo sintético tem origem em materiais feitos pelo Homem, tais como polímeros, sendo aplicado em estruturas mais exigentes [11]. Este tipo de classificação torna-se demasiado abrangente para muitas aplicações, existindo outras classificações de acordo com a função, composição química, método de aplicação, custo, entre outros. A classificação segundo a composição química é o método mais utilizado. Esta, quando aplicada a adesivos sintéticos, pode ser dividida segundo quatro grupos característicos [11]:

- Resinas termoendurecíveis: Resina epóxi, poliésteres, fenólicas, etc.;
- Resinas termoplásticas: celulósicas, poliamidas, vinílicas, acrílicas, etc.;
- Elastómeros: silicones, poliuretanos, neoprenos, nitrilos, etc.;
- Ligas adesivas (híbridos): combinação de pelo menos dois dos outros grupos.

Cada um destes grupos apresenta pontos fortes e fracos nas suas propriedades, podendo de uma forma resumida serem comparados através da Tabela 2.1

Tabela 2.1. Propriedades dos materiais poliméricos [11]

Material	Flexibilidade (Resiliência)	Resistência Mecânica	Resistência Térmica	Resistência a Agentes Químicos
Resinas Termoendurecíveis	má	boa	boa	boa
Resinas Termoplásticas	média	medíocre	medíocre	boa
Elastómeros	muito boa	má	variável	medíocre

Na caracterização de um adesivo é necessário determinar alguns parâmetros, de carácter elástico, plástico e de fratura, onde cada um destes parâmetros envolve a realização de testes específicos para cada situação. As propriedades dos adesivos podem variar bastante e é necessária uma seleção adequada para haver um correto projeto de junta [12]. Além disso, para prever a resistência de uma junta, é necessário ter em conta a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado [13].

Para se caracterizar um adesivo mecanicamente, deve-se realizar pelo menos dois tipos de carregamento (tração e corte são os mais utilizados), sendo normalmente utilizados os ensaios com provetes *bulk* para determinação das propriedades mecânicas à tração, e com provetes TAST para determinação das propriedades mecânicas ao corte [11].

2.4. Estrutura e Composição do Dente

A constituição dentária está inserida nos maxilares. A Figura 2.3 apresenta a constituição da dentição humana. Os dentes incisivos são dentes frontais afiados e têm a função de cortar os alimentos (quatro superiores e quatro inferiores). Os dentes caninos, localizados ao lado dos incisivos, têm uma forma pontiaguda (cúspides) e a sua função é rasgar os alimentos. Os pré-molares, são apenas dentes permanentes (as crianças não possuem pré-molares), têm a função de esmagar, e os molares, localizados no fundo da boca, são usados para triturar e mastigar os alimentos [14].

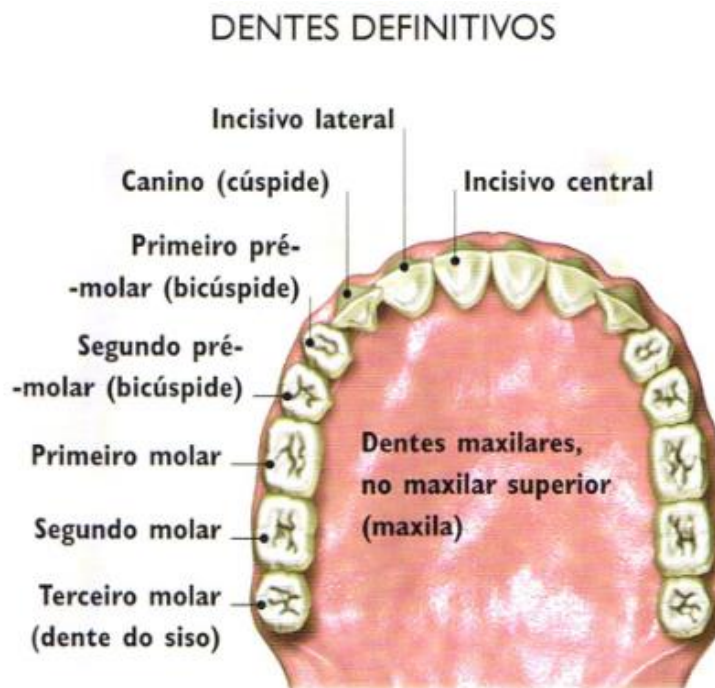


Figura 2.3. Identificação dos Dentes [15].

Relativamente à estrutura, o dente humano é dividido anatomicamente em três partes como ilustra a Figura 2.4:

1. A coroa é a parte superior do dente e, geralmente, é a única visível;
2. O colo, é a parte do dente que se situa entre a coroa e a raiz;
3. A raiz, parte do dente que não é visível e está coberta pelo cemento. Representa aproximadamente $2/3$ do tamanho total do dente

Analisando o dente num corte vertical, observamos três componentes histológicos diferentes: esmalte, dentina e polpa [16].

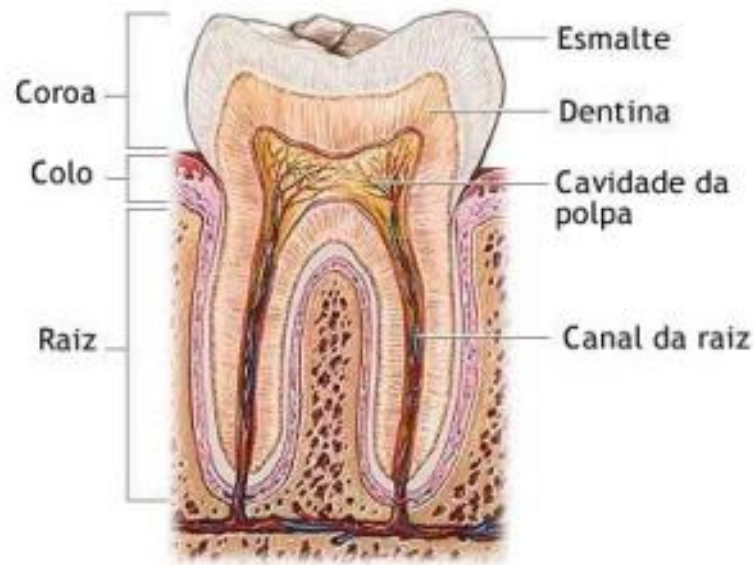


Figura 2.4. Composição do Dente Humano[16].

O esmalte é um tecido que reveste a coroa da estrutura dentária. A sua espessura é variável ao longo das regiões do dente e entre os diferentes tipos de dentes. Quimicamente, a sua composição consiste maioritariamente em cristais de hidroxiapatita (matéria inorgânica), correspondendo cerca de 92% do seu volume, sendo o restante material composto por 2% de componente orgânica e 6% de água. O seu elevado conteúdo de matéria inorgânica torna-o um tecido com elevada dureza, porém é também o mais propício a ser danificado [17].

A maior parte do dente é constituída por dentina, que tem um papel extremamente importante na proteção da polpa e no suporte do esmalte. Esta é atravessada por inúmeros túbulos dentários finos e cilíndricos. A dentina é um tecido mineralizado e a sua composição consiste em cerca 60% de matéria inorgânica e o resto em volume de material orgânico e água [17].

A polpa dentária, ou cavidade pulpar, encontra-se protegida por um ambiente rígido composto por três tecidos mineralizados: esmalte, dentina e cimento. Esta é constituída por 75% de água e 25% de matéria orgânica e é onde ficam contidos os vasos sanguíneos e terminações nervosas do dente. A sua função é nutrir o dente através dos vasos sanguíneos, regular o fluxo sanguíneo e é responsável pela sensibilidade nos dentes [18].

2.5. Restaurações Dentárias

A restauração é o processo pelo qual um dente afetado por cárie ou partido volta a ter a sua função normal. Os maiores desafios quando as restaurações são feitas estão relacionados com a estrutura do dente, as exigências mecânicas e a resistência e desgaste às forças feitas quando se mastiga nos dentes molares e pré-molares [4].

A restauração do dente é um tratamento dentário feito por especialistas da área, onde se tem de ter atenção às propriedades do dente para haver a sua reconstrução. O médico dentista inicialmente tem a necessidade de limpar toda a zona atingida e, posteriormente, colocar o material restaurador na cavidade limpa. O principal objetivo das restaurações dentárias é devolver o mais aproximadamente a estética e forma do dente, as respetivas funcionalidades e promover estabilidade a longo prazo, quando o dente é afetado. O tipo de material usado e o tipo de restauração depende de cada situação, tendo como objetivo impedir a entrada de bactérias e a danificação do dente a longo prazo [19].

Tendo em conta a importância das restaurações dentárias na saúde do ser humano, com os avanços na medicina dentária, são feitos estudos contínuos relacionados com novos materiais e ferramentas, a fim de melhorar o desempenho das restaurações.

2.5.1. Restauração Direta

Geralmente, as restaurações diretas são as mais comuns na área da medicina dentária, pelo facto de serem simples e rápidas. São utilizadas para reconstruir dentes ligeiramente partidos, dentes desvitalizados cuja estrutura interna não tenha ficado muito comprometida, dentes com pequenas cáries ou apenas para fazer reparos estéticos. Realiza-se a remoção do tecido afetado a fim de se colocar uma massa compatível com o dente, de forma a recuperar as funcionalidades de um dente natural.

Nos dentes posteriores, quando se aplica uma restauração direta, é necessário ter atenção aos componentes das partículas incorporadas no material a escolher, nomeadamente a sua composição e tamanho.

Na técnica de restauração direta o material mais utilizado são as resinas compostas, que apresentam como principais vantagens: um menor custo, boa estética, maior preservação do tecido dentário e facilidade de aplicação [20]. Por outro lado, apresentam como

desvantagens uma maior contração de polimerização, baixa resistência ao desgaste e a boa aplicação da restauração depende sempre da qualidade do profissional [21].

2.5.2. Restauração Indireta

A técnica indireta é utilizada para o mesmo fim que as diretas, embora sejam aplicadas em dentes com problemas estruturais mais extensos. São produzidas em laboratório e exigem um trabalho mais demorado do que as restaurações diretas. Esta técnica apresenta melhores propriedades mecânicas, na resistência ao desgaste microfiltrações do que as restaurações diretas, no entanto, é uma técnica mais demorada e mais dispendiosa [21].

As restaurações indiretas podem ser classificadas em quatro tipos: *inlay*, onde a restauração é totalmente intracoronal; *onlay*, em que é restaurada pelo menos uma das cúspides; *overlays*, restauração total da coroa e *endocrown*, quando existe grande destruição do dente [4].

Relativamente aos materiais usados nas restaurações indiretas, estes são submetidos a grandes forças oclusais (principalmente em dentes posteriores), logo, essa vulnerabilidade deverá ser compensada pela espessura da restauração e uma correta cimentação adesiva. Existe uma grande quantidade de materiais à disposição, com diferentes propriedades, e a sua escolha depende sempre da situação em que vão ser aplicados [22].

As restaurações indiretas em cerâmica são aquelas que apresentam, de um modo geral, melhores propriedades físicas e mecânicas, tais como, maior resistência ao desgaste e à fratura, estabilidade da cor, maior biocompatibilidade e menor retenção da placa bacteriana. As suas desvantagens são a sensibilidade das técnicas clínica e laboratorial, e as maiores dificuldades de manuseamento e friabilidade da incrustação previamente à cimentação [4].

As restaurações indiretas *inlay/onlay* com resina composta permitem compensar as desvantagens relativas às técnicas diretas, pois são realizados em condições ideais de humidade, elevado grau de polimerização e excelente morfologia. Esta técnica tem também um custo mais baixo quando comparado às restaurações indiretas em cerâmica. Para além disso, a resina composta apresenta menor risco de fraturas em relação às restaurações em cerâmica, devido à sua capacidade de absorver forças de carga mastigatória [23].

Como é referido em [24], a longevidade de restaurações em resina composta é influenciada diretamente pelo grau de polimerização o qual, por sua vez, tem influência direta sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas.

2.6. Adesão nas Restaurações Dentárias

O processo de adesão pode ser definido pela união de duas superfícies ou materiais independentes que ficam em contacto, sem ação de forças externas. Um adesivo é um material, frequentemente viscoso, que une dois substratos através da sua solidificação e transferências de cargas de uma superfície para a outra. A força de adesão é uma medida da capacidade de suporte da interface adesiva [25].

O princípio da adesão baseia-se na capacidade de um material restaurador aderir aos vários tecidos dentários. O esmalte e a dentina são os substratos mais envolvidos. O mecanismo de adesão ao esmalte e à dentina, é essencialmente um processo de substituição dos minerais removidos dos tecidos dentários por monómeros de resina que, ao polimerizarem, ficam retidos nas porosidades criadas. A adesão ao esmalte é um processo relativamente simples, sem grandes exigências técnicas, mas a adesão à dentina é mais sensível e imprevisível. De facto, a dentina, dada a sua natureza húmida e orgânica é considerada um substrato ao qual é extremamente difícil aderir. Outra questão a ter em conta é a compatibilidade dos materiais restauradores com o sistema adesivo a ser utilizado [25].

A ligação adesiva bem-sucedida depende da composição química do adesivo, da manipulação clínica adequada do material, bem como do conhecimento sobre as alterações nos tecidos dentais causadas pelos diferentes procedimentos de ligação [26]. Os sistemas adesivos estão constantemente sujeitos a tensões químicas e mecânicas que afetam negativamente a integridade e a durabilidade da interface dentina-adesivo. Apesar dos progressos feitos no desenvolvimento de novos sistemas adesivos e estratégias para ultrapassar estas limitações, o conhecimento geral sobre o comportamento da interface permanece limitado. Há uma grande variabilidade de resultados encontrados nos diferentes estudos de laboratório já realizados [27].

Existem dois tipos de adesão, a adesão química e a adesão mecânica. A primeira forma de adesão surge na medicina dentária com o objetivo de criar um sistema de adesão entre a restauração e o resto do dente, e é promovida por materiais no estado líquido. Apesar de se apresentarem com viscosidades diferentes, tencionam criar a adesão entre os substratos sólidos biológicos e as resinas compostas de restauração. A adesão mecânica é importante para quantificar os valores de adesão e refere-se às forças intermoleculares que atuam na interface e mantêm o fenómeno de adesão [25].

Os sistemas de adesão são classificados de acordo com os mecanismos de atuação na camada de *smear layer*, camada orgânica de microfragmentos e microdetritos deixados sobre dentina durante o preparo cavitário e pelo número das diferentes etapas de trabalho, Figura 2.5.

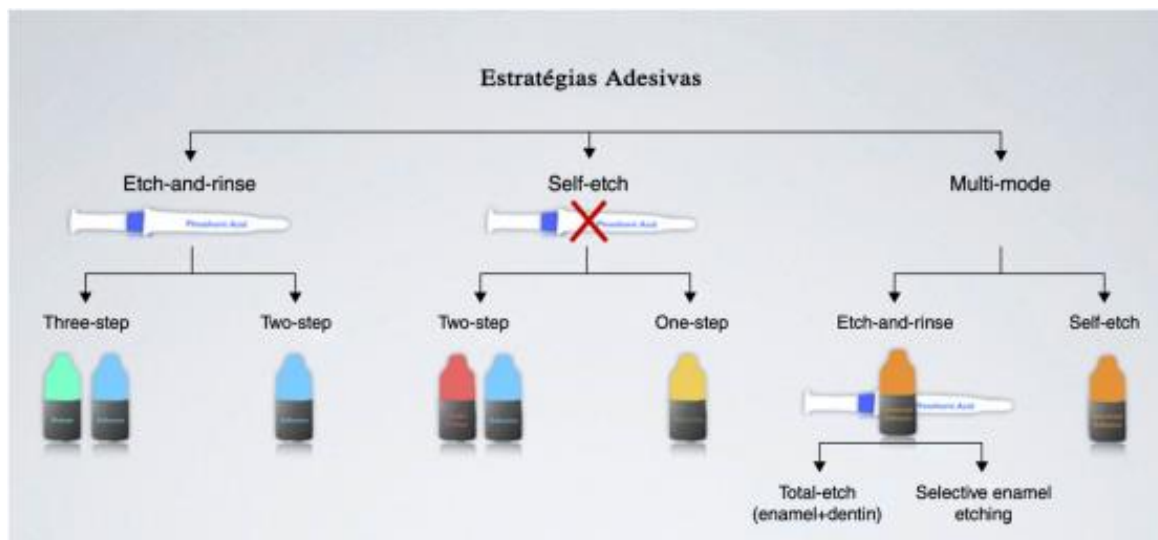


Figura 2.5. Classificação e estratégias adesivas [28]

O sistema *etch-and-rinse* pode ser aplicado em dois ou três passos, com condicionamento ácido no esmalte e na dentina. Quando aplicado em três passos, a lavagem é seguida pela aplicação de um *primer* e só no passo seguinte o adesivo. Na técnica *etch-and-rinse* de dois passos, o *primer* está combinado com o adesivo, o que resulta na diminuição de passos clínicos. Os adesivos *self-tech* surgiram para diminuir o número de passos clínicos e ao mesmo tempo contornar as complicações como a hidratação excessiva que podem ocorrer na técnica *etch-and-rinse*. Nesta técnica os adesivos *self-etch* não fazem o condicionamento ácido isoladamente, em vez disso, os monómeros acídicos estão incorporados no *primer*. Os adesivos universais foram introduzidos em 2011 e destacam-se através da sua versatilidade. Estes adesivos podem ser utilizados através da técnica *self-etch*, *etch-and-rinse* ou através do *selective enamel etching* [28].

2.7. Avaliação da Resistência de Restaurações Dentárias

O MEF é um dos métodos que pode ser utilizado para avaliar a resistência mecânica das restaurações dentárias [29]. O MEF é um método de análise numérica, que consiste na divisão de uma estrutura complexa em vários subdomínios de geometria mais simples, denominados de elementos finitos.

Estes conceitos foram introduzidos na década de 60 e 70 por Clough, Zienkiewicz e Cheung, começando por ser utilizado com análises lineares em juntas coladas por Wooley e Carvey em 1971 [30]. Em 1980, o avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de métodos mais eficientes na resolução de problemas não-lineares.

O tipo, a densidade da malha e o número total de elementos são fatores que influenciam a precisão dos resultados, devido às suas formulações e simplificações. As etapas do MEF passam, geralmente, pela construção de um modelo de elementos finitos, seguido pela especificação das propriedades mecânicas dos materiais, condições de fronteira e de carga para que as configurações desejadas sejam simuladas com precisão [31].

A utilização correta dos parâmetros numéricos tem influência positiva na previsão da resistência das juntas coladas. Estes parâmetros devem ser devidamente ajustados de modo a que o modelo numérico apresente um comportamento verídico quando comparado com o comportamento real da estrutura [7].




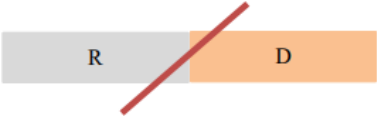
As juntas coladas podem ser modeladas com dois tipos de elementos que são adequados para análises lineares e não lineares, envolvendo plasticidade e grandes deformações. Para uma análise bidimensional de juntas adesivas os elementos sólidos 2D em estado plano de tensão e plano de deformação são os mais utilizados. O primeiro elemento é usado quando uma das dimensões é muito pequena em relação às outras e a tensão segundo essa direção é nula, enquanto o segundo é utilizado quando uma das dimensões é considerada como infinita e a deformação nessa direção é nula [30]. Quando é necessário maior precisão de análise recorre-se a elementos sólidos 3D.

Os estudos feitos através do MEF, exportam o modelo geométrico de dentes para *softwares* de análise numérica. O comportamento mecânico de um dente, quando submetido a ensaios experimentais em laboratório, pode ser analisado computacionalmente. Atualmente estão a ser efetuados estudos nesta área com elevada frequência, havendo alterações nos valores das cargas aplicadas, na seleção do dente e no tipo de restauração.

3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

Neste capítulo são apresentados o procedimento e a metodologia para validação dos resultados numéricos. Este procedimento tem por base a validação numérica da geometria associada a um provete de secção quadrangular composto por dentina, cola e resina composta sujeito a um teste de microtração no programa comercial *ADINA*®. Após a sua validação, a geometria é utilizada para analisar o comportamento e a resistência adesiva de diferentes colas. A resistência adesiva corresponde à força por unidade de área (MPa), necessária para quebrar a ligação adesiva, através da formação de uma falha ao nível da interface. Os tipos de fratura dos vários provetes são classificados em fraturas adesivas, coesivas ou mistas, dependendo do local de ocorrência da fratura. Os vários tipos de fratura estão apresentados no esquema ilustrativo da Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Esquema representativo da classificação dos tipos de fratura. R- Resina composta; D – dentina [32].

Tipo de Fratura	Imagem ilustrativa
<p style="text-align: center;">Adesiva</p> <p>Ocorre na interface resina-dentina</p>	
<p style="text-align: center;">Coesiva na Dentina</p> <p>Ocorre apenas na dentina</p>	
<p style="text-align: center;">Coesiva na Resina</p> <p>Ocorre apenas na resina</p>	
<p style="text-align: center;">Mista</p> <p>Ocorre na interface adesiva e na resina ou dentina</p>	

3.1. Metodologia Numérica

A Figura 3.1 apresenta a metodologia utilizada ao longo deste estudo, permitindo ao leitor uma melhor compreensão do procedimento para a validação do modelo geométrico e dos resultados numéricos.

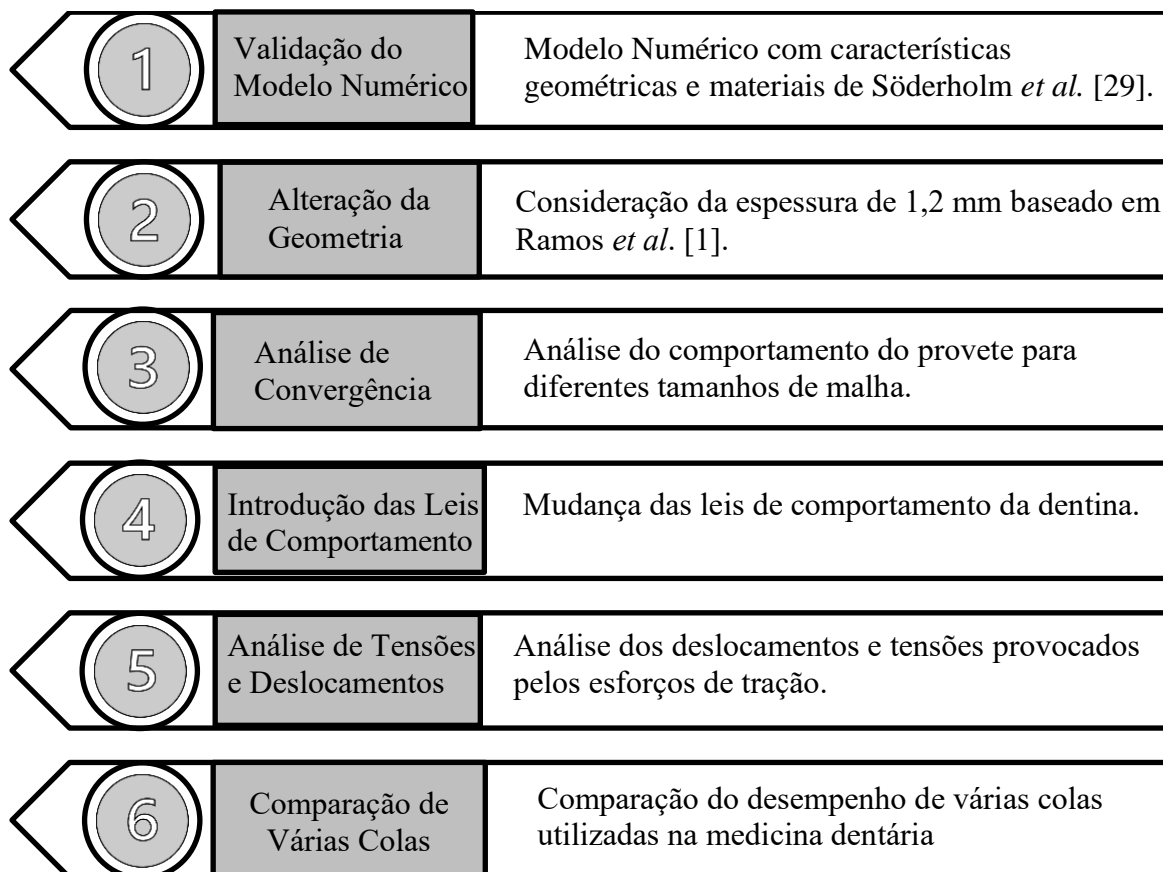


Figura 3.1. Esquema da metodologia numérica desenvolvida para o estudo

3.2. Validação do Modelo Numérico

Numa fase inicial, por se tratar de um ensaio de tração, foi feita uma pesquisa bibliográfica de modo a encontrar modelos geométricos enquadrados no estudo desta dissertação. O modelo de Söderholm *et al.* [29] foi o que mais se adequou ao nosso estudo. Os exemplares simulados nesta avaliação de MEF consistem num provete virtual composto por dentina e uma resina compósita ($1,2 \times 1,2 \times 5 \text{ mm}^3$) colados por intermédio de uma camada adesiva ($1,2 \times 1,2 \times 0,02 \text{ mm}^3$). A geometria e as condições de fronteira são

apresentadas na Figura 3.2, onde a parte branca representa a dentina, a parte vermelha a camada da cola e a parte amarela a resina compósita.

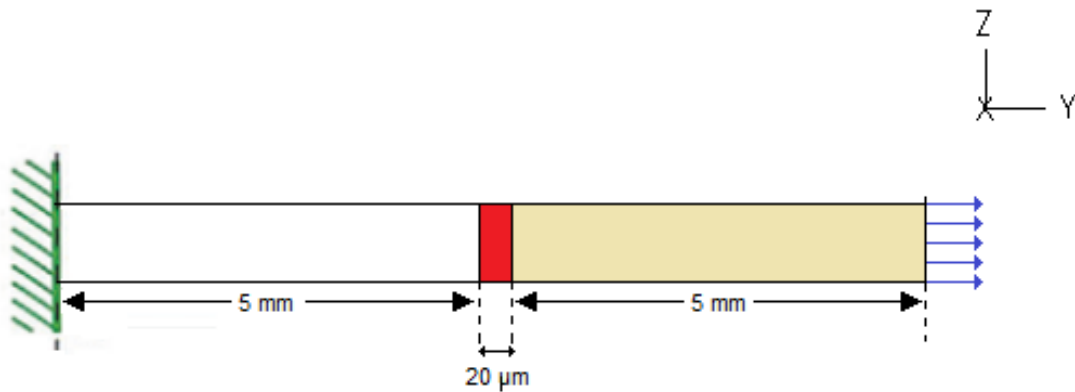


Figura 3.2. Modelo geométrico do provete.

O material utilizado é a dentina de um pré-molar e o Ceram X Septra ST HV. Relativamente às colas, foram feitos estudos com o objetivo de avaliar três colas diferentes: o Clearfil™ S³ Bond Plus, Clearfil™ SE Bond e o Optibond Solo Plus. As composições e os componentes dos materiais estão apresentados no APÊNDICE A – Composição dos materiais

Os modelos numéricos foram construídos de modo a garantir uniformidade e simetria dos elementos, impossibilitando assim uma influência significativa da discretização nos resultados numéricos. Por se tratar de uma estrutura de dimensões reduzidas e com massa específica reduzida, o seu peso próprio foi desprezado, pois este, quando comparado a cargas externas aplicadas é relativamente pequeno.

3.3. Modelação dos Parâmetros

O MEF obriga à construção previa de modelos. O *software* utilizado para a implementação dos modelos foi o ADINA®. O objetivo deste método é dividir a geometria complexa em pequenos blocos, designados por elementos, e estes possuem nas suas extremidades os nós, formando-se assim a malha. Considerando primeiramente uma análise de convergência com o objetivo de entender a influência do parâmetro de malha nas tensões e deslocamentos finais, e posteriormente, estuda-se uma análise não linear, onde se analisou a influência da curva da lei de comportamento da dentina. Posto isto, é analisado e

comparado o desempenho de diferentes tipos de colas utilizadas no mundo da medicina dentária.

Neste subcapítulo são apresentados os diferentes parâmetros usados para avaliar o sucesso das restaurações dentárias. Como foi referido na revisão bibliográfica, a restauração do dente consiste na remoção na zona da coroa, esmalte e dentina, sem afetar a cavidade pulpar, de forma a ser reparado e restaurado, através de um processo dentário. A reparação deverá ser feita utilizando os materiais que apresentem as melhores características, para que a estrutura do dente mantenha o melhor aspeto geométrico e estético e além disso, conserve a qualidade mecânica e fisiológica do mesmo. Os parâmetros utilizados pretendem melhorar a forma como a restauração do dente é estudada.

A discretização dos modelos geométricos foi feita considerando transições de malha entre as diferentes zonas de estudo, de forma a reduzir o tempo computacional. As zonas onde foi considerada maior densidades de elementos foi na zona da cola, pois é a zona de iniciação e propagação de fendas. Em todos os modelos, utilizaram-se elementos sólidos bidimensionais lineares de 4 nós com dois graus de liberdade por nó. Nos modelos da análise não linear e na comparação de várias colas, foram considerados modelos com 4236 elementos e com um tamanho de elemento de 0,01 mm na zona da cola, como está representado na Figura 3.3.

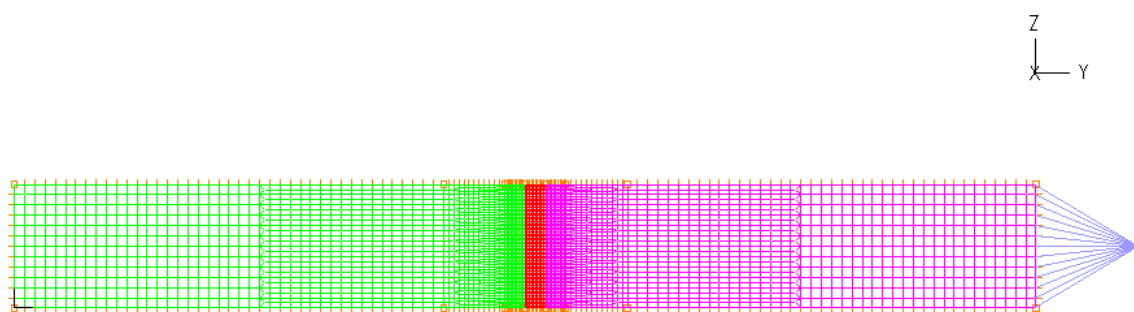


Figura 3.3. Representação da malha utilizada nos modelos

3.3.1. Materiais Utilizados nos Modelos

Os modelos dos provetes desenvolvidos têm de considerar todos os constituintes e as suas propriedades mecânicas. Na análise não-linear, num dos modelos, as propriedades de um material isotrópico elástico linear foram aplicadas na dentina com um módulo de Young

de 12 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,31. No outro modelo, foram consideradas as propriedades de um material elástico não-linear para a dentina, com os valores da curva uniaxial tensão-deformação baseados no estudo de Stanford *et al.* [33], como é possível verificar na Figura 3.4. A aproximação da reta azul representa o regime elástico do material, onde é possível retirar o módulo de Young através da equação da reta e a parte laranja representa o regime plástico do material.

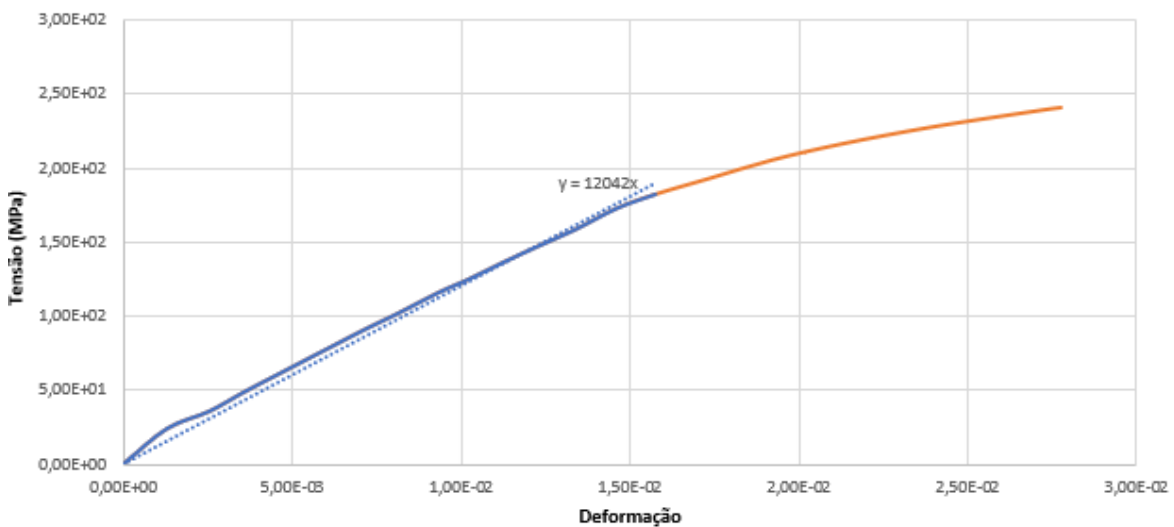


Figura 3.4. Diagrama tensão-deformação da dentina [33].

Nos dois modelos foram aplicadas as propriedades de um material plástico bilinear na cola (neste caso o estudo foi feito com Clearfil™ S³ Bond Plus) e as propriedades de um material elástico linear no compósito. A Tabela 3.2 apresenta as características mecânicas dos materiais.

Tabela 3.2. Propriedades dos materiais utilizados utilizado

	E [MPa]	v
Compósito [29]	16000	0,25
Cola [34]	5410	0,35

Nos modelos desenvolvidos, como se considera que a cola tem um comportamento bilinear é necessário acrescentar a tensão de cedência, 20 MPa, o módulo de endurecimento, 0,5 GPa, e a percentagem máxima de deformação plástica, 2,5%. A Figura 3.5 representa a curva da cola.

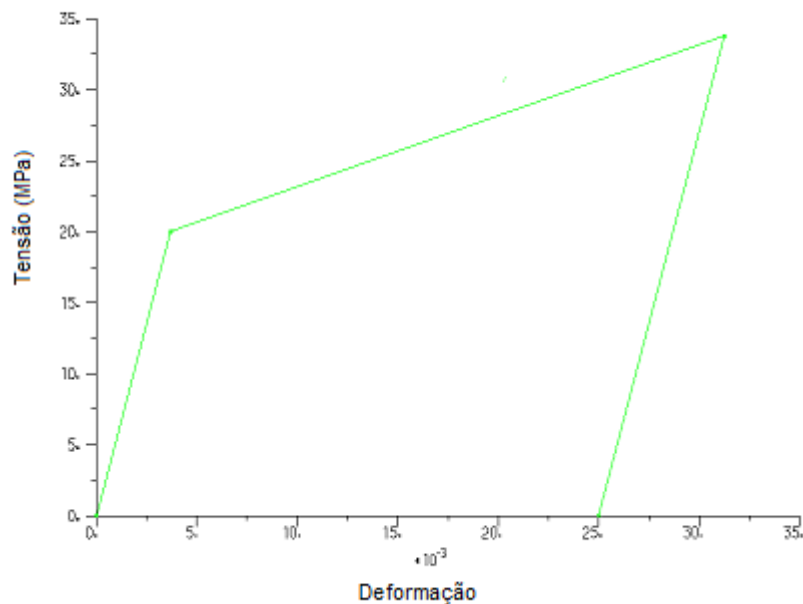


Figura 3.5. Diagrama tensão-deformação da cola

3.3.2. Condições de Apoio

Foi necessário definir as condições de fronteira para garantir que o conjunto se mantinha estável. As condições de fronteira adotadas pretendem replicar a situação estudada por Söderholm *et al.* [29], onde o provete se encontra totalmente encastrado numa extremidade e com uma carga axial na outra extremidade. As condições de fronteira aplicadas no modelo estão representadas na Figura 3.6. Nesta figura é possível visualizar uma letra B, à qual está associado na prática o impedimento do movimento segundo o eixo Y e o eixo Z e uma letra C, à qual está associado o impedimento segundo o eixo Z.

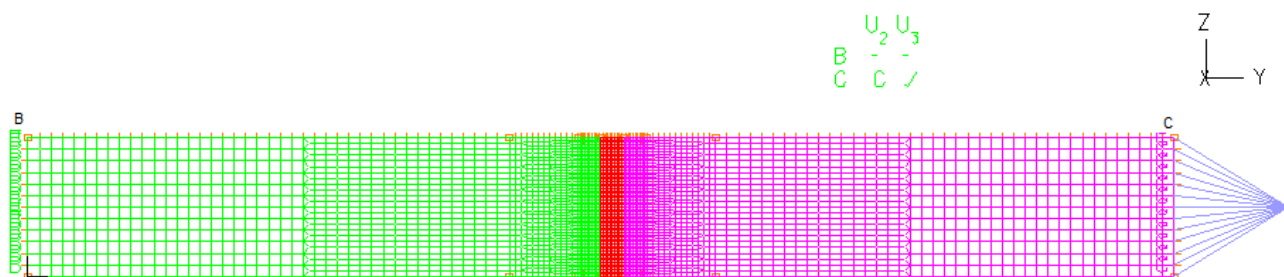


Figura 3.6. Condições de fronteira aplicadas no conjunto

3.3.3. Solicitações Aplicadas

Para aplicar as solicitações são utilizadas ligações rígidas entre um ponto virtual posicionado no eixo horizontal do provete e a aresta do compósito. As ligações rígidas estão identificadas na Figura 3.6 através de retas de cor azul.

Na análise não linear a solicitação do provete é feita através da aplicação de um deslocamento máximo de 2 mm no referido ponto. O deslocamento é aplicado gradualmente utilizando um número total de 500 incrementos, isto é, o time step é igual a 500.

Na análise de convergência, com o objetivo de analisar a influência do parâmetro de malha é aplicada uma força instantânea com intensidade de 20 N, como ilustrado na Figura 3.7.

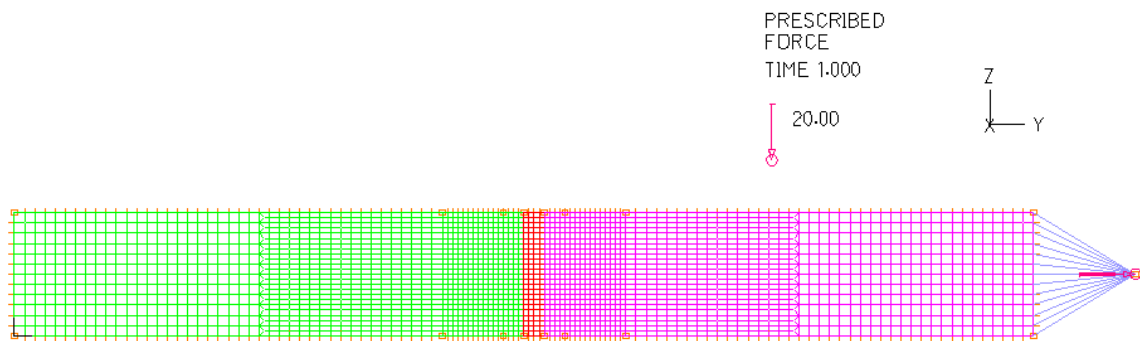


Figura 3.7. Carregamento na estrutura na análise de convergência

3.4. Análise de deslocamentos e tensões

O conhecimento da distribuição das tensões ao longo da estrutura é muito importante, uma vez que permite obter previsões sobre a iniciação da falha na estrutura. Foi feita uma análise de tensões provocadas pelos ensaios de tração, por serem as principais tensões que originam a falha em ligações coladas deste tipo.

A análise das tensões foi realizada ao longo da estrutura, com especial atenção no centro da cola e nas interfaces de contacto da cola com a dentina.

De forma a complementar esta análise, foi também estudado os deslocamentos da estrutura segundo a direção longitudinal da mesma.

Por último, foi feita uma comparação e uma análise da resistência adesiva e do desempenho de três colas diferentes.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos modelos definidos para este estudo, tendo como referência a influência da alteração dos parâmetros de malha no valor das tensões e deformações finais, a influência da curva da dentina na distribuição de tensões e a comparação da utilização de diferentes tipos de colas.

4.1. Análise de Convergência

A avaliação relativa à análise de convergência da estrutura tem como objetivo estudar a influência do parâmetro da malha através de uma análise estática. O modelo geométrico utilizado foi descrito anteriormente. A principal diferença está associada na solicitação, isto é, os deslocamentos prescritos são substituídos por uma força de 20 N. Nesta situação, para fazer uma comparação, foram utilizados cinco tamanhos de malha diferentes na zona da cola, pois é a zona de iniciação e propagação de fendas. Na Figura 4.1 é possível observar os vários tamanhos de malha utilizados neste estudo.

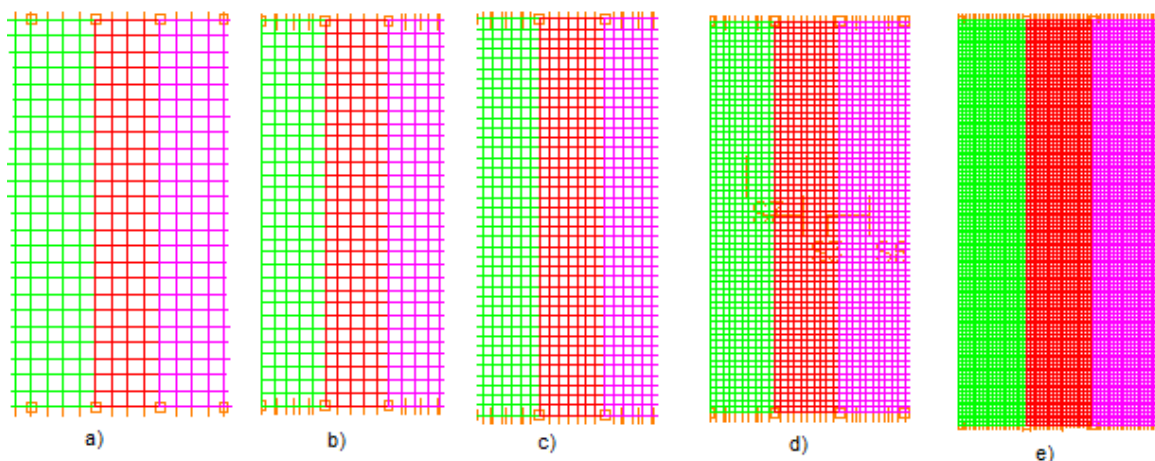


Figura 4.1. Vários tamanhos de elementos na cola utilizados na análise de convergência: a) 0,05 mm; b) 0,04 mm; c) 0,03mm; d) 0,02mm; e) 0,01mm

A convergência foi avaliada ao nível dos deslocamentos e tensões, os resultados são apresentados na Tabela 4.1. Analisando os valores, verifica-se que o deslocamento máximo permanece inalterável com a diminuição do tamanho do elemento, enquanto a tensão máxima apresenta uma variação de cerca de 12,7% entre os dois tamanhos limites, isto é, entre os valores de 0,05 mm e 0,01 mm.

Tabela 4.1. Comparação dos parâmetros para diferentes tamanhos de malha.

Tamanho do elemento	Número de elementos	Número de nós	Deslocamento máximo	Tensão máxima
0,05 mm	2292	2412	45,90 μm (nó 1740)	23,38 MPa
0,04 mm	2526	3218	45,90 μm (nó 1740)	24,02 MPa
0,03 mm	3052	4040	45,90 μm (nó 1740)	24,95 MPa
0,02 mm	4236	5213	45,91 μm (nó 1740)	25,58 MPa
0,01 mm	10212	11159	45,91 μm (nó 1740)	26,34 MPa

Relativamente à localização da tensão máxima, em todas as situações ocorre no mesmo sítio, isto é, na interface de contacto da dentina com a cola. A Figura 4.2 representa parte do provete onde existe maior concentração de tensões, para a situação com o tamanho de elemento de 0,01mm. A tensão máxima está identificada com o triângulo a preto.

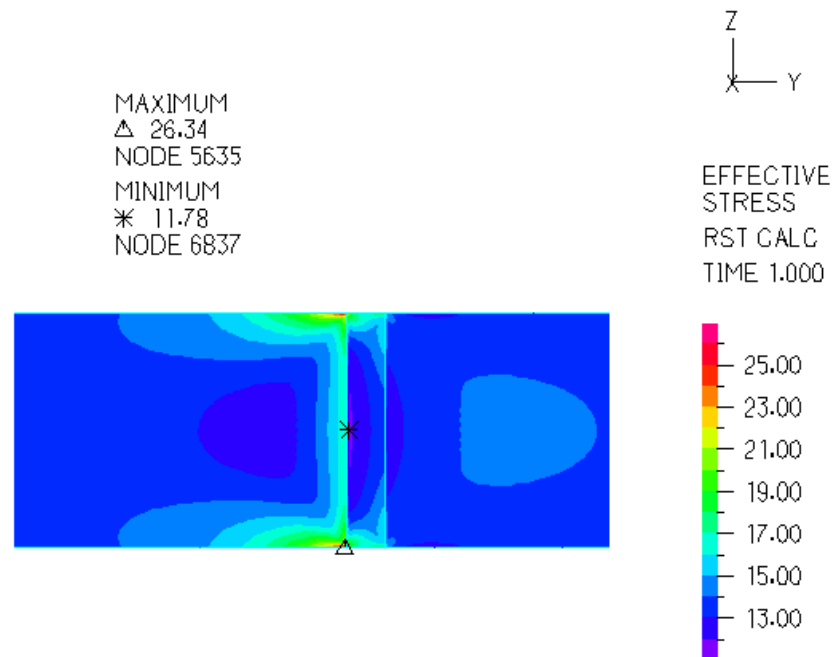


Figura 4.2. Localização da tensão máxima na estrutura

4.2. Análise Não Linear

A avaliação relativa à análise não linear da estrutura efetuou-se com base no modelo geométrico descrito anteriormente no Capítulo 3 utilizando leis constitutivas não lineares para a cola e para a dentina.

4.2.1. Análise de Deslocamentos

Como foi referido anteriormente, foi feita uma análise não linear de forma a analisar o efeito da lei de comportamento da dentina na solução final. Na Figura 4.3, é possível visualizar a distribuição de deslocamento na direção do eixo y (direção de tração do provete), quando se considera a lei de comportamento linear da dentina, ou seja, é considerado um material elástico isotrópico. A distribuição apresentada corresponde ao instante de simulação de 0.052s, no qual inicia o processo de falha da cola.

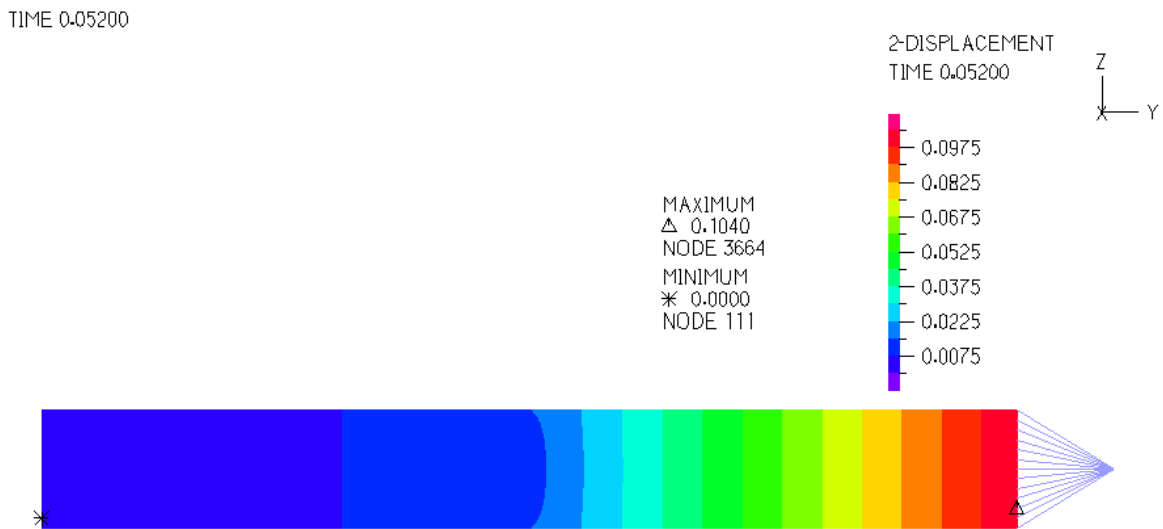


Figura 4.3. Distribuição do deslocamento segundo a direção do eixo y da estrutura considerando a dentina como linear e isotrópica.

Quando se considera a lei de comportamento não linear da dentina e se insere os valores da curva uniaxial de tensão-deformação no programa, os valores dos deslocamentos são diferentes, como é possível visualizar na Figura 4.4.

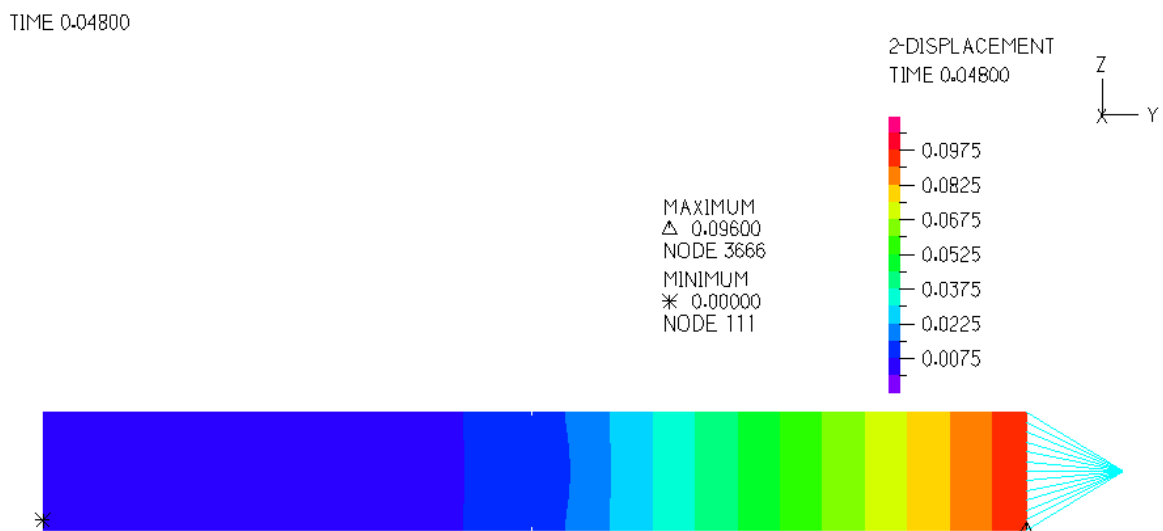


Figura 4.4. Distribuição do deslocamento na direção do eixo y da estrutura com a lei de comportamento não linear da dentina.

A localização do deslocamento máximo é identificada em ambas as figuras com o triângulo preto. Como se observa, os triângulos são semelhantes quanto à sua localização, a principal diferença é encontrada na intensidade do deslocamento, ou seja, na primeira

situação existe um deslocamento de $104 \mu m$ e para a segunda situação o deslocamento máximo é de $96 \mu m$.

Nos valores retirados observa-se, também, que existe uma diferença no instante em que começa a ocorrer falha na cola, ou seja, na primeira situação a falha ocorre no instante 0,052, enquanto na segunda situação a falha ocorre no instante 0,048.

4.2.2. Análise de Tensões

Esta análise é efetuada com o objetivo de perceber qual o local onde as tensões terão mais influência. Para comparar os resultados de forma mais objetiva, analisaram-se as tensões de von Mises que ocorrem na estrutura, tendo em conta as duas leis de comportamento da dentina.

Na Figura 4.5 são apresentadas as distribuições de tensões no provete para a dentina isotrópica e linear, enquanto na Figura 4.6 são apresentadas as distribuições de tensões no provete considerando o comportamento não linear da dentina. Nas duas situações foram considerados os instantes imediatamente antes do início de falha. Os valores da tensão máxima apresentam-se em ambas as figuras com o triângulo a preto e o seu valor é relativamente próximo dos resultados obtidos por Ramos *et al.* [1]. As tensões são acompanhadas por uma escala de cores, de forma a poder-se clarificar o local de maior percentagem de tensões.

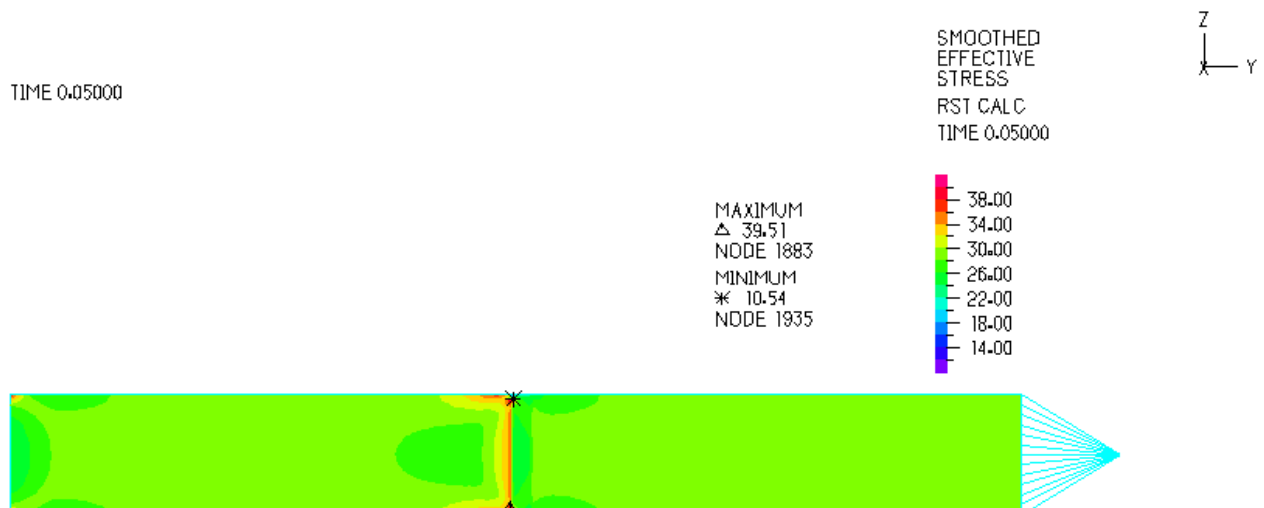


Figura 4.5. Distribuição das tensões no provete, considerando a dentina isotrópica e linear.

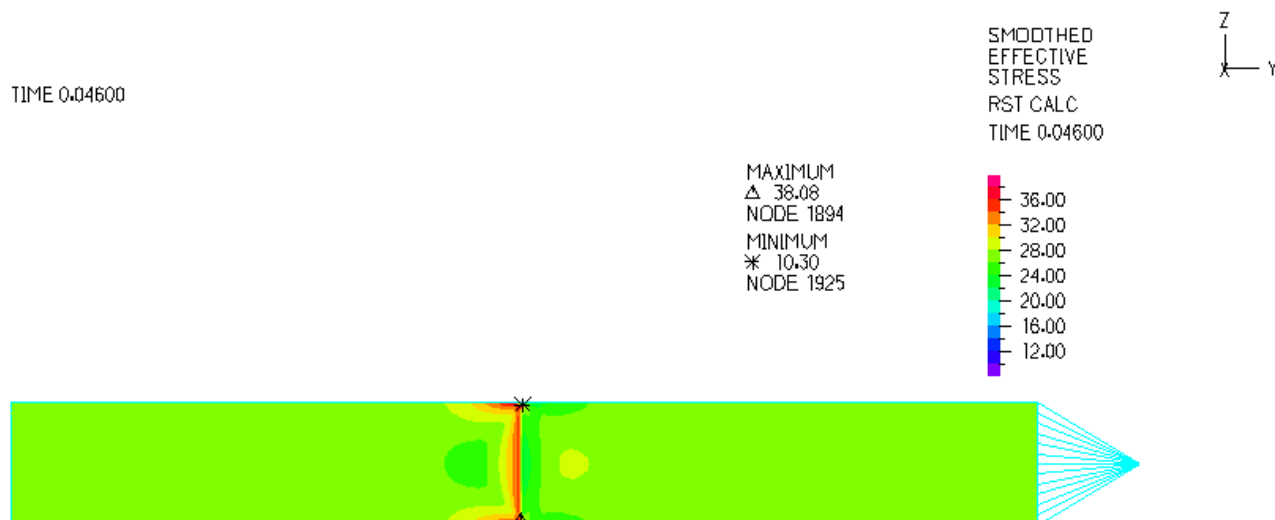


Figura 4.6. Distribuição das tensões no provete, considerando a dentina com comportamento não linear.

Como referido anteriormente, os maiores valores de tensão, nas duas situações, surgem na interface da dentina com a cola. As tensões na dentina são mais elevadas, no entanto, a resistência da dentina é superior à resistência da cola. Com os dois modelos numéricos de provetes validos em termos de tensão, foi realizada uma comparação entre eles na zona mais interessante, a interface da dentina com a cola no instante imediatamente antes de se iniciar falha.

A Figura 4.7 apresenta a comparação dos valores da tensão de von Mises nos nós da interface dentina-cola, entre provetes com dentina linear e não linear. Verifica-se uma distribuição de tensões muito semelhantes. As tensões máximas no caso da dentina não linear são ligeiramente inferiores, mas ocorrem muito próximas das extremidades, $Z = 0$ mm e $Z = 1,2$ mm.

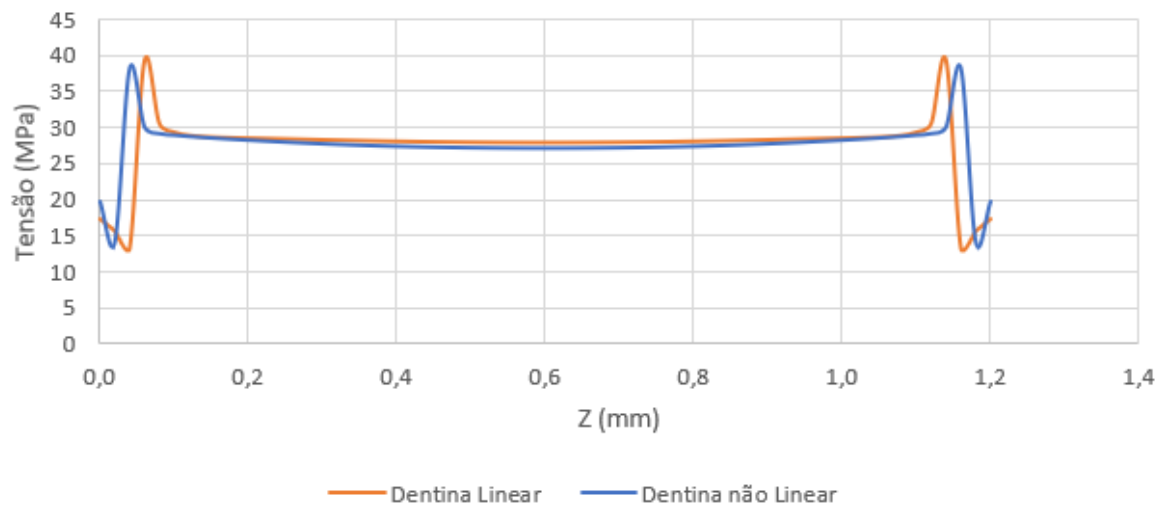


Figura 4.7. Comparação da variação da tensão de von Mises na interface dentina-cola

4.3. Comparação de várias colas

A influência da utilização de diferentes colas na estrutura é também um fator importante na influência dos resultados. Com o objetivo de perceber essa influência, foi feito um estudo com três colas diferentes: o Clearfil™ S³ Bond Plus, Clearfil™ SE Bond e o Optibond Solo Plus. A Tabela 4.2 apresenta as propriedades das colas. As propriedades dos restantes materiais foram mantidas no estudo não linear utilizando a curva da dentina, de forma a não haver muitas alterações no modelo para permitir uma mais fácil comparação de resultados.

Tabela 4.2. Propriedades das diferentes colas.

Material	E (MPa)	ν	σ_c (MPa)
<i>Clearfil™ S³ Bond Plus</i> [34]	5410	0,35	20
<i>Clearfil™ SE Bond</i> [34]	5080	0,30	21
<i>Optibond Solo Plus</i> [35]	3300	0,31	27

A Figura 4.8 representa as distribuições das tensões de von Mises ao longo do provete utilizando cada tipo de cola. Nas três situações foram considerados os instantes

imediatamente antes da ocorrência da falha. Dependendo do tipo de cola, os valores das tensões máximas variam e os instantes da origem da falha também.

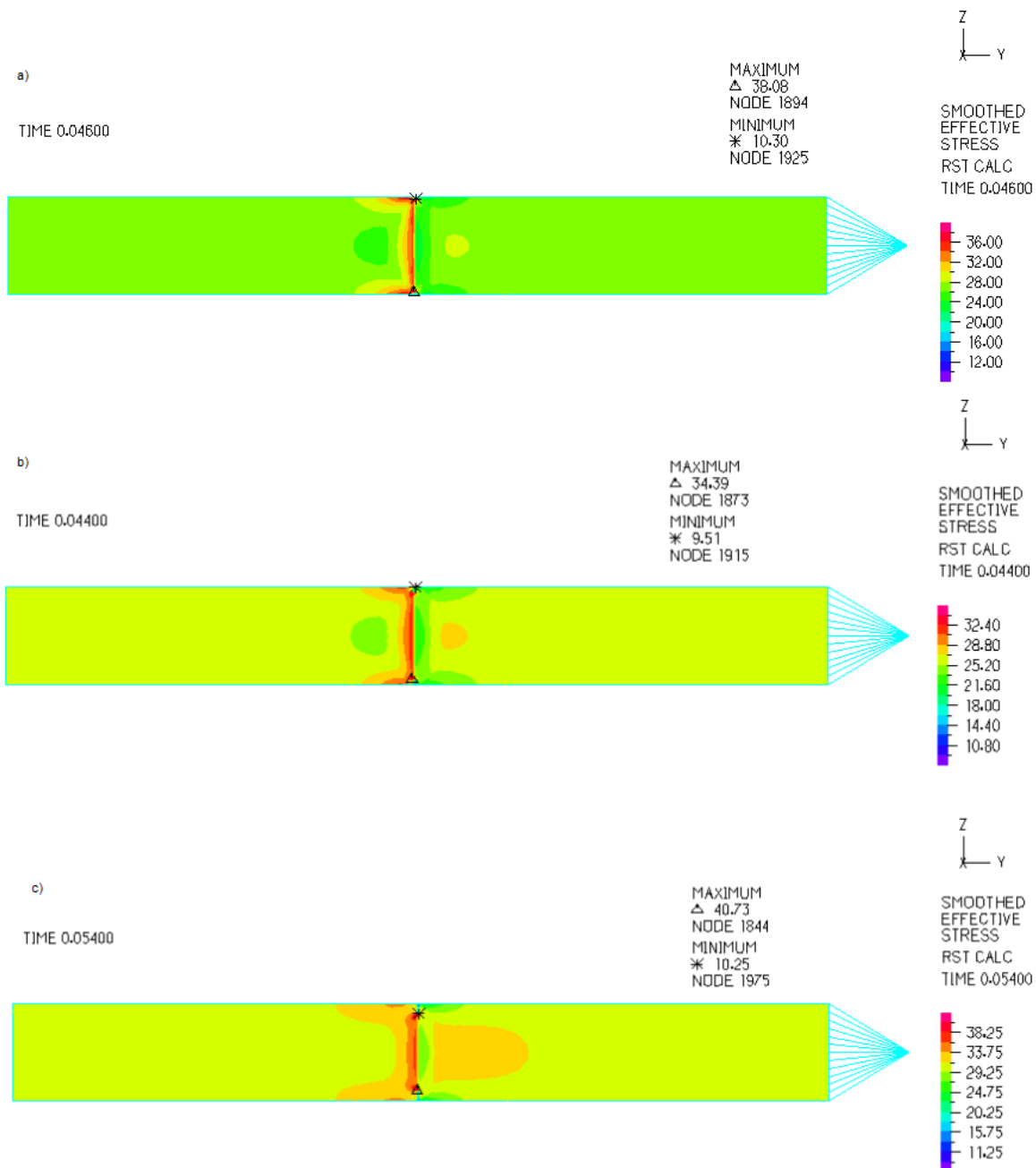


Figura 4.8. Distribuição das tensões para as diferentes colas: a) Clearfil S3 Bond Plus; b) Clearfil SE Bond; c) Optibond Solo Plus

Fazendo uma comparação do comportamento das três colas, Tabela 4.3, podemos afirmar que apresentam valores semelhantes. Apesar de não haver diferenças significativas,

facilmente se percebe que a cola Optibond Solo Plus é a que apresenta melhores resultados, pois é a que suporta mais tempo o carregamento até se iniciar a falha e é aquela que apresenta um valor mais elevado de tensão máxima.

Tabela 4.3. Comparação do desempenho das diferentes colas.

Tipo de cola	Instante início da falha	Deslocamento máximo (antes da falha)	Tensão máxima (antes da falha)
Clearfil S3 Bond Plus	0,04800	96,06 μm	38,08 MPa
Clearfil SE Bond	0,04600	88,05 μm	34,39 MPa
Optibond Solo Plus	0,05600	108,1 μm	40,73 MPa

De forma a perceber mais detalhadamente o comportamento das tensões na zona onde ocorre a falha, ou seja, na interface dentina-cola, foi realizada uma análise da distribuição da tensão de von Mises nas três colas em estudo. A Figura 4.9 apresenta a comparação de tensões entre as colas nos nós da interface. A cola Clearfil™ S³ Bond Plus apresenta uma distribuição de tensões mais variável na zona central e os seus máximos mais perto das extremidades. Na cola Clearfil™ SE Bond há uma redução de tensões, enquanto, a Optibond Solo Plus apresenta um valor constante numa zona maior do provete e tem os valores máximos de tensão.

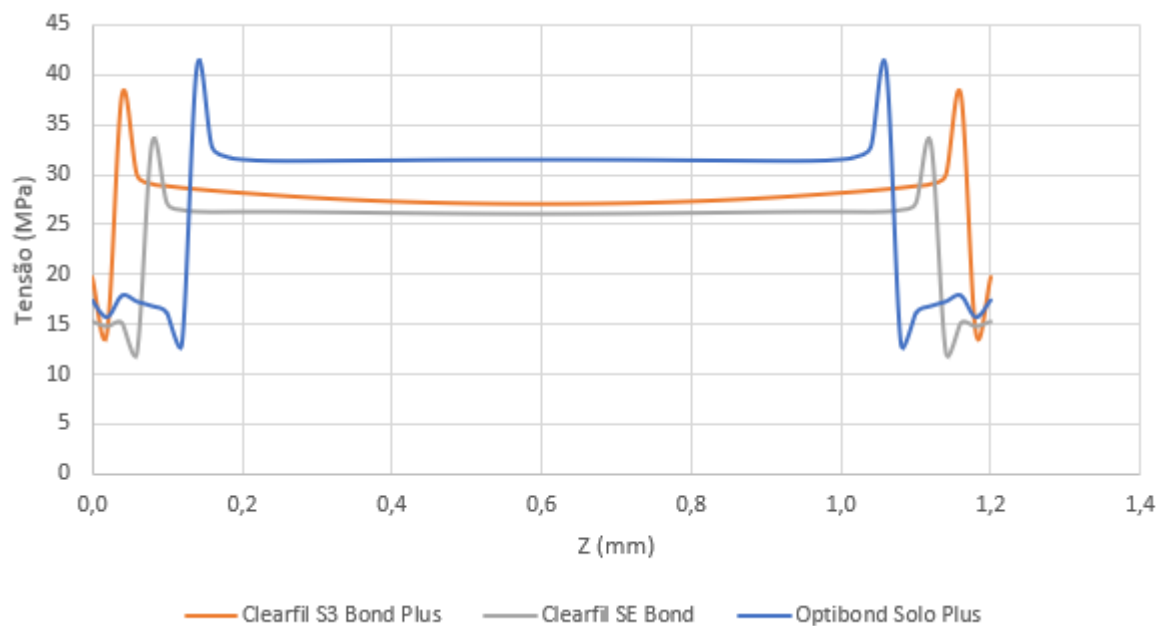


Figura 4.9. Comparação da variação da tensão de von Mises na interface dentina-cola nas diferentes colas em estudo.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste último capítulo apresentam-se as conclusões retiradas após a análise e comparação dos resultados, seguida de algumas propostas de sugestões para trabalhos futuros, a realizar dentro da mesma área de estudo em que esta dissertação se enquadra.

O principal objetivo desta dissertação foi a avaliação da resistência mecânica de juntas coladas nas restaurações dentárias. A realização deste estudo foi possível através da análise de um modelo 2D a partir do método de elementos finitos e do *software* ADINA®. Foram realizadas várias simulações onde foi possível retirar que tanto a densidade do tamanho de elementos de malha, como o comportamento e propriedades dos materiais utilizadas e a aplicação de diferentes colas apresentam a sua influência na resistência do provete.

No início da parte de modelação desta dissertação, surgiram algumas adversidades normais relacionadas com a utilização do *software*. Após as alterações necessárias serem efetuadas, procedeu-se à realização das simulações numéricas. Estas levaram o seu tempo a serem realizadas, contudo, pode-se observar os seus resultados e iniciar uma avaliação do mesmo. De facto, as análises efetuadas permitem afirmar que a utilização de um tamanho de elemento de malha mais reduzido dá origem, a resultados numéricos mais próximos dos estudos encontrados na pesquisa bibliográfica. Nesta avaliação, o modelo com tamanho de elemento de 0,01 *mm* foi o que apresentou uma tensão máxima mais elevada.

Numa segunda análise procedeu-se ao estudo do comportamento do provete em situações diferentes: (i) considerando a dentina isotrópica e linear elástica; e (ii) considerando a dentina não linear. Através dos valores obtidos foi possível concluir que não há uma grande diferença de valores de deslocamento e de tensão máxima nestas duas situações.

Por último, fez-se uma comparação do desempenho e da resistência mecânica de três colas utilizadas na medicina dentária. Pôde-se observar em todas as simulações que os deslocamentos são semelhantes, e que os valores máximos das tensões revelam a sua semelhança, contudo a opção mais resistente seria a cola Optibond Solo Plus.

5.1. Proposta para Trabalhos Futuros

No seguimento deste estudo é proposto algum trabalho futuro, tal como:

- Uma comparação mais ampla nos casos de estudo, isto é, simulações variadas com outras características e materiais;
- Realização de ensaios experimentais, de forma a comparar com os resultados numéricos obtidos neste estudo;
- Introdução de elementos coesivos, com o objetivo de estudar a sua influência nos resultados;
- Realização de novas simulações numéricas considerando elementos finitos 3D, para posterior comparação com os resultados obtidos neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Ramos, A. D. Soares, S. Torres, A. Luísa Costa, A. L. Messias, and A. Vinagre, “Adhesive interface and microtensile bond strength evaluation of four adhesive systems to primary dentin,” 2016, doi: 10.1016/j.rpemd.2016.03.002.
- [2] M. Hanabusa *et al.*, “Bonding effectiveness of a new ‘multi-mode’ adhesive to enamel and dentine,” *J. Dent.*, vol. 40, no. 6, pp. 475–484, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.jdent.2012.02.012.
- [3] R. M. Carvalho, A. P. Manso, S. Geraldeli, F. R. Tay, and D. H. Pashley, “Durability of bonds and clinical success of adhesive restorations,” *Dent. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 72–86, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.DENTAL.2011.09.011.
- [4] A. Simões, “Avaliação da Influência da Geometria da Cavidade Retentiva na Resistência Mecânica das Obturações Dentárias (Restauração do Dente),” Universidade de Coimbra, 2018.
- [5] L. Wadley, T. Hodgskiss, and M. Grant, “Implications for complex cognition from the hafting of tools with compound adhesives in the Middle Stone Age, South Africa,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 106, no. 24, pp. 9590–9594, Jun. 2009, doi: 10.1073/PNAS.0900957106/SUPPL_FILE/0900957106SI.PDF.
- [6] F. Keimel, “Historical Development of Adhesives and Adhesive Bonding,” *Handb. Adhes. Technol. Revis. Expand.*, Aug. 2003, doi: 10.1201/9780203912225.PT1.
- [7] V. Gomes, “Análise Numérica da Influência do Taper na Resistência de Juntas Coladas,” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, 2016.
- [8] B. G. Yacobi, S. Martin, K. Davis, A. Hudson, and M. Hubert, “Adhesive bonding in microelectronics and photonics,” *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 10 I, pp. 6227–6262, May 2002, doi: 10.1063/1.1467950.
- [9] F. Francisco Soeiro Amaral, “Estudo numérico de juntas adesivas com materiais hiperelásticos,” Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, 2018.
- [10] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhaes, M. F. S. F. de Moura, and Publindustria., “Juntas adesivas estruturais,” 2007.
- [11] T. Manuel and S. Faneco, “Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo

- estrutural de alta ductilidade,” 2014.
- [12] M. D. Banea and L. F. M Da Silva, “Adhesively bonded joints in composite materials: an overview,” 2009, doi: 10.1243/14644207JMDA219.
- [13] M. D. Banea, L. F. M. Da Silva, and R. D. S. G. Campilho, “Moulds design for adhesive bulk and joint specimens manufacturing,” *Assem. Autom.*, vol. 32, no. 3, pp. 284–292, 2012, doi: 10.1108/01445151211244456.
- [14] “Anatomia dos dentes: A anatomia de um dente.” <https://www.colgate.com/pt-pt/oral-health/articles/tooth-anatomy>
- [15] “Dente do Siso ainda existe devido a mecanismo universal genético de todos os mamíferos.” https://www.rtp.pt/noticias/saude/dente-do-siso-ainda-existe-devido-a-mecanismo-universal-genetico-de-todos-os-mamiferos_n898990
- [16] R. S. Lacruz, S. Habelitz, J. T. Wright, and M. L. Paine, “Dental Enamel Formation and Implications for Oral Health and Disease,” *Physiol. Rev.*, vol. 97, no. 3, p. 939, Jul. 2017, doi: 10.1152/PHYSREV.00030.2016.
- [17] A. Ritter, L. W. Boushell, and R. Walter, “Sturdevant’s Art and Science of Operative Dentistry - 7th Edition (2018),” 2018.
- [18] M. Goldberg and A. Hirata, “The Dental Pulp: Composition, Properties and Functions,” *JSM Dent*, vol. 5, no. 1, p. 1079, 2017.
- [19] M. C. Thompson, K. M. Thompson, and M. Swain, “The all-ceramic, inlay supported fixed partial denture. Part 1. Ceramic inlay preparation design: a literature review,” 2010.
- [20] G. T. Rocca, N. Rizcalla, I. Krejci, and D. Dietschi, “Evidence-based concepts and procedures for bonded inlays and onlays. Part II. Updated guidelines for cavity preparation and restoration fabrication,” *Int. J. Esthet. Dent.*, vol. 10, 2015.
- [21] F. Angeletaki, A. Gkogkos, E. Papazoglou, and D. Kloukos, “Direct versus indirect inlay/onlay composite restorations in posterior teeth. A systematic review and meta-analysis,” *J. Dent.*, vol. 53, pp. 12–21, 2016, doi: 10.1016/j.jdent.2016.07.011.
- [22] C. I. G. da R. P. Ameixa, “RESTAURAÇÕES DIRETAS VS INDIRETAS NA LONGEVIDADE DE DENTES ENDODONCIADOS-REVISÃO DA LITERATURA,” Instituto Universitário Egas Moniz, 2019.
- [23] P. Y. Lu and Y. C. Chiang, “Restoring Large Defect of Posterior Tooth by Indirect Composite Technique: A Case Report,” *Dent. J.*, vol. 6, no. 4, p. 54, Dec. 2018, doi:

- 10.3390/DJ6040054.
- [24] R. M. C. ; R. M. C. ; M. P. G. ; R. P. G. ; P. F. M. F. ; C. H. V. Silva, “Onlay com resina composta direta: Relato de caso Clínico,” 2012.
- [25] A. R. R. Vinagre, “Avaliação clínica e laboratorial de diferentes sistemas adesivos em dentística restaurador,” Universidade de Coimbra, 2014.
- [26] H. N. Filho, “Adhesives systems-classification,” 2014.
- [27] G. Kuramochi, E. Borie, I. A. Orsi, and M. Del Sol, “Magnitude and distribution of stresses in composite resin and sound dentine interface with mechanical retentions,” *J. Clin. Exp. Dent.*, vol. 7, no. 2, p. e232, 2015, doi: 10.4317/JCED.52144.
- [28] O. Gresko, “Técnicas de Adesão em Restaurações Indiretas,” INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ, 2020.
- [29] K.-J. Söderholm, S. Geraldeli, and C. Shen, “What Do Microtensile Bond Strength Values of Adhesives Mean?,” *J Adhes Dent*, vol. 14, no. 4, pp. 307–314, 2012, doi: 10.3290/j.jad.a22767.
- [30] O. C. Zienkiewicz and R. L. (Robert L. Taylor, *The finite element method*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [31] L. Carvalho, P. Roriz, J. Simões, and O. Frazão, “New Trends in Dental Biomechanics with Photonics Technologies,” *Appl. Sci. 2015, Vol. 5, Pages 1350-1378*, vol. 5, no. 4, pp. 1350–1378, Nov. 2015, doi: 10.3390/APP5041350.
- [32] T. Santos, “ESTUDO IN VITRO DA RESISTÊNCIA ADESIVA, POR MICROTRAÇÃO, DE UM NOVO SISTEMA ADESIVO DE IONÓMERO DE VIDRO MODIFICADO POR RESINA,” Instituto Superior de Ciências da Saúde Egas Moniz, 2015.
- [33] J. W. STANFORD, K. V. WEIGEL, G. C. PAFFENBARGER, and W. T. SWEENEY, “Compressive properties of hard tooth tissues and some restorative materials,” *J. Am. Dent. Assoc.*, vol. 60, no. 6, pp. 746–756, Jun. 1960, doi: 10.14219/JADA.ARCHIVE.1960.0258.
- [34] P. H. Freitas, M. Giannini, R. França, A. B. Correr, L. Correr-Sobrinho, and S. Consani, “Correlation between bond strength and nanomechanical properties of adhesive interface,” *Clin. Oral Investig.*, vol. 21, no. 4, pp. 1055–1062, May 2017, doi: 10.1007/S00784-016-1847-7.
- [35] E. Ghassemieh, “Evaluation of sources of uncertainties in microtensile bond

strength of dental adhesive system for different specimen geometries,” *Dent. Mater.*, vol. 24, no. 4, pp. 536–547, Apr. 2008, doi: 10.1016/J.DENTAL.2007.06.022.

APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS

Tabela A.1. Composição química da dentina [17].

Material	Composição
Dentina de um Pré-molar	60% de matéria inorgânica (hidroxiapatite), 25% de matéria orgânica (colagénio) e 15% de água

Tabela A.2. Composição química do adesivo [1].

Material/Fabricante	Classificação	Composição Química
Clearfil S3 Bond Plus (Kuraray, Noritake Dental Inc., Tokyo, Japan)	Sistema adesivo SE 1P	10-MDP, Bis-GMA, HEMA, dimetacrilato hidrofílico alifático, dimetacrilato hidrofóbico alifático, canforoquinona, aceleradores, iniciadores, etanol, água
Clearfil SE Bond (Kuraray, Noritake Dental Inc, Tokyo, Japan)	Sistema Adesivo SE 2P	Primer: 10-MDP, 12-MDPB, HEMA, Dimetacrilato hidrofílico, água Bond: 10-MDP, Bis-GMA, Dimetacrilato hidrofóbico, canforoquinona
Optibond soloplus (Kerr Corporation, Orange, CA, USA)	Sistema adesivo E&R 3P	Primer: HEMA, GPDM, MMEP, água, etanol, fotoiniciador (CQ), BHT; Bond: Bis-GMA, HEMA, GPDM, UDMA, fotoiniciador (CQ), ODMAB, partículas (SiO ₂ , vidro de bário aluminoborosilicato, fator de acoplamento A174

Tabela A.3. Composição química do compósito.

Resina Compósita	Fabricante	Componentes
Ceram.x Spectra ST HV	Dentsply Sirona	Vidro de bário-alumínio - borossilicato, metacrilato funcionalizado dióxido de silicone nano filler, metacrilato modificado polissiloxano, resina dimetacrilato, pigmento fluorescente, estabilizador UV, pigmentos de óxido de titânio, pigmentos de silicato de alumínio

APÊNDICE B – SELEÇÃO DOS NÓS NA INTERFACE

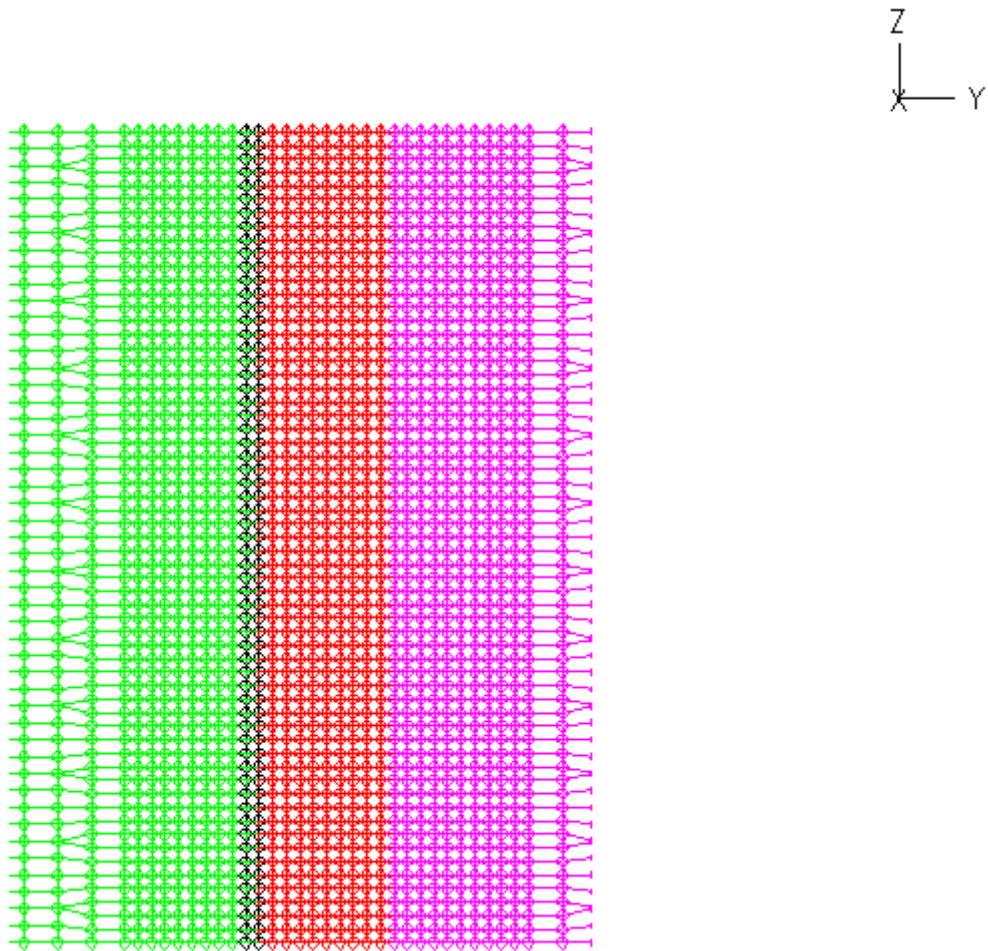


Figura B.1. Nós selecionados (a preto) para o estudo da variação da tensão na interface.