

**TATHY APARECIDA XAVIER**

**Comparação dos ensaios de resistência adesiva por torção  
e por cisalhamento com fio**

São Paulo

2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**TATHY APARECIDA XAVIER**

**Comparação dos ensaios de resistência adesiva por torção  
e por cisalhamento com fio**

Tese apresentada à Faculdade de  
Odontologia da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Doutor em  
Ciências Odontológicas

Área de Concentração: Materiais Dentários

Orientador: Prof. Dr. Rafael Yagüe Ballester

São Paulo

2010

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo da Publicação  
Serviço de Documentação Odontológica  
Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo

Xavier, Tathy Aparecida

Comparação dos ensaios de resistência adesiva por torção e por cisalhamento com fio / Tathy Aparecida Xavier; orientador Rafael Yagüe Ballester. -- São Paulo, 2010.

140p. : fig., tab.; 30 cm.

Tese (Doutorado) -- Programa de Pós-Graduação em Odontologia. Área de Concentração: Materiais Dentários -- Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo.

1. Resistência de União (Odontologia). 2. Ensaio de resistência adesiva. 3. Materiais Dentários. I. Ballester, Rafael Yagüe. II. Título.

CDD 617.695  
BLACK D15

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Xavier TA. Comparação dos ensaios de resistência adesiva por torção e por cisalhamento com fio. Tese apresentada à Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências Odontológicas.

Aprovado em: / /2010

### Banca Examinadora

Prof(a). Dr(a). \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof(a). Dr(a). \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof(a). Dr(a). \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof(a). Dr(a). \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof(a). Dr(a). \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

## *Dedicatórias*

*A Deus, inteligência suprema e causa primária de todas as coisas, dedico humildemente este trabalho por ter permitido que eu vivenciasse esta etapa, repleta de oportunidades de elevação do entendimento através do trabalho físico, intelectual e da convivência com meus companheiros. Peço inspiração para continuar no caminho do trabalho e estudo com responsabilidade e com a consciência de que a evolução não tem fim.*

*Aos meus pais, Agnes e Lucio, dedico este trabalho pela oportunidade que me deram de crescer em um ambiente favorável ao meu desenvolvimento moral e intelectual. Os recursos materiais podem ter sido escassos em alguns momentos, mas não são eles os responsáveis pela formação de valores. Isto foi possível graças ao amor que dispensaram a mim na forma de cuidado abnegado, carinho, amizade, interesse pelas minhas atividades e na forma de repreensões que me corrigiram as atitudes. Pelo exemplo de ambos, obtive estímulo suficiente para ter coragem de optar pelo caminho das pedras, árduo, mas cheio de recompensas sublimes. Posso me considerar feliz pela oportunidade de ter sido guiada por dois seres com tamanha inteligência e elevação espiritual.*

*Aos meus irmãos, Lucio Junior e Gustavo, dedico este trabalho por terem sido grandes amigos e companheiros de jornada. Durante a convivência, vocês me proporcionaram muitas risadas, conselhos valiosos e me deram a segurança de poder ter com quem contar.*

## *Agradecimentos*

*Aos meus avós, **Abílio, Lourys, Joaquim e Iris**, mesmo àqueles que já se foram, agradeço pelo exemplo de bom caráter, força, serenidade, devoção ao trabalho digno e de preocupação com o próximo. Agradeço pelas preces dirigidas a mim e pelas inspirações para seguir o caminho do bem.*

*"Se eu pudesse deixar algum presente a você,  
deixaria aceso o sentimento de amor à vida dos seres humanos.  
A consciência de aprender tudo o que nos foi ensinado pelo tempo afora.  
Lembraria os erros que foram cometidos,  
como sinais  
para que não mais se repetissem.  
A capacidade de escolher novos rumos.  
Deixaria para você, se pudesse, o respeito àquilo que é indispensável:  
além do pão, o trabalho; além do trabalho, a ação.  
E, quando tudo mais faltasse, para você, eu deixaria, se pudesse, um segredo:  
O de buscar no interior de si mesmo a resposta para encontrar a saída."  
(Mahatma Ghandi)*

*Aos **meus tios**, agradeço pela preocupação comigo, pelo incentivo, pelo carinho e por terem entendido minha ausência em momentos importantes.*

*Aos **meus primos**, agradeço pela torcida e pelos momentos de convivência leve e divertida. Somos muitos e, ao mesmo tempo, um só.*

*A **Alba, Eloy, Alair, Altair, Hilário, Alfredo, Leci, Aurice, Daniel, Elisa, Sílvia** e aos demais que me ajudaram de uma forma que jamais vou poder retribuir, não apenas pelo valor material do que me foi doado, mas pelo valor do gesto. Seus exemplos de solidariedade serão seguidos e jamais esquecidos.*

*À **Família Yokota**, que me apoiou e cuidou de mim como uma filha, agradeço as palavras de carinho e incentivo! Agradeço por participar do seu ambiente familiar, em que presenciei lições de amor e respeito.*

*Ao querido **Douglas Yokota**, obrigada pelas palavras amigas e pela companhia em finais de semana, feriados e madrugadas de trabalho. Sua doçura e alegria tornaram felizes esses momentos. Obrigada pelo apoio. Acima de tudo, agradeço por compreender as minhas limitações e por respeitar os meus sonhos.*

*À **Fabiana Soki**, agradeço a companhia que tornou meus dias muito divertidos e inesquecíveis. Uma vez, quando eu estava me sentindo cansada e sem tempo, decidi não*

*prestar o concurso de pós-graduação. Neste dia, a Fabi sentou na minha frente e me olhou por um momento, decepcionada. Em seguida, saiu e voltou com algumas latas de leite condensado (muito úteis em momentos de desânimo!), encheu minha escrivadinha com elas, e disse em tom desesperador: faça a prova... Fabi, aqui está o resultado. Obrigada por ter acreditado em mim em momentos importantes e, mesmo de longe, sempre ter feito questão de me ajudar a permanecer firme.*

*À **Márcia Borba**, minha irmã gaúcha, companheira de pizzas, novelas, brigadeiros, noites de trabalho e de conversas divertidíssimas e intermináveis (como a gente fala, guria!), agradeço por ter sido para mim uma fonte de conselhos muito sensatos. Obrigada pelo seu exemplo de determinação e seriedade. Guardarei comigo os bons momentos e a amizade sincera.*

*À **Caroline Lumi**, muito amiga. Admiro muito sua delicadeza, inteligência e dedicação, além do dom de cuidar das pessoas. Jamais vou me esquecer das vezes em que se sacrificou por mim, sem pedir nada em troca. Isto é muito raro. Muito obrigada! Confio na sua grandeza e torço muito por você!*

*À **Luciana Katty**, grande amiga. Lembra das pizzas de milho, das conversas até altas horas? Foi também nas altas horas que você me acompanhou quando eu estava estudando para entrar na pós-graduação. Agradeço muito pela torcida, pelas palavras de conforto e estímulo em todos os momentos. Fiquei muito feliz com o seu ingresso na turma de pós também! Pena que tenha sido tão próximo da minha saída... Mas isso não importa muito, pois a amizade continuará sempre, onde quer que estejamos!*

*À **Letícia Boaro**, que foi minha colega de graduação e grande amiga na pós-graduação, agradeço pela grande amizade. Muito obrigada por ter sido meu ponto de apoio em muitos momentos. Você me ensinou muito sobre determinação, coragem, planejamento e ousadia, além de estatística! Admiro sua espontaneidade. Quanta falta vou sentir de te procurar no seu esconderijo! Você sempre estará no meu coração!*

*À **Flávia Rodrigues**, Flapiro, agradeço por ter sido sempre solícita. Obrigada por ter me fornecido toda a sua coleção de livros materianos, anotações e livro de Inglês para que eu prestasse o concurso da pós-graduação, e também por toda ajuda que me prestou durante o meu curso, até no momento de preparar a aula da defesa. Agradeço pela convivência, pelas conversas, pelas sugestões, pela torcida. Ah, não poderia faltar um agradecimento por aquela lasanha memorável! Acho que dormi por umas 13h depois de comer, lembra?!*

*Obrigada aos amigos da sala de elementos finitos: **Carina Baptiston**, **Lucas Pabis** e **Camila Esposito**. Carina, agradeço pela disposição em me ensinar os primeiros passos dos elementos finitos, e pelas muitas dúvidas que me tirou durante meu trabalho, além da convivência e longas conversas. Lucas, agradeço a oportunidade de lhe acompanhar durante a sua Iniciação Científica e de presenciar os primeiros passos de um aluno talentoso e*



dedicado; além do mais, agradeço por ter me divertido tanto com suas histórias. Camila Esposito, agradeço a serenidade, atenção e solidariedade; você sempre foi uma companhia muito agradável! Desejo muito sucesso a vocês!

Aos amigos de pós-graduação: **Maurício Gomes**, que ingressou na pós-graduação comigo em 2006, e com quem convivi ao cursar disciplinas e ao freqüentar alguns programas sociais do grupo NVNA: agradeço pela convivência, que me proporcionou exemplos de esforço, inteligência e humildade. À **Bárbara Pick**, de quem me aproximei mais no final do curso, o que me valeu muitas risadas: muito obrigada pela companhia na “sala de medidas”, pelas músicas do U2 e por tornar meus momentos tão mais leves! Ao **Breno Mont’Alverne**, obrigada pelo exemplo de altruísmo quando, sem me conhecer, ofereceu-se para ajudar com a doação de um adesivo, quando já não havia mais nenhuma verba disponível; adorei ter me tornado sua amiga! À **Flávia Gonçalves**, que estudou no mesmo colégio que eu: não sei se ela já ouviu esta história, mas eu me incentivei mais a cursar Odontologia por tê-la admirado quando vi a propaganda do nosso colégio sobre ela, quando passou na FUVEST entre os primeiros colocados. Agradeço pela oportunidade de conviver com uma pessoa tão inteligente e simples. À **Neide Coto**, cujo ânimo e doçura encantam a todos os que a rodeiam, muito obrigada pela torcida e por me indicar para uma oportunidade tão enriquecedora; jamais vou poder agradecer à altura do seu ato. Ao **André de Vito**, que me socorreu quando precisei de mais tubinhos Tygon, serei eternamente agradecida pela companhia de SEIS ANOS (esta expressão só o André pode explicar!), com demonstrações de bom humor, simpatia e inteligência. À **Helena Burlamaqui**, agradeço a amizade sincera e o exemplo de seriedade com o trabalho, além das conversas e da companhia em almoços e cafés-da-manhã. A **Lilyan Yamasaki**, **Carina Castellan**, **Ricardo Sgura**, **Eugenio Garcia** e **Luciana Silva**, obrigada pela companhia no laboratório, enquanto confeccionávamos corpinhos-de-prova, cortávamos dentes, fazíamos testes nas máquinas de ensaios... A presença de vocês tornava o trabalho muito agradável. Ao **Marcelo Mendes**, obrigada pela companhia na disciplina que cursamos na Poli, juntamente com a Márcia. Lembro dos lanches, das caronas e dos três sentados naqueles bancos em conversas muito divertidas. Desejo-lhe muito sucesso! Ao **Emerson Martins**, que tenho como colega de mesmo orientador, agradeço pela demonstração de boa vontade em ajudar e pelo bom humor com que conversa com todos. **Andrea Mello**, minha companheira de ensaios de cisalhamento, quantas vezes eu abusei da sua boa vontade com milhares de perguntas?! Muito obrigada pela amizade e paciência ao responder a cada uma delas! Ao **Vinicius Rosa**, o Vini, animador do departamento, obrigada pela convivência! Aos novos colegas de pós-graduação: **Fernando Maeda**, **Bruna Rozzetti**, **Karen Fukushima**, **Maria Silvia Marques**, **Luana de Campos**, desejo que alcancem seus objetivos e tenham muitas realizações! Ao **Maico Dutra**, agradeço a companhia feita a esta “jovem”! Como diz o Maico piadista: “Ah, esses jovens de hoje em dia... são tão jovens...”. Agradeço a todos vocês e desejo muito sucesso!

“Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas.”  
(Antoine de Saint-Exupéry)

Aos **professores da banca examinadora**, agradeço pela presença, pelo empenho em ler meu trabalho e pela contribuição com comentários e perguntas. Aproveito para me desculpar pelos erros de impressão que possam ter permanecido.

"A luta contra o erro tipográfico  
tem algo de homérico.  
Durante a revisão,  
os erros se escondem,  
fazem-se positivamente invisíveis.  
Mas assim que o livro sai,  
tornam-se visibilíssimos,  
verdadeiros sacis vermelhos  
a nos botar a língua em todas as páginas.  
Trata-se de um mistério que a ciência não  
conseguiu decifrar."  
(Monteiro Lobato)

À **Mariane Brumatti**, do Laboratório de Caracterização Tecnológica — LCT (Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP), agradeço pelo auxílio, com toda a paciência e dedicação, durante a análise por microscopia de varredura. Obrigada pela convivência muito agradável, pelas conversas e pelo seu exemplo de entusiasmo.

Ao professor **Gerson Marinucci**, do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), agradeço pelo auxílio na interpretação das imagens das fraturas dos espécimes. Muito obrigada pela dedicação que demonstrou ao tirar minhas dúvidas.

A **Rosa Cristina, Mirtes e Eli**, três pessoas encantadoras: **Rosinha**, agradeço pelo seu apoio constante e por ter cuidado de mim desde o momento em que ingressei no departamento como aluna de Iniciação Científica. **Mirtes**, agradeço pela preocupação, pelas dicas gastronômicas e jamais vou esquecer as chamadas: "Tatocaaaaa... cadê o batom?? Cadê o salto?!". **Eli**, agradeço pelos muitos momentos de descontração... sempre vou ficar vermelha ao lembrar das suas piadas! Agradeço pela dedicação, pela amizade e pelo carinho que recebi de cada uma de vocês.

Ao professor **Carlos Francci**, agradeço pela oportunidade de conhecer empresas de materiais dentários, e pela oportunidade de assistir às aulas muito bem humoradas e cheias de detalhes durante o estágio no período noturno. Obrigada pela boa vontade em expor seus pontos de vista inovadores aos alunos de pós. Isto é uma demonstração de cuidado e preocupação conosco.

*Ao professor **Fernando Nogueira**, sempre muito divertido, agradeço pela oportunidade de lhe acompanhar no período noturno, em que pude aprender muito, e pelas conversas no corredor.*

*Ao professor **Paulo Capel**, agradeço pelo exemplo marcante de paixão por dar aulas, sem contar a demonstração de talento.*

*Ao professor **Paulo Cesar**, sempre agradável, solícito e divertidíssimo (jamais vou esquecer os comentários engraçadíssimos), agradeço pela convivência e por ter aprendido muito durante o período em que lhe auxiliiei no estágio no período diurno.*

*Ao professor **Walter Miranda**, que demonstra preocupação com as pessoas, obrigada pelo seu bom humor e pelas conversas leves e edificantes. Agradeço por nos contar sobre sua rotina de trabalho, para que possamos refletir como dentistas e seres humanos.*

*À professora **Rosa Helena**, que sempre cuidou de suas “crianças” com tanto carinho, agradeço por tudo o que fez por nós enquanto responsável pela pós-graduação. Pelo seu trabalho, obtivemos muitos recursos, sem os quais, talvez, nossos trabalhos não alcançariam tanta qualidade. Agradeço imensamente.*

*Ao professor **Igor Medeiros**, pessoa inteligentíssima, simples, solícita e bem-humorada, que me orientou no trabalho de Iniciação Científica, agradeço pela sua simpatia, pelos exemplos de dedicação e pela torcida!*

*Ao professor **Leonardo Rodrigues**, agradeço pelo tempo dispensado a mim quando pedi conselhos na época de prestar o concurso para aluna de pós-graduação, uma época de decisões difíceis. Fui muito feliz por, nesta época, ter tido oportunidade de acompanhar suas aulas práticas durante o estágio na graduação no período noturno, quando pude tirar minhas próprias dúvidas sobre materiais dentários. Agradeço pelos conselhos dados também após meu ingresso na pós-graduação. Obrigada por me ajudar a enxergar que as coisas... “não são bem assim...”!*

*Ao professor **Roberto Braga**, cuja disciplina, dedicação e racionalismo se fizeram fontes de inspiração, agradeço a atenção prestada a mim em todas as vezes que bati em sua porta para fazer muitas perguntas. Professor, sempre me lembrarei do seu exemplo de empenho no trabalho constante e incansável. Muito obrigada mesmo!*

***Antonio Carlos Lascaia e Silvio Peixoto Soares**: seriam dois gênios ou dois anjos-da-guarda?? A resposta é que são as duas coisas. Admiro sua seriedade, dedicação, criatividade e inteligência. Não tenho palavras para agradecer pela imensa ajuda que me deram, pelas inúmeras vezes em que fui socorrida por vocês quando eu mesma já não sabia mais por onde continuar. Gostaria de agradecer pelos conselhos e conversas muito bem-humoradas. Desejo-lhes tudo de bom!*

À professora **Josete**, que com seu jeito doce e amigo, esteve sempre por perto me dando suporte, agradeço muito pelos ensinamentos que recebi nestes anos. Sua presença foi muito importante para que eu pudesse realizar este trabalho.

Ao professor **Raul Lima**, agradeço pela enorme boa vontade em nos ajudar com seus conhecimentos. A sua ajuda foi fundamental, não apenas para o meu trabalho, mas para o de todos os do grupo. Sua presença sempre nos traz muita luz.

Professor **Antonio Muench**, não tenho palavras para expressar a gratidão e o contentamento por ter por perto alguém tão especial como o senhor. Sua jovialidade, simpatia e humildade o tornam uma pessoa ímpar e admirável. Não bastasse a presença agradabilíssima, o senhor ainda tem o mérito de uma grande inteligência, raciocínio lógico e de uma incansável vontade de estudar. Serei sempre grata pelo exemplo de conduta que o senhor me deu.

Ao meu orientador, **Rafael Yagüe Ballester**, agradeço por ter sido o maior responsável pelo meu ingresso na atividade de pesquisa e pelas minhas evoluções deste período. Obrigada pelos exemplos de honestidade, caráter, compreensão e humildade, e por ter compartilhado comigo alguns de seus valores. Agradeço pelas demonstrações de amizade e pela preocupação com minha formação pessoal como pessoa crítica, consciente e justa. Serei eternamente grata pela paciência com que conduziu meus passos, no início, muito vacilantes, até que se tornassem mais firmes.

"Se eu pude ver mais longe  
é porque estava me apoiando  
sobre os ombros de gigantes."  
(Isaac Newton)

À **MSC Software Corporation**, agradeço pelo suporte técnico na etapa de construção dos modelos de análise por elementos finitos.

À **Saint-Gobain Performance Plastics**, obrigada pela doação dos tubos Tygon.

À **Bisco**, agradeço pela doação do adesivo auto-condicionante.

Ao **Serviço de Documentação Odontológica da FOU SP (SDO)**, agradeço pela revisão da formatação deste trabalho.

À **CAPES**, agradeço pelo apoio financeiro.

*À Faculdade de Odontologia da USP (FOUSP), muito obrigada pela oportunidade de me graduar em Odontologia sob seus ideais.*

*Ao Departamento de Materiais Dentários, um sincero agradecimento pela oportunidade de, desde de 2002, participar do convívio com seus membros e de participar de suas atividades de pesquisa. No início de 2003, passei à condição de aluna de Iniciação Científica; mais tarde, em 2006, à condição de aluna de pós-graduação. Agradeço por todas as transformações que sofri neste lugar. Serão muitas as lembranças.*

*À Universidade de São Paulo (USP), obrigada pela oportunidade de vivenciar sua respeitável filosofia de ensino e pesquisa científica. Cursar a USP foi um sonho realizado.*

*“Scientia Vincet”  
(Vencerás pela Ciência)*

*“O Amor sempre permanecerá.  
As profecias desaparecerão;  
as línguas cessarão;  
a ciência será superada;  
porque agora, nosso conhecimento é imperfeito,  
e imperfeita é a nossa profecia.  
Mas quando vier o que é perfeito,  
desaparecerá o que é imperfeito.  
Quando eu era menino, falava como menino,  
sentia como menino, raciocinava como menino.  
Mas, depois que cheguei à idade adulta, acabei com as coisas de menino.  
Porque agora vemos como num espelho, embaçado,  
mas então veremos face a face.  
Agora conheço de modo imperfeito,  
mas então conhecerei como sou conhecido.  
Agora permanecem a fé, a esperança e o amor:  
as três virtudes.  
Porém, a maior delas é o Amor.”*

*Paulo de Tarso  
(Coríntios XIII: 8-13)*

## RESUMO

Xavier TA. Comparação dos ensaios de resistência adesiva por torção e por cisalhamento com fio [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2010.

Objetivo: verificar, através de análise por elementos finitos e de uma etapa experimental, se o ensaio de torção, como ensaio de resistência de interfaces adesivas, seria capaz de levar os espécimes à ruptura sob tensões de cisalhamento e se ele seria vantajoso em relação ao ensaio de cisalhamento. Material e Método: para a análise de tensões pelo método dos elementos finitos, os modelos tridimensionais dos dois ensaios foram constituídos por cilindro de compósito, uma camada de adesivo e um cilindro de dentina com maior diâmetro. Os espécimes foram simulados nos tamanhos convencional e micro, numa proporção de 5:1, exceto pela camada de adesivo, de espessura constante. Foram simulados dois módulos de elasticidade do cilindro de compósito (híbrido e baixa viscosidade) e, para os modelos de cisalhamento, variaram as distâncias entre o local de carregamento e a interface adesiva. Foram analisados os valores das tensões máxima principal e cisalhamento máximo e a proporção entre elas ao longo da interface dentina/adesivo; a direção dos vetores de tensão máxima principal; e o local dos picos de tensão. Na etapa experimental, foram construídos cilindros de compósito (híbrido e de baixa viscosidade) nos tamanhos convencional e micro, aderidos a uma superfície de dentina bovina por meio de três sistemas adesivos. O esforço de cisalhamento foi aplicado com fio ortodôntico a uma distância da interface adesiva baseada na literatura e, para os ensaios de torção e microtorção, foram desenvolvidos dispositivos específicos para a aplicação do torque. Os resultados de tensão de ruptura foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey. Todas as superfícies de fratura foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura. As frequências das fraturas adesivas e coesivas foram submetidas ao teste exato de Fisher e relacionadas aos valores de tensão de ruptura experimentais, bem como suas características foram relacionadas às tensões observadas pelo método dos elementos finitos. Os parâmetros experimentais de comparação entre os ensaios foram: poder de detecção de diferenças significantes entre os sistemas

adesivos; constância da classificação relativa dos mesmos ao alterar as configurações dos ensaios e frequências dos tipos de fratura. Resultados: ambos os ensaios apresentaram um estado complexo de tensões com distribuição não-uniforme. Não foi notada menor sensibilidade dos resultados do ensaio de torção às mudanças das configurações do teste, nem uma maior capacidade para detectar diferenças significantes entre os adesivos do que o ensaio de cisalhamento. O ensaio de torção apresentou maior dificuldade de execução prática e maiores frequências de fraturas coesivas, porém, estas ocorreram mais no cilindro de compósito, enquanto no cisalhamento, ocorreram mais na dentina. Não houve certeza sobre o tipo de tensão que tenha levado à fratura nos dois tipos de ensaio. Conclusões: embora não se tenha certeza se o ensaio de torção leva à ruptura sob tensões de cisalhamento e tenham sido notadas desvantagens práticas de execução do ensaio, este apresenta uma característica que sugere novos estudos: ocorrência de fraturas coesivas principalmente no cilindro de compósito, o que poderia, talvez, ser resolvido com o reforço do material do cilindro.

Palavras-Chave: Ensaio de torção. Ensaio de cisalhamento. Biomecânica. Método dos elementos finitos. Interface adesiva. Resistência de união adesiva.



## ABSTRACT

Xavier TA. A comparison between torsion and wire-loop shear bond strength tests [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2010.

Objective: verify, by finite element analysis (FEA) and laboratorial tests, if the torsion bond strength test is able to lead adhesive interface to fracture under shear stress and if it would be more advantageous than wire-loop shear test. Material and method: for stress analysis by finite element method, the 3D models of both tests consisted of a resin composite cylinder, an adhesive layer and a dentin cylinder with a larger diameter. The specimens were simulated with both conventional and micro sizes, in a 5:1 ratio, except for the adhesive layer, kept in a constant thickness. Two values of elastic modulus were simulated for the composite cylinder (hybrid and flowable). For the shear models, different distances were simulated between the load point and the adhesive interface. The values of maximum principal and maximum shear stresses and the ratio between both types were analyzed along the adhesive interface, as well as the maximum principal vectors direction and the local of stress peaks. For the laboratorial tests, cylinders of hybrid and flowable resin composite, in both micro and conventional sizes, were adhered onto dentin surfaces by means of 3 adhesive systems. The shear load was applied with a metallic wire-loop at distances from the interface based on literature and, for the torsion test, the torque was applied by specific apparatus developed for that. The values of bond strength were submitted to analysis of variance and Tukey's test. Fracture surfaces were analyzed by scan electron microscopy. The frequencies of fracture types were compared by Fisher's test and its relationship with bond strength values were verified, as well as the relationship between fracture features and stresses results obtained by FEA. The experimental parameters for comparison between both tests were: ability for detecting significant differences among the 3 adhesives, change of adhesives ranking while varying the test configuration and frequency of fracture types. Results: both tests showed non-uniform stress distribution. It was not noticed a lower sensibility of torsion test results to changes of the test configurations, nor a major ability for detecting significant differences among the adhesive systems than showed

the shear test. The torsion test showed to be more difficult to execute and exhibited a higher frequency of cohesive fracture, however, that occurred most of the time in the composite cylinder, while it occurred mainly in dentin in shear test. There was no certainty about the kind of stress that lead to specimen fracture in both tests. Conclusions: although there was no certainty about the kind of stress that lead to specimen fracture and the major difficulty of execution of torsion test, this test exhibited a feature that suggests future studies: the occurrence of cohesive fracture mainly in the composite cylinder, which could be solved, maybe, by reinforcing the cylinder material.

Keywords: Torsion test. Shear Test. Biomechanics. Finite element method. Adhesive interface. Adhesive bond strength.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1 - Corte longitudinal (plano xz) que evidencia a geometria e malha dos modelos 3D simulados pelo método dos elementos finitos. Observar o refinamento da malha nas áreas de interesse: periferia da interface dentina/adesivo/cilindro de compósito e adjacências71 .....54
- Figura 4.2 - Cilindros de adesivo (azul) e dentina (amarelo). A) Geometria: notar as divisões internas da geometria (o cilindro principal é composto de vários menores) que possibilitam o controle da malha; B) Malha: notar que a malha foi refinada na região da periferia da interface dentina/adesivo/resina. O perímetro do cilindro de compósito foi posicionado coincidindo com o centro da faixa de elementos de menor tamanho no adesivo .....56
- Figura 4.3 - A) Incisivo bovino com dentina vestibular exposta embutido em resina acrílica autopolimerizável, dentro de um segmento de tubo de PVC; B) Modelo 3D com fixação da base e paredes laterais do cilindro de dentina em todas as direções do espaço .....57
- Figura 4.4 - Simulação dos carregamentos pelo método dos elementos finitos. Os esquemas dos carregamentos correspondentes estão representados na parte superior da figura. A) Modelo de microtorção (miTo), com um cilindro adicional de metal (em azul), e a carga de torção distribuída por quatro nós deste cilindro no sentido anti-horário (setas amarelas); B) Modelo de microcisalhamento (miCis), com a pressão (setas vermelhas) aplicada em uma linha na metade do perímetro do cilindro de compósito, neste caso, a 0,4 mm de distância da interface dentina/adesivo .....58
- Figura 4.5 - Representação esquemática da aplicação de carga (2C) de cisalhamento com fio e dedução matemática do valor da pressão (N)71 .....59
- Figura 4.6 - Seqüência de confecção dos espécimes71: I.a) Incisivo bovino (face vestibular); I.b) Dentina vestibular exposta após desgaste; II. Embutimento do dente em resina autopolimerizável; III. Aplicação do sistema adesivo e fotoativação; IV. Construção do cilindro de compósito (com auxílio de uma matriz) e fotoativação.....65

Figura 4.7 - Dispositivo de aplicação de torção. A) Dispositivo com polias e rolamentos adaptado a uma máquina de ensaios universal; B) Dispositivo com sistema de rolamentos e espécime posicionado no mandril com auxílio de uma mesa magnética; C) Cilindro de To fixado (por meio de resina fluida) ao mandril (notar o acoplamento flexível na haste do mandril); D) Aumento na região do cilindro, sem a resina fluida; E) Cilindro de microtorção posicionado no mandril (diferente do mandril do ensaio de To); F) Cilindro de To fixado ao mandril .....69

Figura 4.8 - Montagem experimental dos ensaios de cisalhamento. A) Dispositivo adaptado a uma máquina de ensaios universal; B) Transmissão de força cisalhante ao cilindro por meio de um fio ortodôntico de 0,5 mm de diâmetro (ensaio de Cis) .....71

Figura 4.9 - Esquema da classificação das fraturas. Fraturas consideradas adesivas: A) Entre adesivo e dentina; B) Entre adesivo e cilindro; C) Coesiva no adesivo. Fraturas consideradas coesivas: A) Coesiva em dentina; B) Coesiva em compósito/vidro. Fraturas consideradas mistas: os tipos de A a D envolvem trechos de fratura adesiva e coesiva em um ou ambos os substratos de colagem.....73

Figura 5.1 - Variação da tensão máxima principal (MPa) ao longo de uma linha mediana na interface dentina/adesivo. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e, nos casos de ensaios de cisalhamento (Cis) e microcisalhamento (miCis), explicita a distância entre a carga e a interface (em mm). Os modelos correspondem aos tamanhos convencional e micro com compósito de baixa viscosidade e com filete .....80

Figura 5.2 - Variação da tensão de cisalhamento máximo (MPa) ao longo de uma linha mediana na interface dentina/adesivo. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e, nos casos de ensaios de cisalhamento (Cis) e microcisalhamento (miCis), explicita a distância entre a carga e a interface (em mm). Os modelos correspondem aos tamanhos convencional e micro com compósito de baixa viscosidade e com filete .....80

- Figura 5.3 - Faixas de tensões (valores das escalas em MPa) sobre a superfície de adesão do cilindro de dentina nos modelos simulados pelo MEF. Letras A e B, são faixas de tensão máxima principal, respectivamente, nos modelos de cisalhamento com fio e torção. Letras C e D, exibem as faixas de tensão de cisalhamento máximo, respectivamente, nos modelos de cisalhamento com fio e de torção. Acima, estão os esquemas dos sentidos do carregamento correspondentes a cada modelo .....81
- Figura 5.4 - Picos de tensão (em MPa) de cisalhamento máximo e máxima principal na interface dentina/adesivo para modelos com cilindros de compósito de baixa viscosidade. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e tipo de tensão .....83
- Figura 5.5 - Picos de tensão (em MPa) de cisalhamento máximo e máxima principal na interface dentina/adesivo para modelos com cilindros de compósito híbrido. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e tipo de tensão.....83
- Figura 5.6 - Médias (MPa) de resistência à ruptura correspondentes ao fator principal tipo de ensaio das três análises de variância e letras para contrastes dentro de cada adesivo. Médias com mesmas letras são semelhantes ( $p > 0,05$ ) .....88
- Figura 5.7 - Médias (MPa) de resistência à ruptura correspondentes ao fator principal cilindro (de compósito híbrido ou de baixa viscosidade) das três análises de variância (feitas para cada adesivo) e letras para contrastes dentro de cada adesivo. Médias com mesmas letras são semelhantes ( $p > 0,05$ ) .....91
- Figura 5.8 - Médias (MPa) de resistência à ruptura correspondentes às interações ensaio x cilindro x adesivo (não incluiu cilindro de vidro) e letras de contraste de médias. As letras maiúsculas permitem comparar as barras no plano do papel e dentro de cada um dos paralelos a ele (compara ensaios e cilindros dentro de um mesmo adesivo, ou entre colunas da mesma cor), e as minúsculas, entre as barras situadas num mesmo plano perpendicular ao papel (compara os três adesivos dentro de um ensaio com um mesmo cilindro). Letras iguais indicam semelhança de médias ( $p > 0,05$ ) .....93

- Figura 5.9 - Médias (MPa) de tensão de ruptura para as 9 condições experimentais (3 adesivos x 3 tipos de cilindro) do ensaio de torção ( $T_0$ ) (com inclusão do cilindro de vidro) e letras para contraste. Médias com mesmas letras são semelhantes ( $p > 0,05$ ) ..... 95
- Figura 5.10 - Coeficientes de variação (%) de cada condição experimental (segundo o tipo de ensaio, material do cilindro e sistema adesivo) ..... 97
- Figura 5.11 - Gráfico de dispersão do número de diferenças significantes entre os adesivos em função das médias dos coeficientes de variação dos mesmos em cada combinação ensaio x cilindro. No gráfico, são exibidos o coeficiente de correlação de Pearson (\*) e o valor de  $p$ ..... 99
- Figura 5.12 – Vista de topo de fraturas obtidas pelo ensaio de microtorção. I. Fratura adesiva (interface adesivo/dentina). Em 1, podem-se ver as impressões estriadas do tubo Tygon (que serviu como matriz para o cilindro de compósito) deixadas sobre o adesivo em torno da área onde estava colado o cilindro de compósito; II. Fratura coesiva (no cilindro de compósito). Observar a direção oblíqua da superfície da fratura coesiva que, neste caso, deixou a superfície com formato de cone; III. Fratura mista (envolve a interface dentina/adesivo e fratura coesiva no cilindro de compósito). A região do compósito com perda de foco é mais alta. Setas pretas: linhas de fratura no compósito e adesivo. Legenda geral na tabela 5.9, página 102 ..... 102
- Figura 5.13 - A) Vista de topo da fratura coesiva no cilindro de compósito de um espécime de microtorção. Em 3, observa-se o aspecto lamelado da superfície de fratura coesiva no compósito; B) Aumento da região do quadro na figura A, numa região mais próxima da interface (a região sem foco na figura A é mais alta). Notar que o compósito apresenta um aspecto poroso e que, mesmo na região mais profunda desta fratura, não foi exposta a dentina nem o adesivo da interface. Legenda geral na tabela 5.9, página 102 ..... 103

- Figura 5.14 - Vista de topo de fraturas obtidas pelo ensaio de microcisalhamento. I. Fratura adesiva (interface adesivo/dentina). Seta branca grossa: lado do carregamento; Setas brancas duplas: superfície de fratura da camada de adesivo no perímetro da interface adesiva, na região oposta à do carregamento; II. Fratura coesiva (em dentina). Setas brancas grossas: lado do carregamento. II. A) Imagem do dente, com uma inclinação oblíqua da superfície de fratura na dentina (com corte longitudinal dos túbulos dentinários); II. B) Imagem do cilindro de compósito solto, com parte da dentina que continuou aderida a ele. Setas brancas duplas: trinca na dentina; III. Fratura mista (envolve a interface adesivo/dentina e fratura coesiva em dentina). Setas brancas grossas: lado do carregamento. A) Imagem do dente; B) Imagem do cilindro de compósito solto. Legenda geral na tabela 5.9, página 102 ..... 104
- Figura 5.15 - Variação da razão [máxima principal/cisalhamento máximo] ao longo de uma linha mediana na interface dentina/adesivo de modelos de cisalhamento (Cis) e torção (To) com cilindro de compósito de baixa viscosidade. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e, nos casos do ensaio de cisalhamento, explicita a distância entre a carga e a interface (em mm) ..... 105
- Figura 5.16 - Vetores de tensão máxima principal (valores das escalas em MPa) apresentados num corte longitudinal de quatro modelos (cilindros de compósito de baixa viscosidade) tanto com filete (esquerda: A e C) quanto sem filete (direita: B e D). Acima (A e B): microtorção; abaixo (C e D): microcisalhamento. Notar que, em todos os casos, os vetores se orientam numa direção de aproximadamente 45° em relação à direção do carregamento e, portanto, também em relação à interface adesiva ..... 107
- Figura 5.17 - Fratura em um bastão de metal dúctil sob esforço de tração uniaxial (setas vermelhas; F = força). A) Notar a estricção da área de seção transversal na região da fratura (fratura sinalizada pelas setas duplas amarelas); B) Separação das superfícies de fratura: notar a superfície (\*) em 45° com a direção do carregamento de tração; C) Imagens de ambas as superfícies formadas pela fratura: a) superfície inclinada a 45° com o carregamento, na direção da tensão de cisalhamento máximo; b) estrias formadas pelo alongamento do material dúctil antes da fratura completa (notar que esta superfície formada na etapa de propagação dos danos é perpendicular aos vetores de tração) ..... 108

- Figura 5.18 - Exemplo de fratura de um material frável sob esforço de tração. A) Esforço de tração uniaxial no giz (neste caso, os vetores de tração se desenvolvem paralelos ao longo eixo do giz); B) Fratura (setas duplas) perpendicular ao esforço de tração ..... 109
- Figura 5.19 - Figura retirada do livro *Fractography of Ceramics and Glasse*74. A) Esforço (F) de torção sobre um bastão e orientação dos vetores de tensão de cisalhamento máximo ( $\tau$ ) e máximas principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ); B) Superfície de fratura helicoidal, formada a  $45^\circ$  com o esforço de torção, perpendicular aos vetores de tração ( $\sigma_1$ ). A seta indica o local de início da fratura ..... 110
- Figura 5.20 - A) Fratura oblíqua (helicoidal) em um material frável submetido à torção; B) Fratura num bastão de material dúctil, plana e paralela ao esforço de torção ..... 110
- Figura 5.21 - A) Giz submetido a um esforço de torção (F), com fratura helicoidal (linha pontilhada); B) Separação das superfícies de fratura..... 112
- Figura 5.22 - Imagens de dois cilindros de vidro fraturados após serem submetidos ao ensaio de To. Notar a direção oblíqua da superfície de fratura que, nestes dois casos, formam um cone..... 112
- Figura 5.23 - Fratura entre adesivo e cilindro de compósito obtida pelo ensaio de miTo. a) Camada de adesivo na região da interface adesiva, com laminações na periferia da interface. A seta branca mostra a região central, com marcas características de rasgamento, provavelmente por ter sido a última região para a qual a fratura se propagou. Legenda geral na tabela 5.9, página 102 ..... 113
- Figura 5.24 - Frequências (%) de cada tipo de fratura segundo o adesivo e tipo de ensaio. As médias da tensão de ruptura (MPa) de cada grupo estão apresentadas no eixo horizontal ..... 115
- Figura 5.25 - Corte longitudinal de modelos de miTo e miCis sem filete de compósito com faixas de tensões máxima principal e cisalhamento máximo (valores de tensão em MPa). Notar que a região de maior concentração de tensão nos dois tipos de ensaio é próxima ao ângulo reto entre adesivo e compósito. Notar também que, no modelo de miTo, as tensões de maiores valores avançam menos para a interface dentina/adesivo e interior da dentina do que no modelo de miCis ..... 117



- Figura 5.26 - Corte longitudinal de modelos de miTo e miCis com filete de compósito com faixas de tensões máxima principal e cisalhamento máximo (valores de tensão em MPa). Notar que a região de maior concentração de tensão nos dois tipos de modelo é o filete. Notar que, também neste caso, as tensões de maiores valores avançam menos para a interface dentina/adesivo e interior da dentina no modelo de miTo do que no de miCis..... 117
- Figura 5.27 - Coeficientes de variação (%) de cada sistema adesivo segundo o tipo de ensaio..... 121
- Figura 5.28 - Gráfico da dispersão dos resultados de frequência de fraturas coesivas (%) em função das médias das tensões de ruptura (MPa) dos adesivos para cada tipo de ensaio. No gráfico, são exibidos os coeficientes de correlação de Pearson (\*) e os valores de p ..... 122
- Figura 5.29 - Gráfico da dispersão dos resultados de frequência de fraturas coesivas (%) em função das médias normalizadas das tensões de ruptura (MPa) dos adesivos de todos os ensaios. No gráfico, são exibidos o coeficiente de correlação de Pearson (\*) e o valor de p.... 123
- Figura 5.30 - Gráfico da dispersão dos resultados de frequência de fraturas adesivas (%) em função dos coeficientes de variação (%) dos adesivos para cada tipo de ensaio. No gráfico, são exibidos os coeficientes de correlação de Pearson (\*) e os valores de p ..... 124
- Figura 5.31 - Gráfico da dispersão dos resultados de frequência de fraturas adesivas (%) em função dos coeficientes de variação (%) normalizados dos adesivos de todos os ensaios. No gráfico, são exibidos o coeficiente de correlação de Pearson (\*) e o valor de p.... 125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dimensões das estruturas dos modelos simulados pelo MEF .....	54
Tabela 4.2 - Propriedades dos materiais simulados pelo método dos elementos finitos.....	55
Tabela 4.3 - Distâncias entre o local de carregamento e a interface adesiva para os ensaios de cisalhamento com fio simulados pelo método dos elementos finitos <sup>31</sup> .....	60
Tabela 5.1 - Médias e desvios-padrão (MPa), coeficientes de variação (%) e frequência dos tipos de fratura de cada condição experimental .....	86
Tabela 5.2 - Análise de variância da resistência adesiva para o adesivo All-Bond SE (A).....	87
Tabela 5.3 - Análise de variância da resistência adesiva para o adesivo Magic Bond (M) .....	87
Tabela 5.4 - Análise de variância da resistência adesiva para o adesivo Scotchbond Multi-Purpose (S) .....	87
Tabela 5.5 - Razões entre os picos de tensão obtidos pelo MEF de modelos de tamanho micro e convencional correspondentes. Os modelos de cisalhamento correspondem aos casos reproduzidos experimentalmente.....	89
Tabela 5.6 - Razões entre os picos de tensão obtidos pelos modelos de análise pelo MEF com cilindro de compósito fluido e híbrido correspondentes. Os casos de cisalhamento correspondem aos reproduzidos experimentalmente .....	90
Tabela 5.7 - Análise de variância da resistência adesiva para o ensaio de torção, com inclusão do cilindro de vidro .....	94

Tabela 5.8 - Comparação das influências das configurações dos ensaios sobre os resultados de picos de tensão obtidos pelo MEF e de tensões de ruptura experimentais.....	101
Tabela 5.9 - Legenda geral das estruturas observadas nas imagens das superfícies de fratura.....	102
Tabela 5.10 - Comparação das frequências de fraturas adesivas e coesivas pelo teste exato de Fisher para cada adesivo dentro de cada ensaio .....	116
Tabela 5.11 - Médias (MPa) da tensão de ruptura de cada tipo de fratura dos adesivos nos diversos ensaios e suas frequências entre parênteses. Em cada ensaio, foram contrastadas as médias correspondentes às combinações tipo de fratura x adesivo com frequência mínima de 3.	119

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

$\mu\text{m}$	Micrômetro
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ade	Fratura do tipo adesiva
BisGMA	Metacrilato de glicidila bisfenol A
$G_{IC}$	Taxa crítica de liberação de energia
Cis	Ensaio de cisalhamento
coe	Fratura do tipo coesiva
E	Módulo de elasticidade
GPa	Gigapascal
h	Hora
HEMA	Metacrilato de 2-hidroxietila
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
$K_{IC}$	Fator de intensidade de tensão crítico
$K_t$	Fator de concentração de tensão
MEF	Método dos elementos finitos
miCis	Ensaio de microcisalhamento
min	Minuto
mis	Fratura do tipo mista
miTo	Ensaio de microtorção
mm	Milímetro
$\text{mm}^2$	Milímetro quadrado
MPa	Megapascal
N	Newton
n	Número de espécimes (tamanho da amostra)
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celcius
$p$	Probabilidade de hipótese nula
pH	Potencial hidrogeniônico
PVC	Cloreto de polivinila
s	Segundo
SiC	Carbeto de silício
TEGDMA	Dimetacrilato de trietilenoglicol
To	Ensaio de torção

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
$\pi$	Razão entre o perímetro e o diâmetro de uma circunferência
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\sigma$	Tensão de tração
$\tau_{\text{máx}}$	Tensão de cisalhamento máximo
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima principal
#	Numeração

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	29
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	33
2.1 ODONTOLOGIA RESTAURADORA ADESIVA .....	33
<b>2.1.1 Procedimentos adesivos</b> .....	34
2.1.1.1 Esmalte e dentina como substratos de adesão .....	34
2.1.1.2 Sistemas adesivos dentinários .....	36
2.1.1.2.1 <i>Sistemas adesivos com condicionamento ácido prévio</i> .....	36
2.1.1.2.2 <i>Sistemas auto-condicionantes</i> .....	37
2.2 AVALIAÇÃO DA INTERFACE ADESIVA .....	39
<b>2.2.1 Ensaios mecânicos estáticos</b> .....	41
2.2.1.1 Influência das configurações dos ensaios sobre seus resultados .....	43
<b>3 PROPOSIÇÃO</b> .....	52
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	53
4.1 ANÁLISES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	53
<b>4.1.1 Construção dos modelos tridimensionais (3D)</b> .....	53
4.1.1.1 Geometria .....	53
4.1.1.2 Propriedades .....	55
4.1.1.3 Discretização do modelo .....	56
4.1.1.4 Condições de contorno e carregamento .....	57
4.1.1.4.1 <i>Deslocamento</i> .....	57
4.1.1.4.2 <i>Interfaces adesivas</i> .....	58
4.1.1.4.3 <i>Carregamentos mecânicos</i> .....	58
<b>4.1.2 Parâmetros de análise dos resultados de tensão obtidos pelo método dos elementos finitos</b> .....	62
4.2 ETAPA EXPERIMENTAL .....	63
<b>4.2.1 Delineamento das variáveis da etapa experimental</b> .....	63
4.2.1.1 Seleção dos materiais .....	63
4.2.1.2 Dois tamanhos de espécime .....	64
4.2.1.3 Tamanho da amostra e número de cilindros colados por dente .....	64
<b>4.2.2 Sequência de confecção dos espécimes</b> .....	65
4.2.2.1 Tratamento prévio do substrato dentinário .....	66
4.2.2.2 Aplicação dos sistemas adesivos .....	66
4.2.2.3 Confecção dos cilindros de compósito .....	67
<b>4.2.3 Armazenamento dos espécimes antes dos ensaios</b> .....	68

<b>4.2.4 Ensaios mecânicos de resistência de união</b> .....	69
4.2.4.1 Torção .....	69
4.2.4.2 Cisalhamento .....	71
<b>4.2.5 Análise dos resultados da etapa experimental</b> .....	72
4.2.5.1 Resultados de tensão de ruptura .....	72
4.2.5.2 Análise das fraturas.....	72
4.2.5.2.1 Avaliação do modo de ruptura.....	72
4.2.5.2.2 Classificação das fraturas .....	73
4.2.5.2.3 Relação das características das fraturas com as tensões obtidas pelo MEF.....	74
4.2.5.2.4 Análise de frequências de fraturas.....	74
4.2.5.2.5 Relação das frequências de fratura com valores de resistência à ruptura experimentais.....	75
<b>4.2.6 Parâmetros experimentais de comparação entre os ensaios de torção e cisalhamento</b> .....	76
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	77
5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DELINEAMENTO DO ESTUDO .....	77
5.2 PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES OBTIDO PELO MEF EM CADA TIPO DE ENSAIO .....	78
5.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS SOBRE OS VALORES DE TENSÃO DE RUPTURA (ETAPA EXPERIMENTAL) E PICOS DE TENSÃO (ANÁLISE PELO MEF).....	82
5.4 ANÁLISE DAS FRATURAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E SUAS RELAÇÕES COM A ANÁLISE PELO MEF E COM VALORES DE TENSÃO EXPERIMENTAIS.....	101
5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS MECÂNICOS.....	126
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	131
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	132
<b>APÊNDICE A</b> .....	140

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de restaurações de resinas compostas aderidas à estrutura dental por meio de um sistema adesivo trouxe grandes avanços na prática clínica odontológica. Em relação ao amálgama dentário, os compósitos resinosos permitem maior conservação da estrutura dental sadia, são livres de mercúrio e são mais estéticos<sup>1-3</sup>.

Apesar das vantagens, estudos clínicos de longos períodos de acompanhamento apontam para uma menor longevidade clínica das restaurações resinosas em dentes posteriores<sup>2, 3</sup>. A principal causa desta menor longevidade é o maior risco de cáries secundárias e descoloração marginal, conseqüências da falha da adesão na interface entre o dente e a restauração<sup>2-5</sup>.

O maior desafio da Odontologia restauradora adesiva é melhorar a adesão à dentina, um substrato úmido (desfavorável aos monômeros hidrofóbicos dos compósitos) e muito variável<sup>6</sup>. Na tentativa de superar as dificuldades, são desenvolvidos, em grande velocidade, novas técnicas de adesão e novos materiais. O modo mais seguro de testar o desempenho destes é através de estudos clínicos de longos períodos de acompanhamento (cinco anos ou mais)<sup>2, 7-12</sup>, porém, muitas vezes, os resultados provenientes destes estudos são disponibilizados quando os materiais e técnicas correspondentes já foram substituídos por outros novos<sup>7, 9, 13, 14</sup>.

Neste contexto, embora haja dúvidas sobre a validade da predição do desempenho clínico das restaurações por meio dos estudos laboratoriais<sup>7, 11, 15-20</sup>, os resultados destes se tornaram a maior fonte de informação para os clínicos e fabricantes. Além da vantagem da maior rapidez, os estudos laboratoriais requerem menores custos e permitem um maior controle de variáveis que possam interferir nos resultados. Quanto maior a capacidade de vedamento da interface verificada de forma direta ou indireta *in vitro*, teoricamente, maior será a longevidade da restauração *in vivo*<sup>8, 9</sup>.

Como forma indireta de avaliar o vedamento da interface adesiva, são muito utilizados ensaios laboratoriais mecânicos, que fornecem resultados de resistência mecânica à fratura da interface. Entre os tipos mais utilizados, estão os testes mecânicos estáticos de tração, cisalhamento, microtração e microcisalhamento<sup>8, 9, 21, 22</sup>. Embora o ensaio de microtração seja, atualmente, o mais empregado<sup>8, 22, 23</sup>, os



que aplicam carregamento de cisalhamento apresentam vantagens como facilidade de execução<sup>24-26</sup>, e são considerados mais viáveis para testar materiais mais frágeis<sup>27</sup> ou com menor resistência adesiva e/ou coesiva<sup>28, 29</sup>.

Geralmente, os ensaios citados fornecem os resultados de resistência à fratura na forma de uma tensão média ou nominal, que é proveniente da divisão da carga aplicada no momento da fratura pela área da interface adesiva<sup>14, 24, 30</sup>.

Inúmeros estudos sobre as tensões geradas pelos ensaios mecânicos citados verificaram uma não-uniformidade da distribuição dessas tensões por todo o espécime, inclusive na região da interface<sup>15, 18, 22, 30-34</sup>. Muitas variáveis dos ensaios foram identificadas como capazes de produzir variações de distribuição de tensão, como o modo de fixação e alinhamento do espécime<sup>30, 34</sup>, a geometria do mesmo<sup>15, 18, 30, 31, 33-35</sup>, a distância entre o ponto de aplicação da carga e a interface adesiva<sup>18, 24, 25, 31</sup>, velocidade do carregamento<sup>24</sup> e módulo de elasticidade (E) dos materiais envolvidos<sup>18, 22, 31, 34</sup>. Quando a distribuição de tensões não é uniforme, o espécime tende a se fraturar no local onde elas se concentram mais, onde, provavelmente, chegam a atingir o valor da resistência máxima à ruptura do material. Ao dividir o valor do carregamento por toda a área de seção transversal, o valor da tensão nominal é menor do que o valor da verdadeira tensão a que o espécime resistiu. Quanto maior for a concentração das tensões num determinado ponto, menor será o valor do carregamento necessário para provocar o início da ruptura, o que indica que, dependendo de como se distribuem as tensões, o carregamento e, portanto, a tensão nominal, pode ser variável para fraturar um mesmo espécime com resistência constante.

Embora haja tentativas, não há, no meio odontológico, uma padronização dos ensaios que seja seguida pela maioria dos pesquisadores<sup>14, 24</sup>. As possibilidades de variação dos resultados de tensão nominal devidas às variações das configurações dos ensaios fazem com que não seja possível uma comparação direta entre resultados de diferentes laboratórios<sup>18, 30</sup>. Ainda dentro de um mesmo estudo, podem ser encontradas grandes dispersões dos resultados, por motivos que vão, por exemplo, desde a variabilidade dos substratos de colagem e da distribuição dos defeitos, até a dificuldade de padronizar a distância do ponto de carregamento até a interface, o alinhamento do corpo-de-prova e seu modo de fixação.

As comparações entre materiais não seriam totalmente limitadas pela subestimação do valor da tensão de ruptura caso houvesse padronização da

distribuição de tensões<sup>15,17</sup>. Porém, existe um fator que pode ser considerado como limitante para essas comparações, que é o fato de haver maiores frequências de fraturas coesivas em espécimes com maiores valores de resistência adesiva<sup>13, 24, 28, 36</sup>.

Análises de tensões pelo método dos elementos finitos<sup>24</sup> relacionaram as fraturas coesivas com a incidência de tensões de tração no substrato, e há autores que sugerem que, nestes casos, os resultados de tensão de ruptura são mais dependentes das propriedades do substrato do que da interface<sup>23</sup>. A interpretação do significado deste tipo de fratura é controversa, e alguns estudos chegam a sugerir o descarte dos resultados provenientes delas<sup>23</sup> porque não forneceriam informação a respeito da interface. No entanto, este tipo de procedimento pode viciar os resultados, já que, numa amostra em que a interface realmente resiste às faixas de tensão incidentes sobre ela, seriam considerados apenas os resultados influenciados, por exemplo, por falhas durante o procedimento adesivo. É lógico pensar que, se a interface for melhorada até o ponto de não mais representar uma região menos resistente (e não apenas quando a tensão não concentrar nela), as fraturas comecem a incidir em outras regiões. A limitação trazida pelas altas frequências de fraturas coesivas está na discriminação entre adesivos bons e muito bons<sup>14</sup>. O desenvolvimento de novos materiais e técnicas necessita da comparação do desempenho destes com o dos adesivos já considerados muito bons na atualidade. Caso a fratura passe a ocorrer sempre no substrato de colagem, os resultados provenientes de interfaces realmente diferentes passarão a pertencer às mesmas faixas de tensões.

Para superar o problema da padronização dos ensaios e das fraturas coesivas, alguns autores sugeriram a utilização de ensaios de tenacidade à fratura da interface adesiva<sup>14, 23, 24, 26</sup>, que são, porém, de difícil execução<sup>7, 8, 14</sup> e não deixam de apresentar resultados controversos entre diferentes laboratórios<sup>8</sup>.

A partir das críticas feitas por vários estudos aos ensaios mecânicos mais empregados atualmente, são consideradas, a seguir, algumas características que deveria apresentar um ensaio mecânico laboratorial confiável:

- simular as solicitações a que os materiais são submetidos clinicamente;
- produzir distribuições de tensão padronizadas;
- promover a fratura na área de interesse (no caso dos ensaios de resistência de união, na interface adesiva);

- ser capaz de discernir entre pequenas diferenças de resistência à fratura (o que depende também da variabilidade dos resultados e da sensibilidade da célula de carga utilizada);
- apresentar facilidade de execução (especialmente no que se refere à facilidade de padronização das variáveis de configuração).

Mesmo que os ensaios atuais passem a ser padronizados e a produzir sempre fraturas adesivas, ainda não há certeza de que algum deles leve a interface à fratura por tensões de cisalhamento, mesmo em se tratando do ensaio de carregamento por cisalhamento<sup>24</sup>.

Neste contexto, o ensaio de torção, chamado em um estudo<sup>37</sup> de ensaio de “cisalhamento puro”, foi sugerido<sup>31</sup> por não produzir esforço de alavanca no espécime, uma das variáveis do ensaio de cisalhamento que, além de ser responsável por grande variação da distribuição de tensões, leva à concentração de tensões de tração no substrato dentário<sup>29</sup>.

Neste trabalho, o ensaio de torção foi comparado ao ensaio de cisalhamento com fio, nas versões com espécimes de tamanhos convencional e micro, através da análise de tensões pelo método dos elementos finitos e dos resultados de uma etapa experimental. Esta comparação visou a verificar se, com base nos parâmetros de um ensaio mecânico ideal, o ensaio de torção seria vantajoso em relação ao de cisalhamento para testar interfaces adesivas, e se ele seria capaz de levar o espécime à ruptura por tensões de cisalhamento.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 ODONTOLOGIA RESTAURADORA ADESIVA

Os materiais restauradores devem desempenhar funções que vão além do preenchimento de cavidades no dente, tais como vedamento da interface dente/restauração, bom desempenho mecânico durante a mastigação, mimetização das estruturas dentais (cor, textura) e biocompatibilidade. Um dos grupos de material restaurador mais utilizados é o dos compósitos resinosos, considerados materiais do tipo “adesivo”, compostos de uma matriz orgânica polimérica que tem, como principal monômero-base, o BisGMA (metacrilato de glicidila bisfenol A) e, como principal monômero diluente, o TEGDMA (dimetacrilato de trietilenoglicol). Esta matriz é reforçada por partículas de cargas cerâmicas, unidas quimicamente a ela por meio de silano. A união das resinas compostas aos tecidos dentais ocorre através de uma resina de consistência mais fluida e, normalmente, sem carga cerâmica: o adesivo.

As restaurações adesivas trouxeram grandes avanços na prática clínica odontológica, especialmente por permitirem a realização de preparos cavitários mais conservadores, já que não dependem de retenção macro-mecânica com as paredes da cavidade, como é o caso do amálgama dentário<sup>1</sup>. Ao lado das vantagens sobre o amálgama de conservar as estruturas dentais sadias e de serem mais estéticos<sup>2, 3</sup>, esses materiais são livres de mercúrio, que pode representar riscos ao profissional e ao meio ambiente<sup>2</sup>.

Geralmente, os estudos que apontam desempenhos clínicos semelhantes do amálgama e da resina composta são realizados por um curto período de acompanhamento, na maioria, cerca de 3 anos<sup>9</sup>. Ao revisar artigos sobre longevidade clínica de restaurações de amálgama e de compósito, foi notado que os tempos médios de longevidade variaram de 5 a 15 anos para o amálgama e 3 a 8 anos para os compósitos resinosos<sup>3</sup>. Entre as causas das falhas das restaurações adesivas estão desgaste (que inclui a perda de contato proximal) e alteração de cor, fraturas do material e o principal motivo atual: perda da adesão<sup>3</sup>. O descolamento na interface, além de poder permitir a própria perda de retenção do material, permite a

infiltração de fluidos, moléculas, íons e microorganismos o que, como consequência, pode acarretar sensibilidade pós-operatória e os dois maiores motivos de substituição das restaurações: descoloração marginal e cáries recorrentes<sup>3-5</sup>. O amálgama apresenta uma capacidade que o compósito resinoso não possui: o auto-vedamento marginal. Embora o amálgama não apresente adesão aos tecidos dentais, ao longo do tempo, os produtos da corrosão são liberados e se precipitam na interface entre o amálgama e o dente, o que resulta no vedamento do espaço. Um estudo<sup>3</sup> de 7 anos de acompanhamento clínico de restaurações de amálgama e resina composta em dentes posteriores verificou que as cáries recorrentes foram o principal motivo para substituição das restaurações de ambos os materiais; mas as de resina composta apresentaram risco de cárie 3,5 vezes maior que o amálgama. Confirmando estes achados, uma revisão sistemática<sup>2</sup> sobre estudos clínicos também encontrou evidências de que o amálgama apresenta maior longevidade e um risco bem menor de recidivas de cáries do que os compósitos resinosos.

## **2.1.1 Procedimentos adesivos**

### **2.1.1.1 Esmalte e dentina como substratos de adesão**

O esmalte é um tecido mineralizado, composto por cerca de 97% de hidroxiapatita, cujos cristais se dispõem em prismas. O material orgânico corresponde a cerca de 1% (natureza principalmente protéica) e a água, a cerca de 2%<sup>6</sup>. A pequena proporção de água favorece a interação com os monômeros hidrofóbicos da matriz resinosa dos adesivos e resinas compostas. Por isso, a adesão a cavidades com margens totalmente em esmalte não constitui um problema que preocupe os clínicos.

O procedimento adesivo no esmalte envolve uma etapa de condicionamento ácido prévio, proposta na década de 1950<sup>1</sup>, que altera a sua superfície. Este procedimento é comumente realizado com uma solução de ácido fosfórico com concentrações entre 30 e 40%<sup>10, 16</sup>. O ácido dissolve a camada de esfregaço (resultante da manipulação com instrumentos abrasivos) e forma micro-retenções na

superfície do esmalte, nas quais o adesivo penetra para criar um embricamento mecânico após a polimerização deste<sup>9,16</sup>. Posteriormente, é aplicado o compósito resinoso, que se liga quimicamente ao adesivo por meio de ligações duplas de carbono, que permanecem intactas neste mesmo após a sua polimerização.

O procedimento adesivo sobre a dentina é mais crítico devido à sua estrutura e composição distintas do esmalte e, principalmente, grande variabilidade<sup>16</sup>. De modo geral, sua composição corresponde a cerca de 70% em massa de hidroxiapatita, 18% de material orgânico e 12% de água. Sua estrutura é formada por túbulos dentinários, dentro dos quais há prolongamentos de células odontoblásticas envolvidos por fibrilas nervosas provenientes da polpa. Os túbulos percorrem toda a espessura da dentina e, em toda a sua extensão, são preenchidos pelo chamado fluido dentinário, e circundados por uma dentina mais mineralizada, a chamada dentina peritubular. Entre os túbulos, existe a dentina chamada intertubular, que compõe a maior parte da dentina, é menos mineralizada e apresenta muitas fibrilas colágenas do tipo I. O número dos túbulos e seu diâmetro aumentam conforme mais próximo à polpa, o que faz a umidade e permeabilidade deste tecido variarem em diferentes profundidades<sup>6</sup>. Além da variação da estrutura da dentina conforme a proximidade com a polpa, a superfície de adesão pode variar conforme a direção do corte em relação à disposição dos túbulos dentinários e com os diferentes tipos de dentina, que podem ser: dentina primária<sup>a</sup>, secundária<sup>b</sup>, terciária<sup>c</sup> e esclerótica<sup>d</sup>. Dessa forma, a estrutura e composição da dentina podem variar: dentro da mesma região, pela variação na orientação do corte; de região para região em um mesmo dente; de dente para dente numa mesma cavidade oral (conforme o tipo de solicitação mecânica a que é submetido) e de pessoa para pessoa, conforme a idade e hábitos alimentares, entre outros.

---

<sup>a</sup> Dentina que se forma durante a odontogênese, até o fechamento do ápice radicular<sup>6</sup>.

<sup>b</sup> A dentina se forma ao longo de toda a vida. Este tipo de dentina é formado após o fechamento do ápice radicular, e apresenta estrutura semelhante ao da dentina primária, com leves diferenças nas direções dos túbulos<sup>6</sup>.

<sup>c</sup> Possui estrutura irregular (pela alta velocidade de formação) e pode ser do tipo reacional ou reparativa. O primeiro tipo é uma tentativa dos odontoblastos de formar uma barreira de dentina frente a estímulos como atrição e cáries, e esta barreira não possui estrutura tubular organizada. O segundo tipo é um tecido tipo osteóide, formado por odontoblastos provenientes de células indiferenciadas da polpa para repor os odontoblastos mortos pela agressão<sup>6</sup>.

<sup>d</sup> Ao longo da vida, a porção dos túbulos não preenchida por prolongamentos odontoblásticos na região mais próxima ao limite com o esmalte sofre deposição de dentina peritubular até obliterar a luz do túbulo, formando a dentina esclerosada. Essa formação pode ser especialmente estimulada por esforços mecânicos, como atrição. Pessoas com mais de cinquenta anos apresentam, comumente, a dentina mais superficial com túbulos com luz muito pequena ou totalmente obliterados<sup>6</sup>.

### 2.1.1.2 Sistemas adesivos dentinários

O condicionamento da dentina com ácido fosfórico expõe a trama de fibrilas colágenas da dentina intertubular, cercadas de água<sup>9</sup>. Para superar o problema da incompatibilidade entre os monômeros resinosos hidrofóbicos e a umidade dentinária, foi introduzido o *primer*. Este consiste de uma solução composta por um solvente orgânico (água, álcool, acetona ou a combinação de dois deles) e monômeros bifuncionais (por exemplo, o HEMA — metacrilato de 2-hidroxietila) capazes de interagir com a dentina úmida (pelo grupo mais hidrofílico) e se ligar quimicamente aos monômeros hidrofóbicos do adesivo (pelo grupo metacrilato)<sup>16</sup>. A adesão ao esmalte, que depende apenas da criação de reentrâncias no substrato, não é afetada negativamente pela utilização dos monômeros mais hidrofílicos<sup>9</sup>.

Após a aplicação do ácido e lavagem da dentina, a secagem deve ser feita até adquirir um aspecto de umidade natural, para que o excesso de água não dilua desnecessariamente os monômeros do adesivo, nem a desidratação excessiva colabe as fibrilas colágenas de forma que os monômeros não possam penetrar entre elas<sup>16</sup>. Na etapa da aplicação do *primer*, o solvente tem a função de transportar os monômeros bifuncionais por entre as fibrilas colágenas e retirar a água do local quando sofrer evaporação. Em seguida, o adesivo é aplicado, fotoativado e, sobre este, é construída a restauração de compósito resinoso. Alguns sistemas adesivos foram introduzidos para simplificar a prática clínica através da redução do tempo total de aplicação e do número de passos. Uma das formas de classificar os adesivos é de acordo com o número de passos e tipo de estratégia de adesão<sup>9</sup>:

#### 2.1.1.2.1 Sistemas adesivos com condicionamento ácido prévio

São sistemas que envolvem uma etapa de condicionamento ácido separadamente<sup>9</sup>. Nesta etapa, o ácido fosfórico (a mesma solução utilizada para condicionar o esmalte) promove a dissolução quase completa da hidroxiapatita da dentina superficial<sup>9</sup>, de forma que elimina a camada de esfregaço dentinário, expõe as fibrilas colágenas mais superficiais da dentina e aumenta o diâmetro dos túbulos

(desmineralização da dentina peritubular)<sup>16</sup>. Nestes sistemas, a interação química entre os monômeros e as fibrilas colágenas expostas é muito fraca. O principal meio de retenção é o mecânico, através da formação da chamada “camada híbrida”, constituída por fibrilas colágenas envolvidas pelos monômeros resinosos do *primer* e adesivo<sup>38-40</sup>. A polimerização da porção de adesivo que penetra nos túbulos dentinários, formando prolongamentos (chamados “*tags*”), não garante a retenção mecânica, a menos que os prolongamentos desenvolvam uma forte interação com as paredes dos túbulos<sup>16</sup>. Estes sistemas são classificados em:

- Sistema “multi-frascos”: três frascos separados: um de ácido fosfórico, um de *primer* e um de adesivo. É considerado o sistema “padrão-ouro” para adesão à dentina e esmalte<sup>8</sup>.
- Sistema “frasco-único”: após o condicionamento ácido, é aplicada uma única solução de um mesmo frasco, composta por monômeros de *primer* e adesivo.

#### 2.1.1.2.2 Sistemas auto-condicionantes

São sistemas em que o *primer* contém monômeros ácidos (com grupos carboxílicos ou fosfatos ácidos<sup>9</sup>). Não há procedimento de lavagem do ácido após sua aplicação, e a camada de esfregaço, não removida, fica incorporada à camada híbrida. Além de reduzir o número de passos e o tempo de aplicação em relação aos de condicionamento ácido prévio, estes sistemas apresentam outra vantagem: é reduzido o risco de discrepância entre a profundidade da dentina desmineralizada pelo ácido e a profundidade de penetração do adesivo<sup>9</sup>, que poderia resultar na existência de uma camada de fibrilas colágenas expostas, com menor resistência mecânica. Estes sistemas têm desempenhos diferentes de acordo com o pH da solução<sup>9</sup>. Os chamados “*strong*” têm pH mais baixo, menor que 1, e produzem um condicionamento ácido semelhante ao ácido fosfórico. Os chamados “*mild*” têm um pH próximo de 2; a desmineralização da dentina é feita por eles numa menor profundidade e, no fim do processo, há hidroxiapatita residual entre as fibrilas colágenas. Parece que, neste tipo de adesivo, há uma interação química entre os radicais carboxila e fosfato ácido dos monômeros do *primer* com o cálcio da



hidroxiapatita residual, além do próprio embricamento mecânico<sup>9</sup>. Há ainda os intermediários (chamados “*intermediary strong*”), com pH próximo de 1,5, que criam melhor retenção mecânica no esmalte e dentina que os “*mild*”, e ainda promovem interação química entre os monômeros resinosos e a hidroxiapatita residual<sup>9</sup>. Os sistemas auto-condicionantes são classificados em:

- Sistema de *primer* auto-condicionante: a solução de *primer* contém monômeros ácidos, aplicados previamente ao adesivo. É um sistema auto-condicionante “de dois passos”.
- Sistema de adesivo auto-condicionante: tanto o *primer* ácido quanto o adesivo são partes de uma mesma solução, aplicada ao dente num único passo (sistema auto-condicionante “de um passo”). Alguns produtos deste tipo fornecem frascos separados apenas para manter a estabilidade da solução.

A falha de adesão pode ocorrer por inúmeros motivos, entre eles, quando tensões desenvolvidas na interface superam a resistência de união da restauração com o dente. Essas tensões podem ser geradas devido à contração volumétrica do compósito durante a polimerização, durante a aplicação de cargas mastigatórias ou ainda pelas alterações térmicas no ambiente oral<sup>11</sup>. Outras causas da falha da adesão podem ser a degradação da interface devido às variações de pH e à degradação hidrolítica da camada híbrida, facilitada em adesivos que formam uma camada mais permeável à água<sup>8, 9, 41, 42</sup>.

Para adesão ao esmalte e à dentina, os sistemas que apresentam maior resistência de união são os de condicionamento ácido prévio, especialmente o de multi-frascos, e o que apresenta resultados de menores resistências adesivas é o auto-condicionante de um passo (adesivo auto-condicionante)<sup>9, 10</sup>. Em relação ao pH dos auto-condicionantes, os sistemas do tipo “*mild*” são, em relação aos do tipo “*strong*”, mais promissores em promover uma adesão duradoura à dentina<sup>8-10</sup>. Quanto à longevidade clínica, os adesivos auto-condicionantes de um passo são tidos, atualmente, como os de menor longevidade, seguidos o pelos de frasco-único de condicionamento ácido prévio. Os de multi-frascos são os que apresentam maior estabilidade em longo prazo de adesão à dentina e esmalte, seguidos pelos *primers* auto-condicionantes do tipo “*mild*” (este sistema adesivo não apresenta alta eficiência de adesão ao esmalte não-instrumentado devido ao seu pH mais alto)<sup>8, 10,</sup>

## 2.2 AVALIAÇÃO DA INTERFACE ADESIVA

Os estudos clínicos são os melhores indicadores da eficiência da adesão e estabilidade em longo prazo. Normalmente, são realizados em cavidades de classe V provenientes de lesões não-cariosas, já que este tipo de cavidade apresenta características favoráveis ao estudo, tais como existência em dentes de fácil acesso (anteriores e pré-molares), alta frequência (mesmo em pacientes com boa higiene oral), margens tanto em esmalte quanto em dentina e ausência retenção macro-mecânica da restauração na cavidade (o que significa que a retenção da restauração depende apenas da eficiência da adesão do material ao dente)<sup>8, 9</sup>. Nos estudos clínicos, alguns parâmetros indicadores da efetividade da adesão avaliados são a retenção na cavidade, integridade marginal, descoloração marginal e presença de cáries recorrentes nas margens da restauração<sup>4, 7, 8</sup>. Apenas os estudos clínicos controlados de longos períodos de acompanhamento (5 anos ou mais) ou as revisões sistemáticas baseadas nestes tipos de estudo fornecem bases para afirmar com segurança se um material ou técnica é eficiente ou não<sup>2, 7-12</sup>.

Com o rápido desenvolvimento de materiais e técnicas, muitas vezes, eles se tornam ultrapassados antes da obtenção dos resultados de estudos clínicos<sup>7, 9, 13, 14</sup>. Nesse contexto, os estudos laboratoriais ganharam importância por apresentarem vantagens como menor custo, menor tempo gasto e um melhor controle de variáveis, de forma a permitir um melhor entendimento das causas das falhas<sup>8, 16, 43</sup>. Além dos fatores relacionados ao paciente (hábitos de alimentação, de higiene, bem como hábitos para-funcionais<sup>9</sup>), há também variáveis externas<sup>8</sup>, tais como diferentes habilidades dos dentistas operantes, variações das fontes de luz utilizadas para ativar os polímeros e dos instrumentos utilizados para o acabamento e polimento das restaurações, que podem ser considerados fontes de variação para os resultados dos estudos clínicos, de forma a dificultar o entendimento das causas das falhas da adesão.

Os ensaios laboratoriais de avaliação da interface adesiva podem ser de diferentes tipos. Apesar das dúvidas sobre a representatividade dos seus resultados em relação ao real desempenho clínico<sup>7, 11, 15-20</sup>, supõe-se que, em cada ensaio, os materiais e/ou técnicas que demonstrarem promover maior vedamento na interface

serão os que têm potencial para produzir um melhor desempenho e maior longevidade clínica da restauração<sup>8,9</sup>.

Existem trabalhos que visam a caracterizar a interface adesivo/dentina produzida por diferentes materiais e técnicas através da sua morfologia, composição química e propriedades micromecânicas, por meio de técnicas como microscopia óptica e eletrônica, micro-espectroscopia Raman ( $\mu$  - RS) e microscopia acústica de varredura (scanning acoustic microscopy - SAM), respectivamente<sup>44</sup>. Outros ensaios analisam a efetividade do selamento na interface adesiva, que, segundo um estudo<sup>9</sup>, podem ser classificados em:

- Análise qualitativa da efetividade do selamento marginal: ensaios de microinfiltração em cavidades classe V, por exemplo;
- Análise semi-quantitativa: análise das fendas formadas na interface;
- Análise quantitativa ou medida do escoamento: medida do escoamento de um fluido através da interface.

O vedamento da interface adesiva também pode ser acessado indiretamente em laboratório por meio de ensaios de resistência mecânica. Nos ensaios estáticos, a interface entre dente e restauração é solicitada por uma carga mecânica, geralmente, de tração ou cisalhamento, até ser levada à ruptura. O valor da resistência adesiva fornecido quase sempre corresponde a uma tensão nominal (unidade em MPa), que é calculada pela divisão da carga suportada na fratura (unidade em N) pela área de secção transversal da interface aderida (unidade em  $\text{mm}^2$ )<sup>14, 24, 30</sup>. Quanto maior for a resistência à ruptura na interface, teoricamente, melhor será o vedamento<sup>7</sup>.

Tanto os ensaios estáticos de resistência mecânica quanto os de medição da infiltração de corantes e de fendas na interface podem ser realizados com ou sem envelhecimento prévio desta<sup>8</sup>. O envelhecimento da interface pode ser feito sob desafios mecânicos ou químicos, de curto ou longo prazo. Uma maneira de provocar o envelhecimento consiste em realizar o procedimento adesivo *in vivo* (cl clinicamente), após o que, passado o período de função na cavidade oral, o dente é extraído para que se obtenham espécimes para serem testados em laboratório<sup>8, 45</sup>. Procedimentos de envelhecimento também podem ser realizados *in vitro* (em laboratório), através de ciclagem térmica, ciclagem mecânica ou armazenamento em água (ou saliva artificial) por períodos variados<sup>8</sup>.

Nos ensaios estáticos, a velocidade do carregamento é mantida baixa e constante, e a trinca se propaga a partir de um defeito inicial com velocidades cada vez maiores. Na condição clínica, a cinética de propagação da trinca é diferente: a interface é solicitada por cargas de curta duração (uma carga isoladamente gera uma tensão bem abaixo do limite de resistência da interface) e o defeito se propaga até a fratura após um grande número de ciclos, e com uma velocidade bem menor do que nos ensaios estáticos<sup>8,12</sup>. Ao revisar dados da literatura, alguns estudos<sup>8, 9</sup> verificaram que há poucos trabalhos realizados com testes da interface com cargas repetidas e não há um protocolo de padronização para eles. Segundo um dos estudos<sup>9</sup>, alguns exemplos de ensaios com cargas repetidas são: ensaio de cisalhamento cíclico, ensaio de tração cíclica, ensaio cíclico de tenacidade à fratura, *push-out* cíclico e ensaio de micro-fadiga rotatória<sup>e</sup>. Este estudo verificou que há trabalhos que testam tanto a interface adesiva dos espécimes quanto todo o conjunto de dente e restauração, até que todo o complexo falhe.

## 2.2.1 Ensaios mecânicos estáticos

Alguns exemplos de ensaios mecânicos estáticos relatados para avaliar a resistência da interface adesiva são o *pull-out*, *push-out* e os mais utilizados: tração, cisalhamento, e suas versões com espécimes de menor área de secção transversal, a microtração e o microcisalhamento<sup>8, 9, 21, 22</sup>.

O ensaio de *pull-out*<sup>46, 47</sup> é muito empregado, por exemplo, para verificar a resistência de união na interface de materiais restauradores com a dentina radicular. Neste ensaio, são obtidas fatias transversais de dentina com um orifício central. Dentro deste é aderido, por exemplo, um segmento de pino intra-radicular, de modo que o comprimento do segmento de pino seja maior que a espessura da fatia. A

---

<sup>e</sup> Neste ensaio, o espécime corresponde a uma barra retangular composta de tecido dentário, adesivo e compósito resinoso com um entalhe na região da interface adesiva. Coloca-se um peso pendente em um das extremidades da barra (a do compósito resinoso) para flexioná-lo, e a outra extremidade (composta do tecido dentário) é encaixada na máquina de forma que esta imprime rotação ao espécime. Conforme a máquina rotaciona, o movimento de flexão imposto pelo peso na extremidade livre do espécime faz com que se alternem, em cada região da interface, tensões de tração e de compressão, numa função sinusoidal<sup>8,9</sup>.

extremidade do pino que permanece para fora da fatia é fixada a uma garra que transmite a tração até o arrancamento do pino.

O chamado *push-out*<sup>48-50</sup> tem espécimes construídos com o mesmo princípio do *pull-out*, porém, o segmento do pino é cimentado antes de cortar as fatias de dentina, de modo que o pino e a fatia ficam com comprimentos iguais, e a carga é aplicada de forma a empurrar o pino até a sua extrusão.

Nos ensaios de tração e cisalhamento, o dente é planificado em uma das faces, sobre a qual é realizado o procedimento adesivo e construído um bloco de material restaurador. Os ensaios de tração e cisalhamento chamados “convencionais” testam, normalmente, um espécime por dente<sup>26</sup>, com áreas de interface adesiva com diâmetros de 3 a 4 mm<sup>22</sup>. Nos ensaios de tração, o carregamento é feito por forças perpendiculares à interface, orientadas em sentidos opostos, de modo a romper a interface por afastamento dos materiais aderidos. Nos ensaios de cisalhamento, o carregamento se dá através de uma força aplicada paralelamente à interface adesiva, por meio de uma lâmina de faca, alça de fio ortodôntico ou fita de aço inoxidável<sup>51</sup>.

Ao longo do tempo, foram sendo desenvolvidos materiais e técnicas que promoviam maior resistência de união adesiva. Os ensaios convencionais passaram a apresentar altas frequências de fraturas coesivas em faixas de tensão de ruptura de 20 a 30 MPa e ficou evidente um paradoxo: as uniões adesivas não rompiam no seu ponto mais fraco nem com uma resistência comparável à dos substratos (que é várias vezes maior). Em 1994, foi desenvolvido um novo ensaio que parecia voltar a avaliar a interface dos adesivos, que se apresentavam com maiores resistências de união (de até 40 MPa)<sup>28, 52</sup>: o ensaio de microtração<sup>52</sup>. Mais tarde, foi desenvolvida a versão micro do ensaio de cisalhamento<sup>25, 27, 53-55</sup>. Na maioria dos trabalhos da literatura, ambos os ensaios micro são realizados com espécimes com áreas de secção transversal menores que 2 mm<sup>2</sup><sup>22</sup>.

O ensaio de microcisalhamento é realizado praticamente da mesma forma que o de cisalhamento convencional, exceto pela redução das dimensões do cilindro de compósito aderido ao dente<sup>25, 27, 54, 55</sup>. No caso do ensaio de microtração, após a adesão de um grande bloco de compósito, são realizados procedimentos de corte para obter vários espécimes constituídos por compósito resinoso, adesivo e substrato dentário, em forma de palitos (paralelogramos)<sup>56</sup>, halteres ou ampulhetas<sup>52</sup>

(estes dois últimos, com entalhes que resultam na redução da secção transversal da interface em relação ao restante do espécime).

Os ensaios micro apresentam, em relação aos de tamanho convencional, vantagens como a possibilidade de comparar a adesão a regiões diferentes do mesmo dente, comparar a degradação da interface adesiva também em diferentes áreas do mesmo dente ao longo do tempo<sup>9, 25, 52, 54, 57-60</sup>, além de facilitar a observação do modo de fratura com microscopia, por se tratar de áreas de menor tamanho<sup>28</sup>.

#### 2.2.1.1 Influência das configurações dos ensaios sobre seus resultados

Inúmeras são as diferenças entre ensaios laboratoriais realizados por diferentes autores<sup>17, 28</sup>. Um trabalho de meta-análise<sup>12</sup> examinou 75 artigos de 1992 a 1996 sobre 15 sistemas adesivos dentinários, e verificou que, entre diversas variáveis, algumas foram responsabilizadas por influenciar nos resultados de resistência adesiva à tração e ao cisalhamento, tais como a origem do dente, a profundidade da dentina, a simulação ou não de pressão intra-pulpar durante o procedimento adesivo, a temperatura da solução e o tempo de armazenamento (tanto do dente antes do procedimento adesivo como do espécime antes do ensaio), a área da interface adesiva e o módulo de elasticidade do material utilizado.

Num dos primeiros trabalhos com ensaio de microtração<sup>52</sup>, foi notado que espécimes com menores áreas de seção transversal obtiveram maiores valores de tensão de ruptura. Isto foi confirmado por um trabalho de revisão de literatura com artigos de 1998 a 2009 com 6 sistemas adesivos dentinários<sup>23</sup>: esta revisão notou que os ensaios de microtração apresentaram valores de 2 a 5 vezes maiores que os de tração para os 6 adesivos, e os de microcisalhamento, para alguns adesivos, chegaram a obter valores até 3 vezes maiores que os obtidos pelo cisalhamento convencional. Por estes dados, pode-se dizer que o tamanho da área de seção transversal do espécime tem relação inversa com o valor da tensão de ruptura obtido por um ensaio experimental.

O fenômeno do aumento do valor da tensão nominal de ruptura com a diminuição do tamanho da área de seção transversal do espécime tem sido

interpretado com auxílio da teoria elaborada por Griffith<sup>61</sup> sobre a falha em materiais frágeis. Esta teoria se refere aos defeitos como fatores concentradores de tensão, que, quanto maior o tamanho, maior essa concentração. O alinhamento do defeito em relação às tensões de tração também é decisivo para que o defeito seja mais ou menos danoso. Griffith menciona que o tamanho do espécime limita o tamanho dos defeitos. Além do mais, num espécime de menor tamanho, é menos provável que haja defeitos de tamanho crítico alinhados com as tensões no sentido de sua abertura. Deve-se notar que esta teoria se refere à qualidade do defeito, e não à porcentagem em volume ou número absoluto de defeitos no material: quanto maior o tamanho do defeito alinhado transversalmente à tensão de tração, maior será a concentração de tensão e menor será o carregamento necessário para que a tensão de ruptura seja alcançada. A estatística de Weibull calcula a probabilidade de falha da interface sob um determinado nível de tensão e leva em conta a distribuição de defeitos<sup>23</sup> (descontinuidades, solventes residuais<sup>26</sup>), também prevendo que, quanto maior o tamanho do espécime, a tensão nominal de ruptura tende a ser, aparentemente, menor<sup>26</sup>.

A revisão de literatura sobre os artigos de 1998 a 2009 mencionada anteriormente<sup>23</sup> verificou que alguns estudos utilizam a estatística de Weibull para avaliar a resistência mecânica da interface entre o dente e os materiais adesivos, que são, geralmente, considerados como frágeis. Foi verificado que, embora a ISO/TS 11405, na versão de 2003, recomende a utilização desta estatística quando os dados de tensão de ruptura não apresentam distribuição normal, a maioria dos artigos publicados utiliza os dados de média e desvio-padrão. Esta revisão de literatura verificou que os estudos que utilizaram a estatística de Weibull encontraram baixos valores do parâmetro  $m$  de Weibull (relacionado à distribuição de defeitos), que indica alta variabilidade dos resultados e baixa confiabilidade do desempenho da interface adesiva sob o determinado nível de tensão.

Além da existência praticamente não-controlada dos defeitos, estudos com elementos finitos<sup>15, 18, 22, 30-34</sup> verificaram que também as configurações dos ensaios mecânicos mais utilizados são capazes de variar as distribuições de tensão e influenciar nos resultados. Entre elas, destacam-se o modo de fixação e alinhamento do espécime<sup>30, 34</sup>, a geometria do mesmo (inclui também presença/ausência de filete de compósito, espessura da camada de adesivo)<sup>15, 18, 30, 31, 33-35</sup>, a distância entre o

ponto de aplicação da carga e a interface adesiva<sup>18, 24, 25, 31</sup>, a velocidade do carregamento<sup>24</sup> e o módulo de elasticidade dos materiais envolvidos<sup>18, 22, 31, 34</sup>.

Com uma distribuição de tensões não-uniforme, a fratura inicia, provavelmente, num ponto em que a tensão é maior e atinge a resistência máxima do material e, a partir dele, se propaga pelo restante da seção transversal. Assim, a tensão nominal obtida com os ensaios mecânicos atualmente empregados representa um valor de resistência adesiva menor do que a máxima tensão a que o espécime verdadeiramente resistiu<sup>11, 15, 18, 31, 32</sup>. Quanto maior for a concentração de tensões, menor será o carregamento necessário para levar o material à fratura e, assim, menor será sua resistência nominal calculada<sup>f</sup>, o que dá uma falsa idéia de baixa resistência. Além das variações de valores de tensão nominal para um mesmo espécime, distribuições de tensões diferentes podem determinar diferentes locais preferenciais de início da ruptura (na interface ou no substrato de colagem), e tudo isso faz com que não seja possível a comparação de resultados de ensaios com configurações diferentes<sup>18, 30</sup>.

Embora haja uma tentativa de padronização, através da norma ISO/TS 11405 (publicada, pela primeira vez, em 1994, e revisada na edição de 2003), não está definido um protocolo específico sobre a geometria do espécime e configuração dos ensaios mecânicos que sejam seguidos pela maioria dos pesquisadores<sup>14, 24</sup>. Uma revisão de literatura<sup>22</sup> sobre aspectos relacionados à geometria do espécime e à configuração de ensaios de tração e cisalhamento convencionais (área de adesão, módulo de elasticidade dos materiais, modo de aplicação da carga e velocidade do carregamento) verificou que, em 100 estudos publicados entre 2007 e 2009, não foi encontrado consenso sobre nenhum dos parâmetros analisados. Há ainda uma dificuldade adicional com relação à falta de informações suficientes sobre todas as variáveis adotadas nos ensaios mecânicos cujos resultados são divulgados no meio científico<sup>17, 26</sup>.

Na revisão<sup>23</sup> de artigos de 1998 a 2009 com 6 adesivos dentinários (abrangendo todos os sistemas), foi encontrada uma alta dispersão de resultados (coeficientes de variação numa faixa de 20-50%) e alta frequência de fraturas coesivas em todos os tipos de ensaios estudados. Tanto a revisão mencionada<sup>23</sup> quanto um estudo de meta-análise com artigos de 1992 a 1996<sup>12</sup> verificaram que há

---

<sup>f</sup> A relação entre tensão máxima e média é definida como  $K_t$ . Quanto maior a concentração de tensões, maior será o  $K_t$ <sup>30</sup>.



grande discrepância de valores de tensão de ruptura para o mesmo adesivo testado por ensaios diferentes (de forma geral, o ensaio de cisalhamento apresentou maiores valores que os de tração), ou pelo mesmo ensaio em laboratórios diferentes. Estes estudos mencionaram que até mesmo a classificação relativa dos materiais pareceu ser dependente das condições experimentais.

Análises pelo método dos elementos finitos (MEF) verificaram que, além da distribuição não-uniforme das tensões, os ensaios mecânicos produzem tensões em um estado complexo, ou seja, não são produzidas tensões puramente de um tipo<sup>15, 18, 24, 25, 31, 32, 62</sup>. Isto quer dizer que o material, em determinados casos, pode ir à fratura por influência de uma tensão de um tipo, embora o carregamento seja de outro. Nos ensaios de tração, o alinhamento não correto do material pode provocar esforço de flexão, como é o caso dos espécimes colados por apenas um lado ou por dois lados adjacentes nas garras<sup>30</sup>. Nos ensaios de cisalhamento, o tipo de carregamento gera um esforço de alavanca, de forma que são geradas tensões de tração no lado do carregamento e compressão no lado oposto, e as primeiras superam as tensões de cisalhamento nas regiões de maior concentração de tensões<sup>18, 31, 62</sup>. Pode parecer que os ensaios de *pull-out* e *push-out* produzam tensões predominantes de cisalhamento por não haver esforço de alavanca como ocorre no cisalhamento com fio ou faca, mas um estudo com MEF sobre o ensaio de *pull-out*<sup>47</sup> notou um estado complexo de tensões na interface pino/cimento.

Não existe também um protocolo estabelecido para a análise dos modos de fratura, tanto em relação à classificação das fraturas quanto ao equipamento utilizado para a observação<sup>23</sup>. Os tipos mais comumente citados nas classificações são<sup>23</sup> adesiva, coesiva e mista. Quanto ao equipamento de observação, foi comentado que, enquanto fraturas coesivas em que se destacam grandes porções de dentina ou compósito resinoso podem ser facilmente classificadas com auxílio de um estereomicroscópio, em muitos casos, as fraturas adesivas e mistas só podem ser classificadas com auxílio da microscopia eletrônica de varredura e, ainda com o uso desse instrumento, a classificação pode não ser segura<sup>23</sup>.

A interpretação do modo de fratura coesiva é controversa. Como a frequência é maior em adesivos com maior tensão de ruptura<sup>13, 24, 28, 36</sup>, muitos autores interpretaram este achado como sinal de que a interface resistiu mais que a resistência coesiva do substrato de colagem<sup>63, 64</sup>, ou ainda, como indicativo de redução das propriedades mecânicas da dentina, resultantes, por exemplo, da

desmineralização da região da camada híbrida<sup>13</sup>. No entanto, é questionável o fato de a interface chegar a ser mais resistente que a resistência coesiva do substrato de colagem<sup>7</sup>.

Um trabalho de revisão de literatura<sup>28</sup> encontrou valores de resistência coesiva da dentina (humana ou bovina mineralizadas ou desmineralizadas; humana em diferentes profundidades e orientações de túbulos dentinários; sob carregamento de tração ou cisalhamento) tanto bem acima dos obtidos pelos testes de uniões adesivas que resultam em fraturas coesivas, quanto outros da mesma ordem. Na tentativa de entender o motivo de haver fraturas coesivas no substrato de colagem em vez da interface adesiva nos ensaios de cisalhamento, um estudo<sup>62</sup> testou três tipos de espécimes com diferentes configurações: um cilindro de resina composta aderido a um disco de cerâmica, um “inverso” (um cilindro de cerâmica aderido à base maior de resina composta) e um composto unicamente por resina composta. Foram encontrados resultados estatisticamente diferentes de resistência à ruptura entre os grupos dos cilindros de compósito aderidos ao disco de cerâmica (que apresentou frequências iguais de fraturas adesivas e coesivas) e os inversos, de forma que os primeiros apresentaram média significativamente menor, mesmo em se tratando da mesma interface adesiva, mesma geometria do espécime e configuração do ensaio. Os espécimes inversos (80% de fraturas coesivas) apresentaram resultados semelhantes aos dos espécimes compostos unicamente por compósito (que apresentaram 100% de fratura na base de compósito), o que indica que, no caso dos inversos, os resultados de tensão de ruptura foram influenciados pela resistência coesiva do material da base, e não da interface adesiva. Análises feitas pelo MEF<sup>24, 29</sup> indicam que as fraturas coesivas ocorrem principalmente sob concentração de tensões de tração que levam a fratura a se propagar em direção ao substrato de colagem, mesmo nos ensaios com carregamento de cisalhamento. Portanto, a fratura coesiva do substrato de colagem nem sempre quer dizer que a interface resistiu mais ou que o substrato apresentava propriedades mecânicas reduzidas. Com esses achados, alguns autores passaram a questionar a validade dos resultados de tensão de ruptura obtidos com fraturas coesivas.

Um dos estudos<sup>23</sup> sugere que, como a força utilizada para calcular a tensão nominal se refere ao início da falha a partir de um defeito inicial, apenas o local do início da fratura é de interesse, e as regiões para onde ela propaga não interfeririam

no cálculo desta tensão. Sendo assim, idealmente, através da microscopia eletrônica de varredura, a análise fractográfica poderia indicar se o valor da tensão de ruptura se refere ou não à interface e, no caso de a fratura ter sido iniciada fora dela, o resultado deveria ser descartado<sup>9</sup>. Além desse trabalho, outro<sup>14</sup> também sugere que os resultados de fraturas coesivas não sejam considerados para as análises, mesmo porque, ao se propagar para fora da interface, a área de seção transversal desta já não serve mais para o cálculo da tensão nominal de ruptura.

Embora seja necessário desenvolver protocolos que padronizem os procedimentos dos ensaios mecânicos, é difícil produzir um estado de tensões com distribuição uniforme<sup>18</sup>, que leve a fratura a começar na região de interesse e sob o tipo de tensão de escolha do pesquisador. Mesmo que os ensaios não concentrem tensões devido às suas configurações, haverá, de alguma forma, não-uniformidade de tensões na interface adesiva<sup>26</sup>. As interfaces entre a restauração resinosa e o dente são complexas, muitas vezes, com envolvimento de materiais com diferentes propriedades mecânicas<sup>65</sup>, às vezes com alterações bruscas de geometria, e estão presentes em espécimes com limitações de tamanho e dificuldade de alinhamento para aplicação do carregamento. A padronização das tensões é difícil quando se trata de materiais friáveis nos quais a presença de defeitos não é controlada<sup>66</sup>. Além dos defeitos, existem outros fatores concentradores de tensão dentro da própria interface adesiva: a existência de fases diferentes na camada híbrida, ricas em HEMA (mais hidrofílico, e com menor módulo de elasticidade) e ricas em BisGMA (mais hidrofóbica, e com maior módulo de elasticidade), ou ainda, diferentes gradações de módulo de elasticidade geradas ao longo da profundidade da camada híbrida quando o adesivo consegue penetrar apenas parcialmente por toda espessura da dentina desmineralizada<sup>67</sup>. Diante destas dificuldades, a padronização do ensaio que resulte em distribuição de tensões sempre igual, para que não acrescente variabilidades de distribuição de tensões, torna-se um fator indispensável para que a resistência nominal seja um parâmetro de comparação confiável<sup>18</sup>. Assim, mesmo que não seja possível saber a real resistência a um determinado tipo de tensão, será suficiente saber, ao menos, qual o nível de ganho ou perda de resistência entre materiais e/ou técnicas frente a desafios mecânicos bem padronizados. Por outras palavras: se não for possível caracterizar de modo

---

<sup>9</sup> Esse estudo<sup>23</sup> sugere que sejam consideradas apenas as fraturas adesivas e as mistas com menos de 10% de envolvimento do substrato de colagem.

absoluto um material ou técnica adesiva, seria suficiente classificá-lo relativamente a outros<sup>15, 17, 18</sup>.

De acordo com esta linha de raciocínio, um ensaio mecânico confiável para se comparar as resistências dos materiais deveria respeitar as seguintes exigências<sup>h</sup>:

- simular as solicitações a que os materiais são submetidos clinicamente;
- produzir distribuições de tensão padronizadas;
- promover a fratura na área de interesse (no caso dos ensaios de resistência de união, na interface);
- ser capaz de discernir entre pequenas diferenças de resistência à fratura (o que depende também da variabilidade dos resultados<sup>i</sup>). Evidentemente, se existir uma diferença real de resistência à fratura dos espécimes comparados, as diferenças de carga aplicada até a ruptura devem ser identificáveis pela célula de carga disponível na máquina de ensaios;
- apresentar facilidade de execução (especialmente no que se refere à facilidade de padronização das variáveis de configuração).

Alguns estudos<sup>14, 23, 24, 26</sup> sugerem que a comparação da eficiência da adesão deve ser feita através da mecânica da fratura, em vez de utilizar ensaios cujos resultados sejam tão dependentes de suas configurações. A criação de um defeito inicial e mensuração das constantes  $K_{IC}$  (fator de intensidade de tensão crítico) e da  $G_{IC}$  (taxa crítica de liberação de energia) são modos de medir a resistência adesiva na interface do dente com a restauração à propagação de defeitos<sup>23,66</sup>. Um estudo<sup>8</sup>, porém, ao revisar dados da literatura, encontrou correspondências de valores de tenacidade à fratura encontrados por diferentes laboratórios para certos materiais,

---

<sup>h</sup> Um estudo de 2007<sup>19</sup> fala sobre a necessidade de verificar se um ensaio laboratorial pode ser considerado um método válido. A validação “interna” do ensaio ocorre quando seus parâmetros e fatores que influenciam nos resultados são sistematicamente estudados e conhecidos, quando um protocolo é estabelecido, quando os resultados são reprodutíveis e as chances de erros são bem conhecidas. Se os resultados do ensaio laboratorial se correlacionam com os resultados de estudos clínicos, o ensaio é validado “externamente”. Neste ponto é necessário fazer a ressalva de que, mesmo que um ensaio mecânico apresentasse todas as características ideais, ainda assim, ele não forneceria necessariamente dados totalmente capazes de prever o desempenho clínico. O único meio de se obterem dados confiáveis sobre a performance clínica, como já foi discutido inicialmente, são os estudos clínicos de longos períodos de acompanhamento, devido à complexidade do ambiente oral<sup>7,18</sup>.

<sup>i</sup> Poderia ser que o maior responsável pela variabilidade experimental fosse realmente o substrato dentinário, que dificilmente pode ser controlado, mas não se deve negligenciar a variabilidade originada pela falta de padronização de fatores relacionados aos ensaios que influem na distribuição de tensões.

enquanto para um outro material, houve discrepância de valores entre diferentes laboratórios, e um terceiro centro não conseguiu mensurar sua tenacidade à fratura deste mesmo material devido à baixa resistência adesiva. Este mesmo estudo comentou sobre a dificuldade em obter vários espécimes de um mesmo dente para comparar a tenacidade à fratura imediata e após envelhecimento da interface.

A dificuldade de execução dos ensaios de mecânica da fratura<sup>7, 8, 14</sup> e a dificuldade de testar a eficiência da adesão ao esmalte com os ensaios de *pull-out* e *push-out*<sup>j</sup> justificam o fato de os ensaios de tração, cisalhamento e suas versões micro serem os mais populares. Embora o ensaio de microtração seja, atualmente, o mais empregado dos quatro ensaios<sup>8, 22, 23</sup>, os que aplicam carregamento de cisalhamento apresentam vantagens como facilidade de execução<sup>24-26</sup> pela ausência de procedimentos de corte ou desgaste após a realização do procedimento adesivo que, além do mais, introduzem defeitos aleatórios no espécime e já solicitam mecanicamente a interface antes do ensaio<sup>9, 34</sup>. Por esta característica, estes ensaios podem ser considerados mais viáveis para testar materiais mais friáveis<sup>27</sup> ou com menor resistência adesiva e/ou coesiva, como o caso dos cimentos de ionômero de vidro, do que os ensaios de microtração<sup>26, 28, 29</sup>.

Para caracterizar um material, é interessante conhecer sua resistência à ruptura sob os três tipos básicos de tensão: tração, compressão e cisalhamento. No caso da caracterização da resistência mecânica da interface, não parece muito útil conhecer sua resistência à ruptura sob tensão de compressão. Como mencionado anteriormente, os ensaios mecânicos citados produzem estados complexos de tensão no espécime e, embora produzam normalmente os três tipos de tensão, pode existir uma que predomine na área de fratura. Mesmo nos ensaios de cisalhamento, não há a certeza de que a interface seja levada à ruptura por tensões de cisalhamento. Diante destas observações, o ensaio de torção (já referido como ensaio de “cisalhamento puro”<sup>37</sup>) foi sugerido por um estudo<sup>31</sup> como uma alternativa ao carregamento de cisalhamento, já que não há esforço de alavanca. A forma como é realizado o carregamento no ensaio de cisalhamento, além de provocar a predominância de tensões de tração no local de maior concentração de tensões, é uma fonte de variação de resultados. Conforme varia o momento fletor, varia a

---

<sup>j</sup> Os ensaios de *push-out* e *pull-out* também são sensíveis a variáveis tais como a inclinação das paredes, modo de fixação do corpo-de-prova, rigidez do material, e até o operador<sup>36, 49</sup>, além de não produzirem tensões uniformes<sup>47</sup>.

concentração das tensões de tração<sup>k</sup> e, conforme o carregamento fique mais próximo da interface, devido ao efeito Saint-Venant, ocorre maior concentração das tensões tanto de tração como de cisalhamento.

Existem estudos que empregaram carregamentos de torção para verificar a resistência de união de bráquetes ortodônticos<sup>68-70</sup> e de diferentes combinações entre sistemas adesivos e compósitos resinosos ao dente<sup>37</sup>, mas nenhum deles, porém, se focou nos tipos de tensão incidentes na interface adesiva (embora tenham sido analisadas concentrações de tensões na torção de bráquetes<sup>69</sup>) e na sensibilidade dos resultados de tensão de ruptura às variações de configuração do ensaio.

---

<sup>k</sup> Um dos primeiros estudos com ensaios de microcisalhamento<sup>25</sup> sugeriu que, para que a fratura ocorra sob tensão de cisalhamento, a distância do ponto de aplicação da carga até a interface deve ser igual a um décimo da altura do cilindro de compósito. Ao desviar desta distância, o risco de fratura sob tração aumenta, já que esta passa a predominar cada vez mais sobre a tensão de cisalhamento. Porém, o estudo comenta que, caso a interface adesiva seja menos resistente à tração que ao cisalhamento, pode ser que, mesmo maximizando esta última tensão, a falha ainda poderá ocorrer sob tensão de tração.

### 3 PROPOSIÇÃO

Da análise dos ensaios de resistência de união na interface dente/restauração mais comumente empregados na Odontologia, verifica-se que não há certeza de que o espécime é levado à ruptura sob tensões de cisalhamento, e os resultados parecem mesmo dependentes das variações de sua configuração.

Diante disso, este estudo propôs verificar, através de análise por elementos finitos e de uma etapa experimental, se o ensaio de torção leva a interface à ruptura sob tensões de cisalhamento e se ele seria vantajoso (ver os tópicos de características de um ensaio mecânico ideal, página 49) como ensaio mecânico de resistência de uniões adesivas em comparação com o ensaio de cisalhamento.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

A comparação dos ensaios de resistência adesiva por torção e por cisalhamento foi realizada através de duas etapas: análise de distribuição de tensões pelo método dos elementos finitos (MEF)<sup>71</sup> e etapa experimental com ensaios com carregamento de torção e de cisalhamento com fio de espécimes aderidos à dentina.

### 4.1 ANÁLISES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

#### 4.1.1 Construção dos modelos tridimensionais (3D)

Os softwares escolhidos para a análise das distribuições de tensão nos modelos 3D pelo método dos elementos finitos foram o MSC.Patran 2005r2<sup>®</sup> para o pré e pós-processamento e o MSC.Marc<sup>®</sup> para o processamento (MSC.Software Corporation, Santa Ana, CA, USA).

##### 4.1.1.1 Geometria

Os modelos 3D foram constituídos por cilindro de compósito, uma camada de adesivo e um cilindro de dentina com maior diâmetro (ver geometria na Figura 4.1). As dimensões para os ensaios de carregamento com fio, isto é, cisalhamento (Cis) e microcisalhamento (miCis), foram baseadas num estudo anterior que simulou o ensaio de cisalhamento com fio através de modelos 2D<sup>31</sup>. Estas dimensões estão exibidas na tabela 4.1, onde se pode observar que as dos modelos de Cis e miCis são proporcionais numa razão de 5:1, exceto para a camada de adesivo, sempre com 50 µm de espessura. As mesmas dimensões foram simuladas para os ensaios



de torção ( $T_o$ ) e microtorção ( $miT_o$ ), para os quais foi adicionado um cilindro de metal sobre o cilindro de compósito, para facilitar a aplicação do carregamento de torção.

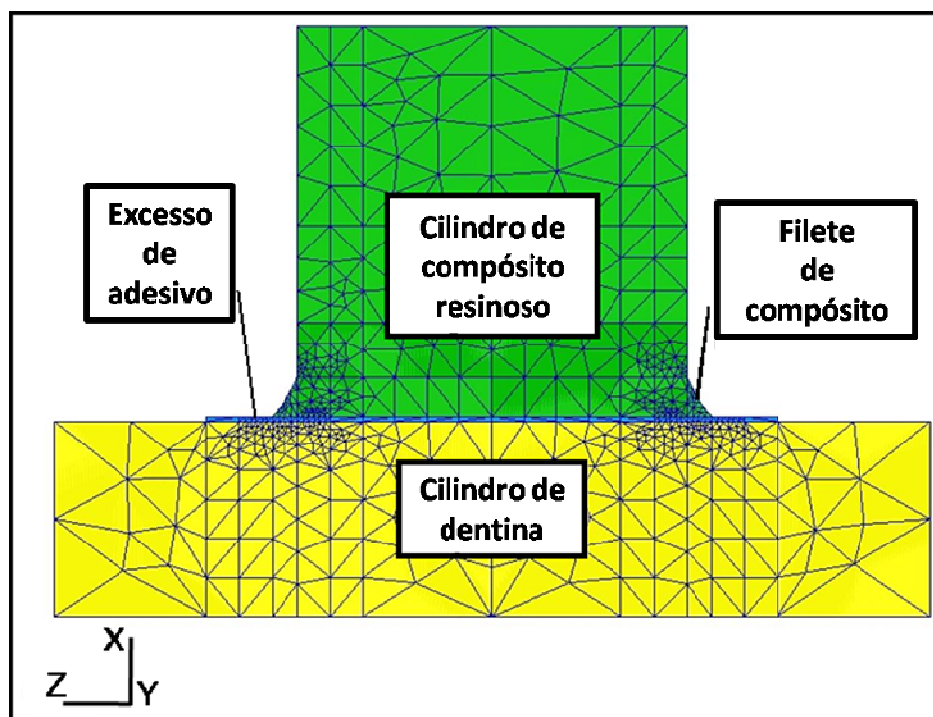


Figura 4.1 - Corte longitudinal (plano xz) que evidencia a geometria e malha dos modelos 3D simulados pelo método dos elementos finitos. Observar o refinamento da malha nas áreas de interesse: periferia da interface dentina/adesivo/cilindro de compósito e adjacências<sup>71</sup>

Tabela 4.1 - Dimensões das estruturas dos modelos simulados pelo MEF

Estrutura	Dimensões (mm) (diâmetro x altura)	
	Torção/ cisalhamento	Microtorção/ microcisalhamento
Dentina	9,0 x 2,0	1,8 x 0,4
Cilindro de compósito	4,0* x 4,0	0,8* x 0,8
Adesivo	5,866 x 0,05*	1,248 x 0,05*
Metal	4,0 x 2,0	0,8 x 0,4

\*Dimensões baseadas na literatura<sup>31</sup>

Visando a imitar a geometria verificada em espécimes reais, foi simulado um filete arredondado de compósito na confluência entre o cilindro de compósito e o adesivo<sup>18</sup>. O formato do perfil do filete foi obtido após mensuração, com auxílio de

um projetor de perfil, das coordenadas médias de três pontos (de um ponto central e dos dois extremos) em cortes de cinco espécimes produzidos em laboratório. Foi comprovado que alguns espécimes para microcisalhamento apresentaram o filete e outros não; por isso, foram simulados ambos os tipos de término do compósito para este tamanho de modelo.

A camada cilíndrica de adesivo foi desenhada com um diâmetro maior que o do cilindro de resina composta (plano zy), para simular a região não coberta por este, decorrente de aplicar o adesivo em toda a superfície de substrato e fotoativá-lo antes de aderir o compósito ao dente.

O diâmetro do cilindro de dentina foi definido, através de testes, como o mínimo para que a fixação das paredes laterais (detalhada no item 4.1.1.4.1, sobre as condições de contorno dos modelos) não contribuísse para o aumento da concentração de tensões na interface adesiva.

#### 4.1.1.2 Propriedades

As propriedades dos materiais simulados foram baseadas no estudo realizado anteriormente com os modelos 2D<sup>31</sup> e estão apresentadas, na tabela 4.2. Todos eles foram considerados elásticos, lineares, isotrópicos e homogêneos.

Tabela 4.2 - Propriedades dos materiais simulados pelo método dos elementos finitos

Material	Propriedades	
	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
Dentina	15	0,23
Compósito híbrido	20	0,25
Compósito de baixa viscosidade	5	0,35
Adesivo	4	0,35
Metal	200	0,29

Propriedades baseadas na literatura<sup>31</sup>

#### 4.1.1.3 Discretização do modelo

A malha foi construída com elementos tetragonais com quatro nós. Para o controle de malha, durante a construção da geometria, cada cilindro correspondente a um material foi construído através de vários cilindros menores (Figura 4.2, parte A). O refino da malha foi maior nas áreas em que, em modelos prévios, foi observada maior concentração de tensões, isto é, na periferia das interfaces dentina/adesivo/compósito e adjacências<sup>1</sup>. A figura 4.2, parte B, permite notar o refino da malha no sentido transversal, e a figura 4.1 (página 54) permite observar o refino no sentido longitudinal.

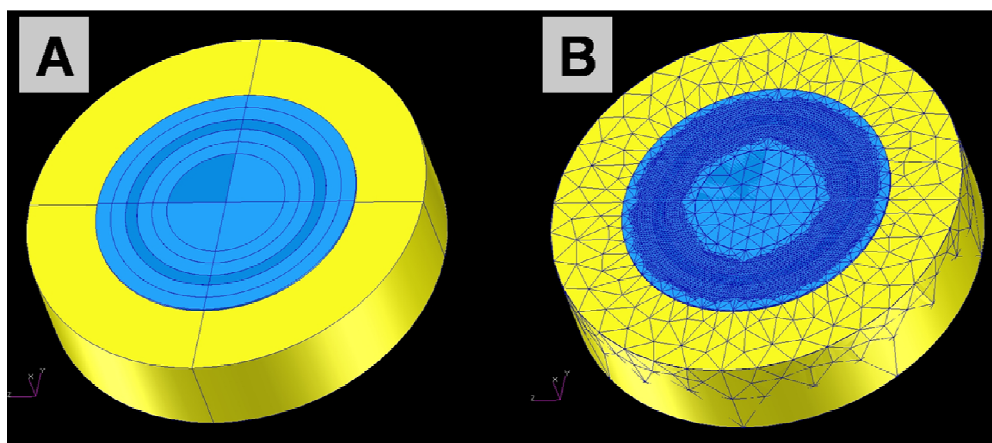


Figura 4.2 - Cilindros de adesivo (azul) e dentina (amarelo). A) Geometria: notar as divisões internas da geometria (o cilindro principal é composto de vários menores) que possibilitam o controle da malha; B) Malha: notar que a malha foi refinada na região da periferia da interface dentina/adesivo/resina. O perímetro do cilindro de compósito foi posicionado coincidindo com o centro da faixa de elementos de menor tamanho no adesivo

Após o teste de convergência de malha, optou-se por estabelecer um equilíbrio entre a precisão dada pelo refino da malha, o custo computacional para análise dos modelos e a redução dos erros residuais pelo grande número de

<sup>1</sup> O diâmetro da camada de adesivo dos modelos de tamanho micro e convencional não foram proporcionais de 1:5 porque, em cada uma dos tamanhos, o filete de compósito não foi proporcional, já que as medidas foram feitas em laboratório. Dessa forma, em cada tamanho de modelo, o diâmetro do adesivo foi adaptado para permitir uma transição gradativa dos tamanhos dos elementos da malha desde a periferia da interface adesiva em direção à periferia da dentina.

elementos. O número de elementos para cada modelo foi: To: 181.827; Cis: 178.731; miTo: 199.701; miCis: 196.902 elementos.

#### 4.1.1.4 Condições de contorno e carregamento

##### 4.1.1.4.1 Deslocamento

O cilindro de dentina teve a base e as paredes laterais fixadas tanto em rotação quanto translação em todas as direções do espaço (Figura 4.3, parte B) para simular o dente embutido em resina acrílica (Figura 4.3, parte A).

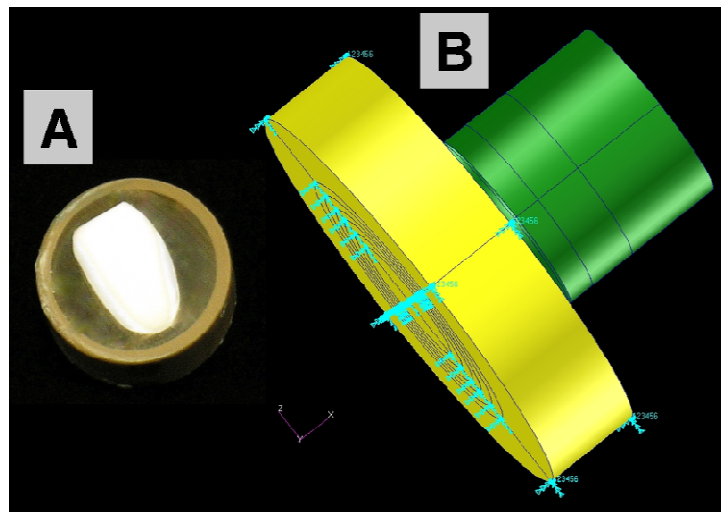


Figura 4.3 - A) Incisivo bovino com dentina vestibular exposta embutido em resina acrílica autopolimerizável, dentro de um segmento de tubo de PVC; B) Modelo 3D com fixação da base e paredes laterais do cilindro de dentina em todas as direções do espaço

Como foi mencionado anteriormente (item 4.1.1.1), o diâmetro do cilindro de dentina foi estabelecido como o mínimo para que a fixação das paredes laterais não contribuísse para o aumento da concentração de tensões na interface adesiva.

#### 4.1.1.4.2 Interfaces adesivas

As interfaces dentina/adesivo e dentina/compósito foram simuladas considerando uniões perfeitas (através da equivalência entre os nós da interface) e sem defeitos em todos os casos<sup>31</sup>.

#### 4.1.1.4.3 Carregamentos mecânicos

As forças empregadas em todos os modelos resultaram numa tensão nominal arbitrária de 4 MPa<sup>31</sup>, com valores de 50,2656 N e 2,010624 N, respectivamente, nos tamanhos convencional e micro.

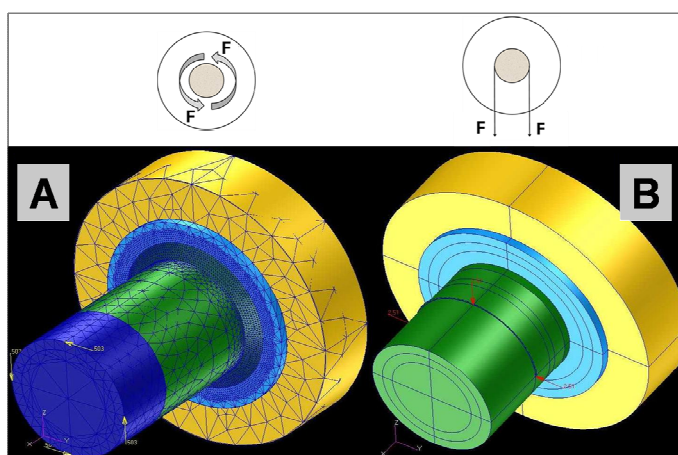


Figura 4.4 - Simulação dos carregamentos pelo método dos elementos finitos. Os esquemas dos carregamentos correspondentes estão representados na parte superior da figura. A) Modelo de microtorção (miTo), com um cilindro adicional de metal (em azul), e a carga de torção distribuída por quatro nós deste cilindro no sentido anti-horário (setas amarelas); B) Modelo de microcisalhamento (miCis), com a pressão (setas vermelhas) aplicada em uma linha na metade do perímetro do cilindro de compósito, neste caso, a 0,4 mm de distância da interface dentina/adesivo

### a) Ensaio de cisalhamento (Cis) e microcisalhamento (miCis)

A simulação da carga nos modelos de cisalhamento e microcisalhamento com fio foi feita através de aplicação de pressão (12,5675 MPa para Cis e 2,513 MPa para miCis) distribuída em uma linha na metade do perímetro do compósito (ver Figura 4.4, parte B). A aplicação da pressão deste modo parece adequada para simular um carregamento com fio, pois considera a capacidade do fio metálico se deformar e apertar o cilindro de compósito. O valor de pressão foi deduzido da equação  $2C = \int_0^\pi r N \sin \alpha d\alpha \quad \therefore N = \frac{C}{r}$ , cuja legenda está na figura 4.5.

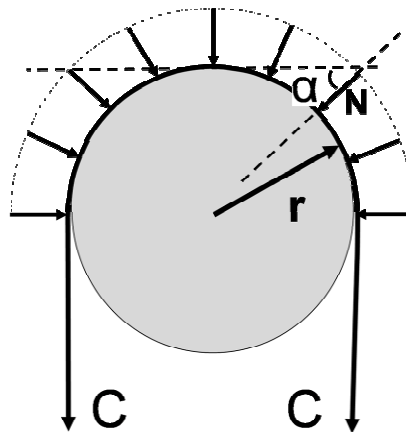


Figura 4.5 - Representação esquemática da aplicação de carga (2C) de cisalhamento com fio e dedução matemática do valor da pressão (N)<sup>71</sup>

A distância entre o local do carregamento e a interface dentina/adesivo pode variar para os ensaios de carregamento com fio de acordo com o diâmetro deste (a distância equivale ao raio do fio). Além disso, essa distância também pode variar dentro de um mesmo trabalho experimental, caso o fio não seja bem posicionado em relação à interface igualmente para todos os espécimes antes de iniciar o ensaio.

Ao variar as distâncias de carregamento, em um conjunto de modelos de Cis e miCis, foram simuladas distâncias de aplicação de carga proporcionais ao diâmetro do cilindro de compósito aderido (Cis: 1 mm e 2 mm; miCis: 0,2 mm e 0,4 mm, respectivamente), a fim de isolar e analisar a influência da espessura

relativa da camada de adesivo sobre a distribuição de tensões<sup>31</sup>. Também foram simuladas distâncias correspondentes às montagens experimentais reais, que utilizam alças de fio ortodôntico com raios iguais a 0,25 mm no Cis e 0,1 mm no miCis<sup>31</sup>. As distâncias de carregamento estão apresentadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Distâncias entre o local de carregamento e a interface adesiva para os ensaios de cisalhamento com fio simulados pelo método dos elementos finitos<sup>31</sup>

Tamanho do espécime	Distâncias (mm)					
	0,1	0,2	0,25	0,4	1	2
Cisalhamento	x	x	x	x	x	x
Microcisalhamento	x	x	x	x		

De acordo com um artigo da internet<sup>m</sup>, existe uma solução analítica para cálculo dos picos de tensão quando são superpostos esforços de cisalhamento com os de flexão (é o caso do cisalhamento com fio). Enquanto a tensão nominal é calculada pela divisão da força pela área de seção transversal do espécime (Equação 1, em que  $F$  é a força e  $R$  é o raio do cilindro de compósito), o pico de tensão de cisalhamento na seção transversal na altura do engastamento (no caso, a interface adesiva) pode ser calculado com a Equação 2 (em que  $\tau$  é o pico da tensão de cisalhamento). Já a tensão de tração depende da distância entre a aplicação da carga e o engastamento, ou seja, distância entre a carga e a interface adesiva, segundo a Equação 3 (em que  $\sigma$  é o pico da tensão de tração e  $L$  é o comprimento da viga que, neste caso, equivale à distância entre a carga e a interface).

$$Tensão_{média} = \frac{F}{\pi(R_{compósito})^2} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{4F}{3\pi(R_{compósito})^2} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{4FL}{\pi(R_{compósito})^3} \quad (3)$$

O pico da tensão de cisalhamento na seção transversal da interface dos modelos de Cis e miCis simulados pelo MEF seria 5,33 MPa (o valor da tensão nominal corresponde a 0,75 do valor do resultado analítico). No caso do pico de

<sup>m</sup> <http://www.mspc.eng.br/matr/resmat0730.shtml> (acessado em 28/12/2009).

tração para os casos reais, ou seja, Cis com  $L=0,25$  mm e miCis com  $L=0,1$  mm, os valores calculados resultam em 2 MPa e 4 MPa, respectivamente<sup>n</sup>.

#### b) Ensaio de torção (**To**) e microtorção (**miTo**)

Foi verificado, pela simulação de um cilindro de compósito de baixa viscosidade (com baixo E) que, para aplicar a carga de torção em 4 pontos diretamente sobre o compósito, sem que a concentração da carga influenciasse nas tensões da interface, a distância mínima entre o carregamento e esta deveria ser de 2 mm no caso do modelo de To e 0,4 mm para o de miTo.

Para simplificar a simulação da aplicação da carga em todo o perímetro do cilindro de compósito (que foi o que ocorreu na etapa experimental), sobre este foi construído um cilindro de metal de 2 mm (To) ou 0,4 mm (miTo) de altura e módulo de elasticidade igual a 200 GPa, e a carga foi distribuída em 4 nós diametralmente opostos deste cilindro. Como o metal tem alta rigidez, a transmissão do carregamento dele para o cilindro de compósito aconteceu de forma mais bem distribuída.

O valor da carga foi escolhido de forma que, no caso de calcular a tensão nominal da mesma forma que para o ensaio de cisalhamento, o valor desta também resultasse em 4 MPa. Assim, as cargas nos modelos de To e miTo foram, respectivamente, 50,2656 N e 2,010624 N.

---

<sup>n</sup> Isto é condizente com um aumento linear da tensão de tração com o aumento da distância entre o ponto de carregamento e a interface: a distância entre o ponto de carregamento no miCis real (0,1 mm) é, proporcionalmente, o dobro da do Cis real (0,25 mm), já que a proporção entre tamanhos de miCis e Cis é 1:5.



No caso de um espécime de secção transversal circular que sofre um carregamento de torção no regime linear, as tensões de cisalhamento aumentam em módulo de forma linear do centro da secção até a periferia, onde a tensão de cisalhamento é máxima. Para chegar ao valor da tensão de cisalhamento máxima (em MPa) produzida no perímetro do espécime sob torção, é preciso levar em conta o torque ou momento torçor (obtido pela Equação 4, em que  $T$  é o torque,  $F$  é a força e  $R$  é o raio do cilindro de compósito) e o momento de inércia polar da secção transversal do espécime (obtido pela Equação 5, em que  $J$  é o momento de inércia polar na secção transversal do espécime). O valor da tensão máxima de cisalhamento pode ser obtido pela Equação 6<sup>o</sup>, em que  $\tau$  é o pico da tensão de cisalhamento na periferia da interface:

$$T_{compósito} = F \times R_{compósito} \quad (4)$$

$$J_{compósito} = \frac{\pi}{2} (R_{compósito})^4 \quad (5)$$

$$\tau = \frac{T_{compósito} \times R_{compósito}}{J_{compósito}} \quad (6)$$

Para os ensaios de  $T_o$  e  $miT_o$  simulados pelo MEF, a tensão máxima de cisalhamento calculada pela equação analítica foi igual a 8 N.

#### 4.1.2 Parâmetros de análise dos resultados de tensão obtidos pelo método dos elementos finitos

A análise das tensões desenvolvidas pelos ensaios de torção e cisalhamento foi feita com base nos seguintes parâmetros<sup>31</sup>:

- Valores de tensão (máxima principal, cisalhamento máximo e razão máxima principal/cisalhamento máximo) nos nós situados numa linha mediana da interface dentina/adensivo;
- Local dos picos de tensão máxima principal ( $\sigma_{máx}$ ) e cisalhamento máximo ( $\tau_{máx}$ ), como possíveis indicativos do local de início da fratura;

<sup>o</sup> Equações retiradas do site: [http://linux.alfamaweb.com.br/sgw/downloads/38\\_104254\\_Torca-Notasdeaula.pdf](http://linux.alfamaweb.com.br/sgw/downloads/38_104254_Torca-Notasdeaula.pdf) (acessado em 28/12/2009).

- Vetores de tensão máxima principal, cuja direção pode indicar a tendência da direção da fratura.

## 4.2 ETAPA EXPERIMENTAL

### 4.2.1 Delineamento das variáveis da etapa experimental

#### 4.2.1.1 Seleção dos materiais

Foram selecionados três sistemas adesivos que produzissem interfaces com diferentes faixas de resistência de união: multi-frascos, frasco-único e adesivo auto-condicionante do tipo “*mild*”.

Para verificar a influência da variação da rigidez do cilindro de compósito sobre os resultados de tensão nominal de ruptura, foi empregado um compósito do tipo híbrido e um compósito de baixa viscosidade, este último com menor conteúdo de carga inorgânica, o que lhe confere menor rigidez.

Ao longo dos ensaios, foi observada alta frequência de fraturas coesivas no cilindro de compósito no caso dos ensaios de torção. Para verificar se o reforço do cilindro poderia forçar a ocorrência de fraturas puramente adesivas, foi incluído um grupo com cilindros de vidro, em vez de compósito, para o ensaio  $T_0$ . Os ensaios de  $m_iT_0$  não receberam um grupo com vidro devido à dificuldade em se obter com esse material um espécime com as dimensões micro.

Neste trabalho, os cilindros de compósito ou vidro serão referidos apenas como “cilindros” ou espécimes.

#### 4.2.1.2 Dois tamanhos de espécime

Foram confeccionados espécimes de torção e de cisalhamento nos tamanhos convencional (To e Cis) e micro (miTo e miCis), para verificar a influência do tamanho da área da interface adesiva sobre os resultados de tensão de ruptura. Embora a variação do tamanho do cilindro de compósito implique na variação da espessura relativa da camada de adesivo, nos ensaios de cisalhamento com fio não foi isolada esta variável, já que as distâncias de carregamento não foram proporcionais.

#### 4.2.1.3 Tamanho da amostra e número de cilindros colados por dente

Os valores de adesão obtidos sobre a dentina apresentam alta dispersão, atribuída, em parte, à variabilidade deste substrato. O cálculo do tamanho da amostra com base na variância chegaria a um número inviável em termos práticos. Neste trabalho, o tamanho das amostras foi estabelecido como  $n=10$ , e o dente foi considerado como a unidade experimental.

A princípio, os dentes destinados aos ensaios To e Cis receberiam 1 cilindro de compósito e, os destinados para os ensaios de miTo e miCis, receberiam 6 cilindros. O valor de resistência à ruptura atribuído a cada unidade experimental (aqui, o valor atribuído a cada unidade experimental será chamado “dado amostral”) dos ensaios micro seria a média dos resultados dos 6 cilindros.

Uma vez obtidos os resultados parciais dos ensaios de miTo e To, foi realizado um teste de homocedasticidade para comparar as variabilidades de ambos, tanto considerando a média dos 6 cilindros para cada dente da microtorção como considerando o valor de apenas um dos cilindros para este tipo de ensaio. Através dessa comparação, verificou-se que as variabilidades entre os dois ensaios foram semelhantes quando se considerou o valor de apenas um cilindro por dente no ensaio micro. Com base nesses resultados, e no fato de que é mais trabalhoso testar os 6 cilindros para obter 1 resultado, foi utilizado, neste trabalho, o valor de apenas um cilindro por dente no ensaio de microtorção, e o mesmo raciocínio foi

usado para o ensaio de microcisalhamento. Este procedimento de utilizar apenas o valor de um cilindro por dente nos ensaios micro ainda evita que se oculte a variabilidade em torno de cada dado amostral (por utilizar a média por dente, que já é uma medida de tendência central) e que por isso seja sugerida uma vantagem equivocada dos ensaios micro em relação aos convencionais quanto à menor dispersão dos resultados.

#### 4.2.2 Sequência de confecção dos espécimes

A figura 4.6 exibe um resumo da seqüência de confecção dos espécimes para os ensaios de torção e cisalhamento.

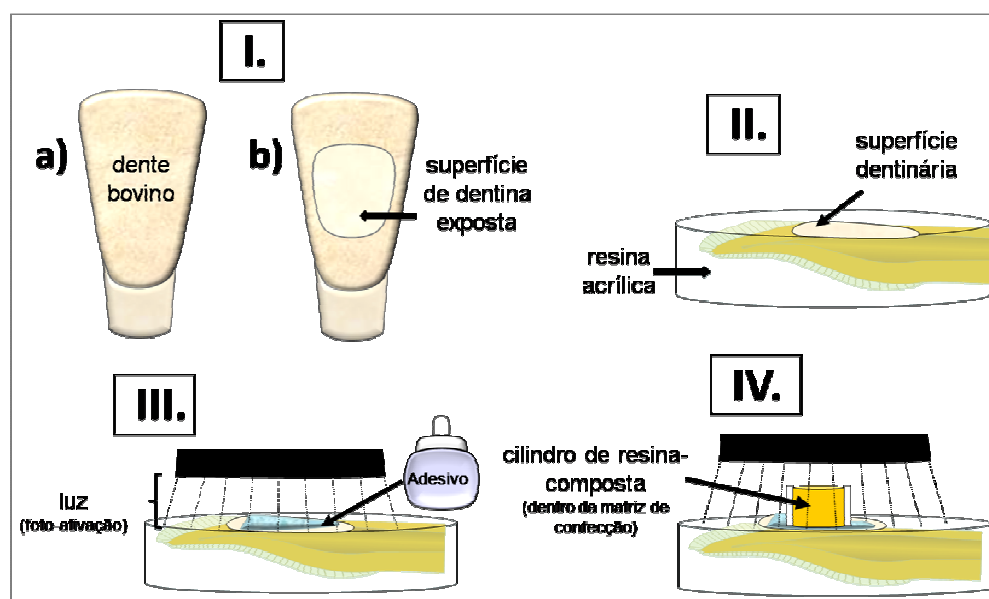


Figura 4.6 - Sequência de confecção dos espécimes<sup>71</sup>: I.a) Incisivo bovino (face vestibular); I.b) Dentina vestibular exposta após desgaste; II. Embutimento do dente em resina autopolimerizável; III. Aplicação do sistema adesivo e fotoativação; IV. Construção do cilindro de compósito (com auxílio de uma matriz) e fotoativação

#### 4.2.2.1 Tratamento prévio do substrato dentinário

Dentes incisivos bovinos foram armazenados em solução de cloramina (1%) a 4° C. Dois dias antes do início dos experimentos, os dentes foram lavados em água corrente e, a partir de então, foram armazenados em água destilada também a 4° C.

A face vestibular da coroa foi desgastada sob refrigeração com lixa de SiC, granulação 180, para expor a dentina até a obtenção de uma área suficiente para realizar a adesão de um cilindro de compósito do tamanho convencional.

As raízes foram seccionadas para o posterior embutimento da coroa em resina acrílica autopolimerizável dentro de um segmento de tubo de PVC (diâmetro igual a  $\frac{3}{4}$  de polegada e altura igual a 10 mm). Após o embutimento, a camada de esfregaço dentinário foi padronizada com abrasão em lixa de SiC, granulação 600, durante 60 s e sob refrigeração com água (procedimento comumente descrito na literatura<sup>23</sup>).

#### 4.2.2.2 Aplicação dos sistemas adesivos

Sobre a dentina preparada, foram aplicados os sistemas adesivos de acordo com os seguintes passos:

- Sistema multi-frascos (**S**): adesivo Adper Scotchbond Multi-Purpose<sup>P</sup> (3M ESPE, St Paul, MN, USA): (1) aplicação de ácido fosfórico em gel a 37% (Attaquegel, Biodinâmica, Ibiporã, PR, Brasil)<sup>Q</sup> por 15 s; (2) lavagem em água corrente por 20 s; (3) secagem com papel absorvente, na tentativa de manter a umidade da dentina próxima ao natural (aspecto brilhante, mas sem formar uma “lâmina de água”); (4) aplicação do *primer* por 45 s sob agitação; (5) aplicação de jato de ar para evaporação do solvente (até não mais se observar o movimento de líquido do solvente), e repetição dos

---

<sup>P</sup> Lote do frasco do *primer*: 8BT (prazo de validade: 03/2011); lote do frasco do adesivo: 8RF (prazo de validade: 04/2011).

<sup>Q</sup> Lote: 408 08 (prazo de validade: 04/2010).

passos (4) e (5) até que, ao final da secagem do solvente, a dentina apresentasse uma superfície brilhante; (6) aplicação do adesivo e uniformização da espessura da camada com jato de ar; (7) fotoativação por 20 s (SDS Kerr Optilux 501 Curing Light);

- Sistema frasco-único (**M**): adesivo Magic Bond DE<sup>r</sup> (Vigodent SA Indústria e Comércio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil): (1) condicionamento ácido, lavagem e secagem com os mesmos passos e critérios do condicionamento ácido no sistema multi-frascos; (2) aplicação do líquido do único frasco (*primer* mais adesivo) por 45 s sob agitação; (3) aplicação de jato de ar para evaporação do solvente (até não mais se observar o movimento de líquido do solvente), e repetição dos passos (2) e (3) até que, ao final da secagem do solvente, a dentina apresentasse uma superfície brilhante; (4) fotoativação por 20 s;
- Adesivo auto-condicionante do tipo “*mild*” (**A**): adesivo All-Bond SE<sup>s</sup> (Bisco, Inc., Schaumburg, IL, USA): (1) secagem da dentina com papel absorvente; (2) proporcionamento de uma gota de cada frasco do produto (parte I e parte II) num casulo e mistura até chegar à cor rosa; (3) aplicação imediata da mistura sobre a dentina sob agitação por 10 s; (4) aplicação de jato de ar para evaporação do solvente (até não mais se observar o movimento de líquido do solvente), e repetição dos passos (3) e (4) até que, ao final da secagem do solvente, a dentina apresentasse uma superfície brilhante; (5) fotoativação por 20 s.

#### 4.2.2.3 Confecção dos cilindros de compósito

Para a construção dos cilindros sobre a camada de adesivo já polimerizada, foram utilizados dois compósitos diferentes: o compósito híbrido (**H**) Z100<sup>t</sup> (3M

---

<sup>r</sup> Lote: 165/08 (prazo de validade: 11/2010).

<sup>s</sup> Lote do frasco I: 0800006927 (prazo de validade: 04/2010); lote do frasco II: 0800006928 (prazo de validade: 04/2010).

<sup>t</sup> Lote: 7YN (prazo de validade: 06/2010).

ESPE, St Paul, MN, USA) e o compósito fluido (**F**) Filtek Z350 Flow<sup>u</sup> (3M ESPE, St Paul, MN, USA), ambos da cor A3.

Os cilindros de tamanho convencional (ensaios To e Cis) apresentaram dimensões de 4 mm de diâmetro x 4 mm de altura. A confecção foi realizada com auxílio de uma matriz bi-partida de poliacetal, dentro da qual foram inseridos dois incrementos do respectivo compósito, cada um fotoativado por 40 s (SDS Kerr Optilux 501 Curing Light).

Para a colagem de cilindros de vidro (**V**) (ensaio de To), foram obtidos cilindros com as mesmas dimensões dos de compósito de tamanho convencional. A face que se destinaria à adesão foi jateada com óxido de alumínio (granulação média de 50 µm) e recebeu a aplicação do silano Rely X Ceramic Primer<sup>v</sup> (3M ESPE, St Paul, MN, USA) segundo as recomendações do fabricante. Após a aplicação do silano, o vidro recebeu uma camada de adesivo do sistema correspondente ao já aplicado e polimerizado sobre a dentina e, em seguida, foi posicionado sobre esta. Foi aplicada luz para fotoativação da camada de adesivo do vidro por 20 s com a mesma unidade de fotoativação utilizada para os outros casos.

Os cilindros do tamanho micro foram construídos com diâmetro de 0,76 mm, com altura de 0,4 mm para os ensaios de miCis<sup>25</sup> ou 1 mm para o de miTo (esta maior altura foi para facilitar o procedimento de aplicação da carga de torção). A confecção se deu com a utilização de matrizes de segmentos de tubos Tygon (Saint-Gobain Performance Plastics, Akron, OH, USA)<sup>25, 27, 54, 55</sup>, em que foi inserido um único incremento do respectivo compósito, seguido de fotoativação por 40 s.

#### **4.2.3 Armazenamento dos espécimes antes dos ensaios**

Após a adesão dos cilindros de compósito ou vidro aos dentes, os espécimes foram armazenados em água destilada a 37° C por 24 h (procedimento comumente descrito na literatura<sup>23</sup>). Após este período, foram realizados os ensaios mecânicos.

---

<sup>u</sup> Lote: 8GJ (prazo de validade: 05/2010).

<sup>v</sup> Lote: 8YU (prazo de validade: 09/2011).

## 4.2.4 Ensaios mecânicos de resistência de união

### 4.2.4.1 Torção

Foram utilizados dispositivos equipados com polias para aplicar torque a partir da carga de tração de uma máquina de ensaios universal (Instron, Modelo # 5565, Instron Corp, Canton, MA, USA) (Figura 4.7, parte A).

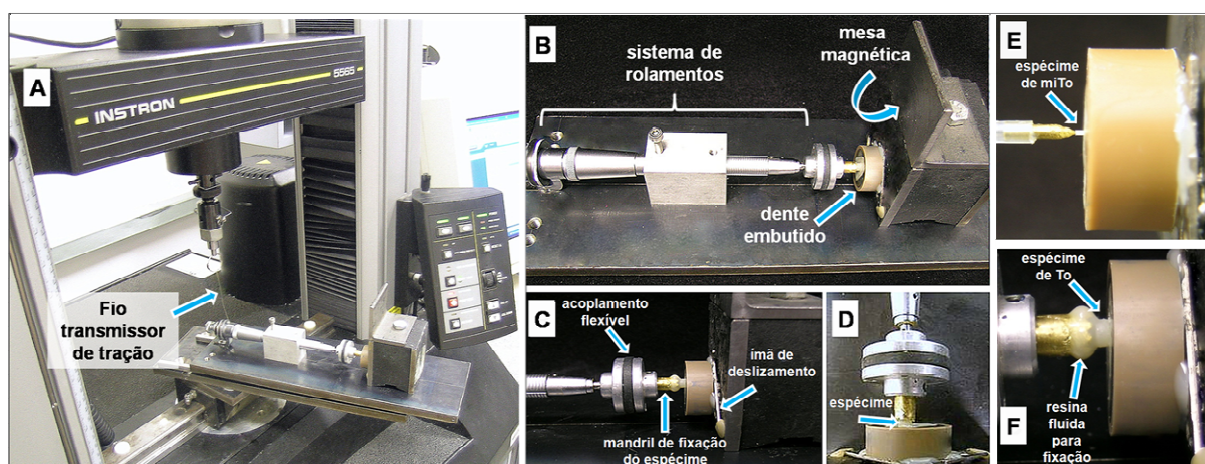


Figura 4.7 - Dispositivo de aplicação de torção. A) Dispositivo com polias e rolamentos adaptado a uma máquina de ensaios universal; B) Dispositivo com sistema de rolamentos e espécime posicionado no mandril com auxílio de uma mesa magnética; C) Cilindro de To fixado (por meio de resina fluida) ao mandril (notar o acoplamento flexível na haste do mandril); D) Aumento na região do cilindro, sem a resina fluida; E) Cilindro de microtorção posicionado no mandril (diferente do mandril do ensaio de To); F) Cilindro de To fixado ao mandril

Os dispositivos utilizados para a torção (To) e microtorção (miTo) diferiram entre si quanto ao tamanho do mandril (Figura 4.7, partes E e F) para fixação dos espécimes (compatível com diâmetro de cada um) e quanto à capacidade de transmissão de cargas em faixas diferentes (o ensaio de torção precisou de um dispositivo mais robusto para transmitir cargas mais altas).

O tubo de PVC com o espécime embutido foi colado a um ímã e, através do deslizamento do ímã sobre uma mesa magnética, o espécime foi posicionado para ser fixado ao mandril, pelo qual receberia o carregamento de torção (Figura 4.7, parte B). A fixação dos espécimes ao mandril foi feita por meio de uma resina fluida



fotoativável (fixação do espécime de To exibida na Figura 4.7, parte F), mantendo sempre a distância mínima entre essa resina e a interface adesiva em que a fixação do cilindro não interfere na concentração de tensões na interface (como mencionado no item 4.1.1.4.3 b) da página 61: 2 mm para a torção e 0,4 mm para a microtorção). Para a fixação do cilindro de vidro ao mandril, a sua extremidade oposta à da adesão à dentina foi jateada com óxido de alumínio (antes do procedimento de colagem do cilindro ao dente) e, sobre a área jateada, foi aplicado silano antes da colagem com resina fluida. Para reforçar o cilindro, além da resina fluida para fixação ao mandril, foi utilizado um compósito resinoso híbrido para envolver todo o vidro, sem entrar em contato com a interface adesiva.

Como, na aplicação do torque, qualquer desalinhamento entre o eixo das polias e o eixo do espécime poderia produzir mistura de outros tipos de esforços com a torção (flexão, por exemplo), a transmissão da carga foi feita com auxílio de intermediários flexíveis. Isto foi possível, no caso do ensaio de microtorção, graças ao material flexível da própria haste-mandril, com possibilidade de se defletir para se alinhar ao eixo do espécime. No caso do ensaio de To, a haste de transmissão da torção foi segmentada em duas partes e, entre elas, foi adaptado um acoplamento flexível com 4 pinos (Figura 4.7, partes C e D, na página 69).

As velocidades de avanço da máquina foram definidas para que, em média, o tempo decorrido até a ruptura fosse semelhante à média de tempo nos ensaios de microcisalhamento e cisalhamento convencional: de 60 a 120 s. Com base em testes prévios, a velocidade do ensaio de microtorção ficou estabelecida em 3 mm/min e no de torção, em 5,16 mm/min.

A tensão de cisalhamento máxima (MPa) na secção transversal do espécime para os ensaios de miTo e To foi calculada da forma analítica, através da Equação 6 (página 62). O torque (ou momento torçor, com unidade em N·mm) incidente no espécime foi considerado o mesmo que o incidente na polia diretamente ligada à máquina de ensaios (Equação 7, em que T é o torque, F é a força e R é o raio da polia). O cálculo do torque na polia foi feito com a força máxima registrada na máquina.

$$T_{cilindro} = T_{polia} = F_{polia} \times R_{polia} \quad (7)$$

Como as cargas aplicadas para o ensaio de microtorção eram muito mais baixas que nos outros ensaios, foi utilizada uma célula de carga com maior

sensibilidade para aquele caso, com limite de 100 N, enquanto para todos os outros, foi utilizada uma célula com limite de 1000 N.

#### 4.2.4.2 Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento (Cis) e microcisalhamento (miCis) foram realizados com um dispositivo adaptado à mesma máquina de ensaios utilizada para os ensaios de torção (Figura 4.8, parte A). O deslocamento em tração da máquina provocava esforços de cisalhamento sobre o cilindro de compósito através de fios ortodônticos com diâmetros iguais a 0,5 mm e 0,2 mm (portanto, as distâncias entre o carregamento e a interface foram iguais a 0,25 mm e 0,1 mm), respectivamente, para o Cis (Figura 4.8, parte B) e miCis.

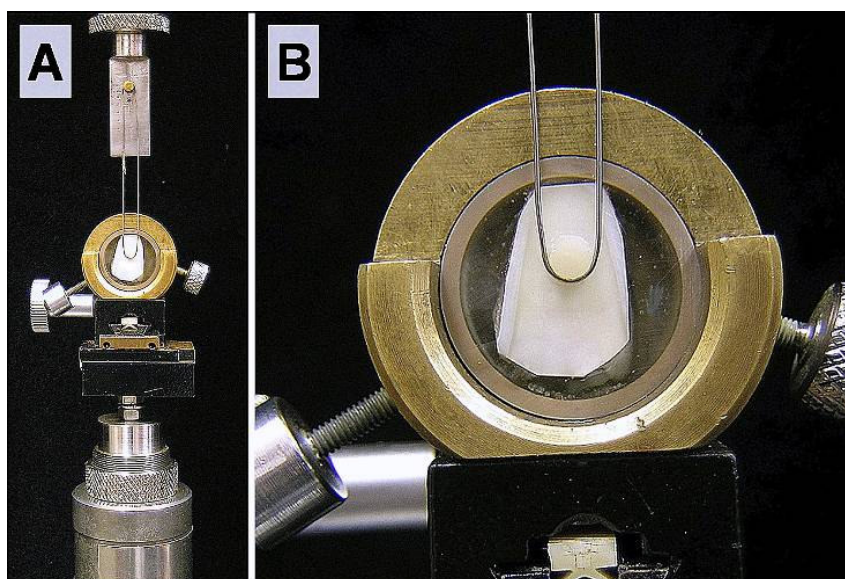


Figura 4.8 - Montagem experimental dos ensaios de cisalhamento. A) Dispositivo adaptado a uma máquina de ensaios universal; B) Transmissão de força cisalhante ao cilindro por meio de um fio ortodôntico de 0,5 mm de diâmetro (ensaio de Cis)

Ambos os ensaios foram realizados com uma velocidade de 0,5 mm/min (comumente empregada na literatura<sup>23</sup>). O cálculo da tensão nominal de ruptura (MPa) foi realizado com a divisão da força máxima registrada (N) pela área de seção transversal do espécime (mm<sup>2</sup>).

## 4.2.5 Análise dos resultados da etapa experimental

### 4.2.5.1 Resultados de tensão de ruptura

Os resultados de tensão de ruptura passaram pelos testes de normalidade e homocedasticidade para verificar a possibilidade de submeter os resultados à análise de variância. Para o fator adesivo, não houve homocedasticidade entre os resultados, especialmente devido ao caso do adesivo auto-condicionante (A). Por este motivo, foram realizadas três análises de variância, uma para cada adesivo, cujos fatores principais foram o tipo de cilindro e tipo de ensaio. As médias dos grupos dentro de cada uma das análises de variância foram contrastadas pelos valores críticos calculados pelo teste de Tukey. Tanto este teste quanto as análises de variância tiveram nível global de significância pré-estabelecido de 5% ( $p=0,05$ ). Para estabelecer contraste entre as médias dos três adesivos, os valores críticos foram calculados levando em consideração os resíduos (dois a dois) de cada análise de variância (feita separadamente para cada um dos adesivos) e o grau de liberdade decorrente.

Os valores de ruptura dos espécimes com cilindro de vidro do ensaio de To foram avaliados numa análise de variância com dois fatores: cilindro (três níveis: H, F ou V) e adesivo (três níveis: A, M ou S).

### 4.2.5.2 Análise das fraturas

#### 4.2.5.2.1 Avaliação do modo de ruptura

Todas as superfícies de fratura foram analisadas com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura modelo Stereoscan 440 (LEO Electron Microscopy Ltd, Cambridge, England). As superfícies de fratura resultantes dos ensaios de Cis e miCis receberam recobrimento com grafite (já que o relevo mais

baixo permitia esse tipo de cobertura, sem perder nitidez da imagem) e as resultantes dos ensaios de To e miTo, com platina<sup>w</sup>.

#### 4.2.5.2.2 Classificação das fraturas

As fraturas foram classificadas em três tipos principais<sup>23</sup>:

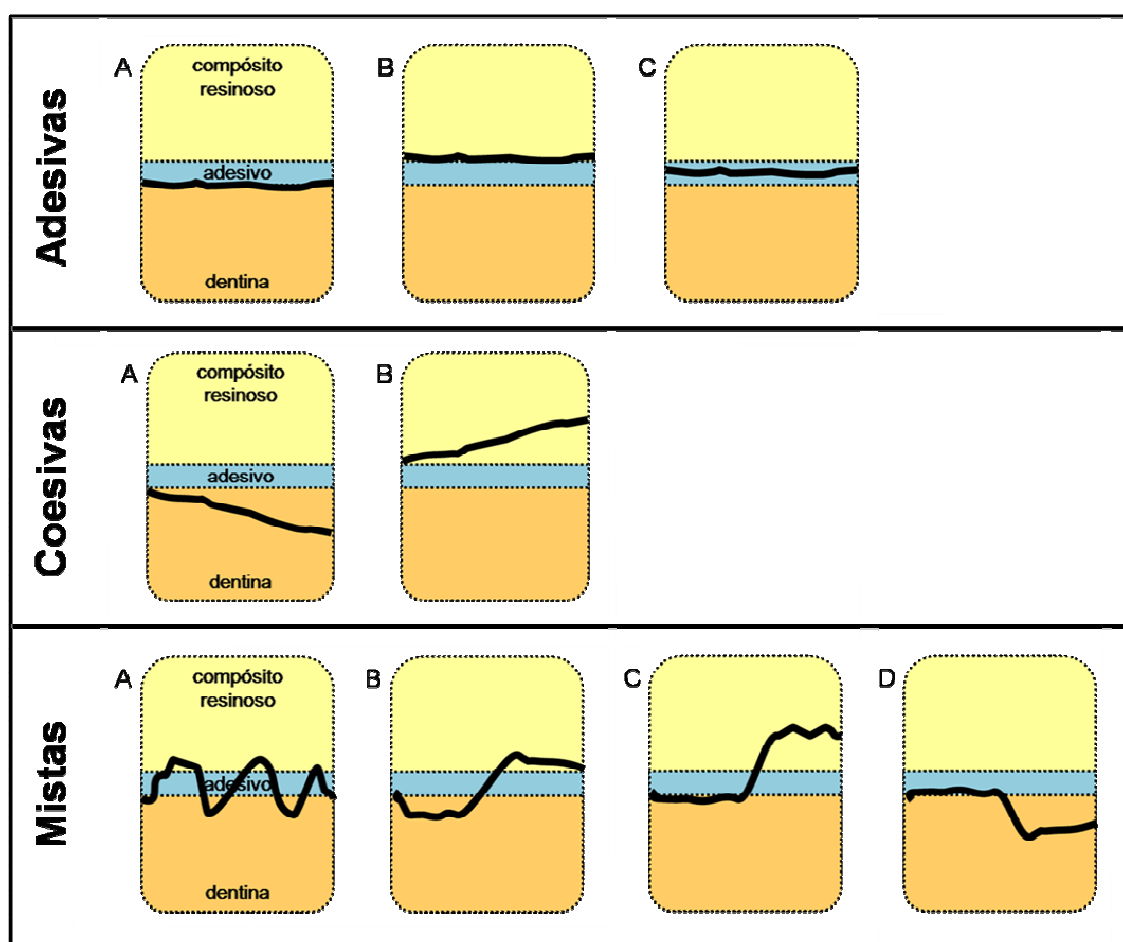


Figura 4.9 - Esquema da classificação das fraturas. Fraturas consideradas adesivas: A) Entre adesivo e dentina; B) Entre adesivo e cilindro; C) Coesiva no adesivo. Fraturas consideradas coesivas: A) Coesiva em dentina; B) Coesiva em compósito/vidro. Fraturas consideradas mistas: os tipos de A a D envolvem trechos de fratura adesiva e coesiva em um ou ambos os substratos de colagem

<sup>w</sup> Não houve nenhum preparo prévio das superfícies que envolvesse o emprego de solventes orgânicos (como o álcool, por exemplo, bastante utilizado para promover a desidratação da dentina para microscopia) que pudesse degradar o compósito resinoso ou adesivo.

- Adesivas (**ade**), que inclui fraturas que separam os substratos de colagem entre si (substrato dentinário e os cilindros de compósito/vidro). Neste grupo, foram incluídas as fraturas entre adesivo e cilindro, adesivo e dentina e coesivas no adesivo (esquema na Figura 4.9). Embora haja possibilidade de considerar uma fratura coesiva na camada de adesivo como uma fratura “coesiva” (coe)<sup>24</sup>, neste trabalho, ela foi considerada como adesiva, por resultar na separação dos substratos de colagem;
- Coesivas (**coe**), que inclui as fraturas que ocorrem através de um dos substratos de colagem (compósito, vidro ou dentina), sem envolver a interface adesiva (esquema na Figura 4.9);
- Mistas (**mis**): apresentam trechos de falha adesiva e coesiva no cilindro e/ou dentina, e não se sabe qual foi o local de início da falha (esquema na Figura 4.9).

#### *4.2.5.2.3 Relação das características das fraturas com as tensões obtidas pelo MEF*

Foi feita uma tentativa de compreender algumas das características das fraturas experimentais ao relacioná-las com os resultados de tensão obtidos pelo MEF, tais como direção dos vetores de máxima principal e local de maior concentração das tensões.

#### *4.2.5.2.4 Análise das frequências de fraturas*

Embora as fraturas adesivas e coesivas apresentem subtipos mais específicos, as frequências dos tipos de fratura foram calculadas para os três tipos mais gerais: adesivas, coesivas e mistas. A comparação das frequências de tantos subtipos, sendo que alguns apresentavam frequência muito baixa ou até mesmo igual a zero, mostrou-se inviável.

Em todos os ensaios, para aumentar as frequências dos tipos de fratura coesiva, de forma que houvesse um número viável para comparações estatísticas, os dados dos cilindros de compósito híbrido e de baixa viscosidade foram agrupados, já que as médias entre os dois tipos de compósito não apresentaram diferenças significantes na maioria das condições experimentais. As fraturas coesivas em vidro foram incluídas nas frequências das fraturas coesivas nos ensaios de torção pelo mesmo motivo. No caso dos ensaios de cisalhamento e microcisalhamento, as fraturas coesivas corresponderam, quase sempre, à dentina, e os poucos casos de fratura coesiva em compósito foram inclusos neste grupo.

As frequências de fraturas coesivas e adesivas dentro de cada adesivo em cada ensaio foram comparadas através do teste exato de Fisher, com um nível global de significância pré-estabelecido de 5%. Este teste foi empregado devido às frequências muito baixas de alguns tipos de fratura apresentadas em alguns casos. Estas comparações foram realizadas com a intenção de analisar se algum dos ensaios obteve frequência significativamente maior de fraturas adesivas em relação às coesivas, e como isso variou de acordo com o sistema adesivo empregado em cada um deles.

#### *4.2.5.2.5 Relação das frequências de fratura com valores de resistência à ruptura experimentais*

Com os valores de tensão de ruptura dos tipos de fratura (adesiva, coesiva e mista) em cada ensaio, foram feitas análises de variância de um fator, cujos níveis foram as combinações adesivo x tipo de fratura. Para a análise, foram incluídas apenas as médias das combinações adesivo x tipo de fratura cujo tipo de fratura apresentou frequência maior ou igual a 3.

Foram também analisadas as relações entre as frequências de fratura coesiva e a média tensão de ruptura, bem como a relação entre a dispersão dos resultados e a frequência de fraturas adesivas num ensaio.

#### **4.2.6 Parâmetros experimentais de comparação entre os ensaios de torção e cisalhamento**

- Poder de detecção de diferenças significantes entre os diferentes sistemas adesivos;
- Constância da classificação relativa dos adesivos, segundo suas resistências à ruptura, ao alterar as configurações dos ensaios (módulo de elasticidade do cilindro de compósito, e tamanho do espécime);
- Tipos de fratura, que indicam se o ensaio é capaz de testar a interface adesiva;
- Facilidade de execução do ensaio.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DELINEAMENTO DO ESTUDO

O ensaio de cisalhamento com fio foi escolhido para ser comparado ao ensaio de torção porque os dois utilizam exatamente o mesmo formato de espécime e por apresentar vantagens sobre o ensaio de tração<sup>18, 25, 27, 28</sup>, como execução mais simples e possibilidade de ser aplicado a materiais com baixa resistência coesiva (pois no caso da tração, haveria maiores chances de fratura coesiva no substrato menos resistente) e a materiais com baixa resistência adesiva (já que o processo de confecção do espécime não envolve cortes ou entalhes que já solicitam mecanicamente o espécime durante sua confecção). Além disso, o ensaio de cisalhamento, a princípio, foi proposto para verificar a resistência da interface às tensões cisalhantes. A aplicação de carga de cisalhamento com fio foi escolhida em vez da aplicação da carga com lâmina de faca ou fita de aço por ser uma condição muito utilizada e que cria mais uma variável de configuração: a possibilidade de alterar a distância entre o carregamento e a interface adesiva<sup>18</sup>.

No caso dos ensaios de torção, foi necessário elaborar um dispositivo para a aplicação do torque por causa da inadequação das sensibilidades dos torquímetros comerciais. Os espécimes, especialmente os micro, fraturam-se com torques muito abaixo da faixa de sensibilidade dos torquímetros existentes. A correta execução do ensaio exige também um mecanismo de alinhamento que não seja rígido, para garantir que não haja mistura de esforços com a torção.

Os dentes bovinos, embora tenham algumas diferenças de estrutura com relação aos dentes humanos, apresentam vantagens como facilidade de obtenção em grande quantidade e de não haver necessidade de aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa para que possam ser utilizados. As diferenças de estrutura dos dentes bovinos em relação aos humanos podem influenciar nos valores de resistência de união<sup>12, 72</sup>, bem como nas classificações relativas dos materiais e frequências de fraturas, mas não invalidam as comparações dos ensaios mecânicos entre si<sup>14, 24</sup>. O objetivo deste trabalho não foi verificar qual o melhor adesivo para



ser utilizado nos dentes humanos, mas verificar se haveria vantagens em aplicar o ensaio de torção no âmbito da pesquisa odontológica.

Ao contrário do esmalte, a dentina é um substrato de colagem cuja composição variável provoca grandes dispersões nos resultados de resistência de união. Por este motivo, a dentina superficial dos dentes bovinos foi escolhida como substrato de colagem, a fim de que fosse colocada à prova a capacidade de cada ensaio de detectar diferenças significantes entre os adesivos.

Quanto à escolha do número de cilindros de tamanho micro por dente: frequentemente, nos ensaios de resistência de união, o dente é considerado como a unidade experimental, e todos os valores de resistência de união dos espécimes provenientes dele, por quebrarem a aleatorização, servem para encontrar uma média, que é tida como um único dado amostral (e a análise da amostra leva em conta, neste caso, a média de cada dente). Um fato, às vezes, não suficientemente considerado é a redução implícita da variabilidade em torno de cada dado amostral quando é calculada a média (uma medida de tendência central) dos cilindros por dente. Neste trabalho, foi observado que, quando se considerou como dado amostral o resultado de apenas um cilindro por dente nos ensaios micro, os resultados dos ensaios de ambos os tamanhos foram homocedásticos. Como este trabalho não teve a intenção de comparar a eficiência de adesão a diferentes regiões do mesmo dente, todos os ensaios foram realizados com apenas um cilindro por dente, para que fossem comparadas as dispersões dos resultados sem camuflá-las artificialmente nos ensaios micro. Este cuidado é importante quando se comparam os desempenhos de ensaios micro com os chamados convencionais.

## 5.2 PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES OBTIDO PELO MEF EM CADA TIPO DE ENSAIO

Os resultados da análise pelo método dos elementos finitos, apresentados a seguir, foram publicados no ano de 2009<sup>71</sup>. Estes resultados permitiram notar que nenhum dos ensaios mecânicos simulados neste estudo produziu tensões uniformemente distribuídas.

Os gráficos das figuras 5.1 e 5.2, ambas na página 80, apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões máxima principal e cisalhamento máximo ao longo de uma linha mediana da interface dentina/adesivo (casos dos ensaios de tamanho convencional e micro com compósito de baixa viscosidade e com filete). Os casos de miCis e Cis selecionados para os dois gráficos são proporcionais quanto à distância do ponto de carregamento até a interface (isto é, 5 vezes maiores nos ensaios de Cis). A “posição relativa na interface” no eixo horizontal dos gráficos é dada em porcentagem, a partir da extremidade do adesivo correspondente ao lado do carregamento no ensaio de cisalhamento (0%) até a extremidade oposta (100%)<sup>x</sup>. A análise através da posição relativa na interface permite a comparação de resultados em modelos de diferentes diâmetros (convencional e micro)<sup>31</sup>. A linha da tensão nominal dos ensaios de cisalhamento, de 4 MPa, e a linha de tensão máxima de cisalhamento para os ensaios de torção, de 8 MPa, também estão apresentadas nos gráficos.

---

<sup>x</sup> As extremidades correspondentes a 0% e 100% da interface dentina/adesivo estão além do diâmetro do cilindro de compósito, pois este era menor que o diâmetro da camada de adesivo simulada.

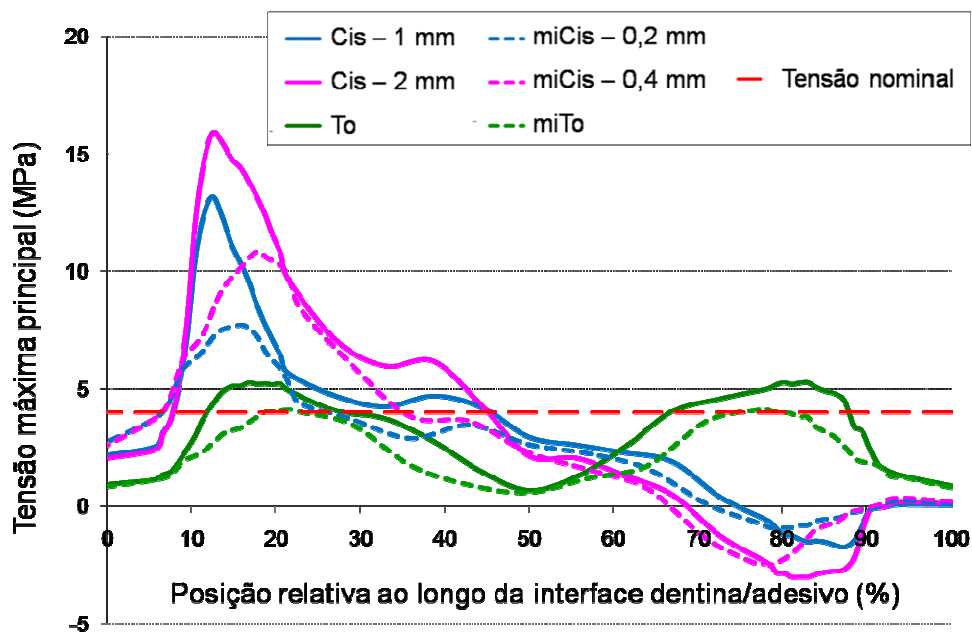


Figura 5.1 - Variação da tensão máxima principal (MPa) ao longo de uma linha mediana na interface dentina/adesivo. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e, nos casos de ensaios de cisalhamento (Cis) e microcisalhamento (miCis), explicita a distância entre a carga e a interface (em mm). Os modelos correspondem aos tamanhos convencional e micro com compósito de baixa viscosidade e com filete

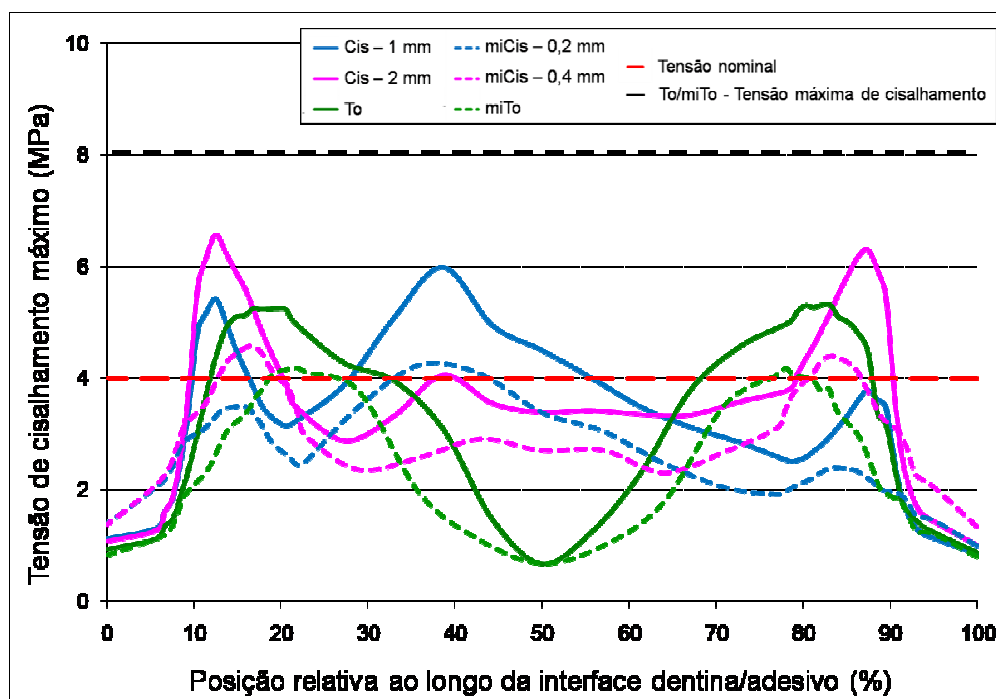


Figura 5.2 - Variação da tensão de cisalhamento máximo (MPa) ao longo de uma linha mediana na interface dentina/adesivo. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e, nos casos de ensaios de cisalhamento (Cis) e microcisalhamento (miCis), explicita a distância entre a carga e a interface (em mm). Os modelos correspondem aos tamanhos convencional e micro com compósito de baixa viscosidade e com filete

Nos ensaios de Cis e miCis, foram notados aumentos nos valores de tensão de cisalhamento máximo nas duas extremidades da interface (Figura 5.2) devido à descontinuidade geométrica<sup>18, 31</sup>. A tensão máxima principal (Figura 5.1) apresentou valores mais altos no lado do carregamento (região próxima a 0% da linha na interface), com valores acima da tensão nominal e com sinal positivo, o que indica que são tensões normais de tração. No lado oposto ao carregamento (região próxima dos 100% da linha na interface), desenvolveram-se tensões compressivas (valores negativos da tensão máxima principal). As tensões de tração e compressão com essa distribuição nos ensaios de Cis e miCis caracterizaram o esforço de alavanca imposto ao espécime. Este achado concorda com estudos prévios que utilizaram o MEF<sup>18, 31</sup>.

Ainda com relação aos ensaios de Cis e miCis, a figura 5.3 permite observar, na superfície de adesão do cilindro de dentina, a extensão da área submetida aos picos de tensão nos ensaios de cisalhamento: pequenas áreas correspondentes a um semicírculo (letras A e C, respectivamente, exibem faixas de tensão máxima principal e cisalhamento máximo).

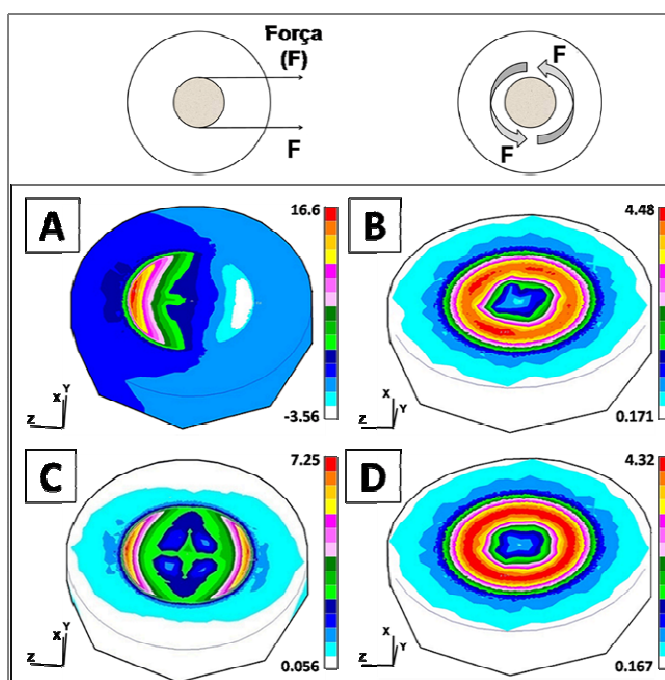


Figura 5.3 - Faixas de tensões (valores das escalas em MPa) sobre a superfície de adesão do cilindro de dentina nos modelos simulados pelo MEF. Letras A e B, são faixas de tensão máxima principal, respectivamente, nos modelos de cisalhamento com fio e torção. Letras C e D, exibem as faixas de tensão de cisalhamento máximo, respectivamente, nos modelos de cisalhamento com fio e de torção. Acima, estão os esquemas dos sentidos do carregamento correspondentes a cada modelo

No ensaio de torção, as faixas de tensões, tanto máxima principal quanto cisalhamento máximo, apresentaram uma disposição concêntrica (Figura 5.3 — B e D) com maiores intensidades em toda a periferia da interface. Este aumento na periferia da interface também pode ser observado nas figuras 5.1 e 5.2, ambas na página 80.

Tanto nos ensaios de torção quanto nos de cisalhamento com fio, foi observado que as áreas submetidas à máxima tensão foram muito menores que a área total da interface adesiva; porém, no ensaio de torção, esta área foi bem maior que no cisalhamento (Figura 5.3), o que poderia sugerir que os resultados de resistência obtidos por torção seriam mais representativos da interface.

Para ambos os ensaios, foram encontrados estados complexos de tensões. Estes achados indicam que, para os ensaios simulados neste estudo, embora o carregamento seja de um tipo, há possibilidade de a fratura ocorrer sob tensões de outro. Isto também ocorre em outros tipos de ensaio, como o de tração diametral (em que o espécime sofre um carregamento compressivo e se rompe por tensões de tração transversais à direção do carregamento) e no ensaio de resistência à compressão de cilindros friáveis (que desenvolve, próximo ao topo e à base cilindro, tensões de cisalhamento aproximadamente a 45° com a direção do carregamento, e de tração no sentido transversal na região central do espécime).

A predominância dos tipos de tensão e a direção dos vetores de máxima principal serão abordadas no item 5.4.

### 5.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS SOBRE OS VALORES DE TENSÃO DE RUPTURA (ETAPA EXPERIMENTAL) E PICOS DE TENSÃO (ANÁLISE PELO MEF)

Os gráficos das figuras 5.4 e 5.5 (página 83) mostram os picos da tensão máxima principal e cisalhamento máximo (MPa) obtidos pelo MEF quando foram simulados os compósitos, respectivamente, fluido e híbrido, em função da distância entre o ponto de carregamento e a interface (modelos de tamanhos convencional e micro com filete). A tensão nominal de 4 MPa e a tensão máxima de cisalhamento calculada para a torção, de cerca de 8 MPa, também foram representadas nos gráficos.

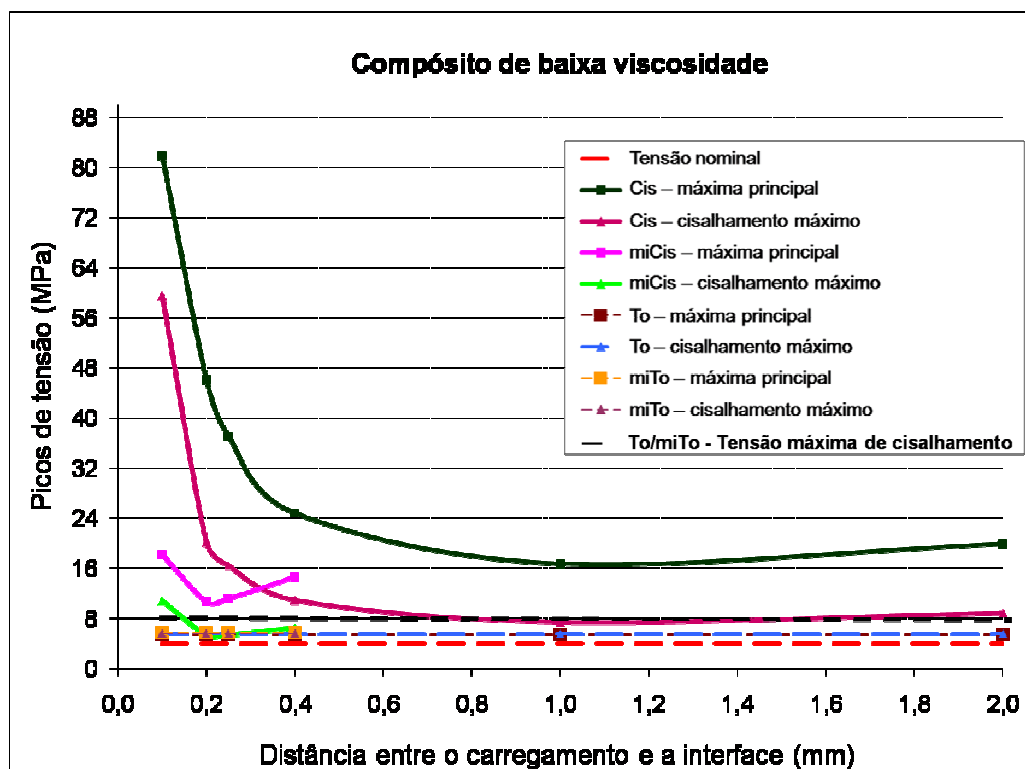


Figura 5.4 - Picos de tensão (em MPa) de cisalhamento máximo e máxima principal na interface dentina/adesivo para modelos com cilindros de compósito de baixa viscosidade. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e tipo de tensão

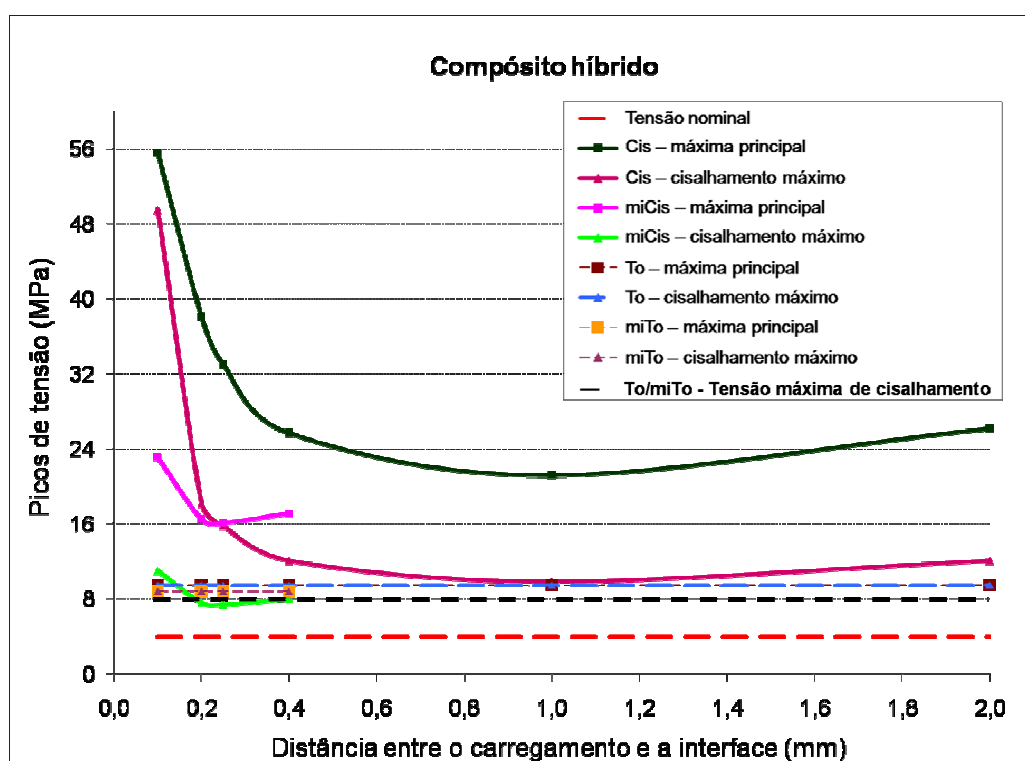


Figura 5.5 - Picos de tensão (em MPa) de cisalhamento máximo e máxima principal na interface dentina/adesivo para modelos com cilindros de compósito híbrido. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e tipo de tensão

As figuras 5.4 e 5.5 (página 83) permitem notar a variação da intensificação das tensões conforme varia o módulo de elasticidade do cilindro de compósito em ambos os ensaios e conforme varia a distância entre o ponto de carregamento e a interface adesiva nos ensaios de cisalhamento. No caso destes últimos ensaios, a intensificação da tensão máxima principal ocorre com o aumento do momento fletor ao aumentar esta distância<sup>18, 25, 31</sup>. O Efeito Saint-Venant é evidenciado ao observar, nestas figuras, que as tensões tanto de cisalhamento máximo quanto máxima principal se intensificam com menores distâncias de aplicação da carga em relação à interface (estas distâncias incluem as reproduzidas experimentalmente nos ensaios reais de Cis e miCis). O Efeito Saint-Venant mostra que exerce uma maior influência sobre o aumento da tensão máxima principal do que o aumento do momento fletor<sup>31</sup>. No caso do ensaio de torção, como não há o mesmo esforço de alavanca, não haveria intensificação das tensões de tração com aumento da distância entre o carregamento e a interface adesiva. A partir de uma distância mínima de aplicação da carga em relação à interface (mencionada no item 4.1.1.4.3 b) da página 61), não seria esperada a influência do Efeito Saint-Venant no ensaio de torção. É possível observar nas mesmas figuras que, pelos resultados dos picos de tensão obtidos pelo MEF referentes aos modelos de cisalhamento, ao reduzir a espessura relativa da camada de adesivo (isto é, nos modelos de tamanho convencional), há um aumento dos valores de picos de tensão. Já nos ensaios de torção, os valores dos picos de tensão encontrados para os dois tamanhos de espécime são muito próximos (ver também Tabela 5.5, página 89). Na etapa experimental, como mencionado, a influência da espessura relativa da camada de adesivo não foi isolada, já que as distâncias de carregamento não foram proporcionais entre os ensaios de miCis e Cis (além da própria dificuldade em padronizar a espessura do adesivo em todos os espécimes).

Os valores de tensão máxima calculados pelas equações analíticas para cada tipo de ensaio (Equações 2 e 3, página 60, para o cisalhamento e Equação 6, página 62, para a torção) e o valor de tensão nominal calculado para os ensaios de cisalhamento raramente se aproximaram dos valores de picos de tensão encontrados pelo MEF (Figuras 5.4 e 5.5, página 83). Esses cálculos não levam em conta os fatores concentradores de tensão. No cálculo da tensão de tração máxima pela equação analítica no ensaio de cisalhamento com fio, só é levado em conta o comprimento do braço de alavanca, de forma que os resultados de tração só

aumentam com o aumento da distância de carregamento, e o cálculo da tensão máxima de cisalhamento não depende desta distância. Esses achados indicam que os cálculos de tensão na etapa experimental (tanto nominal para Cis e miCis, quanto a máxima de cisalhamento para To e miTo) não representam os verdadeiros valores de tensão de ruptura do espécime. Seria esperado que, quanto maior fosse a concentração de tensões observada pelos resultados obtidos com o MEF, menores seriam os valores de tensão de ruptura obtidos na etapa experimental. Isto porque, em um mesmo espécime, quanto mais se concentra a tensão numa região, uma menor carga é necessária para chegar ao valor de ruptura num determinado ponto do material. Essa menor carga é dividida pela mesma área de seção transversal para calcular a tensão nominal, ou é usada para calcular a máxima tensão de cisalhamento de forma analítica.

Normalmente, na etapa experimental, o cálculo das tensões de ruptura em ensaios de cisalhamento é feito com base na tensão nominal de ruptura<sup>18, 25, 33, 52, 53</sup>. No caso da torção, como as tensões no centro são praticamente nulas, ou seja, essa região da interface praticamente não é solicitada, foi empregado o cálculo analítico da tensão máxima de cisalhamento, correspondente à faixa de tensões incidente no perímetro da interface. Existe uma dificuldade para o cálculo de resistência nominal na torção: neste caso, quando se aplica uma força em um espécime, produz-se um torque cujo valor depende da distância ao eixo de rotação, o que significa que uma mesma força aplicada produz solicitação diferente conforme muda esta distância. Isto faz com que, na torção, em vez da força, o torque ou momento torçor (unidade em N·mm) seja considerado como o carregamento mecânico que, se fosse dividido pela área de seção transversal do espécime (unidade em mm<sup>2</sup>), não resultaria em unidades de tensão (N/mm ≠ N/mm<sup>2</sup>). O ensaio de resistência à flexão em três pontos é um exemplo de ensaio em que o cálculo da tensão máxima também é feito de forma analítica para expressar a resistência à fratura dos espécimes, em vez da resistência média ou nominal. Neste ensaio, as tensões na linha da fratura não são uniformes. Sob este ponto de vista, também não faria sentido expressar a resistência no ensaio de cisalhamento com um valor nominal ou médio, já que também não são produzidas tensões uniformes (nem de tração, nem de cisalhamento). Porém, como a maioria das pesquisas que utilizam o ensaio de cisalhamento se vale da comparação das tensões nominais de ruptura, isto foi adotado para este ensaio também no presente trabalho. Assim, não parece razoável comparar diretamente os valores máximos obtidos por torção com os nominais ou médios calculados para o ensaio de cisalhamento. Este raciocínio também foi



adotado por estudos que não acharam viável comparar diretamente resultados de ensaios de remoção de bráquetes ortodônticos por torção com os de remoção por tração e cisalhamento<sup>68, 73</sup>.

A tabela 5.1 apresenta as médias dos valores experimentais de tensão de ruptura, desvios-padrão (ambos em MPa), coeficientes de variação (%) e frequências dos tipos de fratura de cada condição experimental (os resultados referentes a cada espécime incluído no trabalho estão exibidos no APÊNDICE A, na página 140).

Tabela 5.1 - Médias e desvios-padrão (MPa), coeficientes de variação (%) e frequências dos tipos de fratura de cada condição experimental

Ensaio	Material do cilindro	Adesivo	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)	Frequência dos tipos de fratura			
						Adesiva	Coesiva	Mista	Total
miTo	F	A	38,0	11,0	28,8	4	2	4	10
		M	39,5	8,3	21,0	2	6	2	10
		S	42,6	5,5	13,0	0	10	0	10
	H	A	34,1	10,8	31,7	7	3	0	10
		M	37,2	8,2	22,0	5	3	2	10
		S	41,2	3,5	8,5	0	10	0	10
To	F	A	18,6	9,7	51,9	7	1	2	10
		M	27,7	6,1	22,2	6	1	3	10
		S	38,4	5,5	14,3	0	10	0	10
	H	A	29,4	3,2	10,7	1	6	3	10
		M	30,6	4,5	14,8	0	4	6	10
		S	35,5	2,5	7,0	0	10	0	10
V	A	31,8	10,0	31,5	4	2	4	10	
	M	12,7	7,9	61,9	10	0	0	10	
	S	37,4	5,9	15,8	0	7	3	10	
miCis	F	A	13,1	5,5	41,9	9	1	0	10
		M	17,2	4,0	23,5	9	0	1	10
		S	23,2	2,9	12,5	8	0	2	10
	H	A	13,6	5,9	43,5	9	0	1	10
		M	16,4	4,4	26,8	10	0	0	10
		S	26,6	4,4	16,5	1	6	3	10
Cis	F	A	8,4	2,5	29,7	8	2	0	10
		M	11,8	2,3	19,3	10	0	0	10
		S	16,7	2,7	16,1	0	10	0	10
	H	A	7,8	3,6	45,9	8	1	1	10
		M	11,2	2,3	20,9	10	0	0	10
		S	17,9	3,3	18,3	0	9	1	10

Pela tabela, as faixas de valores médios de resistência à ruptura apresentadas por cada ensaio foram: Cis: de 7,8 a 17,9 MPa; miCis: 13,1 a 26,6 MPa; To: 12,7 a 38,4 MPa; miTo: 34,1 a 42,6 MPa.

As tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 (página 87) apresentam as análises de variância realizadas com os resultados experimentais de tensão de ruptura separadamente para cada sistema adesivo, cujos fatores principais foram o tipo de material do

cilindro (dois níveis: H e F) e o tipo de ensaio (quatro níveis: Cis, miCis, To e miTo).

Tabela 5.2 - Análise de variância da resistência adesiva para o adesivo All-Bond SE (A)

<b>Adesivo</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>Grau de liberdade (GL)</b>	<b>Quadrados médios</b>	<b>F</b>	<b><i>p</i> (probabilidade de hipótese nula - <math>H_0</math>)</b>
A	Cilindro (C)	1	58,63	1,11	0,30
	Ensaio (E)	3	3064,26	57,81	0,00
	Interação CxE	3	202,26	3,82	0,01
	Resíduo	72	53,01	-	-
	Total	79	-	-	-

Tabela 5.3 - Análise de variância da resistência adesiva para o adesivo Magic Bond (M)

<b>Adesivo</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>Grau de liberdade (GL)</b>	<b>Quadrados médios</b>	<b>F</b>	<b><i>p</i> (probabilidade de hipótese nula - <math>H_0</math>)</b>
M	Cilindro (C)	1	1,07	0,04	0,85
	Ensaio (E)	3	2931,12	97,50	0,00
	Interação CxE	3	24,42	0,81	0,51
	Resíduo	72	30,06	-	-
	Total	79	-	-	-

Tabela 5.4 - Análise de variância da resistência adesiva para o adesivo Scotchbond Multi-Purpose (S)

<b>Adesivo</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>Grau de liberdade (GL)</b>	<b>Quadrados médios</b>	<b>F</b>	<b><i>p</i> (probabilidade de hipótese nula - <math>H_0</math>)</b>
S	Cilindro (C)	1	0,15	0,01	0,92
	Ensaio (E)	3	2505,04	160,71	0,00
	Interação CxE	3	38,76	2,49	0,07
	Resíduo	72	15,59	-	-
	Total	79	-	-	-

As tabelas de análise de variância de cada sistema adesivo (Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4) mostram que, para todos eles, houve diferenças significantes entre os valores de tensão de ruptura para o fator principal “tipo de ensaio” ( $p < 0,05$ ), mas não para o fator “material do cilindro”. Apenas na tabela 5.2, com os resultados referentes ao adesivo A, houve interação significativa entre os dois fatores.

A figura 5.6 permite observar o efeito do fator principal “tipo de ensaio” para cada sistema adesivo. Nota-se que os ensaios de torção e microtorção apresentaram, em todos os casos, valores significativamente maiores que os ensaios de cisalhamento e microcisalhamento, porém, como já foi mencionado, não são diretamente comparáveis devido às diferenças nas formas de calculá-los.

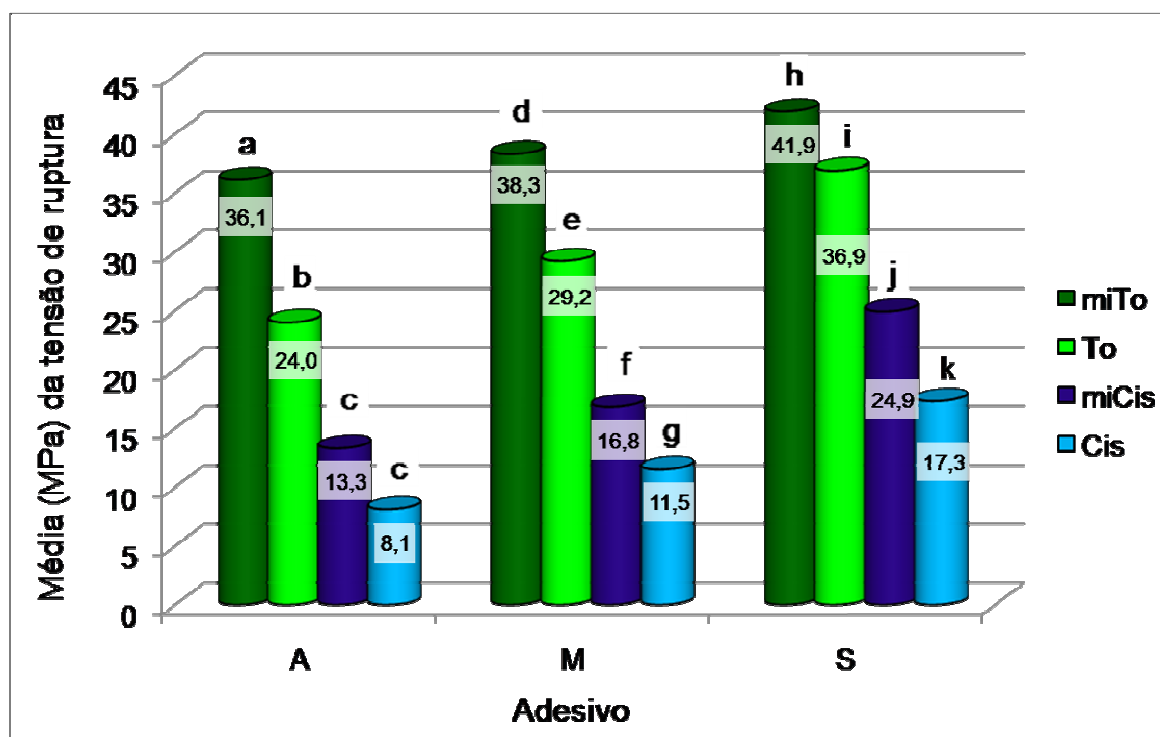


Figura 5.6 - Médias (MPa) de resistência à ruptura correspondentes ao fator principal tipo de ensaio das três análises de variância e letras para contrastes dentro de cada adesivo. Médias com mesmas letras são semelhantes ( $p > 0,05$ )

Na figura 5.6, observa-se que, exceto para o adesivo A, em que miCis foi semelhante ao Cis, os ensaios experimentais com espécimes do tamanho micro obtiveram valores de ruptura maiores que os de tamanho convencional correspondentes.

A tabela 5.5 mostra as razões entre os picos de tensão obtidos pelo MEF com modelos micro e de tamanho convencional correspondentes aos casos reproduzidos na etapa experimental.

Tabela 5.5 - Razões entre os picos de tensão obtidos pelo MEF de modelos de tamanho micro e convencional correspondentes. Os modelos de cisalhamento correspondem aos casos reproduzidos experimentalmente

Modelo (MEF)	Razão [pico de tensão do micro/pico de tensão do tamanho convencional]		
		Cisalhamento máximo	Máxima principal
miTo/To	F	1,04	1,04
	H	0,93	0,93
miCis (com fio de 0,1 mm de raio)/Cis (com fio de 0,25 mm de raio)	F	0,66	0,49
	H	0,7	0,7

Pelos dados da tabela 5.5, houve maior concentração de tensões nos modelos de Cis (distância de carregamento de 0,25 mm) do que no de miCis (carregamento a 0,1 mm da interface). Se for levado em consideração apenas o pico de tensão como critério de falha, nota-se que apenas os ensaios de cisalhamento apresentaram correspondência entre a maior concentração de tensões observada pelo MEF e a tensão de ruptura experimental mais baixa: o ensaio de Cis apresentou valores experimentais significativamente mais baixos do que o ensaio de miCis (Figura 5.6, na página 88), exceto para o adesivo A (o que pode ter mais a ver com a dispersão dos resultados deste adesivo). Para aplicação do mesmo raciocínio no caso da torção, seria esperado que não houvesse tanta diferença entre os valores experimentais de ruptura de miTo e To (pois os picos encontrados pelo MEF são quase iguais: ver razão próxima de 1 na Tabela 5.5). Porém, o ensaio de microtorção apresentou valores significativamente maiores que os de To para todos os adesivos (Figura 5.6). Esta discrepância poderia ser explicada como uma confirmação do efeito da diferença de probabilidade de existirem defeitos críticos entre tamanhos diferentes espécime, ou ainda porque, talvez, o critério de falha do material não seja o de máxima tensão incidente. Os modelos de elementos finitos foram simulados no regime linear-elástico mas, na etapa experimental, os materiais são levados até a ruptura, o que envolve processos provavelmente não previstos pelo MEF empregado neste trabalho, como a propagação de danos e deformação

plástica (do tamanho convencional para o micro muda, por exemplo, a espessura relativa da camada de adesivo, que pode ser mais ou menos deformável). Outros parâmetros, como as deformações máximas ou uma composição de tensões tal como a de Von Mises modificada, poderiam, eventualmente, ser mais coerentes para a predição da fratura no ensaio experimental através da análise pelo MEF. Um estudo<sup>67</sup>, por exemplo, justificou que, por não ser claro o mecanismo de falha na interface adesivo/dentina, analisou a distribuição de tensões de Von Mises, além da máxima principal.

A influência do E do cilindro de compósito sobre a magnitude dos picos de tensão obtidos pelo MEF pode ser observada nas figuras 5.4 e 5.5 (página 83). Para facilitar as comparações, a tabela 5.6 apresenta as razões entre os picos de cada uma das tensões obtidos com cilindros F e H para os modelos correspondentes às configurações ensaiadas experimentalmente (cisalhamentos reais e torção).

Tabela 5.6 - Razões entre os picos de tensão obtidos pelos modelos de análise pelo MEF com cilindro de compósito fluido e híbrido correspondentes. Os casos de cisalhamento correspondem aos reproduzidos experimentalmente

Modelo (MEF)	Razão [pico de tensão com cilindro F/pico de tensão com cilindro H]	
	Cisalhamento máximo	Máxima principal
miTo	0,64	0,65
To	0,57	0,58
miCis (com fio de 0,1 mm de raio)	0,98	0,79
Cis (com fio de 0,25 mm de raio)	1,04	1,12

As razões entre os picos de tensão obtidos pelo MEF com cilindros F e H levariam a esperar que, na etapa experimental, o cilindro H dos ensaios de To e miTo apresentassem menores tensões de ruptura do que o F, já que o primeiro concentrou mais tensões. Caso o critério de falha seja a concentração de tensões de tração, o mesmo poderia ser esperado para o ensaio de miCis (com razão igual a 0,79). Já no caso do Cis, embora os picos tenham sido maiores com o cilindro F, as razões chegaram próximo a 1 para ambos os tipos de tensão, o que levaria a esperar que os valores experimentais de ruptura fossem estatisticamente semelhantes para ambos os materiais de cilindro.

As letras de contrastes de médias de tensão de ruptura experimentais da figura 5.7 permitem observar a influência não significativa do fator principal “material do cilindro” das análises de variância de cada um dos adesivos (ver as análises de variância de cada adesivo nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4, página 87). As semelhanças estatísticas dos valores experimentais correspondentes aos diferentes materiais de cilindro para cada adesivo podem ser observadas, também, na figura 5.8, na página 93 (gráfico da interação adesivo x ensaio x cilindro).

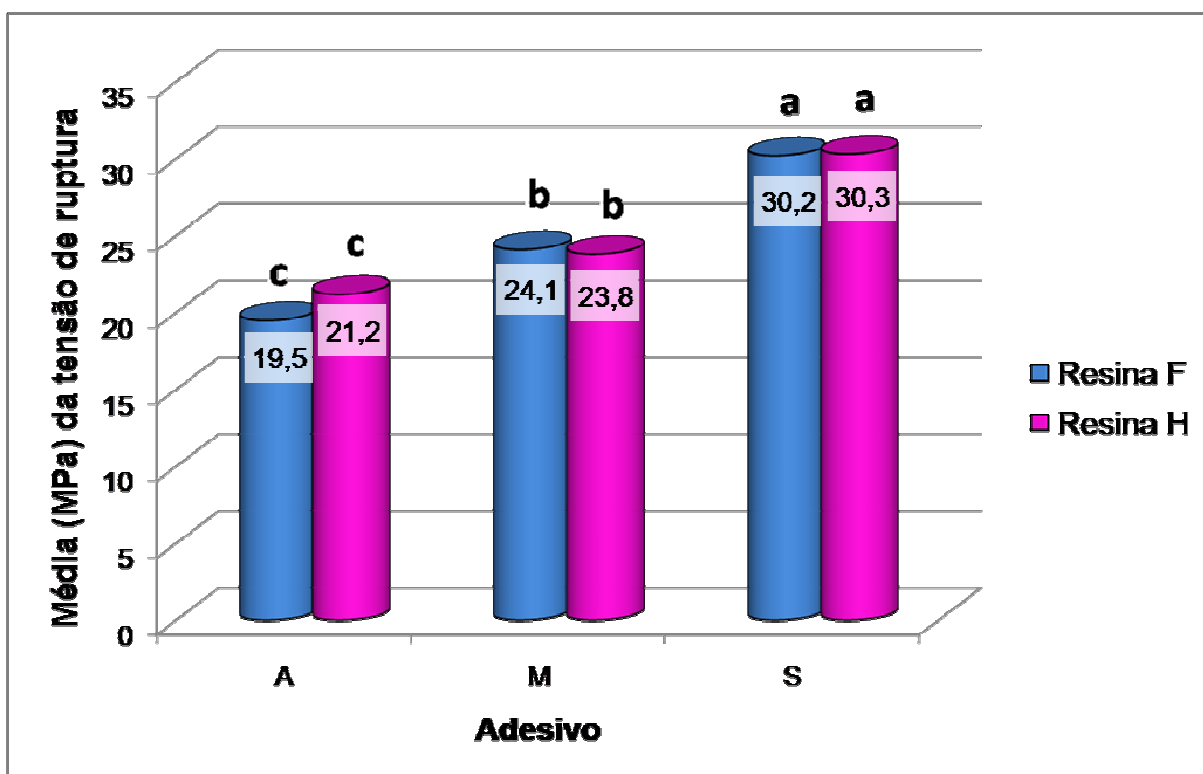


Figura 5.7 - Médias (MPa) de resistência à ruptura correspondentes ao fator principal cilindro (de compósito híbrido ou de baixa viscosidade) das três análises de variância (feitas para cada adesivo) e letras para contrastes dentro de cada adesivo. Médias com mesmas letras são semelhantes ( $p > 0,05$ )

A previsão feita pelos resultados obtidos pelo MEF (Tabela 5.6, página 90) sobre a influência da rigidez do cilindro de compósito foi confirmada experimentalmente apenas para o caso do ensaio de Cis, em que se observou tanto semelhança nos valores de picos de tensão pelo MEF quanto dos valores de tensão de ruptura experimentais com os cilindros F e H (letras de contraste para médias experimentais exibidos nas Figuras 5.7 e 5.8, esta última na página 93). Quanto aos outros ensaios, em que seriam esperadas diferenças de valores experimentais entre

os dois tipos de cilindro ( $F > H$ , pois os modelos simulados pelo MEF apresentaram picos de tensão  $H > F$ ), elas não foram detectadas, exceto em alguns casos do ensaio de  $T_0$  (ver interação ensaio x cilindro para o adesivo A na Figura 5.8, página 93, e letras de contrastes de médias para o ensaio de  $T_0$  incluindo cilindro de vidro, na Figura 5.9, página 95).

Os achados por este trabalho sobre a influência da rigidez do cilindro de compósito não concordam com os resultados de um estudo anterior<sup>31</sup>, que simulou ensaio de cisalhamento com fio pelo MEF com modelos 2D e encontrou maior concentração de tensões com compósitos de menor módulo de elasticidade em todos os casos (e, para os casos reais de cisalhamento com fio, encontrou maiores picos de tensão com o modelo de miCis com cilindro F). Também não concordam com os achados de trabalhos de revisão de literatura<sup>12, 22</sup>, que encontraram, nos artigos revisados, maiores valores de tensão de ruptura experimental com os compósitos de maior E. Um deles<sup>12</sup> encontrou uma correlação positiva significativa entre os valores de tensão de ruptura e o módulo de elasticidade do compósito resinoso pelos resultados dos trabalhos revisados.

O gráfico da figura 5.8 apresenta as médias (MPa) de resistência à ruptura correspondentes à interação tripla ensaio x cilindro x adesivo, sem incluir o cilindro de vidro do ensaio de  $T_0$ . Neste gráfico, os contrastes entre as médias dos adesivos de um mesmo ensaio (isto é, vindo de análises de variância separadas) foram feitos com as variâncias comuns de cada 2 adesivos.

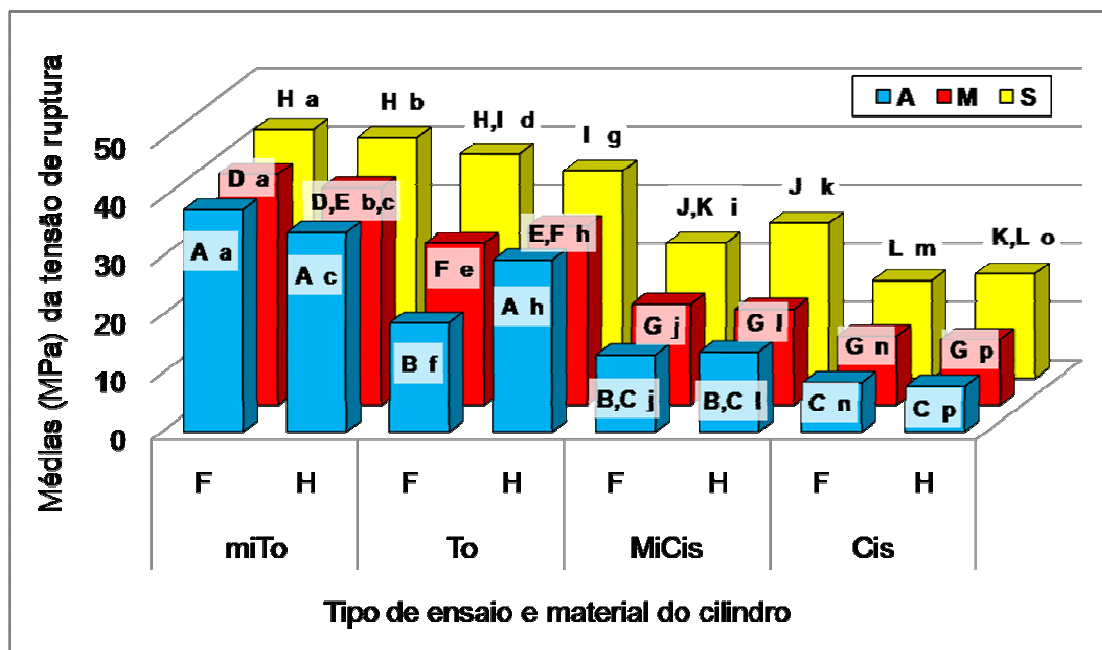


Figura 5.8 - Médias (MPa) de resistência à ruptura correspondentes às interações ensaio x cilindro x adesivo (não incluiu cilindro de vidro) e letras de contraste de médias. As letras maiúsculas permitem comparar as barras no plano do papel e dentro de cada um dos paralelos a ele (compara ensaios e cilindros dentro de um mesmo adesivo, ou entre colunas da mesma cor), e as minúsculas, entre as barras situadas num mesmo plano perpendicular ao papel (compara os três adesivos dentro de um ensaio com um mesmo cilindro). Letras iguais indicam semelhança de médias ( $p > 0,05$ )

Como visto na tabela de análise de variância do adesivo A (Tabela 5.2, página 87), houve interação significativa entre os fatores principais cilindro e tipo de ensaio. Esta interação pode ser observada no gráfico da figura 5.8, que demonstra que o cilindro de compósito de baixa viscosidade (F) do ensaio de To obteve valores significativamente menores que os obtidos com cilindro H no mesmo ensaio. Este achado experimental também não corresponde ao que seria esperado pelos resultados obtidos com o MEF pois, nos ensaios de torção, houve maior concentração de tensões com o cilindro H (ver Tabela 5.6, página 90).

A análise de variância para o ensaio de torção com inclusão do cilindro de vidro (Tabela 5.7) mostra uma interação significativa entre o adesivo e tipo de cilindro.



Tabela 5.7 - Análise de variância da resistência adesiva para o ensaio de torção, com inclusão do cilindro de vidro

-	Fonte de variação	Grau de liberdade (GL)	Quadrados médios	F	$p$ (probabilidade de hipótese nula - $H_0$ )
	Adesivo (A)	2	1495,69	34,10	0,00
Ensaio de torção incluindo vidro	Tipo de cilindro (C)	2	172,44	3,93	0,02
	Interação AxC	4	634,17	14,46	0,00
	Resíduo	81	43,86	-	-
	Total	89	-	-	-

O gráfico da figura 5.9 mostra as médias da interação apontada como significativa pela análise de variância e permite o contraste das médias das 9 condições experimentais do ensaio de To (Tabela 5.7). Um dos casos responsáveis pela significância da interação é o mesmo observado no gráfico da figura 5.8 (página 93), pois a média do cilindro de compósito F foi menor que do compósito H no caso do adesivo A, ao contrário de terem sido semelhantes nos outros dois adesivos. Além disso, o gráfico da figura 5.9 mostra que o valor do cilindro F com adesivo A também foi inferior ao encontrado com o cilindro de vidro com o mesmo adesivo. O adesivo M com cilindro de vidro apresentou valor significativamente menor que o obtido pelos cilindros de compósito F e H com o mesmo adesivo. Outros motivos da significância da interação do tipo de cilindro com o adesivo na To são as variações de tendência de classificação relativa entre os adesivos conforme muda o tipo de material do cilindro (bem evidente, por exemplo, no caso do adesivo M com cilindro de vidro, que apresentou valores muito inferiores aos dos adesivos S e A, diferente do que ocorreu nos casos dos cilindros F e H).

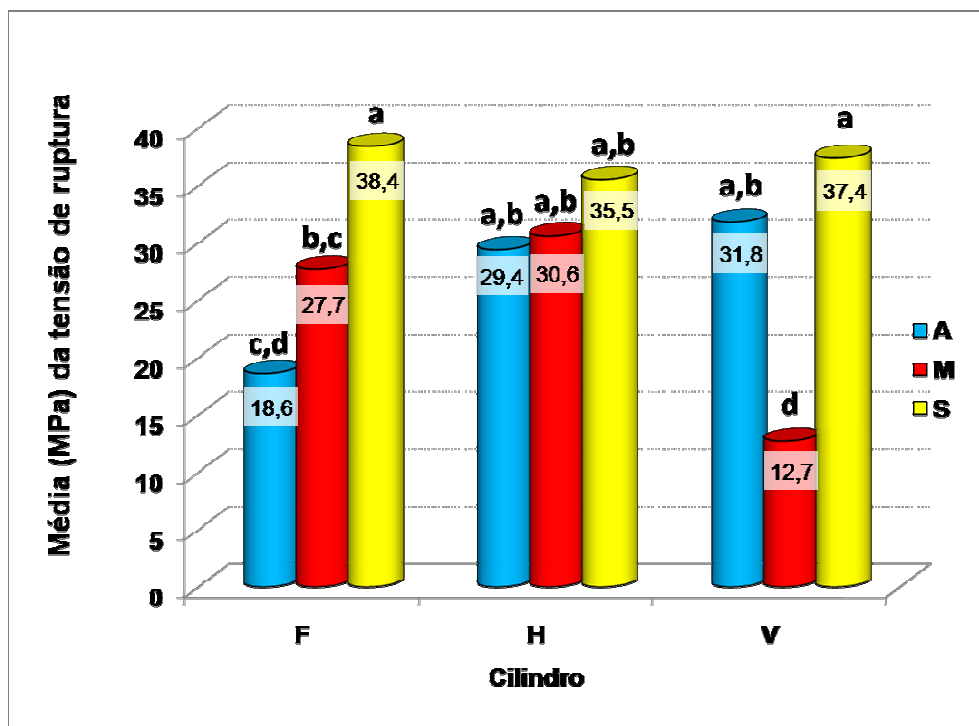


Figura 5.9 - Médias (MPa) de tensão de ruptura para as 9 condições experimentais (3 adesivos x 3 tipos de cilindro) do ensaio de torção (To) (com inclusão do cilindro de vidro) e letras para contraste. Médias com mesmas letras são semelhantes ( $p > 0,05$ )

Exceto pela alteração de tendência de classificação relativa dos adesivos com o cilindro de vidro observada na figura 5.9, o gráfico da figura 5.8 (página 93) mostra uma tendência de manter constante a classificação relativa deles em quase todos os ensaios, conforme a resistência à ruptura obtida:  $A \leq M < S$ . Os adesivos M e S requerem uma etapa de condicionamento ácido prévio, com remoção da camada de esfregaço, exposição das fibrilas colágenas e abertura dos túbulos dentinários. O adesivo S recebe uma camada de *primer*, que é mais hidrofílica e, em seguida, recebe aplicação da camada mais hidrofóbica de adesivo. O adesivo M recebe, após aplicação do ácido fosfórico, a aplicação de uma camada de *primer* misturado com adesivo. Esta solução de *primer* mais adesivo do sistema M pode ser menos concentrada de monômeros que a camada pura de adesivo aplicada no caso S, já que o *primer* contém os monômeros dissolvidos em um solvente orgânico. Com o condicionamento ácido prévio dos sistemas S e M, o embricamento mecânico entre os polímeros resinosos e o substrato dentário é maior do que o obtido por um adesivo auto-condicionante do tipo “*mild*”. Apesar de este último sistema conseguir promover ligações com o cálcio da hidroxiapatita residual entre as fibrilas colágenas e, também, não promover uma desmineralização além da profundidade em que os

monômeros do adesivo possam penetrar, ele não remove totalmente a camada de esfregaço (pois não há um processo de lavagem após o condicionamento) e a camada de *primer*-ácido mais adesivo pode ter monômeros de adesivo ainda mais diluídos que no caso M. Não se sabe, ainda, sobre a quantidade de solvente dos sistemas auto-condicionantes que permanece na dentina por dificuldade de evaporação<sup>8</sup>, que pode enfraquecer a interface e afetar a polimerização dos monômeros infiltrados<sup>9</sup>. Pode-se supor, também, que os resíduos da camada de esfregaço e da dentina desmineralizada podem se comportar como corpos estranhos, que reduziram as propriedades mecânicas da interface adesiva por reduzirem a concentração de polímero, que atuaria como aglutinante. A mistura das gotas de cada um dos frascos do adesivo A (partes I e II) num casulo, antes da aplicação sobre a dentina, provavelmente inclui mais bolhas que nos outros dois sistemas. Um estudo<sup>8</sup> ainda cita a formação de bolhas na camada híbrida durante a evaporação do solvente do sistema auto-condicionante, resultante de separações de fases ao alterar a razão monômero/água.

Entre os fatores que interferem na detecção de diferenças significantes entre os sistemas adesivos, estão a sensibilidade da célula de carga às variações de carregamento (dependente das características da própria célula, portanto) e a variabilidade dos resultados experimentais. Quanto maior a dispersão dos resultados apresentada por uma amostra, menor a capacidade de identificar com segurança se as amostras pertencem a populações diferentes, já que a diferença entre suas médias pode ser mero fruto do acaso. É importante que um ensaio seja capaz de detectar diferenças significantes quando elas realmente existem. Isto leva ao raciocínio de que, embora haja condições naturalmente variáveis, como a adesão ao substrato dentinário e incorporação de bolhas e corpos estranhos durante a aplicação de um adesivo, a esta variabilidade não se deve acrescentar uma adicional devido às configurações do ensaio.

Apesar de ter sido mantida constante a tendência classificação relativa dos adesivos na maioria dos ensaios, cada um variou ao detectar diferenças significantes ou não. A única condição experimental que mostrou diferenças significantes entre os três adesivos foi no caso da torção ( $T_0$ ) com o cilindro de compósito de baixa viscosidade (F) (Figura 5.8, página 93). No caso do ensaio  $miT_0$  com compósito F, não foi detectada nenhuma diferença entre os três adesivos. Na maioria dos outros casos, apenas o adesivo S foi detectado como significantemente

mais resistente, e foram verificadas semelhanças estatísticas entre os valores obtidos com os adesivos A e M.

A figura 5.10 apresenta os coeficientes de variação de cada condição experimental. Os coeficientes de variação seriam mantidos independentemente de como seriam calculadas as tensões de ruptura dos ensaios (pela máxima tensão ou pela tensão nominal).

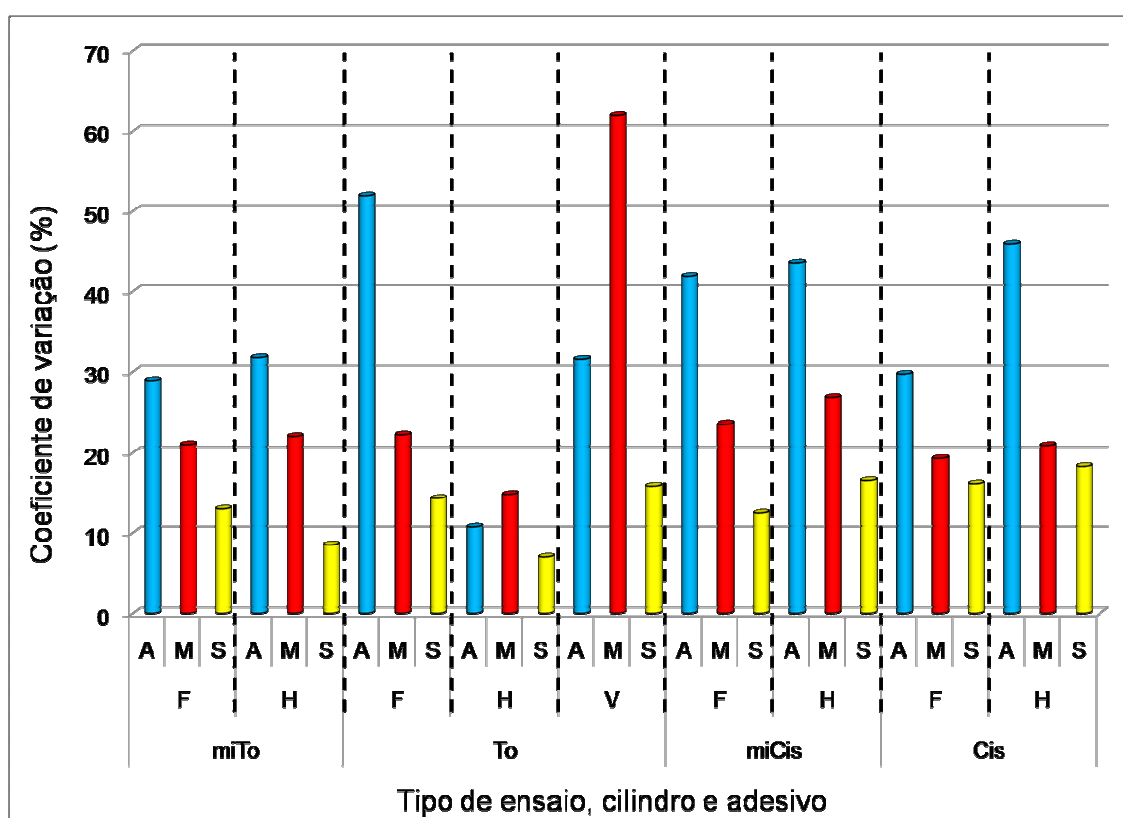


Figura 5.10 - Coeficientes de variação (%) de cada condição experimental (segundo o tipo de ensaio, material do cilindro e sistema adesivo)

O maior coeficiente de variação encontrado neste trabalho foi para o adesivo M com cilindro de vidro (V) no ensaio de To, com valor igual a 61,9%. Em geral, o adesivo A apresentou os maiores coeficientes de variação, que oscilaram de 10,7% (caso de To com cilindro H) a 51,9% (caso de To com cilindro F), com maior concentração na faixa acima de 28,8%. Exceto para o caso do adesivo M citado, este adesivo e o adesivo S apresentaram coeficientes sempre abaixo de 30% em todos os ensaios. Os coeficientes de variação do adesivo M se situaram na faixa de 14,8% (caso To com cilindro H) a 26,8% (caso miCis com cilindro H), e o S, na faixa

de 7% (caso To com cilindro H) a 18,3% (Cis com cilindro H). Os coeficientes de variação deste estudo estão, em sua maioria, dentro do encontrado na literatura: um trabalho de revisão<sup>22</sup> cita que a ISO/TS 11405 preconiza uma faixa de coeficientes de variação com valores de até 20-50%, e outra revisão<sup>23</sup> encontrou coeficientes de variação nesta mesma faixa nos trabalhos de tração, microtração, cisalhamento e microcisalhamento.

Os resultados observados pelo MEF poderiam indicar uma provável menor dispersão dos resultados nos ensaios experimentais de torção, já que, segundo a análise de tensões, a torção se mostrou menos sensível à variação da espessura relativa da camada de adesivo (semelhança entre os picos de tensão nos modelos de miTo e To; ver Tabela 5.5, página 89) e com uma padronização menos crítica da distância de carregamento (já que não há esforço de alavanca da mesma forma que no cisalhamento com fio). Porém, os resultados experimentais não mostraram um padrão de aumento ou diminuição do coeficiente de variação de um mesmo adesivo conforme mudou o tipo de ensaio (de torção para cisalhamento com fio, ou mesmo de tamanho micro para convencional). Nota-se um padrão de aumento ligeiro da variabilidade conforme o tipo de cilindro apenas nos ensaios de Cis e miCis (em que a dispersão de um mesmo adesivo é maior para o compósito H). Apenas o caso de ensaio de To com cilindro H correspondeu às expectativas trazidas pela análise pelo MEF sobre menores dispersões de resultados da torção: este foi o caso com menores coeficientes de variação experimentais para todos os adesivos (Figura 5.10, página 97).

Provavelmente, o adesivo auto-condicionante (A) apresentou os maiores coeficientes de variação devido à inclusão de bolhas, bem como à incorporação de corpos estranhos (provenientes da camada de esfregaço e da dentina desmineralizada), como já mencionado, durante a realização do procedimento adesivo. Ao contrário do adesivo A, o adesivo S apresentou a menor variabilidade em todos os ensaios. Estes achados concordam com um estudo<sup>23</sup> que notou que a dispersão dos resultados é mais dependente do tipo de material utilizado para a adesão do que do tipo de ensaio e, no caso do presente estudo, o mesmo valeu com relação às variações das configurações dos ensaios.

A detecção de diferenças significantes não se relacionou à menor dispersão dos resultados dos adesivos dentro da combinação tipo de ensaio x tipo de cilindro: o caso da To com cilindro H, que foi o que apresentou menor dispersão de

resultados para todos os adesivos (ver as dispersões na Figura 5.10, página 97) não conseguiu detectar diferenças significantes entre os adesivos A e M (letras de contrastes na Figura 5.8, página 93). O gráfico da figura 5.11 mostra que não há correlação significativa entre a média dos coeficientes de variação dos adesivos e o número de diferenças significantes entre os mesmos detectadas em cada combinação tipo de ensaio x tipo de cilindro.

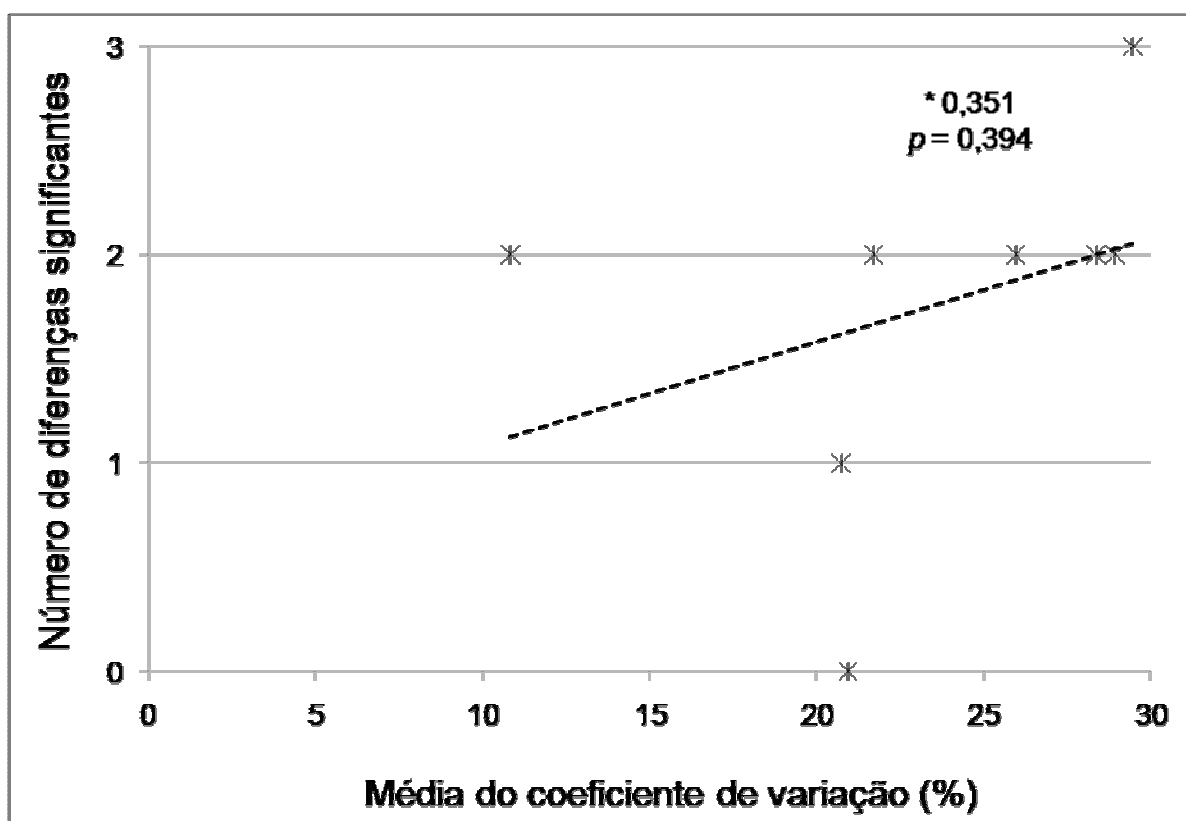


Figura 5.11 - Gráfico de dispersão do número de diferenças significantes entre os adesivos em função das médias dos coeficientes de variação dos mesmos em cada combinação ensaio x cilindro. No gráfico, são exibidos o coeficiente de correlação de Pearson (\*) e o valor de  $p$ . A reta é ilustrativa

As diferenças significantes das variâncias obtidas com o adesivo A em relação com os outros sistemas na maioria dos ensaios impediram que os resultados fossem todos comparados por apenas uma análise de variância com 3 fatores (interação tipo de ensaio x tipo de cilindro x adesivo). Como já mencionado, por este motivo, a comparação do desempenho dos adesivos dentro de um mesmo ensaio foi feita através da comparação entre as médias “duas a duas” (Figura 5.8, página 93). Ao observar o gráfico de contrastes de médias do teste de Tukey realizado com

todas as médias do ensaio de To (incluindo todos os adesivos e o cilindro de vidro) na figura 5.9 da página 95, nota-se que os contrastes entre os 3 adesivos dentro de cada um dos cilindros F e H são diferentes dos contrastes exibidos no gráfico da figura 5.8 (página 93) para as mesmas condições experimentais. Isto traz uma impressão de que, na comparação feita duas a duas (Figura 5.8), houve maior sensibilidade para detectar diferenças. Isto ocorre porque, quando se realiza uma análise de variância comparando todas as médias de uma vez, como foi feito para a interação da figura 5.9 (tipo de cilindro x adesivo para ensaio de To), o critério de diferenciação é mais rigoroso, com valores para contrastes maiores do que os usados para comparar apenas duas médias. É possível que se detectem diferenças entre duas médias quando elas são comparadas apenas entre si e, quando se comparam todas as médias ao mesmo tempo, essas diferenças não sejam detectadas. No caso do gráfico com as comparações duas a duas (Figura 5.8, página 93), os adesivos não poderiam ser comparados de outra forma que não fosse a cada duas médias dentro de um mesmo ensaio. Provavelmente, caso fosse possível comparar todas de uma vez numa mesma análise de variância, seria detectado ainda um número menor de diferenças significantes entre os adesivos de um mesmo ensaio do que o que foi apresentado na figura 5.8.

A tabela 5.8 faz uma comparação dos resultados de tensão obtidos pelo método dos elementos finitos (inclui apenas os casos de cisalhamento com fio que simulam as distâncias de carregamento reais) com os obtidos pela etapa experimental. Se o critério de ruptura for o pico de tensão, espera-se que os maiores picos coincidam com as menores tensões de ruptura. Nesta tabela, é possível verificar que apenas dois casos apresentaram correspondência entre as comparações de picos de tensão obtidas pelo MEF e os valores de tensão de ruptura experimentais: o caso da maior concentração de tensões nos modelos de Cis em relação aos de miCis obtido pelo MEF foi confirmado pelos resultados experimentais na forma de tensão de ruptura estatisticamente mais baixa para o primeiro ensaio, ainda assim, com exceção do caso do adesivo A (em que são semelhantes); e o caso da semelhança de picos de tensão dos cilindros F e H do ensaio de Cis, que foi confirmado experimentalmente por não haver diferença estatística dos valores de tensão de ruptura experimentais.

Tabela 5.8 - Comparação das influências das configurações dos ensaios sobre os resultados de picos de tensão obtidos pelo MEF e de tensões de ruptura experimentais

Variáveis		Pico de tensão obtido pelo MEF		Tensão de ruptura (ensaios experimentais)
Módulo de elasticidade do compósito	Cisalhamento	miCis	$H > F$	$H \approx F$
		Cis	$H \approx F$	$H \approx F$
	Torção	miTo	$H > F$	$H \approx F$
		To	$H > F$	$H \approx F$ (exceto no caso do adesivo A, em que $H > F$ )
Tamanho do espécime	Cisalhamento	$Cis > miCis$		$Cis < miCis$ (exceção para o caso do adesivo A, em que são semelhantes)
	Torção	$To \approx miTo$		$To < miTo$

A simulação dos ensaios de torção e cisalhamento pelo MEF permitiu analisar padrões de distribuição de tensões de forma geral (quanto à não-uniformidade e ao estado complexo de tensões), porém, os resultados desta etapa foram limitados para prever o desempenho experimental dos ensaios. A interpretação dos resultados obtidos com o MEF deve ser feita de forma cautelosa, especialmente no caso de não serem simuladas condições reais que influenciam na mecânica do ensaio, tais como a existência aleatória de defeitos, variabilidades do substrato de colagem, diferentes resistências de união na interface adesiva, regimes de deformação e critério de falha de diferentes materiais.

#### 5.4 ANÁLISE DAS FRATURAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E SUAS RELAÇÕES COM A ANÁLISE PELO MEF E COM VALORES DE TENSÃO EXPERIMENTAIS

A seguir, são apresentados exemplos de imagens de cada tipo de classificação geral de fratura (adesiva, coesiva e mista) para ambos os ensaios. As figuras 5.12 (página 102) e 5.13 (página 103) são de imagens obtidas após o ensaio de miTo, e a figura 5.14, na página 104, após o de miCis.



Tabela 5.9 - Legenda geral das estruturas observadas nas imagens das superfícies de fratura

Estrutura	Legenda
Excesso de adesivo sobre a dentina (além da área de interface)	1
Dentina exposta (túbulos dentinários em seção transversal)	2
Cilindro de compósito (fraturado coesivamente)	3
Fratura coesiva em adesivo	4
Fratura coesiva em dentina	5
Fita de carbono (suporte)	6
Adesivo aderido ao cilindro descolado	7

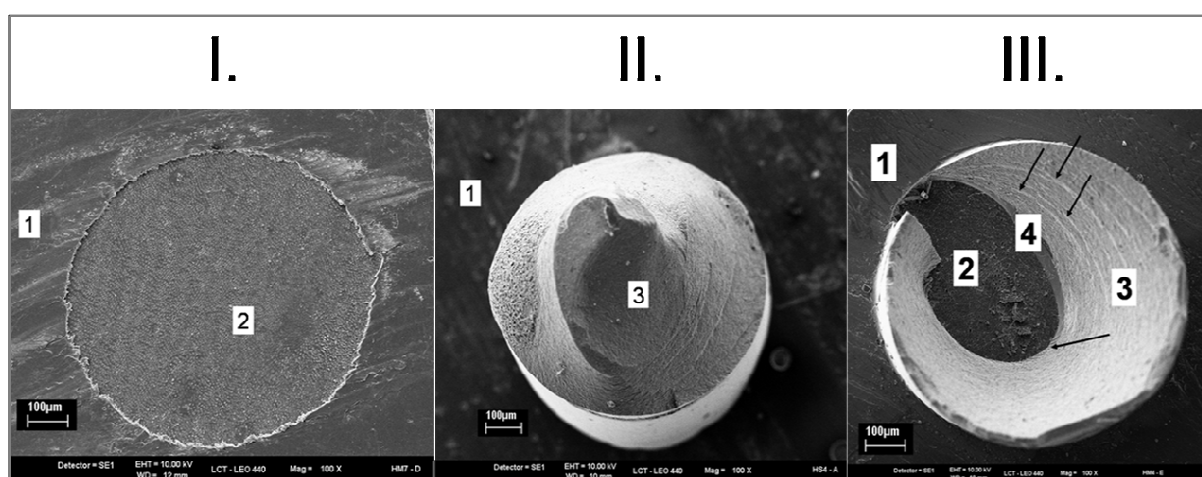


Figura 5.12 – Vista de topo de fraturas obtidas pelo ensaio de microtorção. I. Fratura adesiva (interface adesivo/dentina). Em 1, podem-se ver as impressões estriadas do tubo Tygon (que serviu como matriz para o cilindro de compósito) deixadas sobre o adesivo em torno da área onde estava colado o cilindro de compósito; II. Fratura coesiva (no cilindro de compósito). Observar a direção oblíqua da superfície da fratura coesiva que, neste caso, deixou a superfície com formato de cone; III. Fratura mista (envolve a interface dentina/adesivo e fratura coesiva no cilindro de compósito). A região do compósito com perda de foco é mais alta. Setas pretas: linhas de fratura no compósito e adesivo. Legenda geral na tabela 5.9.

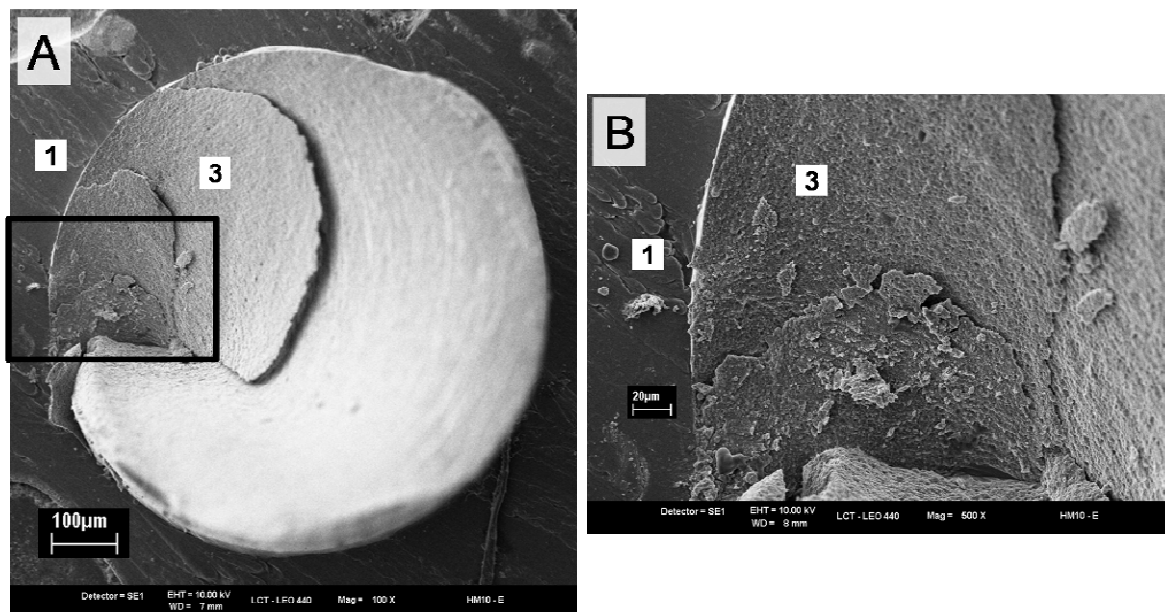


Figura 5.13 - A) Vista de topo da fratura coesiva no cilindro de compósito de um espécime de microtorção. Em 3, observa-se o aspecto lamelado da superfície de fratura coesiva no compósito; B) Aumento da região do quadro na figura A, numa região mais próxima da interface (a região sem foco na figura A é mais alta). Notar que o compósito apresenta um aspecto poroso e que, mesmo na região mais profunda desta fratura, não foi exposta a dentina nem o adesivo da interface. Legenda geral na tabela 5.9, página 102

No caso dos ensaios de torção e microtorção, a direção da propagação da fratura pelo cilindro, tanto de compósito quanto de vidro, foi oblíqua, como mostram as imagens de fraturas coesivas e mistas. Os casos de fraturas coesivas em dentina foram raros para estes ensaios, ao contrário dos ensaios de cisalhamento, em que a fratura coesiva oblíqua ocorreu principalmente em direção ao substrato dentinário.

No caso da fratura mista no ensaio de miTo da figura 5.12 (parte III), a região de dentina exposta inclui também uma porção do perímetro da interface adesiva, onde a concentração de tensões é mais alta (segundo os resultados obtidos pelo MEF exibidos na Figura 5.3, letras B e D, página 81). Mesmo com linhas de fratura no compósito e adesivo (setas pretas), este é um caso que deixa dúvidas sobre a verdadeira origem da fratura: se é na interface adesiva, no adesivo ou no compósito.

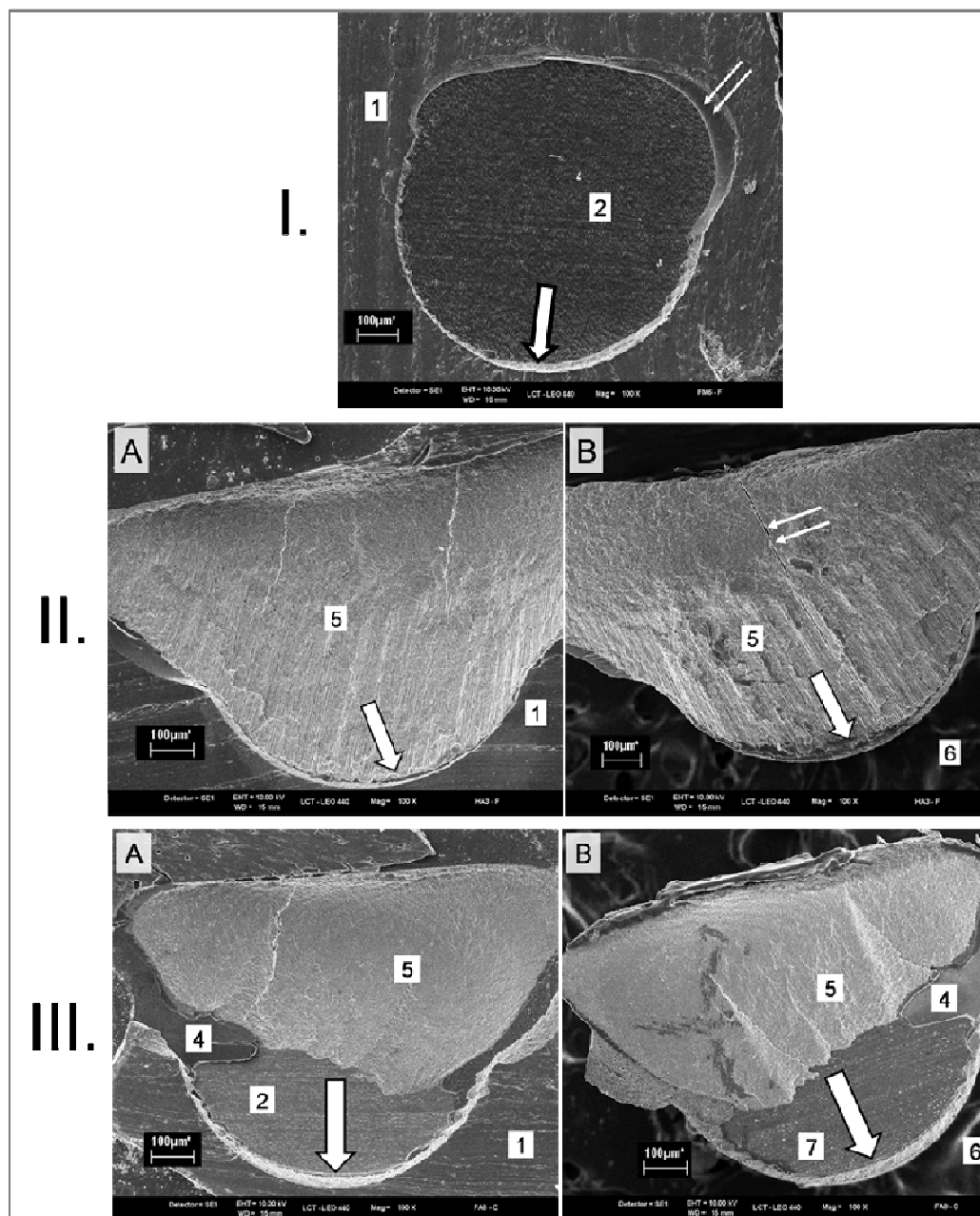


Figura 5.14 - Vista de topo de fraturas obtidas pelo ensaio de microcisalhamento. I. Fratura adesiva (interface adesivo/dentina). Seta branca grossa: lado do carregamento; Setas brancas duplas: superfície de fratura da camada de adesivo no perímetro da interface adesiva, na região oposta à do carregamento; II. Fratura coesiva (em dentina). Setas brancas grossas: lado do carregamento. II. A) Imagem do dente, com uma inclinação oblíqua da superfície de fratura na dentina (com corte longitudinal dos túbulos dentinários); II. B) Imagem do cilindro de compósito solto, com parte da dentina que continuou aderida a ele. Setas brancas duplas: trinca na dentina; III. Fratura mista (envolve a interface adesivo/dentina e fratura coesiva em dentina). Setas brancas grossas: lado do carregamento. A) Imagem do dente; B) Imagem do cilindro de compósito solto. Legenda geral na tabela 5.9, página 102

Algumas imagens de fraturas coesivas e/ou mistas dos ensaios de cisalhamento exibiram trincas na superfície da dentina, que são artefatos resultantes

do armazenamento a seco dos espécimes e do vácuo realizado para a observação no microscópio de varredura.

As imagens das fraturas coesivas e mistas dos ensaios de cisalhamento deste trabalho correspondem com imagens publicadas na literatura de fraturas obtidas com ensaios semelhantes<sup>14, 24</sup>, embora, nem sempre as mistas existam como classificação em todos os artigos da mesma forma que o presente trabalho (em que, sempre que houve mistura de fratura adesiva e coesiva, sem importar a porcentagem da área de ambas, a fratura foi classificada como mista).

O gráfico da figura 5.15 apresenta a variação da razão entre as tensões máxima principal/cisalhamento máximo ao longo de uma linha mediana da interface adesivo/dentina para os ensaios To e Cis (cilindro de compósito de baixa viscosidade) simulados pelo MEF.

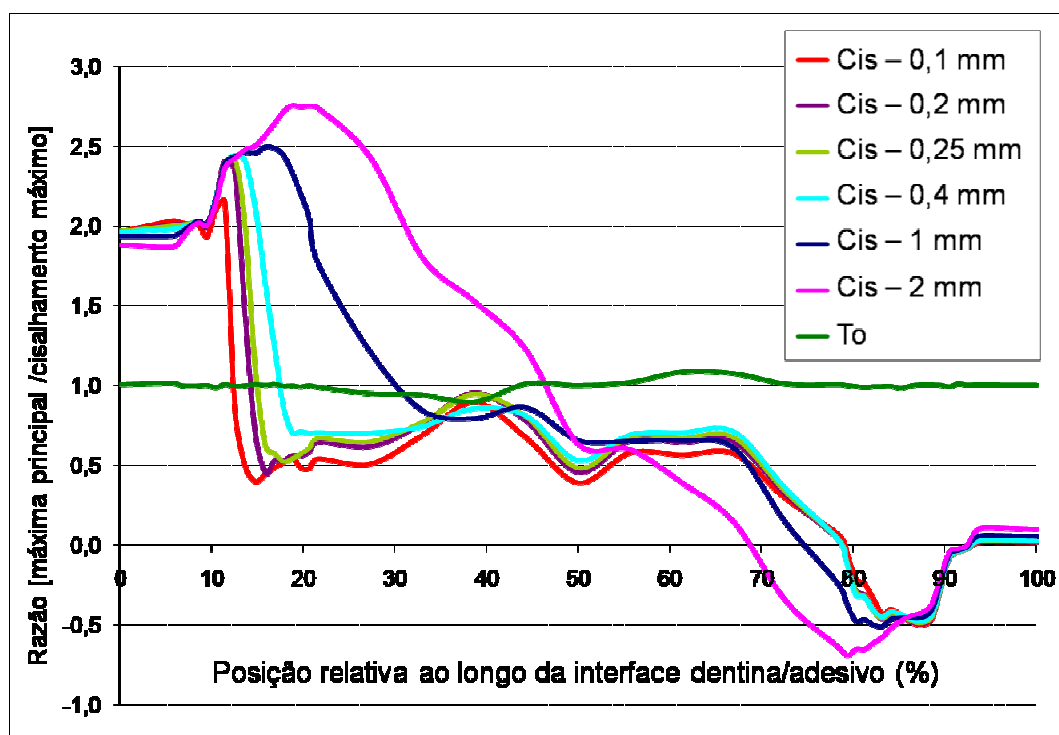


Figura 5.15 - Variação da razão [máxima principal/cisalhamento máximo] ao longo de uma linha mediana na interface dentina/adesivo de modelos de cisalhamento (Cis) e torção (To) com cilindro de compósito de baixa viscosidade. A legenda do gráfico se refere ao tipo de ensaio empregado e, nos casos do ensaio de cisalhamento, explicita a distância entre a carga e a interface (em mm)

Este gráfico permite notar a predominância da tração na região dos picos de tensão nos ensaios de carregamento com fio. Neste ensaio, observa-se que a

tensão de cisalhamento supera a máxima principal (onde se vê razão  $< 1$ ) apenas em áreas com menores concentrações de tensão. Nos locais de maior concentração de tensões (nos pontos iniciais da linha na interface), a tensão máxima principal chega a ter valores de 2 a quase 3 vezes maiores que as de cisalhamento máximo, dependendo da distância do carregamento com fio. Vários estudos<sup>18, 25, 31</sup> constataram também a predominância das tensões de tração sobre as de cisalhamento nessa região da interface. Caso o critério de falha fosse a tensão predominante, seria suposto que o ensaio de cisalhamento leva o espécime à ruptura por tensão de tração. No ensaio de torção, os valores da máxima principal são muito próximos aos do cisalhamento máximo, numa proporção próxima de 1:1 ao longo de toda a interface, ou seja, sem uma clara predominância de uma delas. Este fato sugere que, no ensaio de torção, o espécime tende a se fraturar sob a tensão à qual resiste menos. Porém, não há dados na literatura que forneçam o valor de resistência máxima ao cisalhamento puro ou à tração pura das interfaces e materiais utilizados no estudo para que se possa prever qual das tensões levará o espécime à ruptura. Como já mencionado, é difícil produzir um ensaio que permita medir a resistência à ruptura verdadeira e sob um tipo específico de tensão pré-determinado.

A figura 5.16 exhibe a direção dos vetores de tensão máxima principal na região de maior concentração de tensões (periferia da interface dentina/adesivo e adjacências), para os casos de miTo e miCis com e sem filete de compósito. Em todos os casos, os vetores apresentaram uma direção de aproximadamente  $45^\circ$  com relação à interface, o que indica que a fratura sob tensão de tração, em ambos os ensaios, tenderia a se propagar em direção a um dos substratos (dentina ou cilindro), perpendicularmente aos vetores de tração<sup>29</sup>.

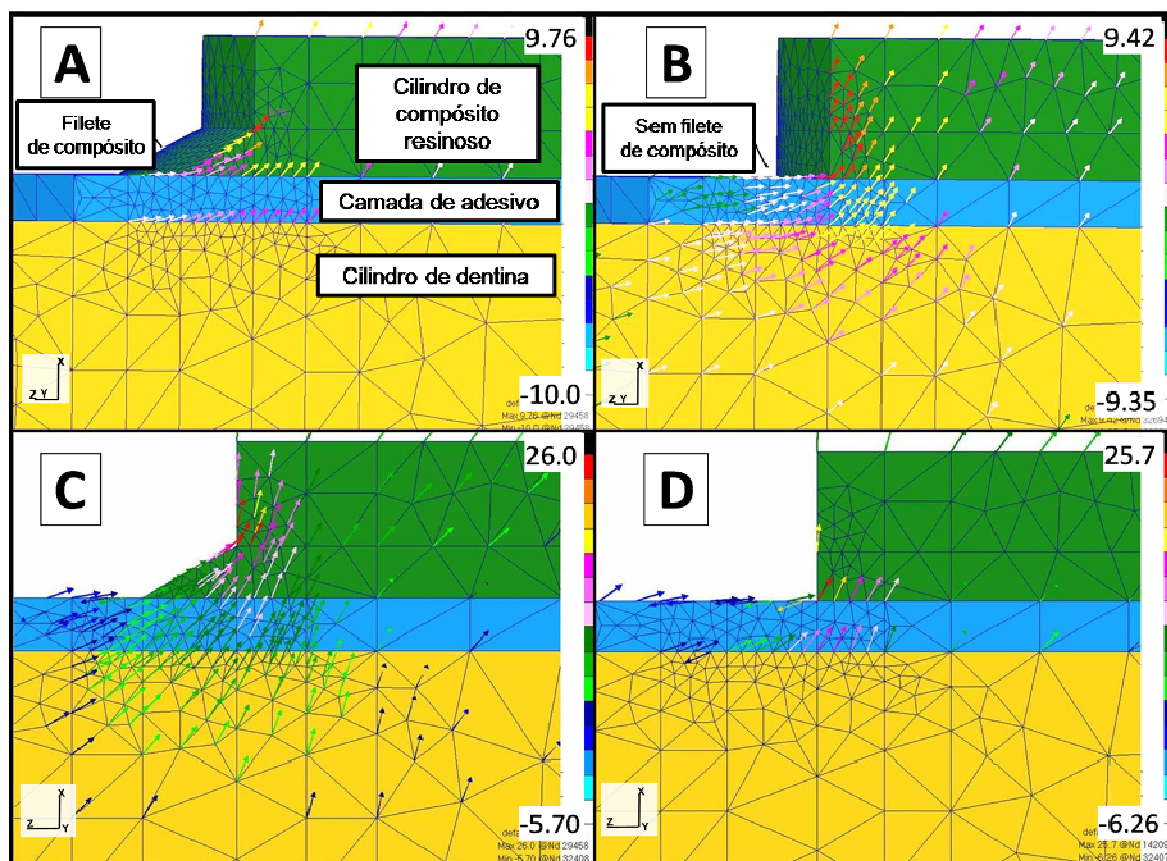


Figura 5.16 - Vetores de tensão máxima principal (valores das escalas em MPa) apresentados num corte longitudinal de quatro modelos (cilindros de compósito de baixa viscosidade) tanto com filete (esquerda: A e C) quanto sem filete (direita: B e D). Acima (A e B): microtorção; abaixo (C e D): microcisalhamento. Notar que, em todos os casos, os vetores se orientam numa direção de aproximadamente  $45^\circ$  em relação à direção do carregamento e, portanto, também em relação à interface adesiva

Num estado complexo de tensões, o tipo de tensão que vai levar à fratura do material pode ser mais dependente do critério de falha do mesmo do que do tipo de tensão que atinge os maiores valores. Materiais dúcteis absorvem grande parte da energia na forma de deformações plásticas. O critério de falha desses materiais se baseia na distorção, ditada principalmente pelas tensões de cisalhamento. No caso dos metais, por exemplo, a deformação plástica ocorre com o deslizamento das discordâncias, com quebra e restabelecimento sucessivos de ligações interatômicas ao longo dos deslizamentos. Quando solicitados por um esforço de tração uniaxial (paralelo ao longo eixo do espécime), os metais dúcteis normalmente sofrem uma estrição da área de secção transversal graças a deslizamentos oblíquos entre planos interatômicos e, assim, no início da fratura, ocorre a formação de uma superfície com inclinação próxima a  $45^\circ$  com o longo eixo do espécime, que indica

que a falha tenha se iniciado sob tensões cisalhantes (a fratura sob cisalhamento é paralela aos seus vetores). A figura 5.17 exibe um exemplo de imagem de fratura de um cilindro de metal dúctil sob esforço de tração uniaxial (parte A). Reparar que, nesta figura, embora o início da falha tenha ocorrido por cisalhamento com inclinação de  $45^\circ$  em relação ao carregamento (Figura 5.17, parte B: observar superfície marcada com \*), a propagação dos danos pelo restante da secção transversal ocorreu na direção perpendicular aos vetores de tração (Figura 5.17, parte C: observar superfície *b*), o que sugere que, nesta etapa de propagação de danos, o tipo de tensão que rege a fratura pode mudar.

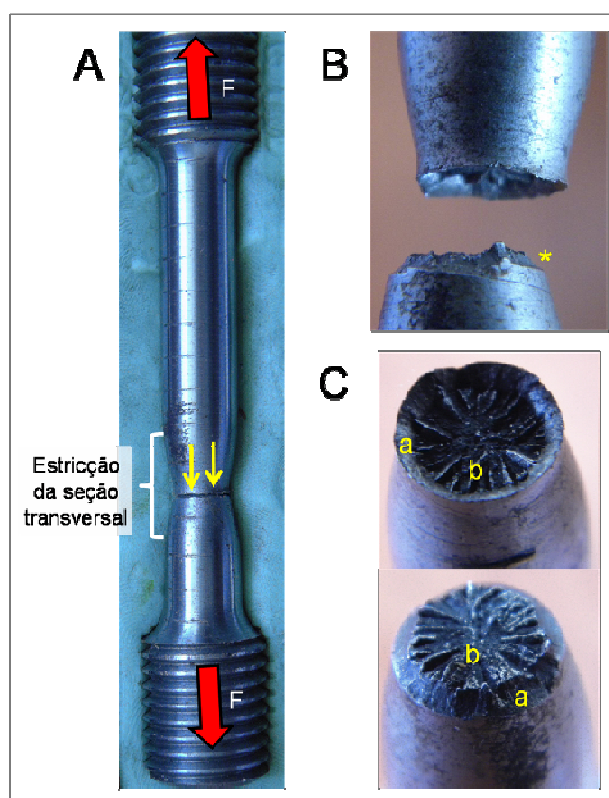


Figura 5.17 - Fratura em um bastão de metal dúctil sob esforço de tração uniaxial (setas vermelhas; F = força). A) Notar a estricção da área de seção transversal na região da fratura (fratura sinalizada pelas setas duplas amarelas); B) Separação das superfícies de fratura: notar a superfície (\*) em  $45^\circ$  com a direção do carregamento de tração; C) Imagens de ambas as superfícies formadas pela fratura: a) superfície inclinada a  $45^\circ$  com o carregamento, na direção da tensão de cisalhamento máximo; b) estrias formadas pelo alongamento do material dúctil antes da fratura completa (notar que esta superfície formada na etapa de propagação dos danos é perpendicular aos vetores de tração)

Os materiais frágeis são aqueles que limitam seu comportamento mecânico ao regime elástico, fraturando-se com pouca ou nenhuma deformação permanente.

Estes materiais são levados à fratura, normalmente, por tensões de tração<sup>66</sup>, na direção perpendicular aos seus vetores. Certos materiais podem apresentar critério de falha diferente conforme a temperatura ambiente ou a taxa de carregamento em que são solicitados (um metal, por exemplo, pode sofrer fratura frágil sob temperaturas muito baixas e/ou impactos). A figura 5.18 permite notar a superfície de fratura perpendicular ao esforço de tração uniaxial no giz, um material frável.

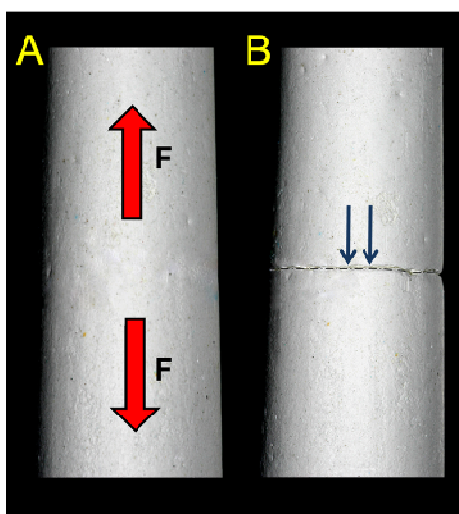


Figura 5.18 - Exemplo de fratura de um material frável sob esforço de tração. A) Esforço de tração uniaxial no giz (neste caso, os vetores de tração se desenvolvem paralelos ao longo eixo do giz); B) Fratura (setas duplas) perpendicular ao esforço de tração

A figura 5.19 mostra o esquema de um bastão submetido a um esforço de torção<sup>74</sup>. Na parte A desta figura, nota-se que os vetores de tensão cisalhante ( $\tau$ ) se orientam paralelamente ao esforço mecânico de torção, e os de máxima principal ( $\sigma_1$  corresponde ao vetor de tração e  $\sigma_2$ , ao de compressão), numa orientação de, aproximadamente,  $45^\circ$  com o esforço. Essas orientações de vetores de tensão máxima principal foram condizentes com as encontradas nos modelos de torção simulados pelo MEF (Figura 5.16, página 107). A parte B da figura 5.19 mostra a inclinação da superfície de fratura perpendicular aos vetores  $\sigma_1$ , indicando que, neste caso, a falha do material ocorreu sob tensões de tração.



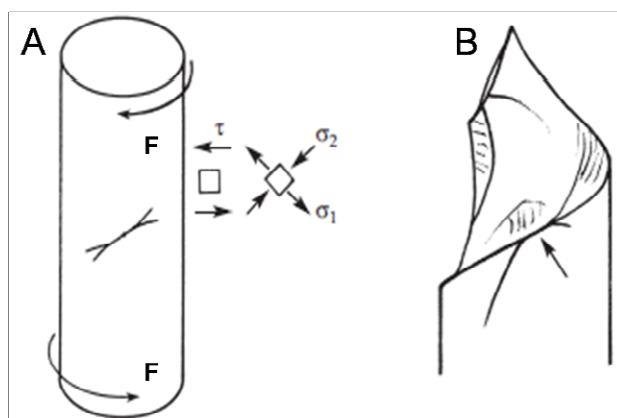


Figura 5.19 - Figura retirada do livro *Fractography of Ceramics and Glasses*<sup>74</sup>. A) Esforço (F) de torção sobre um bastão e orientação dos vetores de tensão de cisalhamento máximo ( $\tau$ ) e máximas principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ); B) Superfície de fratura helicoidal, formada a 45º com o esforço de torção, perpendicular aos vetores de tração ( $\sigma_1$ ). A seta indica o local de início da fratura

Na figura 5.20, pode ser notada a diferença entre a inclinação das superfícies de fratura sob esforço de torção num material frável (direção oblíqua) e dúctil (direção transversal, paralela ao esforço de torção).

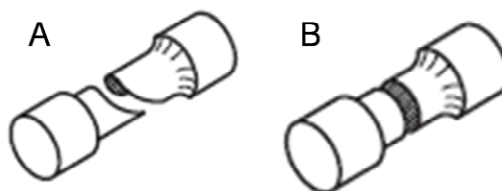


Figura 5.20 - A) Fratura oblíqua (helicoidal) em um material frável submetido à torção; B) Fratura num bastão de material dúctil, plana e paralela ao esforço de torção<sup>y</sup>

Normalmente, os artigos sobre materiais odontológicos classificam os compósitos poliméricos restauradores como fráveis, bem como a dentina e esmalte<sup>15, 23, 24, 26, 33, 62</sup>. Por este motivo, os mesmos são, geralmente, simulados pelo MEF como materiais elástico-lineares e, segundo esses critérios, alguns estudos sugerem, por exemplo, que a fratura coesiva no substrato de colagem ocorra por concentração de tensões de tração no substrato em vez da interface<sup>24, 62</sup>. No entanto, existem trabalhos que afirmam não ter total certeza do critério de falha dos tecidos biológicos e materiais dentários<sup>14, 28, 67</sup> e alguns chegam a afirmar que,

<sup>y</sup> Figura retirada do site <http://www.lrm.ufjf.br/pdf/10torcao.pdf> (acessado em 28/12/2009).

invariavelmente, a iniciação e propagação da fratura nos polímeros envolvem deformações plásticas e visco-elásticas<sup>75</sup>.

Um estudo<sup>24</sup> verificou a tendência de propagação da fratura em direção à dentina na simulação de um ensaio de cisalhamento por um programa de análise por MEF capaz de analisar acúmulo de falhas e, simultaneamente, realizou um ensaio experimental para confrontar os dados. Os materiais simulados pelo MEF foram considerados fráveis e a eles foi atribuído um fator chamado “efeito diferencial de resistência” (SDE), que é uma razão entre as resistências à compressão e à tração. Para os materiais fráveis, essa razão é maior que 1, já que resistem mais sob carregamento de compressão do que de tração. Quando foi considerado este fator com razão maior que 1, os resultados obtidos com o MEF mostraram uma tendência de propagação da fratura para a dentina assim como foi observado pela etapa experimental. Quando a razão foi considerada igual a 1, a fratura tendeu a se propagar pela interface adesivo/compósito. Isto significa que, nesse estudo, os resultados obtidos pelo MEF corresponderam aos experimentais quando os materiais simulados foram considerados fráveis.

As direções oblíquas das superfícies de fraturas coesivas em compósito nos ensaios de torção e as oblíquas em dentina nos de cisalhamento sugerem que a fratura seguiu a direção perpendicular aos vetores de tensão máxima principal.

A figura 5.21 mostra o giz com uma propagação de fratura helicoidal sob esforço de torção. A figura 5.22 mostra cilindros de vidro, um material certamente frável à temperatura ambiente, fraturados obliquamente durante a realização do esforço de  $T_0$ . Provavelmente, no caso dos dois cilindros de vidro, a superfície de fratura formou um cone devido à existência de várias nucleações simultâneas de fratura.

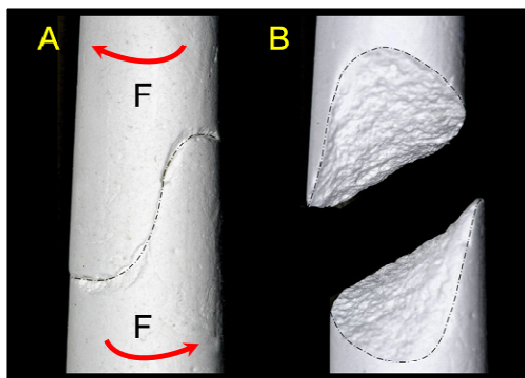


Figura 5.21 - A) Giz submetido a um esforço de torção (F), com fratura helicoidal (linha pontilhada); B) Separação das superfícies de fratura

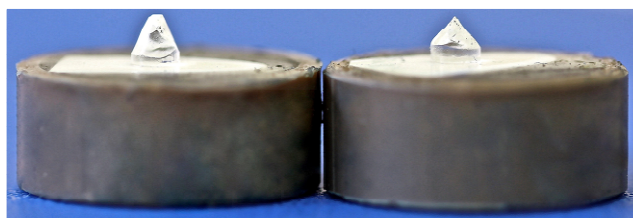


Figura 5.22 - Imagens de dois cilindros de vidro fraturados após serem submetidos ao ensaio de To. Notar a direção oblíqua da superfície de fratura que, nestes dois casos, formam um cone

Hipóteses para as inclinações oblíquas da superfície de fratura na dentina e polímeros nos dois tipos de ensaio:

- A dentina e os polímeros odontológicos (tanto os compósitos resinosos quanto o adesivo) podem ter exibido comportamento predominantemente frível (seja pelas próprias características dos materiais, ou pela taxa de carregamento aplicada), com fraturas perpendiculares aos vetores de tração;
- A nucleação da fratura pode ter sido provocada sob tensões de cisalhamento e, após a propagação dos danos, o mecanismo de fratura passou a ser diferente, com propagação na direção perpendicular à da tensão máxima principal.

Quanto a este último tópico, é possível que o adesivo, por não apresentar cargas de cerâmica aderidas quimicamente à matriz polimérica (que é o caso do compósito), tenha apresentado critério de falha dúctil. Deve-se levar em conta que, embora a união do adesivo com a dentina seja principalmente de natureza mecânica, a camada híbrida é constituída de polímeros orgânicos amorfos, tanto na

forma de fibrilas colágenas quanto de cadeias poliméricas resinosas, e o embricamento mecânico na interface adesiva é feito pelo encapsulamento das primeiras pelas segundas. A falha na interface adesiva pode ter se iniciado sob tensões de cisalhamento e, quando a fratura se propagou para o compósito ou dentina, a sua propagação pode ter ocorrido perpendicularmente aos vetores de tensão máxima principal. Também é possível que a falha no próprio substrato de colagem possa ter se iniciado sob tensões de cisalhamento e depois tenha se propagado perpendicularmente aos vetores de tração na fase de propagação de danos, assim como foi exemplificado na fratura com o metal sob esforço de tração uniaxial (Figura 5.17, parte C, na página 108).

A figura 5.23 mostra uma imagem de fratura entre a camada de adesivo e o cilindro de compósito, com laminações provocadas no adesivo, provavelmente, por distorção sob tensões cisalhantes.

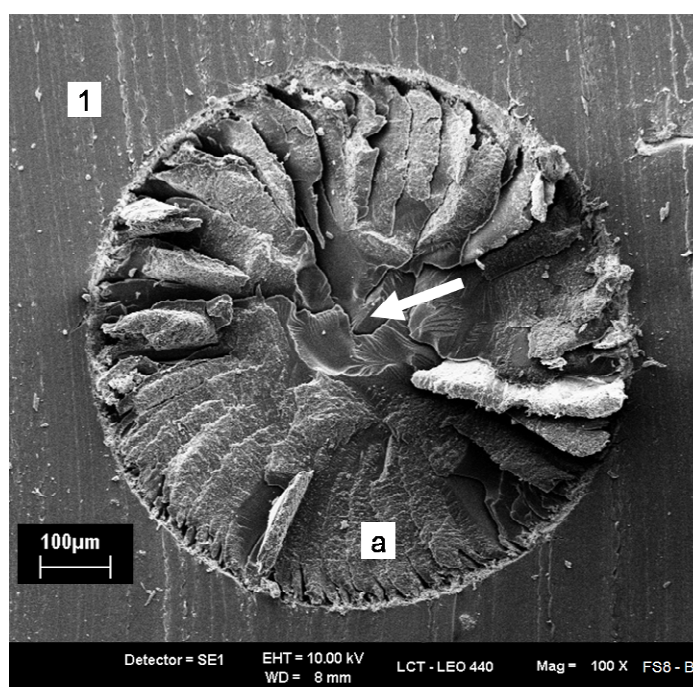


Figura 5.23 - Fratura entre adesivo e cilindro de compósito obtida pelo ensaio de miTo. a) Camada de adesivo na região da interface adesiva, com laminações na periferia da interface. A seta branca mostra a região central, com marcas características de rasgamento, provavelmente por ter sido a última região para a qual a fratura se propagou. Legenda geral na tabela 5.9, página 102

Neste trabalho, não foi possível obter certeza sobre qual o critério de falha dos materiais utilizados nem se chegou à certeza sobre o tipo de tensão que levou os espécimes à fratura nos ensaios de torção e de cisalhamento.

Além da dificuldade em garantir qual o tipo de tensão que levou o espécime à fratura em ambos os ensaios, foi encontrada grande dificuldade na interpretação das fraturas mistas quanto ao local do início da falha, especialmente no caso dos ensaios de torção. Pelos resultados obtidos pelo MEF, sabe-se que as tensões neste ensaio se concentram mais na periferia da interface e, quando uma fratura mista expõe dentina que não pertence à região do perímetro, o mais provável é que ela tenha se iniciado coesivamente no compósito, ou na própria interface no caso de existir um defeito na adesão. Porém, quando a fratura mista expõe a dentina na periferia da interface, mesmo quando as linhas de fratura indicam o local de provável início da falha no compósito, vidro ou adesivo (ver Figura 5.12, parte III, na página 102, em que as setas pretas apontam linhas como estas), é possível que a fratura num desses materiais tenha ocorrido como continuação da falha que se originou na interface adesiva. No caso de uma fratura mista iniciada na interface dentina/adesivo, independentemente de que ela tenha se propagado depois pelos substratos de colagem, a carga de ruptura ainda poderia ser utilizada como referência da resistência adesiva<sup>23</sup>. No entanto, como foi mencionado, não foi possível concluir o local do início da falha para este tipo de fratura no presente trabalho.

O gráfico da figura 5.24 permite comparar as frequências dos três tipos de fratura para cada combinação ensaio x adesivo.

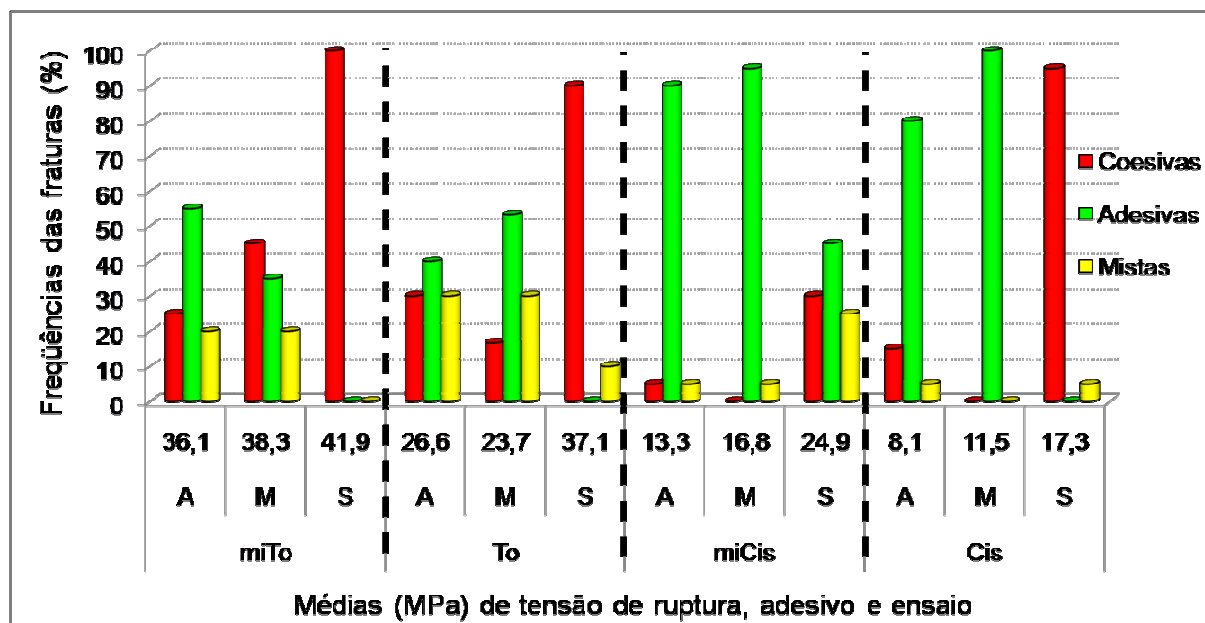


Figura 5.24 - Frequências (%) de cada tipo de fratura segundo o adesivo e tipo de ensaio. As médias da tensão de ruptura (MPa) de cada grupo estão apresentadas no eixo horizontal

A tabela 5.10 exhibe as comparações das frequências das fraturas coesivas e adesivas (para cada adesivo em cada ensaio) pelo teste exato de Fisher. Como mencionado anteriormente, para que as frequências das fraturas coesivas tivessem um número significativo para permitir comparações estatísticas, as ocorridas nos diferentes tipos de cilindro e na dentina foram consideradas todas dentro do mesmo grupo. Isto foi feito levando-se em consideração as semelhanças de valores de tensão correspondentes às fraturas coesivas nos diferentes materiais. A explicação para a semelhança destes valores correspondentes aos cilindros F, H e V pode ser a semelhança de suas resistências máximas à tração<sup>2</sup>. A intenção de comparar a frequência de fraturas adesivas e coesivas para cada adesivo dentro dos ensaios foi verificar se algum dos tipos de ensaio era mais capaz de obter informações sobre a interface adesiva, independentemente do sistema adesivo empregado. Por este motivo, as frequências de fraturas mistas não foram incluídas na comparação da tabela 5.10, já que, na maioria dos casos, o local de origem deste tipo de falha não foi claro.

<sup>2</sup> Alguns valores relatados na literatura de resistência à tração do poli(metacrilato de metila) (correspondente a uma resina sem carga cerâmica), do compósito Z100 e do vidro são, respectivamente: 58,5 MPa<sup>76</sup>, 54,5 MPa<sup>77</sup> e 30-70 MPa (site <http://www.vidreirosreunidos.pt/faq.htm>). Embora estes valores sejam dependentes do modo como os materiais foram testados (os resultados foram publicados por diferentes laboratórios, com diferentes modos de aplicar a carga), eles podem indicar semelhança entre as faixas de resistência à tração dos mesmos.

Tabela 5.10 - Comparação das frequências de fraturas adesivas e coesivas pelo teste exato de Fisher para cada adesivo dentro de cada ensaio

Ensaio	Adesivo	Frequência do tipo de fratura		Resultado	
		Adesiva [A]	Coesiva [C]	Comparação	$p$ (probabilidade de hipótese nula - $H_0$ )
miTo	A	11	5	$A \approx C$	0,18
	M	7	9	$A \approx C$	0,46
	S	0	20	$A < C$	<b>0,00</b>
To	A	12	9	$A \approx C$	0,40
	M	16	5	$A > C$	<b>0,04</b>
	S	0	27	$A < C$	<b>0,00</b>
miCis	A	18	1	$A > C$	<b>0,00</b>
	M	19	0	$A > C$	<b>0,00</b>
	S	9	6	$A \approx C$	0,38
Cis	A	16	3	$A > C$	<b>0,01</b>
	M	20	0	$A > C$	<b>0,00</b>
	S	0	19	$A < C$	<b>0,00</b>

Embora tenha havido combinações adesivo x ensaio com 100% de fraturas adesivas (ver caso do adesivo M no ensaio de Cis na Tabela 5.1 da página 86 e na Figura 5.24 da página 115), nenhum dos ensaios apresentou 100% de fraturas adesivas para todos os três sistemas adesivos ao mesmo tempo. Não houve um padrão de aumento ou diminuição da frequência de fraturas coesivas/adesivas ao alterar o tamanho do espécime de convencional para micro em nenhum dos tipos de ensaio.

Pelos resultados obtidos pelo MEF das faixas de tensão na superfície de adesão da dentina exibidos na figura 5.3 Figura 5.3(página 81), foi notado que a extensão da área da interface submetida aos picos de tensão é maior nos ensaios de torção que nos de cisalhamento, o que poderia sugerir que os resultados da torção foram mais representativos da interface adesiva. Porém, os resultados das comparações com teste de Fisher exibidos na tabela 5.10 permitem observar que os ensaios de cisalhamento foram os que apresentaram, de forma geral, maiores frequências de fraturas adesivas que coesivas do que os ensaios de torção (os casos de exceção em que as adesivas não superaram as frequências das coesivas nos ensaios de Cis e miCis foram com o adesivo S).

As figuras 5.25 e 5.26 mostram, num corte longitudinal, as faixas de tensão máxima principal e cisalhamento máximo para ambos os ensaios simulados pelo MEF.

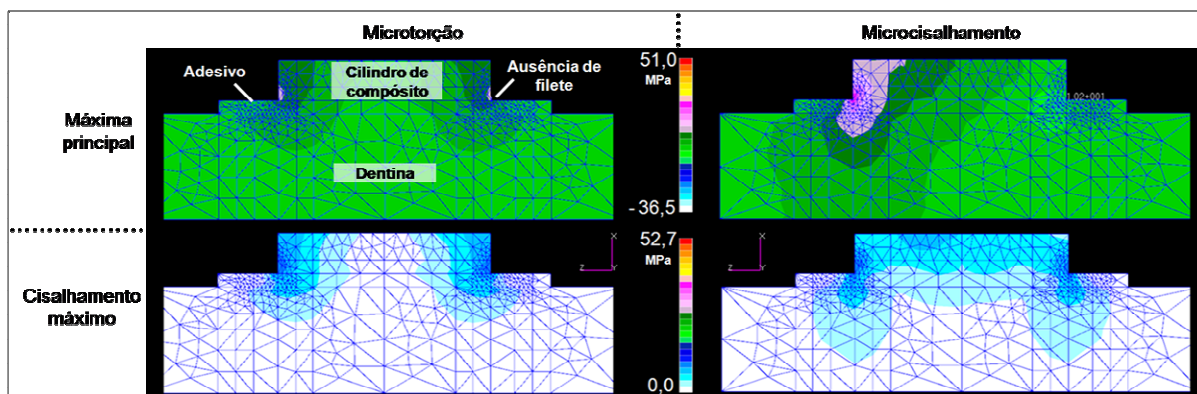


Figura 5.25 - Corte longitudinal de modelos de miTo e miCis sem filete de compósito com faixas de tensões máxima principal e cisalhamento máximo (valores de tensão em MPa). Notar que a região de maior concentração de tensão nos dois tipos de ensaio é próxima ao ângulo reto entre adesivo e compósito. Notar também que, no modelo de miTo, as tensões de maiores valores avançam menos para a interface dentina/adesivo e interior da dentina do que no modelo de miCis

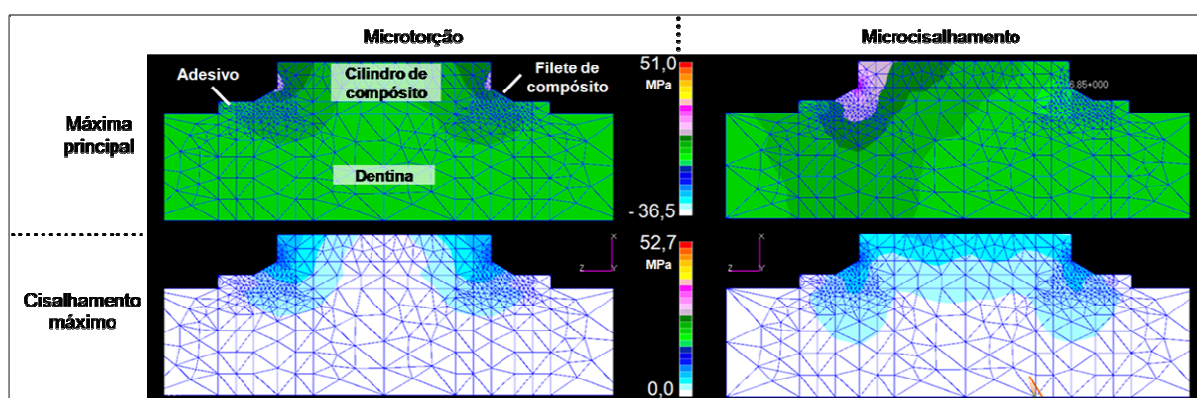


Figura 5.26 - Corte longitudinal de modelos de miTo e miCis com filete de compósito com faixas de tensões máxima principal e cisalhamento máximo (valores de tensão em MPa). Notar que a região de maior concentração de tensão nos dois tipos de modelo é o filete. Notar que, também neste caso, as tensões de maiores valores avançam menos para a interface dentina/adesivo e interior da dentina no modelo de miTo do que no de miCis

Segundo as figuras 5.25 e 5.26, o local de maior concentração de tensões para ambos os ensaios foi no filete de compósito (o que concorda com um estudo que simulou o filete<sup>18</sup>) ou nas proximidades do ângulo vivo entre o adesivo e o compósito para os casos em que o filete não foi simulado. É possível notar que o adesivo e a dentina são mais solicitados mecanicamente nos ensaios de cisalhamento que de torção. Neste último ensaio, as faixas de maiores tensões se concentram mais no próprio cilindro de compósito e, sobre a dentina e interface adesiva, incidem tensões de menores valores que no cisalhamento. Esta pode ser



uma explicação para a maior frequência de fraturas coesivas nos ensaios de torção, ainda mais por terem sido, principalmente, coesivas em compósito.

Em análises de modelos 2D pelo MEF que simularam carregamento de cisalhamento com fio<sup>29, 31</sup> e de tração convencionais<sup>33</sup> em modelos sem filete e com o adesivo de mesmo diâmetro que o compósito, o pico da tensão máxima principal se encontrou no ângulo vivo entre o adesivo e a dentina ou na camada de adesivo, também próximo ao referido ângulo. A geometria simulada nos modelos 3D do presente trabalho é diferente, pois o ângulo vivo entre dentina e adesivo foi deslocado dos limites da área da interface compósito/adesivo/dentina, devido ao maior diâmetro do adesivo em relação ao cilindro de compósito. Isto resultou na concentração de tensões no ângulo reto entre o compósito e o adesivo (Figura 5.25, página 117), em vez do ângulo entre adesivo e dentina.

Na etapa experimental de dois trabalhos<sup>33, 78</sup>, foram comparados casos de delimitação ou não da área do adesivo, e foi encontrada uma média de tensão de ruptura experimental significativamente maior para os casos em que houve excesso de adesivo (diâmetro maior que do cilindro de compósito). Destes dois estudos, o que realizou análise pelo MEF<sup>33</sup> observou que, nesse caso de diâmetro do adesivo maior que do compósito, assim como no presente trabalho, houve maior concentração de tensões no ângulo entre compósito e adesivo. Os autores desse estudo<sup>33</sup> interpretaram a maior concentração de tensão neste ângulo como indicativo de que a fratura se iniciaria neste local e, ao relacionar este dado com os maiores valores experimentais de ruptura, concluíram que o excesso de adesivo provoca um aumento artificial da resistência à ruptura da interface. Uma das explicações sugeridas pelos autores para a maior tensão de ruptura experimental foi que os resultados podem ter sido influenciados pela resistência da união entre adesivo e compósito, de natureza química, maior que a resistência de união entre adesivo e dentina. Por este motivo, o estudo afirmou que uma forma mais realista de analisar a interface é manter o adesivo limitado à área sob o cilindro de compósito, com diâmetro igual ao deste. Alguns autores realizam a delimitação da área de aplicação do adesivo com fita adesiva dupla-face com um orifício central aderida à superfície dental<sup>22, 78</sup>. No presente trabalho, a área do adesivo não foi delimitada em nenhum dos ensaios, especialmente pela dificuldade em se fazer uma delimitação perfeita para os espécimes de tamanho micro. A delimitação do adesivo à área sob o cilindro de compósito pode funcionar como mais um fator concentrador de tensão na

interface adesivo/dentina (já que leva as tensões a se concentrarem no ângulo vivo entre adesivo e dentina, além de, provavelmente, na prática, ser uma fonte de defeitos numa área crítica), o que pode também ter sido a causa de haver menores tensões de ruptura experimentais nos grupos correspondentes nos trabalhos que compararam as duas formas de aplicar o adesivo<sup>33, 78</sup>.

A tabela 5.11 apresenta as médias de tensão de ruptura experimentais encontradas para cada combinação tipo de fratura x adesivo em cada ensaio, com as letras de contrastes obtidas pelo teste de Tukey.

Tabela 5.11 - Médias (MPa) da tensão de ruptura de cada tipo de fratura dos adesivos nos diversos ensaios e suas frequências entre parênteses. Em cada ensaio, foram contrastadas as médias correspondentes às combinações tipo de fratura x adesivo com frequência mínima de 3

Ensaio	Adesivo	Média (MPa)	Médias e (frequências) por tipo de fratura		
			Adesiva	Coesiva	Mista
miTo	A	36,1	28,9 (11) <sup>e</sup>	48,9 (5) <sup>a</sup>	39,8 (4) <sup>c,d</sup>
	M	38,3	31,9 (7) <sup>e</sup>	45,2 (9) <sup>a,b</sup>	34,2 (4) <sup>d,e</sup>
	S	41,9	-	41,9 (20) <sup>b,c</sup>	-
To	A	26,6	18,8 (12) <sup>h</sup>	33,1 (9) <sup>g</sup>	30,5 (9) <sup>g</sup>
	M	23,7	17,6 (16) <sup>h</sup>	29,7 (5) <sup>g</sup>	31,1 (9) <sup>g</sup>
	S	37,1	-	37,6 (27) <sup>f</sup>	32,5 (3) <sup>g</sup>
miCis	A	13,3	13,0 (18) <sup>l</sup>	20,4 (1)	12,0 (1)
	M	16,8	16,6 (19) <sup>k</sup>	-	21,7 (1)
	S	24,9	22,3 (9) <sup>j</sup>	26,6 (6) <sup>i,j</sup>	27,6 (5) <sup>i</sup>
Cis	A	8,1	7,3 (16) <sup>n</sup>	10,1 (3) <sup>n</sup>	14,6 (1)
	M	11,5	11,5 (20) <sup>n</sup>	-	-
	S	17,3	-	17,2 (19) <sup>m</sup>	19,8 (1)

\* Médias com mesmas letras no mesmo ensaio são semelhantes ( $p > 0,05$ )

Ao selecionar, para as análises de variância, os valores de tensão de ruptura correspondentes a cada tipo de fratura, as amostras (combinações tipo de fratura x adesivo dentro de cada ensaio) tiveram tamanhos diferentes. Isto pode ter contribuído para detecção ou não de diferenças significantes entre os valores de tensão obtidos por cada uma delas em cada ensaio.

As médias dos valores de resistência das fraturas do tipo adesiva para os sistemas adesivos A e M foram, na maioria dos ensaios, estatisticamente semelhantes (exceção para o ensaio de miCis, em que a média do M foi maior que do A). O ensaio de miCis foi o único caso em que o adesivo S apresentou frequência de fratura adesiva suficiente para entrar na análise (frequência maior que 3), e sua média de tensão de ruptura foi detectada como superior às dos dois outros sistemas adesivos neste ensaio. Nos ensaios de torção, as médias de valores das fraturas coesivas foram estatisticamente maiores que das fraturas adesivas dos sistemas adesivos correspondentes. Nos ensaios de cisalhamento, quando houve condições de comparação (frequências das adesivas e coesivas maiores que 3: caso do adesivo S no ensaio de miCis e do adesivo A no de Cis) as médias de resistência à ruptura dos dois tipos foram semelhantes, provavelmente porque, nestes ensaios, a maioria das fraturas coesivas foi em substrato dentinário, que é variável. Nos casos das fraturas mistas cujas frequências permitiram que suas médias de tensão de ruptura fossem submetidas à análise de variância, os valores das médias variaram quanto a serem intermediários aos das coesivas e adesivas (caso do adesivo A do ensaio de miTo); semelhantes aos das adesivas (caso do adesivo M do mesmo ensaio) ou iguais aos das coesivas (adesivos A e M de To e S de miCis). Apenas os ensaios de To e miTo apresentaram frequências de fraturas coesivas suficientes com todos os adesivos para comparar as médias de resistência entre todos eles. Nestes dois ensaios, as médias de resistência das fraturas coesivas dos adesivos A e M foram estatisticamente semelhantes. As fraturas coesivas do sistema S variaram quanto à superioridade, inferioridade ou semelhança de valores de médias com as coesivas dos outros dois adesivos em todos os tipos de ensaios com frequências suficientes. As fraturas coesivas dos adesivos apresentaram frequências bem diferentes entre os mesmos na maioria dos ensaios (tamanhos de amostra diferentes), o que pode ter influenciado para as aleatoriedades de detecção de diferenças entre seus valores de tensão de ruptura dentro de cada ensaio.

Observar, no gráfico dos coeficientes de variação dos adesivos da figura 5.27, que o sistema S foi o que apresentou as menores dispersões de resultados de todos os adesivos em cada ensaio.

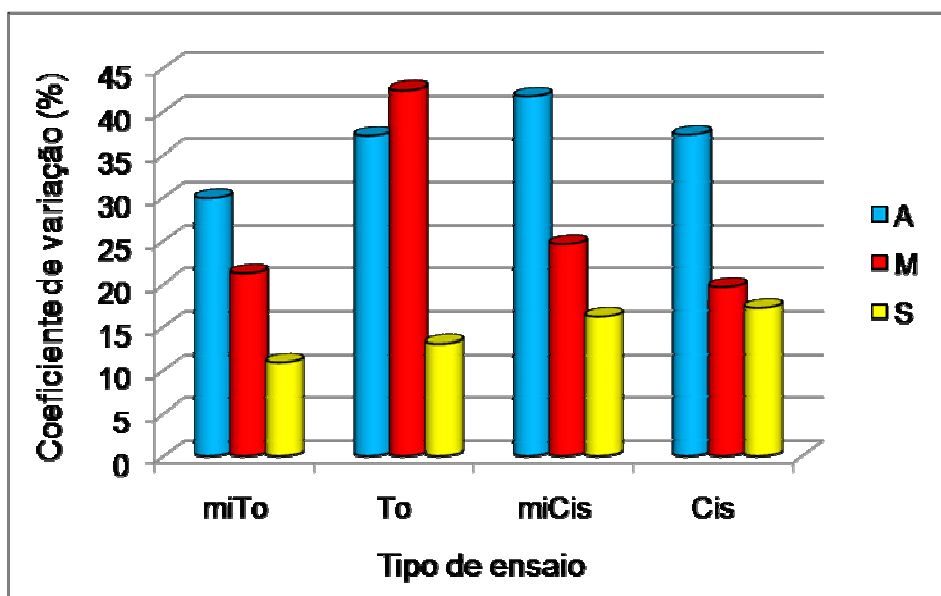


Figura 5.27 - Coeficientes de variação (%) de cada sistema adesivo segundo o tipo de ensaio

Em todos os ensaios, o adesivo S apresentou maior frequência de fraturas coesivas que os outros dois sistemas (Figura 5.24, página 115 e Tabela 5.10, página 116), juntamente com o maior valor de média de tensão de ruptura (embora, nem sempre, essa superioridade tenha sido considerada significativa em todos os ensaios, como mostram as letras de contraste da Figura 5.8, na página 93) e os menores coeficientes de variação (Figura 5.27). Nos ensaios de cisalhamento, o adesivo S exibiu coeficientes de variação um pouco maiores que nos ensaios de torção (Figura 5.27). Isto pode ser porque, no caso do miCis, este adesivo apresentou tanto fraturas adesivas quanto coesivas em dentina e, no de Cis, a maioria foi coesiva em dentina, que é um substrato mais variável que o compósito resinoso. Isto permite notar uma tendência de que, quanto maior for a resistência de adesão na interface produzida pelo adesivo (observar, na Tabela 5.11 da página 119, o valor significativamente maior da média tensão de ruptura da fratura adesiva do adesivo S do que dos outros dois adesivos no miCis), maior a frequência de fraturas coesivas e menor a dispersão dos resultados, que pode ser atribuída ao fato de os resultados mostrarem as propriedades mecânicas do substrato de colagem, que é menos variável do que a interface adesiva com a dentina (especialmente se ocorrer mais no cilindro de compósito).

O caso do adesivo M com cilindro de vidro no ensaio de torção exibiu o maior coeficiente de variação encontrado neste estudo (igual a 61,9%, ver Tabela 5.1, página 86, e Figura 5.10, página 97), e alterou a tendência de classificação relativa

entre os adesivos em relação às outras combinações ensaios x cilindros, com resultado de tensão de ruptura estatisticamente inferior aos dos adesivos A e S com cilindro V. Nesta condição de adesivo M com cilindro de vidro, foi encontrada uma frequência de 100% de fraturas adesivas (ver frequência de fraturas de cada condição experimental na Tabela 5.1 da página 86). Isto reforça a idéia de que, quando um mesmo adesivo fratura mais na interface, seus resultados de média de tensão de ruptura diminuem e a dispersão dos resultados aumenta.

O gráfico da figura 5.28 mostra a tendência de correlação positiva entre as médias de tensão de ruptura dentro de um ensaio e a frequência de fraturas coesivas, ou seja, quanto maior a resistência à ruptura apresentada por uma amostra, esta tende a apresentar maior frequência de fraturas coesivas em vez de adesivas.

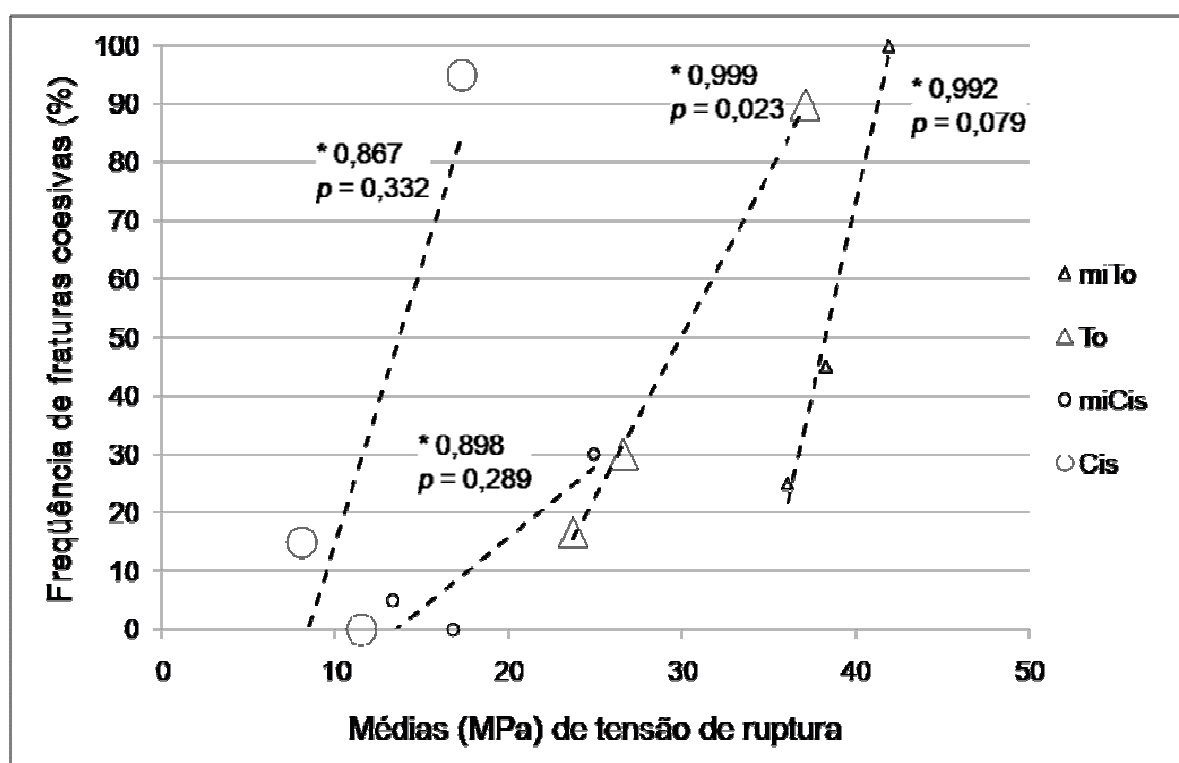


Figura 5.28 - Gráfico da dispersão dos resultados de frequência de fraturas coesivas (%) em função das médias das tensões de ruptura (MPa) dos adesivos para cada tipo de ensaio. No gráfico, são exibidos os coeficientes de correlação de Pearson (\*) e os valores de  $p$ . As retas são ilustrativas

Embora os coeficientes de correlação (\*) apresentados para cada caso do gráfico da figura 5.28 sejam altos, os valores de  $p$  mostraram significância apenas

no caso da torção ( $T_o$ :  $p < 0,05$ ), provavelmente porque cada ensaio apresenta apenas 3 dados para compor as retas (médias da tensão de ruptura de cada um dos 3 adesivos). Por este motivo, foi feita a normalização dos valores de médias de tensão de ruptura (pelos valores máximos) para que todos os valores de médias de todos os ensaios compusessem uma única reta e se verificasse, dessa forma, se um maior número de dados permite obter uma correlação positiva significativa (gráfico da Figura 5.29). Com este método, foi possível perceber que, no estudo como um todo, as maiores médias de tensão de ruptura corresponderam a maiores frequências de fraturas coesivas (correlação positiva significativa). Uma correlação positiva significativa entre a média de resistência à ruptura e a frequência de fraturas coesivas também foi encontrada por um estudo de meta-análise<sup>12</sup> que reuniu dados de 15 sistemas adesivos dentinários de 75 artigos (considerou as coesivas em dentina e em compósito num mesmo grupo).

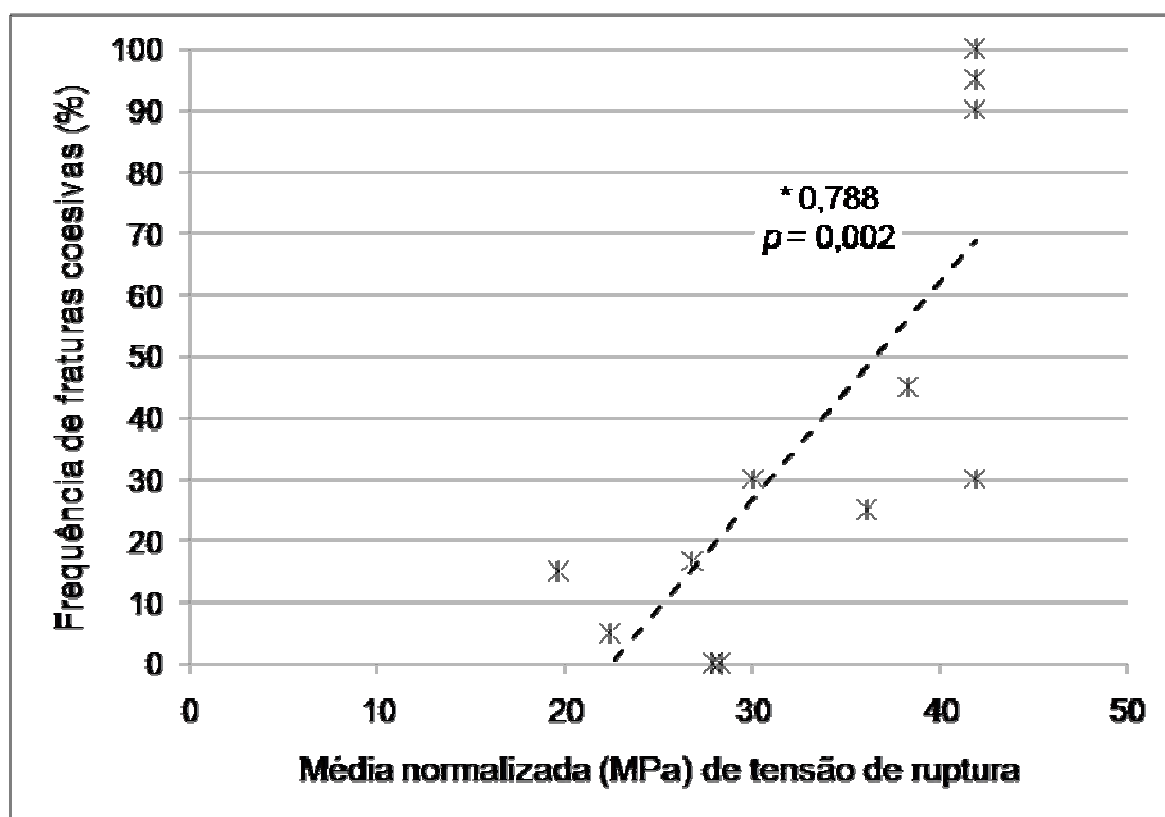


Figura 5.29 - Gráfico da dispersão dos resultados de frequência de fraturas coesivas (%) em função das médias normalizadas das tensões de ruptura (MPa) dos adesivos de todos os ensaios. No gráfico, são exibidos o coeficiente de correlação de Pearson (\*) e o valor de  $p$ . A reta é ilustrativa

Um estudo<sup>24</sup> analisou a porcentagem da área de fratura coesiva em relação à área total da interface, e tentou correlacionar individualmente este dado com a resistência nominal de ruptura do espécime sob ensaio de cisalhamento. A correlação encontrada foi baixa. Provavelmente, a proporção da área de fratura coesiva não deve ter grande influência sobre o cálculo da tensão de ruptura, pois seu tamanho será definido na etapa de propagação dos danos, após a aplicação da carga máxima.

O gráfico da figura 5.30 mostra uma tendência de correlação positiva entre a frequência de fraturas adesivas e o coeficiente de variação dos valores de tensão de ruptura em todos os ensaios. Mais uma vez, apenas o caso do ensaio de torção (To) apresentou correlação positiva significativa ( $p < 0,05$ ).

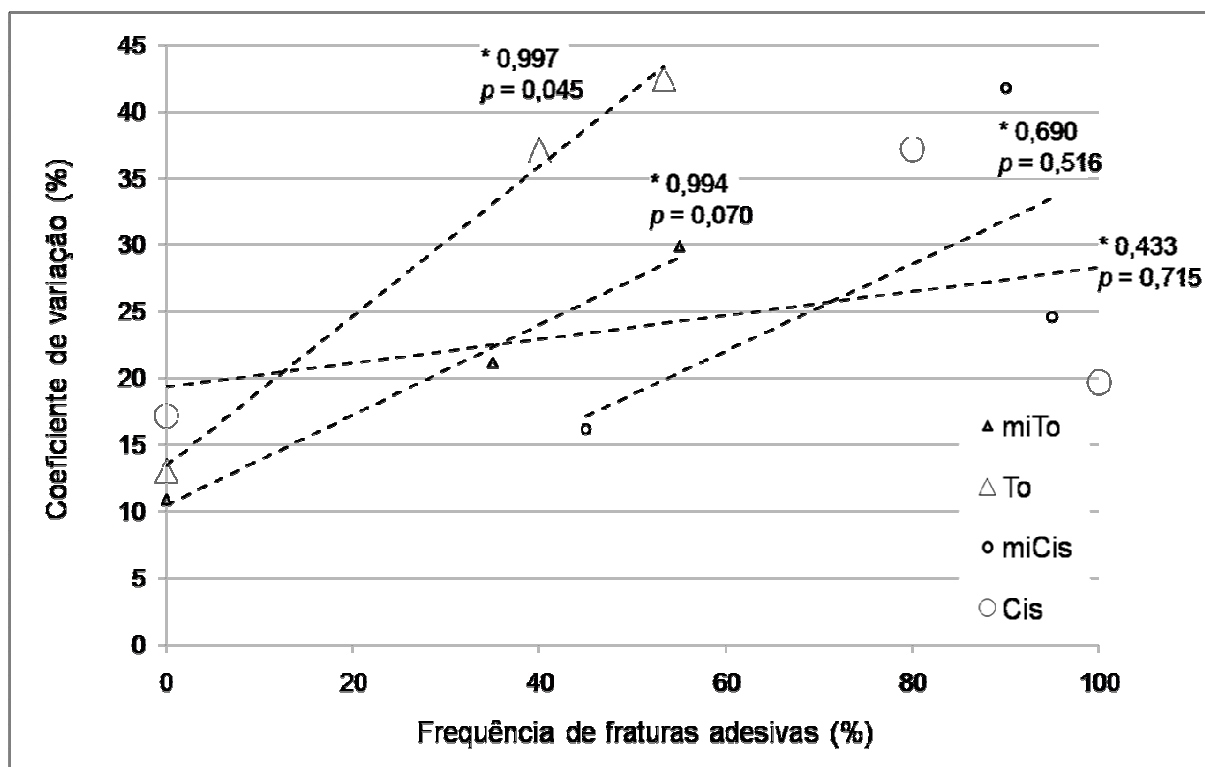


Figura 5.30 - Gráfico da dispersão dos resultados de frequência de fraturas adesivas (%) em função dos coeficientes de variação (%) dos adesivos para cada tipo de ensaio. No gráfico, são exibidos os coeficientes de correlação de Pearson (\*) e os valores de  $p$ . As retas são ilustrativas

Foi feita também uma correlação com os coeficientes de variação normalizados (gráfico da Figura 5.31), que reduziu o valor de  $p$  para 0,08 ( $> 0,05$ ). Este valor, embora não significativo para o nível de 5%, mostra uma tendência de

que, quando o ensaio obtém um valor de resistência realmente relacionado à interface adesiva (ou seja, quando há maior frequência de fraturas adesivas), os resultados apresentam maior dispersão do que quando ele mede a resistência do substrato de colagem (maior frequência de fraturas coesivas).

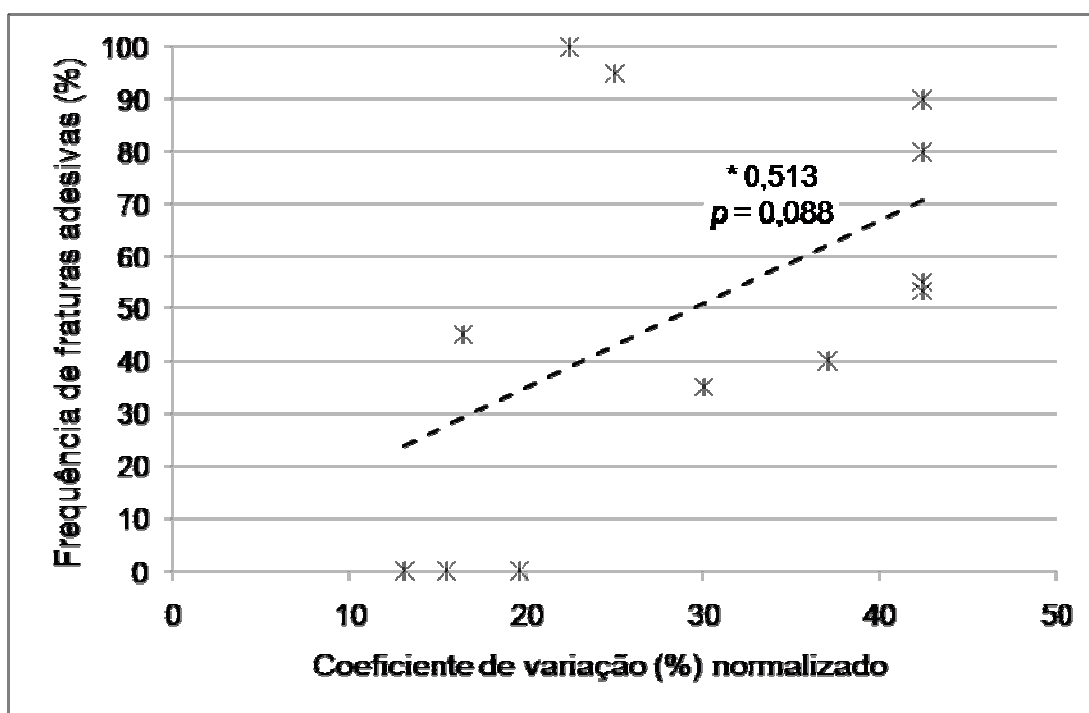


Figura 5.31 - Gráfico da dispersão dos resultados de frequência de fraturas adesivas (%) em função dos coeficientes de variação (%) normalizados dos adesivos de todos os ensaios. No gráfico, são exibidos o coeficiente de correlação de Pearson (\*) e o valor de  $p$ . A reta é ilustrativa

Um estudo<sup>23</sup> sugere que se faça uma análise fractográfica da superfície de fratura para localizar o local de início da falha e, a partir desta análise, deveriam ser descartados os resultados referentes aos espécimes cuja fratura não tenha se iniciado na interface adesiva (o descarte dos espécimes fraturados coesivamente também é sugerido por mais autores<sup>14</sup>). Segundo este estudo<sup>23</sup>, um número de 30 espécimes com fraturas adesivas deve ser obtido por grupo para a realização da análise estatística de Weibull. Porém, no caso do adesivo S do presente trabalho, por exemplo, que apresentou, em grande maioria, fraturas do tipo coesivas, precisariam ser confeccionados muito mais espécimes para obter fraturas adesivas em número de 30 para submeter à análise de Weibull. Além disso, o descarte dos espécimes fraturados coesivamente, para considerar apenas os resultados



referentes às fraturas adesivas, poderia viciar os resultados, com a inclusão na análise apenas dos valores mais baixos de resistências de união proporcionados, por exemplo, por erros de aplicação do adesivo e não por uma resistência de união naturalmente baixa.

Se for assumido que a região da interface é considerada a menos resistente e que a falha ocorrerá no local de maior tensão, quando um substrato de colagem se fratura antes que a interface, o motivo é a maior concentração de tensões neste substrato; ou seja, as tensões incidentes nele teriam valores mais altos que as incidentes na interface. Como já foi mencionado anteriormente (página 47), a fratura coesiva não necessariamente significa que a interface tem resistência maior que a resistência coesiva do substrato de colagem. No entanto, pode-se supor que, quando um adesivo apresenta maior frequência de fraturas coesivas que outros, significa que a interface produzida por ele resiste mais que as outras, que já fraturam sob as tensões menores incidentes nelas, e esta informação não deveria ser desprezada. Um estudo<sup>24</sup> com MEF da propagação da falha em ensaios de cisalhamento simulou interfaces adesivas com diferentes resistências de união, cujos valores foram representados por porcentagens da resistência coesiva do substrato de colagem (a união perfeita foi simulada com uma interface com 100% da resistência coesiva do substrato de colagem). Para a mesma configuração do ensaio, mesma geometria do espécime e mesmas propriedades dos substratos de colagem simulados, a tendência de propagação da fratura pela dentina foi maior quanto maior foi a resistência de união da interface adesiva. Isto significa que, embora a fratura coesiva ocorra devido à mecânica do ensaio, que provoca concentrações de tensão no substrato, nestas condições, ela tem ainda maior tendência de ocorrer quando a resistência da interface é maior<sup>24</sup>.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS MECÂNICOS

Como foi notado pelos resultados da literatura e do presente estudo, as fraturas coesivas e as grandes dispersões dos resultados ainda continuam existindo, e parecem ser muito mais dependentes do adesivo e do substrato do que do tipo de ensaio<sup>23</sup>. Quanto às fraturas coesivas, embora suas maiores frequências possam

indicar que o sistema adesivo em questão tem maior eficiência do que outros, caso as fraturas passem a ocorrer sempre no substrato em vez da interface, os valores de tensão de ruptura de diferentes adesivos tenderão a pertencer às mesmas faixas, sem ser possível distinguir interfaces mais ou menos resistentes<sup>14</sup>. O aumento da frequência de fraturas coesivas com o aumento da resistência adesiva reflete uma limitação dos ensaios que medem resistências à ruptura imediatas, por estas serem muito elevadas: os ensaios mecânicos mostram ter um limite de resistência, acima do qual não é possível distinguir diferentes interfaces. Ainda são apontadas necessidades de desenvolver materiais e/ou técnicas adesivas mais eficientes<sup>3, 8, 41</sup> e, para isto, seu desempenho precisa ser avaliado comparativamente ao dos já considerados como muito bons.

Um estudo<sup>14</sup> abordou a dificuldade em distinguir as resistências imediatas de adesivos atualmente considerados de alta-performance através da comparação da resistência nominal obtida com o ensaio de cisalhamento, devido às altas frequências de fraturas coesivas. Este trabalho comparou a classificação relativa de 6 adesivos através do ensaio de cisalhamento e de um ensaio de mecânica da fratura. Foram encontradas propagações de fraturas em direção ao substrato dentinário em ambos os ensaios (este estudo considerou todos os tipos de fratura em que houve propagação para o substrato como coesivas, sem uma classificação denominada “mista”), mas no ensaio de tenacidade à fratura, como isto ocorreu longe do ponto de início da falha (ou seja, após a propagação instável desta), já não influenciava mais no cálculo da  $G_{IC}$ . Os ensaios produziram classificações relativas semelhantes para os adesivos com menores eficiências de adesão, mas as classificações foram diferentes quando se referiram aos adesivos com 100% de fraturas coesivas no ensaio de cisalhamento, que foram os que apresentaram também maiores valores de tensão nominal de ruptura. O ensaio de tenacidade à fratura mostrou maior poder de discriminação entre os adesivos. O autor, apesar de dizer que o ensaio de cisalhamento não precisa ser, necessariamente, substituído pelo outro ensaio, conclui que, como este último tem resultados mais relacionados à interface, seria preferível para discriminar novos adesivos e técnicas que venham a ser mais eficientes.

Ao chegar a este ponto, passam a ser muito úteis testes que incluem envelhecimento para testar se a qualidade da união se mantém com o passar do tempo: interfaces degradadas, provavelmente, já não produziram tantas fraturas

coesivas e, assim, os ensaios de resistência adesiva voltariam a ser úteis para detectar diferenças na possibilidade de deterioração da adesão ao longo do tempo. Os adesivos auto-condicionantes, por exemplo, podem, em certos estudos, apresentar resultados de resistência imediata próximos aos dos sistemas de condicionamento ácido prévio, porém, apresentam baixa estabilidade em longo prazo<sup>10, 43</sup>. Não apenas os desafios químicos do ambiente oral reduzem o desempenho clínico dos adesivos ao longo do tempo, mas também os esforços mastigatórios e as alterações térmicas provocam degradação mecânica da interface<sup>8, 41</sup>. Um estudo de revisão da literatura<sup>8</sup> verificou que, embora a interface se degrade sob fadiga mecânica durante sua função no ambiente oral, o fator que parece ser mais decisivo para a degradação em longo prazo é a hidrólise da interface, o que levou o estudo a dizer que o modo mais válido de simular a degradação clínica da interface é através do envelhecimento pelo armazenamento de micro-espécimes em água.

Embora os resultados dos ensaios mecânicos laboratoriais nem sempre tenham relação direta com os resultados de acompanhamentos clínicos (que são obtidos sob estados de tensões mais variáveis e complexos, além de ocorrerem num ambiente não simulado totalmente em laboratório)<sup>7, 11, 15-19, 79</sup>, os primeiros são importantes não apenas por apresentarem vantagens como menor custo, menor tempo gasto e melhor controle das variáveis, mas por serem ensaios que caracterizam a interface adesiva sob tensões básicas<sup>24</sup>, que é uma prática comum para caracterizar materiais. Foi mencionado na literatura<sup>10</sup> que, quando um adesivo ou técnica demonstra promover durabilidade da adesão em estudos laboratoriais prévios, idealmente, um acompanhamento clínico deveria ser realizado para avaliá-lo em longo prazo de função na cavidade oral. Os ensaios laboratoriais são importantes, portanto, para triar materiais/técnicas com potencial de serem utilizados clinicamente<sup>26</sup>.

Alguns autores<sup>9</sup> sugeriram que, além de testes de resistência de união, a interface adesiva deveria ser avaliada por uma mistura de ensaios laboratoriais, com acréscimo de ensaios de análise quantitativa ou semi-quantitativa do selamento marginal e um mecânico de cargas repetidas. Deve-se pensar na escolha do tipo de ensaio mecânico empregado para mensurar a resistência à ruptura, que, talvez, deva ser um conjunto de mais de um ensaio com carregamentos diferentes. Durante os esforços oclusais no ambiente oral, a interface adesiva é sujeita a uma

combinação de vários tipos de carregamento, o que sugere que dificilmente apenas um tipo de ensaio será suficiente para verificar o desempenho de um sistema adesivo ou técnica de adesão relativamente a outros<sup>21</sup>. Há evidências<sup>12, 23, 73</sup> de que a classificação relativa de materiais com diferentes tipos de ensaio possa variar, provavelmente, porque as interfaces criadas com eles têm desempenhos diferentes sob diferentes estados de tensão, e a padronização dos ensaios ainda não garantirá que todos eles obtenham sempre as mesmas classificações relativas.

Com base nos resultados obtidos pela análise de elementos finitos e na etapa experimental do presente trabalho, os ensaios de resistência adesiva à torção, em relação aos de cisalhamento, não se mostraram vantajosos nos quesitos:

- sensibilidade para detectar diferenças significantes: nenhum dos ensaios se mostrou com maior sensibilidade para detectar diferenças significantes entre as resistências à ruptura dos diferentes adesivos, salvo uma única exceção (ensaio de  $T_0$  com cilindro F), provavelmente, devida ao acaso;
- influência das variáveis de configuração sobre os resultados de tensão de ruptura: contrariando o que seria esperado pelos resultados de distribuição de tensões obtidos pelo MEF, os valores experimentais foram estatisticamente diferentes quando se alterou o tamanho do espécime no ensaio de torção; o módulo de elasticidade do cilindro do espécime não foi um fator significativo para alterar as tensões de ruptura em nenhum dos tipos de ensaio e a suposta padronização menos crítica da distância entre o carregamento e a interface na torção não influenciou para que houvesse menores dispersões dos resultados;
- avaliação da resistência da interface adesiva propriamente dita: os ensaios de torção apresentaram, de forma geral, maiores frequências de fraturas coesivas que os de cisalhamento;
- facilidade de execução: no que diz respeito à dificuldade de alinhamento do corpo-de-prova para garantir um esforço puramente de torção (o procedimento para alinhar a carga consome mais tempo e exige o uso de maiores sofisticções no dispositivo mecânico) e na interpretação, ainda mais difícil, das origens das fraturas. As maiores frequências de fraturas coesivas nestes ensaios também podem significar dificuldades em testar interfaces entre substratos mais frágeis ou com menor resistência coesiva.

O ensaio de torção, porém, apresenta uma importante vantagem em relação ao ensaio de cisalhamento com fio e, até mesmo, em relação ao ensaio de tração, que é o fato de ser muito rara a ocorrência de fraturas coesivas no substrato dentinário. Como as fraturas coesivas ocorrem mais no cilindro de compósito ou vidro, outros estudos poderiam testar se, com o reforço desse cilindro, seja aumentando seu volume (de forma que o diâmetro da interface seja menor que o diâmetro do restante do cilindro) ou mesmo confeccionando-o com outro material menos friável (por exemplo, um metal, que resiste bem aos esforços de tração), seriam encontradas maiores frequências de fraturas adesivas, mesmo para os casos de uniões mais resistentes. Nos casos da tração e cisalhamento com fio, como não seria possível reforçar o substrato dentário, que é muito mais sujeito a fraturas coesivas do que na torção, haveria uma limitação difícil de ser superada para obter informações acerca de adesivos mais resistentes. O ensaio de torção também tem a vantagem de produzir um estado de tensões mais simétrico em relação ao longo eixo do espécime e concentrar a tensão máxima numa área maior que nos ensaios de tração e cisalhamento com fio, o que seria mais representativo da interface. Além disso, todos os ensaios citados aqui parecem mais fáceis de executar do que os ensaios de mecânica da fratura.

Alguns estudos avaliaram métodos de remoção de bráquetes ortodônticos metálicos sob diferentes formas de carregamento, das quais as principais foram tração, cisalhamento e torção. Um deles<sup>69</sup> verificou, através da análise pelo MEF, que a remoção sob torção provocou maior concentração de tensões de tração no esmalte do que a remoção sob cisalhamento. Isto sugeriu que o primeiro método de remoção de bráquete apresentou maior tendência a provocar fraturas coesivas em esmalte. Outro estudo não verificou diferenças significantes entre a frequência de fraturas coesivas em esmalte, nem entre o tamanho da área dessas fraturas coesivas para nenhum modo de carregamento<sup>68</sup>, enquanto um terceiro verificou menor risco de lesão no esmalte com a remoção do bráquete sob torção<sup>70</sup>. Isto leva a uma reflexão sobre o efeito do reforço no material do cilindro, que poderia passar a provocar fraturas coesivas no substrato dentário, e não necessariamente fraturas adesivas. Porém, os bráquetes apresentam uma geometria diferente da geometria dos espécimes ensaiados no presente trabalho. Nos resultados de análise pelo MEF, foi verificado que o ensaio de torção provoca incidência de faixas de tensões de tração sobre a dentina com valores menores do que as provocadas pelo ensaio de cisalhamento, e os maiores valores incidem no próprio cilindro, próximo ao ângulo com o adesivo (faixas de tensão em corte longitudinal dos modelos nas Figuras 5.25 e 5.26, página 117).

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados de distribuição de tensões obtidos pelo método dos elementos finitos e nos resultados obtidos pela etapa experimental, não foi possível obter certeza sobre a capacidade do ensaio de torção de levar o espécime à ruptura por tensões de cisalhamento. Além disso, com base nos parâmetros de um ensaio de resistência mecânica ideal, o ensaio de torção não se mostrou mais vantajoso que o ensaio de cisalhamento, pois apresentou maior dificuldade de execução, não se mostrou significativamente menos sensível à influência das variações de configuração sobre os resultados de tensão de ruptura, não mostrou maior capacidade em detectar diferenças significantes entre os adesivos testados e apresentou maiores frequências de fraturas coesivas. No entanto, este ensaio apresenta uma característica que pode ser explorada em novos estudos: visto que a concentração de tensões não é dirigida preferencialmente ao substrato dentinário, existiria a possibilidade de reforço do material do cilindro aderido à dentina, o que, talvez, possa proporcionar maiores frequências de fraturas adesivas. Resta verificar se esta condição permitiria obter maiores informações do que as já obtidas com os ensaios baseados em carregamentos de tração e cisalhamento.

**REFERÊNCIAS<sup>aa</sup>**

- 1 Buonocore MG. A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res.* 1955 Dec;34(6):849-53.
- 2 Kovarik RE. Restoration of posterior teeth in clinical practice: evidence base for choosing amalgam versus composite. *Dent Clin North Am.* 2009 Jan;53(1):71-6, ix.
- 3 Bernardo M, Luis H, Martin MD, Leroux BG, Rue T, Leitao J, et al. Survival and reasons for failure of amalgam versus composite posterior restorations placed in a randomized clinical trial. *J Am Dent Assoc.* 2007 Jun;138(6):775-83.
- 4 Sarrett DC. Prediction of clinical outcomes of a restoration based on in vivo marginal quality evaluation. *J Adhes Dent.* 2007;9 Suppl 1:117-20.
- 5 Levin L, Coval M, Geiger SB. Cross-sectional radiographic survey of amalgam and resin-based composite posterior restorations. *Quintessence Int.* 2007 Jun;38(6):511-4.
- 6 Katchburian E, Arana-Chavez VE. *Histologia e Embriologia Oral.* 1a ed. São Paulo: Editorial Médica Panamericana; 1999. 381 p.
- 7 Sudsangiam S, van Noort R. Do dentin bond strength tests serve a useful purpose? *J Adhes Dent.* 1999 Spring;1(1):57-67.
- 8 De Munck J, Van Landuyt K, Peumans M, Poitevin A, Lambrechts P, Braem M, et al. A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: methods and results. *J Dent Res.* 2005 Feb;84(2):118-32.
- 9 Van Meerbeek B, De Munck J, Yoshida Y, Inoue S, Vargas M, Vijay P, et al. Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent.* 2003 May-Jun;28(3):215-35.

---

<sup>aa</sup> De acordo com Estilo Vancouver. Abreviatura de periódicos segundo base de dados MEDLINE.

- 10 Peumans M, Kanumilli P, De Munck J, Van Landuyt K, Lambrechts P, Van Meerbeek B. Clinical effectiveness of contemporary adhesives: a systematic review of current clinical trials. *Dent Mater.* 2005 Sep;21(9):864-81.
- 11 Van Noort R, Cardew GE, Howard IC. A study of the interfacial shear and tensile stresses in a restored molar tooth. *J Dent.* 1988 Dec;16(6):286-93.
- 12 Leloup G, D'Hoore W, Bouter D, Degrange M, Vreven J. Meta-analytical review of factors involved in dentin adherence. *J Dent Res.* 2001 Jul;80(7):1605-14.
- 13 Oilo G, Austrheim EK. In vitro quality testing of dentin adhesives. *Acta Odontol Scand.* 1993 Aug;51(4):263-9.
- 14 Tantbirojn D, Cheng YS, Versluis A, Hodges JS, Douglas WH. Nominal shear or fracture mechanics in the assessment of composite-dentin adhesion? *J Dent Res.* 2000 Jan;79(1):41-8.
- 15 DeHoff PH, Anusavice KJ, Wang Z. Three-dimensional finite element analysis of the shear bond test. *Dent Mater.* 1995 Mar;11(2):126-31.
- 16 Swift EJ Jr., Perdigão J, Heymann HO. Bonding to enamel and dentin: a brief history and state of the art, 1995. *Quintessence Int.* 1995 Feb;26(2):95-110.
- 17 Stanley HR. An urgent plea for a standardized bonding (adhesion) test. *J Dent Res.* 1993 Oct;72(10):1362-3.
- 18 Van Noort R, Noroozi S, Howard IC, Cardew G. A critique of bond strength measurements. *J Dent.* 1989 Apr;17(2):61-7.
- 19 Heintze SD. Systematic reviews: I. The correlation between laboratory tests on marginal quality and bond strength. II. The correlation between marginal quality and clinical outcome. *J Adhes Dent.* 2007;9 Suppl 1:77-106.
- 20 Bouillaguet S, Ciucchi B, Jacoby T, Wataha JC, Pashley D. Bonding characteristics to dentin walls of class II cavities, in vitro. *Dent Mater.* 2001 Jul;17(4):316-21.



21 al-Salehi SK, Burke FJ. Methods used in dentin bonding tests: an analysis of 50 investigations on bond strength. *Quintessence Int.* 1997 Nov;28(11):717-23.

22 Braga RR, Meira JB, Boaro LC, Xavier TA. Adhesion to tooth structure: a critical review of "macro" test methods. *Dent Mater.* 2009; [Epub ahead of print]. doi:10.1016/j.dental.2009.11.150.

23 Scherrer SS, Cesar PF, Swain MV. Direct comparison of the bond strength results of the different test methods: a critical literature review. *Dent Mater.* 2009; [Epub ahead of print]. doi:10.1016/j.dental.2009.12.002.

24 Versluis A, Tantbirojn D, Douglas WH. Why do shear bond tests pull out dentin? *J Dent Res.* 1997 Jun;76(6):1298-307.

25 McDonough WG, Antonucci JM, He J, Shimada Y, Chiang MY, Schumacher GE, et al. A microshear test to measure bond strengths of dentin-polymer interfaces. *Biomaterials.* 2002 Sep;23(17):3603-8.

26 Armstrong S, Geraldeli S, Maia R, Raposo LH, Soares CJ, Yamagawa J. Adhesion to tooth structure: A critical review of "micro" bond strength test methods. *Dent Mater.* 2009; [Epub ahead of print]. doi:10.1016/j.dental.2009.11.155.

27 Shimada Y, Yamaguchi S, Tagami J. Micro-shear bond strength of dual-cured resin cement to glass ceramics. *Dent Mater.* 2002 Jul;18(5):380-8.

28 Pashley DH, Sano H, Ciucchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM. Adhesion testing of dentin bonding agents - a review. *Dent Mater.* 1995 Mar;11(2):117-25.

29 Placido E. Distribuição de tensões em testes de cisalhamento e microcisalhamento mediante análise de elementos finitos [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2006.

30 Meira JB, Souza RM, Driemeier L, Ballester RY. Stress concentration in microtensile tests using uniform material. *J Adhes Dent.* 2004 Winter;6(4):267-73.

31 Placido E, Meira JB, Lima RG, Muench A, de Souza RM, Ballester RY. Shear versus micro-shear bond strength test: a finite element stress analysis. *Dent Mater.* 2007 Sep;23(9):1086-92.

32 Anusavice KJ, Dehoff PH, Fairhurst CW. Comparative evaluation of ceramic-metal bond tests using finite element stress analysis. *J Dent Res.* 1980 Mar;59(3):608-13.

33 Van Noort R, Cardew GE, Howard IC, Noroozi S. The effect of local interfacial geometry on the measurement of the tensile bond strength to dentin. *J Dent Res.* 1991 May;70(5):889-93.

34 Ghassemieh E. Evaluation of sources of uncertainties in microtensile bond strength of dental adhesive system for different specimen geometries. *Dent Mater.* 2008 Apr;24(4):536-47.

35 Van Noort R, Brown D, Clarke R, Combe EC, Curtis R, Fletcher AM, et al. Dental materials: 1991 literature review. *J Dent.* 1993 Feb;21(1):5-30.

36 Moll K, Fritzenschaft A, Haller B. In vitro comparison of dentin bonding systems: effect of testing method and operator. *Quintessence Int.* 2004 Nov-Dec;35(10):845-52.

37 Pedrazzi H. Análise da resistência ao cisalhamento pelo teste de torção de diferentes combinações resinas compostas/sistemas adesivos [dissertação]. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto; 2004.

38 Nakabayashi N, Kojima K, Masuhara E. The promotion of adhesion by the infiltration of monomers into tooth substrates. *J Biomed Mater Res.* 1982 May;16(3):265-73.

39 Nakabayashi N, Nakamura M, Yasuda N. Hybrid layer as a dentin-bonding mechanism. *J Esthet Dent.* 1991 Jul-Aug;3(4):133-8.

40 Van Meerbeek B, Inokoshi S, Braem M, Lambrechts P, Vanherle G. Morphological aspects of the resin-dentin interdiffusion zone with different dentin adhesive systems. *J Dent Res.* 1992 Aug;71(8):1530-40.

41 Breschi L, Mazzoni A, Ruggeri A, Cadenaro M, Di Lenarda R, De Stefano Dorigo E. Dental adhesion review: aging and stability of the bonded interface. *Dent Mater.* 2008 Jan;24(1):90-101.

42 De Munck J, Van Meerbeek B, Yoshida Y, Inoue S, Vargas M, Suzuki K, et al. Four-year water degradation of total-etch adhesives bonded to dentin. *J Dent Res*. 2003 Feb;82(2):136-40.

43 Perdigão J. New developments in dental adhesion. *Dent Clin North Am*. 2007 Apr;51(2):333-57, viii.

44 Katz JL, Bumrerraj S, Dreyfuss J, Wang Y, Spencer P. Micromechanics of the dentin/adhesive interface. *J Biomed Mater Res*. 2001;58(4):366-71.

45 Hashimoto M, Ohno H, Kaga M, Endo K, Sano H, Oguchi H. In vivo degradation of resin-dentin bonds in humans over 1 to 3 years. *J Dent Res*. 2000 Jun;79(6):1385-91.

46 Prisco D, De Santis R, Mollica F, Ambrosio L, Rengo S, Nicolais L. Fiber post adhesion to resin luting cements in the restoration of endodontically-treated teeth. *Oper Dent*. 2003 Sep-Oct;28(5):515-21.

47 De Santis R, Prisco D, Apicella A, Ambrosio L, Rengo S, Nicolais L. Carbon fiber post adhesion to resin luting cement in the restoration of endodontically treated teeth. *J Mater Sci Mater Med*. 2000 Apr;11(4):201-6.

48 Goracci C, Fabianelli A, Sadek FT, Papacchini F, Tay FR, Ferrari M. The contribution of friction to the dislocation resistance of bonded fiber posts. *J Endod*. 2005 Aug;31(8):608-12.

49 Roydhouse RH. Punch-shear test for dental purposes. *J Dent Res*. 1970 Jan-Feb;49(1):131-6.

50 Kurtz JS, Perdigão J, Geraldeli S, Hodges JS, Bowles WR. Bond strengths of tooth-colored posts, effect of sealer, dentin adhesive, and root region. *Am J Dent*. 2003 Sep;16 Spec No:31A-6A.

51 Sinhorette MA, Consani S, De Goes MF, Sobrinho LC, Knowles JC. Influence of loading types on the shear strength of the dentin-resin interface bonding. *J Mater Sci Mater Med*. 2001 Jan;12(1):39-44.

- 52 Sano H, Shono T, Sonoda H, Takatsu T, Ciucchi B, Carvalho R, et al. Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength--evaluation of a micro-tensile bond test. *Dent Mater.* 1994 Jul;10(4):236-40.
- 53 McDonough WG, Antonucci JM, Dunkers JP. Interfacial shear strengths of dental resin-glass fibers by the microbond test. *Dent Mater.* 2001 Nov;17(6):492-8.
- 54 Shimada Y, Kikushima D, Tagami J. Micro-shear bond strength of resin-bonding systems to cervical enamel. *Am J Dent.* 2002 Dec;15(6):373-7.
- 55 Shimada Y, Senawongse P, Harnirattisai C, Burrow MF, Nakaoki Y, Tagami J. Bond strength of two adhesive systems to primary and permanent enamel. *Oper Dent.* 2002 Jul-Aug;27(4):403-9.
- 56 Perdigão J, Geraldeli S, Carmo AR, Dutra HR. In vivo influence of residual moisture on microtensile bond strengths of one-bottle adhesives. *J Esthet Restor Dent.* 2002;14(1):31-8.
- 57 Shimada Y, Tomimatsu N, Suzuki T, Uzzaman MA, Burrow MF, Tagami J. Shear bond strength of tooth-colored indirect restorations bonded to coronal and cervical enamel. *Oper Dent.* 2005 Jul-Aug;30(4):468-73.
- 58 Shimada Y, Tagami J. Effects of regional enamel and prism orientation on resin bonding. *Oper Dent.* 2003 Jan-Feb;28(1):20-7.
- 59 Shimada Y, Iwamoto N, Kawashima M, Burrow MF, Tagami J. Shear bond strength of current adhesive systems to enamel, dentin and dentin-enamel junction region. *Oper Dent.* 2003 Sep-Oct;28(5):585-90.
- 60 Toba S, Veerapavati W, Shimada Y, Nikaido T, Tagami J. Micro-shear bond strengths of adhesive resins to coronal dentin versus the floor of the pulp chamber. *Am J Dent.* 2003 Sep;16 Spec No:51A-6A.
- 61 Griffith AA. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil Trans Roy Soc London.* 1920;A221:163-98.
- 62 Della Bona A, van Noort R. Shear vs. tensile bond strength of resin composite bonded to ceramic. *J Dent Res.* 1995 Sep;74(9):1591-6.

- 63 Gwinnett AJ. A new method to test the cohesive strength of dentin. *Quintessence Int.* 1994 Mar;25(3):215-8.
- 64 Davidson CL, Abdalla AI, De Gee AJ. An investigation into the quality of dentine bonding systems for accomplishing a durable bond. *J Oral Rehabil.* 1993 May;20(3):291-300.
- 65 Van Meerbeek B, Willems G, Celis JP, Roos JR, Braem M, Lambrechts P, et al. Assessment by nano-indentation of the hardness and elasticity of the resin-dentin bonding area. *J Dent Res.* 1993 Oct;72(10):1434-42.
- 66 Mecholsky JJ, Jr. Fracture mechanics principles. *Dent Mater.* 1995 Mar;11(2):111-2.
- 67 Misra A, Spencer P, Marangos O, Wang Y, Katz JL. Micromechanical analysis of dentin/adhesive interface by the finite element method. *J Biomed Mater Res.* 2004 Jul 15;70B(1):56-65.
- 68 Chen CS, Hsu ML, Chang KD, Kuang SH, Chen PT, Gung YW. Failure analysis: enamel fracture after debonding orthodontic brackets. *Angle Orthod.* 2008 Nov;78(6):1071-7.
- 69 Knox J, Jones ML, Hubsch P, Middleton J, Kralj B. An evaluation of the stresses generated in a bonded orthodontic attachment by three different load cases using the Finite Element Method of stress analysis. *J Orthod.* 2000 Mar;27(1):39-46.
- 70 Valletta R, Prisco D, De Santis R, Ambrosio L, Martina R. Evaluation of the debonding strength of orthodontic brackets using three different bonding systems. *Eur J Orthod.* 2007 Dec;29(6):571-7.
- 71 Xavier TA, Meira JBC, Rodrigues FP, Lima RG, Ballester RY. Finite element analysis of shear versus torsion adhesive strength tests for dental resin composites. *J Adhes Sci Technol.* 2009;23(10-11):1575-89.
- 72 Retief DH, Mandras RS, Russell CM, Denys FR. Extracted human versus bovine teeth in laboratory studies. *Am J Dent.* 1990 Dec;3(6):253-8.

73 Katona TR, Long RW. Effect of loading mode on bond strength of orthodontic brackets bonded with 2 systems. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006 Jan;129(1):60-4.

74 Quinn GD. *Fractography of ceramics and glasses.* Washington: National Institute of Standards and Technology; 2007. 546 p.

75 Davis DM, Waters NE. Fractography of a bis-GMA resin. *J Dent Res.* 1989 Jul;68(7):1194-8.

76 Caycik S, Jagger RG. The effect of cross-linking chain length on mechanical properties of a dough-molded poly(methylmethacrylate) resin. *Dent Mater.* 1992 May;8(3):153-7.

77 Lee SY, Greener EH. Effect of excitation energy on dentine bond strength and composite properties. *J Dent.* 1994 Jun;22(3):175-81.

78 Shimaoka AM. *Influência da delimitação da área adesiva no ensaio mecânico de microcisalhamento [dissertação].* São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2007.

79 Soderholm KJM. Correlation of in vivo and in vitro performance of adhesive restorative materials - a report of the Asc Md156 Task Group on test methods for the adhesion of restorative materials. *Dent Mater.* 1991 Apr;7(2):74-83.

APÊNDICE A – Valores individuais de tensão de ruptura (MPa) e frequência de cada tipo de fratura

Ensaio	Cilindro	Adesivo	Valores individuais de tensão de ruptura (MPa) e tipo de fratura																	Frequência de fraturas					
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ade	Coe	Mis										
MiTo	F	A	50,1	mis	42,9	ade	45,8	coe	26,8	ade	51,0	mis	30,0	mis	25,0	ade	27,9	mis	50,6	coe	30,2	ade	4	2	4
		M	42,0	coe	44,1	coe	40,7	coe	32,0	ade	45,0	coe	27,4	mis	30,3	mis	37,3	ade	55,8	coe	40,7	coe	2	6	2
		S	44,6	coe	48,1	coe	53,6	coe	41,3	coe	39,4	coe	41,2	coe	35,8	coe	44,4	coe	35,1	coe	42,2	coe	0	10	0
	H	A	26,5	ade	48,4	coe	46,4	coe	27,4	ade	31,4	ade	25,8	ade	27,1	ade	26,4	ade	53,4	coe	28,2	ade	7	3	0
		M	37,1	mis	55,1	coe	42,1	mis	42,6	coe	31,1	ade	30,5	ade	32,6	ade	29,0	ade	30,5	ade	41,1	coe	5	3	2
		S	38,6	coe	45,3	coe	36,2	coe	41,7	coe	43,9	coe	34,8	coe	42,4	coe	44,0	coe	41,3	coe	43,5	coe	0	10	0
To	F	A	11,8	ade	13,1	ade	26,0	mis	35,2	mis	22,2	coe	10,8	ade	29,9	ade	5,20	ade	20,0	ade	11,6	ade	7	1	2
		M	18,9	ade	33,7	ade	24,4	ade	27,0	mis	39,5	mis	20,7	ade	31,6	ade	25,2	ade	29,6	mis	26,6	coe	6	1	3
		S	34,5	coe	35,8	coe	43,4	coe	31,2	coe	45,0	coe	36,7	coe	34,8	coe	42,9	coe	46,3	coe	33,0	coe	0	10	0
	H	A	26,3	coe	28,4	mis	34,4	coe	25,5	coe	26,9	mis	32,8	coe	30,1	mis	26,3	ade	31,1	coe	32,2	coe	1	6	3
		M	23,7	coe	25,9	mis	32,8	coe	36,4	coe	32,4	mis	29,0	coe	37,4	mis	31,3	mis	25,7	mis	31,3	mis	0	4	6
		S	40,7	coe	35,5	coe	33,1	coe	31,8	coe	35,4	coe	34,6	coe	35,3	coe	36,8	coe	37,6	coe	34,3	coe	0	10	0
	V	A	22,4	ade	24,1	ade	38,7	mis	35,5	mis	30,5	mis	18,7	ade	23,3	mis	46,8	coe	31,1	ade	46,8	coe	4	2	4
		M	17,5	ade	7,20	ade	4,90	ade	26,0	ade	6,40	ade	13,4	ade	7,30	ade	18,9	ade	21,5	ade	3,80	ade	10	0	0
		S	30,2	mis	46,2	coe	40,4	coe	38,6	mis	28,8	mis	36,6	coe	44,7	coe	37,4	coe	31,1	coe	40,1	coe	0	7	3
MiCis	F	A	8,30	ade	20,4	coe	6,30	ade	8,50	ade	11,1	ade	8,60	ade	16,8	ade	21,3	ade	11,7	ade	17,6	ade	9	1	0
		M	10,3	ade	12,0	ade	21,7	mis	17,6	ade	21,4	ade	14,9	ade	18,5	ade	22,4	ade	16,9	ade	16,7	ade	9	0	1
		S	25,8	mis	18,3	ade	23,9	ade	23,0	ade	25,1	ade	18,3	ade	23,7	ade	25,5	ade	21,9	ade	26,2	mis	8	0	2
	H	A	3,60	ade	10,6	ade	21,4	ade	12,0	mis	13,3	ade	16,0	ade	23,8	ade	11,8	ade	8,30	ade	14,9	ade	9	0	1
		M	16,70	ade	9,50	ade	11,1	ade	15,1	ade	18,3	ade	18,8	ade	13,8	ade	25,0	ade	19,0	ade	16,7	ade	10	0	0
		S	26,9	mis	20,6	ade	31,0	coe	30,9	mis	33,0	coe	28,1	mis	21,3	coe	21,8	coe	27,9	coe	24,6	coe	1	6	3
Cis	F	A	6,40	ade	5,30	coe	8,00	ade	8,00	ade	6,30	ade	11,0	ade	7,30	ade	10,8	ade	7,50	ade	13,2	coe	8	2	0
		M	10,9	ade	15,2	ade	13,5	ade	14,1	ade	12,9	ade	11,9	ade	8,00	ade	12,0	ade	11,0	ade	8,70	ade	10	0	0
		S	19,0	coe	15,6	coe	20,5	coe	14,9	coe	21,9	coe	14,6	coe	14,6	coe	15,2	coe	15,8	coe	15,2	coe	0	10	0
	H	A	2,80	ade	5,40	ade	4,90	ade	5,80	ade	6,60	ade	8,70	ade	11,9	coe	14,6	mis	10,4	ade	7,20	ade	8	1	1
		M	13,7	ade	7,00	ade	7,70	ade	11,7	ade	12,6	ade	9,50	ade	12,0	ade	12,1	ade	13,4	ade	12,6	ade	10	0	0
		S	16,2	coe	21,9	coe	12,9	coe	18,5	coe	15,5	coe	21,8	coe	15,4	coe	19,8	mis	21,7	coe	15,3	coe	0	9	1





# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)