

TESTES MECÂNICOS PARA A AVALIAÇÃO LABORATORIAL DA UNIÃO RESINA/DENTINA

MECHANICAL TESTS FOR LABORATORY EVALUATION OF RESIN/DENTIN BONDING

Fernanda Cristina Pimentel GARCIA

Paulo Henrique Perlatti D'ALPINO

Doutorandos em Dentística Restauradora da Faculdade de Odontologia de Bauru - USP.

Raquel Sano Suga TERADA

Prof. Dra. do Departamento de Dentística Restauradora da Faculdade de Odontologia de Maringá - PR.

Ricardo Marins de CARVALHO

Prof. Associado do Departamento de Dentística, Endodontia e Materiais Dentários da Faculdade de Odontologia de Bauru - USP.

A obtenção de uma união forte e durável entre os materiais restauradores e a estrutura dentária é de fundamental importância para a longevidade dos procedimentos restauradores. Embora os testes laboratoriais não reproduzam fielmente as condições que ocorrem clinicamente, eles representam um importante parâmetro de análise, uma vez que apresentando um eficiente desempenho in vitro, provavelmente resultará em uma melhor performance clínica. Há uma série de testes mecânicos para avaliação da união adesiva dente/material restaurador, sendo que cada um deles apresenta características e parâmetros próprios. Objetivou-se com este artigo, informar e comentar as diversas modalidades científicas de avaliação da interface adesiva dente/restauração. O assunto é de interesse dos pesquisadores que buscam o entendimento dos variados testes mecânicos que serão discutidos e analisados no presente trabalho.

UNITERMOS: Adesivos dentinários; Biomecânica; Dentina.

INTRODUÇÃO

A busca por um material restaurador adesivo às estruturas dentárias reflete-se na constante introdução de novos produtos no mercado odontológico. Embora essa renovação freqüente de produtos seja uma conseqüência da evolução tecnológica e aprimoramento dos conhecimentos, apresenta-se também como um desafio aos profissionais que se encarregam de avaliar esses produtos. A velocidade de produção de dados analíticos relevantes, principalmente clínicos, nem sempre acompanha a velocidade de renovação e substituição dos produtos. Os trabalhos clínicos consomem um maior tempo para que os resultados sejam estabelecidos e demandam uma análise mais complexa de fatores associados. Não é incomum encontrarmos relatos de estudos clínicos que empregam materiais não disponíveis no mercado no momento da publicação do estudo. Os estudos

laboratoriais são imediatos, porém, não são completos e não permitem uma avaliação global e respectiva extrapolação direta para a previsão do comportamento clínico dos materiais. Os testes mecânicos laboratoriais empregados para a avaliação da união de sistemas adesivos à estrutura dentária, geralmente, se fundamentam na aplicação de forças de deslocamento sobre a união, na tentativa de simular os mesmos esforços sofridos pela restauração durante sua função no meio bucal. As forças e tensões exercidas sobre os dentes e restaurações na clínica são, entretanto, de natureza complexa, portanto, nenhum teste simula adequadamente as forças intrabucais¹⁵. Dentro desse contexto, a previsão da performance clínica de materiais, baseada nas suas propriedades, parece ser uma missão complexa, senão impossível. Retief¹⁵ (1991) considera, entretanto, que a avaliação laboratorial de sistemas adesivos é importante para uma análise prévia da necessidade e até da

conveniência de se levar a efeito um estudo clínico, muito mais oneroso e dispendioso em termos de tempo. Para o autor, se o sistema adesivo não se mostrar promissor nos testes laboratoriais, dificilmente o será no desempenho de sua função no meio bucal. Os testes laboratoriais são particularmente interessantes aos fabricantes que, em um curto espaço de tempo, podem avaliar seus materiais, corrigir deficiências e implementar melhorias.

Diante do número razoável de testes disponíveis para a avaliação da união resina/dente, cabe ao pesquisador conhecer as vantagens e limitações para que selecione o mais adequado para testar as hipóteses levantadas em seu projeto. Este trabalho faz uma apresentação e discussão dos testes mecânicos mais rotineiramente empregados para a avaliação da resistência de união de materiais adesivos à estrutura dentária.

Testes Mecânicos

Dentre os vários testes mecânicos que estão disponíveis para se avaliar a união resina/dente, destacam-se aqueles que se baseiam na aplicação de uma força de deslocamento dos dois substratos, diretamente na interface ou à distância desta. Os testes de tração e cisalhamento (Figura 1) estão entre os mais utilizados, por serem menos complexos e de fácil preparação dos corpos-de-prova. Outros testes

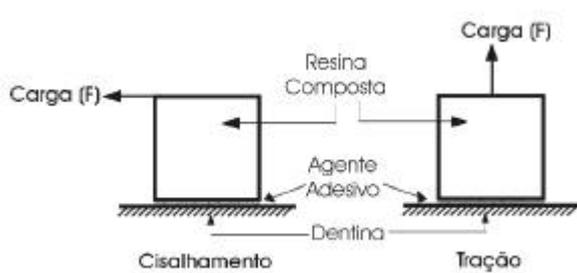


FIGURA 1 - Ilustrações demonstrando comparativamente os testes de cisalhamento e de tração, com a localização da aplicação da carga

objetivam mensurar a quantidade de energia necessária para provocar a fratura da união ou medir

a tenacidade* da mesma. Dispomos ainda do chamado “blister test”, empregado por Williams et al.³¹ (1973), baseado na aplicação de uma pressão crescente de ar na união, através de um orifício realizado no substrato. O valor da pressão necessário para romper a união é aplicado à equação de Griffith⁵ (1920) e transformada para valores de resistência adesiva. Hotz et al.⁶ (1977) empregaram o teste de centrifugação, que se baseia na aplicação de uma determinada velocidade periférica ao corpo-de-prova e as forças de tração geradas induziriam a ruptura da união, permitindo o cálculo da resistência adesiva. Ambos, o “blister test” e o teste de centrifugação, não são rotineiramente empregados na avaliação da união de materiais adesivos à estrutura dentária, pois são de preparação complexa e de difícil interpretação. Serão abordados, portanto, os métodos mais comumente empregados na pesquisa odontológica.

Testes de Tração

Em um teste de tração, a união é estressada por uma força aplicada perpendicularmente à interface adesiva (Figura 2). Dessa maneira, um dos principais problemas com esse modo de teste é a manutenção do alinhamento do corpo-de-prova durante o ensaio, evitando a orientação inadequada da força devido a uma geometria interfacial incorreta. Devido a essa preocupação, Kemper, Kilian⁹ (1976) desenvolveram um dispositivo que, acoplado à máquina de testes, permite a reprodutibilidade de ensaios sempre dentro do requerido alinhamento. O dispositivo é preconizado e sugerido pela ISO TR 11405⁷ como método padrão a ser empregado nos testes de tração. Entretanto, e a despeito do alerta e constantes recomendações encontradas na literatura^{13,15,21,32}, a falta de padronização nos testes de resistência adesiva é rotina nos diferentes estudos. Isso se deve, principalmente, à falta de similaridade de dispositivos e equipamentos disponíveis nos diversos laboratórios de pesquisa.

A escolha do dispositivo e do método para a realização dos testes de tração não é a única variável frequentemente observada nos estudos. A delimitação da área adesiva é certamente uma

* Tenacidade. Este termo foi empregado como tradução do Inglês “Fracture Toughness”. O termo “toughness”, em inglês, representa mecanicamente o quanto que um corpo resiste à tensão após ultrapassar o limite de proporcionalidade. Na representação gráfica de módulo de elasticidade, a propriedade de “toughness” do material é derivada da medida da área sob a curva de deformação em função do esforço. Na língua inglesa, os termos “toughness” e “strength” têm significados mecânicos distintos. Em Português, o termo “toughness” pode ser traduzido por tenacidade.

variável ainda mais relevante, e esta influencia diretamente os resultados, qualquer que seja o tipo de teste selecionado. Erickson et al.⁴ (1989) compararam a resistência adesiva do sistema Scotchbond 2 à dentina, variando a dimensão da área adesiva. Foram encontrados valores mais elevados de resistência quando a área adesiva era menor. Apesar do trabalho de Erickson et al.⁴ (1989) ter sido pioneiro em demonstrar a relação entre resistência adesiva e área de união, somente em 1994 o assunto voltou a ser importante para os testes de resistência adesiva, com o surgimento da técnica de microtração.

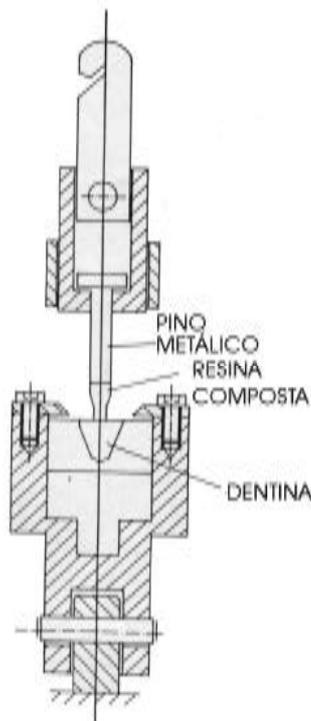


FIGURA 2- Representação esquemática de um teste de tração (Adaptado de Van Noort et al.²⁶, 1991)

Teste de Microtração

A relação inversamente proporcional da área adesiva com a resistência de união foi demonstrada por Sano et al.¹⁷ (1994) e Carvalho et al.² (1994), empregando uma metodologia denominada de microtração (Figura 3). Esta técnica permite avaliar

a resistência adesiva dentro de um largo espectro de dimensões de área transversal (0,3 a 15,0 mm², por exemplo). Um importante achado desses trabalhos foi a demonstração de que a redução da área de teste (< 2,0 mm²), resultava proporcionalmente em valores de resistência adesiva superiores e o modo de fratura dos espécimes ocorria quase que na sua totalidade de forma adesiva, ou seja, não se observavam fraturas coesivas nos substratos. No estudo de Sano et al.¹⁷ (1994), quando se empregou o sistema adesivo Clearfil Liner Bond 2, em áreas adesivas entre 7,0 - 12,0 mm², a resistência de união encontrada variou de 15 a 20 MPa e algumas falhas coesivas em dentina foram verificadas. Quando se reduziu a área adesiva para valores inferiores a 2,0 mm², os valores de resistência adesiva aumentaram para 50-60 MPa, e somente falhas adesivas foram observadas**. A interpretação dos resultados dos testes de microtração baseia-se na teoria de Griffith⁵ (1920),

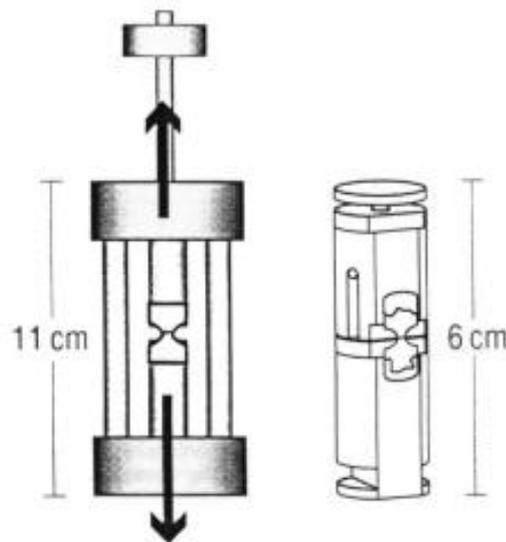


FIGURA 3- Ilustração esquemática de dispositivos para testes de microtração (Adaptado de Passhley et al.¹³, 1999).

que demonstra que a resistência coesiva de corpos sólidos diminui com o aumento do volume e da área de secção transversa. Isso se deve ao fato de que espécimes de dimensões maiores contêm mais defeitos estruturais do que espécimes menores. Como a interface adesiva não é uniforme, irregularidades de superfície, presença de bolhas e

** A determinação do modo de fratura é variável entre diferentes estudos e sujeita ao modo de análise. Enquanto alguns empregam visualização direta ao olho nu, outros a analisam sob diferentes magnitudes, inclusive empregando MEV e MET. A interpretação do modo de fratura pode, entretanto, variar de acordo com a magnitude empregada para a visualização.

variações decorrentes do próprio procedimento de aplicação do sistema adesivo estão presentes. Assim, a menor resistência adesiva encontrada em áreas adesivas maiores se deve a uma maior quantidade de defeitos presentes, tanto na interface quanto nos substratos, determinando pontos de concentração e propagação de tensões que causam a falha da união em valores inferiores. Alguns estudos que utilizaram áreas adesivas maiores que 2,0 mm² (7-11mm²), freqüentemente reportaram um grande número de falhas coesivas em dentina, principalmente quando o teste empregado é o de cisalhamento, e encontraram valores de “resistência de união” em torno de 20-25 MPa. Em função desses achados, os autores interpretam que a resistência de união ultrapassa a resistência coesiva da dentina. Em um estudo de Sano et al.¹⁶ (1994) sobre as propriedades mecânicas das dentinas humana e bovina, demonstrou-se valores de resistência coesiva dos substratos em torno de 100 MPa. Portanto, a fratura da dentina com cargas aparentemente inferiores, observada nos testes de resistência adesiva, pode ser um evento determinado pelo tipo de teste empregado e causa, muitas vezes, interpretações equivocadas dos resultados.

Segundo Pashley et al.¹³ (1995), uma das principais vantagens do teste de microtração é a possibilidade de determinação do local de falhas quase que exclusivamente adesivas na interface, permitindo uma análise da real resistência de união entre o material e a estrutura dentária. Entre outras vantagens, podemos citar a possibilidade de obtenção de vários espécimes de um único dente, permitindo comparações intra e interdentas e a possibilidade de avaliação da resistência adesiva em áreas diminutas, o que favorece a mensuração da resistência adesiva em substratos clinicamente relevantes como dentina afetada por cárie ou dentina esclerótica³². O tamanho reduzido dos espécimes facilita a análise completa das superfícies em microscopia eletrônica de varredura; entre outras. A técnica, entretanto, é trabalhosa e requer treinamento prévio do operador além de necessitar de equipamento especial ou outros adaptados de acordo com a disponibilidade de cada laboratório. Pashley et al.¹⁴ (1999), num trabalho de revisão, descreveram os testes de microtração e suas modificações, visando um melhor resultado no problema específico a ser investigado. Os autores ressaltaram a versatilidade desse tipo de teste, a qual não pode ser obtida com os métodos convencionais e, apesar de apresentar uma metodologia mais elaborada, representa um grande suporte para

análise da resistência adesiva dos materiais restauradores ao longo do tempo.

Embora a técnica tenha sido desenvolvida há quase uma década, um único estudo recente procurou aplicar um modelo de análise por elemento finito para proporcionar um melhor entendimento da distribuição de tensões ao longo do espécime, quando a microtração é empregada (Meira et al.¹¹, 2002). Segundo os autores, fatores como a geometria do recorte e modo de prensão dos espécimes no dispositivo de teste podem influenciar significativamente os resultados do teste. Mais estudos são necessários nesse campo de investigação para que a técnica possa ser aperfeiçoada.

Em função de suas vantagens operacionais e, principalmente, dos aspectos mecânicos relacionados à distribuição das tensões durante o teste, a técnica de microtração vem sendo considerada como o método mais confiável e fidedigno para a avaliação da união de sistemas adesivos com a estrutura dentária, principalmente à dentina²⁸.

Testes de cisalhamento

O teste de cisalhamento é um dos mais simples e amplamente utilizado. Neste teste, a união é rompida por uma força aplicada paralelamente à interface adesiva. Para realização deste ensaio, espécimes em forma de cilindro e com diâmetro variando de 3 a 4mm são necessários. Este espécime é unido a um substrato plano por meio de um adesivo. Para se obter o valor da resistência adesiva, a carga é aplicada neste conjunto (na interface) por meio de uma ponta, que está acoplada em uma máquina de ensaio universal. Assim, pela divisão da força aplicada pela área adesiva total obter-se-á a resistência de união induzida pela tensão de cisalhamento. O teste pode ser realizado através de uma haste metálica ou uma alça de fio de aço, justapostas o mais próximo possível da interface adesiva. A ISO TR 11405 recomenda o dispositivo proposto por Noguchi et al.¹² (1982), que consiste de uma base sólida para a fixação do espécime e uma barra deslizante adaptada nessa base para o carregamento da carga (Figura 4).

Uma das críticas freqüentemente direcionadas aos testes de cisalhamento é que o mesmo induz a união a falhar em um plano determinado pelo teste e não pelas próprias características da interface adesiva. Em outras palavras, no teste de cisalhamento, a fratura se inicia no ponto onde a

haste aplica uma força normal e, portanto, a fratura nem sempre ocorre no ponto mais fraco, como sugerido por Watanabe, Nakabayashi³⁰ (1994). Smith et al.²⁰ (1994) comentaram que os testes de cisalhamento provavelmente avaliam a distribuição dos defeitos introduzidos na interface dente/restauração durante o preparo da amostra, ao invés de avaliar a verdadeira resistência de união. Além disso, este teste apresenta várias limitações de padronização, pois dispõe de diferentes formas de pontas aplicadoras de tensão, além da possível ocorrência de variação na distância da mesma em relação à base (material). Quanto maior esta distância, menor seria a resistência ao cisalhamento na interface analisada. Desta forma, este teste apresenta imperfeições em seu desenho, uma vez que apenas a padronização dos procedimentos não é suficiente para contornar as suas deficiências intrínsecas. Embora sujeito a críticas, os testes de cisalhamento são os testes mais freqüentemente empregados pelos autores para a avaliação da resistência adesiva de materiais à estrutura dentária. Em um levantamento de 50 trabalhos publicados, Al-Salehi, Burke¹ (1997) verificaram que 80% empregaram os testes de cisalhamento, nas suas diversas formas, para a avaliação da resistência adesiva. Isso provavelmente se explique pela simplicidade do método e facilidade de adequação

aos diferentes equipamentos disponíveis nos diversos laboratórios.

Testes de Micro-Cisalhamento

Seguindo a mesma linha de raciocínio dos testes de micro-tração, recentemente foi descrito um teste de micro-cisalhamento (Shimada et al.¹⁹). Neste teste, a mesma configuração empregada no teste de cisalhamento convencional é empregada, porém, trabalha-se com áreas reduzidas de adesão. A redução da área adesiva confere a possibilidade de se testar a união em vários pontos sobre uma mesma superfície dentinária, permitindo, à semelhança do que ocorre com o teste de microtração, avaliar-se a variação regional de resistência adesiva. A relação entre área de união e respectivo valor de resistência adesiva também se aplica ao teste de micro-cisalhamento, ou seja, os valores aparentes de resistência adesiva tendem a ser maiores do que os observados nos testes convencionais que empregam áreas adesivas maiores. A redução da área adesiva, entretanto, não modifica a configuração do teste, portanto, acredita-se que geração de tensões não uniformes que se concentram no substrato adjacente à interface adesiva também ocorra, porém, em menor magnitude. Isso pode trazer vantagens para o teste, pois se espera um menor número de fraturas coesivas no substrato. Diferentemente do teste de microtração, não há necessidade de se realizar cortes (trimming) dos espécimes, tornando-o mais simples e fácil de ser realizado, especialmente quando se tratar de materiais odontológicos mais friáveis, como os cimentos de ionômero de vidro. O dispositivo utiliza um disco de dentina ou esmalte no qual são aderidos cilindros de materiais odontológicos em dimensões em torno de 1 mm de diâmetro. A célula de carga é alinhada paralelamente à interface adesiva para que ocorra uma aplicação da força o mais próximo desta união, assegurando uma correta orientação das forças de cisalhamento.

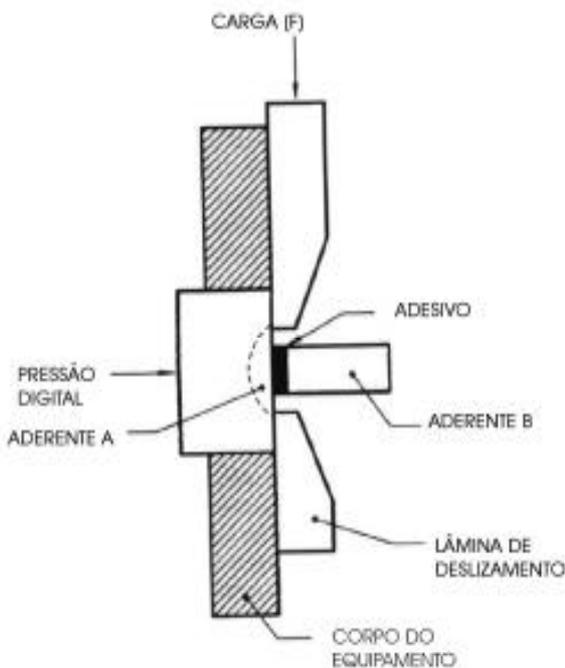


FIGURA 4- Diagrama esquemático do teste de cisalhamento seguindo as determinações da ISO TR 11405⁷, de 1994

Nanoindentação (“Nanoindentation”)

O teste de nanoindentação é um método que se fundamenta na aplicação de uma carga estática sobre um sólido, através de pontas de formato e dimensões conhecidas, provocando uma depressão no substrato, a qual, depois de analisada por parâmetros específicos, fornece informações sobre as propriedades do sólido. O método é geralmente empregado para se avaliar dureza superficial e módulo de elasticidade e, devido à reduzida dimensão

da ponta endentadora (Figura 5), permite análises em áreas reduzidas como a interface adesiva. Van Meerbeek et al.²⁷ (1993) empregaram esse método para investigar a interface adesiva formada por quatro sistemas adesivos sobre a dentina, empregando uma carga de 1 mN e pontas endentadoras triangulares diminutas, monitoradas por computador. Segundo os autores, a técnica de nanoendentação apresenta algumas vantagens em relação aos métodos de microdureza convencionais como Vickers e Knoop. A principal delas é a possibilidade de se posicionar adequadamente a ponta endentadora com uma precisão de 0,2 nm. A sensibilidade de profundidade com precisão também de 0,2 nm e resolução de carga de aproximadamente 0,2 μ N, permitem que áreas relativamente estreitas, como a camada híbrida, sejam analisadas. A análise das propriedades mecânicas da interface adesiva, particularmente o módulo de elasticidade, permitiu demonstrar que esta tem uma capacidade de deformação que poderia ser suficiente para atenuar as tensões geradas pela contração de polimerização da resina composta, preservando, ao menos em teoria, a união com a dentina. Os dados gerados por Van Meerbeek et al.²⁷ (1993), empregando a técnica de nanoendentação diretamente sobre a interface adesiva, serviram de sustentação para a aceitação de que a zona desmineralizada pode não ser completamente infiltrada pelos agentes adesivos durante a formação da camada híbrida. O menor módulo de elasticidade observado para a camada híbrida em comparação com a dentina subjacente e a resina, somente poderia ser explicado pela presença de fibras colágenas desmineralizadas e não protegidas pelo agente resinoso.

Os resultados de testes de nanoendentação

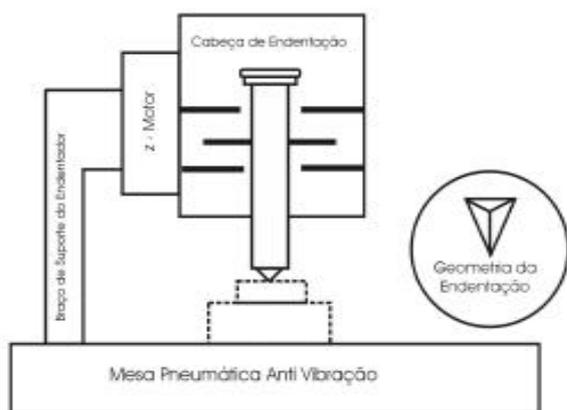


FIGURA 5- Representação esquemática de um aparato para a realização de teste de nanoendentação (Adaptado de Van Meerbeek et al.²⁵, 1993)

devem, entretanto, ser analisados com cautela. Apesar de ser de tamanho reduzido, a ponta ativa pode, inadvertidamente, tocar substratos adjacentes com diferentes propriedades, incorporando erros de leitura e interpretação nas análises. Isso deve ter ocorrido neste estudo porque seus valores de módulo de elasticidade da camada híbrida foram bem superiores aos encontrados por Sano et al.¹⁸ (1995), que empregaram técnicas convencionais (tração) para determinação do módulo de elasticidade da dentina infiltrada com resina.

Este teste permite a avaliação das propriedades mecânicas da interface adesiva *in situ*, entretanto, o emprego de pontas endentadoras ainda menores parece ser necessário para se determinar as propriedades de cada camada componente da interface adesiva. A técnica de nanoendentação pode ser acoplada a um microscópio de força atômica, com esse equipamento, pode-se produzir endentações na dentina suficientemente pequenas para medir separadamente as propriedades da dentina peritubular e intertubular. A técnica é promissora e merece ser aperfeiçoada, para que, num futuro próximo, possibilite conhecer as propriedades mecânicas individuais de fibras colágenas, por exemplo.

Tenacidade de fratura

Neste tipo de teste, mede-se o valor da energia de fratura (K_{Ic}), o qual reflete a capacidade de um material, ou interface, de resistir ao início e à propagação da ruptura. Determinando-se o K_{Ic} da interface é possível definir a capacidade da união de resistir à fratura sob uma determinada carga conhecida. Em outras palavras, quanto maior a energia necessária para promover a ruptura, melhor a qualidade da união. Alguns pesquisadores têm empregado esse teste para a avaliação da união de sistemas adesivos à dentina^{10,22,23}. Tam, Pilliar²² (1993), avaliaram a união dos sistemas adesivos Scotchbond 2 (3M), Scotchbond MP (3M) e All Bond 2 (Bisco) em combinação com as resinas compostas P-50 (3M) e Bis-Fil (Bisco) à dentina, através dos testes de tração convencional e tenacidade de fratura. Embora os resultados relativos, para os materiais em ambos os testes, tenham sido semelhantes, não conseguiram demonstrar uma correlação entre os achados dos dois testes. Portanto, ressaltaram que o teste de tenacidade e o teste de tração são dois parâmetros distintos de avaliação da interface adesiva e necessariamente não seguem os mesmos critérios

de fratura. Estes mesmos autores²⁴ avaliaram, em estudo recente, o comportamento da interface adesiva através da análise da rigidez interfacial e a sua resistência à fratura. Puderam verificar que houve uma correlação entre o teste de tenacidade e a rigidez interfacial avaliada, o que quer dizer que, uma adesão perfeita, deverá resultar em uma camada altamente resistente, formando uma união efetiva entre dentina e resina composta. Devido à ocorrência de falhas coesivas em dentina, observadas em testes de cisalhamento, quando se avaliam adesivos de última geração, Tantbirojn et al.²⁵ (2000) verificaram que, como os adesivos mais modernos apresentam altos valores de resistência adesiva, deve-se interpretar mais criteriosamente os resultados. Estes autores avaliaram e compararam o teste de cisalhamento com teste de tenacidade interfacial (baseado no trabalho de Lin, Douglas¹⁰, 1994) para avaliação da resistência adesiva, e concluíram que o teste de tenacidade foi a metodologia com maior validade para se avaliar adesivos de alta performance. Na Figura 6 estão representados ambos os testes.

Análise da distribuição de tensões na interface

Ao selecionar um teste mecânico para avaliar a resistência adesiva de um determinado material aos substratos dentários, parte-se do pressuposto que a carga aplicada será transmitida exclusivamente à interface adesiva. Na realidade, ao se aplicar a carga, quer seja de tração, cisalhamento ou outra forma, esta certamente se distribuirá pelos substratos (aderente, aderido e adesivo) e sofrerá alterações influenciadas pelas características físicas de cada um deles gerando uma propagação não uniforme das tensões nos corpos-de-prova. A distribuição da carga e propagação das tensões são influenciadas por vários fatores como: tipo de substrato, tipo de teste, tamanho dos corpos-de-prova, volume de

material, extensão da área adesiva, local, velocidade e direção de aplicação da carga, entre outros.

O método de análise por elemento finito tem sido empregado como auxiliar para a visualização e interpretação da distribuição e propagação das tensões geradas em corpos-de-prova sob uma determinada carga. Basicamente, constrói-se um modelo experimental que simula as características de um determinado teste (tração ou cisalhamento, por exemplo), empregando materiais de composição, propriedades conhecidas e de forma e dimensões definidas. Esse modelo é conectado a um computador por elementos sensores e submetido a um carregamento de força igual aquele empregado no teste propriamente dito. As tensões geradas no modelo durante o “teste” são percebidas pelos sensores, analisadas pelo computador e aplicadas na tela sobre a imagem do modelo. Isso permite a localização, no modelo, dos pontos onde as tensões estão sendo geradas. As análises podem ser realizadas em planos bi e tridimensionais.

Poucos trabalhos na literatura têm empregado a análise por elemento finito especificamente para testes de resistência adesiva entre materiais restauradores e a estrutura dentária²⁹. Van Noort et al.²⁹ avaliaram a distribuição e propagação das tensões em testes simulados de tração entre corpos-de-prova cilíndricos e a dentina. Verificaram que, aplicando-se uma carga constante, a respectiva propagação das tensões na interface dente/restauração não era uniforme. Observou-se que a maior concentração de estresses ocorria nos ângulos formados entre a superfície do aderente e da circunferência do cilindro aderido a ela. Reduzindo-se a altura do cilindro, diminuía-se a concentração de forças nos ângulos, aumentando-se no centro do corpo-de-prova. Analisando testes de cisalhamento, demonstraram que esses são significativamente influenciados pela distância entre o ponto de aplicação da carga e a interface adesiva. Quando esta aumenta, origina-se o “momento de dobramento”, causando alterações significantes nos resultados observados. Os autores concluem que uma força de tração ou cisalhamento uniforme não é conseguida na interface adesiva. Considerando que é importante conhecer a natureza das forças que são empregadas nos testes mecânicos para mensurar a resistência adesiva, Dehoff, Anusavice, Wang³ (1995) questionaram: será que o teste de cisalhamento realmente causa uma fratura por cisalhamento na interface ou a fratura é causada por forças de tração incontroladas em um dos materiais? Para responder a esta questão, os autores

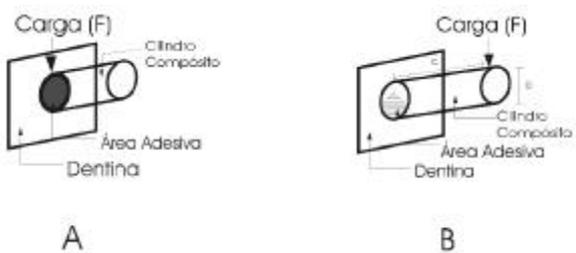


FIGURA 6- Ilustrações comparativas de testes de cisalhamento (A) e teste de tenacidade (B) (Adaptado de Tantbirojn et al.²³, 2000)

empregaram a análise de elemento finito (Figura 7) em um plano tridimensional e verificaram que há uma grande concentração de tensões na interface próxima à área de aplicação da força e, geralmente, as tensões alcançam valores máximos aproximadamente a 0,3 mm abaixo do local de aplicação da carga, diminuindo a partir daí em todas as direções. Notaram também que as forças de cisalhamento alcançam um nível relativamente uniforme a uma distância aproximada de 0,5 mm do local de aplicação da carga e, a partir daí, há um aumento acentuado quando se aproxima dos ângulos da restauração. Através da análise de elemento finito, também ressaltaram que, para os testes de cisalhamento, a utilização de “hastes” resulta em uma maior concentração de tensões nos ângulos do que a utilização das “alças”. Concluíram ainda que, a análise por elemento finito bidimensional, embora seja muito semelhante à análise tridimensional, não possibilita a aquisição de informações sobre a concentração de tensões em outras áreas distantes daquela onde foi aplicada a força.

Devido às imperfeições decorrentes das limitações dos testes de cisalhamento, é admissível assumir que os valores de resistência adesiva podem ser mais precisamente calculados em testes de tração e microtração¹³. Deve-se considerar ainda que as fraturas que ocorrem clinicamente acontecem após vários ciclos de carga aplicados, enquanto que no teste laboratorial, a fratura é induzida por uma carga estática única. Portanto, o emprego de dados tradicionais de resistência adesiva deveria ser restrito a comparações dos efeitos relativos das propriedades e da microestrutura dos materiais e das condições de tratamento que poderiam melhorar

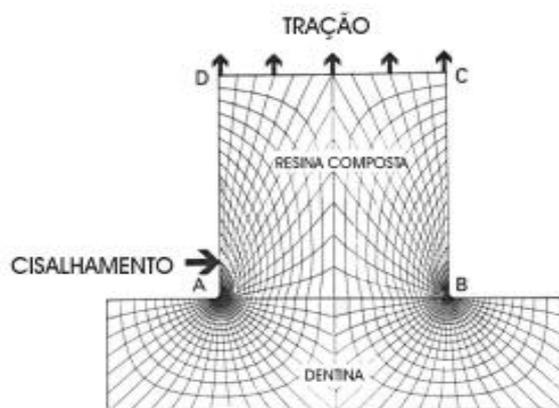


FIGURA 7- Representação esquemática de uma análise de elemento finito quando da realização de diferentes testes mecânicos (tração e cisalhamento) (Adaptado de Van Noort et al.²⁷, 1989)

a resistência à fratura, e não para fazer interpretações clínicas sobre resistência de união.

Fractografia

Fractografia é considerada a análise das superfícies fraturadas. Em trabalhos pioneiros sobre resistência adesiva, empregando sistemas de segunda geração, quase todas as falhas eram classificadas como sendo de natureza adesiva, em função da dentina estar usualmente recoberta por uma camada de smear layer. Entretanto, ao examinar-se sob microscopia eletrônica de varredura, estas eram na verdade falhas coesivas da camada de smear layer. Observações como essas determinaram a necessidade de se dedicar uma maior atenção à classificação do modo de fratura dos espécimes submetidos aos testes adesivos. Uma criteriosa avaliação das superfícies fraturadas deve ser realizada, quer seja a olho nu, microscopia óptica ou eletrônica, e a escolha dessas magnitudes depende dos objetivos e hipóteses levantadas no estudo. Segundo Pashley et al.¹³ (1995), a classificação visual é de grande auxílio para proporcionar uma descrição global do modo de fratura, particularmente se a fratura é coesiva no adesivo, no material restaurador ou na dentina. Obviamente que para um estudo fatorial da falha adesiva, ou seja, para avaliar se a ruptura ocorreu de forma adesiva no topo, base ou no interior da camada híbrida, por exemplo, há a necessidade de se empregar análises em microscopia eletrônica, o que, novamente, depende dos objetivos do estudo. O importante é que qualquer estudo que avalie a resistência adesiva de um determinado material a um substrato, deve sempre considerar o modo de fratura dos espécimes para avaliar não somente se essa foi adesiva, coesiva ou mista, mas também para que, através dessa análise, se possa avaliar criticamente a eficácia do método empregado para o teste e as conclusões obtidas. A fractografia é geralmente determinada por análise qualitativa visual, embora possa ser realizada quantitativamente. Sob esse aspecto, os testes de resistência adesiva avaliada com microtração oferecem uma vantagem. A superfície total da área fraturada pode ser analisada em uma única imagem de MEV, vários espécimes podem ser montados em um único “stub” e não demanda muito tempo. A análise fractográfica detalhada das superfícies fraturadas tem sido relativamente empregada em alguns estudos recentes que empregaram a microtração. Pela análise dos trabalhos, pode-se verificar que a interpretação dos

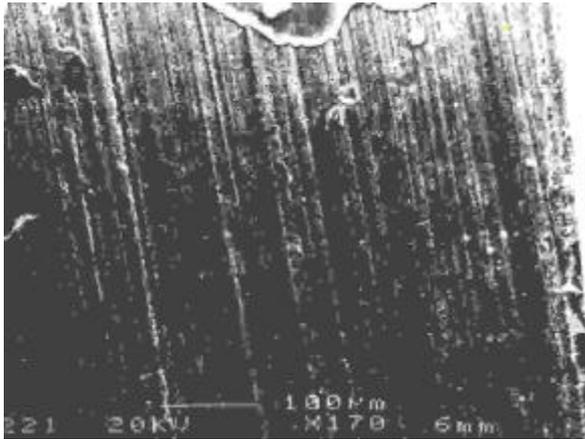


FIGURA 8A- Fotomicrografia de uma interface adesiva fraturada em um teste de microtração. A análise fractográfica denota uma fratura essencialmente adesiva. A maior parte da superfície fraturada é representada por um único plano de fratura

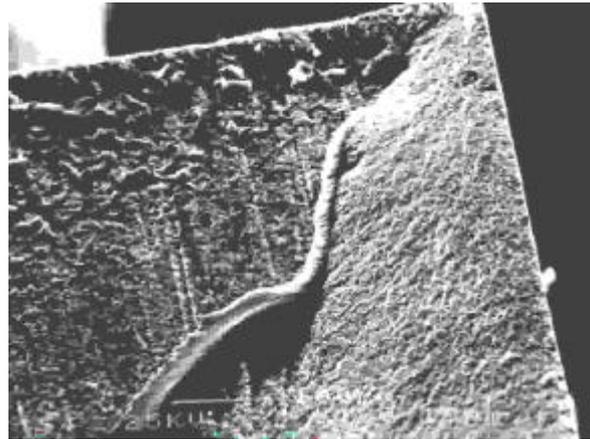


FIGURA 8B- Fotomicrografia de uma interface adesiva fraturada em um teste de microtração. O quadro é típico de uma fratura mista, envolvendo os planos de resina, adesivo e interface

resultados fica enriquecida e oferece informações que não seriam possíveis em outras situações (Figuras 8A e 8B).

CONCLUSÕES

- Os métodos de avaliação da resistência adesiva selecionados quer seja de tração, cisalhamento, microtração, entre outros, são apenas um dos elementos que determinam os resultados observados;
- O melhor método é aquele que atende aos requisitos dos objetivos do trabalho e, principalmente, das hipóteses levantadas. Uma metodologia adequada conduz a uma correta avaliação e interpretação dos resultados do teste selecionado.

AGRADECIMENTOS

Redigido como parte dos requisitos da disciplina de Metodologia Científica I do curso de doutoramento em Dentística da FOB-USP. Apoio CNPq # 300481/95-0, CAPES e FAPESP 01/06140-1.

ABSTRACT

The ability to achieve strong and durable bond strengths between the restorative material and tooth structure is highly important for the clinical success or failure of many dental restorations. Even though

mechanical tests have not reached the level of clinical simulation, they represent an important parameter of analysis. Once the bonding agents present an efficient performance in vitro, they may result in a better clinical performance. There are many mechanical tests to evaluate dental/adhesive interface, each of them with their characteristics and parameters. The main purpose of this article is to inform and comment about the variety of scientific approaches to evaluate the bond strength of adhesive interfaces. This subject is interesting for researchers seeking for the comprehension of the large variety of mechanical tests available

UNITERMS: Dental adhesives; Biomechanics; Dentin.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- 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.
- 2- Carvalho RM, Sano H, Ciucchi B, Yoshiyama M, Pashley D H. Determinação da resistência adesiva a dentina através de um dispositivo de microtração. Rev odontol FOB 1994 Jul/Set 2(3): 77-82.
- 3- Dehoff PH, Anusavice KJ, Wang Z. Three-dimensional finite element analysis of the shear bond test. Dent Mater 1995 Mar 11:126-31.

- 4- Erickson RL, Glasspoole EA, Rtief DG. Influence of test parameters on dentin bond strength measurements [Abstract n. 1543]. *J Dent Res* 1989 Jan/May 68(1): 374.
- 5- Griffith AA. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil Trans Roy Soc Lon (Series A)* A221, 1920:168-98.
- 6- Hotz P, Mclean JW, Sced I, Wilson AD. The bonding of glass ionomer cements to metal and tooth substrates. *Br Dent J* 1977 Jan 142(2):41-7.
- 7- International Organization for Standardization. Technical report ISO TR 11405. Dental materials- guidance on testing of adhesion to tooth structure. Switzerland, 1994.
- 8- Kelly JR. Perspectives on strength. *Dent Mater*, 1995 Mar 11(2):103-10.
- 9- Kempr K, Kilian R. New test system of tensile bond strength testing [Abstract 308]. *J Dent Res* 1976; 55(Sp. issue): 3138.
- 10- Lin CP, Douglas WH. Failure mechanisms at the human dentin-resin interface: a fracture mechanics approach. *J Biomech* 1994 Aug 27(8):1037-47.
- 11- Meira JBC, Ballester RY, Souza RM, Driemer L. Concentração de tensões em teste de micro-tração. In: XXXVIII Encontro do Grupo Brasileiro de Materiais Dentários, Belo Horizonte, 2002. Programas e resumos. Piracicaba, 2002. p.98.
- 12- Noguchi H, Nakano N, Kasmataka A, Ecchu Y. Testing dental bonding cements produced in Japan. *De J Dent Eng* 1982 60:16-27.
- 13- Pashley DH, Sano H, Cicchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM. Adhesion testing of dentin bonding agents: a review. *Dent Mater* 1995 Mar 11(2): 117-25.
- 14- Pashley DH, Carvalho RM, Sano H, Nakajima M, Yoshiyama M, Shono Y, Fernandes CA, Tay F. The micro tensile bond test: a review. *J Adhes Dent* 1999 1(4): 299-309.
- 15- Retief DH. Standardizing laboratory adhesion tests. *Amer J Dent* 1991 Oct 4(5): 231-6.
- 16- Sano H, Ciucchi B, Matthews WG, Pashley DH. Tensile properties of mineralized and mineralized and demineralized human and bovine dentin. *J Dent Res*, 1994a 73(6): 1205-11.
- 17- Sano H, Shono T, Sonoda H, Takatsu T, Ciucchi B., Carvalho RM, Pashley DH. Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength – evaluation of a micro-tensile bond test. *Dent Mater*. 1994b July 10(4): 236-240.
- 18- Sano H, Takatsu T, Ciucchi B, Russell CM, Pashley DH. Tensile properties of resin-infiltrated demineralized human dentin. *J Dent Res* 1995 Apr 74(4): 1093-102.
- 19- Shimada Y, Antonucci JM, Schumacher GE, Mcdouough WG, Tagami J. Effects of regional tooth structure and sectioning orientation on micro-shear bond strength. In: Tagami, J., Toledano, M., Prati, C. editors. *Advanced adhesive dentistry (3rd International Kuraray Symposium)*, Kuraray Co. Ltd, Cirimido, Italy; 1999. p. 91-103.
- 20- Smith TB, Kelly JR, Tesk J. A. In vitro fracture behavior of ceramic and metal-ceramic restorations. *J Prosth* 1994 Sep 3(3): 138-44.
- 21- Söderholm 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.
- 22- Tam LE, Pilliar RM. Fracture toughness of dentin/resin-composite adhesive interfaces. *J Dent Res* 1993 May 72(5): 953-9.
- 23- Tam LE, Pilliar RM. Fracture surface characterization of dentin-bonded interfacial fracture toughness specimens. *J dent. Res* 1994 Mar 73(3): 607-19.
- 24- Tam LE, Pilliar RM. The effect of interface stiffness on dentin-composite interfacial fracture resistance. *J Dent* 2000 Sept 28(7): 487-93.
- 25- Tantibirojn D et al. Nominal shear or fracture mechanics in the assessment of composite-dentin adhesion? *J Dent Res* 2000 Jan 79(1): 41-8.
- 26- Tay FR, Gwinnett JA, Wei SH. Micro morphological spectrum of acid-conditioned dentin following the application of a water-based adhesive. *Dent Mater* 1998 Sept; 14(5): 329-38.
- 27- Van Meerbeek B. et al. Assessment by nano-indentation of the hardness and elasticity of the resin-dental bonding area. *J dent Res* 1993 Oct 72(10):1434-42.
- 28- Van Noort R. Dentine bonding. *J Dent* 1997 May/Jul 25(3 /4): 178-9.
- 29- Van Noort R. et al. 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.
- 30- Watanabe I, Nakabayashi N. Measurement methods for adhesion to dentine: the current status in Japan. *J Dent* 1994 Apr 22(2): 67-72.
- 31- Willians ML, Devries KL, Despain RR. A technique for evaluation dental adhesives. *J Dent Res* 1973 May/June 52(3): 517-21.
- 32- Yoshiyama M, Urayama A, Kimochi T, Matsuo T.; Pashley DH. Comparison of conventional vs self-etching adhesive bonds to caries-affect dentin. *Oper Dent* 2000 May/June 25(3): 163-9.

Correspondência:

Dr. Ricardo M. Carvalho
FOB-USP, Depto. Dentística
Al. Otávio P. Brisola 9-75
Bauru, SP, 17012-101
e-mail: rickcarvalho@hotmail.com
Tel: 14-235 8321
Fax: 14-224 1388