

## TESTES DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICO-QUÍMICAS EM RESINAS COMPOSTAS: INDICAÇÕES E APLICABILIDADE

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.034-011>

**Geovanna de Castro Bizarria**

Mestranda, Piracicaba Dental School, State University of Campinas (UNICAMP)  
geovannabizarria@gmail.com

**Sarah de Araújo Mendes Cardoso**

Mestranda, Piracicaba Dental School, State University of Campinas (UNICAMP)  
s290973@dac.unicamp.br

**Carolina Cardoso de Araujo**

Mestranda, Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo (FORP/USP)  
carolinacodonto@outlook.com

**Álefi Marques Lopes da Silva**

Mestrando, Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo (FORP/USP)  
alefi1968@gmail.com

**Wglanna Kellen de Maria Silva Costa**

Cirurgiã-Dentista, Centro Universitário Santo Agostinho (UNIFSA)  
wglanna@hotmail.com

**Nicollas Gabriel de Carvalho Lima**

Graduando, Centro Universitário Santo Agostinho (UNIFSA)  
nicollasgabriel128@gmail.com

**Ousanas Wesllen Macedo da Costa**

Graduando, Centro Universitário Santo Agostinho (UNIFSA)  
ousanaswesllen@gmail.com

**Maria Sarah Teresa Lima Verde Moura**

Mestranda, Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
masarah144@gmail.com

**Marine Olmos Villagomez**

Mestranda, Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo (FORP/USP)  
marine.olmos@usp.br

**Maria do Amparo Veloso Magalhães**

Doutora, Universidade Luterana do Brasil  
amparovm@bol.com.br

**Cícera Andreza Alves dos Santos**

Mestranda, Piracicaba Dental School, State University of Campinas (UNICAMP)  
Santos.a2016@hotmail.com

## **RESUMO**

A relação entre as propriedades mecânicas dos materiais odontológicos e seu desempenho intraoral tem sido objeto de extensivos estudos, que resultaram na identificação de correlações significativas. As propriedades físico-químicas referem-se às características que influenciam a interação dos materiais com o ambiente oral, englobando fatores como reatividade, durabilidade e estabilidade. Dentre as principais propriedades físico-químicas, destacam-se a composição química, solubilidade, absorção de água, biocompatibilidade, cor e a estética. Este capítulo aborda os principais testes odontológicos para avaliar propriedades mecânicas e físico-químicas de materiais resinosos, com base em uma revisão da literatura realizada nas bases PubMed e SciELO, destacando suas características e indicações. O teste de resistência à flexão pode ser relacionado ao problema clínico de deformação, e seus dados fornecem indicações das propriedades de força e módulo de elasticidade de um material dentário. A dureza de um material corresponde à sua resistência à deformação local, não sendo uma propriedade intrínseca do material, é resultado de um procedimento de medição. O teste de sorção e solubilidade é crucial, pois a sorção de água pode afetar negativamente a estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas do material, impactando sua durabilidade a longo prazo. Materiais que absorvem mais água podem apresentar expansão e perda de resistência, comprometendo sua performance clínica. Valores mínimos esperados pela normatização ISO desses ensaios são requisitos no desenvolvimento de materiais mais duráveis e confiáveis.

**Palavras-chave:** Testes Mecânicos. Solubilidade. Materiais Dentários. Resinas Compostas.

## 1 INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas dos materiais odontológicos são fundamentais para a avaliação do comportamento e da resistência desses materiais em resposta a forças ou tensões aplicadas, visando caracterizar sua capacidade de resistir à deformação permanente ou à fratura sob as condições encontradas na cavidade bucal. Essas propriedades incluem a análise das forças atuantes, do movimento, da deformação e das tensões que os materiais sofrem. Na odontologia, as propriedades mecânicas mais relevantes incluem: resistência à compressão, ductilidade, módulo de elasticidade, resistência à flexão, tenacidade à fratura, dureza, resistência ao impacto, resistência ao cisalhamento e resistência à tração e torção, entre outras. A compreensão dessas propriedades é crucial para a seleção adequada de materiais e para garantir a eficácia e a durabilidade das restaurações dentárias (Anusavice; Shen; Rawls, 2013; Reis *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2023).

A relação entre as propriedades mecânicas dos materiais odontológicos e seu desempenho intraoral tem sido objeto de extensivos estudos, que resultaram na identificação de correlações significativas. Tyas (1990) relatou uma correlação inversa substancial entre o lascamento superficial e a fratura em massa de compósitos, em relação à tenacidade à fratura, ao módulo de elasticidade e à resistência à compressão por tração diametral. De maneira semelhante, Ferracane *et al.* (1999) observaram uma correlação análoga entre a tenacidade à fratura e a quebra marginal de resinas compostas. Ferracane e Condon (1999), ao analisarem compósitos microfill, minifill e midfill com um simulador de desgaste, demonstraram uma forte correlação inversa entre a quebra marginal e a tenacidade à fratura. Adicionalmente, Ferracane *et al.* (1997) reportaram uma correlação inversa robusta entre o desgaste e a tenacidade à fratura, bem como entre o desgaste e a resistência à flexão, enquanto uma correlação inversa mais fraca foi observada entre o desgaste e a dureza. Além disso, a tenacidade à fratura, juntamente com a resistência à flexão e o módulo de flexão, foi proposta como indicadores preditivos do desgaste clínico de restaurações em resina composta. Assim, todas essas propriedades mecânicas são fundamentais para a caracterização da resina composta em relação ao seu desempenho clínico.

Um aspecto fundamental na determinação das propriedades mecânicas dos compósitos dentários é a correlação entre seus parâmetros. Embora as propriedades mecânicas sejam frequentemente consideradas independentes, uma vez que descrevem diferentes aspectos do comportamento do material, correlações universais podem fornecer uma abordagem mais eficiente e simplificada para a caracterização das propriedades do material, permitindo que se inferem propriedades desconhecidas com base na identificação de um único parâmetro. Um exemplo notável dessa prática é a correlação entre dureza e módulo de elasticidade, que tem sido amplamente empregada para estimar o módulo de elasticidade das resinas compostas dentárias a partir de medições de dureza. Essa relação não apenas facilita a avaliação das propriedades mecânicas, mas também

contribui para a seleção adequada de materiais em aplicações clínicas (Li *et al.*, 2009; Thomadis *et al.*, 2013).

As propriedades físico-químicas referem-se às características que influenciam a interação dos materiais com o ambiente oral, englobando fatores como reatividade, durabilidade e estabilidade. Dentre as principais propriedades físico-químicas, destacam-se a composição química, solubilidade, absorção de água, biocompatibilidade, cor e a estética. Na prática clínica odontológica, esses materiais frequentemente requerem a combinação de diferentes componentes para a obtenção de uma massa ou líquido que será manipulado, adaptado e moldado para a aplicação desejada. O escoamento do material durante suas etapas de manipulação é denominado reologia. As variações constantes de temperatura na cavidade bucal tornam essencial a compreensão das propriedades térmicas dos materiais restauradores, uma vez que a polpa dentária é sensível à exposição a extremos térmicos (Reis *et al.*, 2020).

Propriedades mecânicas, químicas, físicas e biocompatíveis são essenciais. Os materiais dentários precisam resistir a diferentes forças mecânicas, exposição à umidade, várias temperaturas e a valores de pH flutuantes. Isso leva ao envelhecimento, que altera as propriedades mecânicas ao longo do tempo. A temperatura influencia os processos de envelhecimento por meio do aumento da taxa de reação, o que acelera a degradação química (Gorning, 2022).

Este capítulo teve como objetivo apresentar os principais testes odontológicos utilizados para avaliar as propriedades mecânicas e físico-químicas dos materiais resinosos. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura nas bases de dados PubMed e SciELO, com o intuito de identificar as principais características desses testes e suas respectivas indicações.

## **2 TENSÃO *versus* DEFORMAÇÃO**

A tensão pode ser definida como a reação gerada pela aplicação de uma carga sobre um corpo, que atua em sentido oposto ao da direção externa (Reis, 2021). A estrutura dentária e materiais odontológicos utilizados na reabilitação oral, estão suscetíveis a ação de fatores que geram tensões como: forças mastigatórias, hábitos parafuncionais, alterações funcionais e atividades associadas a postura e musculatura. As forças geradas por cargas resultam em tensões estruturais, se tais tensões se tornarem excessivas e excederem o limite elástico, pode ocorrer falha estrutural, a depender da característica do material (May *et al.*, 2012; Vianna *et al.*, 2018).

Dentre as propriedades mecânicas, há diferentes tipos de tensões que se desenvolvem de acordo com o tipo de carga incidente sobre o material. Estas podem ser classificadas em: simples (tração, cisalhamento e compressão) ou complexas (flexão e torção). A tensão por tração trata-se de uma tensão que ocorre na mesma linha e em sentidos opostos, e tende a esticar e alongar o material. Em contrapartida, a tensão por cisalhamento, é resultado da aplicação de uma carga em sentido contrário,

porém paralelo, esta também pode ser promovida por tensões por torção. A tensão por compressão é gerada quando uma carga é aplicada sobre o corpo na mesma direção, onde um ponto é móvel, e este é dirigido ao ponto fixo, com objetivo de comprimir o material (Anusavice; Shen; Rawls, 2013).

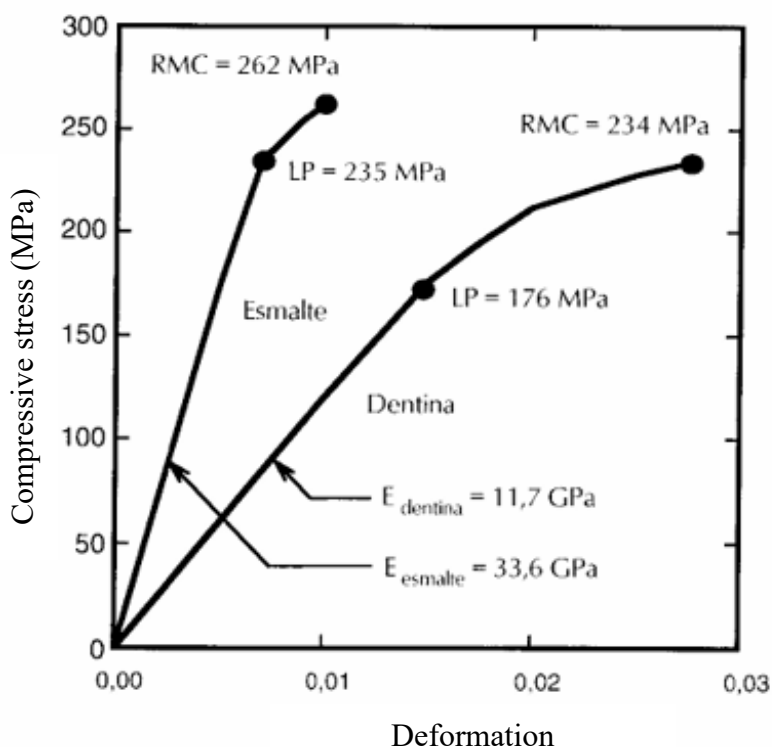
Nas tensões complexas, há a tensão por flexão, que poderá ser de três pontos, onde as três tensões simples atuam sobre o material, sendo a de tração na zona inferior, cisalhamento nas extremidades e compressão na zona superior. Por fim, a tensão por torção ocorre quando as extremidades do material são rotacionadas em sentido contrário (Anusavice; Shen; Rawls, 2013).

Quando ocorre a aplicação de uma tensão, uma deformação é gerada como resposta à força aplicada, e a supera, ocasionando alterações nas dimensões do material. A deformação pode ser classificada como elástica (ocorre a aplicação de uma tensão que causa alterações no material, porém, quando esta é removida, as partículas do material retornam as dimensões originais), e plástica (ocorre a aplicação de uma tensão que causa alterações no material, porém, quando esta é removida, a força vai a zero, mas partículas do material não retornam as dimensões originais, pois já se deformaram de maneira permanente) (Reis, 2021).

### **3 CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO**

Para exemplificar, a curva tensão-deformação de um material representa a relação entre a tensão e a deformação desse material sob aplicação de uma força, e pode ser obtida por testes feitos sobre os materiais, para obter informações acerca das suas características, e conferir segurança, antes de lançá-lo no mercado (Goodno; Gere, 2017).

Curva tensão-deformação do esmalte e dentina submetidos ao teste de resistência à compressão:



Fonte: Anusavice; Shen; Rawls, 2013; Stantord, 1960. Legenda: Os valores do limite de proporcionalidade (LP); resistência máxima à compressão (RMC) e módulo de elasticidade (E) são apresentados na curva.

A linha vertical representa a tensão exercida sobre o material e a linha horizontal a deformação ocasionada em resposta a tensão aplicada. A curva linear (dos pontos 0 ao LP, ou seja, a curva linear dentro da região de deformação elástica) tem uma inclinação significativamente mais reta que a segunda curva, onde não há linearidade (dos pontos LP ao RMC, ou seja, a curva dentro da região de deformação plástica). Há algumas regiões e pontos associados a essa curva de tensão-deformação que têm significados mecânicos importantes (Anusavice; Shen; Rawls, 2013; Lin; Kang, 2021).

Estes serão descritos abaixo:

- A. Amplitude da Região Elástica:** Esta região compreende do ponto de origem (0) ao limite elástico, onde ocorre a deformação elástica, caso a força seja removida, a tensão vai a zero, e as partículas do material se organizam e retornam às dimensões originais. Nesta região, de acordo com a lei de Hooke, a tensão deverá ser proporcional à deformação. Não irá ocorrer deformação permanente, e o material estará intacto com a remoção da força.
- B. Amplitude da Região Plástica:** Esta região corresponde ao ponto acima do limite de proporcionalidade. Se o material sofrer a ação de uma força acima da região elástica, ocorrerá a deformação plástica. Portanto, com a remoção da força, a tensão vai a zero, mas as partículas do material não retornam às dimensões originais, pois já foram deformadas permanentemente. A tensão passará a não ser proporcional à deformação baseada na lei de Hooke.
- C. Limite de Proporcionalidade:** Este é indicado na curva pela sigla LP, e pode ser definido como, o ponto acima do qual a curva deixa de ser uma linha reta. Este, marca a transição entre

a deformação elástica e plástica. Ele representa a tensão máxima acima da qual a tensão não é mais proporcional à deformação. Alguns autores podem definir limite de proporcionalidade como sendo o mesmo que limite elástico, por serem próximos um do outro, contudo, baseado no conteúdo referenciado, estes serão tratados como distintos.

**D. Limite Elástico:** Trata-se da tensão máxima suportada pelo material, de modo que este possa retornar às dimensões originais com a remoção da força, sem sofrer deformação plástica.

**E. Limite de Escoamento (Tensão de Prova):** Corresponde a uma pequena quantidade de deformação plástica (cerca de 0,1% a 0,2%) induzida pela tensão e localiza-se acima do limite de escoamento na curva tensão-deformação.

**F. Módulo de Elasticidade:** Trata-se da rigidez relativa de um material, é medido na região elástica da curva tensão-deformação. Este é constante, e não é alterado pela tensão elástica ou plástica gerada sobre o material.

**G. Resistência Máxima:** No gráfico, cujo teste de resistência explicitado é o de compressão, este é dado pela sigla RMC. Em mecânica de materiais, a falha é definida como o momento em que o corpo de prova fratura completamente em mais de um fragmento. A resistência à falha é a tensão máxima que o corpo de prova pode suportar antes da falha, esta pode ocorrer na região elástica ou plástica, a depender da característica mecânica do material.

#### 4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A resistência não é uma propriedade inerente da resina composta, ou seja, ela não é completamente previsível apenas com base na composição química ou estrutura interna do material, pode depender do contexto clínico e de variáveis externas. Nesse sentido, para analisar a flexão de um material, a força é aplicada de diferentes maneiras que criam tensões internas dentro do material, sendo então medido e registrado como resistência à fratura. O teste de resistência à flexão pode ser relacionado ao problema clínico de deformação, e seus dados fornecem indicações das propriedades de força e módulo de elasticidade de um material dentário (Ilie *et al.*, 2017).

É possível afirmar que a resistência de um material envolve sua composição e qualidade de preparação (porosidade interna e falhas superficiais), sendo então necessário garantir o preparo de espécimes totalmente sólidos e desprovidos de falhas significativas. Essas especificações são indicadas pela ISO 4049/2019 - *Dentistry-Polymer-Based Restorative Materials* que orienta ensaios em compósitos odontológicos.

O teste de resistência à flexão desenvolve tensões de tração, compressão e cisalhamento e de acordo com a literatura, há correlação entre a resistência à flexão e fraturas clínicas de restaurações de resina composta, o que pode prever o desgaste clínico do compósito. As ciclagens que simulam

envelhecimento do material podem melhorar essa relação dos dados laboratoriais com estudos clínicos (Ferracane, 2013).

Para avaliar a resistência dos compósitos dentários o teste de flexão pode ser realizado de três formas, sendo elas: flexão de três pontos (A), flexão de quatro pontos (B) e flexão biaxial (C) (Ilie *et al.*, 2013).

- A. Flexão de 3 pontos:** o espécime terá formato de viga com dimensões específicas (aproximadamente 10% de material adicional, além dos suportes em cada extremidade), apoiada em dois rolos separados com uma distância especificada, e, no centro superior da viga será carregada uma força até a falha, e espera-se que haja deformação plástica mínima do espécime;
- B. Flexão de 4 pontos:** o espécime também deve seguir conformidade retangular (viga), e deve manter apoio inferior em dois pontos separados de forma que haja 10% adicional do espécime em cada extremidade. Em relação à força superior, dois pontos superiores aplicam a carga de forma simétrica entre os apoios inferiores, criando uma área de carga distribuída. Isso permite avaliar um maior volume da amostra, tornando o teste menos sensível a defeitos localizados;
- C. Flexão Biaxial:** Nesse caso, o espécime apresenta forma de disco e é apoiado sobre três pontos ou sobre um anel que suporta toda a circunferência, fornecendo uma distribuição uniforme de tensão de tração dentro da amostra. Geralmente é indicado para materiais mais frágeis que compósitos resinosos, porém, seus dados podem ser correlacionados com os obtidos na flexão de 3 pontos.

Materiais a base de resina composta são introduzidos na realidade clínica de forma constante, sendo necessária a avaliação físico-mecânica desses materiais constantemente. Devem ser submetidos a forças de flexão para que indiquem a longevidade clínica quando usados em restaurações de dentes anteriores e posteriores (Yap *et al.*, 2018).

## 5 MICRODUREZA KNOOP E VICKERS

A dureza de um material corresponde à sua resistência à deformação local, não sendo uma propriedade intrínseca do material, é resultado de um procedimento de medição (Tabor, 1970). O módulo de indentação determinado é classificado em importância paralela ao módulo de elasticidade determinado em um teste de flexão, pois pode permitir uma avaliação rápida e precisa da resistência do material à deformação. De modo geral, o teste de dureza utiliza um indentador de formato específico para cada método, que será pressionado na superfície do corpo de prova por tempo determinado, obtendo a medição da profundidade da indentação (Fischer-Cripps *et al.*, 2004; Cramer *et al.*, 2011).

O teste de dureza viabiliza a análise quantitativa da resistência à deformação, sendo calculada como a carga máxima aplicada dividida pela área de contato projetada. Os métodos possíveis para realização do teste são: Brinell, Knoop (B), Rockwell e Vickers (A). Estes correspondem ao carregamento um indentador duro contra o material. Para essas medições clássicas de dureza, apenas a parte plástica do processo de indentação é considerada.

ATENÇÃO! →

A medição da dureza pode ser definida como macro, micro ou nanoescala de acordo com as forças aplicadas e os deslocamentos obtidos (Ohki et al., 2012): faixa macro:  $2\text{N} \leq F \leq 30\text{kN}$ ; faixa micro:  $2\text{N} > F$ ;  $h > 0,2\text{ }\mu\text{m}$ ; e faixa nano:  $h \leq 0,2\text{ }\mu\text{m}$  (onde  $F$  = Força e  $h$  = profundidade de indentação) (ISO, 2005; ISO 4545-1, 2017).

A medição da dureza pode ser definida como macro, micro ou nanoescala de acordo com as forças aplicadas e os deslocamentos obtidos (Ohki et al., 2012): faixa macro:  $2\text{N} \leq F \leq 30\text{kN}$ ; faixa micro:  $2\text{N} > F$ ;  $h > 0,2\text{ }\mu\text{m}$ ; e faixa nano:  $h \leq 0,2\text{ }\mu\text{m}$  (onde  $F$  = Força e  $h$  = profundidade de indentação) (ISO, 2005; ISO 4545-1, 2017).

**A. Microdureza Vickers (ISO/CD6507-1):** indentar espécime com um indentador de diamante, na forma de uma pirâmide com uma base quadrada e um ângulo de  $136^\circ$  entre faces opostas. A carga total é geralmente aplicada entre 10 a 15 segundos. As duas diagonais da indentação, que permanecem na superfície do material após a remoção da carga, são medidas usando um microscópio e sua média calculada. O procedimento de teste pode ser fatores de influência do operador na leitura óptica das diagonais do indentador. Dispositivos modernos permitem a medição automática de indentações.

**B. Microdureza Knoop (ISO 4545-1):** a força é aplicada com um indentador de diamante em forma de pirâmide (com ângulos de  $172,5^\circ$  e  $130^\circ$  entre as bordas opostas no vértice) por um tempo de permanência que não deve exceder 10 segundos, e a força de teste é mantida por 10 a 15 segundos. O valor de dureza Knoop é proporcional à força de teste dividida pela área projetada da indentação. Comparado a um indentador Vickers, o indentador usado em um teste Knoop tem um formato mais alongado. O método Knoop é comumente utilizado quando as indentações são muito próximas da borda da amostra.

Os corpos de prova podem ser confeccionados em formato de disco para ensaios de microdureza. Com uso de uma matriz de aço inoxidável nas seguintes dimensões: 2 mm de espessura por 5 mm de diâmetro, o material deverá ser inserido com uma espátula, por conseguinte, uma tira necessitará ser aplicada para que o molde seja pressionado com uma placa de vidro para remover o excesso de material, e permitir o nivelamento da superfície, e este seja mantido homogêneo (Cruz;

Águila, 2024). A preparação do espécime requer uma superfície de baixa rugosidade, idealmente lisa, polida e uniforme (o desvio máximo no paralelismo não deve exceder 0,1 a 50 milímetros). A superfície do espécime deve estar completamente livre de quaisquer lubrificantes, pastas de polimento, marcas de caneta à prova d'água ou quaisquer falhas de superfície visíveis.

## 6 SORÇÃO E SOLUBILIDADE

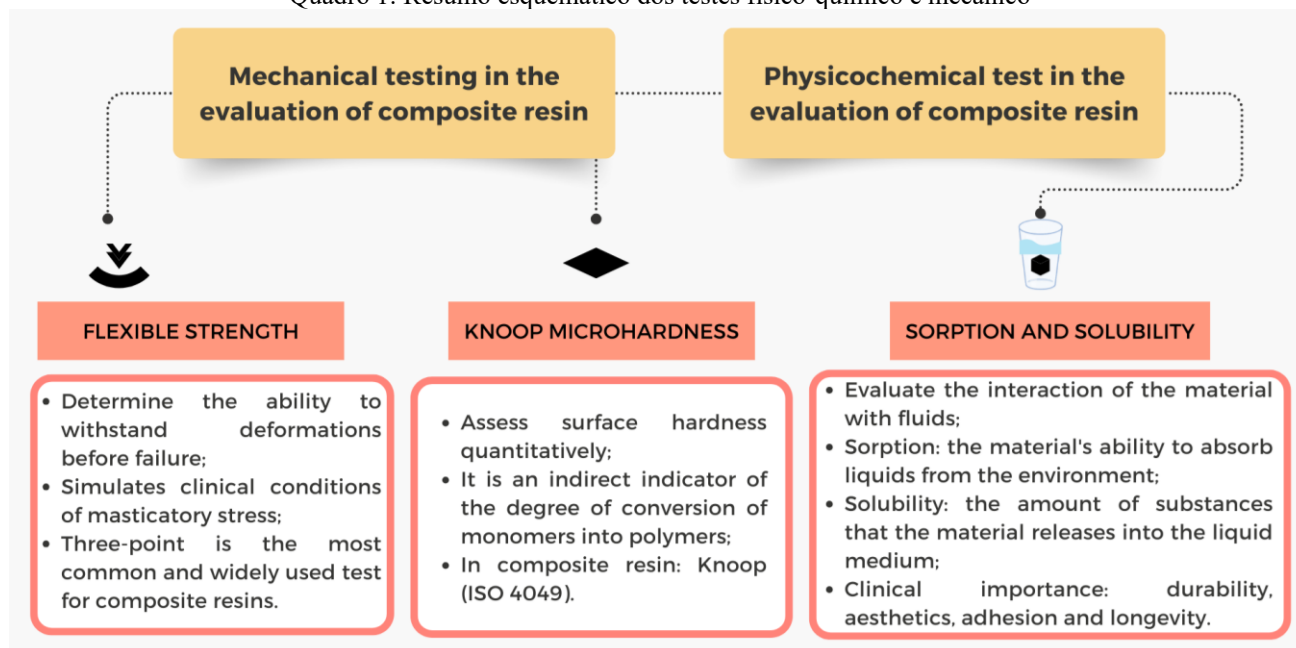
A quantidade de água que um compósito resinoso pode absorver está diretamente relacionada à hidrofilia dos monômeros constituintes da matriz polimérica (Toledano *et al.*, 2003). Esse teste é crucial, pois a sorção de água pode afetar negativamente a estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas do material, impactando sua durabilidade a longo prazo. Materiais que absorvem mais água podem apresentar expansão e perda de resistência, comprometendo sua performance clínica.

Em relação à solubilidade, este teste também é fundamental para avaliar o comportamento dos materiais dentários, pois a solubilidade está diretamente relacionada à quantidade de monômeros residuais que podem ser lixiviados para a cavidade oral. A solubilidade é influenciada por vários fatores, incluindo o tempo de imersão e as características do meio de armazenamento. Quando os fatores de teste são controlados, outros elementos, como a composição monomérica, a carga utilizada, o tratamento de silano e o grau de reticulação do polímero, também desempenham um papel importante (Ortengren *et al.*, 2001).

A importância do teste de solubilidade se destaca, pois, a quantidade de monômeros residuais lixiviáveis está intimamente ligada ao grau de conversão do material. A fotopolimerização, processo crucial para a conversão de monômeros, deve ser otimizada para reduzir a quantidade de monômeros lixiviáveis e garantir a biocompatibilidade do material (Leprince *et al.*, 2013). Além disso, o peso molecular dos monômeros também influencia a solubilidade, pois moléculas de menor peso molecular se dissociam mais facilmente, liberando monômeros residuais para a cavidade oral (Ferracane, 1994). Esse conhecimento é vital para o desenvolvimento de novos materiais dentários que sejam tanto duráveis quanto seguros para os pacientes.

## 7 QUADRO RESUMO

Quadro 1: Resumo esquemático dos testes físico-químico e mecânico



Fonte: Autores, 2024.

## 8 CONCLUSÃO

Os testes físico-químicos e mecânicos desempenham um papel fundamental na avaliação da qualidade e do desempenho clínico de materiais dentários, como a resina composta. Dos quais, o teste de resistência à flexão pode fornecer informações sobre a capacidade do material em suportar forças mastigatórias, o teste de microdureza na avaliação da resistência de superfície do material ao desgaste e os testes de sorção e solubilidade na identificação da interação do material com o meio oral e seu potencial de degradação. Valores mínimos esperados pela normatização ISO desses ensaios são requisitos no desenvolvimento de materiais mais duráveis e confiáveis, bem como para auxiliar na escolha de produtos que atendam às demandas clínicas, contribuindo significativamente para o sucesso e a longevidade dos tratamentos odontológicos.

## REFERÊNCIAS

- ANUSAVICE, KJ. PHILLIPS. *Materiais Dentários*. 12<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2013
- CRAMER, N. B.; STANSBURY, J. W.; BOWMAN, C. N. Recent advances and developments in composite dental restorative materials. *Journal of Dental Research*, v. 90, n. 4, p. 402-416, 2011.
- FERRACANE, J. L. Elution of leachable components from composites. *Journal of Oral Rehabilitation*, v. 21, n. 4, p. 441-452, 1994.
- FERRACANE, J. L et al. Wear and marginal breakdown of composites with various degrees of cure. *Journal of Dental Research*. v. 76, n. 8, p. 1508-1516, 1997
- FERRACANE, J. L; CONDON, J.R. In vitro evaluation of the marginal degradation of dental composites under simulated occlusal loading. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*. v. 15, n. 4, p. 262-267, 1999
- FERRACANE, J. L. Resin-based composite performance: are there some things we can't predict?. *Dental materials*, v. 29, n. 1, p. 51-58, 2013.
- FISCHER-CRIPPS, A. C.; NICHOLSON, D. W. Nanoindentation. *Mechanical engineering series. Appl. Mech. Rev.*, v. 57, n. 2, p. B12-B12, 2004.
- GORNIG, D. C. et al. Influence of artificial aging: mechanical and physicochemical properties of dental composites under static and dynamic compression. *Clinical Oral Investigations*. v. 26, n.2, p. 1491-1504, 2022
- GOODNO, B.J; GERE, J.M. *Mechanics of Materials*, 9th ed.; Cengage Learning: Boston, MA, USA, 2017.
- ILIE, N. et al. Academy of dental materials guidance—Resin composites: Part I—Mechanical properties. *Dental Materials*, v. 33, n. 8, p. 880-894, 2017.
- ILIE, N. et al. Resin-based composite light-cured properties assessed by laboratory standards and simulated clinical conditions. *Operative dentistry*, v. 38, n. 2, p. 159-167, 2013.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Dentistry-Polymer-based Restorative Materials*. ISO, 2019.
- ISO, ISO. 4545–1, *Metallic Materials-Knoop Hardness Test-Part 1: Test Method*. 2017.
- ISO, E. N. et al. *Metallic materials. In: Vickers hardness test. Part 1: test method*. 2005.
- LEPRINCE, J. G. et al. Progress in dimethacrylate-based dental composite technology and curing efficiency. *Dental Materials*, v. 29, n. 2, p. 139-156, 2013.
- LI, J. et al. Multiple correlations of material parameters of light-cured dental composites. *Dental materials: official publication of the Academy of Dental Materials*. v. 25, n. 7, p. 829-836, 2009
- LIN, C. Y; KANG, J.H. Mechanical properties of compact bone defined by the stress-strain curve measured using uniaxial tensile test: a concise review and practical guide. *Materials*, v. 14, n. 15, p. 1-16, 2021.

LIMA, F. O. et al. Análise comparativa da adição de nanopartículas em painéis MDP. Seven Editora, 2023.

OHKI, M. Proposal for ISO 14577: metallic materials-instrumented indentation test for hardness and materials parameters (part 1) Test method (2nd) Discussion for relationships between maximum projected area and real maximum contact depth, and computing method of Young's modulus based on area function for the relationships. 材料試験技術, v. 56, n. 2, p. 64-75, 2011.

ÖRTENGREN, U. et al. Water sorption and solubility of dental composites and identification of monomers released in an aqueous environment. Journal of Oral Rehabilitation, v. 28, n. 12, p. 1106-1115, 2001.

REIS, A. C. dos; ELIZABENITEZ CATIRSE, A. B. C.; PIRES-DE-SOUZA, F. C. P. Propriedades físicas e químicas dos materiais dentários. In: Manual de Materiais Dentários, 2020, p.4-19. Disponível em:

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8301780/mod\\_resource/content/1/Propriedades%20f%C3%ADsicas%20e%20qu%C3%ADmicas%20dos%20materiais%20dentarios.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8301780/mod_resource/content/1/Propriedades%20f%C3%ADsicas%20e%20qu%C3%ADmicas%20dos%20materiais%20dentarios.pdf). Acesso em: 27 dez. 2024

REIS, A.; LOGUERCIO, A.D. Materiais Dentários Restauradores Diretos – dos Fundamentos à Aplicação Clínica. 1.ed. São Paulo: Santos, 2007.

TABOR, D. The hardness of solids. Review of Physics in Technology, v. 1, n. 3, p. 145, 1970.

TYAS, M. J. Correlation between fracture properties and clinical performance of composite resins in Class IV cavities. Australian Dental Journal. v. 35, n. 1, p. 46-49, 1990

THOMAIDIS, S et al. Mechanical properties of contemporary composite resins and their interrelations. Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials. v.29, n.8, p.132-141, 2013

TOLEDANO, M. et al. Sorption and solubility of resin-based restorative dental materials. Journal of Dentistry, v. 31, n. 1, p. 43-50, 2003.

VIANNA, A. L. S. V. et al. Effect of cavity preparation design and ceramic type on the stress distribution, strain and fracture resistance of CAD/CAM onlays in molars. Journal of Applied Oral Science, v. 26, p. e20180004, 2018.

YAP, A. U.; EWEIS, A. H.; YAHYA, N. A. Dynamic and static flexural appraisal of resin-based composites: Comparison of the ISO and mini-flexural tests. Operative Dentistry, v. 43, n. 5, p. E223-E231, 2018.