

[Resumen]

Para garantizar una unión óptima y duradera entre los materiales para armazones y las correspondientes cerámicas de recubrimiento es preciso atenderse a unos factores físicos básicos. Entre ellos cabe citar la humectación de las superficies, la forma anatómica de los armazones y también el coeficiente de dilatación térmica de ambos materiales, que deben ajustarse mutuamente a la perfección. Por el momento no existen procedimientos normativos de ensayo o prueba para sistemas dentales de unión que puedan complementarse precisamente en el campo de los sistemas de cerámica sin metal. Aunque sí se ha podido abrir en ese campo un camino para hallar los requisitos básicos que debe reunir cada uno de los sistemas de restauración con cerámica sin metal.

Mecanismos de unión por adherencia en sistemas de capas dentales

Michael J. Tholey y Marc Stephan

Uno de los factores decisivos para tener éxito en una restauración dental es la unión entre el material del armazón y la masa de recubrimiento. Y cuando decimos éxito no nos referimos solamente a la apariencia estética, sino también a la elevada capacidad de carga mecánica y a la larga vida útil de las restauraciones. En este sentido, los factores decisivos para el éxito no tienen que ver sólo con la idoneidad de las propiedades físicas, como por ejemplo el coeficiente lineal de dilatación térmica de las partes a unir, sino también con la idoneidad de combinación de los múltiples mecanismos de unión físicos y químicos y con el comportamiento de adhesión de los sistemas que de ello resulta. Para cuantificar la resistencia de la unión existen distintos métodos, aunque a todos ellos es común el ensayo de separar las partes de la unión por el punto de contacto y de determinar las energías necesarias. A continuación, antes de abordar los distintos mecanismos de unión y los métodos para determinar la resistencia de la unión, debemos tratar uno de los prerequisites más importantes para que tenga lugar la unión por adherencia: la buena humectación del material del armazón por medio de la masa de recubrimiento. Una de las medidas a tener en cuenta para ello

Palabras clave

Materiales. Cerámica sin metal. Cerámica de recubrimiento. Mecanismos de unión por adherencia. Prueba de tracción. Prueba de cizalla. Prueba de presión. Prueba de flexión.

(Quintessenz Zahntech. 2007;33(2):160-8)

Introducción

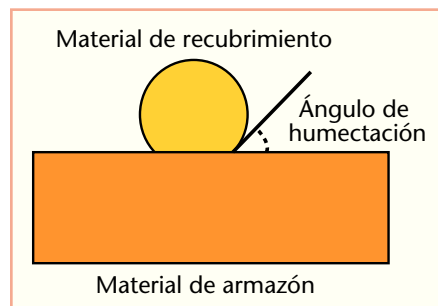


Fig. 1. Medición del ángulo de humectación.

es el ángulo de humectación, cuya determinación se muestra de forma esquemática en la figura 1. En el ángulo de humectación influirá la viscosidad de la masa de recubrimiento, que dependerá de la temperatura alcanzada en la primera cocción (opáquer, cocción Wash, dentina, liner, etc.). Por ello es tan importante atenerse a las temperaturas de cocción prescritas y comprobar regularmente el horno de cocción.

Mecanismos de unión por adherencia Retenciones (unión mecánica)

Las hendiduras y socavaciones (fig. 2) que se encuentran en las superficies preparadas permiten que la cerámica de recubrimiento fluya en ellas durante el proceso de cocción y tras la consiguiente solidificación se produce una unión mecánica. La dificultad que existe en este procedimiento consiste en el conflicto entre la estabilidad de la forma del modelado protésico y la mínima viscosidad

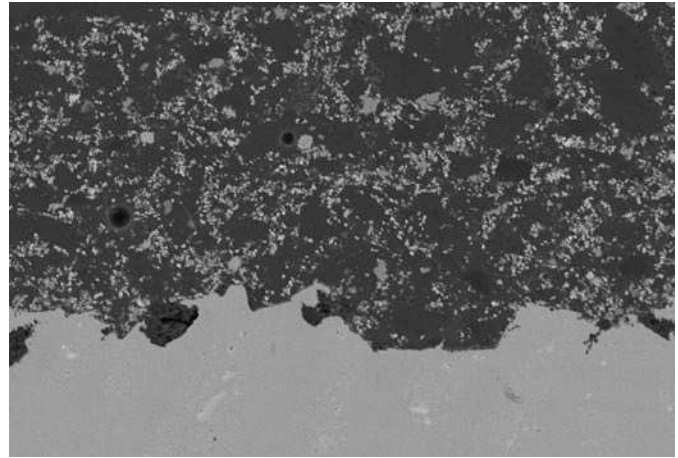


Fig. 2. Superficie metálica sometida a chorro de arena con socavaciones y capa de opáquer (fuente: VITA, 2006).

de las masas necesaria para la humectación que así se produce. Por esta razón, los fabricantes de masas de recubrimiento cerámicas para liner, opáquer, etc. recomiendan instrucciones de cocción que sirven precisamente para optimizar la humectación de las superficies sin requisitos previos en cuanto a la forma. La conformación anatómica de la restauración en ese caso tiene lugar en los procesos de trabajo subsiguientes.

Fuerzas de contracción

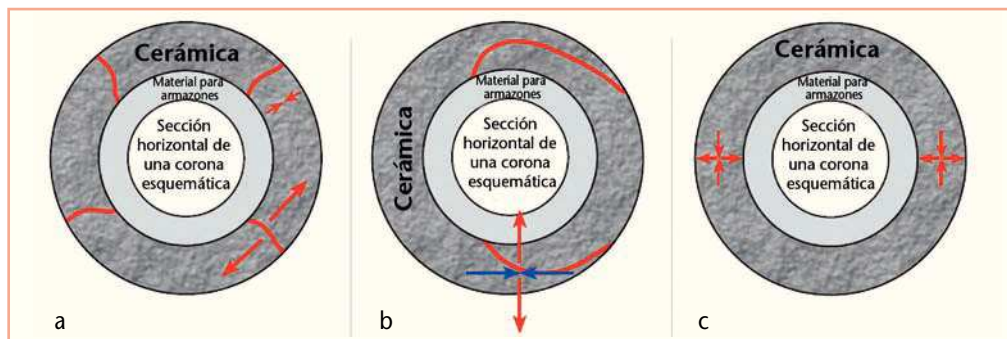
Las fuerzas de contracción son de gran importancia para la unión por adherencia y para la vida útil de las masas de recubrimiento. La resistencia a la presión sobrepasa en varias veces su resistencia a la tracción. Por esta razón, el coeficiente de dilatación térmica (CDT) de la parte de unión mecánica más débil, la masa de recubrimiento, es más bajo que el CDT del material del armazón. Así se consiguen evitar las cargas de tracción críticas a causa de la temperatura sobre la cerámica de recubrimiento. Los distintos comportamientos de dilatación térmica provocan, tras el enfriamiento a temperatura ambiente, una situación de tensión en la zona de unión que a su vez puede repercutir positivamente en la unión retentiva por adherencia. Si las diferencias entre ambos CDT son demasiado grandes, éstas pueden causar desprendimientos y fisuras en la masa de recubrimiento (fig. 3).

Unión química

La unión química en la cerámica con metal se basa, como es sabido, en enlaces por puente de oxígeno entre los óxidos metálicos del material del armazón y de la masa de recubrimiento. Eichner¹ atribuye a este factor hasta un 50% de la unión por adherencia para restauraciones cerámicas con metal. En las modernas aleaciones de metales preciosos usadas en la prótesis dental se emplean metales no preciosos para propiciar la oxidación de los componentes principales y para formar así los llamados óxidos adherentes necesarios para la unión. Entre éstos se cuentan el indio, estaño, hierro, cromo o man-

PUESTA AL DÍA

UNIÓN POR ADHERENCIA



ganoso, que ya están contenidos en las aleaciones de metales no preciosos. En caso de restauraciones cerámicas sin metal hay que admitir, por tanto, que los óxidos metálicos ya presentes (óxido de aluminio Al_2O_3 , Spinell $MgAl_2O_4$, dióxido de zirconio ZrO_2 , vidrios de infiltración) desempeñan un papel decisivo en el mecanismo de unión.

Estas fuerzas de atracción intermoleculares, o también llamadas fuerzas de Van der Waals, responden a fuerzas bipolares entre moléculas o átomos individuales. Su intensidad reside en las fuerzas de enlace metálico o iónico. Por medio de éstas se determina la tensión superficial de cada una de las sustancias y ésta a su vez determina la capacidad de humectación de las superficies.

Para el estudio de la resistencia de las uniones se han aplicado distintos procedimientos de ensayo, tanto conocidos como de reciente desarrollo. Los métodos establecidos, como por ejemplo las pruebas para evaluar la resistencia a la cizalla según Schmitz-Schulmeyer⁶ (DIN 13927) y las pruebas de flexión según Schwickerath² (DIN EN ISO 9693), encuentran aplicación en los sistemas de unión de cerámica con metal. Los procedimientos más nuevos, como la determinación de los índices de liberación de energía según Tholey¹⁴ o la determinación de la unión por adherencia por medio del ensayo de tracción según Stephan⁹, permiten caracterizar incluso las propiedades de la unión independientemente del sistema.

El estudio de la resistencia de la unión se efectúa básicamente aplicando tensiones críticas en los puntos de contacto (interfase). Esto puede llevarse a cabo por medio de fuerzas de presión, de flexión, de cizalla o de tracción.

Las pruebas de tracción (fig. 4) por lo general se llevan a cabo sobre cuerpos de ensayo geométricos definidos de forma exacta en una máquina de comprobación universal. En el ensayo de tracción tiene lugar una carga de tracción axial hasta causar la rotura en la zona de unión de las piezas de prueba. La tensión resulta de la geometría del cuerpo de ensayo y de la fuerza necesaria para la rotura. Las pruebas de tracción en coronas de recubrimiento reales o estilizadas son problemáticas puesto que no se puede de-

Fuerzas intermoleculares

Métodos para la determinación de la unión por adherencia

Pruebas de tracción

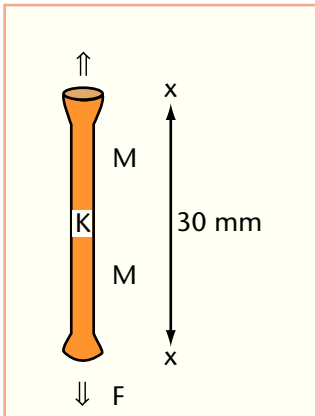


Fig. 4. Ensayo de tracción. F: fuerza; K: coeficiente de la norma.

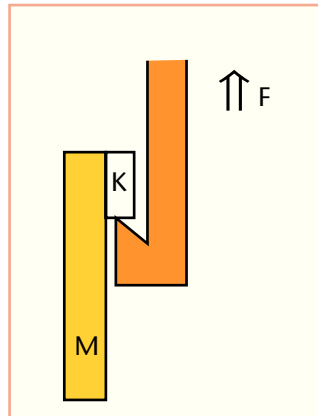


Fig. 5. Ensayo de cizalla según Schütz. F: fuerza; K: coeficiente de la norma.

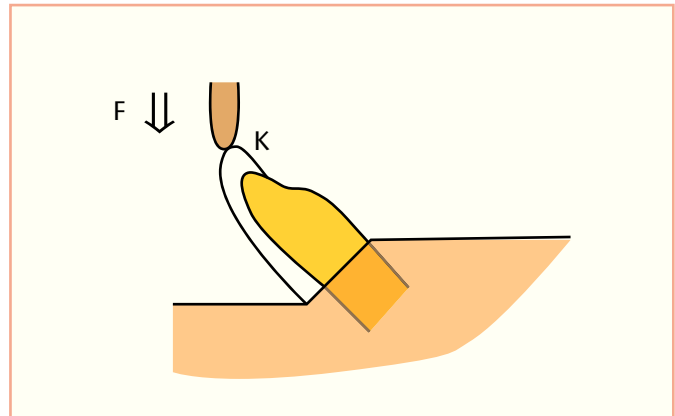


Fig. 6. Prueba de presión según Voss. F: fuerza; K: coeficiente de la norma.

terminar de forma inequívoca la acometida de fuerza ni su efecto. Así pues, del ensayo de tracción según Rossbach⁴ se pasó a un ensayo de tracción y cizalla. Esta prueba se realizó también para los sistemas de cerámica sin metal. En este caso se constató que la resistencia de la unión era más alta que la propia resistencia de la masa de recubrimiento, de modo que sólo se produjo una fisura en el recubrimiento.

Prueba de cizalla

Se efectuó también la prueba de cizalla (fig. 5) en cuerpos de ensayo con geometrías bien definidas. En este procedimiento de ensayo, que se aplica muy a menudo en la realización de pruebas con acrílicos, se debe desplazar o cizallar el material acrílico en dirección a la zona de unión metal/acrílico. Esto tiene lugar aplicando una carga de presión o de tracción sobre la parte acrílica. Uno de los problemas que surge en todos los dispositivos para el ensayo de cizalla es, según Marx⁴, la fuerza que actúa fuera de la zona de unión, creando momentos de torsión y de flexión. Para evitar esto en la mayor medida posible, durante las pruebas la cabeza de cizalla debe situarse, según Schmitz y Schulmeyer⁶, lo más cerca posible del límite metal-acrílico. Este método encuentra aplicación desde hace años en el ámbito de la técnica «etch and bond», que se usa, por ejemplo, para pegar carillas cerámicas a la dentina¹⁴.

Prueba de presión

En esta prueba (fig. 6) se debe comprobar la resistencia del recubrimiento cerámico ejerciendo presión en el borde incisal de la corona recubierta. Esta prueba fue llevada a cabo en primer lugar por Voss y Schwickerath³ en coronas de recubrimiento estilizadas. En los resultados influyó en buena medida la dirección de la presión ejercida y el punto de aplicación de la fuerza. Debido a las coronas uniformes solamente en parte y, por tanto, a los puntos de aplicación de la fuerza que nunca eran exactamente los mismos, hay que contar con una gran fluctuación de los valores de medición. Así pues, este método es inapropiado para obtener valores comparables. Esto atañe tanto a los sistemas de cerámica con metal como a los sistemas de cerámica sin metal.

Prueba de flexión según la EN ISO 6872 o ISO 9693

En este caso, la prueba sin duda más conocida es la prueba de flexión de tres puntos según Schwickerath (fig. 7), usada para determinar la resistencia de la unión metal/cerámica^{2,8}. Este método de ensayo se lleva a cabo también en un cuerpo de ensayo bien

PUESTA AL DÍA

UNIÓN POR ADHERENCIA

definido geométricamente. De acuerdo con la norma, la tensión al inicio de la fisura debe sobrepasar al menos los 25 MPa. Sólo en este caso será apropiada la unión de cerámica con metal para la aplicación en el ámbito dental. Tan pronto como se alcanza la carga límite para la dispersión de fisuras, se llega a la completa destrucción del sistema de unión («crecimiento catastrófico de fisuras»). El punto débil de este método de ensayo reside, según Marx⁴, en que los valores de resistencia de la adherencia dependen en gran medida de la resistencia a la flexión (módulo de elasticidad y dureza) de los materiales de recubrimiento, que por otra parte no se tienen en cuenta en la valoración de los resultados. Por tanto, la aplicación de este ensayo debería limitarse a la comparación de distintas uniones con el mismo material de recubrimiento o muy similar. El problema de este método de ensayo con cerámica sin metal reside en las propiedades físicas del material del armazón. Los armazones cerámicos no son dúctiles como el metal. Por tanto, el método sirve más bien para probar la resistencia a la flexión del material cerámico del armazón y no para provocar una fisura en la zona límite del material de recubrimiento y del armazón.

Otra propiedad crítica, que no se indica en la norma, es el borde del material de recubrimiento, que en la práctica puede ser afilado o bien redondeado en parte. Otro punto débil lo constituye el coeficiente k , necesario para el cálculo. Éste atañe solamente al módulo de elasticidad y grosor del material del armazón. Las propiedades de la masa de recubrimiento son ignoradas. El coeficiente k se suministra con la norma en forma de diagrama. La fórmula que acompaña a la norma para el cálculo de la resistencia de la unión es la siguiente:

$$\tau_b = k \cdot F_{\text{fail}}$$

k = coeficiente de la norma, F = fuerza

Las considerables ventajas de este método de ensayo consisten en la fácil fabricación de los cuerpos de ensayo con poco empleo de material y en su facilidad para llevarlo a cabo.

Puesto que todos estos métodos de ensayo traen consigo ciertos problemas o imprecisiones, parece necesario desarrollar un método de ensayo más exacto. Antes de entrar de lleno en este proceso, en los siguientes apartados ilustraremos la teoría que en él se implica. La necesidad de predecir la vida útil de los materiales condiciona especialmente el crecimiento de fisuras. Así, en el caso de dispersión de fisuras, se constata por una parte la velocidad de aparición de las fisuras y la fuerza que inicia la rotura. Desde 1921 se utiliza el criterio de la energía de Griffith como herramienta para describir la dispersión de fisuras, especialmente en materiales frágiles. Griffith reconoció que en cuerpo con una fisura sometida a carga se acumula energía elástica. Cuando la magnitud de esta fisura aumenta por alguna razón, la liberación de energía causa nuevas fracturas en la superficie. Con la teoría de Griffith se puede calcular una resistencia teórica de los materiales. Griffith explicó de este modo la energía total que puede haber en un sistema, con-

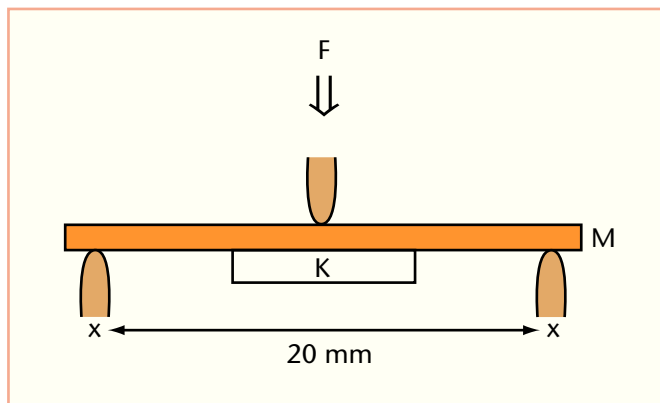


Fig. 7. Prueba de flexión de tres puntos según ISO 6872/9693. F : fuerza; K : coeficiente de la norma.

Determinación del índice de liberación de energía

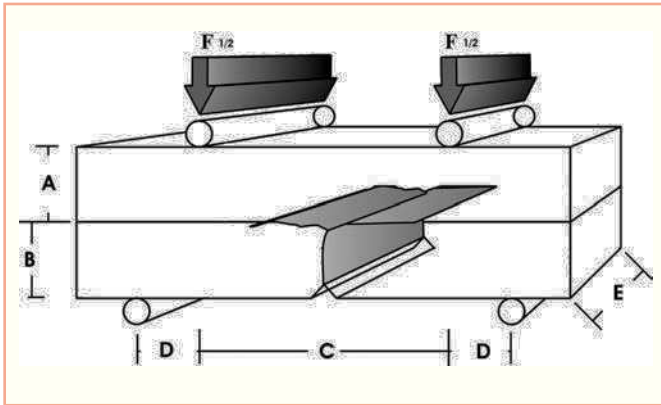


Fig. 8. Cuerpos de ensayo para la determinación del índice de liberación de energía según Tholey (A = armazón; B = recubrimiento; C = distancia del apoyo interior; D = distancia del apoyo interior y exterior; E = anchura del cuerpo de ensayo; F = fuerza).

sistente en la energía elástica acumulada internamente y en la energía inducida externamente. La energía total depende de la magnitud de la fisura. Una fisura está siempre relacionada con el consumo de energía⁵.

Irwin investigó en 1958 los vértices de las fisuras, en las cuales se concentran las tensiones y causan así una rotura. En materiales homogéneos, una fisura crece cuando la tensión acumulada en su vértice sobrepasa las fuerzas de cohesión entre las partículas elementales del material. De su tesis se puede deducir que, cuanto mayor es la resistencia a la formación de fisuras, más difícil es que una fisura se extienda por el material¹⁶.

A medida que una fisura avanza por el interior de un material, su alargamiento crea nuevas superficies libres en los vértices de la fisura, que aumentan la energía superficial del sistema.

Los materiales experimentan en parte deformaciones plásticas cuando se produce una rotura. En consecuencia, se trata de algo más que de un mero aumento de la energía superficial cuando se produce la prolongación de la fisura. La dispersión de una fisura sólo se da cuando el índice de liberación de energía de carga rebasa su valor G crítico. La producción de una rotura consiste, por consiguiente, en el origen de la fisura y en su dispersión.

La inestabilidad de fisuras se da cuando el índice de liberación de energía G es superior a la resistencia a la formación de fisuras. Si la dispersión de fisuras tiene lugar con la aplicación de presión constante, el índice de liberación de la energía elástica no dependerá de la velocidad de formación de la fisura. La resistencia a la formación de fisuras es constante durante el progreso de la fisura. Esta resistencia es una función del comportamiento de deformación plástica del material en los vértices de la fisura y de sus propiedades de rotura específicas del material. Estas propiedades de rotura dependen de los índices de carga. En el vértice de una fisura que progresa a gran velocidad, la carga es muy elevada. Cuanto mayor es la velocidad de formación de una fisura, más frágil se vuelve el comportamiento de un material. De hecho sólo se puede investigar el progreso de una fisura controlable, las roturas catastróficas son difíciles de interpretar o no se pueden interpretar en absoluto⁵.

Con los nuevos métodos de ensayo actualmente se puede hacer progresar una fisura de forma controlada. En el cálculo del índice de liberación de energía se puede emplear un cuerpo de ensayo claramente definido en su forma geométrica y con una estabilidad constante. La incisión se practica por medio del método K_{1c} . Con ello se garantiza una constante y los resultados son claramente comparables entre sí. En un dispositivo de ensayo de resistencia a la flexión en cuatro puntos, la pieza de prueba se somete a una fuerza con la que se iniciará una fisura en la zona de unión. Para calcular la energía liberada en el progreso de la fisura practicada en la zona de unión se necesita tener en cuenta además, aparte de esta fuerza y de los factores geométricos, los módulos de elasticidad y los coeficientes de contracción transversal de los dos materiales contenidos en el cuerpo de ensayo (fig. 8). Así pues, esta prueba tiene en cuenta tanto las propiedades especiales de los sistemas de cerámica sin metal como los sistemas

PUESTA AL DÍA

UNIÓN POR ADHERENCIA

de cerámica con metal, y se puede llevar a cabo exactamente con tanta facilidad como las pruebas de unión por adherencia ya descritas.

$$G = \frac{\eta (F^2 l^2) (1 - \mu_g^2)}{E_g b^2 h^3}$$

Energía liberada G: F = fuerza; l = diferencia entre el apoyo interior y exterior; μ = coeficiente de Poisson; E = módulo de elasticidad; b = anchura de la pieza de prueba; h = altura; g + v = índice para el armazón, cerámica de recubrimiento; η = factor geométrico

A partir de la diferencia de los métodos de ensayo presentados se hace evidente que la comparación de los valores de medición y su propia interpretación es muy difícil de llevar a cabo cuando se trata de uniones de cerámica-metal. Para obtener valores de medición significativos en un solo método de ensayo los cuerpos de ensayo deberían estar configurados de tal modo que fuera posible emitir un juicio cuantitativo sobre la resistencia de la unión. Además, los cuerpos de ensayo deberían contar con una geometría sencilla para conseguir una precisión reproducible y la posibilidad de comparación en una serie exhaustiva de pruebas. En lugar de calcular la resistencia de la adherencia de la unión, a menudo se calcula más bien la resistencia a la tracción o a la flexión del material de recubrimiento. El traslado de la mayoría de métodos de ensayo para los sistemas de unión de cerámica con metal a la cerámica sin metal es muy difícil de conseguir. Las cerámicas se comportan de múltiples maneras, de modo sustancialmente diferente a los metales. En los métodos empleados para la comprobación de la unión por adherencia no es suficiente, por tanto, imitar los procedimientos desarrollados para metales, sino que hay que prestar atención a las propiedades especiales de las cerámicas.

Las normas actualmente disponibles o que se encuentran en desarrollo lamentablemente no son exhaustivas en lo esencial para obtener valores que son necesarios para la caracterización de la unión de restauraciones dentales con cerámica sin metal. Las propiedades especiales de los materiales cerámicos del armazón solamente se han tenido verdaderamente en cuenta en uno de los métodos de ensayo descritos para la unión entre los materiales, la determinación del índice de liberación de energía.

A pesar de todas las posibilidades de error que inciden en las pruebas de unión por adherencia entre armazones de dióxido de zirconio (ZrO_2) y sus correspondientes masas de recubrimiento, existen algunos datos claros que son comunes a todas las investigaciones. Incluso en superficies altamente pulidas se consigue, al contrario que en sistemas de cerámica con metal, una unión excelente; o sea, que la masa de recubrimiento se adhiere perfectamente incluso en las superficies del armazón que no cuentan con medidas de retención. En la figura 9 se puede ver una ampliación 20.000:1 de una de dichas superficies de un armazón VITA In-Ceram[®] YZ recubierta con VITA VM9. El armazón está cubierto homogénea y completamente y no muestra, incluso a esta elevada resolución, ningún punto defectuoso en la zona de unión. Se puede constatar un comportamiento de humectación extraordinario de la masa de recubrimiento a base de ZrO_2 . En la cocción con dentina Wash recomendada por VITA para los armazones de ZrO_2 , en cuya primera cocción de la cerámica a una mayor temperatura se empleó una

Discusión sobre cada uno de los métodos de ensayo

Discusión sobre cada uno de los métodos de ensayo

Fig. 9. Zona de unión del ZrO_2 con VM9 (20.000 aumentos) (fuente: VITA, 2005).

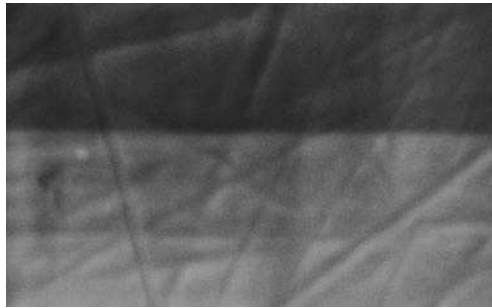
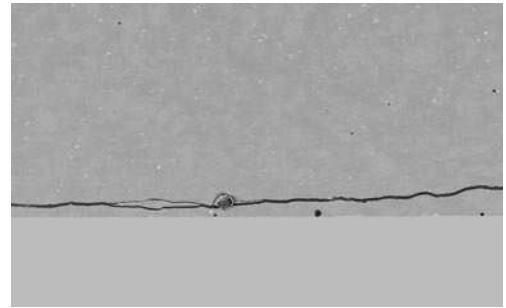


Fig. 10. Zona de unión del ZrO_2 y la masa de recubrimiento tras el inicio de la fisura (300 aumentos) (fuente: VITA, 2005).



capa muy fina de masa de recubrimiento, no puede observarse tampoco ninguna retracción de los bordes (fig. 10). En virtud de las razones citadas se puede deducir que la adherencia no se base solamente en la unión mecánica.

Como quiera que se miran los resultados de las pruebas de unión por adherencia, es evidente que después de la prueba siempre queda adherida una capa de masa de recubrimiento sobre las superficies de los armazones cerámicos. Esto demuestra que se debe garantizar una unión excelente, puesto que muy a menudo en sistemas de cerámica con metal, por el contrario, se desprende la capa completa de cerámica junto con el opáquer, tal como demuestra también la prueba según Tholey.

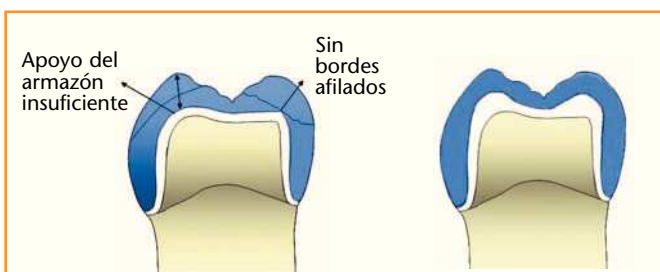
En el ensayo para medir la energía de liberación de una fisura en la zona de unión se constató la influencia de los distintos coeficientes de dilatación térmica. De modo que el valor del índice de liberación de energía obtenido con un CDT de 9,2 fue unas tres veces superior que el obtenido con un CDT de 9,4. Para ello se sometió a prueba tanto una muestra de un competidor de la empresa VITA con el correspondiente CDT como también una masa cerámica de recubrimiento fabricada especialmente para los ensayos de este estudio con el mismo coeficiente de dilatación térmica.

Conclusiones a partir de los valores hallados

De todo ello se concluyen los siguientes puntos como resultado de todas las investigaciones con armazones de dióxido de zirconio:

- La unión por adherencia de la cerámica de recubrimiento a base de dióxido de zirconio no se cimienta solamente en la unión mecánica. La diferencia de los CDT entre el armazón y el material de recubrimiento influye en gran medida, también en sistemas de cerámica sin metal, sobre la adherencia. Los tratamientos de las superficies, como el chorro de arena, ejercen una influencia negativa sobre el material del armazón. Con un tratamiento semejante y en el caso de armazones de dióxido de zirconio parcialmente estabilizado de itrio se produce una transformación superficial de la fase tetragonal a la fase monoclinica. Esto causa tensiones que pueden provocar fisuras posteriores. La empresa VITA (Bad Säckingen) recomienda la cocción de regeneración o liberación (1.000 °C/15 min de tiempo de mantenimiento) para contrarrestar completamente este efecto.
- La unión entre el armazón y la masa de recubrimiento no se debe solamente a fuerzas físicas.
- Los armazones deben contar con apoyos de masa de recubrimiento (forma del diente más pequeña, tal como se da en el caso de recubrimientos de cerámica con metal) (fig. 11).

Figs. 11a y 11b. La conformación del armazón debería realizarse siempre en una forma reducida del diente.



PUESTA AL DÍA

UNIÓN POR ADHERENCIA

- Particularmente, el hecho de que tanto la cerámica del armazón como la masa de recubrimiento consistan en óxidos metálicos trae como consecuencia lógica que al menos uno de los componentes de la unión deba ser de naturaleza química. Por otra parte, los armazones de los sistemas de cerámica sin metal mantienen siempre, al contrario que las distintas aleaciones de los sistemas de cerámica con metal, el mismo CDT, el cual garantiza una mejor adaptación de la masa de recubrimiento sobre el armazón.

Además, para llevar a cabo las restauraciones con éxito resultan decisivas las siguientes normas básicas:

- Deben observarse estrictamente las indicaciones del fabricante para la estratificación y la cocción. Debe evitarse la cocción de la cerámica de recubrimiento por debajo de las temperaturas prescritas; para ello deben realizarse periódicamente pruebas para verificar los grados de cocción y garantizar el funcionamiento de una bomba de vacío.
- La primera cocción, la llamada cocción con dentina Wash, es decisiva para la humectación de las superficies (y, por tanto, para la unión) y debe realizarse y controlarse con sumo cuidado. Si se observan estos puntos, la restauración dental con armazones de dióxido de zirconio puede alcanzar los resultados deseados.

1. Eichner K. Über die Bindung von keramischen Massen und Edelmetall-Legierungen – Theorien und optische sowie elektronenmikroskopische Untersuchungen. Dtsch Zahnärztl Z 1968;23:373–382.
2. EN ISO 6872:1998 und 9693:1999
3. Kappert HF, Eichner K. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. 7. Auflage; Stuttgart: Thieme Verlag, 2000.
4. Marx R. Moderne keramische Werkstoffe für ästhetische Restaurationen - Verstärkung und Bruchzähigkeit. Dtsch Zahnärztl Z 1993;48:229-236.
5. Mencik J. Mechanics of components with treated or coated surfaces. 1st edition. Kluwer academic publisher, 1996.
6. Schmitz K, Schulmeyer H. Bestimmung der Haftfestigkeit dentaler metallkeramischer Verbundsysteme. Dent Labor 1975;23(12):1416-1420.
7. Schreiner J. Vergleichende Untersuchung von vier Verfahren zur Prüfung der Haftung Metall-Keramik. Universität Mainz: Promotionsarbeit, 1985.
8. Schwickerath H. Dauerfestigkeit von Keramik. Dtsch Zahnärztl Z 1986;41:266.
9. Stephan M. Zur Entwicklung von ZrO₂-verstärkten Dentalkeramiken. Berlin: Buch & Mensch Verlag, 2000.
10. Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M. Curriculum Prothetik. Band I – III. Berlin: Quintessenz Verlag, 1999:43-61.
11. Suansuwan N, Swain MV. Characterization of tribochemically assisted bonding of composite resin to porcelain and metal. J Dent 1999;28(6):4415.
12. Suansuwan N, Swain MV. Application of strain energy release rate to characterize the Adhesion at ceramic-metal interfaces. University of Sydney. PhD 2001.
13. Tholey M, Swain MV, Waddell JN. Application of Strain Energy Release Rate to Characterise the Adhesion Ceramic-Titanium Interfaces. Research report for the 1st Praxissemester. Fachhochschule Osnabrück, 2004.
14. Tholey M. Charakterisierung des Haftverbundes in vollkeramischen Systemen mittels der Energiefreisetzungsrates. Diplomarbeit. VITA Zahnfabrik und Fachhochschule Osnabrück, 2005.
15. VITA Zahnfabrik: Angaben aus Begleitbroschüren bzw. www.vita-zahnfabrik.de, 2005.
16. Yue JJ. Energy concepts for fracture. Virginia Tech Materials Science and Engineering, 1997.

Bibliografía

Michael J. Tholey, Dipl.-Ing. Dentaltechnologie
Correo electrónico: m.tholey@vita-zahnfabrik.com

Dr. Marc Stephan

Correo electrónico: m.stephan@vita-zahnfabrik.com

Ambos: VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Ballyweg 6, 79713 Bad Säckingen

Correspondencia