

LA IMPORTANCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE RESISTENCIA A LA CIZALLADURA DE LOS ADHESIVOS CEMENTOSOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS

Richard P. Goldberg AIA, CSI, NCARB

Arquitecto - Professional Consultants International

1. INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de una nueva generación de adhesivos cementosos modificados con polímeros ha ido aumentando el énfasis en la importancia de la flexibilidad y de las capacidades de deformación de estos adhesivos. Mientras que esta característica es uno de los elementos clave en la aplicación exitosa de este tipo de adhesivos para la construcción, las iniciativas actuales de las normas internacionales de clasificar los adhesivos cementosos modificados con polímeros por medio de las características de deformación no consideran de manera suficiente la igualmente importante y equilibrante característica de una alta resistencia a la cizalladura y el resultante módulo de cizalladura de estos adhesivos.

El comportamiento de las uniones con adhesivos estructurales y no estructurales ha sido extensamente estudiado y cuantificado en aplicaciones mecánicas y aeroespaciales. Sin embargo, el estudio y desarrollo de métodos cuantitativos para la adhesión estructural de construcciones compuestas con baldosas y placas de materiales de piedra sigue siendo prioritario en el diseño de edificaciones e infraestructuras. Esta ponencia explora la teoría general y el análisis estructural de la tecnología de la adhesión para mostrar la importancia de contar con una propiedad de alta resistencia a la cizalladura en los adhesivos cementosos modificados con polímeros, y para demostrar la necesidad de contar con métodos de diseño cuantitativos para las aplicaciones de alto rendimiento de construcciones compuestas con baldosas adheridas como por ejemplo en las fachadas exteriores de la edificaciones.

Los adhesivos cementosos modificados con polímeros que por su formulación proporcionan un módulo de cizalladura equilibrado (flexibilidad moderada y alta resistencia a la cizalladura) cuentan con una historia empírica probada de 50 años de aplicación satisfactoria, así como con una teoría de la tecnología de la adhesión comprobada que es única para el campo específico de las baldosas y piedras naturales directamente adheridas.

2. ANTECEDENTES – MÓDULO DE CIZALLADURA DE LOS MATERIALES

Prácticamente todo el mundo sentiría cierta incomodidad si le dijese que un ingeniero estructural adivina el tamaño de las vigas de acero necesarias para un puente utilizando una lógica de diseño basada en que el acero simplemente es un material muy resistente. Pero, por alguna razón, parece aceptable seleccionar un adhesivo para baldosas para, por ejemplo, adherir baldosas a una fachada, basándose en las características cualitativas, como únicamente un intervalo de deformación o la resistencia a la cizalladura, sin siquiera determinar el movimiento anticipado del soporte, o aún peor, sin conocer o considerar las características físicas de la baldosa, del soporte o del adhesivo utilizado para adherir la baldosa. Este tipo de “adivinanzas” puede tener consecuencias importantes.

El módulo de cizalladura es una de muchas de estas medidas cuantitativas de la resistencia de un material. El módulo de cizalladura de un material es esencialmente una constante numérica que describe sus propiedades de deformación elástica, o grado de rigidez, bajo aplicación de fuerzas internas transversales. En las construcciones compuestas con baldosas adheridas, tales fuerzas resultan típicamente debido a diferencias térmicas, humedad o movimiento estructural entre el material adherido, por ejemplo gres porcelánico, y un soporte típico como una losa de hormigón o un muro construido con bloques de cemento.

Físicamente, la deformación se puede caracterizar mediante un pequeño volumen de forma cúbica ligeramente distorsionado de tal manera que dos de sus caras se desplazan una pequeña distancia de forma paralela en sentido contrario y dos de sus otras caras cambian su forma cuadrada a romboide (figura 1). El módulo de cizalladura es una medida que caracteriza la capacidad del material de resistir deformaciones transversales, siendo este índice únicamente válido para el comportamiento elástico de deformaciones pequeñas, luego de las cuales el material es capaz de volver a su configuración original. Los materiales más flexibles con mayores deformaciones pueden pasar del estado elástico al plástico, también conocido como punto de fluencia (límite elástico) del material, y bajo mayores tensiones de corte pueden presentar deformaciones permanentes o fracturarse.

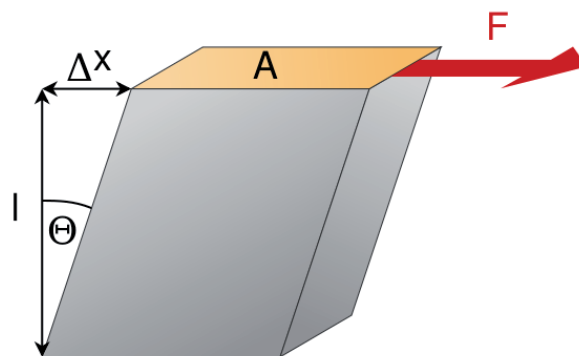


Figura 1. Calculando el módulo de cizalladura de un material.

En la ciencia de los materiales el módulo de cizalladura, que se representa con el símbolo G , a veces con S o μ , se define como la razón entre la tensión de corte y la deformación de corte. El módulo de cizalladura generalmente se expresa en GPa (gigapascasles) o ksi (miles de libras (kips) por pulgada cuadrada):

$$G \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{F/A}{\Delta x/I} = \frac{FI}{\Delta x A}$$

Ecuación 1.

donde

$$\tau_{xy} = F/A = \text{tensión de corte}$$

F es la fuerza actuante

A es el área en la cual actúa la fuerza

$$\gamma_{xy} = \Delta x/I = \tan \theta = \text{deformación de corte}$$

Δx es el desplazamiento transversal

I es la longitud inicial

A los efectos de brindar una mejor comprensión del concepto postulado por esta ponencia, consideraremos dos diferentes adhesivos cementosos modificados con polímeros, cada uno de alta deformación, categoría S2, conforme a las normas vigentes de la industria cerámica EN 12004 / ISO 13007-2, que requieren que los adhesivos sean capaces de soportar una deformación transversal de ≥ 5 mm (0,2 pulgadas) sin fallos de adhesión. Ambos adhesivos pueden presentar las mismas características de deformación (por ejemplo 5 mm). Sin embargo, al no conocer la tensión de corte necesaria para inducir dicha deformación, o el módulo de cizalladura del adhesivo, no es posible saber si los adhesivos presentan una resistencia a la cizalladura suficiente para evitar la fatiga originado por las tensiones de corte cíclicas o el fallo repentino originado por deformaciones permanentes una vez el adhesivo alcanzase el límite elástico. En otras palabras, ambos adhesivos pueden que cumplan con el estándar de rendimiento, pero un adhesivo más flexible con un módulo de cizalladura más bajo, que resulta en propiedades de resistencia a la cizalladura reducidas, puede ser más susceptible al fallo bajo ciertas condiciones adversas. Por ello, la flexibilidad de los adhesivos cementosos modificados con polímeros por si sola no es una medida válida de rendimiento, cuando los adhesivos están expuestos a deformaciones transversales causados por movimientos diferenciales entre baldosa y soporte.

3. EL MÓDULO DE CIZALLADURA DE LOS ADHESIVOS

Con el fin de brindar un esquema de referencia para la comparación entre varios tipos de adhesivos, es útil comprender el intervalo de rendimientos de flexibilidad de varios tipos de adhesivos utilizados en la industria cerámica y en la construcción.

Los adhesivos formulados con polímeros de poliuretano típicamente son considerados como adhesivos relativamente flexibles y presentan un módulo de cizalladura bajo con valores en el intervalo de 0,05-0,02 Gpa (7.2×10^3 - 2.9×10^4 psi). Los adhesivos formulados con resinas epoxi típicamente son considerados como adhesivos más rígidos, a pesar de contar con un módulo de cizalladura re-

lativamente bajo, en comparación con materiales adheridos típicos como el gres porcelánico que presenta un módulo de cizalladura con valores en el intervalo de 0,2-3,5 Gpa ($2,9 \times 10^4 - 5 \times 10^5$ psi). Los adhesivos cementosos modificados con polímeros moderadamente deformables pueden tener un módulo de cizalladura en el intervalo de 0,30 Gpa (4×10^4 psi).

En comparación, el valor del módulo de cizalladura del aluminio y del vidrio es de aproximadamente 24 Gpa (3.5×10^6 psi) y el acero, bajo tensión de corte, es más de tres veces más rígido que el aluminio. En el otro lado del espectro, la goma tiene un módulo de cizalladura de 0,006 Gpa. Por lo tanto, en términos relativos, los adhesivos cementosos modificados con polímeros se considerarían como materiales que presentan un módulo de cizalladura relativamente bajo comparado con materiales más fuertes y rígidos como el gres porcelánico o el acero.

4. LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ADHESIVOS

Existen varios métodos de ensayo establecidos para determinar el módulo de cizalladura y de la resistencia a la cizalladura de los adhesivos. El "Método de ensayo normalizado para la medición de las propiedades de cizalladura de los adhesivos estructurales mediante el ensayo de riel modificado" de ASTM D 4027-04 [1], es un protocolo de ensayo que determina los valores de resistencia a la cizalladura de los adhesivos con un grado de precisión que permite un uso en ingeniería y predecir las características de construcciones compuestas con baldosas adheridas con adhesivos. El diseño estructural basado en el principio de la resistencia de los materiales o en la teoría de la elasticidad requiere conocimientos de las propiedades mecánicas de los materiales adheridos, incluidos los adhesivos. Por la naturaleza de su uso, la característica física más importante de cualquier adhesivo es su módulo de cizalladura; el módulo de cizalladura determinado por ambas características, la resistencia a la cizalladura y deformación de corte.

Basándose en la teoría de la elasticidad, el módulo de cizalladura de los adhesivos cementosos modificados con polímeros también se puede calcular de la siguiente forma:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1 + V)}$$

donde

G_c = modulo de cizalladura del cemento

E_c = modulo de elasticidad del cemento.

V = coeficiente de Poisson.

5. TEORÍA DE LA TECNOLOGÍA DE LA ADHESIÓN

Un aspecto importante a considerar para evaluar la compatibilidad y la selección de un adhesivo es la diferencia entre las características del módulo de cizalladura de los materiales adheridos. En una construcción compuesta con baldosas adheridas, el módulo de cizalladura de la baldosa (G_1) es mucho mayor que el del soporte cementoso (G_2), y por lo tanto, la unión baldosa-adhesivo es frecuentemente más proclive a la concentración de tensiones de corte y a un potencial fallo. El resultado es que la resistencia a la cizalladura se convierte en la característica de diseño predominante, independientemente de la capacidad de deformación del adhesivo. Cuando se adhieren materiales de diferentes composiciones y características, las investigaciones sugieren que el módulo de cizalladura del adhesivo sea $\frac{1}{2} (G_1 + G_2)$ [2].

Por lo tanto, es importante seleccionar un adhesivo con características de flexibilidad o rigidez equilibradas que sea compatible con los materiales adheridos, por ejemplo con la baldosa y el tipo de soporte. Las normas de la industria de la construcción como la norma ASTM C0623-05 "Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad, módulo de cizalladura y el coeficiente de Poisson del vidrio y materiales vitrocerámicos mediante resonancia" brindan un método para determinar la rigidez de la baldosa para fines de diseño estructural. Existen protocolos similares de ensayo y fórmulas establecidas en la ingeniería para determinar el módulo de cizalladura de muchos tipos de soporte para baldosas, que permiten afirmar que los soportes presentan una resistencia a la cizalladura capaz de resistir las tensiones de corte que pueden generarse por la adhesión de materiales dispares con mayores características del módulo de cizalladura, incluidos los adhesivos. En la industria de la construcción se llevaron a cabo muchas investigaciones respecto a la compatibilidad de los adhesivos y los materiales adheridos, sobre todo para la construcción con ladrillos, para la cual es importante determinar la compatibilidad de la resistencia a la compresión, a la cizalladura y a la flexión entre el ladrillo y el mortero para un rendimiento apropiado de la construcción compuesta por ladrillos [3].

Si bien las normas de la industria cerámica y la teoría básica de ingeniería reconocen que los adhesivos cementosos modificados con polímeros más deformables pueden absorber y aislar los movimientos comunes en aplicaciones de alto rendimiento como en fachadas exteriores, existen muchas situaciones en las cuales un adhesivo más flexible puede ser perjudicial o en las cuales la resistencia a la cizalladura del adhesivo puede ser determinante para el diseño.

Es un fenómeno muy conocido que, en los adhesivos más rígidos, la tensión de corte se distribuye uniformemente en la superficie de contacto del adhesivo, mientras que, en los adhesivos más flexibles, se concentra en el perímetro de la superficie de contacto del adhesivo. Los datos de la ingeniería también demuestran que los adhesivos con un módulo de cizalladura mayor muestran un compor-

tamiento tensión de corte-deformación mucho más lineal para un gran intervalo de tensiones, mientras que los adhesivos con un módulo de cizalladura menor muestran un comportamiento no lineal y consecuentemente presentan mayores deformaciones. Por lo tanto, mientras que los adhesivos modificados con polímeros altamente flexibles son capaces de absorber mejor el movimiento diferencial entre los componentes de una construcción compuesta con baldosas, su comportamiento es menos predecible matemáticamente.

Los fabricantes líderes en polímeros redispersibles utilizados en los productos adhesivos para baldosas han realizado cuantiosos estudios [4] respecto a las capacidades de varias formulaciones de adhesivos modificados con polímeros para baldosas. Es sabido, que los adhesivos deformables para baldosas conformes a EN 12002 / ISO 13007 clase S1 contienen aproximadamente 3-5% de polímeros modificados, porcentaje respecto al peso de la masa seca, mientras que los de clase S2, correspondiente a adhesivos altamente deformables para baldosas, requieren más de 9-10% de polímeros modificados (véase figura 2). Sin embargo, como se puede observar en la figura 3, existe un equilibrio entre un rendimiento lineal predecible de un adhesivo moderadamente deformable y un rendimiento no lineal de adhesivos altamente deformables. En los adhesivos cementosos modificados con polímeros muy flexibles, al aumentar el contenido de polímeros modificados las deformaciones pueden resultar en una fatiga irrecuperable y las capacidades de resistencia a la cizalladura verse disminuidas pudiendo resultar más críticas.

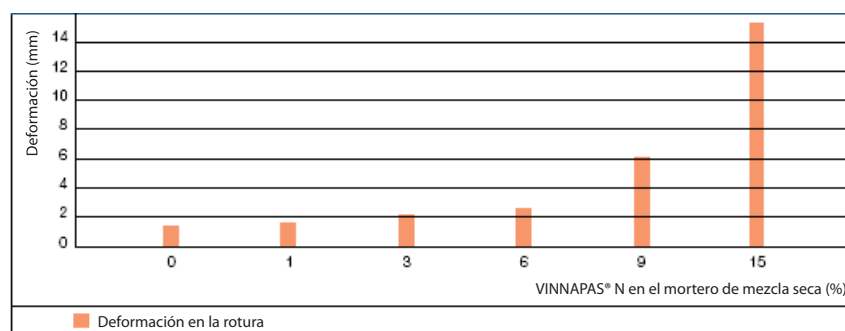


Figura 2. Efecto del porcentaje de polímeros modificados [4] en la capacidad de deformación de un mortero adhesivo.

Por lo tanto, la capacidad de deformación por si sola no es un indicador del rendimiento definitivo de un adhesivo para baldosas. Como resultado, el ensayo y la determinación de las características de la resistencia a la cizalladura y del módulo de cizalladura, junto a las características de flexibilidad, permiten una evaluación más precisa del rendimiento de un adhesivo cementoso modificado con polímeros bajo condiciones adversas.

Así como, para el cálculo estructural de la estructura de una edificación, también es útil conocer las características últimas de resistencia propias de un adhesivo cementoso modificado con polímeros, que difiere de su resistencia a la

cizalladura cuando es adherido a otro material. Esto permite al proyectista cuantificar las tensiones de corte propias que un adhesivo puede soportar, y también si esta característica resulta determinante para el diseño bajo ciertas condiciones.

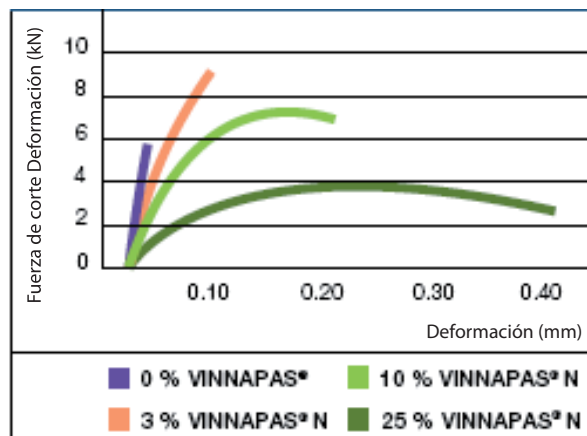


Figura 3. Gráfico fuerza de corte-deformación [4]; el comportamiento de la tensión de corte es más predecible en adhesivos cementosos modificados con polímeros moderadamente flexibles.

- **Fatiga.** La carga/solicitación cíclica de adhesivos altamente deformables puede resultar en fatiga irrecuperable, pudiendo llegar el adhesivo al estado plástico, acompañado de una reducción de las capacidades de resistencia a la cizalladura. Bajo cargas cíclicas, las tensiones y deformaciones se intensifican y se acumulan, pudiendo resultar en un fallo potencial de cohesión interna o, en un fallo en la superficie de contacto.
- **Plasticidad y elasticidad.** Cuando se generan tensiones de corte en la superficie de contacto de un adhesivo cementoso modificado con polímeros, flexible y altamente deformable, el adhesivo se comporta inicialmente de manera elástica. La tensión de corte es acompañada por un aumento proporcional de la deformación, y al quitar la carga que genera la tensión de corte, el adhesivo vuelve a su forma / tamaño original. Sin embargo, si la carga sobrepasa cierto límite (conocido como "límite elástico") las deformaciones incrementan más rápidamente que en la región elástica del material adhesivo, quedando al quitar la carga que genera la tensión de corte una parte de la deformación remanente e irrecuperable. La plasticidad describe el comportamiento de los materiales que sufren deformaciones irreversibles sin rotura o daño. Sin embargo, incluso los adhesivos cementosos modificados con polímeros altamente deformables no pueden soportar un comportamiento plástico significativo antes del fallo interno o por cizalladura. No obstante, es importante hacer notar que la deformación elástica predecible depende del intervalo de tiempo y de la velocidad de carga, y que una carga rápida, como la causada por un evento sísmico o choque térmico, puede también resultar en un fallo repentino de la adhesión.
- **Duración de la carga.** La duración de la tensión de corte ejercida en un adhesivo cementoso modificado con polímeros es otro factor que también es más significativo en los adhesivos flexibles, más deformables. Las in-

vestigaciones muestran que los adhesivos más rígidos se comportan más favorablemente que los adhesivos flexibles ante cargas mantenidas. Los adhesivos flexibles muestran una mayor fluencia inicial.

- Durabilidad de los polímeros flexibles. La cuestión de mayor preocupación en relación al rendimiento de adhesivos cementosos modificados con polímeros altamente deformables es el rendimiento a largo plazo bajo condiciones de temperatura y de humedad reales. Las investigaciones recientes indican que la exposición prolongada a la humedad tiene un efecto significativo sobre las características de deformación de ciertas formulaciones de adhesivos cementosos modificados con polímeros en comparación con las muestras de laboratorio del mismo tipo y edad. La degradación de la resistencia de unión parece ser un tema menos preocupante. [6]

Las muestras almacenadas en el exterior durante 180 días bajo condiciones normales de utilización mostraron una reducción de las características de deformación transversal al 15-18% para algunas de las formulaciones de adhesivo, en comparación con las muestras de laboratorio de 28 días de curación. Para la deformación transversal el resultado más alto obtenido bajo condiciones de exterior fue de 3,55 mm, lo cual fue 50% menos que el valor más bajo alcanzado por todas las formulaciones de adhesivo bajo condiciones de almacenamiento de laboratorio.

Un línea de pensamiento sobre esta cuestión es que la flexibilidad de adhesivos para baldosas es más crítica durante el proceso inicial de la construcción de una edificación, ya que la mayoría de los movimientos diferenciales, atribuibles a la retracción y la fluencia, disminuye con el tiempo, y un compuesto estable de baldosa y soporte requiere menos flexibilidad con el paso del tiempo. Sin embargo, las investigaciones indican que la resistencia a la cizalladura sigue siendo un atributo importante y probado de un adhesivo cementoso modificado con polímeros, tal como lo es la necesidad de cualificar y cuantificar los requisitos de rendimiento a largo plazo de ciertas formulaciones de adhesivo deformables.

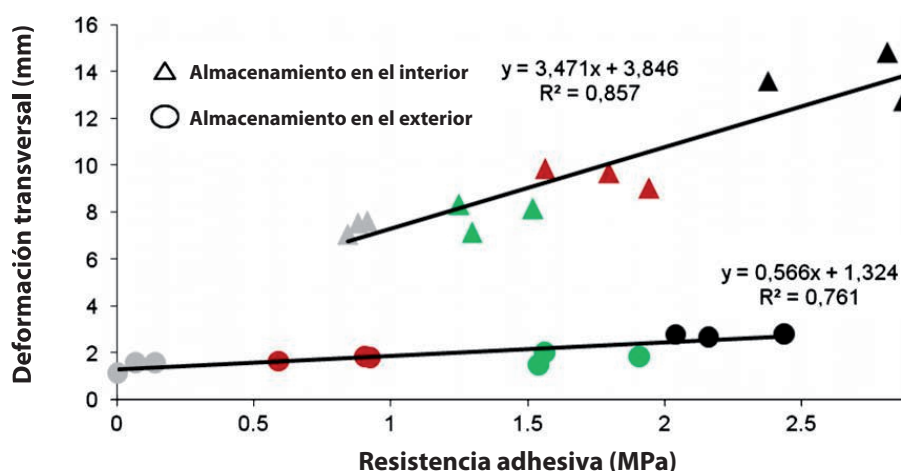


Figura 4. Gráfica que compara la deformación transversal y la resistencia adhesiva de muestras de laboratorio y del exterior en condiciones de utilización a una edad de 180 días [6]; nótese la disminución significativa en la deformación de las muestras del exterior.

6. CONCLUSIÓN

Si bien la nueva generación de productos adhesivos cementosos modificados con polímeros, flexibles y deformables, es en primera instancia un desarrollo positivo de cara a aplicaciones de adhesión directa de baldosas y piedras más satisfactorias, el realizar más investigaciones y ensayos sigue siendo una prioridad absoluta. La importancia principal radica en la necesidad de desarrollar criterios de ingeniería más objetivos y aceptados para el diseño y la especificación de estos adhesivos, tales como los requisitos del módulo de elasticidad, módulo de cizalladura y resistencia a la cizalladura. De forma similar, las normas internacionales (ISO), normas americanas (ANSI) y normas europeas (EN) para la industria cerámica deberían incorporar tales criterios de ingeniería para que los arquitectos e ingenieros puedan tomar decisiones más informadas y científicas que inspiren mayor confianza y éxito en el uso de esta importante tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASTM International "ASTM D4027-04 "Standard Test Method for Measuring Shear Properties of Structural Adhesives by the Modified Rail Test, West Conshohocken, PA.
- [2] Handbook of Adhesives & Sealants, Edward M. Petrie, 2006 p.54.
- [3] Technical Notes on Brick Construction 8B, Brick Industry Association, Reston, VA, 2006.
- [4] Shape the Future with Modern Tile Adhesives-Vinnapas, Wacker Chemie AG, Adrian, Michigan, 2007.
- [5] Behavior of Construction Adhesives Under Long Term Load, USDA, Forest Products Lab, 1981.
- [6] Bond Strength & Transversal Deformation Aging on Cement-Polymer Adhesive Mortar, Maranhao & Vanderley, University of Sao Paulo, Brazil, 2007.
- [7] www.proconweb.com
- [8] www.laticrete.com