

PONENCIA 102 bloque B1

EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN DEL MATERIAL DE REJUNTADO: ¿CÓMO SE PUEDE MEDIR?

ROCHA-GOMES, Leila Verônica da

Profesor del Centro Federal de Educação Tecnológica
Estudiante del Programa de Postgrado en Ingeniería Civil
Universidade Federal do Espírito Santo - Brasil
e-mail: leila@cefetes.br

TRISTÃO, Fernando Avancini

Profesor del Programa de Postgrado en Ingeniería Civil
Universidade Federal do Espírito Santo - Brasil
e-mail:fernandoavancini@ct.ufes.br

1 RESUMEN

El material de rejuntado es uno de los componentes del sistema de recubrimiento cerámico que podría ser responsable de un número de manifestaciones patológicas que se han producido en las fachadas de los edificios revestidas con cerámica, como por ejemplo, las grietas y el desprendimiento de las baldosas. Estas patologías podrían estar asociadas directamente a la capacidad del material de rejuntado de absorber las tensiones sufridas por el sistema de recubrimiento cerámico. El presente trabajo propone la discusión de los métodos para medir la capacidad de deformación del material de rejuntado, puesto que no se ha incluido ninguna norma de ensayo al respecto en la normativa brasileña ABNT todavía. La revisión bibliográfica ha contado con tres fases: planteamiento conceptual, revisión de los principales métodos utilizados para medir la deformación del material de rejuntado y evaluación de la influencia de la temperatura en el comportamiento del sistema de recubrimiento cerámico. A raíz de este estudio, se ha observado que se están adoptando algunos conceptos inadecuados con respecto a la deformación del material de rejuntado, como p. ej. la palabra “flexible”, y que los actuales métodos de ensayo que se están utilizando para medir la capacidad de deformación del material de rejuntado no son adecuados.

Palabras clave: Material de rejuntado, sistema de recubrimiento cerámico, módulo de deformación, métodos de ensayo.

2 OBJETIVO: Discusión de los métodos para medir la capacidad de deformación del material de rejuntado.

3 INTRODUCCIÓN

La norma brasileña NBR 13816 (ABNT, 1997) define el Recubrimiento de Baldosas Cerámicas como “un conjunto formado por las baldosas cerámicas, adhesivo de colocación y material de rejuntado”. El material de rejuntado es el mortero utilizado para rellenar las juntas de colocación entre las baldosas cerámicas. Sin embargo, la norma brasileña NBR 14 992 (ABNT, 2003) para los materiales de rejuntado establece unos métodos de ensayo solamente para los productos a base de cemento pórtland, aunque se comercializan habitualmente materiales de rejuntado compuestos por otros materiales, como la resina epoxi, en el mercado nacional.

Las tensiones inducidas que se crean en las capas del recubrimiento cerámico – retracción del sustrato, dilatación de la baldosa cerámica a causa de la absorción de humedad y dilatación térmica, retracción debido al secado del adhesivo (BUCHER NAKAKURA, 1995) y la retracción del mismo material de rejuntado – generan deformaciones que pueden llevar a severas manifestaciones patológicas, como la formación de grietas y el desplazamiento de las baldosas cerámicas. El material de rejuntado se utiliza, entre otras cosas, para sellar las juntas de colocación, permitiendo así la absorción de las deformaciones sufridas por el recubrimiento cerámico. Para poder alcanzar este propósito, el material utilizado para rellenar las juntas debe ser capaz de cambiar sus dimensiones bajo tensión, y de recuperar sus dimensiones originales sin comprometer sus prestaciones (JUNGINGER et al., 2002); es decir, el material debe ser capaz de absorber las deformaciones (BAUER; RAGO, 2002) y tener propiedades elásticas. Sin embargo, se conocen muy pocos materiales que presentan un

comportamiento elástico lineal, donde la deformación relativa inicial sea esencialmente proporcional a la tensión aplicada al material.

En Brasil, se han realizado algunos estudios desde 1995 con vistas a encontrar un método para medir la capacidad de deformación del mortero y para desarrollar un método de ensayo adecuado. Sin embargo, los resultados de la investigación sugieren que se deben realizar nuevos estudios comparativos, puesto que no existen conclusiones convergentes todavía. El presente trabajo tiene como objetivo discutir los métodos para medir la capacidad de deformación del material de rejuntado a base de cemento pórtland, teniendo en cuenta que la ABNT no tiene todavía ningún método de ensayo normalizado al respecto.

4 METODOLOGÍA

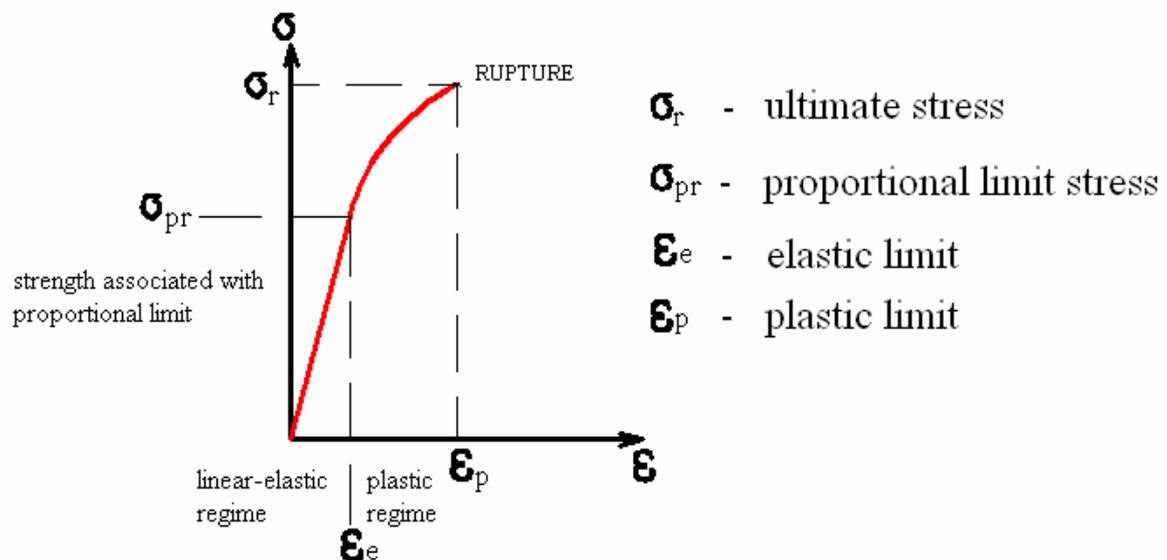
La revisión bibliográfica se ha centrado en tres fases: planteamiento conceptual, revisión de los métodos principales utilizados para medir la deformación del material de rejuntado y evaluación de la influencia de la temperatura en el comportamiento del sistema de recubrimiento cerámico

5 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

5.1 Planteamiento conceptual

Durante la realización de la investigación, se observó que algunos conceptos empleados para caracterizar la capacidad de deformación del mortero son utilizados de forma inadecuada, hecho que despertó el interés en continuar con el planteamiento conceptual iniciado por Bastos (2003) con el propósito de resumir y de desarrollar la discusión en los ámbitos técnicos y científicos.

Los materiales pueden sufrir una deformación específica inmediata, conocida también como la deformación elástica, la cual es reversible, o una deformación plástica, la cual es irreversible, cuando se retira la tensión aplicada. La deformación elástica se produce dentro del límite elástico mientras que la deformación plástica se produce fuera de este límite. En la figura 1 se presenta el diagrama de tensión-deformación de un material frágil, como el material cerámico¹.



Texto figura:

RUPTURA	- tensión última
resistencia asociada al límite proporcional	- tensión límite proporcional
régimen lineal-elástico	- límite elástico

¹ El material cerámico comprende una gran variedad de sustancias, como el vidrio, baldosas, hormigón, abrasivos, barnices y esmaltes para la porcelana, aisladores dieléctricos, materiales no metálicos imantados, materiales refractarios para altas temperaturas, etc. (VAN VLACK, 1984, p. 301).

régimen plástico	límite plástico
------------------	-----------------

Figura 1 - Diagrama de tensión-deformación de los materiales frágiles

Hasta un cierto nivel de tensión aplicada, el material funciona de forma lineal-elástica, es decir, de acuerdo con la ley de Hooke, y la deformación lineal específica es proporcional a la tensión aplicada en el tramo rectilíneo del diagrama de tensión-deformación. La constante de proporcionalidad llamada el “módulo longitudinal de deformación” o el “módulo de elasticidad” (SILVA, 200-?) es la propiedad mecánica que mide la fuerza de unión interatómica del material, y está relacionada con la rigidez del producto diseñado y fabricado (VAN VLACK, 1984). Se determina por la relación entre la tensión aplicada y la deformación resultante de la unidad (L.A. FALCÃO BAUER, 2006)

En los ensayos de carga estática se pueden observar las deformaciones elásticas, donde las deformaciones son proporcionales a las tensiones, o las deformaciones plásticas (BASTOS, 2003), donde las deformaciones son permanentes. El comportamiento del material con relación al tipo de deformación que tendrá depende de sus características y propiedades mecánicas, físicas y químicas.

Ya que el material de rejunto se utiliza para el relleno de las juntas de colocación que son necesarias para acomodar las variaciones dimensionales del recubrimiento cerámico, es esencial que sean capaces de experimentar una deformación y que esta deformación sea reversible para permitir la dilatación y la retracción del recubrimiento cerámico sin perjudicar sus prestaciones funcionales. Sin embargo, los materiales de rejunto a base de cemento pórtland se clasifican como “materiales cerámicos que no suelen estar sujetos a deformación y son generalmente estables bajo condiciones ambientales severas”, de acuerdo con las características establecidas por la Ingeniería de los Materiales (VAN VLACK, 1984, p.302).

En Brasil, varios fabricantes de materiales de rejunto adoptan el término “material de rejunto flexible para la colocación” para caracterizar un tipo del material de rejunto que “se adapta eficazmente a las diferentes situaciones” y, según la hoja del producto, posee la capacidad de soportar las tensiones y de seguir los movimientos de dilatación y de retracción causados por los cambios atmosféricos. Sin embargo, el término se ha empleado mal, ya que un material flexible se caracteriza por ser dúctil y permitir la flexión, sin ruptura, lo cual no quiere decir que la deformación sea del tipo elástico, es decir, reversible. Un tipo de flexibilidad de deformación plástica típica puede observarse en la lámpara (figura 2) o en el micrófono (figura 3) con la varilla flexible que puede doblarse o enrollarse según la posición requerida por el cliente y permanecer estática en una posición hasta que se configure otra.



Figura 2 – Lámpara

Disponibile en: www.brindesuniao.com.br



Figura 3 - Micrófono

Disponibile en: www.atera.com.br

El término “resilience” (capacidad de recuperación) es el término adoptado por las Ciencias Exactas para caracterizar ciertas propiedades de los materiales para acumular energía, cuando se cargan y se tensionan, y de recuperar su condición original sin deformación. Este concepto del término ha sido ampliamente aceptado y ha sido importado por las Ciencias Biológicas y Human para “describir la capacidad de un individuo de superarse positivamente y de construirse bajo dificultades” CARMELLO, 2004, p.12).

Helvecia (2004) ha utilizado este concepto para describir la capacidad humana de manejar la propiedad de la elasticidad – como el salto con pértiga del atleta, por ejemplo – que se dobla hasta el límite máximo, sin romperse, para luego recuperarse inmediatamente a su condición anterior, lanzando al atleta hacia arriba.

Según la norma ASTM D2632 apud Vilar (2004), la capacidad de recuperación se establece según la energía recuperada después de la deformación causada por la tensión. Se suele medir por el porcentaje de energía recuperada y proporciona información acerca del carácter elástico del material.

En la metalurgia, la capacidad de recuperación significa la propiedad que tiene un material determinado de recuperarse o de adaptarse inmediatamente a una nueva situación. La capacidad de recuperación es también la propiedad mediante la cual un cuerpo devuelve la energía almacenada cuando experimenta una deformación elástica en cuanto que cesa la tensión de deformación. Un material perfectamente elástico posee una capacidad de recuperación del 100% y es un absorbedor perfecto al que se asigna la clasificación 0 (cero) (VILAR, 2004).

Por lo tanto, los términos “capacidad de recuperación” y “reversible” son más apropiados para describir los materiales cuya deformación característica se encuentra dentro del límite elástico, que el término “flexible”.

5.2 Capacidad de deformación del material de rejunto

La norma NBR 14 992 A.R. – Material de rejunto a base de cemento pórtland para el relleno de las juntas de colocación – Requisitos y métodos de ensayo (ABNT, 2003) no hace ninguna referencia a este tema. Por lo tanto, es necesario realizar más estudios y experimentos para proporcionar apoyo a la preparación de un método adecuado para medir la capacidad de deformación del material de rejunto, teniendo en cuenta las tensiones experimentadas por el sistema de recubrimiento bajo unas malas condiciones atmosféricas reales y la propiedad de cada material que forma parte del material de rejunto.

La mayoría de las investigaciones realizadas en Brasil para evaluar la capacidad de deformación del material de rejunto utilizan normas internacionales, o una adaptación para el módulo estático del método de deformación para el ensayo de la muestra de hormigón de la norma brasileña NBR 8522 (ABNT, 1984), aunque existen dudas con respecto a la eficacia de este último cuando se aplica al material de rejunto (BAUER; RAGO, 2002).

El valor numérico ideal para el módulo de deformación del material de rejunto es un parámetro que no ha sido establecido todavía y es difícil de evaluar debido a la falta de correlación entre este valor y el comportamiento del material después de su aplicación y uso. Los ensayos adoptados actualmente no tienen en cuenta los factores que dan lugar a los movimientos en los recubrimientos y no miden la capacidad reversible del material.

La capacidad de deformación del material de rejunto de unión a base de cemento pórtland ha sido evaluada por Hogueira y Nakamura (1995) mediante la utilización de tres métodos diferentes tomados de las normas internacionales. En sus conclusiones afirman que los resultados no se pueden comparar y que los ensayos descritos en estas normas no requieren que las probetas experimenten ciclos de humedad, algo que sería muy recomendable para un método de muestreo que intenta simular la realidad a la cual se exponen los recubrimientos cerámicos.

En la curva de tensión-deformación incluida en el trabajo desarrollado por Godoy y Barros (1999a), utilizando el plan de carga del método del módulo estático de deformación de la elasticidad para el hormigón, NBR 8522 (ABNT, 1984), y la adaptación de la norma británica, BS 4551/80, para la preparación de la probeta, el mortero a base de cemento pórtland con el aditivo para el recubrimiento cerámico presentó un mayor módulo que el mortero a base de cemento pórtland sin aditivo para el recubrimiento, cuando se sometió a la misma tensión. Sin embargo, al comparar estas dos curvas se observó que el material de rejunto con mayor módulo resistía una mayor carga de ruptura y demostraba una mayor capacidad de deformación. Este resultado demuestra la dificultad presentada por el método adoptado a la hora de relacionar el valor obtenido para el módulo con las propiedades y las características de los materiales presentes en los dos tipos de mortero muestreados.

En otro trabajo de investigación de Godoy y Barros (1999b), donde se utilizaron la resina de estireno butadieno (SBR) y la resina de estireno acrílico (M) en morteros que servían de capa impermeabilizante en lugares húmedos, se observó que para la mayoría de los morteros con la adición del polímero, el módulo de deformación disminuyó con el tiempo, mientras que para los morteros de referencia (sin la resina polimérica) aumentó el valor del módulo. Sin embargo, concluyeron que ciertos tipos de tensioactivos desarrollan una fuerte película polimérica que mejora la resistencia a la compresión, aumentando posiblemente el valor del módulo de deformación y, al mismo tiempo, desarrollan la capacidad de absorber las deformaciones. Estos resultados aparentemente contradictorios indican que hacen falta más estudios comparativos dedicados a relacionar el módulo de elasticidad con el comportamiento del material con respecto a su resistencia y capacidad de deformación.

Otra forma de medir el módulo de elasticidad del mortero es el método dinámico. El módulo dinámico de deformación puede calcularse por la frecuencia de la resonancia o por la velocidad de propagación de la onda de ultrasonidos. Monde y otros (2007) han realizado ensayos para comparar los resultados de ambos métodos y llegaron a la conclusión que, aunque los resultados han confirmado una correlación excelente entre las dos metodologías, la forma de la probeta influye en el valor del módulo dinámico de elasticidad. Se cree que en este factor influye la densidad másica aparente de las probetas de diferentes dimensiones y los procedimientos de conformación. Por consiguiente, sugieren estudios, entre otras cosas, para establecer los procedimientos de conformación de probetas que aseguran la homogeneidad de las densidades másicas aparentes e investigaciones para evaluar la influencia del coeficiente de Poisson del mortero en el valor del módulo, siendo este una variable del método de la onda de ultrasonidos.

En el método por ultrasonidos (figura 4), el módulo de elasticidad se determina por la función de la velocidad con la cual la onda de ultrasonidos recorre la distancia entre los dos transductores de pulso eléctrico del instrumento (emisión y recepción), la densidad del material y el coeficiente de Poisson – en el caso de los morteros en el intervalo de 0.10-0.20 (CARNEIRO, 1999 apud SILVA; CAMPITELI, 2006). En el caso de las probetas, la distancia entre los transductores es igual a su altura.



Figura 4 – Equipo portátil de ensayo no destructivo por ultrasonidos PUNDIT

La norma brasileña NBR 8822 (ABNT, 1994) prescribe un método de muestreo para determinar la velocidad de la propagación longitudinal de la onda por pulsos de ultrasonidos a través de elementos de hormigón. Este método tiene los siguientes objetivos: la comprobación de la homogeneidad del hormigón, detección de defectos internos ocasionales del colado de hormigón, evaluación de la profundidad de las grietas u otros defectos, y evaluación del módulo de deformación (FIGUEIREDO, 2005).

La norma DIN EN 125-04, (2004) “Ensayo del hormigón en las estructuras – Parte 4: Determinación de la velocidad de pulsos de ultrasonidos”, que también determina el método de ensayo para medir la velocidad de la propagación de la onda de ultrasonidos, informa que los pequeños defectos o fallos dentro de la probeta tienen poco o ningún efecto sobre el tiempo y, por consiguiente, sobre la velocidad de transmisión de la onda. Esta afirmación podría utilizarse como una referencia para estudios más detallados con vistas a utilizar el método dinámico para determinar el módulo de deformación del mortero y para comprobar si tiene alguna influencia en el resultado del ensayo.

Silva y Campiteli (2006) utilizaron el método dinámico para evaluar el módulo de elasticidad del material de rejuntado y llegaron a la conclusión que el módulo y la velocidad de propagación de la onda son variables significativas que pueden utilizarse para realizar el seguimiento del comportamiento del recubrimiento de mortero en cuanto a las fuerzas mecánicas y el desarrollo de las grietas.

La ventaja del método de ultrasonidos es que sea no destructivo, rápido y fácil de utilizar (SILVA; CAMPITELI, 2006); además, permite el uso en probetas, en laboratorios y en estructuras ya consolidadas. Puesto que no es destructivo, cuando se utiliza en los laboratorios también es posible medir el módulo estático de deformación en los ensayos destructivos de compresión y de resistencia a la tracción bajo flexión, con la comparación posterior de los resultados.

Bastos (2003) consiguió recopilar información durante su trabajo que muestra la gran variedad de métodos, parámetros de ensayo y probetas utilizadas para determinar el módulo de deformación del material de rejuntado que hacen imposible la comparación de los resultados de las investigaciones realizadas por los diferentes autores.

Bastos (2003) señala también que la investigación del mortero en Brasil ha mejorado con relación a la caracterización del material bajo condiciones controladas, lo cual aumenta la distancia entre los valores de las propiedades medidas en las probetas y esas mismas propiedades medidas en el material aplicado (a pie de obra) y sometido a los efectos de carga interna y externa.

Pocos trabajos han abordado esta propiedad en estudios específicos del material de rejuntado; entre éstos cabe destacar:

- Falcão Bauer y Rago (2001) realizaron algunos ensayos – de deformación transversal (EN 12002, CEN, 1997a), fuerza de tracción bajo flexión (proyecto de norma brasileña 18:406.05-001, actual NBR 14992/2003) y fuerza de tracción bajo flexión (proyecto de norma europea prEN TC67/WG3 DOC nº 343, actual EN 12808-3) – donde se midieron las deformaciones de la probeta en la ruptura. En las consideraciones finales sugieren la inclusión de valores mínimos para la resistencia a la tracción bajo flexión y de valores máximos para la tensión/velocidad de deformación, en la especificación del mortero para el material de rejuntado;
- Kuko y Martins Neto (2001) estudiaron métodos para determinar el módulo estático de deformación de dos probetas de diferentes dimensiones (5x10 y 4x4x16 cm), según el método de ensayo propuesto por el CSTB - CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT) (Centro científico y técnico de la edificación), 1995. Las diferencias entre los resultados del módulo estático para las dos probetas de diferentes dimensiones no eran significativas, aunque la muestra prismática presentó una cierta ventaja sobre la cilíndrica debido a que no necesitaba tapa. También se observó que ninguno de los dos

métodos utilizados (estático y dinámico) permitió establecer la diferencia entre los morteros de TIPO 1 y de TIPO 2.

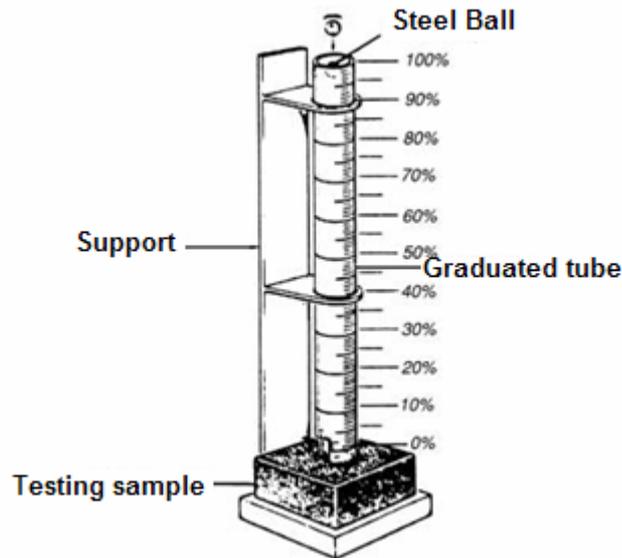
- Junginger et al (2002) realizaron ensayos de deformación transversal, de acuerdo con la norma EN 12002 (1997), en materiales de rejunto, con y sin aditivos, y comprobaban el efecto positivo de los aditivos en la docilidad y capacidad de deformación, aunque éstos conducían a un mayor contenido de aire incorporado;
- Lobato y Carasek (2002) realizaron el ensayo del módulo de elasticidad para caracterizar el material de rejunto que rellenaba las juntas de un panel revestido de baldosas cerámicas para el ensayo de la temperatura, con y sin aditivo, de acuerdo con la norma ASTM C 469 (1994). El material de rejunto con la resina polimérica presentó un valor más bajo para el módulo comparado con aquél del material de rejunto sencillo y con la pasta de cemento.
- Junginger (2003) llevó a cabo ensayos experimentales de compresión, y representó el diagrama de tensión-deformación para el módulo estático de deformación utilizando la norma NBR 8522 (ABNT, 1984) para el hormigón. Utilizó dos tipos de mortero, con y sin aditivo. Estos resultados también presentaron un valor más bajo para el módulo de deformación del mortero con el aditivo;
- Feres (2006), en su revisión de la norma brasileña para el material de rejunto, abordó el tema relacionando el módulo de deformación con las patologías causadas por el choque térmico que se produce en el recubrimiento cerámico y comparó las normas ANSI (Instituto de Normas Nacionales Americanas), ISO (Organización Internacional de Normalización) y ABNT (Asociación brasileña para las normas técnicas) para el material de rejunto y averiguó que únicamente la norma brasileña no mencionaba la propiedad del módulo de deformación.

No se ha encontrado ningún estudio sobre la microestructura del material de rejunto y las propiedades químicas y reológicas de sus componentes², con la diferenciación entre el mortero para el enlucido y para el adhesivo, principalmente con respecto al tipo de agregado utilizado.

La adopción del módulo de deformación como requisito para el comportamiento del material de rejunto podría ser una manera de animar a los investigadores y a los fabricantes a buscar nuevos materiales y métodos de ensayo más adecuados para productos con propiedades y comportamiento elásticos.

En la figura 5 se presenta el ejemplo de un ensayo adecuado para medir la capacidad de un material que recupera su estado original después de eliminar la carga, donde se puede observar un método sencillo, tomado de las normas (NBR 8619 y ASTM D 3574), utilizado para obtener la capacidad de recuperación de espumas flexibles de baja densidad donde una bola de dimensiones y peso normalizados cae sobre una muestra de espuma, de altura normalizada. La cantidad de energía recuperada se obtiene a partir del rebote resultante (VILAR, 2004). Aunque el material de rejunto a base de cemento pórtland presente unas propiedades y un comportamiento que difieren considerablemente de aquellos de las espumas de baja densidad, dificultando la realización de las medidas mediante este tipo de ensayo, el objetivo de este ejemplo es generar dudas acerca del tipo de material más adecuado a utilizar para las juntas de colocación y de los tipos de ensayo adoptados para medir el módulo de deformación sin relacionarlo con la capacidad reversible. Un factor importante que surge de esta discusión se refiere a la manera en que se aplica la fuerza, es decir, estática o dinámica, que lleva a un comportamiento diferente para el material sometido a ensayo.

² Los componentes y su función específica en la mezcla – cemento pórtland (capacidad de recuperación), carbonatos (carga), metilcelulosa de hidroxipropilo (adhesivo), lignosulfonatos (dispersante), estearato de cinc (agente hidrófugo), polímeros (plasticidad), fungicida (antihongos), y pigmentos (color). (ROCHA-GOMES; ALVAREZ, 2007).



Texto figura:
 Bola de acero
 Soporte
 Tubo graduado
 Probeta

Figure 5 – Obtención de la capacidad de recuperación de espumas flexibles
 Fuente: Vilar (2004)

Otra propiedad que se ha investigado menos es la adherencia del material de rejuntable a la baldosa cerámica y al sustrato. La adherencia es un requisito de comportamiento primario para prevenir los problemas relacionados con la infiltración del agua, los desplazamientos y el aseguramiento de la adherencia del material a los flancos de las baldosas cerámicas cuando éstas se someten a cargas mecánicas. Aunque la superficie para el contacto eficaz es un requisito para la adherencia del material al sustrato (TEMOCHE-ESQUIEL et al., 2007), en el caso del material de rejuntable de la baldosa esta área es muy pequeña comparada con la del recubrimiento y del mortero de colocación. Este hecho hace que la interfase material de rejuntable/baldosa/sustrato sea más vulnerable, e incluso cuando el material de rejuntable posee propiedades elásticas y recupera su estado inicial después de la retracción del recubrimiento cerámico, la falta de adherencia puede llevar a la penetración del agua y fomentar el fallo del sistema. Por lo tanto, la adherencia debería ser también una propiedad a tomar en cuenta como requisito a recomendar por la norma del material de rejuntable.

5.3 Efecto de la temperatura en el comportamiento de los sistemas de recubrimiento cerámico

La dilatación y la retracción debido a la temperatura son siempre volumétricas, es decir, el soporte expande y se contrae en todas las direcciones. Cuando la dilatación o la retracción se producen solamente en una dirección se llama la variación lineal. Si la variación se produce en dos direcciones de la sección se trata de una variación superficial, y si se produce en las tres direcciones se llama una variación volumétrica. (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2003).

El valor del aumento lineal (ΔL) de un material está relacionado directamente con su longitud original (L_0) y con el aumento de la temperatura ($\Delta\theta$) que experimenta (ecuación 1). Sin embargo, cada material tiene su propio coeficiente de dilatación térmica (α) que afectará directamente el valor último de dilatación del material.

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta\theta \quad \text{Ecuación 1}$$

La dilatación superficial (ΔA) es directamente proporcional al área original, al aumento de la temperatura y al coeficiente de dilatación térmica superficial (ecuación 2).

$$\Delta A = \beta \times L_0 \times \Delta\theta, \text{ donde } \beta = 2\alpha \quad \text{Ecuación 2}$$

La dilatación volumétrica (ΔV) es directamente proporcional al volumen original, al aumento de la temperatura y al coeficiente de dilatación térmica volumétrica lo cual es tres veces el valor del coeficiente de dilatación térmica lineal (ecuación 3).

$$\Delta V = \gamma \times L_o \times \Delta \Theta, \text{ donde } \gamma = 2\alpha \quad \text{Ecuación 3}$$

Para los tres casos de dilatación, para la misma longitud original y el mismo incremento de temperatura, el material que presenta el mayor coeficiente de dilatación α experimentará la mayor dilatación.

El sistema de recubrimiento cerámico se compone de diferentes capas de materiales interconectadas. La unión entre estas capas da lugar a la formación de un conjunto único que impide la dilatación y la retracción de cada capa por separado. Esta restricción del movimiento libre de las capas origina unas fuerzas de tensión internas que pueden conducir a la ruptura o a la deformación de todo el conjunto. Sin embargo, se deben incorporar soluciones técnicas en el recubrimiento cerámico para permitir la dilatación y la retracción y para prevenir las patologías como las grietas, el desplazamiento y el desprendimiento de las piezas, que puedan llevar a daños serios para el material y las personas.

Ribeiro (2006) clasificó los desplazamientos que se producen en las capas cerámicas, de acuerdo con la Tabla 1.

Naturaleza	Desplazamiento	Reversibilidad
Aumento de la temperatura	Desplazamiento repentino por choque térmico	Reversible
	Desplazamiento térmico	
Efecto de la humedad	Desplazamiento por la humedad relativa	Irreversible
	Dilatación por la humedad en las baldosas cerámicas.	
	Retracción del mortero de pared o del mortero de colocación	
Comportamiento inherente de los componentes y de los elementos del edificio	Desplazamiento de la estructura de hormigón debido a las cargas permanentes: peso, dilatación y retracción	
Efecto del viento	Desplazamiento del edificio debido a la carga del viento	Irreversible/Reversible

TABLA 1 – Clasificación del desplazamiento de los elementos de la construcción en función de la naturaleza y la reversibilidad.

Fuente: Ribeiro (2003)

El conocimiento de las condiciones atmosféricas exteriores es importante, ya que representan los requisitos primarios para obtener los materiales y los procedimientos técnicos que permiten reducir al máximo o eliminar las patologías que se presentan en el recubrimiento cerámico.

Goulart; Lamberts; Firmino (1998) recogieron los datos meteorológicos de 14 ciudades brasileñas: el estudio presenta la Temperatura de Diseño - ASHRAE (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire acondicionado), Grado-día, Grado-hora, Temperatura BIN, Temperatura del Año de Referencia (TAR), y Días de Diseño Típicos del Verano y del Invierno. Asimismo, también caracterizaron el clima en las ciudades analizadas mediante una descripción estadística, presentando valores como, por ejemplo: la Media Mensual y Anual, los Valores Máximos y Mínimos Absolutos: Temperatura de Bulbo Seco, Intervalo de Temperatura, Temperatura Media Máxima y Mínima, Temperatura de Bulbo Húmedo, Humedad Neta, Contenido de Humedad y Viento. Esta información puede utilizarse como referencia para un método de ensayo a concebir y que debe tener en cuenta las condiciones climáticas de cada región con vistas a verificar los desplazamientos y las deformaciones soportados por los recubrimientos cerámicos.

La norma BS 5385: parte 2 (BSI, 1991) y la norma ASTM C1472 (ASTM 2005) tienen en cuenta que el desplazamiento térmico es el efecto predominante en los desplazamientos dimensionales de los componentes del edificio y de los recubrimientos adheridos. A medida que se limita el desplazamiento térmico, este efecto se convierte en un inductor importante de las tensiones cíclicas, las cuales tienden a llevar sobre todo a la fatiga de la unión entre las capas con el tiempo (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998).

La temperatura generada por la radiación solar en el recubrimiento cerámico puede depender del efecto del viento y de la humedad, del color superficial de la baldosa cerámica y del tipo de material que la compone, el cual, según su capacidad de absorción de calor y, por consiguiente, el comportamiento de su temperatura superficial, contribuirá a una dilatación térmica mayor o menor que influirá en el comportamiento de la capa de recubrimiento (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998).

Los efectos causados por los cambios térmicos pueden afectar al comportamiento del sistema de recubrimiento cerámico debido a la presencia de tensiones cíclicas junto a otras tensiones que se producen en el recubrimiento y un mecanismo de fatiga puede desarrollarse con el tiempo (LOBATO PAES; CARASEK, 2002). Por lo tanto, una metodología para determinar cualquier propiedad deberá identificar los fenómenos fisicoquímicos presentes, responsables de los cambios en la propiedad analizada (TRISTÃO; ROMAN, 1999).

La cantidad de energía absorbida por la baldosa depende de sus propias características. Así, las baldosas con diferentes composiciones presentan coeficientes de dilatación térmica diferentes (JUNGINGER, 2003).

Campante (2001, según lo citado por Junginger, 2003, p.47) presenta varias medidas de temperatura realizadas para baldosas de diferentes colores, obteniéndose valores que alcanzan los 70 °C para las baldosas oscuras y 48 °C para las de color claro, estando las baldosas en los dos casos situadas en la fachada con orientación hacia el oeste.

Andrade (2006) simuló el cálculo de la temperatura en baldosas cerámicas blancas y negras en una obra donde la temperatura era de 15 °C, alcanzando valores de temperatura de 80.2 °C para la de color negro y 59.4 °C para la de color blanco, respectivamente. El aumento de la temperatura de 65.2 °C para la de color negro y de 44.4 °C para la de color blanco demuestra la importancia de considerar los ensayos que tengan en cuenta no solo la temperatura ambiente, sino también la temperatura real del recubrimiento. Algunos investigadores han seguido este planteamiento y han desarrollado estudios que intentan simular situaciones más cercanas a la realidad.

En el estudio realizado por Lobato y Carasek (2002) sobre el funcionamiento del material de rejuntado y de las juntas de colocación en el comportamiento térmico del sistema de recubrimiento cerámico, el módulo de elasticidad del material de rejuntado, el adhesivo y el mortero de pared se presentan como propiedades primarias en los resultados de la investigación. Por consiguiente, recomiendan que se realicen estudios sistemáticos sobre el módulo de elasticidad del mortero y que se deban normalizar los métodos de ensayo para su determinación.

Roman et al. (2000) utilizaban la cámara climática para evaluar el mortero de colocación, modificando la temperatura y la humedad durante 120 ciclos de tres horas, que corresponden a 15 días de ensayo, y verificaron ninguna diferencia significativa entre los paneles sometidos a estos ciclos y los de referencia, aunque se observaban que no había ninguna adherencia completa entre las baldosas cerámicas y el mortero de pared. También observaron que el número de ciclos del ensayo de aceleración del envejecimiento podía no ser suficiente para provocar el fallo del sistema.

Vaz Sá y Freitas (2005a), siguiendo el mismo objetivo, han evaluado el comportamiento de un mortero de colocación portugués, llamado cemento cola, sometiendo las probetas al ensayo de envejecimiento acelerado en una cámara climática que permitía cambios de temperatura, humedad, radiación solar y lluvia. Los resultados señalan una disminución significativa de la adherencia después de 112 ciclos de envejecimiento de 12 horas (lo cual corresponde a un periodo de dos meses) e indican el final del tiempo de vida después de 140 y 210 ciclos, con una fuerza adhesiva de 0.3 MPa, para los dos tipos de adhesivo utilizados.

Otro trabajo por Vaz y de Freitas (2005b) correlaciona el tiempo de vida del mortero de colocación en el ensayo acelerado artificial, mencionado anteriormente, con el tiempo de vida real por medio de exposición natural, mediante un modelo de pronóstico. Los resultados indican que 210 ciclos (el mayor valor obtenido) corresponden a un tiempo de vida de seis años en tiempo real.

6 CONSIDERACIONES FINALES

La evaluación de la “flexibilidad” del mortero, presentada en ciertos trabajos publicados, sigue la norma EN 12002 de deformación transversal que determina el desplazamiento del material sometido al ensayo de tracción bajo flexión. Por lo tanto, lo que se mide es el límite de deformación del material hasta la aplicación de la tensión máxima de ruptura. En ciertas publicaciones el término “flexibilidad” se está empleando mal como requisito para la reversibilidad del comportamiento.

Los términos “capacidad de recuperación” (*resilience*) y “reversible” son más adecuados para calificar los materiales con deformación elástica.

Los métodos de ensayo utilizan el esfuerzo de tracción bajo flexión y la deformación del material para calcular el módulo estático de la deformación, o el instrumento de ultrasonidos para el módulo dinámico, sin considerar las tensiones cíclicas que experimenta el recubrimiento cerámico expuesto al ambiente y a las malas condiciones atmosféricas.

Aunque el método dinámico es más apropiado porque es sencillo, no destructivo y permite la comparación con los resultados de otros métodos realizados con la misma probeta, es importante encontrar la forma de relacionar el valor obtenido para el módulo con el comportamiento del material aplicado bajo condiciones de tensión reales.

Con vistas a intentar aproximar las condiciones de ensayo a la realidad a la cual se expone el recubrimiento, sugerimos la elaboración de probetas tomadas de baldosas cerámicas instaladas y rejuntadas de acuerdo con la normativa técnica, sometiéndolas a continuación a ciclos de cambio de temperatura en el laboratorio, para verificar su capacidad de deformación real, después de la acción de los agentes ambientales.

Otro factor observado es la ausencia de trabajos de investigación que proponen el uso de nuevos materiales, con propiedades elásticas compatibles con la necesidad y capacidad del material de rejuntado de absorber las tensiones soportadas por el recubrimiento cerámico.

7 BIBLIOGRAFÍA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13816**: Placas cerâmicas para revestimento-terminologia. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 14992**: A.R- Argamassa À base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1984.

BASTOS, Pedro K.X. Módulo de Deformação de argamassas – Conceitos e Métodos de Determinação. En: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA,5., 2003 São Paulo, SP. p.27-40, jun. de 2003. **Actas eletrônicos**. Disponible en: http://www.infohab.org.br/biblioteca_resultado.aspx>. Consulta realizada: 28 de jul. de 2007.

BAUER, L.A. Falcão. **Materiais de Construção**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, V.1, 2006, 471 p.

BAUER, Roberto José Falcão; RAGO, Fabíola. Normalização e argamassas colantes para assentamento e argamassas para rejuntamento de placas cerâmicas. En: **ANTAC**, Porto Alegre, v. 2, n.2, p.71-84, abr./jun.2002.

BUCHER, Hans R.E.; NAKAKURA, Elza H. A capacidade de deformação de argamassas colantes à base de cimento Portland. En: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSA,1., 1995, Goiana. **Actas**. Goiana:UFG,1995 p.167-176.

CARMELLO, **Eduardo. Supere!**: A arte de lidar com as adversidades. 3ª ed., São Paulo: Editora Gente, 2004, 95p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 12504-4**: Testing concrete in structures. Berlín, 2004.

HELVÉCIA, Heloísa. **Resiliência: um conceito em alta**. Folha de S.Paulo, São Paulo, 27 de abril de 2004. Folha on line. Disponible en: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/sinapse/ult1063u810.shtml>. Consulta realizada: 01 de sept.de 2007.

FERES, João Paulo Iughetti. **Estudo das argamassas de rejuntamento**: análise crítica da norma NBR14992/2003 – A.R. – Argamassas à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas – Requisitos e métodos de ensaio. 2004.114 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

FIGUEREDO, Enio Pazini. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações. En: IBRACON. **Concreto: Ensino Pesquisa e Realizações**. São Paulo:Geraldo C. Isaia, 2005. p 984-1015.

JUNGINGER, Max; REZENDE Maurício M.; SABBATINI, Fernando H.; MEDEIROS, Jonas Silvestre. Influência de aditivos SBR na flexibilidade e no manchamento de rejuntamentos cimentícios. En: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 5., 2002, Juiz de Fora. **Actas**. Juiz de Fora:Uff, 2002, p.1-10.

JUNGINGER, M. **Rejuntamento de revestimentos cerâmicos**: influência das juntas de assentamento na estabilidade de painéis. 2003. 139 p. Dissertação (mestrado) - Programa de pós-graduação em engenharia civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

GODOY, Eduardo Henrique P. de, BARROS, Mércia M. S. Botura de. Proposta de Procedimento de Ensaio para a Avaliação do Módulo de Deformação de Argamassas. En: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSA, 3., 1999, Vitória. **Actas**. Vitória:UFES/PPGEC, 1999, p. 150-167.

GODOY, Eduardo Henrique P. de, BARROS, Mércia M. S. Botura de. Contribuição ao Estudo da Influência do Teor de Polímeros nas Propriedades das Argamassas de Cimento Portland. En: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSA, 3., 1999, Vitória. **Actas**. Vitória:UFES/PPGEC, 1999, p.249-265.

GOULART, S.V.G.; LAMBERTS, Roberto; FIRMINO, Samanta. **Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**, 2. Ed. Florianópolis, 1998. (patrocínio:RHAE/CNPq,NPC- Núcleo de Pesquisa em Construção, PROCEL- Programa de combate ao desperdício de energia elétrica e Eletrobrás- Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

KUKO, Elisabete Kioko, MARTINS NETO, Márcio Luiz. Estudo dos Métodos de Determinação do Módulo de Deformação Estático e Dinâmico. En: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSA, 4., 2001, Brasília. **Actas**. Brasília: UNB/ENC, 2001, p.345-354.

LOBATO PAES, Isaura; CARASEK, Helena. Desempenho das Argamassas de Rejuntamento e da Junta de assentamento no Comportamento Térmico do Sistema de Revestimento Cerâmico. En: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 9., 2002, Foz do Iguaçu, 7-10 de mayo de 2002, p.1795-1803.

MONTE, Renata; ALMEIDA, Valéria; KUDO, Elisabete K.; BARROS, Mércia S.B.; JOHN, Vanderley. Módulo de Elasticidade Dinâmico: Comparação entre Velocidade da onda ultrasônica e Freqüência de Ressonância. En: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSA, 7., 2007, Recife. **Actas**. Recife:UFEB, 2007.

RAMALNHO Jr., Francisco; NICOLAU, Gilberto Ferraro; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. **Os fundamentos da Física 2**. 8. ed rev. y ampl. São Paulo: Moderna, 2003.

RIBEIRO, Fabiana Andrade. **Especificação de Juntas de Movimentação em Revestimentos Cerâmicos de Fachadas de Edifícios**: Levantamento do Estado da Arte. Dissertação de mestrado (mestrado em engenharia civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ROCHA-GOMES, Leila Verônica da; ALVAREZ, Cristina Engel de. **Análise Crítica dos Aspectos Ambientais no Uso de Pigmentos nas Argamassas de Rejuntamento do Espírito Santo (Brasil)**: Diagnóstico remendcoações. En: CONGRESSO DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2., 2007, Lisboa. **Actas**. Lisboa: APFAC, 2007.

ROMAN, Leslie M.F.; SAGAVE, André; ROMAN, H. R.; ALARCOM, Oreste E. Análise da Resistência de Aderência em Sistemas de Revestimento Cerâmico Submetidos à Ciclos Higrométricos. En: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 8., 2000, Salvador, **Actas**. Salvador: ENTAC 2000 abril 2000.

SILVA, Narciso Gonçalves; CAMPITELI, Vicente Coney. Módulo de Elasticidade Dinâmico de Argamassas de Revestimento. En: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS, 2., 2006, Campos Gerais:AEAPG, 14 y 15 de ago. de 2006.

SILVA,Valdir Pignatta e. **Propriedade Mecânica de Aços estruturais**. En: Aspectos Tecnológicos de Materiais Estruturais.[200-?] Disponible en: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/valdir/PEF5736/propr_mec/propr_mec1.html> . Consulta realizada: 31 de agosto de 2007.

TEMOCHE-ESQUIEL, Juan F; DEIFELD, Telmo; BARROS, mércia M.B.S.; JOHN Vanderley; FRANÇA, Ricardo. Influência da Taxa de Interface nas Tensões de Origem Térmica em Revestimentos de Argamassa. En: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSA, 7., 2007, Recife. **Actas**. Recife:UFEB, 2007.

TRISTÃO, Fernando Avancini; ROMAN, Humberto R. Análise do método de Ensaio para determinação da exsudação de água em argamassas de revestimento. En: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSA,3, 1999, Vitória. **Actas**. Vitória:UFES, v. 1, p.107-112, abr. de 1999.

VAN VLACK, Lawrence H. Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais. 7ª ed., Rio de Janeiro:Editora Campus, (tradução da 4ª edição - Edson Monteiro), 1984.

VAZ SÁ, Ana; FREITAS, Vasco Peixoto. Avaliação do desempenho de Cimento-cola em Revestimentos Cerâmicos Aderentes a Fachadas. En: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSA, 7., 2007, Recife. **Actas**. Recife:UFEB, 2007.

VAZ SÁ, Ana; FREITAS, Vasco Peixoto. Influence of Hygrothermal Action on the Durability of Cementitious Adhesives. En: Nordic Nordic Symposium on Building Physics, 7th, 2005, Reykjavík, Islandia, 13-15 de junio.

VILAR, Walter. **Química e Tecnologia de Poliuretanos**. 3ª ed., Vilar Consultoria: Rio de Janeiro, 2004. Disponible en:< <http://www.poliuretanos.com.br/Cap8/812mecanicas.htm>>. Consulta realizada: 29 ago. 2007.

8 RECONOCIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Argalit, una empresa de pintura y fabricación de mortero, su ayuda financiera.