

Estudio de la evolución y nuevas técnicas de análisis por elementos finitos aplicadas al diseño de pavimentos cerámicos

B. DEFEZ, G. PERIS-FAJARNÉS, I. TORTAJADA MONTAÑANA Y L. DUNAI

Centro de Investigación en Tecnologías Gráficas, Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n-8L, 46022 Valencia, España - bdefez@degi.upv.es

El proceso tradicional de diseño de nuevos pavimentos cerámicos, basado en la fabricación de prototipos físicos, es un proceso lento y costoso, que merma la productividad y creatividad de las empresas. Una nueva forma de afrontar este proceso es mediante la creación de modelos virtuales por computador, los cuales ofrecen la misma información que un prototipo real a un coste muy inferior cuando se los somete a simulaciones de fabricación y calidad. La técnica computacional más usada para estas simulaciones es el AEF (análisis por elementos finitos).

En este trabajo se introduce el AEF y se resumen las principales aplicaciones de este análisis en la industria cerámica en general, y en particular en el sector de los pavimentos. Se analizan su evolución y estado actual, citando los trabajos más relevantes. Finalmente se expone el nuevo planteamiento del Centro de Investigación en Tecnologías Gráficas de la Universidad Politécnica de Valencia en este campo, basado en el uso de elementos tridimensionales, evaluación multicriterio y generación de programas específicos de diseño basados en exámenes paramétricos para la mejora geométrica y estructural de pavimentos.

Palabras clave: pavimentos cerámicos, análisis por elementos finitos

Evolution study and new techniques of finite element analysis applied to the design of ceramic floorings

The traditional design process of ceramic floorings, based on the manufacturing of prototypes, is a slow and expensive process, which reduce the productivity and creativity of the enterprises. A new approach to face this challenge is by means of virtual models, which offer the same information as a physic prototype at a very lower cost, when they are tested under manufacturing and quality simulations. The most used simulation technique is FEA (finite element analysis).

In this paper we introduce the finite element method and summarize the main applications of these techniques in the general ceramic industry, and particularly in the ceramic tile sector. We analyze its evolution and current state, citing the most relevant works. Finally we expose the new approach of the Research Center on Graphic Technologies of Universidad Politécnica de Valencia in this field, based in the employment of three dimensional elements, multi-criteria evaluation and the generation of specific design software based on parametric examinations to enhance the geometry and structure of ceramic floorings.

Key words: ceramic tiles, finite element analysis

1. ESTADO ACTUAL DEL MODELADO Y SIMULACIÓN VIRTUAL EN EL DESARROLLO DE NUEVOS PAVIMENTOS CERÁMICOS

En el desarrollo tradicional de productos industriales, se deben fabricar prototipos físicos de los nuevos modelos. Mediante un proceso reiterado de prueba y error, se consigue, tras la fabricación de varios prototipos, refinar el modelo inicial y conseguir el modelo final, viable técnicamente y satisfactorio desde el punto de vista de la estética y la calidad. Este modelo será llevado a fabricación en serie para su comercialización y será el mercado quién dé su aprobación definitiva.

Este proceso, como es fácil comprender, implica altos costes de lanzamiento, ciclos largos de desarrollo y fabricación, y stocks de difícil gestión. Un malgasto de tiempo y dinero inadmisibles en una industria tan competitiva como la de la baldosa cerámica, el cual además restringe las posibilidades creativas y organizativas de las empresas.

Los modelos virtuales son maquetas tridimensionales generadas por ordenador, que representan fielmente la geometría y naturaleza material del producto real sin necesidad de su

fabricación física. Estos modelos pueden servir de interfaz rápido entre los departamentos de I+D+i (investigación, desarrollo e innovación), diseño y fabricación, cuya comunicación y acuerdo es vital para el éxito de la empresa. La construcción de maquetas virtuales mediante software de diseño industrial, permite disponer de prototipos inmateriales que pueden ofrecer gran cantidad de información valiosa sobre el nuevo modelo, entre ellas, aspecto, necesidades de fabricación y embalaje; y peculiaridades de colocación. El prototipo virtual no sólo ofrece una visualización realista del producto aisladamente, sino que es posible insertarlo en cualquier tipo de ambiente (construcción de entornos 3d virtuales), para conocer sus posibilidades de comercialización.

En todo caso, la capacidad más importante de los modelos virtuales radica en la realización de ensayos (también virtuales) tanto mecánicos como térmicos, que permitan conocer los costes reales de la fabricación, ajustar las variables del proceso productivo (p.ej. fuerza de prensado o temperatura de cocción) y saber de antemano la adecuación del producto respecto de la normativa.

Estos ajustes agilizan el lanzamiento de nuevos productos y minimizan las tiradas en concepto de prototipos físicos, lo

cual tiene un gran impacto en la eficiencia de la planta, dada la tendencia actual hacia la fabricación de lotes cada vez más pequeños, con más y más complejos diseños. De esta manera se flexibiliza y automatiza el sistema, lo que permite reducir los tiempos de ciclo de desarrollo y producción, y limitar el manejo de almacenes tanto de producto intermedio como final, lo cual encarece y entorpece la gestión.

En la actualidad, la simulación computacional de procesos de fabricación y ensayos de calidad mediante AEF (análisis por elementos finitos), es un pilar básico de muchas industrias modernas. En cambio, estas técnicas son en su mayoría desconocidas en el sector cerámico. Sin embargo, su aplicación podría colaborar en gran medida a la modernización y mejora de las empresas. Como ya se ha comentado, el uso de las simulaciones permitiría acortar y abaratar el proceso tradicional de diseño de nuevos modelos, y abordar el desarrollo de modelos más complejos e innovadores.

En este trabajo se resumen las principales aplicaciones de las citadas técnicas en la industria cerámica en general, y en particular en el sector de los pavimentos. Se analizan su evolución y estado actual, citando los trabajos más relevantes. Encontrar continuidad entre ellos resulta complicado, si bien cada uno ha aportado nuevos enfoques al problema y nuevas premisas para sentar de forma adecuada las simplificaciones hechas sobre las propiedades de los materiales, las condiciones de contorno, las cargas aplicadas y la geometría de las piezas consideradas. Es por tanto muy recomendable, para cualquier investigador que se proponga generar nuevos métodos para la aplicación de AEF a pavimento cerámico, estudiar detenidamente los trabajos que aquí se citan.

Finalmente se expone el nuevo planteamiento del Centro de Investigación en Tecnologías Gráficas de la Universidad Politécnica de Valencia en este campo, basado en el uso de elementos tridimensionales, evaluación multicriterio y generación de programas específicos de diseño basados en exámenes paramétricos para la mejora geométrica y estructural de pavimentos.

2. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

La optimización de medios continuos es una parte del diseño óptimo estructural que ya fue iniciada por Maxwell y Michell en el siglo XIX (1), pero que ha estado supeditada al desarrollo de las modernas tecnologías CAD (diseño asistido por ordenador) para ser útil, puesto que se requería (y requiere), ya desde el principio, potentes capacidades de cálculo.

El método de los elementos finitos ha sido, de entre los métodos de optimización de medios continuos, el más empleado por la industria en su conjunto. Brevemente, la idea básica del método de elementos finitos, originada en el campo de la ingeniería aeronáutica, consiste en la discretización de una región en donde se define un problema de medio continuo, en otras regiones más pequeñas con formas geométricas sencillas llamadas elementos. Las acciones sobre el medio continuo, las propiedades de los materiales que lo componen, y las relaciones que definen el comportamiento de dicho medio, son consideradas sobre puntos determinados de los elementos (nodos). Puesto que se conocen las leyes de comportamiento que modelan las acciones sufridas por el medio (mecánicas, térmicas...etc.), éstas son planteadas en cada uno de los nodos,

dando lugar a un sistema de ecuaciones, que tras un proceso de ensamblaje permite pasar a un problema discreto (modelo numérico o computacional). La solución del sistema aporta una noción suficientemente precisa e intuitiva del comportamiento del problema continuo inicial (2), normalmente con ayuda de una interpolación de la solución en los nodos.

3. APLICACIÓN DE AEF EN LA INDUSTRIA CERÁMICA GENERAL

La gran mayoría de productos cerámicos constituyen medios continuos sometidos a solicitaciones exigentes. Su diseño y evaluación mediante la aplicación de AEF se perfila como una herramienta adecuada, y así su uso ha experimentado un notable crecimiento recientemente.

Un estudio llevado a cabo por los autores sobre los artículos científicos de impacto publicados en relación al AEF de cerámicas, muestra el crecimiento exponencial del uso de la técnica en el sector en los últimos años: el 91% ha sido publicado durante la década actual, el 7% en los 90 y el restante 1% en los 80.

El estudio ha sido realizado sobre las publicaciones indexadas en el ámbito de la cerámica y los AEF recogidas en las bases de datos Agricola, Arts Full Text (Wilson), Avery Index to Architectural Periodicals, Business Source Premier, Compendex (Ei Village), IEEE Xplore, Science Direct, y Web of Science. Un Total de 75 artículos han sido encontrados y analizados.

Este mismo estudio muestra que los campos en los que más ha evolucionado esta técnica, dentro del sector cerámico, son aquellos relacionados con las cerámicas avanzadas, en especial las usadas en medicina (implantes dentales en su mayoría y en menor medida las prótesis óseas), seguidas de las empleadas para el diseño de composites y nuevos materiales cerámicos para automoción y aeronáutica (cerámicas de alta resistencia a la temperatura y a la abrasión, ferrolíticas y piezoeléctricas). La incidencia del AEF en otros sectores cerámicos se puede observar en la figura 1.

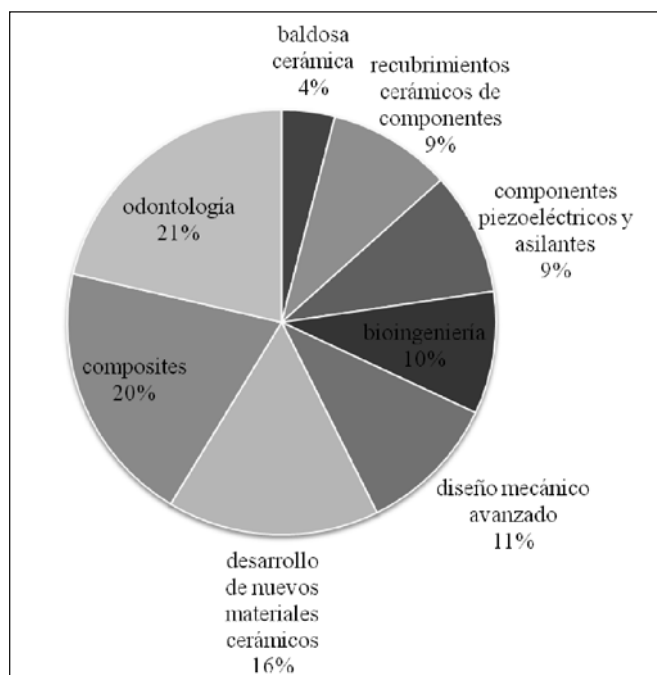


Figura 1 - Incidencia del AEF en los distintos sectores cerámicos

La aplicación de AEF ha buscado, en estos casos, la evaluación mecánica y térmica de los materiales, y en menos ocasiones, de las piezas. Los análisis han evaluado desde el rango de tensiones y deformaciones frente a cargas tipo, crecimiento de grieta y resistencia a fatiga y probabilidad de fallo catastrófico (típico de materiales frágiles), hasta, de forma inversa, la obtención de las constantes del material, como el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de expansión térmica (α) o la dureza superficial Vickers o Mohr, para unas sollicitaciones potenciales. Los resultados obtenidos por los métodos numéricos han demostrado su bondad, en tanto en cuanto presentan valores similares a los obtenidos en los ensayos físicos, realizados en el laboratorio.

En el caso concreto de la odontología, los trabajos varían desde la evaluación de prótesis comerciales, en donde las piezas eran divididas en dos regiones de carácter bien distinto (exterior rígido deformable e interior viscoelástico) (3); hasta la simulación del inicio y crecimiento de grietas (4), desconchado y astillado en el mecanizado, obtención de información acerca de la integridad superficial de las piezas (5), previsión de la vida útil y compatibilidad (6-7).

En lo que se refiere a cerámicas avanzadas para manufacturas, la evaluación de productos con base de alúmina ha acaparado gran cantidad de trabajos (8-9), al ser ésta una materia prima básica de la industria del abrasivo. También como base de circuitos electrónicos con propiedades piezoeléctricas, la alúmina ha sido sometida a AEF (10-11). Finalmente, su uso se extiende a la formación de armaduras compuestas, que junto con capas goma y epoxis dan lugar a recubrimientos de alta fiabilidad (12). Otras investigaciones se han centrado en el establecimiento de metodologías de diseño óptimo, incluso para el caso de probetas normalizadas para la evaluación de materiales frente a tensiles (13). Por otro lado, el estudio del inicio y propagación de grietas también ha sido extensamente analizado en este campo. Tomando como muestra estudios de barras de cristal, los métodos numéricos basados en elementos finitos han probado ser adecuados frente a las limitaciones tradicionales de la mecánica del medio continuo (14)

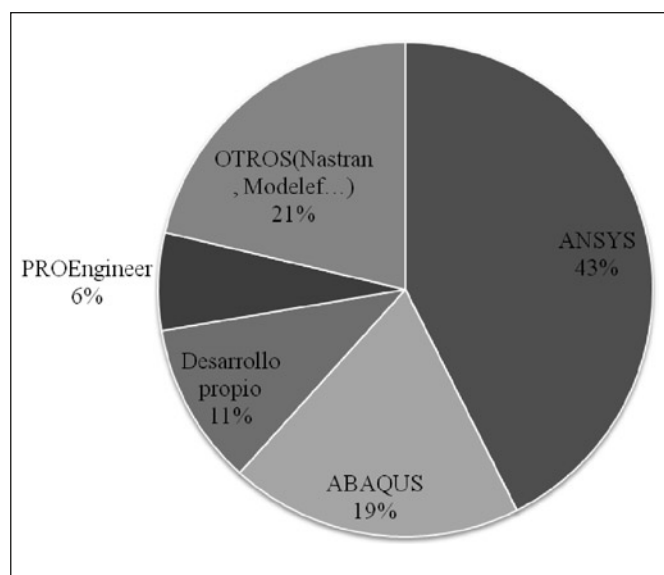


Figura 2 – Programas de AEF empleados en el sector cerámico

En cualquiera de las aplicaciones, el software comercial ANSYS® ha sido el empleado en la gran mayoría de las ocasiones. Por detrás se sitúa el programa ABAQUS (Dassault Systèmes). Los desarrollos propios, basados en programación directa mediante código Matlab o C, han tenido un impacto mucho menor, mientras que programas como Marc, Maple, Nastran apenas han sido empleados, como muestra la figura 2.

Cabe destacar, también como normal general, que los sistemas estudiados son simplificados mediante la eliminación de detalles y la aplicación de restricciones de simetría en uno o dos ejes. El uso de elementos planos (de 4 y 8 nodos) también predomina sobre los sólidos, puesto que las geometrías llevadas a estudio rara vez son lo suficientemente complejas como para justificar un elemento tridimensional (en muchas ocasiones se trata de probetas de sección constante). Por otra parte, el mapeado libre o mapeado indiferentemente suele sufrir procesos de refinamiento en aquellas aéreas críticas a priori (como taladros o cambios de sección), a fin de asegurar la adecuación de los resultados y, por supuesto, la convergencia en la resolución numérica. Finalmente, los materiales se suponen en casi el 100% de los casos, isotrópicos y linealmente elásticos.

Como se aprecia, las decisiones tomadas para plantear los análisis son motivadas por un doble objetivo: representar lo más fielmente posible el comportamiento real del material, y al mismo tiempo reducir al máximo los recursos necesarios para la computación, es decir, acortar el tiempo y la memoria que el equipo necesita para terminar la prueba.

4. APLICACIÓN DE AEF EN EL SECTOR DEL PAVIMENTO CERÁMICO

En contraposición al extendido uso que durante los últimos años se le ha dado a los AEF para la evaluación de cerámicas avanzadas, su aplicación en el sector de los pavimentos y revestimientos ha sido tímida. Esta situación no es de extrañar, teniendo en cuenta el marcado carácter tradicional que todavía tiene la industria, especialmente en España.

Aún así, varios trabajos han sentado precedente para la continua expansión de esta técnica.

H. Camacho, M.E. Fuentes, L. Fuentes, A. García, A. Pérez (15-16) analizaron la evolución de la distribución de tensiones en un cuerpo cerámico durante la cocción. Para distintas condiciones de cocción (incluyendo prensado en caliente y cocción tradicional) se planteó un problema de equilibrio de tensiones, teniendo en cuenta varios comportamientos constitutivos como el modelo de Riedel para policristales, el modelo de celdas de Sherer para amorfos, y el modelo de Kahn para fluencia según una ley de potencia. Cuatro fueron los casos estudiados en los cuales se tenían en cuenta 3 probetas cilíndricas sometidas a una fuerza de compresión axial, y una pieza completa compuesta por una capa de esmalte, otra de engobe y la base (bizcocho o soporte). Las principales conclusiones fueron: (i) la distribución de tensiones en el prensado en caliente es semejante a la fría a pesar de condiciones diferentes de prensado y de considerar distintos comportamientos constitutivos, (ii) el comportamiento termo-elástico puede usarse como una aproximación aceptable para los materiales arcillosos, y (iii) los gradientes de temperatura y su efecto en la viscosidad del cuerpo en las dilataciones térmicas juegan un papel esencial en la distribución de tensiones.

Farzin R., Taheri E., Eghbali B., (17) evaluaron mediante elementos finitos la influencia que el distinto coeficiente de dilatación térmica entre el material del soporte y el esmalte tiene en la aparición de esfuerzos residuales en el proceso de fabricación después de la cocción. Una de las conclusiones más interesantes del trabajo fue que el aumento del grosor del esmalte generaba mayores valores de curvatura tras el enfriamiento, crecimiento de los esfuerzos de tracción en la interfase y reducción de esfuerzos superficiales, cuando el esmalte poseía una dilatación térmica más baja que el soporte. Una aportación de gran importancia para la mejora del diseño de materiales.

En cuanto a sistemas, M. Marrero, A. Ramírez, R. Lucas (18) estudiaron las tensiones de los elementos más exteriores de un fachada revestida con piezas vidriadas sometidas a una dilatación térmica mediante un modelo de elementos finitos que permitía calcular y representar la distribución de tensiones generadas, a la vez que se identificaban las zonas donde eran alcanzados los niveles más altos de tensión. Se consideraron dos variantes de estudio, denominados común y tradicional (azulejo biselado). A modo de conclusión se encontró que el problema podía ser fácilmente estudiado mediante un modelo simplificado formado por medio azulejo (bizcocho y vidriado) y el material de agarre, ya que la fábrica de ladrillo y las juntas de dilatación podían ser representadas mediante condiciones de contorno. La geometría tradicional desarrollaba tensiones significativamente inferiores, tanto en compresión como en tracción, en comparación con la geometría del azulejo común. Es interesante destacar que las tensiones, que eran las que promovían el crecimiento de grietas, se reducían significativamente al añadirle un bisel al azulejo. Esto explicó porqué es más difícil encontrar que el vidriado se desprenda en azulejos de fachada biselados. Con el cambio de geometría las compresiones en el vidriado se concentraban en el bisel, estando el resto del azulejo prácticamente libre de tensiones. Este trabajo sirvió como preámbulo a una línea de investigación más incisiva sobre fachadas de azulejos, continuada por Marrero mediante la aplicación de elementos de contorno. Los azulejos eran modelados con principios de grieta, y se variaba la temperatura en el tiempo, mediante un transitorio.

Se han realizado por otros autores diversos estudios sobre las fachadas de azulejos que van desde el desarrollo de pruebas no destructivas que permiten identificar patologías de defectos habituales, hasta la experimentación con distintos tipos de adhesivos y morteros sometidos a dilataciones térmicas mediante AEF. Entre dichos trabajos cabe destacar los desarrollados por los autores: R. Naniwa (19) y R.G. Bowman, P.J. Banks (20), quienes emplearon los elementos finitos para resolver un modelo bidimensional de una fachada de azulejos expuesta a altas temperaturas. Los trabajos antes mencionados no incluyeron en el sistema el vidriado del azulejo.

En relación a sistemas pavimentados, también Bowman y Banks (21) ofrecieron un modelo basado en elementos finitos que incluía pavimento cerámico, junta de colocación, adhesivo o mortero y sustrato de hormigón, apoyado inferiormente y restringido en los laterales por lo que podrían ser las paredes del recinto en cuestión. Se estudiaron dos tipos de expansión: expansión uniforme y expansión impuesta por un gradiente de temperaturas de 40°C (la superficie de la cerámica mostraba una temperatura de 60°C, mientras que su base tan sólo 20°C). Estas hipótesis parecían simular el comportamiento de la baldosa frente a la radiación solar continuada. Las máximos tensiles

fueron hallados aproximadamente en la sección media de la baldosa (valores alrededor de 4 MPa), mientras que las tensiones verticales y de cizalla se concentraban en los puntos de contacto con la junta (valores alrededor de 2.5 y 1.5 MPa respectivamente). Al margen de los resultados numéricos o cuantitativos, los autores concluyeron que la mejor aproximación a los sistemas reales se obtenía cuando se combinaban datos físicos con simulados: los resultados obtenidos en el laboratorio debían servir de punto de partida al modelo virtual (especialmente en lo referente a la determinación del módulo de Young), y a la vez servir de confirmación del modelo.

C. Ben Amor (22) elaboró un modelo similar, también con soporte de mortero, en donde la malla de elementos finitos se refinó en torno a la junta para su mejor estudio. En este trabajo se investigó la respuesta a fatiga del sistema, simulando 2 y 5 años como intervalo temporal, variaciones de temperatura de 20°C y cargas distribuidas de 2.5 KN/m². Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Los puntos críticos en donde se daban estas tensiones en el sistema de estudio eran similares a los hallados por Bowman y Banks. También los valores estaban en concordancia.

Poco después, D.A. Silva, L.M.F. Roman (23), presentaron resultados relativos a un modelado numérico basado en AEF, en donde el soporte no era hormigón sino ladrillo. Las tensiones del sistema, sujeto a temperaturas en ascenso, eran estimadas por un modelo bidimensional y lineal. Las propiedades físicas y mecánicas de todos los materiales implicados se determinaron experimentalmente y por tanto sirvieron de entrada al modelo. El análisis mostró, de nuevo, concordancia con los resultados de Bowman y Banks. Por otro lado, el modelo demostró ser muy sensible al módulo de elasticidad y al coeficiente de expansión térmica, y prácticamente independiente de los parámetros del mortero.

El trabajo recientemente desarrollado por M. Abreu (24), en el cual se empleó una formulación propia de elementos finitos híbrido-mezclada de esfuerzos de los estados planos, consiguió buenas aproximaciones incluso usando un número reducido de elementos (33 en este caso). El método fue desarrollado en el Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção (ICST) y en el Instituto Técnico Superior (IST), Universidade Técnica de Lisboa. El modelo, de nuevo, estaba constituido por la sección transversal de un forjado de hormigón con recubrimiento cerámico, considerando un comportamiento elástico lineal. 2 variantes se tuvieron en cuenta: (i) sistema de capa gruesa o tradicional (mortero grueso) y (ii) sistema de capa delgada o no tradicional (mortero fino). Las propiedades de los materiales fueron obtenidas de fuentes bibliográficas (25-26). Considerando cuatro cargas distintas (tres deformaciones diferenciales, la principal de 0.1 mm/mm; y un peso distribuido de 10 KN/m), se planteó un estudio paramétrico en donde se alternaban las principales variables geométricas y materiales del sistema.

Los esfuerzos máximos obtenidos en tracción rondaban los 5 MPa, lo cual era suficientemente alto para causar los problemas a agrietamiento-abombamiento típicos de los pavimentos. Sin embargo, también es cierto que una imposición tan lenta de la deformación como la simulada por el modelo permite, casi con seguridad, una relajación significativa de los esfuerzos (principalmente en los morteros y los adhesivos a base de cemento), inhibiendo estos valores tan altos de tensión. Los esfuerzos verticales y de cizalla eran de un orden inferior, aunque los resultados mostraban picos muy pronunciados cerca de las juntas y bordes libres.

Tras el estudio de la respuesta del sistema frente a las distintas cargas y variaciones paramétricas, Abreu concluyó, para empezar, que el modelo elástico lineal proporcionaba una manera rápida y sencilla de obtener una primera aproximación del tipo e intensidad de los esfuerzos que se acumulan en un recubrimiento cerámico. Por otra parte, y de forma más específica, las distribuciones de esfuerzos presentadas coincidían con algunos síntomas comunes de fallos. Los esfuerzos de compresión o tracción horizontales podían causar el abombamiento o agrietamiento de los recubrimientos. Los altos esfuerzos verticales y de cizalla cerca de los bordes de la baldosa (en su contacto con las juntas o libres) provocaban el desprendimiento progresivo de las baldosas en esa zona. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las simplificaciones, la ausencia de datos precisos sobre algunas propiedades de los materiales y la no validación mediante modelos físicos condicionaron la fiabilidad de estas conclusiones (según el propio autor). En cualquier caso, el estudio más o menos aproximado pone las bases para que el diseñador tome decisiones sobre el material y la colocación de las piezas, a fin de maximizar las prestaciones y vida útil del sistema al completo.

Finalmente, cabe destacar el desarrollo efectuado por E.C. Carbajal, E.M. García, L. Reig (27) conocido como MESES ("Método de Estimación Simplificado Estructura-Solado"), que evaluaba la tensión normal máxima que recibe la pieza cerámica más desfavorable de un sistema, y proporcionaba una estimación orientativa para el adhesivo y capa de contacto del forjado, con un error aceptable del lado de la seguridad. Los resultados obtenidos, en una primera comparación con un AEF tradicional para tensiones por incremento de temperatura, se consideraron aceptables. Simultáneamente, la formulación de MESES explicó algunas características sólo sugeridas por el AEF, actuando como mutuo complemento. Para dicha contrastación se tomó como referencia el trabajo de Abreu, dada la dificultad de disponer de datos experimentales, prácticamente inexistentes. En su trabajo expuesto en el IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y Pavimento Cerámico (Qualicer, Castellón 2006), se dieron los resultados calculados para una variación de temperatura de -20°C .

5. NUEVAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS APLICADAS AL DISEÑO DE BALDOSA CERÁMICA

Una moderna aplicación del AEF a la mejora del producto cerámico ha sido llevada a cabo en los últimos años por el Centro de Investigación en Tecnologías Gráficas de la Universidad Politécnica de Valencia (CITG). El objetivo de estas investigaciones ha consistido en evaluar la conveniencia de pavimentos cerámicos aligerados por la conformación de relieves al dorso profundos, empleando técnicas de modelado sólido tridimensional y AEF. Con estos trabajos se han podido establecer las bases para una definición óptima del relieve, entendiendo por óptimo aquel diseño que combine de forma más idónea ahorro másico con respuesta mecánica y térmica dentro de lo viable en la fabricación en serie actual. Dados los pocos antecedentes encontrados en la bibliografía en este sentido, los estudios son una primera aproximación a la problemática de este tipo de productos, abriendo una puerta a estudios posteriores, y facilitando información muy valiosa a los departamentos de diseño y fabricación de las azulejeras.

De estos trabajos cabe destacar tres innovaciones fundamentales, en relación a lo ya empleado por otros autores.

Por un lado, el objeto de la simulación ha sido la geometría de las piezas y no su material. Por otro lado, se ha considerado el problema tridimensional completo sin simplificaciones bidimensionales. Es decir, se han empleado elementos tridimensionales. Además, se ha usado otra herramienta informática diferente a Ansys, Proengineer the PTC Corporation, con un módulo de diseño sólido mucho más potente. Finalmente, cabe destacar el uso de evaluación multicriterio para la determinación de las variantes de diseño más adecuadas (28-29).

5.1 Desarrollo de aplicaciones informáticas específicas de diseño paramétrico

Actualmente, el CITG trabaja en el desarrollo de una aplicación informática específica de diseño estructural de pavimentos cerámicos. La aplicación se realiza en el marco del proyecto "Plataforma de diseño óptimo para la fabricación de baldosas cerámicas", subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del programa de Investigación Aplicada Colaborativa 2008. Los primeros resultados de esta plataforma fueron presentados en el reciente 49 Congreso de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio que tuvo lugar en Linares en octubre de 2009.

La aplicación es capaz de crear múltiples modelos de pavimento cerámico modificando los parámetros básicos del diseño geométrico de la baldosa (formato, espesor máximo, tipo de relieve al dorso y características particulares del mismo). Se dispone de un interfaz sencillo para dar valores concretos a estos parámetros y así crear series paramétricas de modelos cerámicos que después son sometidos a la fabricación simulada. Las series paramétricas son conjuntos de modelos cerámicos de características idénticas, en donde sólo uno de sus parámetros estructurales ha sido variado en valor nominal de una pieza a otra de forma uniforme. Por ejemplo, una serie paramétrica la pueden constituir 10 pavimentos con relieve al dorso en forma de damero, en donde cada pieza tiene una profundidad de relieve diferente (5mm, 5.5mm, 6.5mm...etc.). Como en cada serie sólo se varía un parámetro, una vez realizados los ensayos, se pueden correlacionar variaciones de tensión y deformación con los cambios geométricos.

Tras la definición de la serie geométrica, se somete a los modelos de la serie a un proceso simulado de fabricación estándar. Hasta el momento se han considerado para la simulación las fases de secado, cocción y el ensayo a flexión según la norma EN ISO 10545. De cada una de las fases de fabricación se puede obtener la respuesta mecánica y térmica del producto, y así relacionar cambios geométricos en la baldosa, con comportamiento en fabricación.

Las simulaciones realizadas con la aplicación han obtenido resultados muy similares (valores de tensión y deformación) a los obtenidos mediante simulaciones simples en Ansys y en Proengineer, lo cual prueba que la programación de la aplicación es correcta. Por otro lado, para un número determinado de modelos a ensayar, la aplicación resulta ser hasta un 200% más rápida, ya que permite ensayar series de modelos definiendo un único ensayo.

6. CONCLUSIONES

Aunque la aplicación de AEF a cerámica ha experimentado un crecimiento exponencial desde 1980, la construcción de modelos virtuales y su simulación mediante elementos finitos

son técnicas todavía en desarrollo en el sector de los pavimentos cerámicos. En este trabajo se han resumido las aportaciones más relevantes en este campo, en donde queda patente la diversidad de casos que pueden ser motivo de estudio, y de estrategias de simulación de los mismos. En cualquier caso, si bien es cierto que cada vez son más los profesionales que recurren al método de los elementos finitos para evaluar nuevos materiales, prácticamente ninguno de los trabajos realizados hasta el momento se ha ocupado de la mejora de la geometría de la pieza, básicamente porque la geometría (fundamentalmente la del dorso, que es la que más alternativas de fabricación puede aportar), no se considera un parámetro de diseño. Es decir, el empleo de AEF en la industria se ha centrado en la mejora de los materiales, y no en la de los productos. Íntimamente relacionado con esto se encuentra el hecho de que también la mayoría de los ensayos se haya realizado hasta la fecha con elementos (finitos) planos. Los elementos planos pueden representar fielmente el comportamiento de piezas geoméricamente simples, y así centrar el estudio en las propiedades materiales. Sin embargo, no es adecuado en general para simular pavimentos estructuralmente complejos.

En el CITG se han desarrollado estudios estructurales de pavimentos cerámicos mediante modelado sólido tridimensional y AEF, incorporando herramientas como ProEngineer y Mechanica como alternativa al uso más extendido de ANSYS. En lo referente al AEF en particular, se han usado elementos sólidos (3 dimensiones) en lugar de los habituales elementos planos, lo cual posibilita precisamente evaluar el impacto de diferentes geometrías tridimensionales del relieve al dorso, y por tanto, de diferentes estructuras másicas en pavimentos cerámicos. Estos trabajos han demostrado que la geometría puede jugar un papel básico en la eficiencia de la pieza, tanto desde el punto de vista de la respuesta mecánica y térmica, como en lo relativo a un potencial y muy interesante ahorro de masa y energía. Por otro lado, el desarrollo de programas informáticos específicos, basados en estudios paramétricos, ha permitido una evaluación mucho más rápida de múltiples variantes de diseño, lo cual añade todavía más atractivo a las técnicas computacionales conocidas.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, Programa de Investigación Aplicada Colaborativa 2008, a través del proyecto "Plataforma de diseño óptimo para la fabricación de baldosas cerámicas"; y por la Universidad Politécnica de Valencia, Programa de Ayuda a la Investigación y Desarrollo 2008, a través del proyecto "Implementación de modelado sólido tridimensional y análisis por elementos finitos para la simulación de la línea de producción cerámica".

Así mismo cabe destacar que este trabajo fue introducido en el XLVIII Congreso Anual de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (Oviedo 29, 30, y 31 de octubre de 2008) con el póster titulado "APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA", y en el XLIX Congreso Anual de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (Linares 28, 29 y 30 de octubre de 2009) con el póster titulado "DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN ESPECÍFICA DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS PARA EL DISEÑO PARAMÉTRICO DE PAVIMENTOS CERÁMICOS"

REFERENCIAS

- 1 C. ZIENKIEWICZ., "The finite element method, 3rd. Edition", McGraw-Hill Book Company, Maidenhead (United Kingdom), 1965.
- 2 M.B. ALLEN, I. HERRER I., G.F. PINDER, "Numerical Modeling in Science and Engineering", John Wiley & Sons, New York (EEUU), 1988.
- 3 P.H. DEHOFF, K.J. ANUSAVICE, N. GÖTZEN, "Viscoelastic finite element analysis of an all-ceramic fixed partial denture", J. Biomech., 39:40-48, 2006.
- 4 Y. CAO, "Failure analysis of exit edges in ceramic machining using finite element analysis", Eng. Fail. Anal., 8:325-338, 2001.
- 5 H.H.K XU, D.T. SMITH, S. JAHANMIR, "Influence of microstructures on indentation and machining of dental glass-ceramics", J. Mater. Res., 11(9):2325-71, 1996.
- 6 M.A. GÜNDÜ et.al., "Effect of temperature and stress distribution on all-ceramic restorations by using a three dimensional finite element analysis", J. Oral Rehabil., 31:172-178, 2004.
- 7 H. FISHER, M. WEBER, R. MARX, "Lifetime prediction of all-ceramic bridges by computational methods", J. Dent. Res., 82:238-242, 2003.
- 8 A.G. TOMB, A.L. CAVALIERI, "Análisis por elementos finitos de alúmina sometida a esfuerzos mecánicos y térmicos", Materials Research, 4(1):7-12, 2001.
- 9 M. IUGA, F. RAETHER, "FEM simulations of microstructure effects on thermoelastic properties of sintered ceramics", J. Eur. Ceram. Soc., 27:511-516, 2007.
- 10 M. SANTO, D. BELAVIIC, K.P. FRIEDEL, A. WYMYSLOWSKI, "A procedure for validating the finite element mode of piezoresistive ceramic pressure sensor", IEEE Transactions on Components and Packaging Technology, 27(4):325-332, 2004.
- 11 A.S. ZARNIK, "The application of finite element analysis in the design of thick-film hybrid circuits", Informacije Midem - Journal of Microelectronics Electronic Components and Materials, 32(1):14-21, 2002.
- 12 S. MAHDI, J.W. GILLESPIE,, "Finite element analysis of tile-reinforced composite structural armor subjected to bending loads", Compos. Pt. B-Eng., 35:57-71, 2004.
- 13 Z. WANG, C.K. CHIANG, T.J. CHUANG, "Optimum design of a ceramic tensile creep specimen using a finite element method", J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 102:15-32, 1997.
- 14 G.T. CAMACHO. M. ORTIZ, "Adaptative lagrangian modelling of ballistic penetration of metallic targets", Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., 142:269-301, 1997.
- 15 H. CAMACHO, M.E. FUENTES, L. FUENTES, A. GARCÍA, A. PÉREZ, "Evolución de la distribución de tensiones en un cuerpo cerámico durante la cocción. Parte 1: Planteamiento de los problemas", Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr., 42(5):283-288, 2003.
- 16 H. CAMACHO, M.E. FUENTES, I. FUENTES, A. GARCÍA, A. PÉREZ, "Evolución de la distribución de tensiones en un cuerpo cerámico durante la cocción. Parte 2: Cálculo de los perfiles", Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr., 42(6):353-359, 2003.
- 17 R. FARZIN, E. TAHERI, B. EGHBALL, "Evaluación de los esfuerzos residuales en los azulejos", Cerámica Información, 31(315): 61-70, 2005.
- 18 M. MARRERO, A. RAMÍREZ, R. LUCAS, "Distribución de tensiones en las fachadas de azulejos sujetas a dilataciones térmicas", Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr., 45(4):259-264, 2006.
- 19 R. NANIWA, Y. HAYASHI, T. YAMAZAKI, E. TAKADA, "Study on analysis of differential movement in exterior wall tile installation", International Conference on Building Envelope Systems and Technology, Proceedings, 195-202, Singapore, 1994.
- 20 R.G. BOWMAN , P.J. BANKS , "Theoretical modeling of external wall tiling systems", International Conference on Building Envelope Systems and Technology, Proceedings, 73-78, Singapore, 1994.
- 21 R.G. BOWMAN , P.J. BANKS, "The crucial need for computer modeling of tiling systems", Qualicer, 617-634, 1996.
- 22 C. BEN AMOR, "Comportement mécanique d'un carrelage collé sur sol en béton", 374: 2916. Paris, 1996.
- 23 D.A. SILVA, L.M.F. ROMAN, "Theoretical analysis on the thermal stress of ceramic tile coating systems", Durability Of Building Materials And Components, 8(1-4):603-612, 1999.
- 24 M. ABREU, V. LEITAO, J. CARVALHO, "Modelización del comportamiento de los recubrimientos cerámicos", Qualicer, PGI3-PGI19, 2003.
- 25 J.A. LUCAS, "Revestimentos cerámicos para paredes ou pavimentos. Proposta de intervenção do LNEC para melhoria da qualidade em obra", LNEC, Lisboa, 1999.
- 26 M. WAGNEU, T. BOSSHE, L. LASSOI, "Détachement des carrelages muraux intérieurs", CSTC Magazine,1:23-33, Bruxelles: CSTC, 1995.
- 27 E.C. CARBAJAL, E.M. GARCÍA, L. REIG, "Iniciación hacia una concepción de modelos simplificados en la estimación cuantitativa de los esfuerzos en recubrimientos cerámicos (caso: sistema forjado-adhesivo-soldado. MESES)", Qualicer, PBB33-PBB42, 2006.
- 28 B. DEFEZ, G. PERIS-FAJARNÉS, I. TORTAJADA, F. BRUSOLA, S. MORILLAS, "Flexural strength of non-constant thickness ceramic floorings by means of the finite element method", Int. J. Appl. Ceram. Technol.; 2009; disponible online.
- 29 B. DEFEZ, G. PERIS-FAJARNÉS, I. TORTAJADA, L. DUNAI, F. BRUSOLA, "Optimal design of deep back relief in ceramic floorings by means of the finite element method", J. Ceram. Soc. Jpn.; 116(1357):941-9, 2008.

Recibido: 16-2-09

Aceptado: 30-11-09