

## MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE PAVIMENTOS CERÁMICOS CON ELEMENTO FINITO

Ing. Paulina Leiva Padilla, Ing. Alejandro Navas Carro, MSc  
 e Ing. Luis Guillermo Loria Salazar, PhD

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica,  
 400 metros norte Muñoz y Nanne, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica  
 Tel: (506) 2511-2500 / 2511-2524  
[paulina.leivapadilla@ucr.ac.cr](mailto:paulina.leivapadilla@ucr.ac.cr), [alejandro.navas@ucr.ac.cr](mailto:alejandro.navas@ucr.ac.cr), [luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr)

### Introducción

En los últimos años, las empresas de construcción desarrolladoras ofrecen a la población la opción de vivir en complejos residenciales, cuyos diseños arquitectónicos incluyen acabados en exteriores, que comúnmente han sido utilizados para el interior de complejos residenciales, oficinas, centros comerciales y que, comúnmente, no contemplan las sollicitaciones mayores a las cuales se verán sometidos. La colocación de baldosas cerámicas en aceras, plazas públicas, urbanizaciones, etc., son un ejemplo de esta situación.

Mejoras en los materiales y las técnicas utilizadas en los pavimentos cerámicos han ido evolucionando del uso de tradicional con mortero de cemento y arena en una capa gruesa pasando por los pavimentos cerámicos de porosidad media, hasta los de capa fina sobre base regularizada para pavimentos de gres porcelánico. Así se han reducido, en gran medida, las deficiencias que causaban la fractura y los desprendimientos, por ser utilizados en la pavimentación urbana de exteriores (Cantavella, Gonzalo, Muños y Gilabert, 2012).

En este sentido, se analizó el comportamiento mecánico de un pavimento cerámico bajo el tránsito de un vehículo a velocidades bajas, con el objetivo de determinar las consideraciones importantes de tomar en cuenta a la hora de elegir los materiales y proceder con la instalación de este tipo de elementos, en aras de evitar el desarrollo de deterioros que vengán a reducir la calidad de los acabados que se requieren en obras de este tipo.

### Mecanismos presentes en pavimentos cerámicos

En recubrimientos rígidos modulares, como los pavimentos cerámicos, se pretende mantener la cohesión del sistema baldosa – superficie de colocación. Pueden mencionarse, entonces, dos mecanismos que rigen el comportamiento de los pavimentos cerámicos: adherencia y deformabilidad (Porcar, 2008).

Porcar (2008) define adherentes a los materiales por unir y, junta adhesiva o unión adhesiva al material que establece su unión. Continúa luego describiendo la adherencia como "... la capacidad de transferir una fuerza procedente del adherente a través de la unión adhesiva. ..."; asocia, entonces, la cantidad de adherencia con la fuerza que es posible aplicar a la unión adhesiva hasta el momento en que empieza a ceder. Dos métodos normalizados con los cuales es posible medirla son: cizalladura -fuerza paralela al plano de la unión adhesiva- y tracción -fuerza perpendicular al plano de unión adhesiva- (Figura 1).

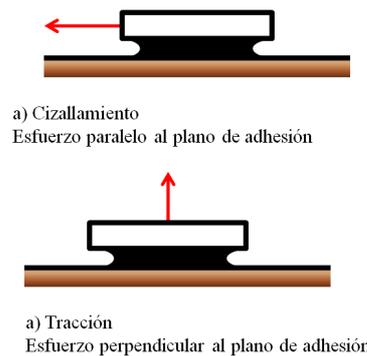


Figura 1.- Métodos para medir la cantidad de adherencia

Con respecto al otro mecanismo: la deformabilidad de la unión adhesiva, según este mismo autor, está relacionada con los esfuerzos mecánicos por atracción, compresión, flexión, cizalladura –Figura 2- y torsión, a los que suelen estar sometidos los sistemas y que les generan deformaciones regidas por la ley de Hooke.

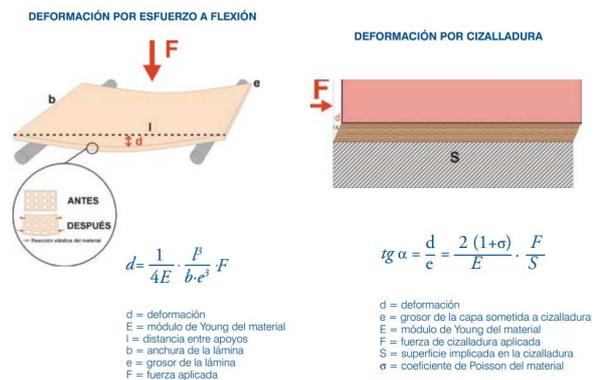


Figura 2.- Métodos para medir la deformabilidad de la unión adhesiva

### Antecedentes en modelación con elemento finito de los pavimentos cerámicos

Con respecto a la modelación por medio de la metodología del elemento finito, se puede mencionar el trabajo realizado por Camacho, Fuentes M., Fuentes L., García B. y Pérez, (2003a), quienes simulaban la distribución de tensiones durante el proceso de cocción de la cerámica, contemplando

comportamientos viscosos no lineales, a partir de la idea de que existen tensiones que ocasionan deformaciones no esperadas y poco deseadas en la cocción.

Posteriormente, los mismos autores, en un segundo estudio (Camacho, Fuentes M., Fuentes L., García y Pérez, 2003b), publicaron otro estudio referente a la resolución del mecanismo, en el cual consideran relaciones constitutivas, ecuaciones de equilibrio y condiciones de frontera particulares. En este estudio, se determinó que describir de una manera termo-elástica los materiales cerámicos aproxima, de forma aceptable, el comportamiento de las tensiones durante la cocción. Así las cosas, se determinó que las tensiones presentes ante cambios de temperatura son el resultado de los procesos de dilatación térmica y la respuesta viscosa.

Continuando con este tema, Peris (2007) estudió el comportamiento mecánico de baldosas aligeradas con relieve al dorso, a través de modelaciones con la metodología del elemento finito. Comprueba que, efectivamente, estos modelos responden en forma distinta a los modelos tradicionales; por tanto, resulta importante una práctica constructiva adecuada, para lograr la reducción del consumo de mortero y una mejor respuesta estructural.

En el 2008, Portolés, Algora, Mira, Silva, Bartolomé, Alcántara, Zamora realizaron una serie de ensayos que complementan con modelos de elemento finito, a partir de los cuales definen un diseño al dorso para baldosas cerámicas, que logre soportar, en gran medida, los niveles de esfuerzo requeridos en pavimentación urbana, tomando en cuenta las fallas más comúnmente observadas.

Un año más tarde, Defez, Peris-Fajarnés, Tortajada y Dunai (2009) realizaron investigación bibliográfica con respecto al uso de los análisis con el método de elemento finito en la industria cerámica en general, así como en pavimentos urbanos. El documento expone que, aunque el uso de esta herramienta se ha venido utilizando en el sector desde 1980, aún hay mucho por analizar, ya que los estudios realizados se han enfocado, principalmente en la evaluación de los materiales y no tanto en la geometría, que es un elemento sumamente importante, en la mejora que pueda darse al diseño de las piezas.

Posteriormente, Nascimientto, Piscitelli y Sander (2012) desarrollaron modelos para la exploración del comportamiento complejo de las tensiones y deformaciones ocurridas por la transferencia de los movimientos entre las capas, conectadas entre sí por las interacciones físicas y químicas de cada una de ellas –grosor, módulo de elasticidad, esfuerzo crítico de fluencia y límites de falla-. El análisis mostró que los límites recomendados en la capacidad de adherencia de este sistema podrían ser menores a los requeridos para sistemas con mortero.

Finalmente, en el mismo año, Cantavella, Silva, Muñoz y Gilabert (2012) estudiaron los esfuerzos mecánicos en pavimentos cerámicos ante la aplicación de cargas estáticas. Utilizan, para tal objetivo, ensayos de laboratorio y modelación con la metodología de los elementos finitos. La investigación estableció que las mayores tensiones que se producen en las baldosas cerámicas, se desarrollan en la parte inferior, y dan inicio a la rotura y propagación de la grieta en

esta zona. Además, morteros con bajos módulos de elasticidad o espesores delgados –menores a 4 mm- aumentan significativamente las tensiones en las piezas y la adhesión de estos con la baldosa es determinante en la carga de rotura que es capaz de soportar. Por otro lado, áreas de aplicación de cargas menores y piezas de mayor tamaño incrementan las tensiones, debido a que las juntas actúan como elementos liberadores de esfuerzos y a que los formatos cuadrados de las piezas presentan tensiones más bajas que los rectangulares, por lo cual los primeros resultan preferibles para la aplicación en pavimentos cerámicos.

## Objetivo general

Analizar el comportamiento mecánico de un pavimento cerámico bajo una carga de un vehículo en movimiento.

## Materiales y Métodos

Como se mencionó anteriormente, en la presente investigación, se utilizó la metodología del elemento finito, a través del programa ABAQUS®, para el análisis mecánico de una estructura tridimensional de pavimento cerámico.

Se estableció simetría en todos los bordes de la estructura para simplificar el modelo (figura 3a), y se aplicó una carga de presión equivalente a 0.8 MPa, en un área de contacto rectangular con las dimensiones mostradas en la figura 3b, a manera de simular una carga de 5 toneladas en la llanta simple. Con la finalidad de contemplar el aporte de la fricción en la superficie, se aplicó una carga de una velocidad de 3km/h (833 mm/s), en la dirección del tráfico. La figura 3c muestra los 99 225 elementos definidos para el modelo.

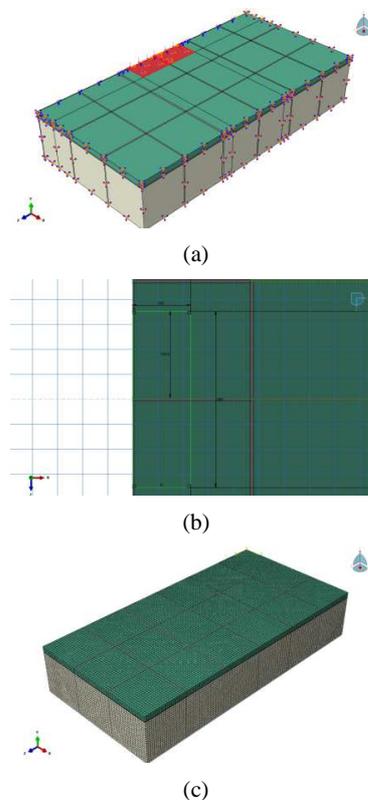


Figura 3.- (a) Geometría del modelo y condiciones de frontera, (b)

Área de carga y (c) mallado

Para la caracterización mecánica de las propiedades fundamentales que describen el modelo, se utilizaron los valores de módulo, densidad y razón de Poisson que se definen en la Tabla 1, para cada uno de los materiales que constituyen el modelo.

Tabla 1.- Caracterización mecánica materiales

Material	Módulo (MPa)	Razón de Poisson	$\alpha t$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
Mortero	7500	0.2	$12 \times 10^{-6}$
Baldosa cerámica	49000	0.2	$5 \times 10^{-6}$
Losa	4500	0.2	$11 \times 10^{-6}$

\* Aproximaciones de valores de literatura (Nacimiento, Piscitelli, & Sander, sf) (Porcar, 2008), modificado y adaptado por autores

Se consideraron condiciones de contacto con fricción completa y sin deslizamiento, con la finalidad de simplificar el modelo.

Evaluación de Resultados

La distribución de los esfuerzos máximos y mínimos principales desarrollados en la estructura en condición deformada se muestran en la figura 4. En ambos esquemas se observan las líneas donde hay mortero de pega en tensión - figura 4a- o compresión -figura 4b-, donde se espera se originen la falla.

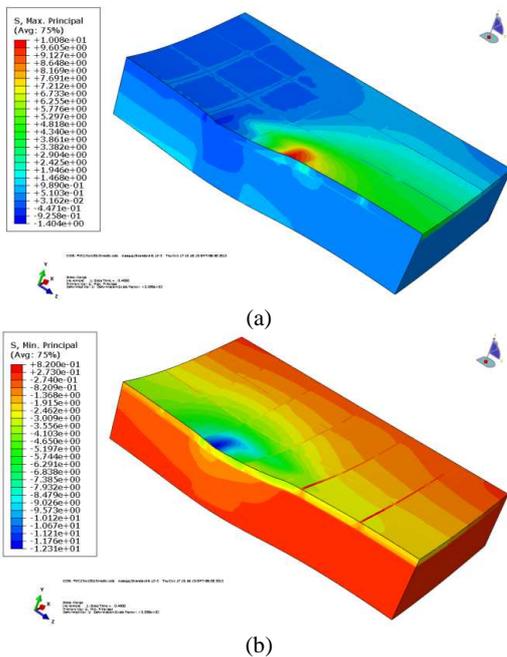


Figura 4.- Distribución de esfuerzos (a) Máximos principales y (b) Mínimos principales

Aislando el mortero de pega para un análisis más detallado, la Figura 5 ilustra los esfuerzos horizontales en la dirección al tránsito y perpendiculares a este, y la Figura 6 los esfuerzos de cizalla, que se desarrollan bajo la carga de estudio. Los resultados muestran la concentración de esfuerzos que se da en el mortero ante esta condición y ubicación de la carga,

apoyando los hallazgos obtenidos de la figura anterior.

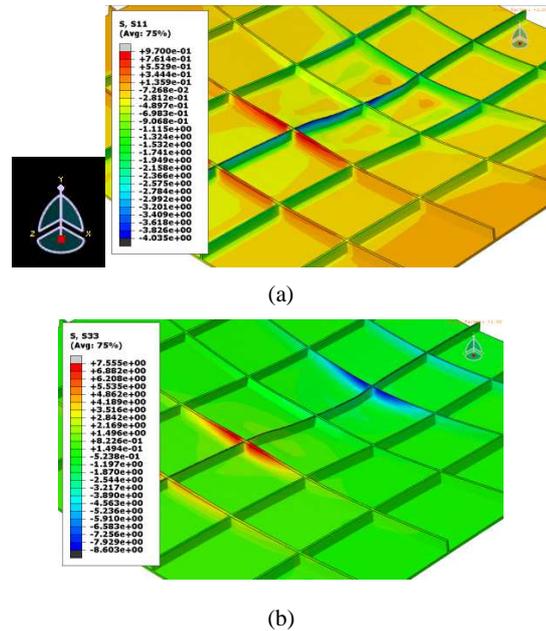


Figura 5.- Distribución de esfuerzos en el mortero de pega (a) horizontales en x -perpendiculares al tránsito- (b) horizontales en z - dirección del tránsito-

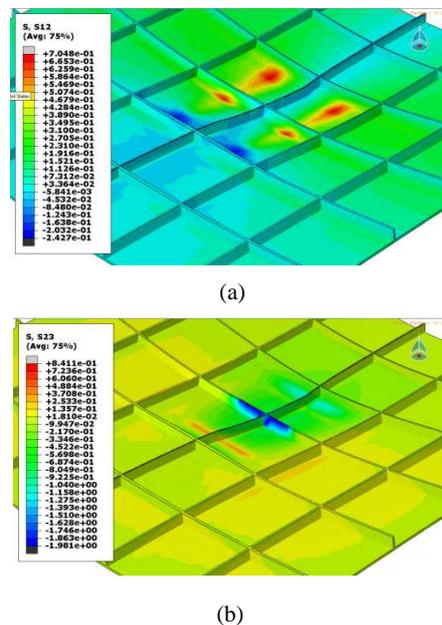
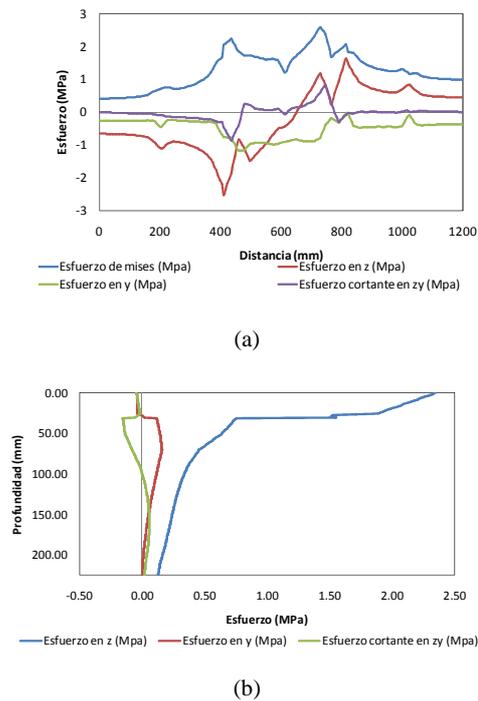


Figura 6.- Distribución de esfuerzos en el mortero de pega cortantes (a) en la dirección xy y (b) zy

Finalmente, las líneas de esfuerzos en el intermedio de la capa de mortero y con respecto a la profundidad -en el borde del área de carga que se encuentra en tensión- se grafican en la Figura 7. Los esfuerzos horizontales en el plano z en ambas figuras son mayores que los de corte, lo que demuestra que predomina el mecanismo de falla asociado con tales esfuerzos.



**Figura 7.-** Distribución de esfuerzos normales y de cortante en el (a) intermedio de la capa de mortero y con respecto a (b) la profundidad

## Conclusiones y Recomendaciones

De los resultados anteriores se puede inferir lo siguiente:

- Ocurre concentración de esfuerzos en el mortero de pega, por tanto, se puede presentar una posible falla por cizalladura o tensión en este elemento, que genera el desprendimiento progresivo de las losetas cerámicas. Esto se comprueba ya que parecieran ser mayores los valores de esfuerzos a tensión en la dirección horizontal z -en dirección al tránsito- que los valores de cortante.
- Hay concentraciones de esfuerzos en los bordes de la losa y el mortero que la rodea, lo que demuestra nuevamente que es en estas inmediaciones que se genera la propagación de la grieta.
- Los esfuerzos principales mayores se desarrollan tras la dirección de la llanta, en contraposición a los principales menores que ocurren en el área frontal de la misma.
- Los esfuerzos de compresión o tracción horizontales, para las condiciones que se estudian, parecen ser los causantes del abombamiento o agrietamiento de los recubrimientos cerámicos ante el tipo de solicitaciones analizadas. También hay que tomar en cuenta, que la resistencia de estos materiales ante tales esfuerzos es muy diferente en tracción que en compresión (10% aproximadamente), por lo que a la hora de analizar la resistencia del material deben aplicarse teorías de falla que contemplen esto, tales como la teoría de la envolvente de esfuerzos de Mohr, donde la falla ocurre, cuando el estado de esfuerzos en un punto se encuentra dentro de la tangente o fuera de la envolvente de falla.

- Los resultados obtenidos pueden variar con respecto al tipo de vehículo, velocidad desarrollada, aceleración y frenado, geometría (peralte, curva, etc), condiciones climáticas en caso de que esté a la intemperie, microtextura superficial de la loseta cerámica, tipo de neumático, presión de inflado y carga. Se recomienda por tanto, la realización de investigaciones que permitan estudiar la sensibilidad del modelo de ser necesario; sin embargo, para efectos de la investigación desarrollada se considera apropiado el análisis realizado.
- Por otra parte, las limitaciones asociadas a datos tomados de la bibliografía y por tanto, de ensayos que permitan la validación con resultados, pueden condicionar los resultados; por consiguiente, se recomienda realizar investigaciones posteriores que logren complementar la presente.

## Referencias

- Nacimiento, O., Piscitelli, A., and Sander, h.** (2012). "Modelación de comportamiento de tensión-deformación de los recubrimientos cerámicos instalados con láminas adhesivas de doble cara". *Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.*
- Porcar, J.** (2008). "ADHESIVOS Y MATERIALES DE REJUNTADO: Colocación de baldosas cerámicas y otros recubrimientos rígidos modulares". Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros Industriales. Barcelona.
- Defez, B.** (2007). "Análisis y definición del diseño óptimo del relieve al dorso en pavimentos cerámicos mediante elementos finitos". *Trabajo de Graduación.* Universidad Politécnica de Valencia.
- Defez, B. Peris-Fajarnés, G. Tortajada, I. and Dunai, L.** (2009). "Estudio de la evolución y nuevas técnicas de análisis por elementos finitos aplicadas al diseño de pavimentos cerámicos". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.*
- Camacho, H. Fuentes, M.E. Fuentes, I. García, A. Pérez, A.** (2003). "Evolución de la distribución de tensiones en un cuerpo cerámico durante la cocción. Parte 1: Planteamiento de los problemas". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 42(5):283-288.*
- Camacho, H. Fuentes, M.E. Fuentes, I. García, A. Pérez, A.** (2003). "Evolución de la distribución de tensiones en un cuerpo cerámico durante la cocción. Parte 2: Cálculo de los perfiles", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 42(6):353-359.*
- Cantavella, V. Silva, G. Muñoz, A. y Gilabert, F.** (2012). "Simulación y análisis en laboratorio de la rotura de pavimentos cerámicos urbanos bajo cargas estáticas". *Asfaltos y Pavimentos.* Bucaramanga.

**Peris, G.** (2007). “Análisis y definición del diseño óptimo del relieve al dorso en pavimentos cerámicos mediante elementos finitos2. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.

**Portolés, J. Algora, E. Mira, J. Silva, G. Bartolomé, M. Alcántara, E. y Zamora, T.** (2008). “Recubrimientos cerámicos que mejoran la seguridad y el confort en espacios públicos”. *X World Congress on Ceramic Tile Quality*.