

INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LAS BALDOSAS DE GRES PORCELÁNICO SOBRE LA RESISTENCIA DE SISTEMAS DE SUELOS ELEVADOS

Djeisa Pasini ^{1,2}, Angela Waterkemper Vieira ^{1,2}, Aline Demarch ^{1,2}, Laura Savi Rosso ^{1,2}, Sérgio Ruzza ², Elídio Angioletto ¹, Elaine G. P. Antunes ¹, Adriano Michael Bernardin ¹

¹ Programa de Graduación de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, PPGCEM, University of the Extreme South of Santa Catarina, UNESC, Criciúma, 88806-000, Santa Catarina, Brasil

² Eliane Ceramic Tiles, Cocal do Sul, 88845-000, Santa Catarina, Brasil

RESUMEN

Los sistemas de suelos elevados se utilizan principalmente en entornos comerciales y como pavimento se emplean diversos materiales, como las baldosas de gres porcelánico. En consecuencia, el espesor de las baldosas puede influir en el rendimiento de los sistemas de suelo elevado y restringir su uso. No existen estudios sobre el uso de baldosas cerámicas en sistemas de suelo elevado en relación con las cargas y deformaciones soportadas. En este trabajo se estudia el efecto del espesor de una baldosa de gres porcelánico sobre la resistencia del sistema de suelo elevado, considerando las tensiones y deformaciones en función de la carga aplicada. Se determinaron la carga de rotura, la resistencia a la flexión, la absorción de agua y el coeficiente de restitución de una baldosa de gres porcelánico según las normas ISO 10545 e ISO 13006. Las resistencias al impacto de cuerpo duro, cuerpo blando y carga concentrada del sistema de suelo elevado se determinaron de acuerdo con la norma BS 7976. Se utilizó ANOVA para analizar la tensión y la deformación máximas soportadas por el sistema, así como el coeficiente de restitución y el factor de amortiguación del impacto. También se llevó a cabo un análisis cualitativo del sistema tras la finalización de los ensayos. Como resultado, la disposición de las bases no influyó en la resistencia del sistema de suelo elevado (valor $p = 0,84$; $R^2 = 91,3\%$).

Por otro lado, el espesor de las baldosas cerámicas fue crítico para la carga máxima soportada por el sistema (nivel de confianza del 95%; valor $p = 0,011$; $R^2 = 91,3\%$). A medida que aumenta el espesor de la baldosa de gres porcelánico, aumenta la resistencia del sistema. La resistencia a la tracción del sistema de suelo elevado está relacionada con la resistencia de cada una de las baldosas cerámicas. La carga media de rotura varió en función de los espesores de las baldosas: para baldosas con 12 mm de espesor, la carga media de rotura fue de 3760 N; para baldosas con 16 mm de espesor, la carga media de rotura fue de 7041 N; y para baldosas con 20 mm, la carga media de rotura fue de 12268 N. Por lo tanto, el espesor de las baldosas de gres porcelánico modifica la resistencia de los sistemas de suelo elevado. Es necesario crear una norma internacional específica para los sistemas de suelo elevado con materiales cerámicos que sirva de guía para la correcta selección de los materiales, garantizando la seguridad y el rendimiento de los sistemas de suelo elevado en todo el mundo.

1. INTRODUCCIÓN

Las primeras aplicaciones del sistema de suelo elevado se remontan a la década de los años 1950. Sin embargo, a partir de los años 2000 la adopción de este sistema fue significativa, impulsada por el avance de la tecnología [1]. Desde entonces, este sistema se ha utilizado en entornos corporativos, principalmente debido a la eficacia de la ventilación, la calidad del aire y la reducción del consumo de energía. Además, el sistema es fácil de instalar en espacios por debajo del revestimiento, proporcionando facilidad de mantenimiento, dando a los usuarios flexibilidad para cambiar la disposición de las zonas cuando sea necesario [2]. Como resultado, los sistemas de suelo elevado se han ido utilizando cada vez más, sobre todo en edificios comerciales, a menudo combinados con la "Distribución de Aire Bajo Suelo" (UFAD), un sistema de distribución de aire en zonas abiertas bajo el suelo elevado. Esta integración proporciona a los edificios una mejor circulación del aire, aumentando la eficiencia energética y la calidad del aire [3].

Como las comunicaciones se procesan mediante ordenadores y las tecnologías se basan en Internet, las empresas han tenido que adaptarse a ellas [4]. Estos sistemas corresponden al 50% de los proyectos de nueva construcción en Alemania, Austria y Dinamarca, según Olesen [5]. Están instalados en el 85% de las viviendas rurales del norte de China, según Zhuang et al. [6] y en casi todos los edificios residenciales de Corea [7]. Estas cifras han aumentado considerablemente con el tiempo en todo el mundo.

Por lo tanto, el desarrollo de los productos y estructuras utilizados para los sistemas de suelo elevado también ha experimentado muchas innovaciones. Los sistemas modernos de suelo elevado pueden presentar una gran variedad de paneles de suelo, subestructuras y componentes auxiliares [8]. El sistema puede estar compuesto por diferentes tipos de materiales y presentar capas y geometrías complejas, y debe cumplir requisitos de rendimiento estructural [9].

Los sistemas de suelo elevado presentados en este trabajo consisten en placas de suelo desmontables autoblocantes, apoyadas sobre soportes telescópicos, ambos de polipropileno termoplástico, que establecen un espacio entre la base de hormigón y el suelo elevado acabado [10]. La capa final del sistema puede estar formada por diversos materiales como hormigón, moqueta, láminas de roca natural, madera y cerámica, especialmente gres porcelánico, o incluso nuevos materiales como los de cambio de fase (PCM) [11].

En cuanto a las baldosas de gres porcelánico, según el CSTB [12], el espesor mínimo debe ser de 18 mm; sin embargo, el mercado europeo actual suele utilizar un espesor de 20 mm.

Los materiales cerámicos tienen una capacidad limitada de deformación plástica en la mayoría de sus aplicaciones, presentando un comportamiento frágil. Por lo tanto, la resistencia mecánica de estos materiales viene dictada por la capacidad del material para soportar la aplicación de una carga sin fallar por rotura, y los materiales cerámicos son particularmente sensibles a la presencia de defectos internos, que determinan su resistencia final [13].

Teniendo en cuenta que las baldosas cerámicas se utilizan frecuentemente en sistemas de suelo elevado, es necesario considerar las propiedades intrínsecas que influyen directamente en su comportamiento. Aunque existen estudios centrados en el comportamiento térmico de los sistemas de suelo elevado [14][15][16][17][18][19][20][21], no existen trabajos que evalúen las cargas y deformaciones de los sistemas de suelo elevado cuando se utilizan baldosas de gres porcelánico como capa final.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue el análisis de las cargas y deformaciones de sistemas de piso elevado cuando se utiliza gres porcelánico como capa de recubrimiento/acabado. Se utilizó una baldosa de gres porcelánico sin esmaltar con espesores de 12, 16 y 20 mm.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO

El primer paso fue la selección de los elementos del sistema de suelo elevado. Se utilizó una base de polipropileno y una baldosa de gres porcelánico sin esmaltar. La altura del sistema se ajustó a 1200 mm mediante un tubo rígido, la altura más crítica según las especificaciones del fabricante. Las muestras de gres porcelánico sin esmaltar se clasificaron como BIa UGL, con medidas de 60×60 cm y espesores de 12, 16 y 20 mm. Los espesores se midieron según la norma ISO 10545 [22][23] y la carga de rotura, el módulo de resistencia a la flexión y la absorción de agua se determinaron según la misma norma. Los sistemas de suelo elevado se construyeron para realizar los ensayos de impacto de cuerpo duro, cuerpo blando y carga concentrada, todos por triplicado para cada espesor.

En los ensayos de impacto de cuerpo duro y cuerpo blando, el factor principal fue la región de impacto sobre la superficie de las baldosas de gres porcelánico, situada en el centro de los sistemas (conjuntos) para ambos ensayos, según la norma BS EN 12825. Para el ensayo con cuerpo duro, las masas de los cuerpos de impacto se redujeron de 4,5 kg a 250, 350 y 500 g para evitar la perforación de las baldosas y obtener así los coeficientes de restitución. Los coeficientes se determinaron utilizando un acelerómetro (PCB Piezotronics 350C04) fijado a la superficie de la baldosa cerámica. Los datos se analizaron mediante el software LabView® utilizando un acondicionador de señal.

En el ensayo de carga concentrada, las deformaciones se midieron en posiciones de aplicación de carga predefinidas. Se colocaron galgas extensométricas en la superficie de las baldosas cerámicas y se midieron los desplazamientos verticales utilizando un transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT), ambos conectados a una unidad de adquisición de datos, controlada por el software Catman Easy.

La zona de contacto del aplicador de carga y la posición de las galgas extensométricas (A, B y C) se determinaron según las directrices estándar para el centro del sistema elevado, el centro de un borde, en el lateral del sistema elevado y en la zona más frágil del sistema. Para identificar una zona potencialmente más frágil, se examinó el conjunto de los soportes (bases) del sistema de suelo elevado, Fig.1. Las áreas marcadas en verde corresponden a las regiones donde los apoyos se conectan al sistema y, por lo tanto, la región desprovista de puntos de apoyo (bases) fue identificada como la más vulnerable. Esta ilustración ofrece una visión detallada de la configuración de la carga en relación con los puntos de apoyo del sistema.

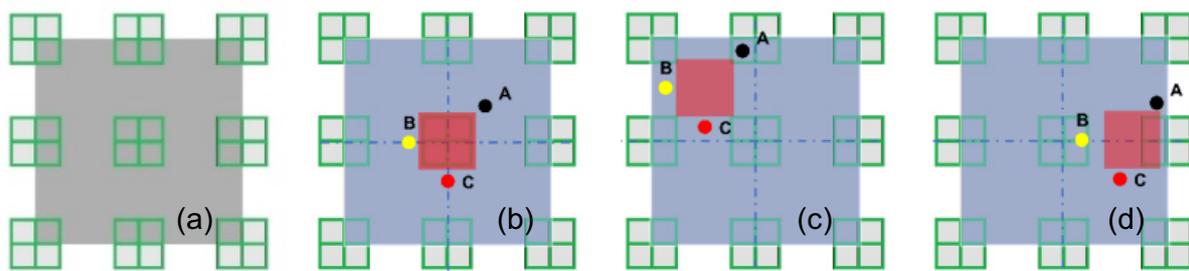


Figura 1. Ensayo de carga concentrada según la norma BS EN 12825: (a) Vista superior del acoplamiento de la base; (b) Conjunto 1; (c) Conjunto 2; (d) Conjunto 3.

El conjunto 01, colocado en el centro del sistema elevado, cubre toda el área de un apoyo, colocado directamente debajo de la región donde se aplica la carga. El conjunto 3 cubre la mitad del área de un apoyo, mientras que para el conjunto 2 no hay apoyo debajo del área donde se aplica la carga en los sistemas elevados.

Se utilizó un diseño experimental factorial 2^k con tres puntos centrales, donde el espesor de las baldosas y la posición donde se aplica la carga son los principales factores. La resistencia de los sistemas de suelo elevado es la respuesta. Los factores y niveles se determinaron a partir de las variables del ensayo de carga concentrada según la norma BS EN 12825 (2001).

Los espesores se definieron a partir de las baldosas comúnmente utilizadas en los sistemas de suelo elevado, tanto en Brasil como en Europa. El nivel (0) corresponde al espesor normalmente utilizado en sistemas de suelo elevado en el mercado brasileño. El nivel (-1) se definió para reducir los costes con un espesor menor. El nivel (+1) se definió en función del espesor utilizado habitualmente en los sistemas de suelo elevado en el mercado europeo. Para los conjuntos, que definen la posición donde la carga fue aplicada en los sistemas elevados, fueron definidos de acuerdo con las directrices de la normativa. El nivel (-1) se estableció como el centro del sistema, el nivel (+1) en el centro de uno de los bordes, y el nivel (0) entre estas dos posiciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Carga de rotura y módulo de resistencia a la flexión:

La carga de rotura y el módulo de resistencia a la flexión para la baldosa de gres porcelánico utilizada en el estudio pueden verse en la Fig.2. Las barras azules representan la carga de rotura, mientras que la línea roja muestra la resistencia a la flexión. Las muestras presentaron cargas de rotura y resistencias a la flexión acordes con las especificadas por la norma ISO 13006 [24], superando los valores mínimos de 1500 N y 35 MPa, respectivamente.

A medida que aumenta el espesor de la baldosa, aumenta la carga de rotura. Todas las muestras tienen el mismo módulo de rotura, independientemente del espesor. Según Silva et al. [25], la carga de rotura está ligada a la microestructura del material. Para una microestructura constante, una baldosa de mayor espesor tendrá una carga de rotura mayor en comparación con las baldosas de menor espesor. La resistencia a la flexión también está relacionada con la microestructura del material, por lo que muestras con diferentes espesores y la misma composición microestructural tienden a tener un módulo similar. El mismo comportamiento de la carga de rotura respecto al espesor fue encontrado por Abad-Coronel et al. [26].

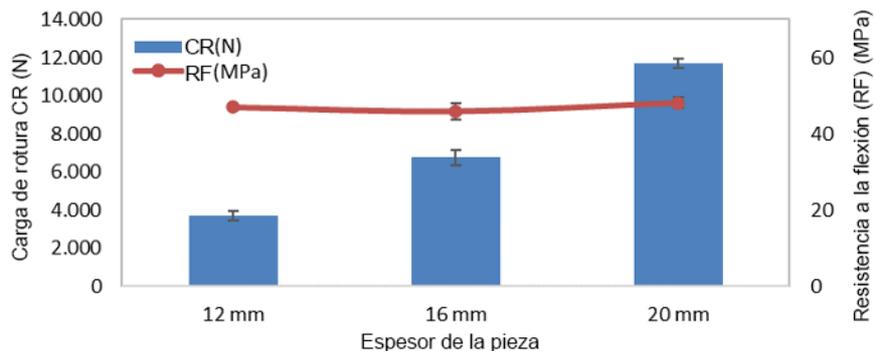


Figura 2. Carga de rotura (CR) y resistencia a la flexión (RF) (MPa) de las baldosas de gres porcelánico

b) Absorción de agua y densidad aparente:

La absorción de agua (AA) de las muestras se muestra en la Fig.3. Las barras azules muestran la absorción de agua y las líneas rojas la densidad aparente. La absorción de agua de las baldosas fue inferior a 0,1 % en peso, clasificándose como B1a UGL, según la norma ISO 13006 [24] para baldosas de gres porcelánico. Existe una ligera tendencia a aumentar la absorción de agua para espesores reducidos. Las muestras más delgadas se prepararon mecanizando la superficie de las baldosas, con lo que se abrieron los poros cerca de la superficie, aumentando la porosidad abierta y la absorción de agua. Wiśniewska et al. [27] demostraron que el aumento de la porosidad abierta también incrementa la absorción de agua. Todas las muestras mostraron una densidad aparente y una resistencia a la flexión similares [28]. García-Ten et al. [29] muestran una relación lineal entre la resistencia a la flexión y la densidad aparente del material ($R^2 = 0,997$).

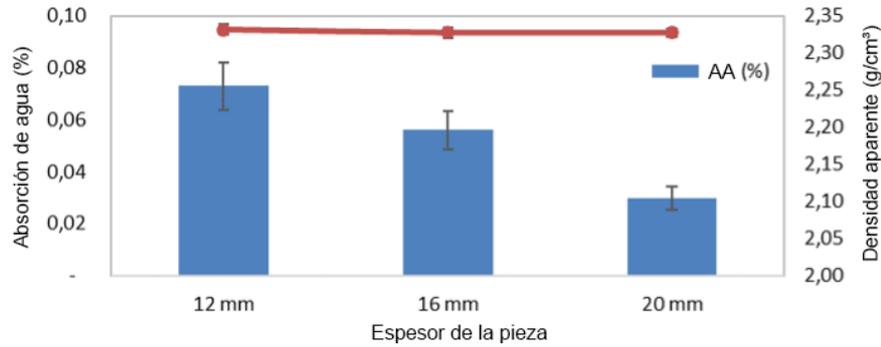


Figura 3. Absorción de agua (%) y densidad aparente (g/cm³)

c) Impacto de cuerpo duro:

El coeficiente de restitución medio (KR, adimensional) de los sistemas elevados sometidos al impacto de un cuerpo duro se muestra en la Tab.1 para las masas de los cuerpos de impacto (250, 350 y 500 g) y los espesores de las baldosas (20, 16 y 12 mm).

Altura (m)	Energía (J)	Masa (g)	DBS1 12	DBS1 16	DBS1 20
0,6	1,5	250	0,11	0,20	0,32
0,6	2,1	350	Fallo	Fallo	0,25
0,6	3,0	500	Fallo	Fallo	0,14

Tabla 1. Análisis del coeficiente de restitución (KR) en el ensayo de impacto de cuerpo duro

Los ensayos realizados con el cuerpo de 500 g dieron como resultado el fallo de los sistemas elevados de 12 y 16 mm en el primer impacto, y no se determinó el coeficiente de restitución para ellos. En el caso del sistema elevado de 20 mm, el fallo se produjo al tercer impacto, y el KR medio fue de 0,14. Independientemente del espesor, ninguno de los sistemas elevados cumplía las especificaciones de la norma. En el caso del cuerpo de impacto de 350 g, los sistemas elevados de 12 y 16 mm no resistieron el primer impacto. El sistema de 20 mm resistió tres impactos sin fallar, lo que dio como resultado un KR medio de 0,25. Todos los sistemas resistieron los impactos del cuerpo de 250 g. Los prototipos de 12, 16 y 20 mm resistieron tres impactos consecutivos sin fallar. Los KR medios fueron de 0,11, 0,20 y 0,32, respectivamente. Los fallos debidos a los ensayos de impacto de cuerpos duros se muestran en la Fig.4.

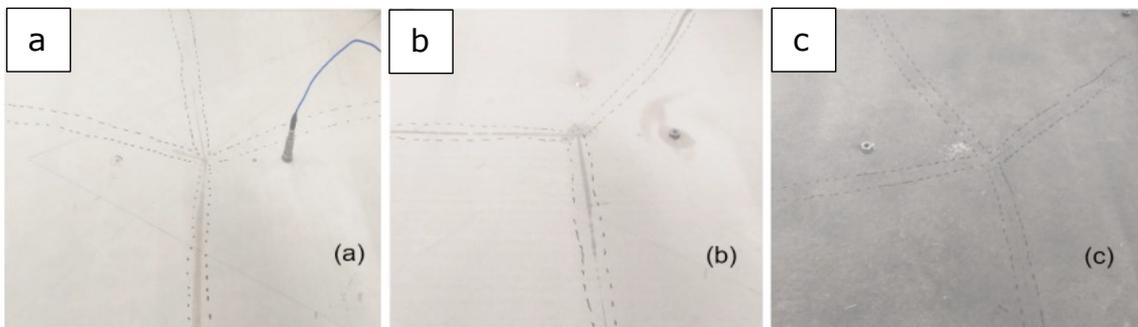


Figura 4. Ensayo de impacto de cuerpo duro (a) DBS1 12 (b) DBS1 16 (c) DBS1 20

d) Impacto de cuerpo blando:

El análisis de la prueba de impacto de cuerpo blando se dividió entre el sistema de suelo elevado (material de polipropileno) y la baldosa de gres porcelánico (material cerámico) para el peor fallo de los sistemas elevados. El ensayo de impacto de cuerpo blando de los sistemas de suelo elevado se muestra en la Tab.2 considerando la altura de liberación del cuerpo de impacto (0,30-2,40 m) para los sistemas de 12, 16 y 20 mm (MBS1 12, MBS1 16 y MBS1 20, respectivamente). En la Fig.5 se muestran las baldosas que fallaron y el sistema colapsado (marcado con * en la Tab.2) tras el impacto.

Altura (m)	Energía (J)	MBS1 20	MBS1 16	MBS1 12
0,30	120	Sin fallo	Sin fallo	Fallo de la baldosa*; sistema colapsado
0,45	180	Sin fallo	Sin fallo	-
0,60	240	Sin fallo	Sin fallo	-
0,90	360	Sin fallo	Fallo de la baldosa*; fallo del sistema	-
1,00	400	Sin fallo	-	-
1,20	480	Sin fallo	-	-
1,80	720	Baldosa sin fallo; sistema colapsado*	-	-
2,40	960	-	-	-

Tabla 2. Análisis cualitativo del ensayo de impacto de cuerpo blando

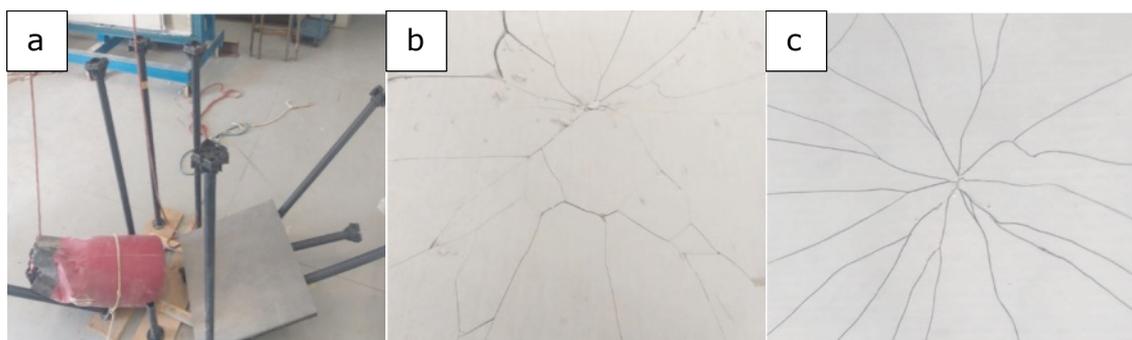


Figura 5. Ensayo de impacto de cuerpo blando (a) Colapso del sistema MBS1 20; (b) Fallo del gres porcelánico MBS1 16 (360 J); (c) Fallo del gres porcelánico MBS1 12 (120 J)

El sistema de suelo elevado de 20 mm (MBS1 20) colapsó con una energía de impacto de 720 J; las baldosas de gres porcelánico no fallaron. Por lo tanto, el soporte tuvo un rendimiento inferior al de las baldosas de gres porcelánico. El soporte y las baldosas de gres porcelánico mostraron el mismo rendimiento para el sistema de 16 mm (MBS1 16), fallando con una energía de 360 J. Para el sistema de suelo elevado de 12 mm, el soporte tuvo mejor rendimiento que las baldosas de gres porcelánico, ya que las baldosas fallaron con una energía de impacto de 120 J y los soportes permanecieron intactos.

Según la norma BS EN 12825 (2001), el sistema sobreelevado no debe colapsar bajo una energía de impacto de 400 J (correspondiente a un impacto de cuerpo blando a 1 m de altura). Por lo tanto, en este trabajo sólo cumplía el prototipo MBS1 20, con un espesor de baldosa de 20 mm.

e) Carga concentrada (BS EN 12825)

Para la prueba de carga concentrada, se determinó la carga (N) frente a la deformación (μm) teniendo en cuenta los espesores de las baldosas y los sistemas de suelo elevado, Fig.6. La carga se aplicó a los sistemas sobreelevados hasta que falló alguno de los componentes.

Para todos los conjuntos, el sistema de suelo elevado de 20 mm mostró la mayor resistencia, seguido del sistema de 16 mm y, por último, del sistema de 12 mm. Por tanto, la resistencia al fallo del sistema de suelo elevado depende del espesor de la baldosa cerámica, es decir, cuanto mayor es el espesor de la baldosa, mayor es la resistencia mecánica del sistema de suelo elevado [30][31], principalmente cuando la microestructura de las baldosas es la misma independientemente del espesor [25].

En cuanto a la deformación, los materiales cerámicos presentan una deformación elástica limitada, ya que tienen un mayor módulo de elasticidad, baja deformación plástica y, por tanto, mayor rigidez a la flexión, es decir, son materiales frágiles [32]. Sin embargo, al ser el sistema de suelo elevado un conjunto de materiales poliméricos y cerámicos, la deformación se vio influenciada por el material polimérico con un comportamiento elástico opuesto al del material cerámico [33]. La deformación de los conjuntos 1 y 3 (ver Fig.1) fue mayor a partir de espesores de baldosas de gres porcelánico de 12, 16 y 20 mm, en este orden. Para el conjunto 2, los sistemas de 12 y 16 mm mostraron una deformación similar. El sistema de 20 mm mostró la menor deformación, y el soporte de polipropileno se rompió antes que la baldosa cerámica.

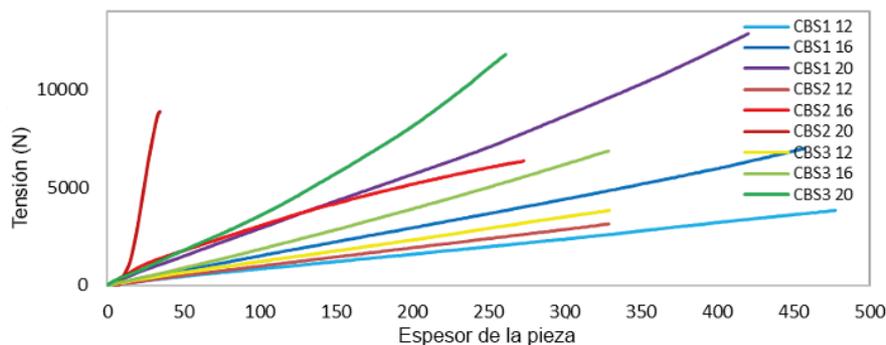


Figura 6. Ensayo de carga concentrada según BS EN 12825; curva tensión \times deformación

Lamnini et al. [34] estudiaron las curvas tensión-deformación para materiales cerámicos y compuestos, mostrando un comportamiento elástico similar. Sin embargo, en este trabajo, las curvas tensión-deformación muestran el comportamiento elástico de las baldosas cerámicas + soporte de polipropileno de los sistemas de suelo elevado, y el comportamiento elástico es diferente.

En la Fig.7 se muestran los valores de carga frente a los conjuntos de sistemas elevados (posiciones de carga). Las barras azules muestran la carga máxima soportada por los sistemas. Las configuraciones de los conjuntos y los tipos de fallo se muestran en el eje horizontal. Los fallos en el gres porcelánico se indican como "PP", mientras que el colapso en el soporte del sistema se identifica como "SPE". Las barras de error comprenden la desviación estándar para tres muestras.

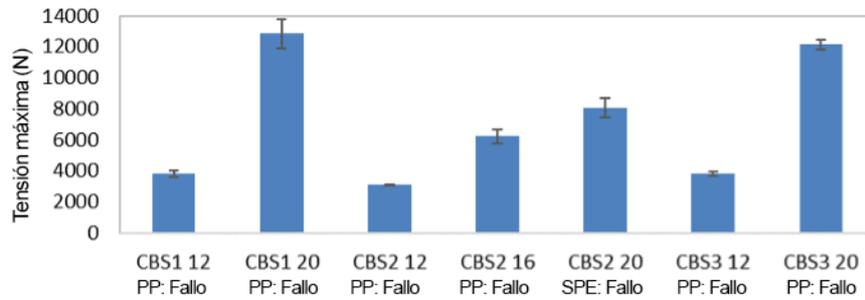


Figura 7. Ensayo de carga concentrada según BS EN 12825; carga máxima × conjuntos

Los conjuntos 1 y 3 muestran la mayor resistencia al fallo para el mismo espesor (12 y 20 mm) debido a las mayores cargas máximas para estas posiciones de carga (véanse las barras de error). Para el conjunto 1, la carga se aplica directamente sobre toda la superficie del soporte de PP. En el conjunto 3, la carga se aplica sobre la mitad de la superficie del soporte de PP. En el conjunto 2, no hay ningún componente de soporte bajo la carga, y este conjunto es el sistema elevado más frágil (véase la Fig.1). El sistema elevado CBS2 20 (conjunto 2, baldosa de 20 mm) muestra un comportamiento distinto. Se produjo un colapso en el soporte de PP antes del fallo de la baldosa de gres porcelánico, que permaneció intacta, Fig.8.

También es importante analizar el comportamiento frente al pandeo del soporte de polipropileno del sistema de suelo elevado. Ostrowski et al. [35] y Sun et al. [36] analizaron el pandeo bajo compresión axial de tubos de aleación metálica y el análisis visual del pandeo de este trabajo. Sin embargo, las curvas de tensión-deformación son totalmente diferentes. Por otra parte, en los sistemas CBS1 20 y CBS3 20 (conjuntos 1 y 3, respectivamente, para baldosas de 20 mm) sólo se produjo la flexión de las baldosas.

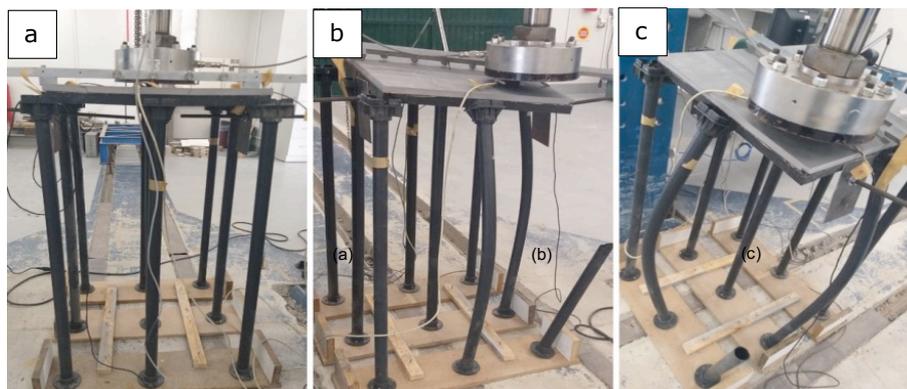


Figura 8. Ensayo de carga concentrada según BS EN 12825: (a) DBS1 20; (b) área frontal de DBS2 20; (c) área lateral de DBS2 20

La norma BS EN 12825 (2001) establece que los sistemas de suelo elevado deben tener una carga de rotura mínima (L) igual o superior a 4000 N y un desplazamiento vertical máximo de 4 mm. Sin embargo, el sistema de suelo elevado con baldosas de gres porcelánico de 12 mm de espesor no cumplía esta norma, ya que su carga de rotura era inferior a 4000 N. En cambio, los sistemas elevados de 16 y 20 mm cumplían los requisitos.

En cuanto a la deformación, los desplazamientos verticales en cada sistema fueron inferiores a 2,5 mm, y todos los sistemas cumplían. Por lo tanto, el sistema CBS 16 se clasificó como 2A y el sistema CBS 20 como 5A, de acuerdo con la norma.

La carga de rotura de los sistemas de suelo elevado y la de las baldosas de gres porcelánico solas puede verse en la Fig.9. Las barras azules muestran la carga de rotura máxima de las baldosas de gres porcelánico, y las barras rojas muestran la carga de rotura máxima de los sistemas de suelo elevado completos. Las barras de error representan la desviación estándar.

Considerando las desviaciones estándar, los soportes poliméricos no aumentan la resistencia del sistema elevado con respecto a la resistencia (carga de rotura) de las baldosas de gres porcelánico. Por lo tanto, la resistencia del sistema de suelo elevado en su conjunto es igual a la resistencia de las baldosas cerámicas ($R^2 = 0,999$ según el coeficiente de correlación de Pearson).

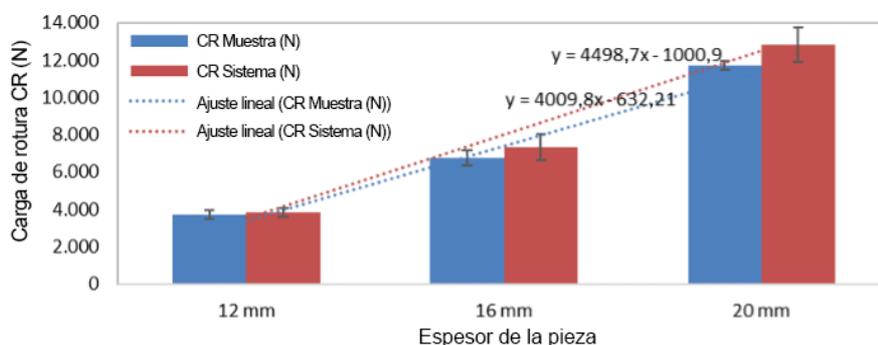


Figura 9. Correlación entre la carga de rotura de las baldosas cerámicas y la carga de rotura del sistema de suelo elevado

La regresión lineal para la baldosa cerámica es $y = 4009,8x - 632,21$ y la del sistema de suelo elevado es $y = 4498,7x - 1004,9$. Por lo tanto, la carga de rotura está influida por el espesor de las baldosas. Cuanto mayor sea el espesor, mayor será la carga de rotura, y se puede determinar la carga de rotura esperada para diferentes espesores. Como resultado, es posible evaluar el rendimiento esperado de la baldosa cerámica con diferentes espesores, realizando la especificación adecuada para la aplicación deseada, asegurando que el espesor elegido cumpla los requisitos de resistencia necesarios.

5. CONCLUSIONES

El análisis de los sistemas de suelo elevado demostró que el espesor de las baldosas de gres porcelánico afecta directamente a la resistencia del sistema. El aumento del espesor de las baldosas proporcionó un aumento de la carga soportada por el sistema, haciendo que las baldosas de gres porcelánico fueran adecuadas para su uso en el sistema de suelo elevado. La configuración de los soportes es suficiente para garantizar una resistencia uniforme del sistema, es decir, la posición de carga tiene poco impacto en la carga máxima soportada por el sistema.

Los sistemas de suelo elevado de este trabajo no cumplen todos los requisitos de la norma BS EN 12825 (2001). En la prueba de impacto de cuerpo duro, todos los sistemas fallaron. En la prueba de impacto de cuerpo blando, sólo cumplía el sistema elevado con baldosas de gres porcelánico de 20 mm de espesor. En cuanto a la prueba de carga concentrada, sólo cumplían las baldosas de gres porcelánico de 16 y 20 mm de espesor. Sin embargo, los requisitos de esta norma pueden no ser los más adecuados para limitar la aplicación de materiales cerámicos en estos sistemas.

El presente trabajo no sólo sirvió para determinar que el espesor adecuado de las baldosas de gres porcelánico especificadas para su uso en sistemas de suelo elevado dependerá del lugar donde se vaya a instalar el sistema, sino también como indicador de la necesidad de crear una norma específica para sistemas de suelo elevado con materiales cerámicos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lin YJP, Linden PF, 2005. A model for an underfloor air distribution system. *Energy and Buildings* 37, 4, 399-409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.07.011>
- [2] Schiavon S, Lee KH, Bauman F, Webster T, 2010. Influence of raised floor on zone design cooling load in commercial buildings. *Energy and Buildings* 42, 8, 1182-1191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.009>
- [3] Ahmad S, Goga G, Mohan R, 2023. Predicting the thermal comfort of occupants in an indoor auditorium space with different UFAD ventilation arrangements. *Materials Today Proceedings* 80, 62-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.115>
- [4] Pasut W, Bauman F, Carli M, 2014. The use of ducts to improve the control of supply air temperature rise in UFAD systems: CFD and lab study. *Applied Energy* 134, 490-498. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.002>
- [5] Olesen BW, 2002. Radiant floor heating in theory and practice. *ASHRAE Journal* 44, 19.
- [6] Zhuang Z, Li Y, Chen B, Guo J, 2009. Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China. A review. *Energy and Buildings* 41, 1, 111-119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.013>
- [7] Yeo M-S, Yang I-H, Kim K-W, 2003. Historical changes and recent energy saving potential of residential heating in Korea. *Energy and Buildings* 35, 7, 715-727. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788\(02\)00221-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788(02)00221-9)
- [8] Zhang G, Yang J, Sidwell A, 2002. Raised floor system: a paradigm of future office building fitout? *Advances in Building Technology* 1577-1584. <http://doi.org/10.1016/B978-008044100-9/50195-9>
- [9] Kim D-W, Joe G-S, Park S-H, Yeo M-S, Kim K-W, 2017. Experimental evaluation of the thermal performance of raised floor integrated radiant heating panels. *Energies* 10, 10, 1632. <http://dx.doi.org/10.3390/en10101632>
- [10] Idalêncio GF et al, 2022. Raised floor systems with ceramic tiles. *Journal of Engineering* 8, 6, 13-27. http://dx.doi.org/10.24840/2183-6493_008.006_0002
- [11] Kitagawa H, Asawa T, Rio MA, Kubota T, Trihamdani AR, 2023. Thermal energy simulation of PCM-based radiant floor cooling systems for naturally ventilated buildings in a hot and humid climate. *Building and Environment* 238, 110351. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110351>
- [12] CSTB, 2018. Revêtements de sol céramiques. Spécifications techniques pour le classement. UPEC 92.
- [13] Xiao Z et al, 2020. Materials development and potential applications of transparent ceramics: a review. *Materials Science and Engineering R* 139, 100518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2019.100518>
- [14] Bauman FS, 2003. Underfloor air distribution (UFAD) design guide. *ASHRAE Journal*.
- [15] Zhang K, Zhang X, Li S, Jin X, 2014. Review of underfloor air distribution technology. *Energy and Buildings* 85, 180-186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.011>
- [16] Raftery P, Bauman F, Schiavon S, Epp T, 2015. Laboratory testing of a displacement ventilation diffuser for underfloor air distribution systems. *Energy and Buildings* 108, 82-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.005>
- [17] Gao Y, Liu J, Yuan X, Zhang K, Yang Y, Wang Y, 2017. Air-conditioning system with underfloor air distribution integrated solar chimney in data center. *Procedia Engineering* 205, 3420-3427. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.852>
- [18] Yuan X, Xu X, Liu J, Pan Y, Kosonen R, Gao Y, 2020. Improvement in airflow and temperature distribution with an in-rack UFAD system at a high-density data center. *Building and Environment* 168, 106495. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106495>
- [19] Fan Y, Li X, Zheng M, Weng R, Tu J, 2020. Numerical study on effects of air return height on performance of an underfloor air distribution system for heating and cooling. *Energies* 13, 5, 1070. <http://dx.doi.org/10.3390/en13051070>
- [20] Qin C, Fang H-Q, Wu S-H, Lu W-Z, 2022. Establishing multi-criteria optimization of return vent height for underfloor air distribution system. *Journal of Building Engineering* 57, 104800. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104800>
- [21] Chen M, Zhang Z, Deng Q, Feng Y, Wang X, 2023. Optimization of underfloor air distribution systems for data centers based on orthogonal test method: a case study. *Building and Environment* 232, 110071. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110071>
- [22] ISO 10545-2, 2018. Ceramic tiles. Part 2: Determination of dimensions and surface quality. Switzerland: International Standardization Organization.
- [23] ISO 10545-4, 2019. Ceramic tiles. Part 4: Determination of modulus of rupture and breaking strength. Switzerland: International Standardization Organization.
- [24] ISO 13006, 2018. Ceramic tiles. Definitions, classification, characteristics and marking Switzerland: International Standardization Organization.
- [25] Silva AL, Feltrin J, Bó MD, Bernardin AM, Hotza D, 2014. Effect of reduction of thickness on microstructure and properties of porcelain stoneware tiles. *Ceramics International* 40, 9, 14693-14699. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.05.150>
- [26] Abad-Coronel C, Paladines Á, Ulloa AL, Paltán CA, Fajardo JI, 2023. Comparative fracture resistance analysis of translucent monolithic zirconia dioxide milled in a CAD/CAM system. *Ceramics* 6, 2, 1179-1190. <http://dx.doi.org/10.3390/ceramics6020071>
- [27] Wiśniewska K, Pichór W, Kłosek-Wawrzyn E, 2021. Influence of firing temperature on phase composition and color properties of ceramic tile bodies. *Materials* 14, 21, 6380. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14216380>
- [28] Darweesh HHM, 2019. Recycling of glass waste in ceramics. Part I: physical, mechanical and thermal properties. *SN Appl. Sci.* 1, 1274. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1304-8>
- [29] García-Ten J, Saburit A, Bernardo E, Colombo P, 2012. Development of lightweight porcelain stoneware tiles using foaming agents. *Journal of The European Ceramic Society* 32, 4, 745-752. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.10.028>

- [30] Farzad M, Shafieifar M, Azizinamini A, 2019. Experimental and numerical study on an innovative sandwich system utilizing UPFRC in bridge applications. *Engineering Structures* 180, 49-356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.052>
- [31] Wang W, Sun K, Liu H, 2020. Effects of different aluminum sources on morphologies and properties of ceramic floor tiles from red mud. *Construction and Building Materials* 241, 118119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118119>
- [32] Collini L, Carfagni GR, 2014. Flexural strength of glass-ceramic for structural applications. *Journal of The European Ceramic Society* 34, 11, 2675-2685. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.10.032>
- [33] Chawla KK, 2019. *Composite Materials*. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-28983-6>
- [34] Lamnini S, Pugliese D, Bairo F, 2023. Zirconia-based ceramics reinforced by carbon nanotubes: a review with emphasis on mechanical properties. *Ceramics* 6, 3, 1705-1734. <http://dx.doi.org/10.3390/ceramics6030105>
- [35] Ostrowski K, Dudek M, Sadowski Ł, 2020. Compressive behaviour of concrete-filled carbon fiber-reinforced polymer steel composite tube columns made of high-performance concrete. *Composite Structures* 234, 111668. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111668>
- [36] Sun Z-C, Cao J, Huang L, Yin Z-K, Zheng L-S, 2021. Buckling behavior of AA6061 circular tube under axial compression by considering contact condition of tube end. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 4, 3, 383-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.06.001>