

De la incertidumbre geotécnica al diseño auditable: el cambio de paradigma del método y software SM-KsDirect®

Proyecto galardonado con el accésit en el IV Premio a la Innovación Tecnológica, Empresarial y Sostenibilidad de la Fundación Técnica Industrial (FTI)

Por Antonio J. Sánchez Garrido (autor) y José F. Moreno Serrano (coautor)

Durante más de un siglo, la ingeniería estructural ha lidiado con un eslabón crítico y paradójico: la interacción suelo-estructura. Mientras el cálculo algorítmico de la superestructura ha alcanzado niveles de precisión milimétrica, la determinación del coeficiente de balasto vertical (K_s) ha operado bajo un inaceptable marco de incertidumbre y vacío normativo. Desde las aproximaciones primigenias de Winkler en 1867, que idealizaban el terreno como un lecho de resortes elásticos independientes, hasta las fórmulas de Terzaghi (1955) o Vesic (1961), la práctica profesional ha dependido crónicamente de correlaciones empíricas.

El sector se ha visto forzado a recurrir a métodos indirectos, como el ensayo de placa de carga (K_{30}), el cual tiende a sobrestimar peligrosamente la rigidez en suelos granulares, o a métodos semidirectos que subestiman la capacidad del terreno (especialmente en suelos cohesivos), generando cimentaciones sobredimensionadas. El marco regulatorio actual, incluyendo el Eurocódigo 7 (EN 1997-1/2) y el Código Estructural (RD 470/2021), no establece un procedimiento analítico directo para la obtención del balasto, delegando este parámetro crítico a la subjetividad del proyectista. La alternativa convencional más rigurosa, el Método de Elementos Finitos (FEM) o modelos constitutivos avanzados (Hardening-Soil), resulta inoperativa para el flujo de trabajo diario debido a su extrema complejidad, altos tiempos de cálculo y enorme exigencia de parametrización.

Para resolver esta desconexión histórica entre la geotecnia y el cálculo estructural, nace la innovación galardonada en los IV Premios FTI: el Método SM-KsDirect y su materialización tecnológica, el software SaaS KsDirect®. Este



Conexión definitiva suelo-estructura.

desarrollo introduce por primera vez un procedimiento físico-matemático directo, auditable y coherente, transformando un riesgo históricamente oculto en una variable de diseño medible.

El Salto científico: Mecánica de suelos directa y coherente

El núcleo algorítmico del método SM-KsDirect (Sánchez & Moreno, 2026) abandona las correlaciones empíricas y define el coeficiente de balasto de manera analítica: como el cociente matemático exacto entre la carga neta transmitida y el asiento resultante. El método aborda el terreno como un medio continuo deformable, procesando las variables de entrada a través de un riguroso esquema multicapa.

A nivel operativo, el algoritmo realiza un cálculo exhaustivo de la carga bruta, pero introduce de manera crítica el análisis de la carga compensada derivada de la excavación de sótanos para obtener la presión neta real que deforma el estrato. Mediante la integración de los criterios elásticos de Boussinesq y Steinbrenner, el sistema determina explícitamente la profundidad de influencia real (z) del bulbo de presiones. Para garantizar la convergencia matemática y evitar sin-

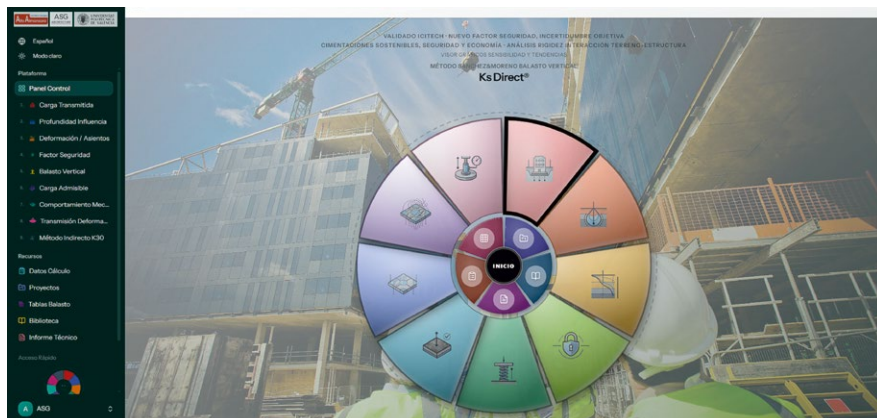
gularidades en escenarios de cargas totalmente compensadas, el algoritmo implementa umbrales físicos rigurosos: la profundidad de influencia se acota donde el diferencial de carga transmitida es inferior al 5% de la presión efectiva (o al 10% de la carga bruta), imponiendo un mínimo de carga neta transmitida del 5%.

A partir de esta geometría de tensiones, el método discrimina con extrema fidelidad los asentamientos elásticos (empleando módulos de deformación E') y los de consolidación edométrica (E_m), vitales en terrenos marcadamente cohesivos o estratigrafías complejas. Estadísticamente, los resultados del modelo convergen hacia la media armónica de las estimaciones clásicas, operando con máxima sensibilidad cuando los estratos blandos gobiernan la deformabilidad del conjunto.

Superando las limitaciones del FEM: interacción analítica real

Uno de los pilares más disruptivos del método SM-KsDirect® es su capacidad para reproducir el campo de deformaciones de un modelo continuo FEM, pero eliminando su coste computacional.

A diferencia de la simplificación clásica, el algoritmo implementa una clasi-



Captura del Dashboard del programa.

ficación mecánica avanzada de la losa. Primero, evalúa si la respuesta es rígida (comportamiento global sin diferencial de deformación significativo) o flexible. Si es flexible, el sistema subclasifica la interacción en dos mecanismos basados en la traslación de bulbos locales:

- 1. Comportamiento "en placa":** donde existe una interacción continua entre pilares con gradientes de deformación globales.
- 2. Comportamiento "por área tributaria":** donde la deformación se localiza críticamente bajo los apoyos puntuales. El método define analíticamente esta respuesta mediante una anchura efectiva asociada a la luz estructural, estableciendo 0.7L como la dimensión representativa de la carga.

Gracias a este mapeo analítico del campo de deformaciones, el software Ks-Direct® realiza una zonificación espacial automática del módulo de balasto. El programa erradica el error de asignar un Ks único, calculando iterativamente matrices de rigidez independientes para el centro, los bordes y las esquinas de la cimentación, reflejando a la perfección la resistencia al asiento inducida por el confinamiento perimetral. Esta traslación directa de la realidad mecánica posiciona a la herramienta como el eslabón perfecto para integrarse en ecosistemas de cálculo BIM, Tekla o CYPE, dotando al modelo del edificio de una base geotécnica inexpugnable.

La disrupción tecnológica: el primer Factor de Seguridad (FS) explícito

El hito más trascendental introducido por Sánchez-Garrido et al. (2026) en el estado del arte mundial es la formulación de un Factor de Seguridad (FS) explícito y específico para el coeficiente de balasto.

Históricamente, en la geotecnia e incluso en los modelos numéricos FEM, la seguridad frente a asientos ha operado como un margen ciego, diluido en múltiples parámetros sin control directo del ingeniero.

El motor algorítmico de Ks-Direct® somete la campaña geotécnica a un mecanismo de scoring que evalúa matemáticamente la incertidumbre objetiva de los datos y la ignorancia subjetiva del ensayo. Ante estudios geotécnicos deficientes o extrapolaciones escasas, el software activa la protección imponiendo un inédito Factor de Seguridad (FS) restrictivo (alcanzando valores de 2.5 o superiores). Por el contrario, si la fiabilidad de los ensayos de campo y laboratorio es de máxima calidad, el programa premia al proyectista optimizando el diseño mediante la reducción del FS hasta un límite calibrado de 1.2. De este modo, la seguridad estructural abandona el empirismo pasivo para convertirse en una variable trazable, dinámica y auditable.

Validación científica internacional: el aval del primer Decil (JCR)

La robustez de la algoritmia de Ks-Direct® no se fundamenta en un desarrollo comercial aislado, sino en un marco de investigación del más alto nivel desarrollado en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València (UPV). La investigación ha contado con la dirección académica del Prof. Dr. Víctor Yepes Piqueras, Catedrático de Ingeniería de la Construcción e investigador posicionado en el Top 3 nacional en Ingeniería Civil.

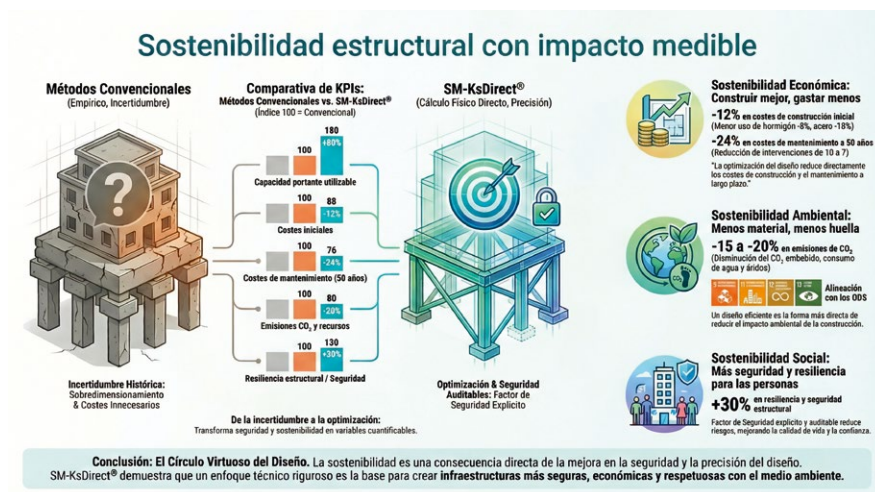
Este respaldo ha cristalizado en la validación por pares del método completo, culminando con su publicación en la prestigiosa revista científica Environmental Impact Assessment Review (Elsevier). Esta cabecera ostenta el máximo impacto global, situándose en el Primer Decil (Q1/D1) del Journal Citation Reports (JCR), lo que certifica internacionalmente que la formulación física del balasto y el esquema de seguridad propuestos superan los estándares de control más rigurosos del estado del arte.

Metodología LCSA: Sostenibilidad estructural mediante lógica neutrosófica

Para cuantificar el impacto real del método frente a la práctica convencional, el equipo investigador sometió el algoritmo a un Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA) multidimensional. La evaluación técnica no se limitó a una métrica de costes básica, sino que implementó un triple enfoque analítico:

1. Dimensión Económica (LCCA):

análisis de costes de ciclo de vida a 50 años (alineado con el Código Estructural), integrando los costes de construcción (CAPEX) y operación/



Sostenibilidad estructural con impacto medible.

mantenimiento (OPEX), aplicando una tasa de descuento social del 2% estandarizada por la Comisión Europea.

2. Dimensión Ambiental (LCA):

cuantificación de la huella estructural empleando la metodología ReCiPe 2016 y las bases de datos de inventario Ecoinvent v3.2. Se evaluaron categorías de impacto de punto final (salud humana, calidad de los ecosistemas y agotamiento de recursos) aplicando la perspectiva jerárquica ("H"), considerada la más robusta a nivel normativo.

3. Dimensión Social (S-LCA):

evaluación de la resiliencia estructural e impacto en los usuarios empleando el marco UNEP/SETAC (indicador C6 sobre seguridad), parametrizando el beneficio directo de contar con un Factor de Seguridad auditable.

Para evitar el sesgo de los métodos compensatorios tradicionales, la consolidación de estos indicadores se resolvió mediante técnicas de toma de decisiones multicriterio de vanguardia. Se empleó la técnica jerárquica NAHP-G basada en lógica neutrosófica para la ponderación objetiva de criterios bajo incertidumbre, y la rutina de outranking ELECTRE IS. Este rigor matemático garantizó que la superioridad del método SM-KsDirect® fuera irrefutable y reproducible.

Caso de estudio empírico: complejo hotelero de 5 estrellas en la costa granadina (KPIs reales)

La validación industrial y constructiva se materializó en el cálculo de parte de la cimentación de un Hotel de 5 estrellas en la costa de Granada. La infraestructura requería una losa de 30x86 metros parcialmente compensada por excavación, apoyada sobre una estratigrafía granular compleja con intercalaciones débiles.

El contraste de resultados evidenció el peligroso vacío de la ingeniería tradicional. Mientras que el método indirecto empírico (K_{30}) sobrestimaba críticamente la rigidez del medio granular arrojando un balasto de 17,82 MN/m³ (introduciendo un riesgo inminente de asentos diferenciales no controlados), el método semi-directo penalizaba el diseño con un valor ultraconservador de 2,91 MN/m³. Frente a ambos extremos, el software KsDirect® determinó un Ks analítico y físicamente coherente de 5,30 MN/m³.

La aplicación de esta rigidez exacta en el modelo digital liberó un incremento de la capacidad portante utilizable del 80%.

La zonificación de las tensiones en el modelo estructural permitió optimizar los armados y el canto de la losa, arrojando KPIs de impacto definitivos:

- **Materiales y CAPEX:** reducción del 8% en el volumen de hormigón y del 18% en la cuantía de acero corrugado. Esto supuso un ahorro económico directo del 12% en la fase de construcción.
- **Mantenimiento (OPEX a 50 años):** al garantizar el control de la deformada, la proyección determinó una reducción del 24% en los costes de mantenimiento, disminuyendo las intervenciones de reparación por patologías asociadas a asentamientos de 10 a 7 ciclos a lo largo de la vida útil del edificio.
- **Descarbonización y Resiliencia (ODS 9, 11, 12, 13):** la optimización geométrica mitigó entre un 15% y un 20% las emisiones de CO₂ embebido y el consumo hídrico/áridos, mientras que el indicador de resiliencia estructural y seguridad de los usuarios aumentó un 30%.

Aplicabilidad masiva a la ingeniería industrial y logística

El motivo central por el que la Fundación Técnica Industrial ha otorgado este accésit de Innovación a la candidatura liderada por ASG Architecture es la escalabilidad masiva de la solución. Aunque el método fue empíricamente testado en edificación singular, la algoritmia de KsDirect® está diseñada para su integración natural en el ámbito de la ingeniería industrial pesada.

En el dimensionado de grandes plataformas logísticas de distribución, sometidas a cargas puntuales dinámicas y tráfico rodado intenso, o en naves industriales con maquinaria pesada (su-

perficies tipo de 20.000 m²), la losa de cimentación puede representar entre el 15% y el 20% del PEM.

En estos escenarios, abandonar la incertidumbre geotécnica y sustituir el sobredimensionamiento "ciego" por un diseño ajustado a la matriz de balasto analítica que provee el software, se traduce en una optimización integral y escalable. De acuerdo con las conclusiones de las investigaciones y el Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA), la aplicación de esta metodología garantiza ahorros económicos directos de hasta un 12% en la ejecución inicial de la cimentación (por reducción de armaduras y canto) y una caída del 24% en los costes de mantenimiento a 50 años. Más allá del plano financiero, esta precisión analítica tiene un impacto medioambiental y social drástico: permite reducir entre un 15% y un 20% las emisiones de CO₂ y el consumo de recursos críticos (agua y áridos), incrementando simultáneamente la resiliencia estructural en un 30% al mitigar el riesgo de patologías por asentamientos diferenciales.

En conclusión, el método científico SM-KsDirect y su traslación tecnológica en formato SaaS constituyen la pieza que faltaba para cerrar el ciclo del modelado estructural en la Industria 4.0. Dotando a los ingenieros de una herramienta compatible con ecosistemas BIM, la innovación transforma el balasto de una variable hipotética a un parámetro físico verificado. Este desarrollo posiciona a la ingeniería española a la vanguardia internacional, demostrando que el rigor técnico y el control algorítmico son la única base posible para la construcción de infraestructuras competitivas, auditables y genuinamente sostenibles.



Software Ks-Sánchez&Moreno (2026).