



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**INFLUENCIA DE LOS ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES EN EL ARMADO DE
REFUERZO DE LOSAS DE CIMENTACIÓN ANALIZADO CON EL MÉTODO MODAL
ESPECTRAL Y MODELOS ACOPLADOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Civil

AUTOR: Byron Alexander Cruz Barbosa

TUTOR: Freddy Israel Rodríguez Badillo

Quito - Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Byron Alexander Cruz Barbosa con documento de identificación N° 1724619588; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 14 de julio del 2025

Atentamente,



Byron Alexander Cruz Barbosa
1724619588

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Byron Alexander Cruz Barbosa con documento de identificación N° 1724619588 expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto de Investigación: “Influencia de los asentamientos diferenciales en el armado de refuerzo de losas de cimentación analizado con el método modal espectral y modelos acoplados de interacción suelo-estructura” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 14 de julio del 2025

Atentamente,



Byron Alexander Cruz Barbosa
1724619588

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Israel Rodríguez Badillo con documento de identificación N° 1720094026, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: INFLUENCIA DE LOS ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES EN EL ARMADO DE REFUERZO DE LOSAS DE CIMENTACIÓN ANALIZADO CON EL MÉTODO MODAL ESPECTRAL Y MODELOS ACOPLADOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA, realizado por Byron Alexander Cruz Barbosa con documento de identificación N° 1724619588, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto de Investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 14 de julio del 2025

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Freddy Rodríguez', is written over a horizontal line.

Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo, MSc.

1720094026

INFLUENCIA DE LOS ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES EN EL ARMADO DE REFUERZO DE LOSAS DE CIMENTACIÓN ANALIZADO CON EL MÉTODO MODAL ESPECTRAL Y MODELOS ACOPLADOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

INFLUENCE OF DIFFERENTIAL SETTLEMENTS ON THE REINFORCEMENT DESIGN OF MAT FOUNDATIONS ANALYZED THROUGH THE MODAL SPECTRAL METHOD AND COUPLED SOIL-STRUCTURE INTERACTION MODELS

Byron Cruz-Barbosa¹, Freddy Rodríguez-Badillo²

Resumen

Este estudio analiza la influencia de los asentamientos diferenciales inducidos por cargas estáticas y sísmicas en la demanda de acero de refuerzo en losas de cimentación, considerando la interacción suelo - estructura mediante modelos acoplados y desacoplados. La simulación sísmica se realizó aplicando el método modal espectral de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015), incorporando las propiedades geomecánicas del terreno. Se evaluaron tres escenarios: un modelo desacoplado Winkler, un modelo acoplado Winkler y un modelo acoplado tridimensional con elementos finitos. El análisis se aplicó a edificaciones de 5, 12 y 25 niveles, sobre suelos tipo C, D y E. La modelación tridimensional se ejecutó en MIDAS GTS NX, y los modelos simplificados en Robot Structural Analysis. Los resultados indican que los modelos desacoplados y acoplados Winkler son más conservadores, mientras que el modelo tridimensional ofrece una representación más precisa, permitiendo un diseño más eficiente.

Palabras claves: Asentamientos diferenciales, losa de cimentación, interacción suelo-estructura, modelo acoplado, método modal espectral.

Abstract

This study analyzes the influence of differential settlements induced by static and seismic loads on the reinforcement steel demand in foundation slabs, considering soil-structure interaction through coupled and uncoupled modeling approaches. The seismic simulation was carried out using the modal response spectrum method defined by the Ecuadorian Building Code (NEC-2015), incorporating the geomechanical properties of the soil. Three scenarios were evaluated: an uncoupled Winkler model, a coupled Winkler model, and a three-dimensional coupled model using finite elements. The analysis was applied to buildings with 5, 12, and 25 stories, founded on soil types C, D, and E, respectively. The three-dimensional modeling was performed using MIDAS GTS NX, while the simplified models were implemented in Robot Structural Analysis. The results indicate that the uncoupled and coupled Winkler models are more conservative, whereas the three-dimensional model provides a more accurate representation, enabling a more efficient design.

Keywords: Differential settlements, mat foundation, soil-structure interaction, coupled model, modal spectral method.

¹ Estudiante Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito-Ecuador.

² Docente Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito-Ecuador.

Autor para correspondencia: byronc539@gmail.com

1. Introducción

En las zonas sísmicas, el diseño de cimentaciones superficiales va mucho más allá de calcular dimensiones y resistencias: implica comprender cómo se comporta el suelo frente a los movimientos del terreno y cómo ese comportamiento afecta directamente a la estructura que sostiene. Entre los fenómenos más delicados que pueden presentarse está el asentamiento diferencial, un tipo de deformación que, aunque muchas veces pasa desapercibida en los modelos tradicionales, puede generar efectos importantes en el desempeño estructural y en la seguridad de una edificación.

Muchos análisis estructurales han asumido que la cimentación se apoya sobre un suelo rígido o idealizado. Esta simplificación, aunque útil en algunos contextos, puede ser peligrosa cuando el terreno tiene baja rigidez o es muy compresible. Bajo estas condiciones, la estructura no se comporta sola, interactúa con el suelo, se adapta a sus deformaciones y, en muchos casos, amplifica los efectos de un sismo.

2. Materiales y Métodos

2.1. Softwares

Para llevar a cabo esta investigación, se emplearon dos softwares especializados en análisis estructural y geotécnico, seleccionadas por su capacidad para modelar con precisión tanto el comportamiento del terreno como la respuesta dinámica de la estructura.

2.1.1. Midas GST NX

Este software es utilizado para la modelación tridimensional del modelo acoplado suelo - estructura. Este software permite trabajar con elementos finitos y considera la no linealidad del terreno, lo cual resulta fundamental cuando se desea analizar cómo los asentamientos diferenciales afectan la cimentación. En este estudio, se usaron modelos 3D del terreno con propiedades geomecánicas definidas para cada tipo de suelo.

2.1.2. ROBOT SAP

Fue empleado para desarrollar el análisis estructural y el diseño de losas de cimentación y analizar los

modelos empotrado-desacoplados. Este software permitió calcular las solicitaciones internas y realizar el dimensionamiento del refuerzo, utilizando los datos de carga obtenidos en las simulaciones dinámicas. Asimismo, se utilizó para interpretar la distribución de esfuerzos bajo diferentes condiciones de apoyo, comparando el comportamiento estructural entre modelos.

2.2. Propiedades estructurales y geomecánicas

Las propiedades estructurales y geomecánicas adoptadas en este estudio fueron seleccionadas con el objetivo de representar condiciones típicas de diseño en edificaciones de mediana y gran altura sobre suelos con distintas características de rigidez.

2.2.1. Materiales de los elementos estructurales

Para este estudio se utilizaron elementos con materiales convencionales, pero con propiedades mecánicas bien definidas, adecuadas para el análisis estructural y la simulación dinámica en edificaciones sismorresistentes, estos materiales se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los elementos estructurales.

Material	Propiedad	Valor	Unidad
	Peso específico (g)	2400	kgf/m ³
Hormigón	Resistencia a la compresión simple (f'c)	280	kgf/cm ²
	Módulo de elasticidad (E)	252671	kgf/cm ²
Acero de Refuerzo	Resistencia a la fluencia (fy)	4200	kgf/cm ²
Acero Estructural	Resistencia a la fluencia (fy)	3521	kgf/cm ²

2.2.2. Características geomecánicas

En esta investigación se analizaron tres tipos de suelo con diferentes niveles de rigidez, con el objetivo de evaluar el efecto de las propiedades del

terreno en la respuesta estructural y en la demanda de refuerzo de las losas de cimentación ante cargas sísmicas, estas características del suelo se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros geotécnicos.

Parámetro	Suelo blando	Suelo semiblando	Suelo rígido	Unidad
Peso específico	2039	1847	1498	kgf/m3
Cohesión (c')	0.10	0.30	3.00	kgf/cm2
Ángulo de fricción (f')	12.50	9.00	36.50	°
Módulo de elasticidad	32.98	70.48	424.32	kgf/cm2
Coefficiente de Poisson (v)	0.45	0.35	0.25	-

2.2.3. Configuración estructural

Para el análisis estructural se modelaron tres edificaciones de 5, 12 y 25 niveles, con diferentes configuraciones geométricas. El edificio de 5 pisos presenta una geometría regular tanto en planta como en elevación, mientras que los edificios de 12 y 25 pisos fueron diseñados con irregularidades en planta y altura, mediante la reducción de ejes estructurales a partir de niveles superiores. Todas las estructuras fueron conformadas con perfiles laminados de acero tipo HEB para columnas e IPE para vigas, conectados rígidamente para garantizar la transmisión de momentos. Las losas de entrepiso fueron consideradas como diafragmas rígidos, permitiendo una distribución efectiva de cargas laterales, los perfiles utilizados se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Elementos estructurales.

Elemento	Sección	Material
Vigas Principales	IPE 270	ASTM A572
	IPE 240	Gr.50
Vigas Secundarias	IPE 200	ASTM A572
		Gr.50
Columnas	HEB 200	
	HEB 240	
	HEB 320	ASTM A572
	HEB 340	Gr.50
	HEB 360	
	HEB 400	

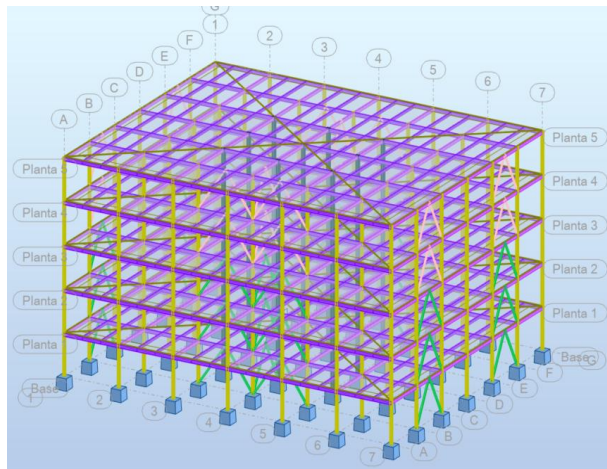


Figura 1. Edificio 5 pisos Robot SAP.

El edificio de 5 niveles que se observa en la Figura 1 fue modelado con una configuración ortogonal de 7 ejes en dirección X, separados a 5m, y 7 ejes en dirección Y, con una separación uniforme de 4m entre cada uno. La estructura presenta una malla regular que favorece la simetría en planta y facilita el análisis comparativo. La altura típica de entrepiso se fijó en 3,50m, valor común en edificaciones de uso comercial o institucional, lo que otorga una configuración estructural representativa y realista para fines de simulación.

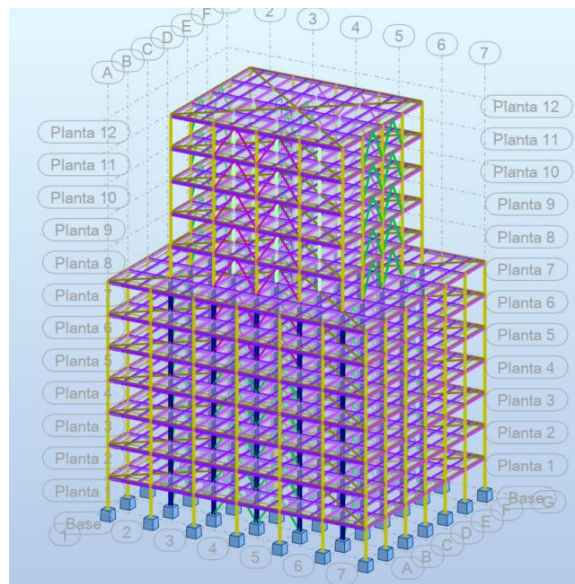


Figura 2. Edificio 12 pisos Robot SAP.

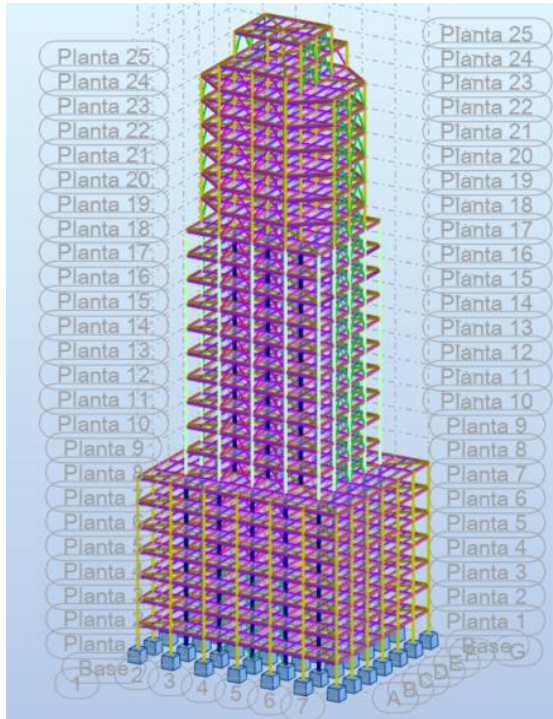


Figura 3. Disposición estructural edificio 25 pisos Robot SAP.

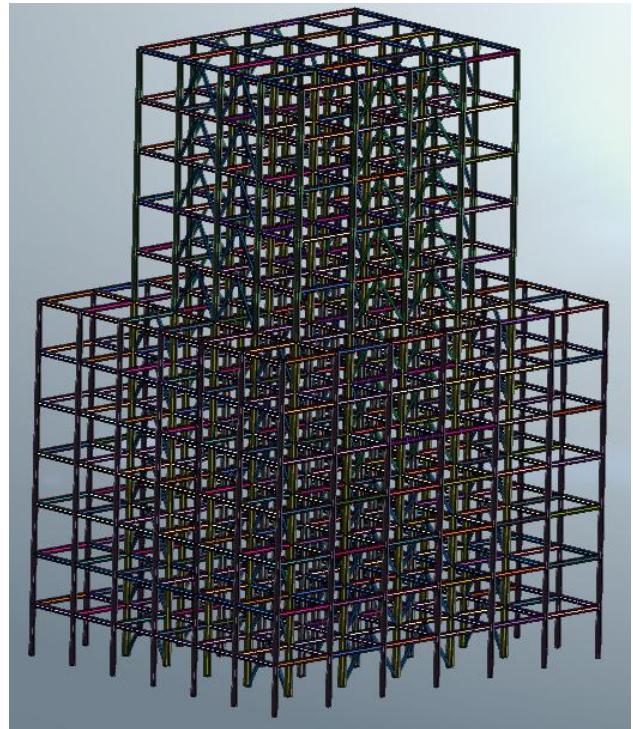


Figura 5. Edificio 12 pisos MIDAS GTS.

Los edificios de 12 y 25 niveles que se observa en las Figuras 2, 3, 4 y 5 comparten la misma configuración base hasta el nivel 7. A partir del nivel 8, se reduce un eje en cada sentido, quedando la planta con 6 ejes en X y 6 ejes en Y, manteniendo las mismas separaciones entre ejes. Esta modificación representa una transición estructural en altura, común en este tipo de edificios.

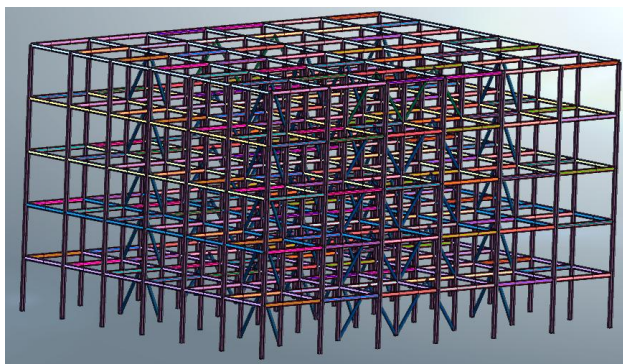


Figura 4. Edificio 5 pisos MIDAS GTS.

2.2.4. Cargas aplicadas

Las cargas aplicadas en los modelos estructurales fueron definidas conforme a los criterios establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción, específicamente en el capítulo de Cargas No Sísmicas (NEC-SE-CG) [1]. Las cargas vivas fueron asignadas de acuerdo con el uso previsto de los entrepisos que son domicilios y oficinas, siguiendo los valores normativos recomendados para edificaciones de tipo residencial y administrativa.

Para la carga muerta, se realizó un metrado que incluyó exclusivamente los elementos no estructurales, como paredes divisorias, revestimientos, enlucidos y acabados arquitectónicos. El peso propio de los elementos estructurales fue calculado automáticamente por el software de análisis estructural, garantizando una representación precisa de la carga permanente.

La acción sísmica sobre las edificaciones se definió mediante un análisis modal espectral, en conformidad con los lineamientos del capítulo de Peligro Sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS) [2]. Esta metodología

permite evaluar de forma más realista la respuesta dinámica de la estructura, considerando su periodo natural, la rigidez y los efectos amplificadores del tipo de suelo, estos parámetros se observan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros sísmicos - Quito - Ecuador.

Parámetro	Suelo blando	Suelo semiblando	Suelo rígido
F Importancia (I)	1	1	1
F de Reducción de respuesta (R)	8	8	8
Amplificación espectral (η)	2.48	2.48	2.48
Zona sísmica (Z)	0.4	0.4	0.4
Perfil sísmico del suelo	E	D	C
Coficiente (Ct)	0.073	0.073	0.073
Coficiente (α)	0.75	0.75	0.75
F de Sitio (Fa)	1	1.2	1.2
F de Sitio (Fd)	1.6	1.19	1.11
F de sitio (Fs)	1.9	1.28	1.11
Irregularidad en Planta ($\emptyset p$)	0.9	0.9	0.9
Irregularidad en Elevación ($\emptyset e$)	0.9	0.9	0.9

Los espectros de diseño para cada tipo de suelo se observan en las Figuras 6, 7, 8.

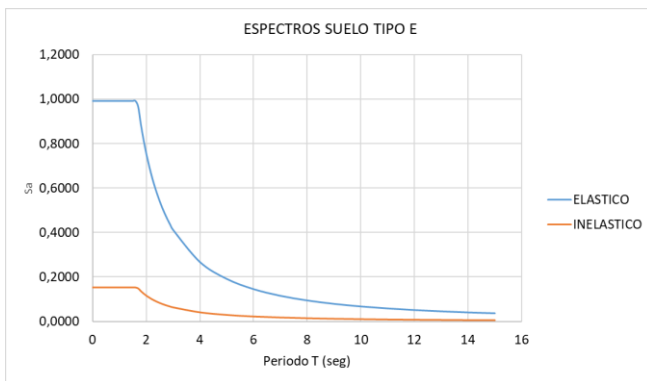


Figura 6. Espectro de respuesta sísmica para suelo tipo E.

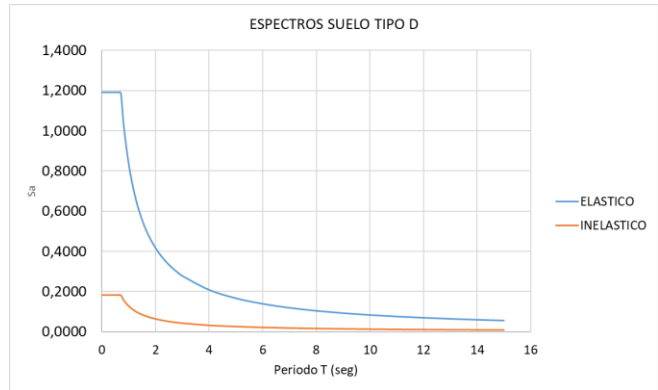


Figura 7. Espectro de respuesta sísmica para suelo tipo D.

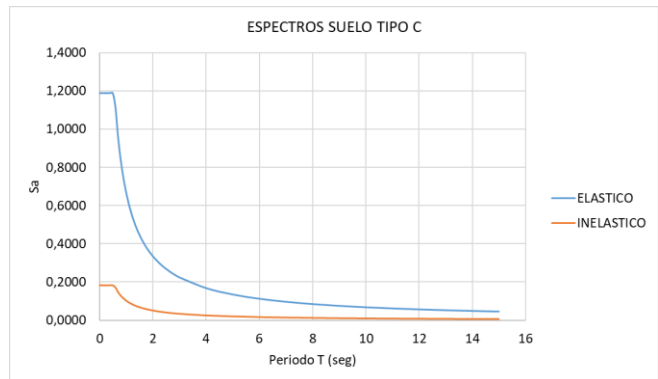


Figura 8. Espectro de respuesta sísmica para suelo tipo C.

2.3. Análisis y diseño estructural

El análisis y diseño estructural de los modelos fue realizado mediante el software Autodesk Robot Structural Analysis Professional, el cual permitió aplicar cargas gravitacionales y sísmicas, obtener los resultados modales y desarrollar el dimensionamiento de los elementos estructurales y de las losas de cimentación.

El análisis dinámico se ejecutó conforme al método modal espectral, siguiendo los lineamientos del capítulo NEC-SE-DS [2] de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015). Para el caso específico de edificaciones en acero, se consideraron además los requisitos del capítulo NEC-SE-AC [4], así como las disposiciones de la norma norteamericana AISC 360-16 [5] para diseño por resistencia y AISC 341-16 [6] para diseño sísmico de estructuras de acero, estas normativas permitieron evaluar el comportamiento global de la estructura bajo cargas combinadas y garantizar que el diseño cumpla con los criterios de resistencia, estabilidad global, ductilidad y desempeño sísmico

exigidos en zonas de alta amenaza sísmica.

Los resultados obtenidos de Robot Structural Analysis sirvieron tanto para comparar los efectos de los distintos modelos de interacción suelo - estructura como para calcular la cuantía de acero de refuerzo requerida en cada caso.

El diseño de las losas de cimentación se llevó a cabo conforme a los requisitos establecidos en el capítulo NEC-SE-HM [7] de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015), correspondiente al diseño de elementos de concreto armado, y a las disposiciones de la norma americana ACI 318S-19 [8], que regula el diseño y construcción de estructuras de concreto con énfasis en seguridad estructural.

El dimensionamiento de las losas incluyó el cálculo de solicitaciones por momentos flectores y cortantes, obtenidos a partir del análisis estructural para cada tipo de modelo (empotrado, desacoplado y acoplado), así como la distribución real de presiones transmitidas al terreno. En función de estos esfuerzos se determinó la cuantía de refuerzo requerida en ambas direcciones, garantizando el cumplimiento de los estados límites de resistencia y servicio.

El refuerzo fue dispuesto considerando la normativa vigente sobre mínimos por retracción y temperatura, desarrollo de anclajes, empalmes y continuidad del acero, todo dentro de los criterios constructivos establecidos para losas macizas fundidas in situ.

2.4. Capacidad de carga admisible y módulo de reacción de la subrasante

La determinación de la capacidad de carga admisible y del módulo de reacción de la subrasante constituye un aspecto fundamental para el análisis de cimentaciones superficiales. Estos parámetros permiten caracterizar la respuesta del suelo ante la aplicación de cargas verticales, tanto en modelos desacoplados como acoplados. En este estudio, ambos valores fueron obtenidos a partir de métodos analíticos reconocidos y complementados con datos provenientes del modelo geotécnico tridimensional, con el fin de capturar de forma más realista el

comportamiento del terreno bajo las losas de cimentación.

2.4.1. Capacidad de carga admisible

Para la determinación de la capacidad portante última del terreno bajo las losas de cimentación, se utilizó la expresión general que encontramos en Braja M. Das [3], que considera los tres mecanismos principales de resistencia del suelo: cohesión, sobrecarga y peso unitario, junto con factores correctivos por forma, profundidad e inclinación de la carga. La ecuación empleada fue la siguiente:

$$q_u = c'N_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i} \quad (1)$$

Posteriormente, se aplicó un factor de seguridad de 3,0 para obtener la capacidad de carga admisible en condiciones estáticas, y 1,5 en condiciones sísmicas, siguiendo criterios geotécnicos comúnmente aceptados.

El valor del ancho de la cimentación (B) se determinó a partir de un análisis iterativo, en el cual se identificó el punto de inflexión de la curva de capacidad portante. Es decir, se seleccionó el valor de B a partir del cual la capacidad de carga admisible empezaba a incrementarse. Este valor fue distinto para cada tipo de suelo, ya que depende directamente de sus propiedades geomecánicas, tales como cohesión, ángulo de fricción y módulo de elasticidad, en las Figuras 9, 10, 11 se observa la capacidad de carga admisible y el valor de B seleccionado.

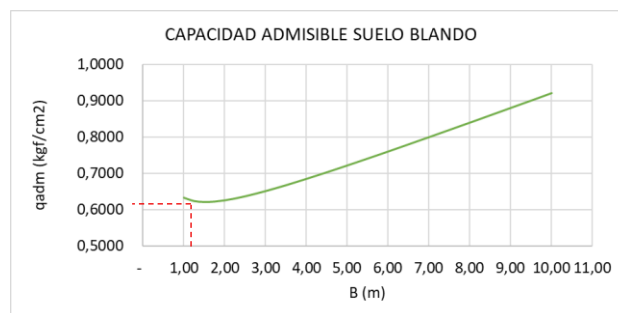


Figura 9. Capacidad admisible suelo blando.

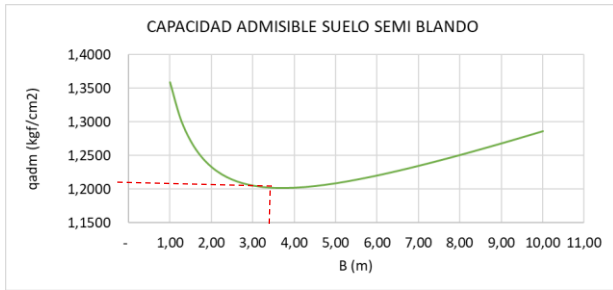


Figura 10. Capacidad admisible suelo semi blando.

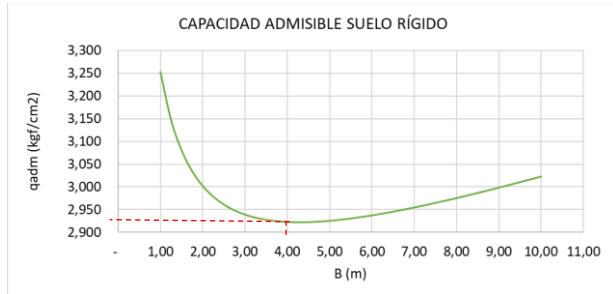


Figura 11. Capacidad admisible suelo rígido.

2.4.2. Módulo de reacción de la subrasante

Para los modelos que consideraron apoyo sobre suelo elástico, se estimó el coeficiente de balasto (k_s) mediante la expresión propuesta por Braja M [3]. Das, ampliamente utilizada en la teoría de cimentaciones. Esta fórmula permite determinar el módulo de reacción de la subrasante considerando la rigidez del suelo y la geometría de la cimentación:

$$k = \frac{E_s}{B(1 - \mu_s^2)} \quad (2)$$

Es importante señalar que el valor de B empleado en esta fórmula fue el mismo valor adoptado para el cálculo de la capacidad portante admisible, es decir, aquel correspondiente al punto de inflexión de la curva, donde la capacidad admisible empezaba a incrementarse de forma más significativa. Esta coherencia en los criterios permitió obtener resultados representativos y comparables entre los modelos desacoplados y acoplados, alineados con el comportamiento real del sistema suelo – estructura, en la Tabla 5 se observa la capacidad de carga admisible y el coeficiente de balasto calculado para cada tipo de suelo.

Tabla 5. Capacidad admisible y coeficiente de balasto.

Parámetro	Suelo blando	Suelo semiblando	Suelo rígido	Unidad
Ancho B	1.50	3.75	4.25	m
qadm estático	6.20	12.00	29.25	tonf/m2
qadm sísmico	12.40	24.00	58.50	tonf/m2
Coefficiente de balasto (k_s)	276	214	1065	tonf/m3

Con el fin de representar de forma más precisa la interacción entre la losa y el terreno, se aplicó una sectorización del coeficiente de balasto siguiendo las recomendaciones de la ACI 336.2R-88 [9].

Según esta norma, el valor de k_s se distribuye en tres zonas:

Área central: se asigna el valor base del coeficiente de balasto k_s .

Área de borde: se incrementa el valor a $1,5k_s$.

Área externa (esquinas y extremos libres): se incrementa hasta $2k_s$.

Esta distribución busca simular con mayor precisión el aumento de rigidez aparente en los bordes de la cimentación, resultado del confinamiento del terreno y de la forma de la losa. La segmentación de la losa se realizó en función de la geometría proyectada, dividiendo el plano en zonas definidas por fracciones de L_x y L_y (longitud y ancho de la losa), tal como lo indica la norma y se observa en la Figura 12.

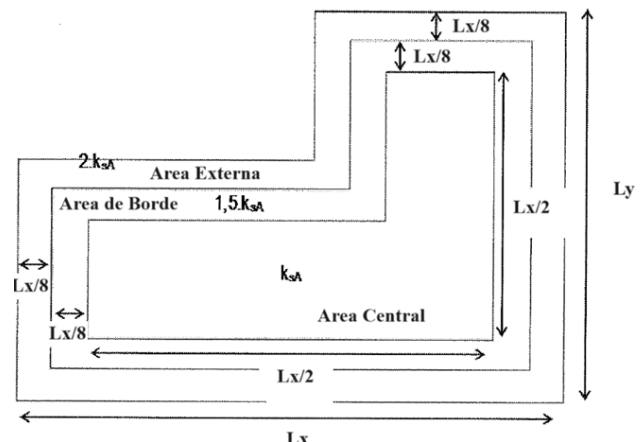


Figura 12. Sectorización de coeficiente de balasto [9]

2.5. Modelación geotécnica y estructural en MIDAS GTS NX

La modelación geotécnica y estructural acoplada se llevó a cabo en el software MIDAS GTS NX,

especializado en análisis geotécnico mediante el método de elementos finitos. Este entorno permitió simular la interacción tridimensional entre la estructura y el suelo de forma realista, capturando los efectos de los asentamientos diferenciales bajo carga sísmica [10].

El suelo fue modelado como un medio continuo tridimensional, compuesto por elementos sólidos con propiedades geomecánicas definidas para cada tipo de terreno (blando, semiblando y rígido), incluyendo módulo de elasticidad, cohesión, ángulo de fricción interna y peso específico. Se utilizó el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, adecuado para simular el comportamiento elástico - plástico del suelo frente a cargas complejas.

La losa de cimentación fue representada mediante elementos tipo lámina 2D (plate elements), lo que permitió simular su rigidez flexional y su interacción directa con el terreno. Esta representación es eficiente para captar las deformaciones diferenciales y su efecto sobre la distribución de esfuerzos en la cimentación, la superestructura se modeló utilizando elementos tipo viga 1D (beam elements), definidos en base a perfiles laminados HEB e IPE.

2.5.1. Coeficiente de balasto obtenido de MIDAS GTS NX

Para obtener una estimación más representativa del terreno modelado, se calculó el coeficiente de balasto directamente desde MIDAS GTS NX, aplicando su definición clásica como la razón entre el esfuerzo vertical transmitido al suelo y el asentamiento correspondiente, es decir:

$$k = \frac{\sigma}{\delta} \quad (3)$$

Esta aproximación permitió comparar los valores teóricos estimados anteriormente, analizando si el modelo desacoplado y acoplado (tipo Winkler) represente adecuadamente la rigidez real del suelo obtenida en el modelo MIDAS, en la Tabla 6 se visualizan estos valores.

Tabla 6. Coeficiente de balasto MIDAS GTS NX.

Parámetro	Suelo blando	Suelo semiblando	Suelo rígido	Unidad
Coeficiente de balasto (ks)	389	633	2310	tonf/m3

Es importante mencionar que tanto en el modelo desacoplado como en el modelo acoplado Winkler, también se utilizó el coeficiente de balasto obtenido directamente desde MIDAS GTS NX mediante la relación esfuerzo/asentamiento, y posteriormente se sectorizó conforme a las recomendaciones de la norma ACI 336.2R-88 [9].

Esta sectorización permitió definir valores diferenciados de rigidez en zonas centrales, de borde y esquinas de la losa, mejorando significativamente la representación de la interacción vertical suelo-estructura en los modelos con base elástica.

3. Resultados y Discusión

Una vez completado el proceso de modelación estructural y geotécnica de las tres edificaciones bajo los distintos escenarios de interacción suelo - estructura, se procedió a comparar los resultados obtenidos para evaluar el impacto real de los asentamientos diferenciales en el diseño de las losas de cimentación.

Se analizaron las edificaciones de 5, 12 y 25 niveles ubicadas sobre suelos blando, semiblando y rígido, en todos los casos, se aplicaron las mismas condiciones de carga y parámetros sísmicos respectivamente.

3.1. Reacción de suelo

Uno de los primeros parámetros evaluados en el análisis fue la reacción del suelo, entendida como el esfuerzo vertical transmitido por la losa de cimentación al terreno bajo las combinaciones de carga de servicio (muerta + viva). Este valor es fundamental para verificar la compatibilidad entre la presión ejercida por la estructura y la capacidad de carga admisible del suelo [11].

3.1.1. Esfuerzos en suelo blando

En el caso del suelo blando, caracterizado por una baja rigidez ($E_s = 32,98 \text{ kgf/cm}^2$), donde se modelo

el edificio de 5 pisos y un espesor de losa de 50cm, el modelo desacoplado con ks calculado sectorizado es el que más se ajustó al modelo tridimensional midas que se observa en la Figura 13.

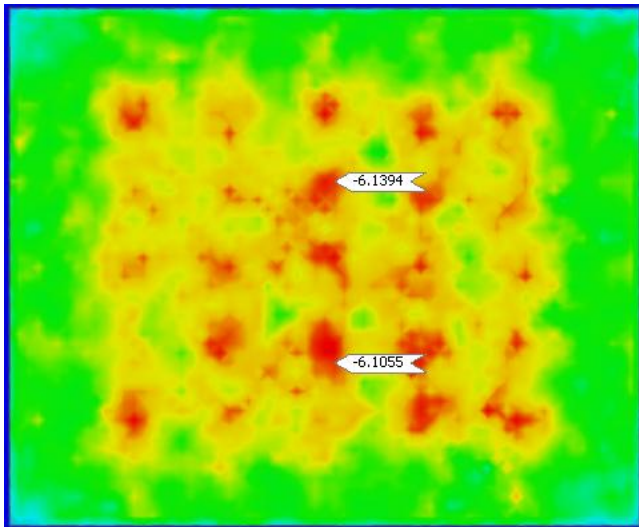


Figura 13. Esfuerzos en el suelo modelo 5P MIDAS.

3.1.2. Esfuerzos en suelo semi blando

En el caso del suelo semiblando, caracterizado por una rigidez intermedia ($E_s = 70,48 \text{ kgf/cm}^2$), donde se modeló el edificio de 12 pisos y un espesor de losa de 70cm, los resultados obtenidos también evidencian diferencias en la magnitud y distribución de los esfuerzos de contacto vertical entre los modelos estructurales considerados, el modelo MIDAS GTS NX se visualiza en la Figura 15.

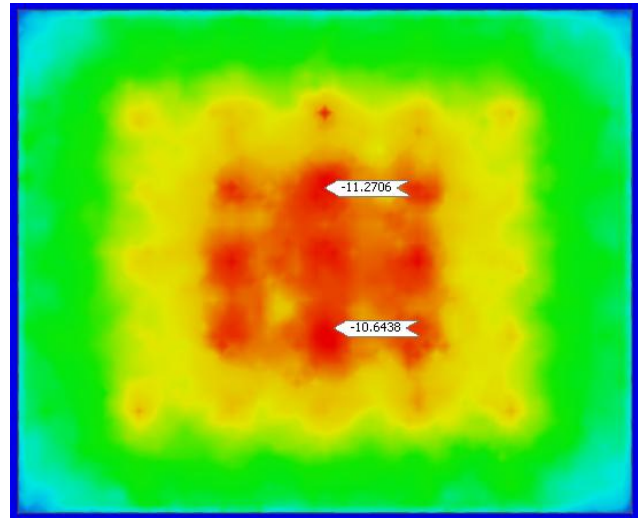


Figura 15. Esfuerzos en el suelo modelo 12P MIDAS

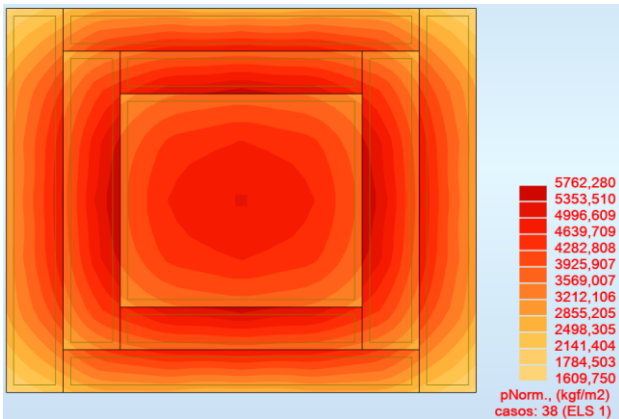


Figura 14. Esfuerzos en el suelo modelo 5P desacoplado ks calculado Winkler sectorizado.

En el modelo que se observa en la Figura 14 es el modelo desacoplado tipo Winkler, utilizando un coeficiente de balasto calculado manualmente y sectorizado conforme a la ACI 336.2R-88 [9], se obtuvo un esfuerzo máximo transmitido al suelo de $5,76 \text{ tonf/m}^2$. En comparación, el modelo acoplado desarrollado en MIDAS GTS NX presentó un esfuerzo máximo de $6,14 \text{ tonf/m}^2$, lo que representa una diferencia de $0,38 \text{ tonf/m}^2$ entre ambos modelos.

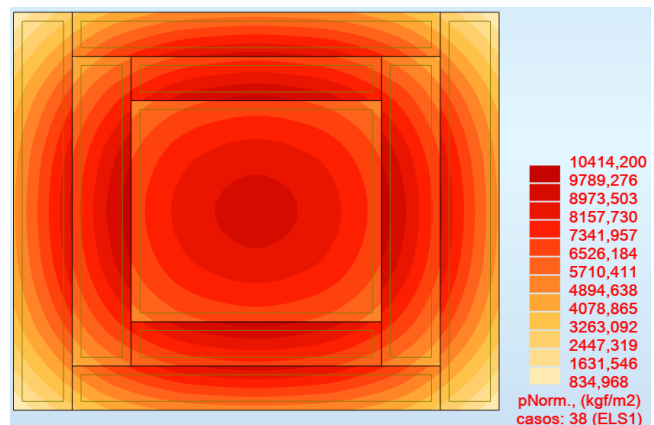


Figura 16. Esfuerzos en el suelo modelo 12P desacoplado ks calculado Winkler sectorizado.

En el modelo que se observa en la Figura 16 es el modelo desacoplado tipo Winkler, utilizando un coeficiente de balasto calculado manualmente y sectorizado, se obtuvo un esfuerzo máximo de $10,41 \text{ tonf/m}^2$ sobre suelo semiblando. En el modelo acoplado tridimensional en MIDAS, el esfuerzo

máximo fue de 11,27 tonf/m², registrándose una diferencia de 0,86 tonf/m².

3.1.3. Esfuerzos en suelo rígido.

En el caso del suelo rígido, caracterizado por una alta rigidez ($E_s = 424,32 \text{ kgf/cm}^2$), donde se modeló el edificio de 25 pisos y un espesor de losa de 85cm, los resultados obtenidos también evidencian diferencias en la magnitud y distribución de los esfuerzos de contacto vertical entre los modelos estructurales considerados, el modelo MIDAS GTS NX se visualiza en la Figura 17.

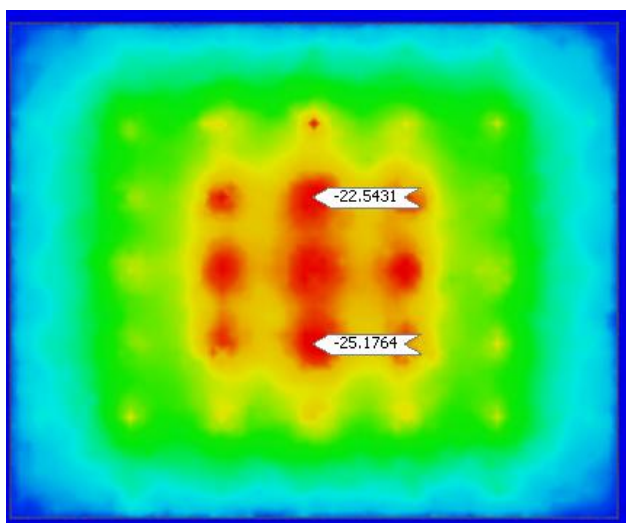


Figura 17. Esfuerzos en el suelo modelo 25P MIDAS

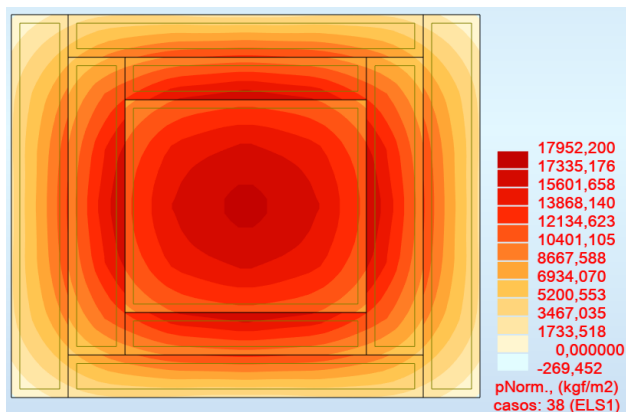


Figura 18. Esfuerzos en el suelo modelo 25P desacoplado ks calculado Winkler sectorizado.

En el modelo que se observa en la Figura 18 es el modelo desacoplado tipo Winkler, utilizando un coeficiente de balasto calculado manualmente y

sectorizado conforme a la ACI 336.2R-88 [9], se obtuvo un esfuerzo máximo de 17,95 tonf/m² sobre suelo rígido. En el modelo acoplado tridimensional en MIDAS, el esfuerzo máximo fue de 25,18 tonf/m², lo que representa una diferencia de 7,23 tonf/m².

Tabla 7. Esfuerzos en el suelo.

Modelo	Suelo blando	Suelo semiblando	Suelo rígido	Unidad
MIDAS GTS NX	6113.56	11270.63	25176.41	kgf/m ²
Desacoplado ks calculado sectorizado	5762.28	10414.2	17952.20	kgf/m ²
Desacoplado ks calculado uniforme	4961.09	9940.95	18345.00	kgf/m ²
Desacoplado ks MIDAS sectorizado	5796.07	11010.1	19391.70	kgf/m ²
Desacoplado ks MIDAS uniforme	5029.61	10452.8	19011.40	kgf/m ²
Acoplado ks calculado sectorizado	5465.08	9285.44	16697.10	kgf/m ²
Acoplado ks calculado uniforme	4774.59	8960.6	17045.40	kgf/m ²
Acoplado ks MIDAS sectorizado	5566.95	10315.2	18221.00	kgf/m ²
Acoplado ks MIDAS uniforme	4803.03	9946.79	18489.00	kgf/m ²

Como se observa en la Tabla 7, en ninguno de los casos evaluados los modelos superan la capacidad de carga admisible del suelo, lo que garantiza la viabilidad geotécnica de los diseños en cuanto a seguridad por falla del terreno.

En la sección anexos, en las figuras 43 a 63 se encuentra los esfuerzos en el suelo de todos los modelos.

En cuanto a la coherencia de los modelos simplificados respecto al modelo tridimensional acoplado en MIDAS GTS NX, se observa lo siguiente:

En suelos blandos, dentro de los modelos con ks calculado manualmente, el que más se aproxima

al modelo tridimensional es el modelo desacoplado con ks sectorizado, con una similitud del 94 %. En cuanto a los modelos con ks obtenido desde MIDAS, el más preciso es también el modelo desacoplado sectorizado, con una similitud del 94 %.

En suelos semiblandos, los resultados siguen una tendencia similar. El modelo desacoplado con ks calculado manualmente y sectorizado presenta una similitud del 92 %, mientras que el modelo desacoplado con ks obtenido desde MIDAS y sectorizado alcanza una precisión del 98 % con respecto al modelo acoplado tridimensional.

En suelos rígidos, las diferencias entre modelos se acentúan notablemente, reflejando la sensibilidad de estructuras de gran altura ante concentraciones de carga. El modelo desacoplado con ks uniforme calculado manualmente es el que más se aproxima, con un 73 % de similitud, mientras que en el modelo desacoplado con ks obtenido desde MIDAS y sectorizado, que alcanza un 77 %.

Estos resultados evidencian que los modelos desacoplados sectorizados, tanto con ks manual como derivado de MIDAS, proporcionan las estimaciones más cercanas al comportamiento real representado por el modelo acoplado, especialmente en suelos blandos y semiblandos.

3.2. Asentamientos del suelo

Además de los esfuerzos de contacto, otro parámetro fundamental en la evaluación de la interacción suelo - estructura es la deformación vertical del terreno o asentamiento, que resulta de la carga transmitida por la losa de cimentación, este valor está directamente relacionado con la rigidez del suelo y con el grado de precisión con que se modela la interacción entre la estructura y su base de apoyo.

3.2.1. Asentamientos en suelo blando

Uno de los parámetros más relevantes en el análisis fue la deformación vertical del suelo, entendida como el asentamiento que experimenta el terreno debido a las cargas transmitidas por la losa de cimentación, el modelo MIDAS GTS NX se visualiza en la Figura 19.

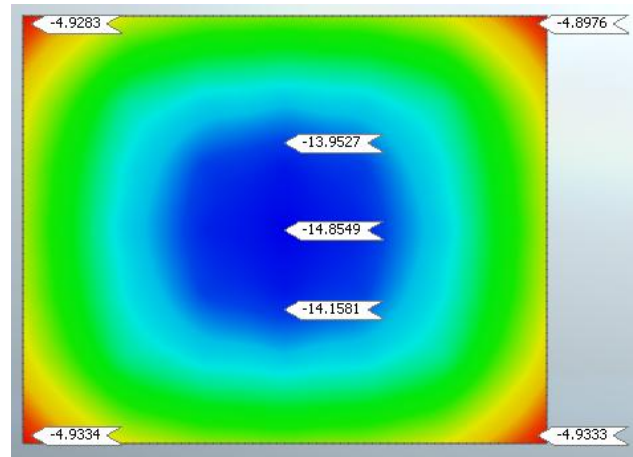


Figura 19. Deformaciones en el suelo modelo 5P MIDAS.

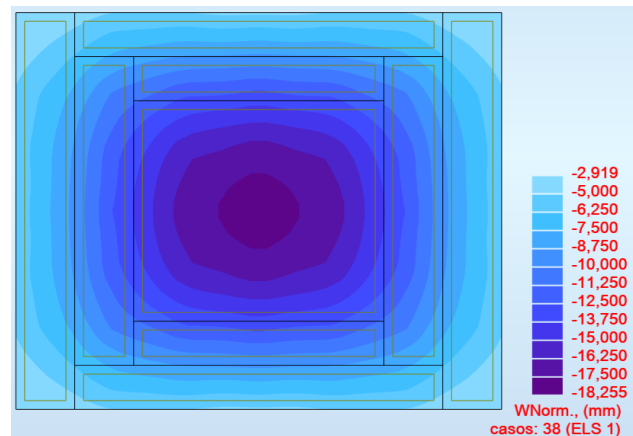


Figura 20. Deformaciones en el suelo modelo 5P desacoplado ks calculado Winkler sectorizado.

En el modelo acoplado tridimensional en MIDAS, el asentamiento máximo registrado fue de 14,85mm y el mínimo de 4,93mm. En contraste, el modelo que se observa en la Figura 20 que es el modelo desacoplado tipo Winkler, con ks calculado manualmente y sectorizado, arrojó un asentamiento máximo de 18,26mm y mínimo de 2,92mm.

3.2.2. Asentamientos en suelo semi blando

Este tipo de suelo, con una rigidez intermedia, presenta un comportamiento sensible a la distribución de carga y a la forma en que se modela la interacción suelo estructura, el modelo MIDAS GTS NX se visualiza en la Figura 21.

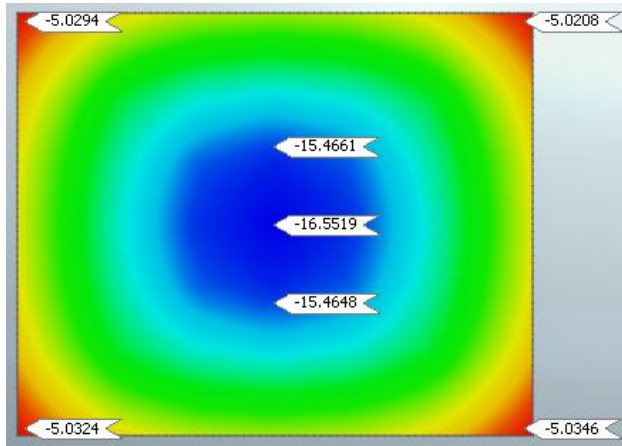


Figura 21. Deformaciones en el suelo modelo 12P MIDAS.

altura. El análisis de estos asentamientos permite identificar variaciones locales de rigidez.

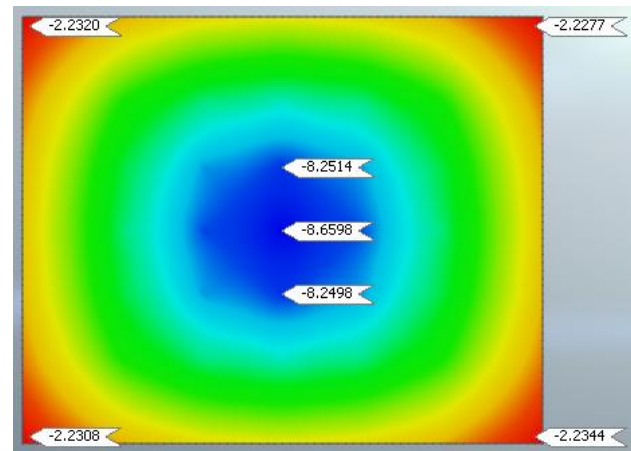


Figura 23. Deformaciones en el suelo modelo 25P MIDAS.

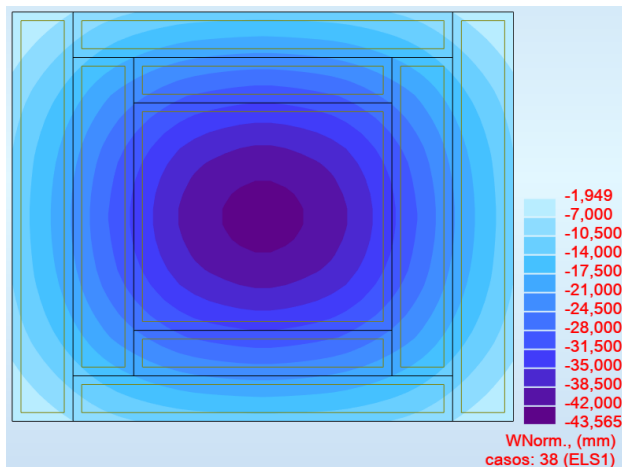


Figura 22. Deformaciones en el suelo modelo 12P desacoplado ks calculado Winkler sectorizado.

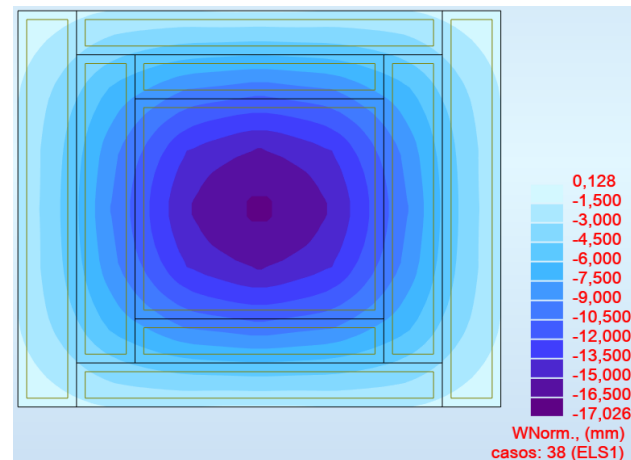


Figura 24. Deformaciones en el suelo modelo 25P desacoplado ks calculado Winkler sectorizado.

En el modelo que se observa en la Figura 22 que es el modelo desacoplado tipo Winkler, con un coeficiente de balasto calculado manualmente y sectorizado, se obtuvo un asentamiento máximo de 43,57mm y un mínimo de 1,95mm sobre suelo semiblando. En comparación con el modelo acoplado tridimensional en MIDAS que registró un asentamiento de 16,55mm y un mínimo de 5,02mm.

3.2.3. Asentamientos en suelo rígido

También para el caso del suelo rígido se analizó la deformación vertical del terreno, entendida como el asentamiento resultante de las cargas transmitidas por la losa de cimentación. A pesar de la alta rigidez del suelo, este parámetro sigue siendo fundamental para evaluar la compatibilidad entre la estructura y su base, especialmente en edificaciones de gran

En el modelo desacoplado tipo Winkler, utilizando un coeficiente de balasto calculado manualmente y sectorizado, se obtuvo un asentamiento máximo de 17,03mm y un mínimo de 0,13mm sobre suelo rígido. En comparación, el modelo acoplado tridimensional en MIDAS registró un asentamiento máximo de 8,66mm y un mínimo de 2,23mm.

Como se observa en la Tabla 8, los distintos esquemas de modelación presentan variaciones significativas en la estimación de los asentamientos verticales en función del tipo de suelo y del método utilizado para determinar el coeficiente de balasto.

Tabla 8. Deformaciones verticales máximas.

Modelo	Suelo blando	Suelo semiblando	Suelo rígido	Unidad
MIDAS GTS NX	14.85	16.55	8.66	mm
Desacoplado ks calculado sectorizado	18.26	43.57	17.03	mm
Desacoplado ks calculado uniforme	18.17	45.95	17.23	mm
Desacoplado ks MIDAS sectorizado	13.11	16.62	8.39	mm
Desacoplado ks MIDAS uniforme	12.91	16.67	8.31	mm
Acoplado ks calculado sectorizado	16.04	37.37	15.5	mm
Acoplado ks calculado uniforme	17.32	41.83	16.17	mm
Acoplado ks MIDAS sectorizado	11.77	15.13	7.89	mm
Acoplado ks MIDAS uniforme	12.45	15.70	7.92	mm

En la sección anexos, en las figuras 64 a 84 se encuentra los asentamientos del suelo para todos los modelos.

En el caso del suelo blando, dentro de los modelos con ks calculado manualmente, el modelo que presenta mayor similitud con el comportamiento del modelo tridimensional MIDAS es el modelo acoplado con ks sectorizado, con una relación del 108 % respecto al asentamiento máximo.

Para el suelo semiblando, los modelos con ks calculado manualmente muestran su mejor ajuste a través del modelo acoplado con ks sectorizado, alcanzando un valor del 226 % respecto al modelo tridimensional.

En el caso del suelo rígido, de los modelos con ks manual, el modelo acoplado con ks sectorizado presenta la mayor similitud con el modelo tridimensional, con un valor del 179 %.

3.3. Acero de refuerzo inferior en losas de cimentación

Como parte del proceso de diseño, se efectuó un análisis de resistencia a punzonamiento, cuyos resultados definieron los espesores mínimos requeridos de losa para garantizar la integridad estructural ante la transferencia de carga concentrada en los puntos de apoyo de columnas. En función del tipo de suelo y la altura de la edificación, se determinaron los siguientes espesores:

Tabla 9. Espesores de losas de cimentación.

Propiedad	Suelo blando	Suelo semiblando	Suelo rígido	Unidad
Espesor de losa de cimentación	50	70	85	cm

3.3.1. Acero de refuerzo en losa E = 50cm

El diseño del acero de refuerzo requerido en la losa de cimentación fue directamente influenciada por la rigidez del suelo y los esfuerzos inducidos por la interacción suelo - estructura. En el caso del suelo blando, la baja rigidez del terreno genera mayores deformaciones y concentraciones de esfuerzo, lo que incrementa las demandas de refuerzo. Esta variable es clave para garantizar la resistencia de la losa ante flexión, cortante y punzonamiento, y permite identificar zonas críticas donde se requiere mayor densidad de acero para preservar la estabilidad estructural frente a cargas verticales y asentamientos diferenciales.

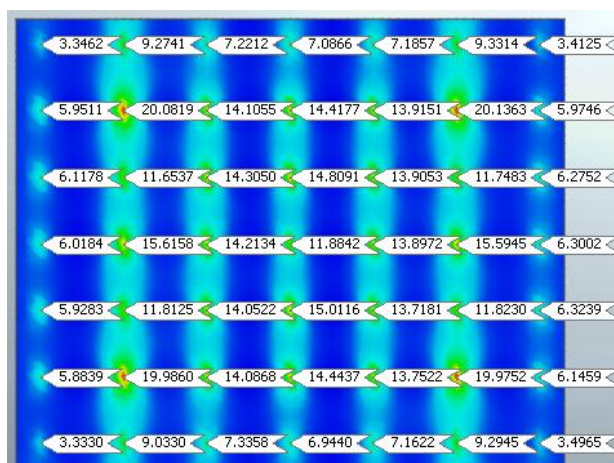


Figura 25. As XX en puntos críticos cm2/m modelo 5P MIDAS.

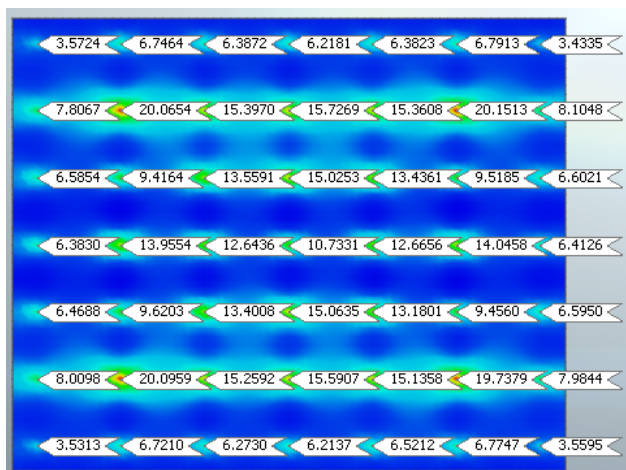


Figura 26. As YY en puntos críticos cm2/m modelo 5P MIDAS.

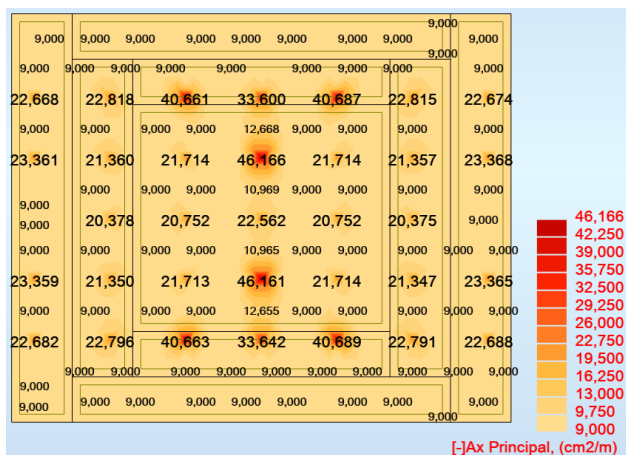


Figura 27. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 5P ks calculado Winkler sectorizado.

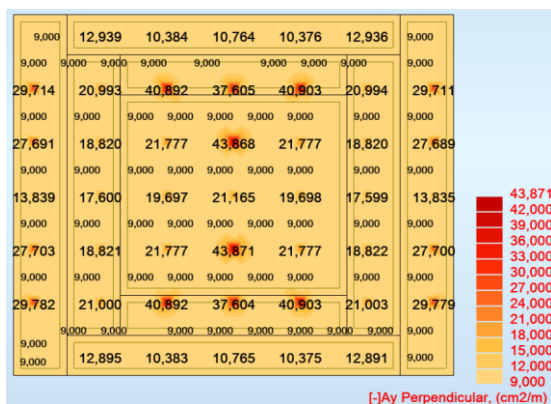


Figura 28. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 5P ks calculado Winkler sectorizado.

Como se observa en las figuras 25, 26, 27 y 28, el acero de refuerzo requerido en el modelo

desacoplado con ks calculado manualmente y aplicado de forma sectorizada es superior al área de acero (As) demandada por el modelo tridimensional MIDAS. Esta diferencia refleja el efecto de la simplificación del modelo en la estimación de los esfuerzos, que tiende a sobreestimar las solicitaciones internas en comparación con una modelación acoplada más realista de la interacción suelo - estructura.

3.3.2. Acero de refuerzo en losa E = 70cm

En el caso del suelo semiblando, la rigidez intermedia del terreno genera deformaciones moderadas y zonas localizadas de concentración de esfuerzos, lo que incrementa las demandas de refuerzo en sectores específicos.

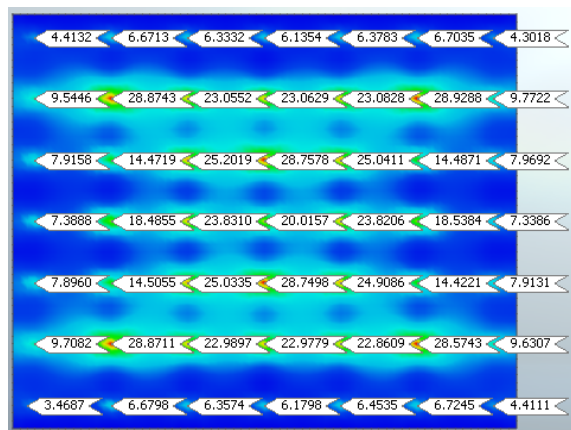


Figura 29. As XX en puntos críticos cm2/m modelo 12P MIDAS.

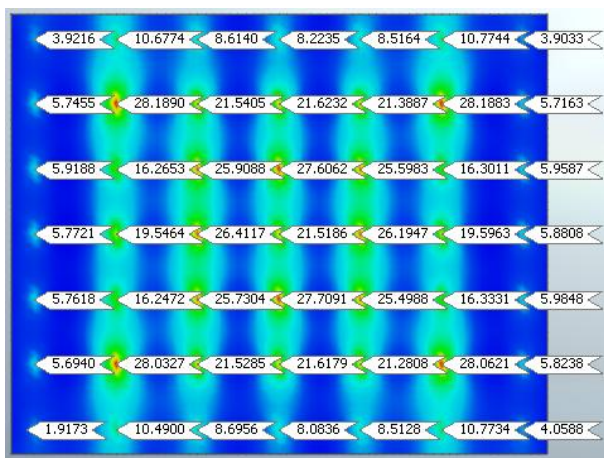


Figura 30. As XX en puntos críticos cm2/m modelo 12P MIDAS.

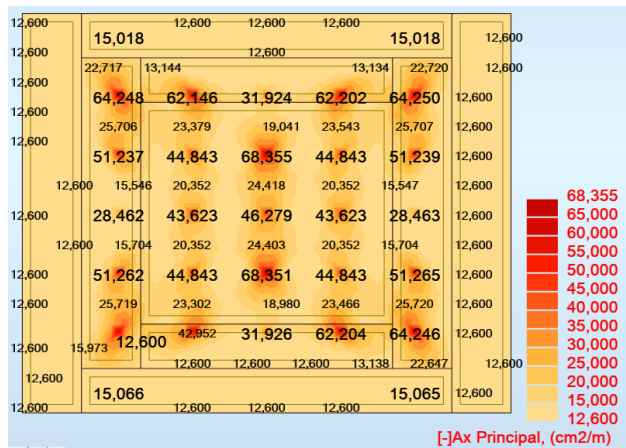


Figura 31. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 12P ks calculado Winkler sectorizado.

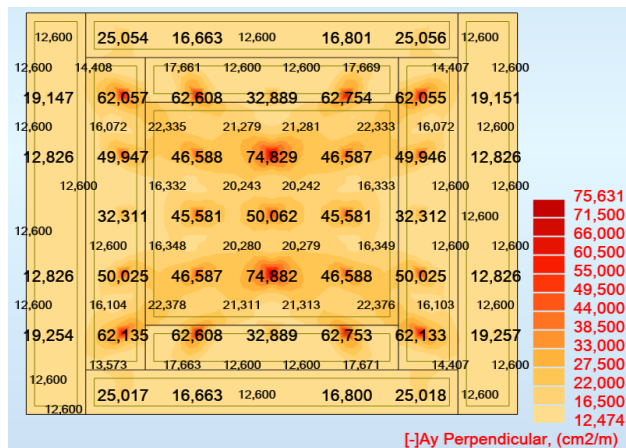


Figura 32. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 12P ks calculado Winkler sectorizado.

Como se observa en las figuras 29, 30, 31 y 32, el acero de refuerzo requerido en el modelo desacoplado con ks calculado manualmente y aplicado de forma sectorizada resulta superior al área de acero (As) requerida por el modelo tridimensional MIDAS. Esta diferencia confirma que, en suelos de rigidez intermedia, las simplificaciones introducidas en modelos desacoplados tienden a sobrestimar las solicitaciones internas, lo cual repercute directamente en una mayor demanda de refuerzo estructural.

3.3.3. Acero de refuerzo losa E = 85cm

En el caso del suelo rígido, la elevada rigidez del terreno limita significativamente las deformaciones, lo que reduce las concentraciones de esfuerzo en la

losa. Sin embargo, en edificaciones de gran altura, como la de 25 pisos, las altas cargas verticales y sísmicas generan demandas estructurales importantes [14]. Esta condición requiere una distribución eficiente del acero de refuerzo, especialmente en zonas críticas, para garantizar la estabilidad de la cimentación frente a esfuerzos combinados y asentamientos diferenciales mínimos.

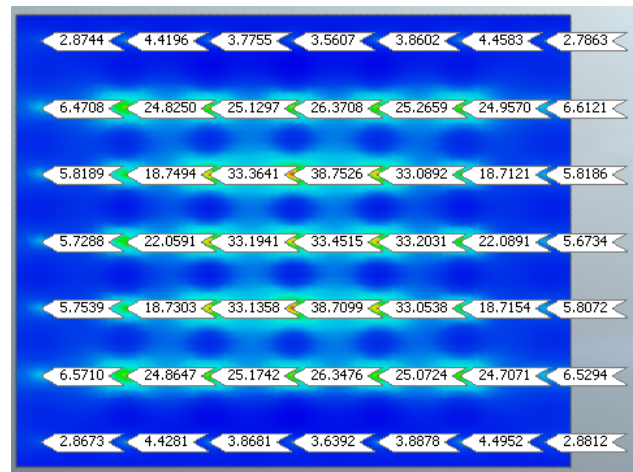


Figura 33. As XX en puntos críticos cm2/m modelo 25P MIDAS.

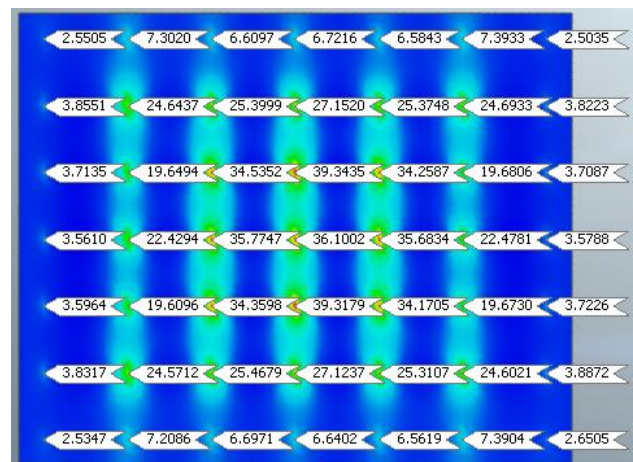


Figura 34. As YY en puntos críticos cm2/m modelo 25P MIDAS.



Figura 35. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 25P ks calculado Winkler sectorizado.

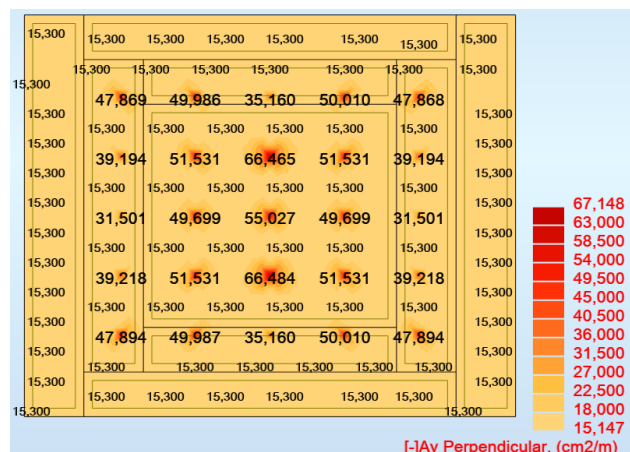


Figura 36. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 25P ks calculado Winkler sectorizado.

Como se observa en las figuras 33, 34, 35 y 36, el acero de refuerzo requerido en el modelo desacoplado con ks calculado manualmente y aplicado de forma sectorizada resulta superior al área de acero (As) determinada por el modelo tridimensional MIDAS. Esta diferencia confirma que, en estructuras de gran altura sobre suelos rígidos, la falta de acoplamiento suelo - estructura en modelos simplificados puede conducir a una sobreestimación de las solicitaciones internas, incrementando la cuantía de refuerzo requerida en zonas críticas de la losa de cimentación.

Para el análisis comparativo, se recopilieron los valores de acero de refuerzo en los puntos críticos de cada modelo, y posteriormente se calculó un promedio representativo de la demanda de refuerzo.

Estos resultados se presentan de manera consolidada en la Tabla 10

Tabla 10. Promedio As en puntos críticos.

Modelo	Suelo blando	Suelo semiblando	Suelo rígido	Unidad
MIDAS GTS NX (XX)	11.76	17.88	21.41	cm2/m
MIDAS GTS NX (YY)	11.96	17.97	21.81	cm2/m
Desacoplado ks calculado sectorizado(XX)	20.79	32.52	31.24	cm2/m
Desacoplado ks calculado sectorizado(YY)	21.98	34.69	31.48	cm2/m
Desacoplado ks calculado uniforme (XX)	20.79	29.47	30.61	cm2/m
Desacoplado ks calculado uniforme (YY)	21.52	31.02	30.23	cm2/m
Desacoplado ks MIDAS sectorizado(XX)	20.06	27.62	28.57	cm2/m
Desacoplado ks MIDAS sectorizado(YY)	21.02	27.61	28.41	cm2/m
Desacoplado ks MIDAS uniforme (XX)	20.21	26.69	28.54	cm2/m
Desacoplado ks MIDAS uniforme (YY)	20.82	26.42	27.45	cm2/m
Acoplado ks calculado sectorizado(XX)	15.14	24.22	28.24	cm2/m
Acoplado ks calculado sectorizado(YY)	16.11	25.84	28.74	cm2/m
Acoplado ks calculado uniforme (XX)	14.58	22.45	27.57	cm2/m
Acoplado ks calculado uniforme (YY)	15.37	22.95	27.64	cm2/m
Acoplado ks MIDAS sectorizado(XX)	14.75	21.72	26.22	cm2/m
Acoplado ks MIDAS sectorizado(YY)	15.50	21.36	26.35	cm2/m
Acoplado ks MIDAS uniforme (XX)	14.37	20.99	26.04	cm2/m
Acoplado ks MIDAS uniforme (YY)	14.95	21.04	25.83	cm2/m

Los distintos esquemas de modelación presentan variaciones en la cuantía de acero de refuerzo, en función del tipo de suelo y del método utilizado para determinar el coeficiente de balasto (ks).

En la sección anexos, en las figuras 85 a 126 se encuentra las áreas de acero solicitadas para todos los modelos.

En el caso del suelo blando, dentro de los modelos con ks calculado manualmente, el que presenta mayor similitud con el comportamiento del modelo tridimensional MIDAS es el modelo acoplado con ks uniforme, con una relación del 124 % para As(XX) y 129 % para As(YY).

Para el suelo semiblando, el modelo acoplado con ks uniforme también es el que más se aproxima al modelo tridimensional, con una relación del 126 % para As(XX) y 128 % para As(YY).

En el caso del suelo rígido, el mismo modelo acoplado con ks uniforme muestra una relación del 129 % para As(XX) y 127 % para As(YY) respecto al modelo MIDAS, confirmando su consistencia como la alternativa más cercana dentro de los enfoques con ks calculado manualmente.

Asimismo, para los modelos con ks obtenido desde MIDAS, los resultados indican que los esquemas con coeficiente de balasto uniforme son los que presentan mejor aproximación al comportamiento observado en los modelos tridimensionales MIDAS.

Es importante mencionar que para los suelos blandos y semi blandos en los modelos desacoplados se requirió acero de refuerzo superior adicional al acero mínimo.

En las Figuras 37, 38, 39, 40, 41, 42 se observa los promedios de acero de refuerzo inferior para todos los casos de estudio.

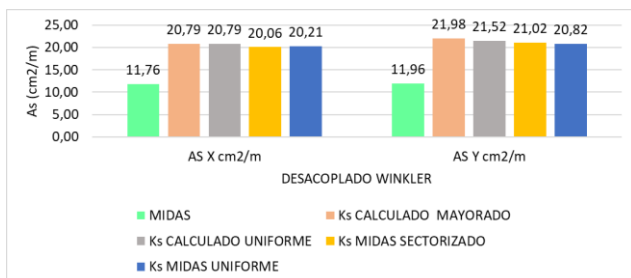


Figura 37. Promedio As en puntos críticos cm2/m modelos desacoplados suelo blando.

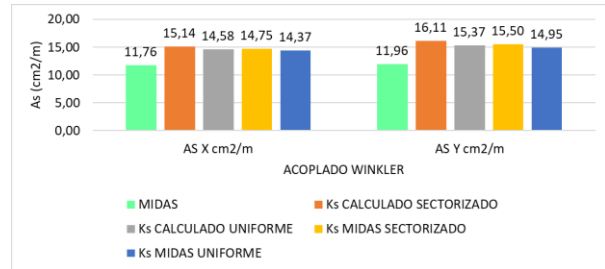


Figura 38. Promedio As en puntos críticos cm2/m modelos acoplados suelo blando.



Figura 39. Promedio As en puntos críticos cm2/m modelos desacoplados suelo semi blando.

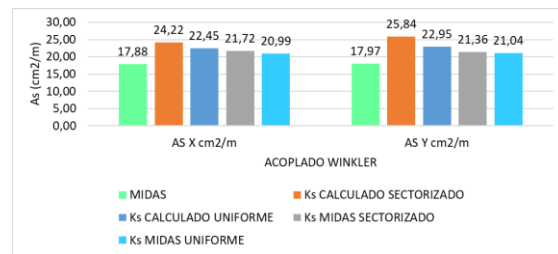


Figura 40. Promedio As en puntos críticos cm2/m modelos acoplados suelo semi blando.

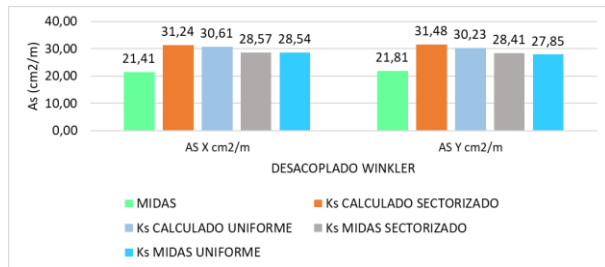


Figura 41. Promedio As en puntos críticos cm2/m modelos desacoplados suelo rígido.

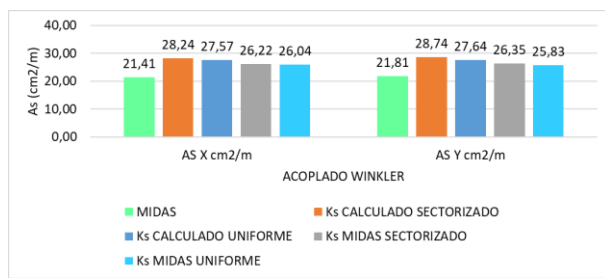


Figura 42. Promedio As en puntos críticos cm2/m modelos acoplados suelo rígido.

4. Conclusiones

Los modelos tridimensionales acoplados desarrollados en MIDAS GTS NX registraron los mayores esfuerzos transmitidos al suelo, evidenciando una representación más precisa de la interacción suelo-estructura. En comparación, los modelos desacoplados con ks sectorizado fueron los que mejor se aproximaron a los resultados de MIDAS en suelos blandos y semiblandos, con una similitud del 94 % y 92 % respectivamente cuando el ks fue calculado manualmente, y del 94 % y 98 % cuando el ks fue obtenido desde MIDAS.

En suelos rígidos, las diferencias se intensifican: el modelo desacoplado con ks manual uniforme alcanzó una similitud del 73 %, mientras que el modelo sectorizado con ks de MIDAS llegó al 77 %.

En cuanto a deformaciones verticales, el modelo tridimensional mostró asentamientos totales inferiores a todos los modelos con ks calculado manualmente, tanto en su forma uniforme como sectorizada, revelando una tendencia a la sobreestimación en enfoques simplificados. Por el contrario, los modelos con ks obtenido desde MIDAS presentaron deformaciones similares o menores a las del modelo tridimensional, confirmando que una estimación adecuada del balasto contribuye a mejorar la precisión de la modelación.

Los modelos acoplados con ks sectorizado fueron los que más se aproximaron a los asentamientos totales del modelo tridimensional, especialmente en suelos de baja rigidez. En términos cuantitativos, la relación de asentamientos máximos fue de 108 % para suelos blandos, 226 % para suelos semiblandos y 179 % para suelos rígidos, lo que demuestra que incluso los modelos acoplados simplificados pueden presentar desviaciones significativas si no se calibran correctamente.

Se concluye que el modelo tridimensional acoplado desarrollado en MIDAS GTS NX ofrece el diseño más eficiente del acero de refuerzo, al reflejar con mayor precisión la distribución real de esfuerzos en las losas de cimentación, considerando de forma integral la interacción suelo - estructura. No obstante, es importante señalar que en este

estudio no se contempló la degradación del módulo de corte del suelo.

En el caso del suelo blando, dentro de los modelos con ks calculado manualmente, el modelo acoplado con ks uniforme presentó la mayor similitud con el modelo tridimensional, con una relación de 124 % para As(XX) y 129 % para As(YY), lo que lo posiciona como la alternativa más aproximada dentro de los modelos simplificados.

Para el suelo semiblando, el modelo acoplado con ks uniforme también mostró el mejor ajuste con respecto al modelo MIDAS, con una similitud del 126 % para As(XX) y 128 % para As(YY), evidenciando un comportamiento consistente en su aproximación a la demanda real de refuerzo.

En suelos rígidos, el modelo acoplado con ks uniforme mantuvo una precisión destacable, con una relación del 129 % para As(XX) y 127 % para As(YY) respecto al modelo tridimensional, lo cual confirma su consistencia y confiabilidad como herramienta de diseño en terrenos con alta rigidez.

Del conjunto de modelos con ks obtenido desde MIDAS, aquellos con aplicación uniforme del balasto fueron los que más se aproximaron a las cuantías de refuerzo calculadas en el modelo tridimensional.

Se concluye que el valor del coeficiente de balasto ks no influye en el cálculo del acero de refuerzo pero si en los esfuerzos de la cimentación transmitidos al suelo.

Finalmente, con el objetivo de mantener un enfoque conservador y conforme a las recomendaciones del ACI 336.2R-88 [9], se recomienda adoptar modelos acoplados tipo Winkler con coeficiente de balasto calculado manualmente y sectorizado para el diseño de losas de cimentación. Esta metodología permite capturar de manera más precisa la variabilidad espacial de la rigidez del suelo, favoreciendo una estimación prudente de la demanda estructural y garantizando la seguridad del diseño.

Referencias

- [1] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), *Norma Ecuatoriana de la Construcción – Cargas (NEC-SE-CG)*, Quito, Ecuador, 2015.
- [2] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), *Norma Ecuatoriana de la Construcción – Diseño Sísmico (NEC-SE-DS)*, Quito, Ecuador, 2015.
- [3] B. M. Das, *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*, 7^a ed., Boston, MA: Cengage Learning, 2014.
- [4] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), *Norma Ecuatoriana de la Construcción – Diseño en Acero (NEC-SE-AC)*, Quito, Ecuador, 2015.
- [5] American Institute of Steel Construction (AISC), *Specification for Structural Steel Buildings*, AISC 360-16, Chicago, IL: AISC, 2016.
- [6] American Institute of Steel Construction (AISC), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, AISC 341-16, Chicago, IL: AISC, 2016.
- [7] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), *Norma Ecuatoriana de la Construcción – Hormigón Armado (NEC-SE-HM)*, Quito, Ecuador, 2015.
- [8] American Concrete Institute (ACI), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318S-19) and Commentary*, Farmington Hills, MI: ACI, 2019.
- [9] ACI Committee 336, *ACI 336.2R-88 – Suggested Analysis and Design Procedures for Combined Footings and Mats*, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1988.
- [10] MIDAS IT, *Manual Técnico del Usuario. Análisis geotécnico avanzado 2D/3D*, MIDAS GTS NX, versión consultada 2023.
- [11] G. D. Smith, *Soil-Structure Interaction and Foundation Reactions*, 2nd ed., New York, NY: McGraw-Hill, 2004.
- [12] C. F. Lee, "Engineering Behavior of Soft Soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 112, no. 5, pp. 457–471, 1986.
- [13] S. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [14] H. G. Poulos and E. H. Davis, *Pile Foundation Analysis and Design*, New York, NY: John Wiley & Sons, 1980.

ANEXOS

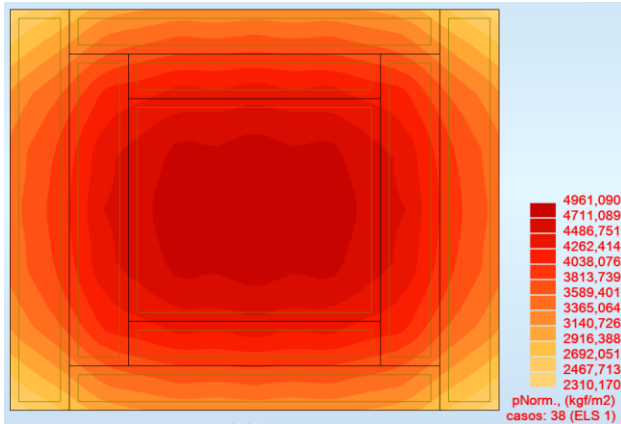


Figura 43. Esfuerzos en el suelo modelo 5P desacoplado ks calculado Winkler uniforme.

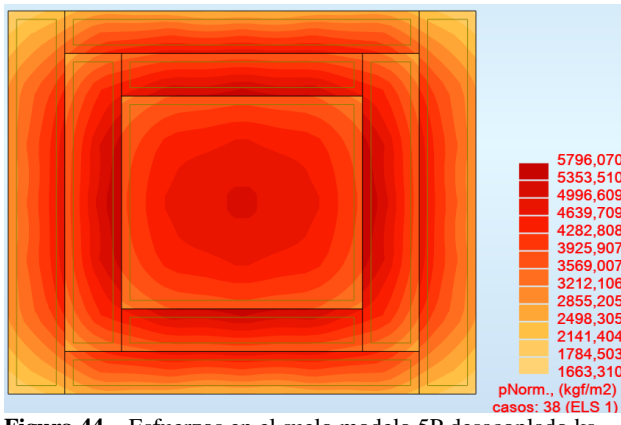


Figura 44. Esfuerzos en el suelo modelo 5P desacoplado ks MIDAS sectorizado.

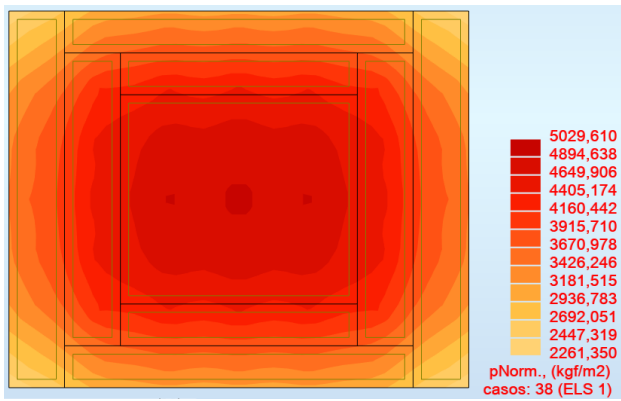


Figura 45. Esfuerzos en el suelo modelo 5P desacoplado ks MIDAS uniforme.

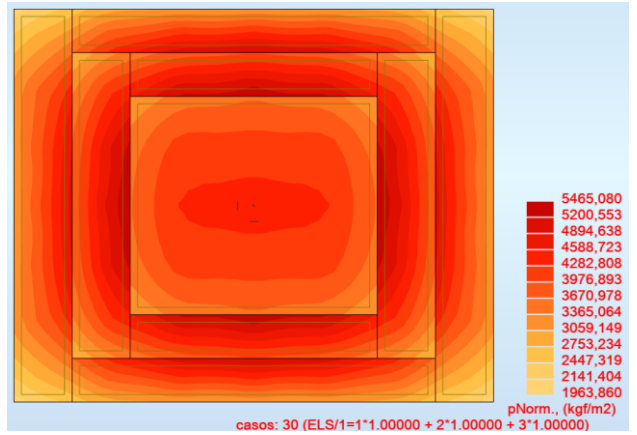


Figura 46. Esfuerzos en el suelo modelo 5P acoplado ks calculado Winkler sectorizado.

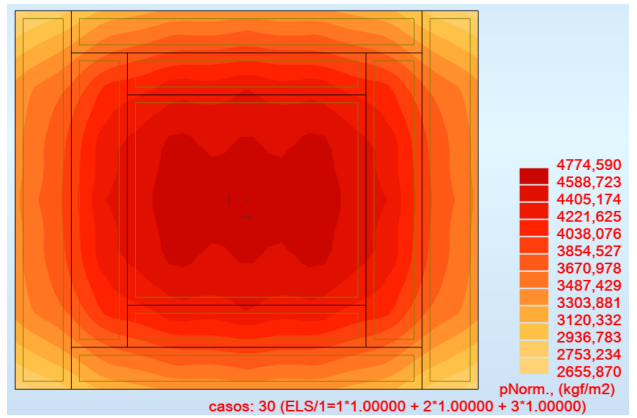


Figura 47. Esfuerzos en el suelo modelo 5P acoplado ks calculado Winkler uniforme.

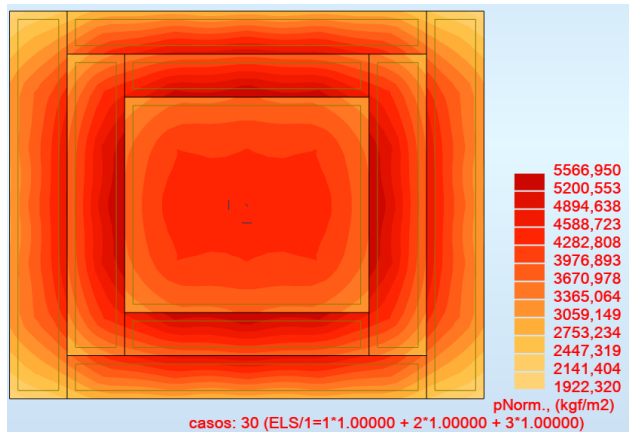


Figura 48. Esfuerzos en el suelo modelo 5P acoplado ks MIDAS uniforme.

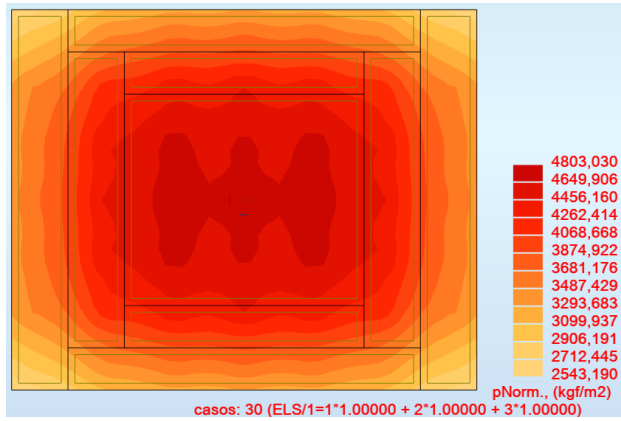


Figura 49. Esfuerzos en el suelo modelo 5P acoplado ks MIDAS uniforme.

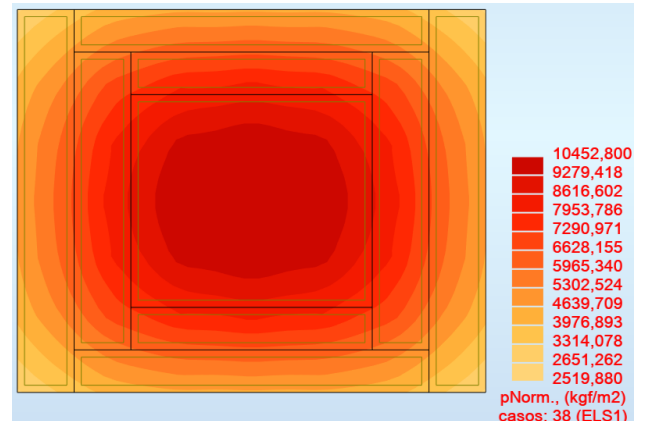


Figura 52. Esfuerzos en el suelo modelo 12P desacoplado ks MIDAS uniforme.

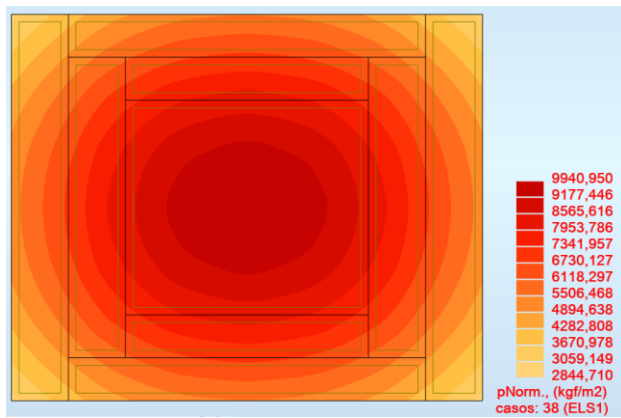


Figura 50. Esfuerzos en el suelo modelo 12P desacoplado ks calculado Winkler uniforme.

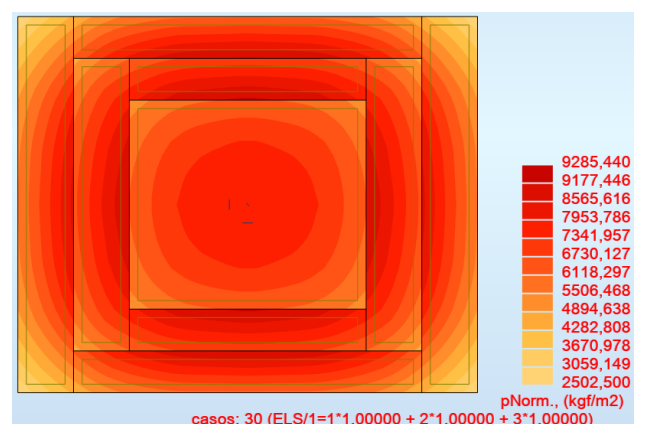


Figura 53. Esfuerzos en el suelo modelo 12P acoplado ks calculado Winkler sectorizado.

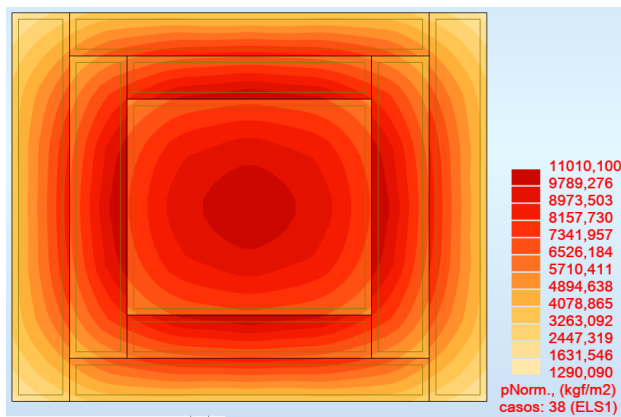


Figura 51. Esfuerzos en el suelo modelo 12P desacoplado ks MIDAS sectorizado.

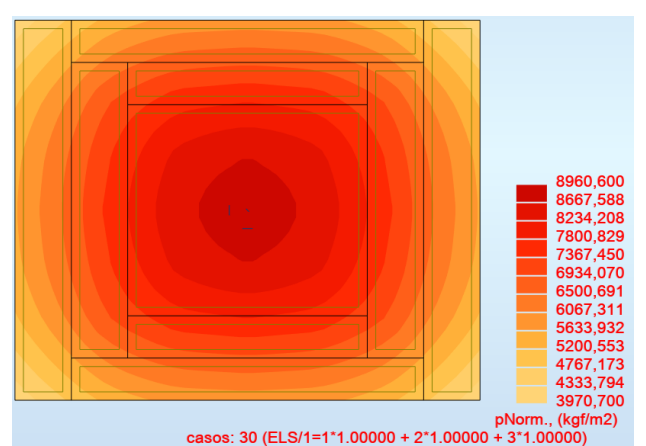


Figura 54. Esfuerzos en el suelo modelo 12P acoplado ks calculado Winkler uniforme.

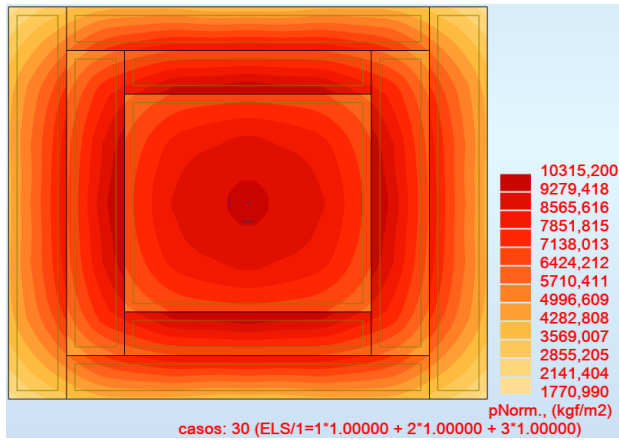


Figura 55. Esfuerzos en el suelo modelo 12P acoplado ks MIDAS sectorizado.

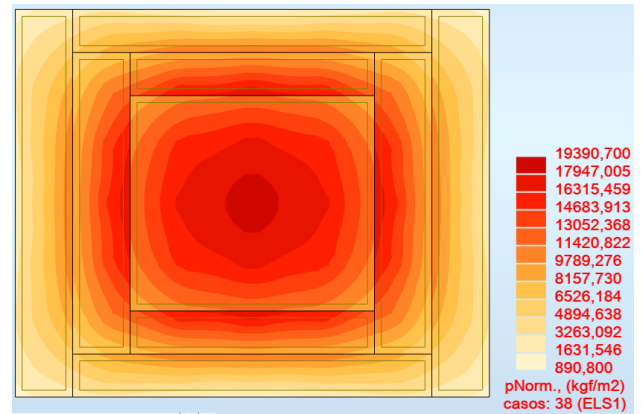


Figura 58. Esfuerzos en el suelo modelo 25P desacoplado ks MIDAS sectorizado.

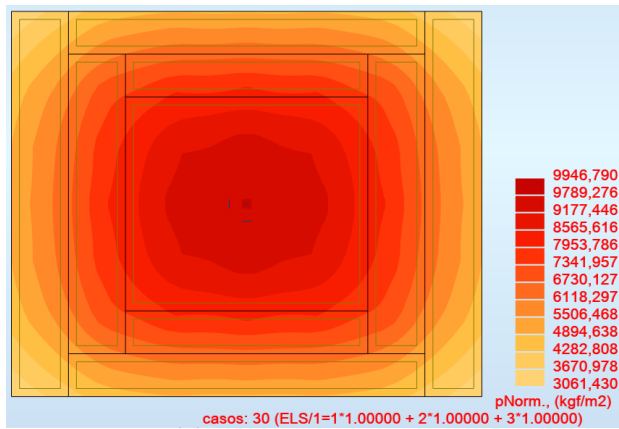


Figura 56. Esfuerzos en el suelo modelo 12P acoplado ks MIDAS uniforme.

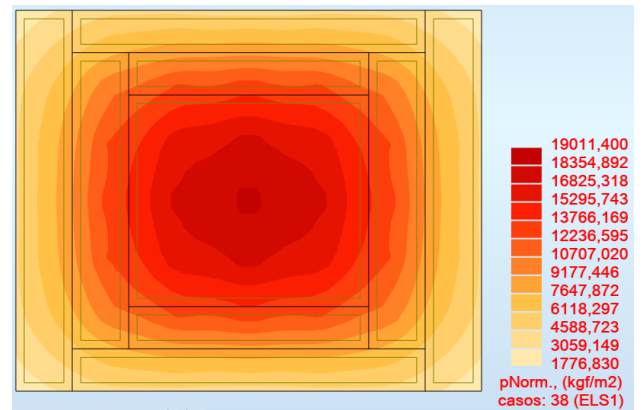


Figura 59. Esfuerzos en el suelo modelo 25P desacoplado ks MIDAS uniforme.

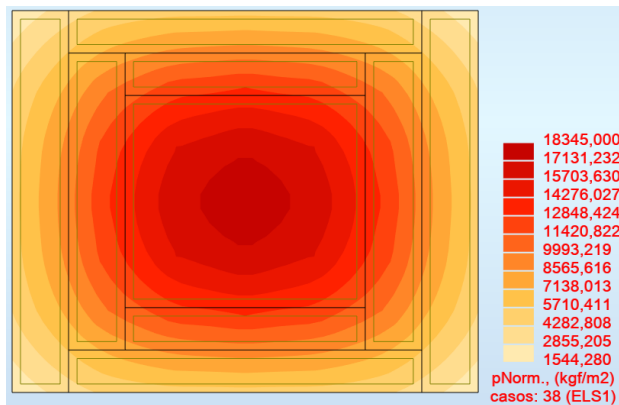


Figura 57. Esfuerzos en el suelo modelo 25P desacoplado ks calculado Winkler uniforme.

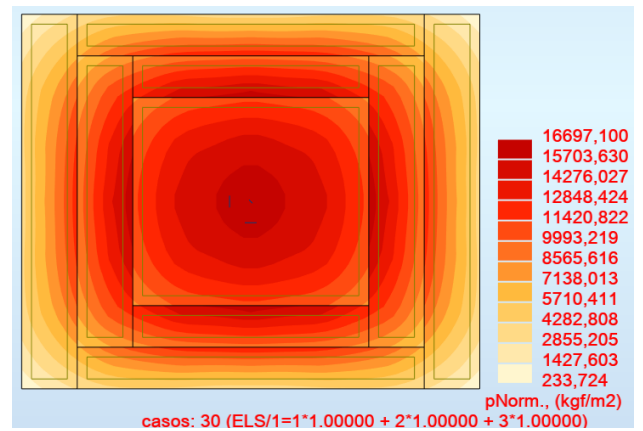


Figura 60. Esfuerzos en el suelo modelo 25P acoplado ks calculado Winkler sectorizado.

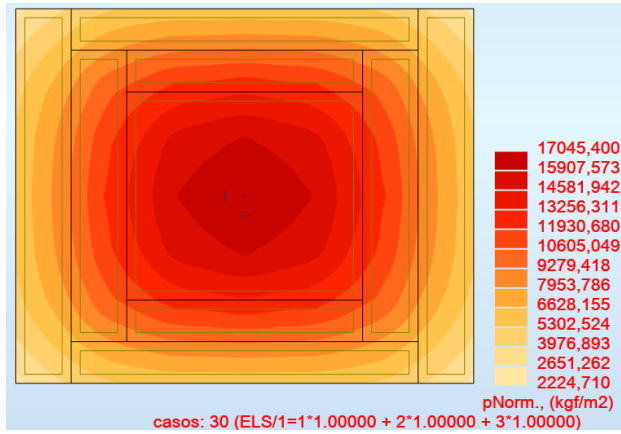


Figura 61. Esfuerzos en el suelo modelo 25P acoplado ks calculado Winkler uniforme.

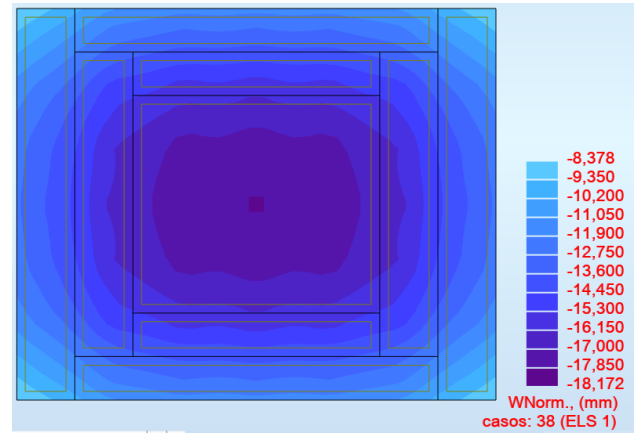


Figura 64. Deformaciones en el suelo modelo 5P desacoplado ks calculado Winkler uniforme.

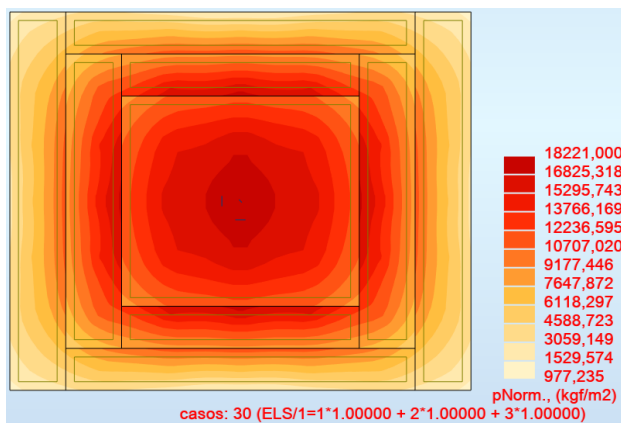


Figura 62. Esfuerzos en el suelo modelo 25P acoplado ks MIDAS sectorizado.

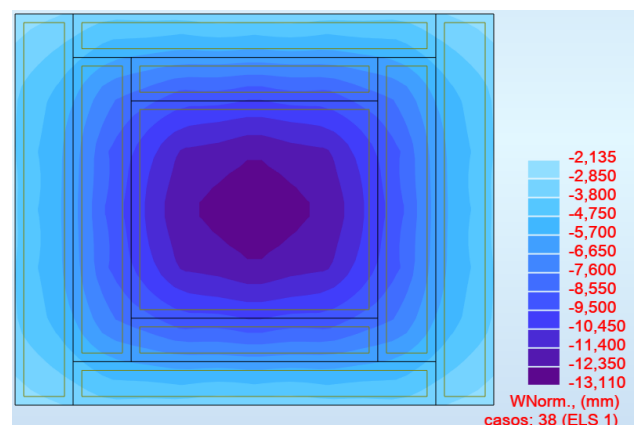


Figura 65. Deformaciones en el suelo modelo 5P desacoplado ks MIDAS sectorizado.

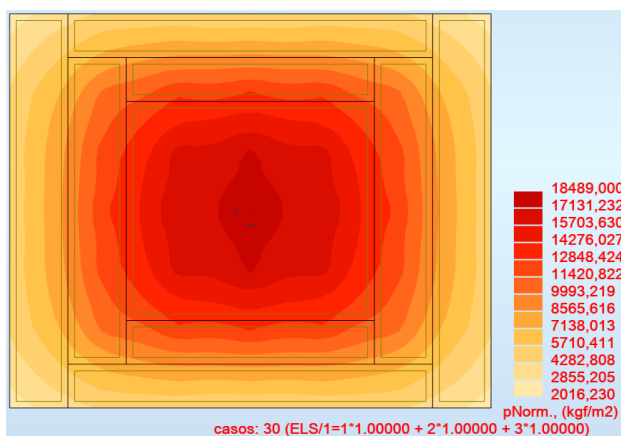


Figura 63. Esfuerzos en el suelo modelo 25P acoplado ks MIDAS uniforme.

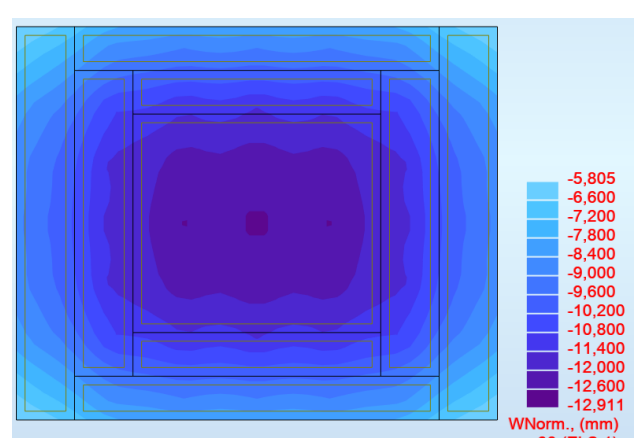


Figura 66. Deformaciones en el suelo modelo 5P desacoplado ks MIDAS uniforme.

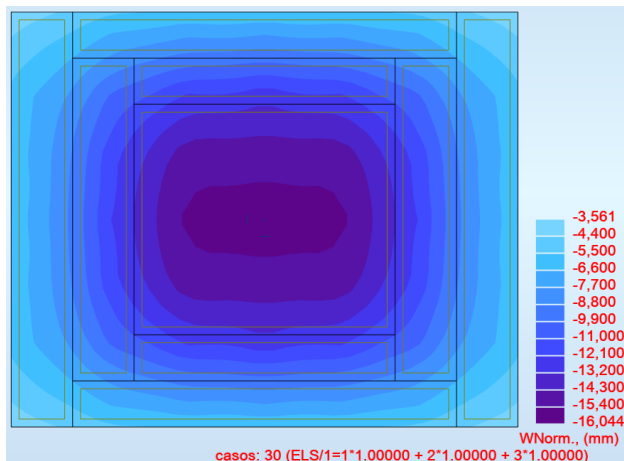


Figura 67. Deformaciones en el suelo modelo 5P acoplado ks calculado Winkler sectorizado.

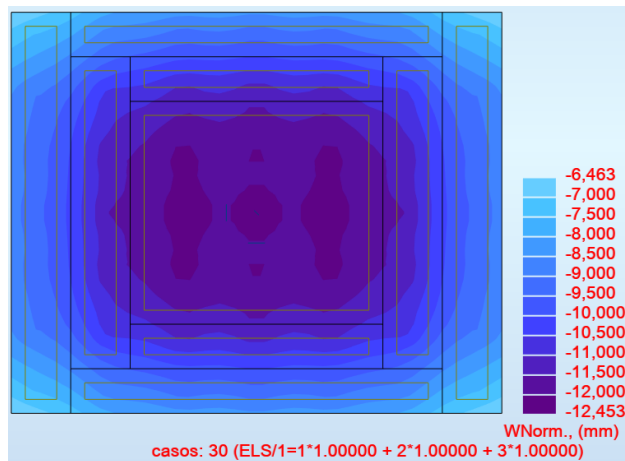


Figura 70. Deformaciones en el suelo modelo 5P acoplado ks MIDAS uniforme.

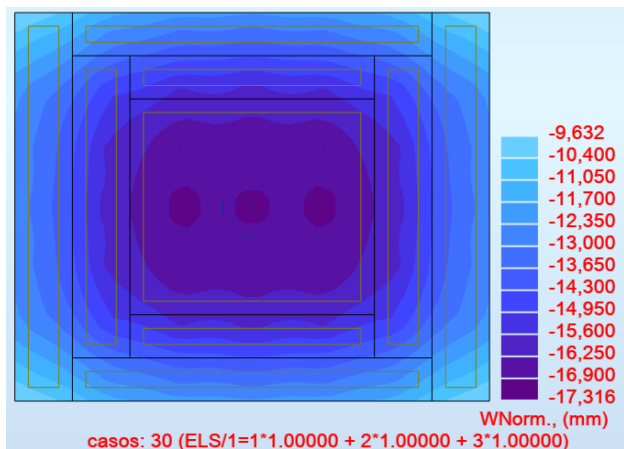


Figura 68. Deformaciones en el suelo modelo 5P acoplado ks calculado Winkler uniforme.

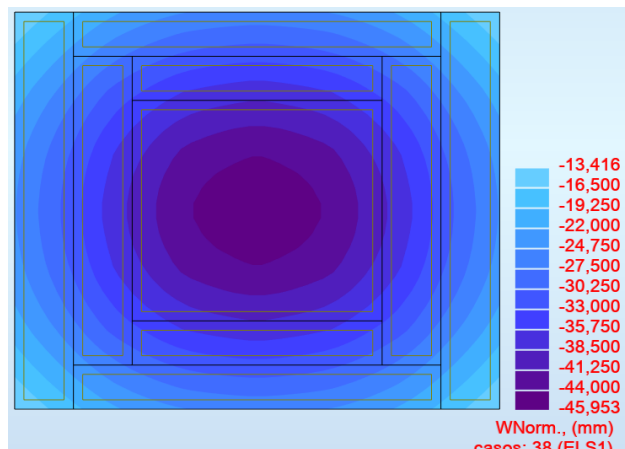


Figura 71. Deformaciones en el suelo modelo 12P desacoplado ks calculado Winkler uniforme.

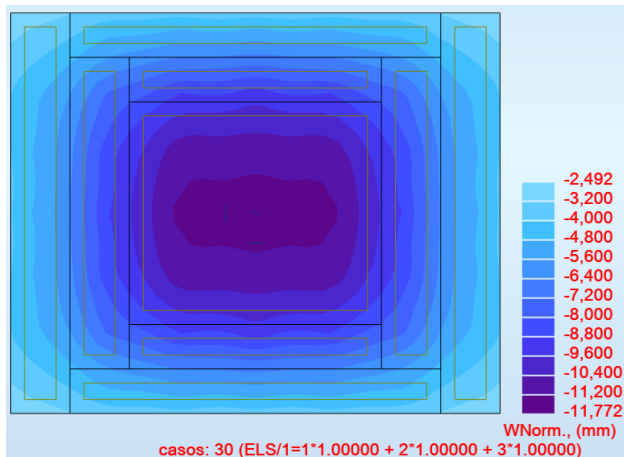


Figura 69. Deformaciones en el suelo modelo 5P acoplado ks MIDAS sectorizado.

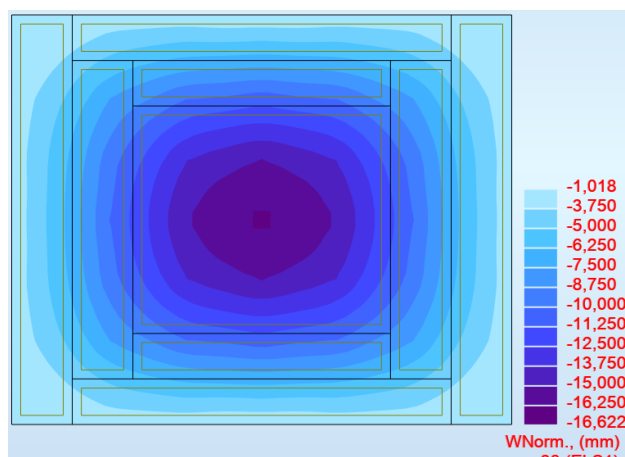


Figura 72. Deformaciones en el suelo modelo 12P desacoplado ks MIDAS sectorizado.

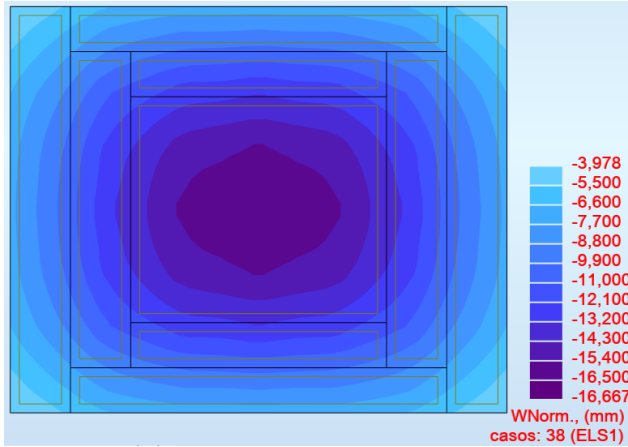


Figura 73. Deformaciones en el suelo modelo 12P desacoplado ks MIDAS uniforme.

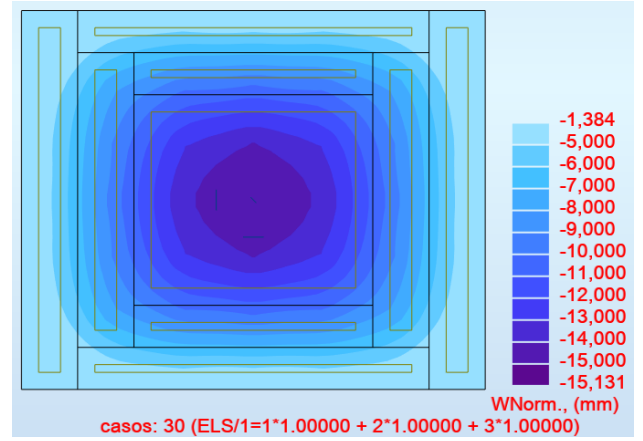


Figura 76. Deformaciones en el suelo modelo 12P acoplado ks MIDAS sectorizado.

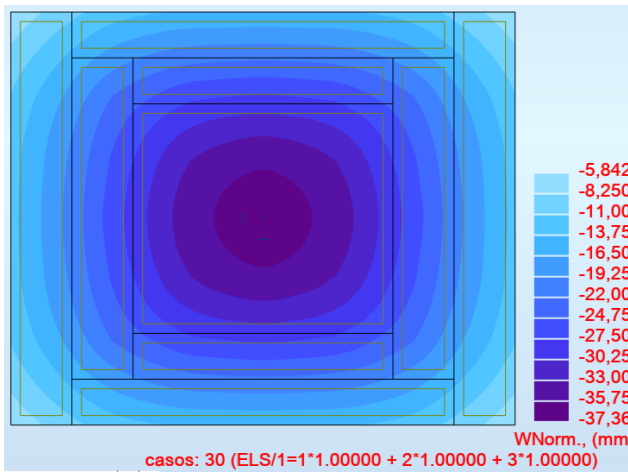


Figura 74. Deformaciones en el suelo modelo 12P acoplado ks calculado Winkler sectorizado.

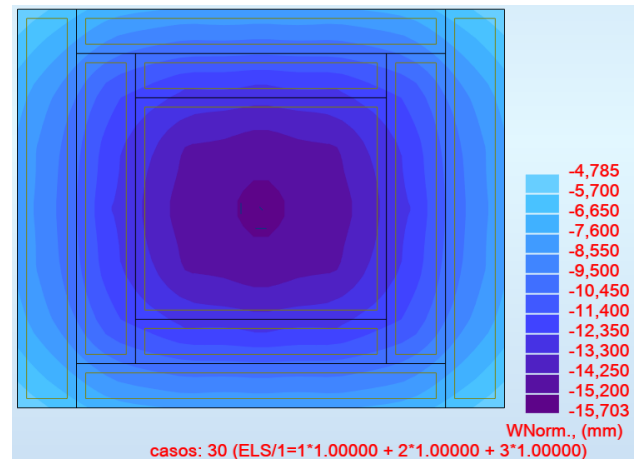


Figura 77. Deformaciones en el suelo modelo 12P acoplado ks MIDAS uniforme.

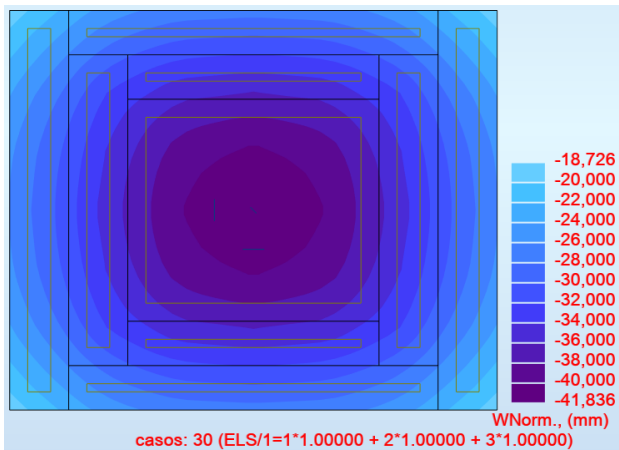


Figura 75. Deformaciones en el suelo modelo 12P acoplado ks calculado Winkler uniforme.

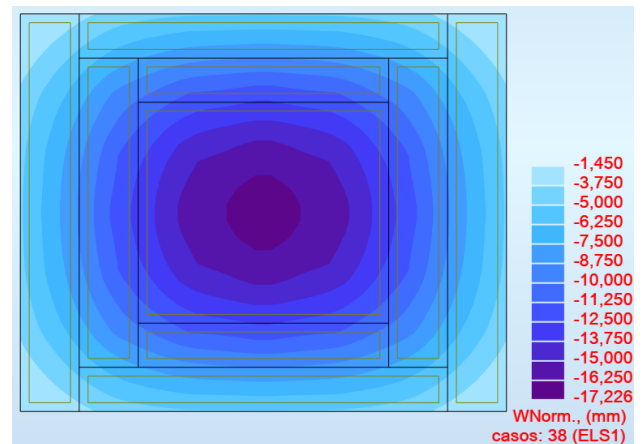


Figura 78. Deformaciones en el suelo modelo 25P desacoplado ks calculado Winkler uniforme.

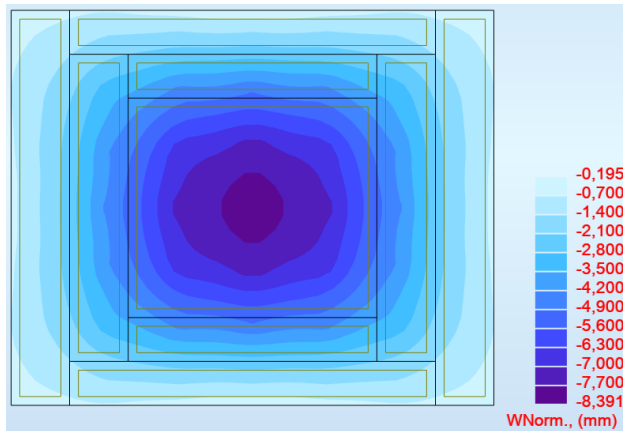


Figura 79. Deformaciones en el suelo modelo 25P desacoplado ks MIDAS sectorizado.

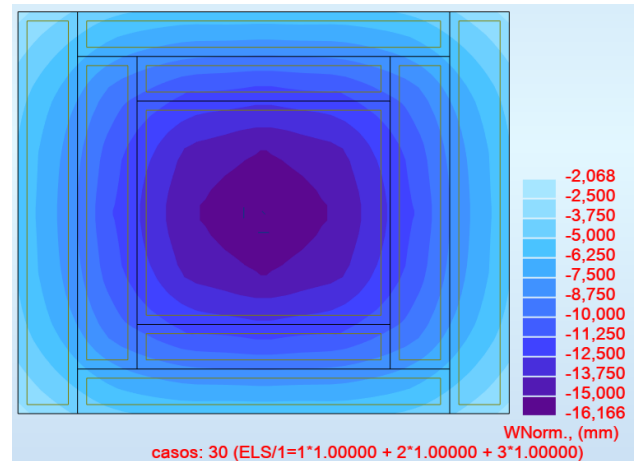


Figura 82. Deformaciones en el suelo modelo 25P acoplado ks calculado Winkler uniforme.

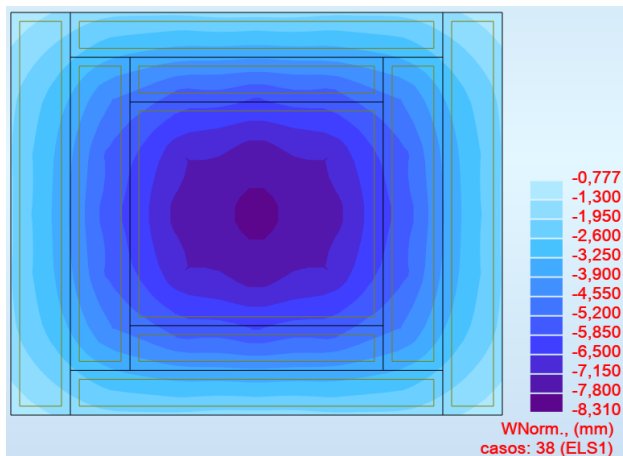


Figura 80. Deformaciones en el suelo modelo 25P desacoplado ks MIDAS uniforme.

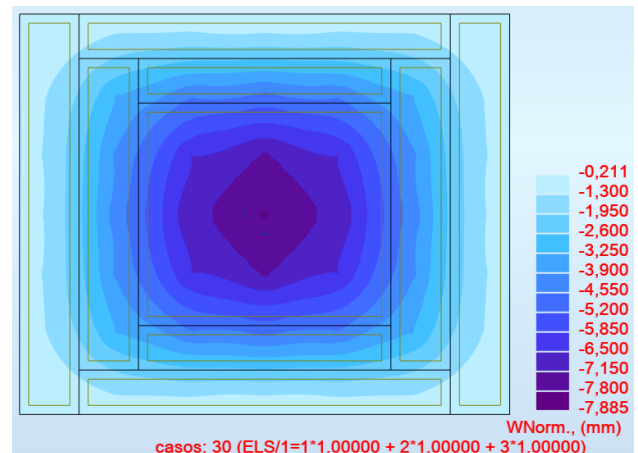


Figura 83. Deformaciones en el suelo modelo 25P acoplado ks MIDAS sectorizado.

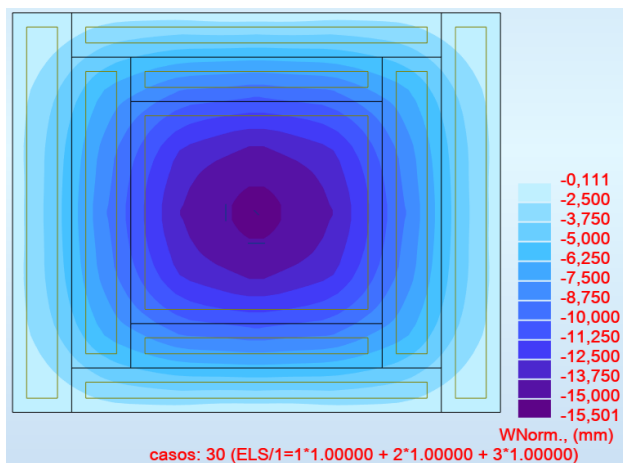


Figura 81. Deformaciones en el suelo modelo 25P acoplado ks calculado Winkler sectorizado.

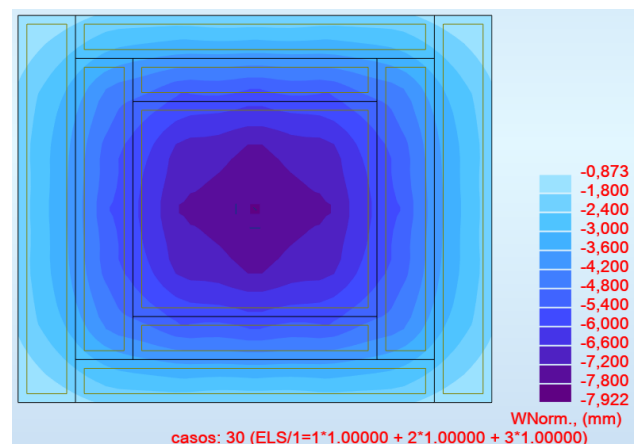


Figura 84. Deformaciones en el suelo modelo 25P acoplado ks MIDAS uniforme.

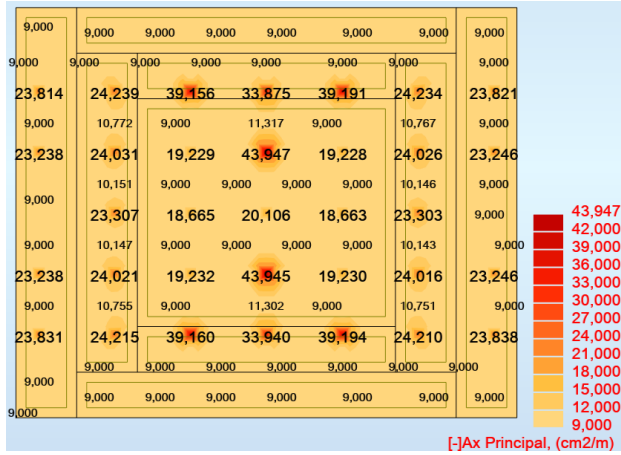


Figura 85. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 5P ks calculado Winkler uniforme.

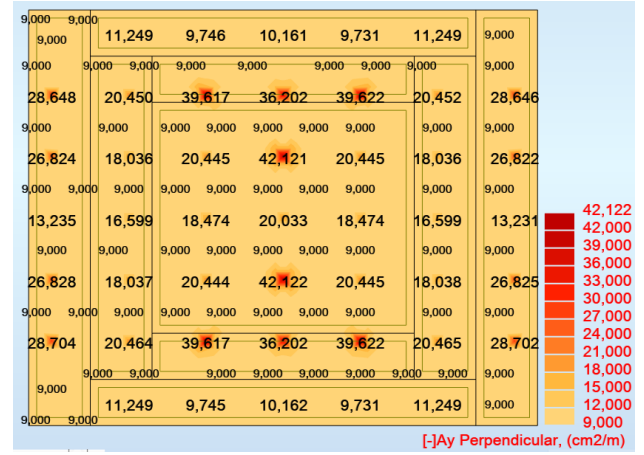


Figura 88. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 5P ks MIDAS sectorizado.

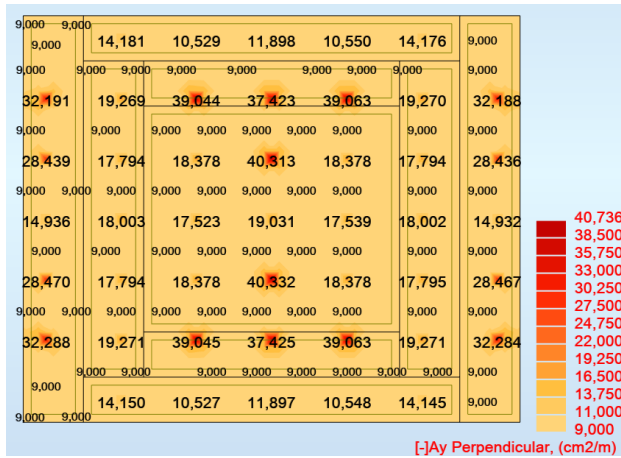


Figura 86. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 5P ks calculado Winkler uniforme.

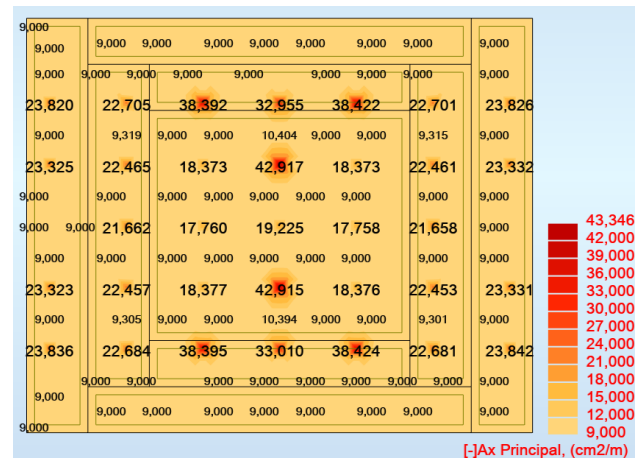


Figura 89. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 5P ks MIDAS uniforme.

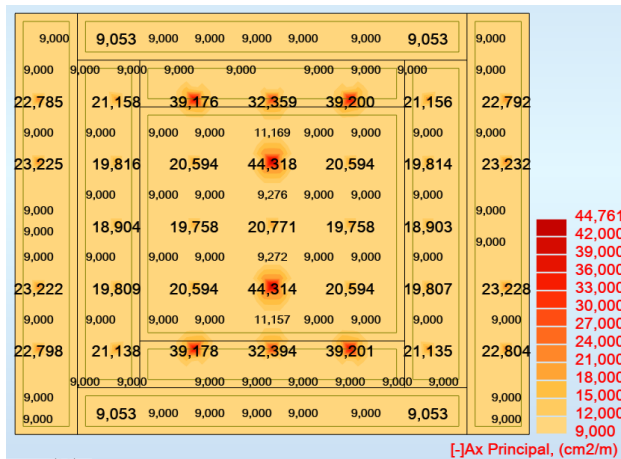


Figura 87. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 5P ks MIDAS sectorizado.

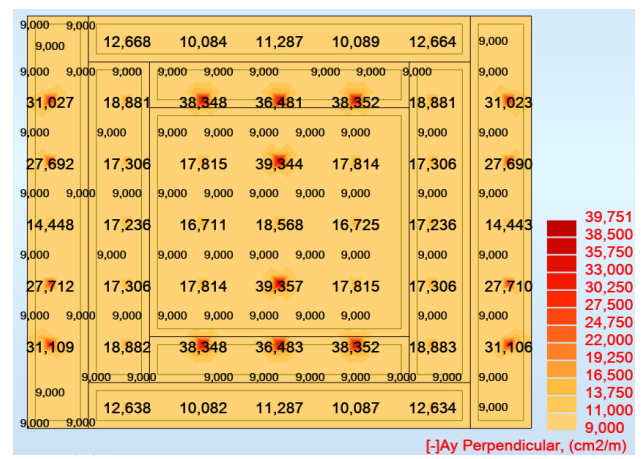


Figura 90. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 5P ks MIDAS uniforme.

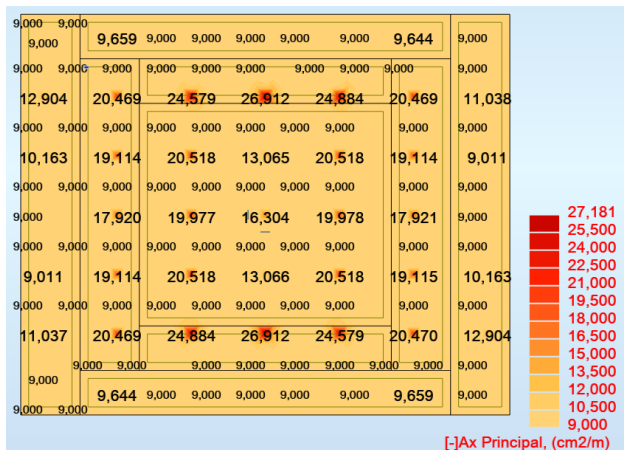


Figura 91. As XX en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 5P ks calculado Winkler sectorizado.

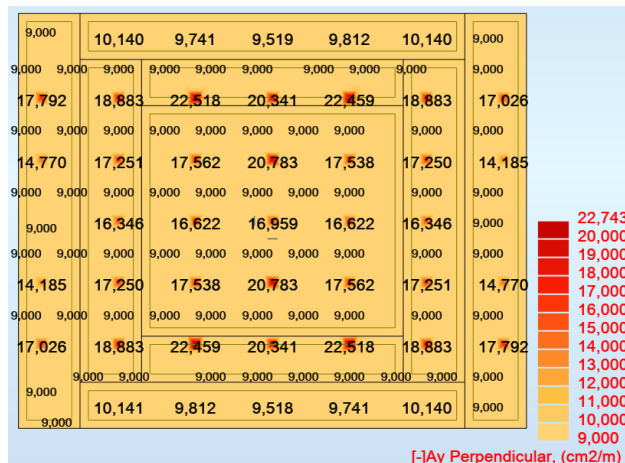


Figura 94. As YY en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 5P ks calculado Winkler uniforme.



Figura 92. As YY en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 5P ks calculado Winkler sectorizado.

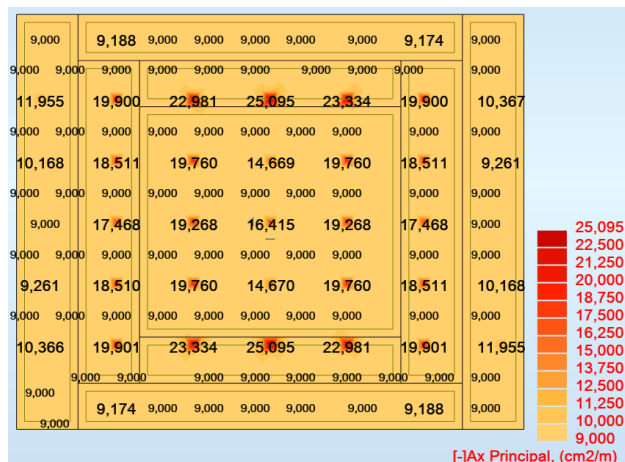


Figura 95. As XX en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 5P ks MIDAS sectorizado.

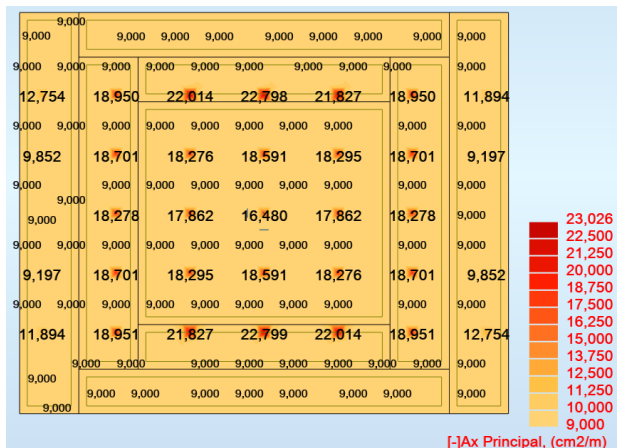


Figura 93. As XX en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 5P ks calculado Winkler uniforme.

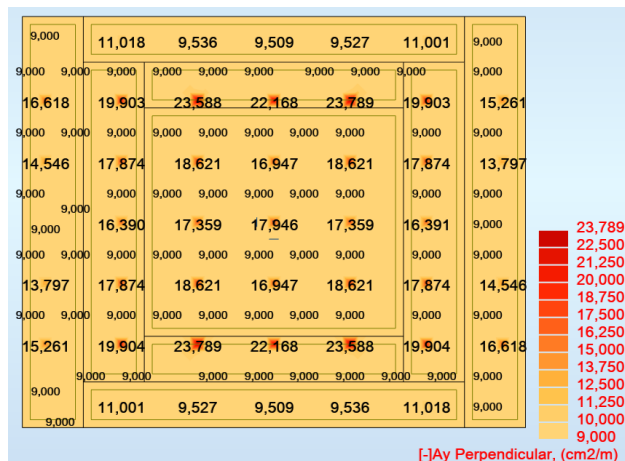


Figura 96. As YY en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 5P ks MIDAS sectorizado.

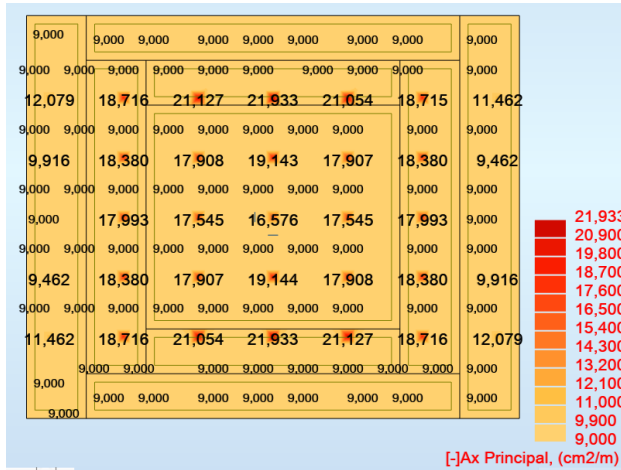


Figura 97. As XX en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 5P ks MIDAS uniforme.

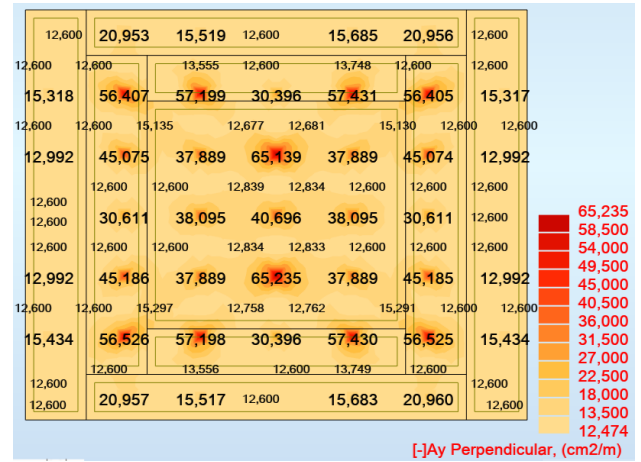


Figura 100. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 12P ks calculado Winkler uniforme.

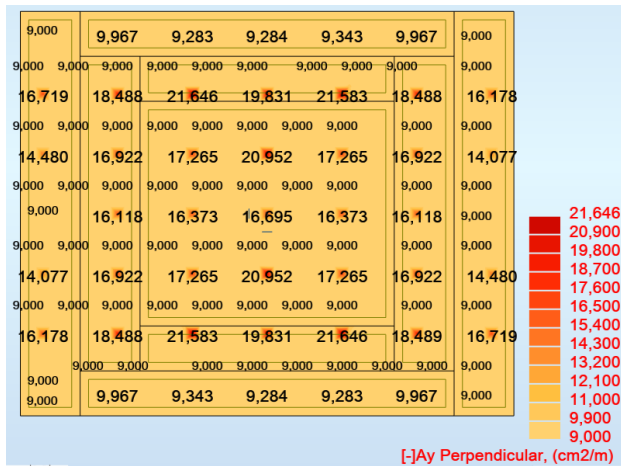


Figura 98. As YY en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 5P ks MIDAS uniforme.

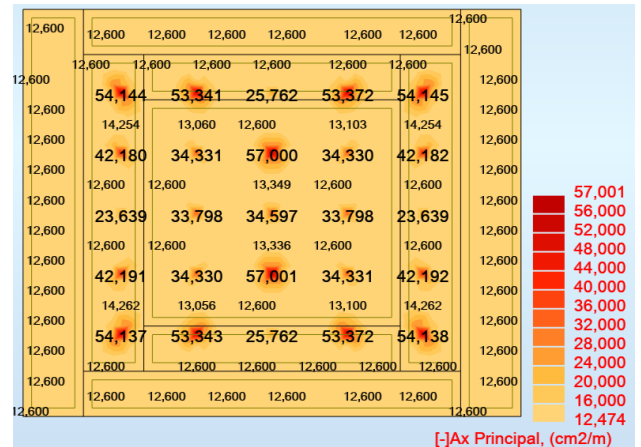


Figura 101. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 12P ks MIDAS sectorizado.

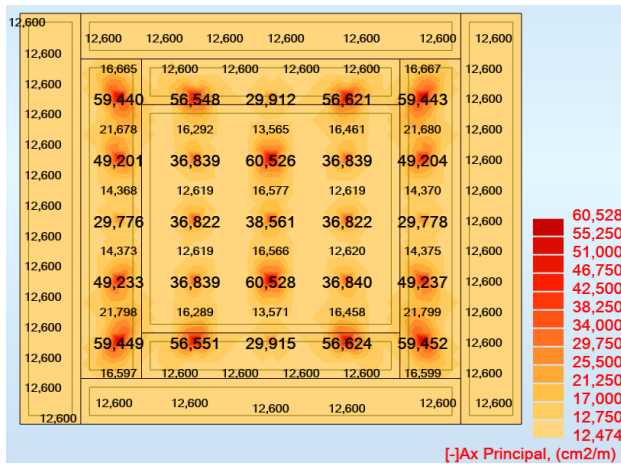


Figura 99. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 12P ks calculado Winkler uniforme.

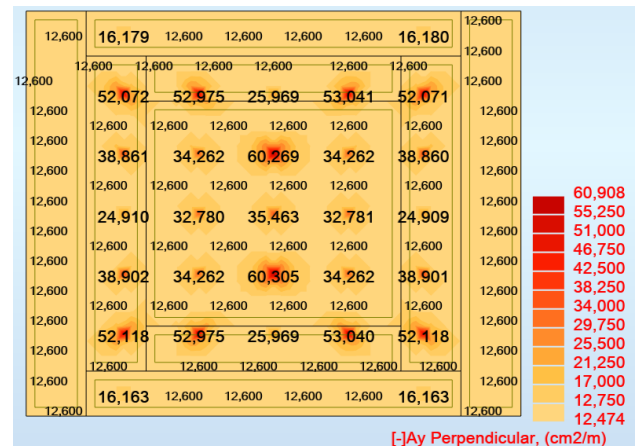


Figura 102. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 12P ks MIDAS sectorizado.

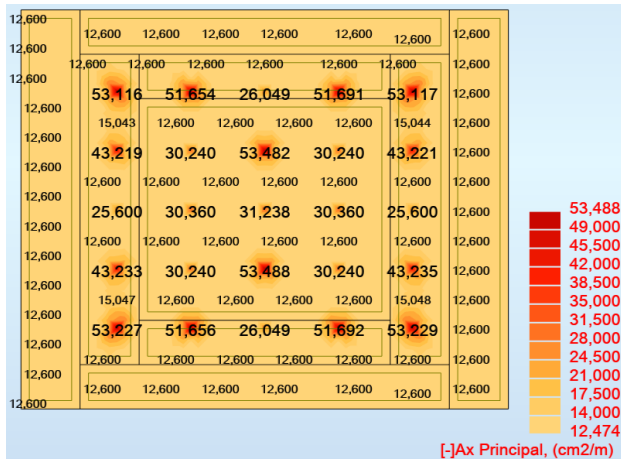


Figura 103. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 12P ks MIDAS uniforme.

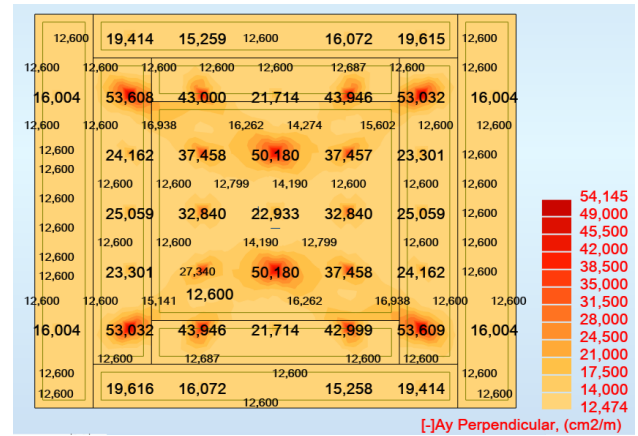


Figura 106. As YY en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 12P ks calculado Winkler sectorizado.

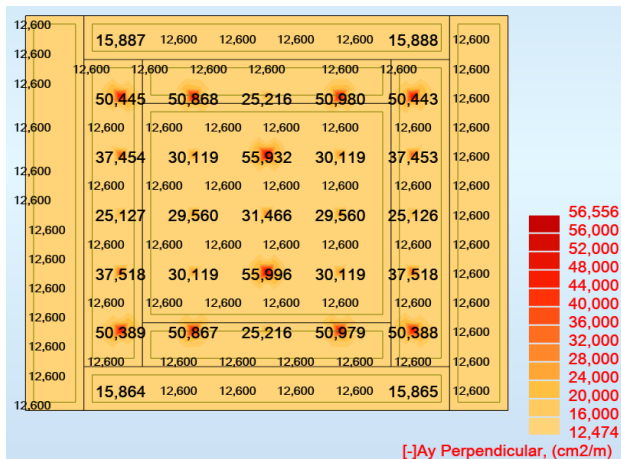


Figura 104. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 12P ks MIDAS uniforme.

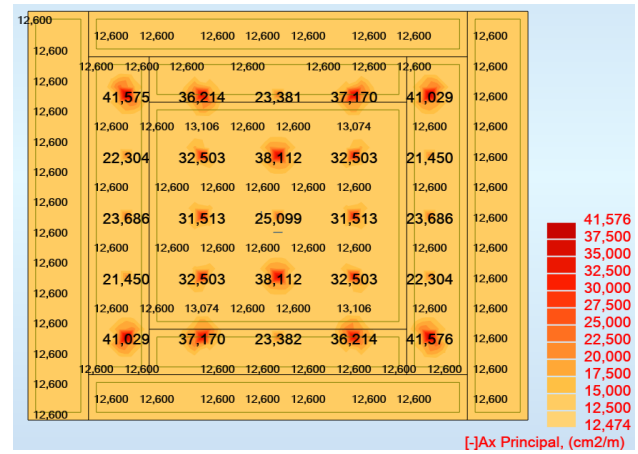


Figura 107. As XX en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 12P ks calculado Winkler uniforme.

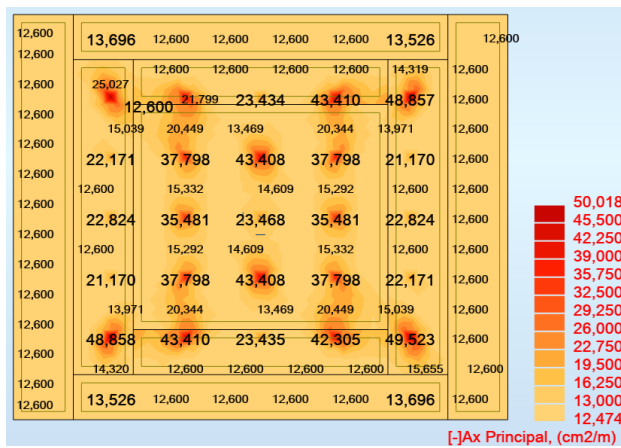


Figura 105. As XX en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 12P ks calculado Winkler sectorizado.

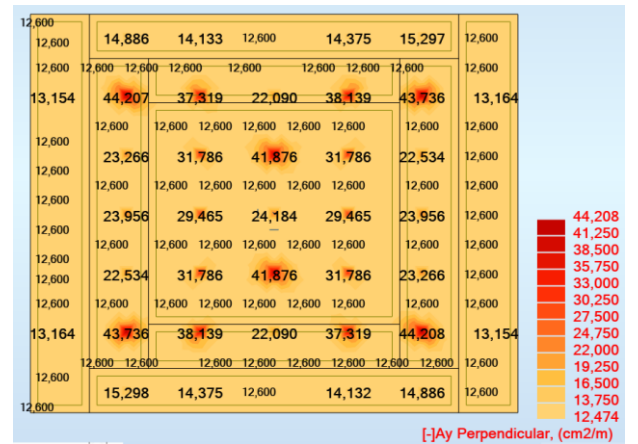


Figura 108. As YY en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 12P ks calculado Winkler uniforme.

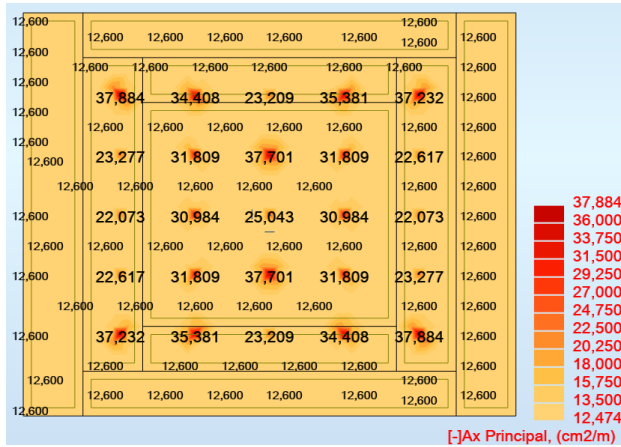


Figura 109. As XX en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 12P ks MIDAS sectorizado.

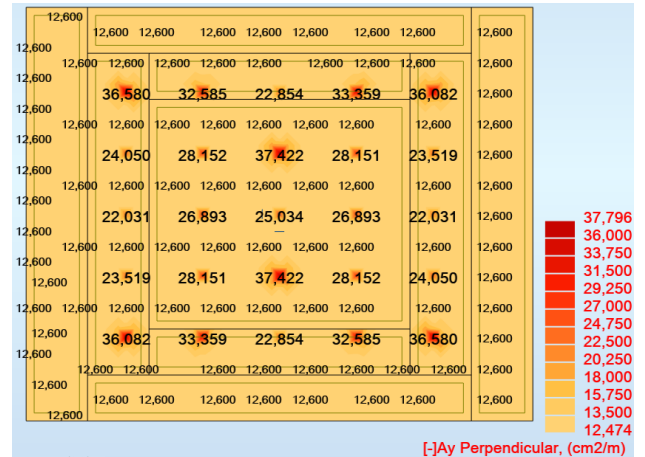


Figura 112. As YY en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 12P ks MIDAS uniforme.

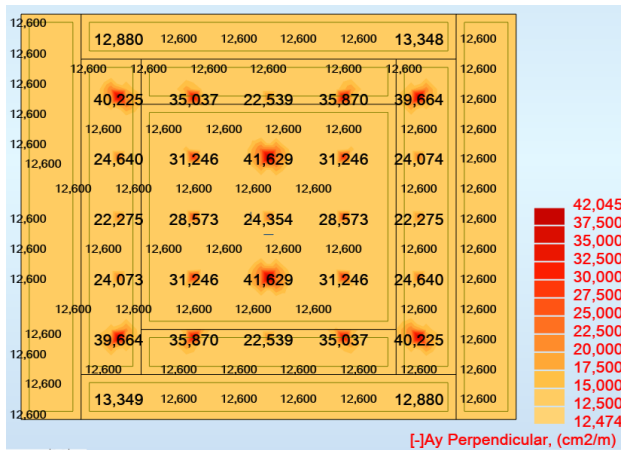


Figura 110. As YY en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 12P ks MIDAS sectorizado.

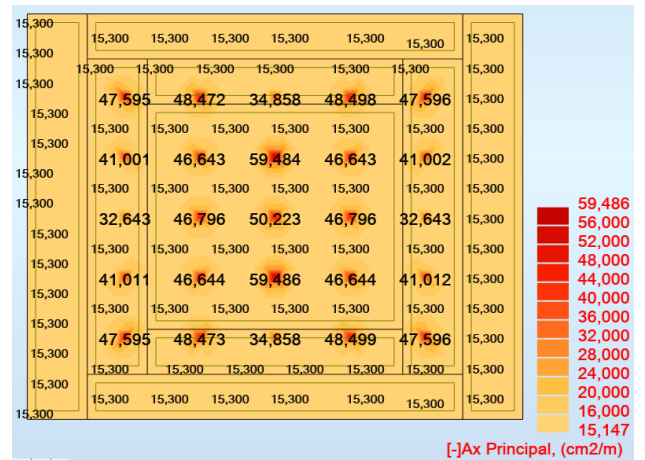


Figura 113. As XX en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 25P ks calculado Winkler uniforme.

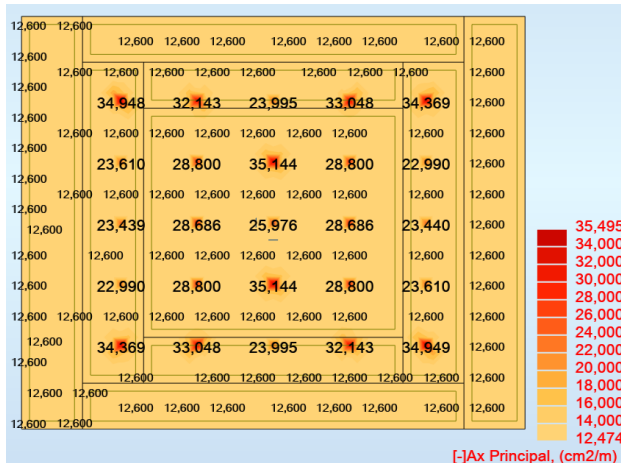


Figura 111. As XX en puntos críticos cm2/m modelo acoplado 12P ks MIDAS uniforme.

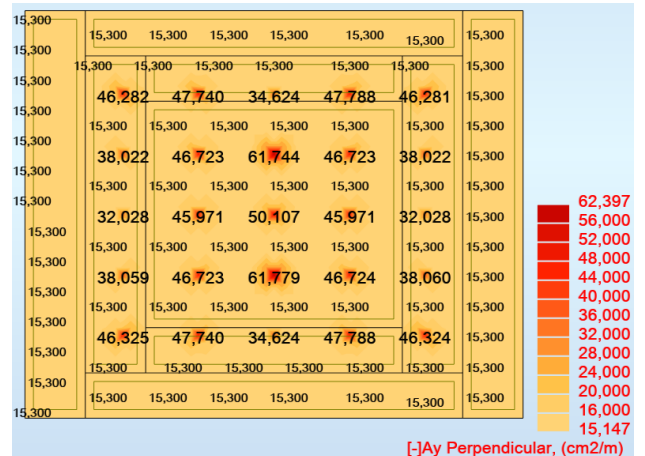


Figura 114. As YY en puntos críticos cm2/m modelo desacoplado 25P ks calculado Winkler uniforme.

