

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

**CARRERA: INGENIERÍA
CIVIL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIEROS CIVILES

TEMA:

AJUSTE DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN POR FORMA EN LA ECUACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA PROPUESTA POR MEYERHOF, EN LOSAS DE CIMENTACIÓN DE GEOMETRÍA IRREGULAR, USANDO MODELACIÓN NUMÉRICA CON MIDAS GTS NX

AUTORES:

MOLINA ORBEA SANTIAGO JAVIER

PIMENTEL PIMENTEL JULIÁN ANDRÉS

TUTOR

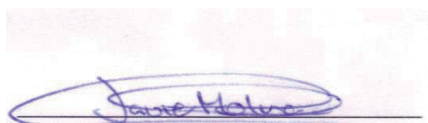
RODRÍGUEZ BADILLO FREDDY ISRAEL

Quito, septiembre de 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Molina Orbea Santiago Javier; Pimentel Pimentel Julián Andrés , con documentos de identificación N ° 171796889-3; 0802385583, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: **AJUSTE DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN POR FORMA EN LA ECUACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA PROPUESTA POR MEYERHOF, EN LOSAS DE CIMENTACIÓN DE GEOMETRÍA IRREGULAR, USANDO MODELACIÓN NUMÉRICA CON MIDAS GTS NX**, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Nombre: Molina Orbea Santiago Javier
Cédula :171796889-3
Quito, septiembre 2021



.....
Nombre: Pimentel Pimentel Julián Andrés
Cédula: 0802385583

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo, con el tema: **AJUSTE DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN POR FORMA EN LA ECUACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA PROPUESTA POR MEYERHOF, EN LOSAS DE CIMENTACIÓN DE GEOMETRÍA IRREGULAR, USANDO MODELACIÓN NUMÉRICA CON MIDAS GTS NX**, realizado por Molina Orbea Santiago Javier con C.I.: 1717968893 y Pimentel Pimentel Julián Andrés con C.I.: 0802385583, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.



.....
FREDDY ISRAEL RODRÍGUEZ BADILLO
CI:172009402-6
Quito, septiembre 2021

CONTENIDO

1. Introducción	3
2. Materiales y Métodos	3
2.1 Caracterización del suelo.....	3
2.2 Ecuación de capacidad de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof y los Escenarios Analizados.....	3
2.2.1 Ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof.....	3
2.2.1.1 Escenario 1.....	4
2.2.1.2 Escenario 2.....	4
2.2.1.3 Escenario 3.....	4
2.3 Metodología	4
2.3.1 Validación del modelo numérico para geometrías regulares	5
2.3.2 Generación del modelo numérico para geometrías irregulares	5
2.3.3 Obtención de factores de corrección para losas de cimentación de geometría irregular.	5
2.3.4 Comprobación de los factores de corrección por forma obtenidos	6
2.4 Marco Teórico.....	6
2.4.1 Teorías de cálculo de la capacidad última	6
2.4.2 Modelación Numérica	8
2.4.3 MIDAS GTS NX	8
2.4.4 Regresión lineal múltiple	10
2.4.5 Coeficiente de determinación (R^2)	10
2.4.6 Error de predicción	10
2.4.7 Gráfica predichos vs observados.....	10
3. Resultados y Discusión	11
3.1 Resultados analíticos Vs MIDAS GTS-NX	11
3.1.1 Resultados	11
3.2 Factores de corrección Fcs para losas de cimentación de geometría regular e irregular.....	12
3.2.1 Escenario 1.....	12
3.3 Factores de corrección Fqs para losas de cimentación de geometría irregular.....	12
3.3.1 Escenario 2.....	12
3.3.2 Ajuste Escenario 2	12
3.3.3 Factores de corrección Fqs para losas de cimentación de geometría irregular.....	13
3.4 Correlación lineal múltiple y factores de forma ajustados.....	14
3.4.1 Escenario 1.....	14

3.4.2 Escenario 2.....	14
3.4.3 Escenario 3.....	14
3.5 Discusión.....	14
3.6 Comprobación de los factores de forma ajustados con una geometría distinta de losa de cimentación.	15
4. Conclusiones.....	16
Referencias	17
ANEXOS.....	19

AJUSTE DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN POR FORMA EN LA ECUACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA PROPUESTA POR MEYERHOF, EN LOSAS DE CIMENTACIÓN DE GEOMETRÍA IRREGULAR, USANDO MODELACIÓN NUMÉRICA CON MIDAS GTS NX

ADJUSTMENT OF THE CORRECTION FACTORS BY SHAPE IN THE LAST LOAD CAPACITY EQUATION PROPOSED BY MEYERHOF, IN IRREGULAR GEOMETRY FOUNDATION SLABS, USING NUMERICAL MODELING WITH MIDAS GTS NX

Santiago Molina-Orbea¹, Julián Pimentel Pimentel²

Resumen

La presente investigación se realizó con el objetivo de encontrar los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con MIDAS GTS NX con el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, a través de una validación inicial de la ecuación de Meyerhof en comparativa con los resultados obtenidos en el software MIDAS GTS NX; con escenarios propuestos en una losa de geometría regular y 3 losas de geometría irregular (Ce, Cruz & L) mismas de las que se obtuvieron las variables dependientes para la correlación lineal múltiple obteniendo coeficientes de determinación (R^2) mayores al 90 % a través de las cuales se extrajeron las ecuaciones para los nuevos factores de forma irregular $F_{cs(i)}$, $F_{qs(i)}$ y $F_{\gamma s(i)}$. Adicionalmente se corroboró los factores obtenidos en una losa de geometría irregular distinta (J).

Abstract

The present research was carried out with the aim of finding the correction factors by shape in the equation of last load capacity proposed by Meyerhof, in foundation slabs of irregular geometry, using numerical modeling with MIDAS GTS NX with the constitutive model Mohr-Coulomb, through an initial validation of the Meyerhof equation in comparison with the results obtained in the MIDAS GTS NX software; with scenarios proposed in a slab of regular geometry and 3 slabs of irregular geometry (Ce, Cross & L) same from which the dependent variables for the multiple linear correlation were obtained obtaining coefficients of determination (R^2) greater than 90 % through which the equations for the new irregular form factors $F_{cs(i)}$ were extracted, $F_{qs(i)}$ and $F_{\gamma s(i)}$. Additionally, the factors obtained in a saout of distinct irregular geometry (J) were corroborated.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

² Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: smolinao@est.ups.edu.ec; jpimentel@est.ups.edu.ec

Palabras Clave: Cimentación irregular, MIDAS GTS NX, modelo constitutivo, correlación lineal múltiple.

Keywords: Irregular foundation, MIDAS GTS NX, constitutive model, multiple linear correlation.

1. Introducción

Es de vital importancia comprender y calcular con precisión la capacidad de carga última del suelo para losas de cimentación ya que éstas son de común uso cuando la magnitud de las cargas es elevada y las características del suelo no tienen suficiente capacidad de soporte. Autores como Terzaghi, Hansen, Meyerhof, Vesic y Janbu entre otros, proponen expresiones matemáticas cuyos parámetros geotécnicos tales como: ángulo de fricción interna (ϕ), cohesión (c), peso unitario (γ) y geometría, deben conocerse para estimar la capacidad de carga [1].

Sin embargo, estas expresiones fueron formuladas para geometrías cuadradas, rectangulares, circulares y cimentaciones corridas; la inexistencia, hasta la actualidad, de una ecuación con factores de forma para losas de geometría irregular para la obtención de la capacidad de carga última del suelo, obliga al proyectista a asumir anchos y formas de las losas, que no necesariamente reflejan en sus resultados la realidad de las mismas.

Para solucionar este problema se partió de la ecuación de capacidad de carga última de Terzaghi modificada por factores de corrección por forma propuestos por Meyerhof y se ajustaron para distintas geometrías irregulares. Para la obtención de estos factores de forma para losas de cimentación de geometría irregular se realizó la modelación numérica en Midas GTS NX. La validación de los resultados se llevó a cabo a través de metodologías analíticas de cálculo, en losas de geometría regular (cuadrada) con ayuda del Software Mathcad y se generó los modelos numéricos de falla del suelo en MIDAS GTS NX de losas con geometrías irregulares para los escenarios planteados.

Se determinó las cargas últimas: qu_1 , qu_2 , qu_3 , en función de escenarios establecidos, que implicaban la obtención de cada término de la ecuación de capacidad de carga última con los modelos numéricos y a partir de estos se planteó la regresión lineal múltiple con los factores de carga N_c , N_q , y la geometría de la losa de cimentación, en el caso del factor de capacidad de

carga N_γ no aplica debido a que no interfiere en los factores de corrección por forma, al no depender del ángulo de fricción, en el caso del tercer factor de forma, F_{ys} , y de la misma manera, como se aprecia en las ecuaciones para obtención de los factores de corrección por forma de Meyerhof, no involucran el factor de capacidad de carga N_γ [2].

2. Materiales y Métodos

2.1 Caracterización del suelo

El suelo usado en la investigación tuvo como propiedades arbitrarias; una cohesión de 2 ton/m^2 la cual se mantuvo constante en todos los casos analizados, mientras que, el ángulo de fricción fue un parámetro que varió: 0° , 5° , 10° , 18° , 30° y 35° . Se trabajó con una sola cohesión, ya mencionada, y un solo peso unitario de suelo de 1.7 ton/m^2 , esto es debido a que en los factores de corrección por forma de Meyerhof no intervienen dichos parámetros geo mecánicos. Cabe mencionar que estos parámetros resistentes del suelo son indispensables para el cálculo de la capacidad de carga última de Meyerhof.

2.2 Ecuación de capacidad de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof y los Escenarios Analizados

2.2.1 Ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof

$$qu = C * N_c * F_{cs} * F_{cd} * F_{ci} + q * N_q * F_{qs} * F_{qd} * F_{qi} + \frac{1}{2} * \gamma * B * N_\gamma * F_{\gamma c} * F_{\gamma d} * F_{\gamma i} \quad (1)$$

Ecuación de Meyerhof

La ecuación (1) (capacidad de carga última propuesta por Meyerhof) esta formulada por 3 sumandos, cada uno de ellos afectado por un parámetro geo mecánico (Cohesión, Peso específico y Angulo de fricción, en este último, expresado a través de los factores de corrección: carga, forma, profundidad e inclinación), así como también la sobrecarga (q). Para efectos de

Molina, Pimentel / Ajuste de los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con MIDAS GTS NX

cálculo de cada uno de los factores de forma que afectan a los términos de la ecuación, se realizó el artificio de anular, en cada escenario propuesto, dos de los tres sumandos, pudiendo de esta manera, obtener los factores preliminares Fcs, Fqs y Fys, y posteriores términos dependientes para la correlación múltiple.

2.2.1.1 Escenario 1

Las propiedades del suelo en este escenario fueron: $\phi \neq 0$ y $\phi = 0$ combinados con $c \neq 0$, $q = 0$, $\gamma = 0$.

- ϕ : Ángulo de fricción
- C: Cohesión
- q: sobrecarga
- γ : Peso específico del suelo

Con esta configuración de las propiedades del suelo se obtuvo el factor de corrección por forma del primer término de la ecuación de Terzaghi corregida por Meyerhof (Fcs), ecuación (2), ya que los términos de la sobrecarga, así como el peso específico del suelo en la ecuación ($qu_{1ANALITICO}$), son cero.

$$qu = C * Nc * Fcs * Fcd * Fci \quad (2)$$

Primer término

2.2.1.2 Escenario 2

En este escenario, la configuración del modelo de cimentación-suelo fue la siguiente:

$\phi \neq 0$ y $\phi = 0$ combinado con $c = 0$, $q \neq 0$ y $\gamma = 0$

- ϕ : Ángulo de fricción
- C: Cohesión
- q: sobrecarga
- γ : Peso específico del suelo

Con esta configuración de las propiedades del suelo se obtuvo el factor de corrección por forma del segundo término de la ecuación de Terzaghi corregida por Meyerhof (Fqs), ecuación (3), ya que los términos de la cohesión y peso específico de la ecuación ($qu_{2ANALITICO}$), son cero.

$$qu = q * Nq * Fqs * Fqd * Fqi \quad (3)$$

Segundo término

2.2.1.3 Escenario 3

La configuración del suelo-cimentación, fue la siguiente: $\phi \neq 0$ y $\phi = 0$ combinado con $c = 0$, $q = 0$ y $\gamma \neq 0$.

- ϕ : Ángulo de fricción
- C: Cohesión
- q: sobrecarga
- γ : Peso específico del suelo

Con esta configuración de las propiedades del suelo se obtuvo el factor de corrección por forma del tercer término de la ecuación de Terzaghi corregida por Meyerhof (Fys), ecuación (4), ya que los términos de la cohesión y sobre carga; de la ecuación ($qu_{3ANALITICO}$), son cero. Pese a ser irreal la propuesta, se utilizó el artificio para encontrar los factores de corrección por forma en cada tramo de la ecuación (1).

$$qu = \frac{1}{2} * \gamma * B * N\gamma * F\gamma c * F\gamma d * F\gamma i \quad (4)$$

Tercer termino

2.3 Metodología

Se realizó un mallado en el sólido (MIDAS GTS NX modelando el suelo como un sólido). Una vez realizado este procedimiento, se asignó las propiedades; ángulo de fricción, cohesión y peso específico. Los parámetros que son considerados para el suelo son los mismos que intervienen en los escenarios señalados y que permitieron la obtención de los factores de corrección por forma irregulares a través del cálculo analítico por separado de cada uno de los términos de capacidad de carga última.

2.3.1 Validación del modelo numérico para geometrías regulares

Se partió de losas de cimentación de geometrías regulares, se realizó modelos numéricos; los modelos constitutivos que se utilizaron para la simulación de la respuesta mecánica del suelo mediante elementos finitos fue Mohr-Coulomb ; utilizando el software Midas GTS NX aplicando los procedimientos correspondientes para la calibración del mismo, es decir, se comparó los resultados obtenidos en los modelos numéricos con los procedimientos analíticos mediante la ecuación de capacidad de carga última ($q_{ANALITICO}$).

Para dicha validación el software MIDAS GTS NX no permitió que el parámetro de la cohesión ingresado sea cero, por lo tanto, fue necesario plantear escenarios en los que intervino siempre la cohesión, para ello se desarrolló un artificio en el cual los resultados de los escenarios 2 y 3 se obtuvieron a través de la diferencia de los escenarios desarrollados como se indica en las siguientes expresiones:

$$q_{2GTS-NX(c=0)} = q_{2GTS-NX(c \neq 0)} - q_{1GTS-NX(c \neq 0)} \quad (5)$$

$$q_{3GTS-NX(c=0)} = q_{3GTS-NX(c \neq 0)} - q_{1GTS-NX(c \neq 0)}. \quad (6)$$

Donde:

$q_{1GTS-NX(c \neq 0)}$: Capacidad de carga última donde interviene: cohesión y ángulo de fricción (escenario 1).

$q_{2GTS-NX(c \neq 0)}$: Capacidad de carga última obtenida del escenario 2 en MIDAS GTS-NX, con cohesión distinto de cero.

$q_{2GTS-NX(c=0)}$: Capacidad de carga última obtenida a partir del artificio (diferencia de los escenarios realizados en MIDAS GTS-NX, escenario 2 con cohesión, menos escenario 1) para la posterior obtención de F_{qs} .

$q_{3GTS-NX(c \neq 0)}$: Capacidad de carga última obtenida del escenario 3 en MIDAS GTS-NX con cohesión distinto de cero.

$q_{3GTS-NX(c=0)}$: Capacidad de carga última obtenida a partir del artificio (diferencia de los escenarios realizados

en MIDAS GTS-NX, escenario 3 con cohesión, menos escenario 1) para la posterior obtención de F_{ys} .

2.3.2 Generación del modelo numérico para geometrías irregulares

Una vez que se realizó la validación con los modelos numéricos para las losas de cimentación de geometría regular, se obtuvieron los valores de q_{MIDAS} para cada uno de los escenarios antes planteados. Las geometrías propuestas son (L “ele”, + “cruz” y C “ce”). Las dimensiones de las losas de geometría irregular se detallan en ANEXO 1.

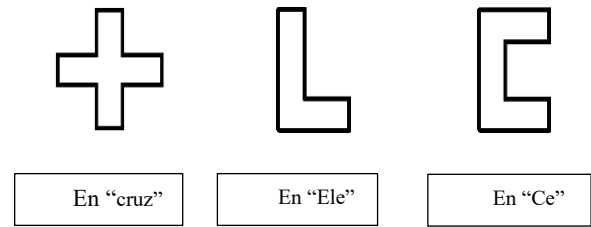


Figura 1. Geometrías irregulares.

2.3.3 Obtención de factores de corrección para losas de cimentación de geometría irregular.

En función de los diferentes escenarios, con los resultados de q_{GTS-NX} de los modelos numéricos y con las expresiones analíticas para determinar $q_{ANALITICO}$ (sin aplicar los factores de corrección por forma de Meyerhof) se obtuvieron las relaciones de los resultados obtenidos de forma analítica y los obtenidos en la modelación numérica de corrección por forma para las geometrías propuestas.

$$F_{cs} = \frac{q_{u1(GTS-NX)}}{q_{u1(ANALITICO)}}$$

$$F_{qs} = \frac{q_{u2(GTS-NX)}}{q_{u(ANALITICO2)}}$$

$$F_{ys} = \frac{q_{u3(GTS-NX)}}{q_{u3(ANALITICO)}}$$

Molina, Pimentel / Ajuste de los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con MIDAS GTS NX

Dónde:

- **Fcs:** factor de corrección por forma en el término de la cohesión
- **Fqs:** factor de corrección por forma en el término de la sobrecarga
- **Fys:** factor de corrección por forma en el término del peso específico
- **$q_u(GTS-NX1)$:** capacidad de carga última obtenida del modelo numérico del escenario 1.
- **$q_u(GTS-NX2)$:** capacidad de carga última obtenida del modelo numérico del escenario 2.
- **$q_u(GTS-NX3)$:** capacidad de carga última obtenida del modelo numérico del escenario 3.
- **$q_u(ANALITICO1)$:** capacidad de carga última obtenida a partir de la ecuación de Terzaghi parcial debido a que esta considera únicamente N_c , cohesión y los distintos factores, con factor de forma igualado a uno, de Meyerhof, permitiendo despejar y obtener un factor (variable dependiente) para la correlación lineal múltiple, para escenario 1.
- **$q_u(ANALITICO2)$:** capacidad de carga última obtenida a partir de la ecuación de Terzaghi y factores, con factor de forma igualado a uno, de Meyerhof para escenario 2.
- **$q_u(ANALITICO3)$:** capacidad de carga última obtenida a partir de la ecuación de Terzaghi y factores, con factor de forma igualado a cero, de Meyerhof para escenario 3.

Con los factores de corrección por forma determinados, se planteó las regresiones lineales múltiples que consiste en ajustar un modelo lineal entre una variable dependiente y más de una variable independiente. En este caso las variables independientes utilizadas son: área y perímetro de la cimentación, N_c , N_q , longitudes y anchos de la cimentación, mientras que las variables

dependientes serán los factores de corrección por forma para cada parte de la ecuación de capacidad de carga última (q_u).

2.3.4 Comprobación de los factores de corrección por forma obtenidos

En una losa de cimentación de geometría irregular diferente a las usadas en la presente investigación, se calculó la capacidad de carga última $q_u(ANALITICO)$, con los factores de corrección por forma obtenidos, a su vez se realizó el modelo numérico para determinar $q_u(GTS-NX)$ y se comparó los resultados entre la capacidad de carga última obtenida con los factores de corrección ajustados (nuevos) y el resultado del modelo numérico. El éxito de la generalización de estos factores de corrección radica en que se cumpla $q_u(GTS-NX) \approx q_u(ANALITICO)$

2.4 Marco Teórico

2.4.1 Teorías de cálculo de la capacidad última

2.4.1.1 Cálculo de la capacidad última de forma analítica

Modificando la ecuación Terzaghi, la capacidad de carga última según Meyerhof (1963), propone lo siguiente [2]:

$$q_u = C' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (7)$$

Ecuación completa de Meyerhof.

Donde:

- C' = Cohesión efectiva
- q' = Esfuerzo efectivo a nivel de desplante de la cimentación
- γ = Peso unitario del suelo.

- B= Ancho característico de la cimentación
- N_c, N_q, N_γ = Factores de capacidad de carga
- $F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$ = Factores de corrección por forma
- $F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$ = Factores de corrección por profundidad
- $F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$ = Factores de corrección por inclinación

$$F_{\gamma d} = 1 \quad (16)$$

Para $\phi' > 0$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1-F_{qd}}{N_c \cdot \tan(\phi')} \quad (17)$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \text{sen} \phi)^2 \frac{Df}{B} \quad (18)$$

Factores de capacidad de carga de la teoría de Meyerhof, ecuaciones (8) (9) (10):

$$N_q = \tan^2 + \left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) e^{\pi \cdot \tan \phi'} \quad (8)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad (9)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi' \quad (10)$$

$$F_{\gamma d} = 1 \quad (19)$$

Condición b: cuando $Df/B > 1$

Para $\phi' = 0$

$$F_{cd} = 1 + (0.4) \tan^{-1} \frac{Df}{B} \quad (20)$$

$$F_{qd} = 1 \quad (21)$$

Factores de forma de Meyerhof, ecuaciones (11) (12) (13):

$$F_{cs} = 1 + \frac{B N_q}{L N_c} \quad (11)$$

$$F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi' \quad (12)$$

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L} \quad (13)$$

$$F_{\gamma d} = 1 \quad (22)$$

Para $\phi' > 0$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1-F_{qd}}{N_c \cdot \tan(\phi')} \quad (23)$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \text{sen} \phi)^2 \tan^{-1} \frac{Df}{B} \quad (24)$$

Factores de profundidad de Beer y Hansen, ecuaciones (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25):

Condición a: cuando $Df/B \leq 1$

Para $\phi' = 0$

$$F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{Df}{B} \quad (14)$$

$$F_{qd} = 1 \quad (15)$$

$$F_{\gamma d} = 1 \quad (25)$$

Factores de inclinación Meyerhof (1963) & de Hanna- Meyerhof (1981), ecuaciones (26) (27):

$$F_{ci} F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta}{90^\circ}\right)^2 \quad (26)$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi}\right)^2 \quad (27)$$

2.4.2 Modelación Numérica

Metodología de los elementos finitos es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales, está pensado para ser usado en la simulación de los escenarios propuestos. Este método tiene las siguientes consideraciones:

- El problema es continuo, se divide en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos. Estos puntos (nodos) sirven de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

Por lo tanto, este método se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos [3].

2.4.3 MIDAS GTS NX

Es un programa de cálculo por elementos finitos orientado al análisis de diversos problemas en Geotecnia mediante la realización de modelos 2D y 3D [4].

Midas GTS NX usa elementos finitos para la obtención de resultados, a través de ecuaciones que relacionan los esfuerzos, ecuaciones (28), (29), (30), (31), deformaciones y sus relaciones usando el principio de trabajo virtual. Que se puede expresar de la siguiente manera [5]:

$$G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta u)^T \sigma + \delta \varepsilon^T (\sigma(\varepsilon) - \sigma) + \delta \sigma^T (\nabla u - \varepsilon) d\Omega \quad (28)$$

δG_{ext} : Trabajo virtual debido a fuerzas externas

ε : Deformaciones

u : Desplazamientos

σ : Esfuerzos

$\sigma(\varepsilon)$: Esfuerzos calculados a partir de las deformaciones

∇ : Operador Nabla $(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z})$

La ecuación anterior es la forma más general que incluye la ecuación de equilibrio, la ecuación constitutiva y la condición de compatibilidad. Si se supone que la relación de deformación y esfuerzos siempre se satisface mediante la ecuación constitutiva, se obtiene el principio de Hellinger-Reissner de la siguiente manera:

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta u)^T \sigma + \delta \sigma^T (\nabla u - \varepsilon(\sigma)) d\Omega \quad (29)$$

$\varepsilon(\sigma)$: Deformación calculada a partir del esfuerzo

Suponiendo que la relación entre ε y ∇u se satisfaga mediante condiciones adecuadas adicionales, la ecuación se convierte en el principio general del trabajo virtual:

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta u)^T \sigma(u) d\Omega \quad (30)$$

En la ecuación (30) se limita la región de integración como un solo elemento para aplicar el principio de trabajo virtual en el método de elementos finitos. Interpolando el desplazamiento como función de forma dentro de un solo elemento da la siguiente ecuación:

$$u^h = N d^e \quad (31)$$

N : Función de forma

d^e : Grados de libertad de los nudos del elemento

Usando la relación deformación-desplazamiento $\varepsilon^h = \nabla u^h = u B d^e$, el principio de trabajo virtual para todo el elemento se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \delta G_{ext} &= \delta \sigma^T F = \delta \sigma^T \left[\sum_{\Omega_e} \int_{\Omega_e} B^T D B d \Omega \right] d \quad (32) \\ &= \delta \sigma^T K d \end{aligned}$$

D: Matriz de relación tensión-deformación

En el análisis lineal, la matriz de rigidez total K es independiente de los grados de libertad total de los nodos y la rigidez de los elementos individuales K_e se puede expresar de la siguiente manera:

$$K^e = \int_{\Omega_e} B^T D B d \Omega \quad (33)$$

La ecuación (33) es aplicable para los análisis elásticos con pequeños desplazamientos, pero también puede ser aplicado para un análisis no lineal usando el mismo principio [5].

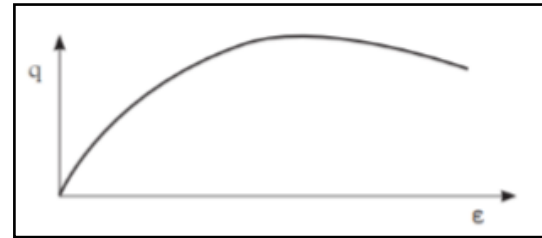
2.4.3.1 Modelos Constitutivos

La modelación constitutiva es una herramienta matemática utilizada para simular el comportamiento del suelo cuando es sometido a estados de esfuerzos que generan deformación y falla [6].

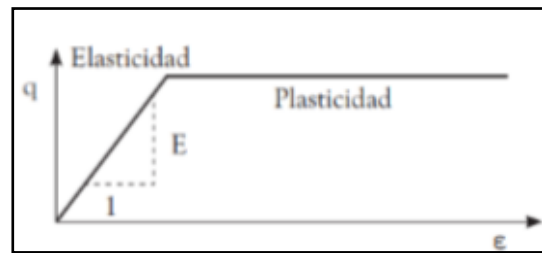
2.4.3.2 Modelo Mohr Coulomb (MC)

El modelo constitutivo Mohr Coulomb es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo. Es un modelo elastoplástico desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de falla Mohr Coulomb [7].

Este modelo no representa el comportamiento elastoplástico progresivo, sino que es un modelo elástico y luego plástico [8].



a)



b)

Figura 5.

a.- Comportamiento elastoplástico progresivo.
b.- Formulación básica del modelo elastoplástico perfecto.

Para evaluar si la plasticidad ocurre o no en un análisis específico, el modelo de Mohr Coulomb involucra un conjunto de funciones de fluencia f (Yield Functions) que definen el límite entre el comportamiento elástico y plástico del material. La representación gráfica como se muestra en la figura, de las funciones genera un cono hexagonal, en el espacio de los esfuerzos principales constituye un contorno o superficie de fluencia fija. De esta manera, para todos los estados de esfuerzos representados dentro de la superficie, el comportamiento es puramente elástico y todas las deformaciones son reversibles. Cuando los esfuerzos igualan o superan la frontera definida por esta superficie, se presentan deformaciones tanto elásticas como plásticas [10].

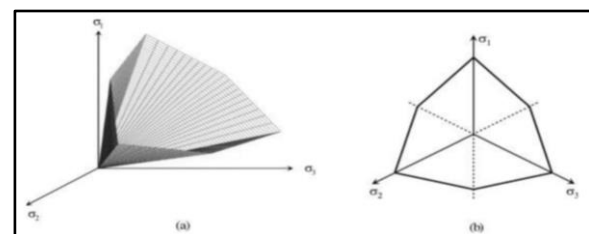


Figura 6. Cono hexagonal.

Este criterio de fluencia es una extensión de la ley de tensiones de Coulomb para un estado general de esfuerzos y es definido a partir de seis funciones formuladas en términos de tensiones principales [9].

$$f_{ia} = \frac{1}{2}(\sigma_j - \sigma_k) + \frac{1}{2}(\sigma_j + \sigma_k) * \sin \sin(\phi) - c * \cos(\phi) \leq 0 \quad (34)$$

$$f_{ib} = \frac{1}{2}(\sigma_k - \sigma_j) + \frac{1}{2}(\sigma_k + \sigma_j) * \sin \sin(\phi) - c * \cos(\phi) \leq 0 \quad (35)$$

Para i=1,2,3; j=2,3,1; k=3,2,1

2.4.4 Regresión lineal múltiple

Trata de ajustar modelos lineales entre una variable dependiente y más de una variable independiente, configurando un individuo de referencia, factores de ponderación, variables de interacción, interrelación, etc. [11].

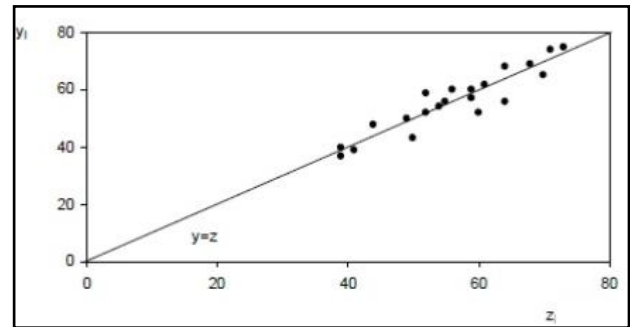
La regresión es una técnica estadística que consiste en calcular dicha similitud en forma de función matemática. Esta función ofrece mucha más información sobre dicha relación [12].

La forma general de una regresión lineal múltiple es:

$$F = a_1A_1 + a_2A_2 + a_3A_3 + a_nA_n \quad (36)$$

Donde:

- F: factor de forma (variable dependiente).
- a1, a2, a3, an: constantes.
- A: Variable independiente (Ejemplo: área, perímetro de cimentación)



2.4.5 Coeficiente de determinación (R²)

El coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El coeficiente de determinación, también llamado R cuadrado, refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar [13].

2.4.6 Error de predicción

Error de predicción es la diferencia entre un valor de los factores de corrección por forma calculados a partir de los modelos numéricos y su estimación a través de las fórmulas correlacionadas, en una recta de regresión (o en una curva de regresión general), cuantifica el error de predicción. Una forma sencilla de cuantificar el error de predicción consiste en obtener las diferencias entre los valores predichos y los valores reales [14]:

$$e = F_{cal} - F_{corr} \quad (37)$$

Donde:

- e: error de predicción o estimación
- Fcal: Factores de corrección por forma calculados a partir de los modelos numéricos
- Fcorr: Predicción o estimación de los Factores de corrección por forma correlacionados

2.4.7 Gráfica predichos vs observados

El gráfico de dispersión de los valores predichos (Factores de forma correlacionados) vs. observados (Factores de forma calculados), permite visualizar que tan alejados están los puntos de la recta $y = z$, así como, tendencias de los puntos a dicha recta que representa la exactitud ideal. La distribución de los puntos en la Figura muestra que éstos se encuentran "cerca" y alrededor de la exactitud ideal ($y = z$), esto indica gráficamente que el modelo no presenta sesgo en sus pronósticos [15].

Figura 7 Relación entre los valores simulados (z_i) para un modelo sin sesgo. $y=z$ es la recta que representa la exactitud ideal.

3. Resultados y Discusión

Se realizó el análisis comparativo de los resultados obtenidos con las losas de cimentación regulares (cuadrada y rectangular) con suelo cohesivo, granular y mixto para poder avalar el software con distintos tipos de suelos. Cabe señalar que el análisis se lo realizó con un solo tipo de suelo, debido a que los factores de corrección por forma no dependen de ningún otro factor, más que del ángulo de fricción.:

Descripción	Cohesión (ton/m ²)	Angulo de fricción (Ø)	Peso unitario (γ) (ton/m ³)
Cohesivo	4.8	0	1.7
Granular	0	30	1.6
Mixto	1.5	18	1.65

3.1 Resultados analíticos Vs MIDAS GTS-NX

Forma	Característica	B(m)	L(m)	qu (ANALITICO) (ton/m ²)	qu (MIDAS GTS-NX) (ton/m ²)
Cuadrada	Cohesivo	4	4	31.18	32.1
Rectangular	Cohesivo	6	8	29.98	33
Cuadrada	Granular	4	4	91.07	92.95
Rectangular	Granular	6	8	118.44	108.58
Cuadrada	Mixto	4	4	38.74	39.9
Rectangular	Mixto	6	8	51.14	51.8

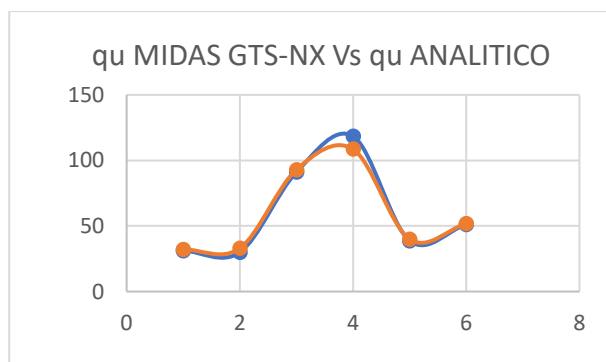


Figura 8. qu MIDAS GTS-NX Vs qu ANALITICO geometrías regulares.

3.1.1 Resultados

Se presenta un resumen de resultados de la capacidad de carga última de cada escenario y las correlaciones obtenidas por regresión lineal múltiple de todas las geometrías de losas de cimentación.

Molina, Pimentel / Ajuste de los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con MIDAS GTS NX

3.2 Factores de corrección Fcs para losas de cimentación de geometría regular e irregular.

3.2.1 Escenario 1

Forma	Angulo de fricción (\emptyset)	qu (ANALITICO) (ton/m ²)	qu (ANALITICO) (ton/m ²)-F=1	qu (MIDAS GTS-NX) (ton/m ²)	Factor (qu (MIDAS GTS-NX) /qu (ANALITICO) (ton/m ²)-F=1)
Rectangular	0	11.78	10.28	10.5	1.021
Cuadrada	0	12.28	10.28	12.28	1.195
Ce	0	11.11	10.28	11.28	1.097
Cruz	0	10.95	10.28	11.67	1.136
L	0	10.95	10.28	10.86	1.057
Rectangular	5	15.33	12.98	14.7	1.133
Cuadrada	5	16.11	12.98	16.11	1.241
Ce	5	14.28	12.98	13.91	1.072
Cruz	5	14.02	12.98	14.11	1.087
L	5	14.02	12.98	13.51	1.041
Rectangular	10	20.4	16.69	21.04	1.261
Cuadrada	10	21.63	16.69	21.63	1.296
Ce	10	18.75	16.69	19.29	1.156
Cruz	10	18.34	16.69	21.67	1.298
L	10	18.34	16.69	18.97	1.137
Rectangular	18	34.09	26.21	36.6	1.396
Cuadrada	18	36.72	26.21	36.72	1.401
Ce	18	30.51	26.21	27.59	1.053
Cruz	18	29.71	26.21	28.41	1.084
L	18	29.71	26.21	25.95	0.99
Rectangular	30	87.88	60.28	95.7	1.588
Cuadrada	30	97.08	60.28	82.5	1.369
Ce	30	75.61	60.28	54.5	0.904
Cruz	30	72.55	60.28	51.34	0.852
L	30	72.55	60.28	45.845	0.761
Rectangular	35	142.19	92.25	135	1.463
Cuadrada	35	158.84	92.25	145	1.572
Ce	35	119.99	92.25	98.5	1.068
Cruz	35	114.44	92.25	83.335	0.903
L	35	114.44	92.25	78.74	0.854

3.3 Factores de corrección Fqs para losas de cimentación de geometría irregular.

3.3.1 Escenario 2

3.3.2 Ajuste Escenario 2

En el escenario 2 se requirió un factor de corrección, mismo que fue obtenido del

promedio de los resultados de la validación de qu2 (capacidad de carga última, escenario 2) para los ángulos de fricción 0, 5,10 y 18. Posteriormente ajustando los resultados de capacidad de carga última de las geometrías irregulares, en la tabla siguiente se muestra la obtención del factor de ajuste:

Forma	Ángulo de fricción interna (Ø)	GTS-NX (ton/m ²)	Analítico (Fcs=1)	Diferencia Midas Mathcad	Regular				
					0	5.7	1.7	3.35	
					Regular	5	5.1	3.004	1.70
					Regular	10	9.1	5.24	1.74
					Regular	18	15.6	12.76	1.22
								promedio	2.00

3.3.3 Factores de corrección Fqs para losas de cimentación de geometría irregular.

Forma	Ángulo de fricción (Ø)	qu (ANALITICO) (ton/m ²)	qu (ANALÍTICO) (ton/m ²)-F=1	qu (MIDAS GTS-NX) (ton/m ²)	Factor (qu (MIDAS GTS-NX) /qu (ANALITICO) (ton/m ²)-F=1)
Rectangular	0	1.70	1.70	14.36	8.447
Cuadrada	0	1.70	1.70	2.85	1.674
Ce	0	1.70	1.70	2.25	1.322
Cruz	0	1.70	1.70	1.98	1.163
L	0	1.70	1.70	2.20	1.293
Rectangular	5	2.91	2.76	5.93	2.149
Cuadrada	5	3.00	2.76	2.55	0.923
Ce	5	2.84	2.76	3.15	1.140
Cruz	5	2.81	2.76	2.90	1.049
L	5	2.81	2.76	2.95	1.068
Rectangular	10	4.95	4.45	5.47	1.229
Cuadrada	10	5.24	4.45	4.54	1.021
Ce	10	4.73	4.45	4.99	1.122
Cruz	10	4.63	4.45	4.54	1.021
L	10	4.63	4.45	4.39	0.986
Rectangular	18	11.69	9.63	20.8	2.160
Cuadrada	18	12.76	9.63	7.79	0.809
Ce	18	10.78	9.63	10.29	1.068
Cruz	18	10.42	9.63	9.89	1.027
L	18	10.42	9.63	9.16	0.952
Rectangular	30	46.98	33.54	92.3	2.752
Cuadrada	30	52.9	33.54	15.15	0.452
Ce	30	41.04	33.54	106.5	3.175
Cruz	30	39.09	33.54	112.23	3.346
L	30	39.09	33.54	101.745	3.034
Rectangular	35	89.99	60.21	31	0.515
Cuadrada	35	102.36	60.21	122.60	2.036
Ce	35	76.84	60.21	60	0.997
Cruz	35	72.78	60.21	59.68	0.991
L	35	72.78	60.21	44.495	0.739

Factores de corrección Fys para losas de cimentación de geometría irregular.

Escenario 3

Forma	Ángulo de fricción (Ø)	qu (ANALITICO) (ton/m ²)	qu (ANALITICO) (ton/m ²)-F=1	qu (MIDAS GTS-NX) (ton/m ²)	Factor (qu (MIDAS GTS-NX) /qu (ANALITICO) (ton/m ²)-F=1)
Rectangular	10	4.37	6.24	0	0

Molina, Pimentel / Ajuste de los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con MIDAS GTS NX

Cuadrada	10	5.24	4.45	3.88	0.87191011
Ce	10	4.73	4.4	5.57	1.26590909
Cruz	10	5.41	6.24	4.47	0.71634615
L	10	5.41	6.24	3.66	0.58653846

3.4 Correlación lineal múltiple y factores de forma ajustados

3.4.1 Escenario 1

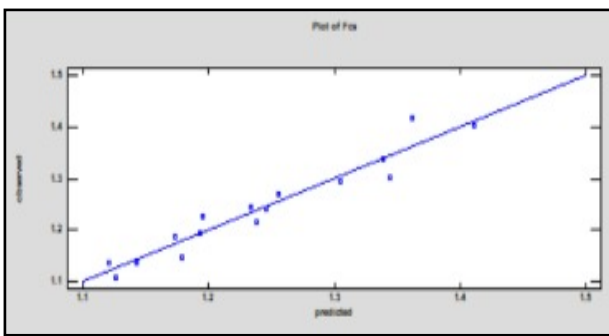


Figura 9. Gráfica predichos vs observados escenarios 1

La recta que mejor se ajusta a los datos es la que minimiza las diferencias (elevadas al cuadrado) de los puntos con respecto a la recta (recta de cuadrados mínimos). El r^2 del coeficiente de correlación, viene del concepto de regresión.

$$Fcs = 0.921962 + 0.0818266 * Nc - 0.101821 * Nq - 0.0477894 * \frac{A}{P}$$

Coefficiente de determinación (R^2) = **93.368%**

3.4.2 Escenario 2

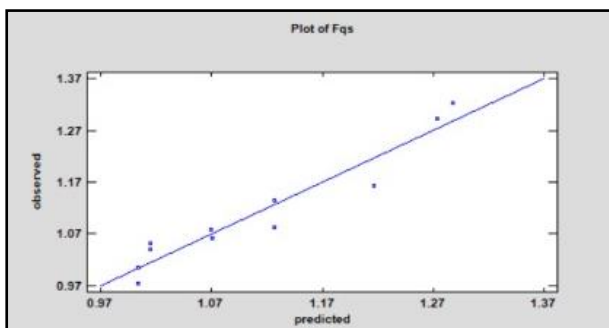


Figura 10. Gráfica predichos vs observados escenarios 2

$$Fqs = 1.91282 + 0.681343 * Fqs \text{ Meyerhof} + 0.037509 * B - 0.0140618 * L + 0.627003 * Nq - 0.376407 * Nc$$

Coefficiente de determinación (R^2) = **92.48%**

3.4.3 Escenario 3

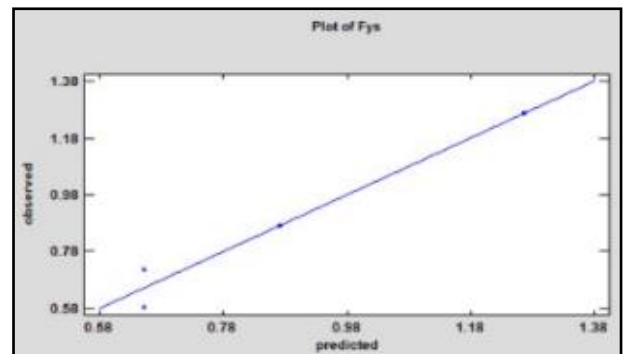


Figura 11. Gráfica predichos vs observados escenarios 3

$$Fys = -0.252937 - 0.0250142 * A + 0.0751643 * P$$

Coefficiente de determinación (R^2) = **92.19%**

3.5 Discusión

- El coeficiente de determinación ajustado (R^2) indica que existe un 93.368% en el escenario 1, 92,48 % en el escenario 2 y un 92.19 % en el escenario 3, existe una bondad en el ajuste de los factores Fcsi, Fqsi & Fysi.
- Los parámetros L y B tomados para el análisis; L es la longitud mayor de la

- geometría mientras B es el ancho con mayor dimensión.

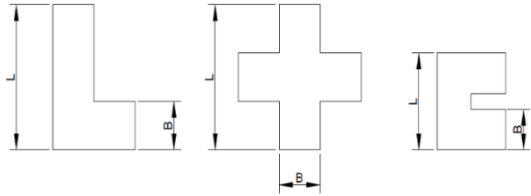


Figura 12. Geometrías irregulares.

- Para el correcto uso de los factores de corrección por forma de geometría irregular siempre el área y perímetro deben ser ingresados en metros cuadrados y metros lineales respectivamente. Los factores serán adimensionales.
- Se corrobora que existe una dependencia de la capacidad de carga última del suelo que está, en función de la geometría de la losa de cimentación, por ejemplo: las losas de
- cimentación de forma Ce y Cruz; con parámetro, cohesión: 2 ton/m², ángulo de fricción 18°, sobrecarga 1.7 ton/m², ubicados en el escenario 2 de análisis de la investigación; donde los resultados difieren de la siguiente manera: $q_{u_{ce}(MIDASGTS-NX)}=10.29$ ton/m² y $q_{u_{cruz}(MIDASGTS-NX)}=9.89$ ton/m² así entonces, queda demostrado que la característica geométrica de la cimentación tiene relación directa con la capacidad de carga última del suelo.

3.6 Comprobación de los factores de forma ajustados con una geometría distinta de losa de cimentación.

El suelo usado para la comprobación de los factores de corrección por forma obtenidos en la investigación tuvo como propiedades una cohesión de 2.2 ton/m², un ángulo de fricción de 15 grados, un peso específico de 1,8 ton/m³, profundidad de desplante de 1.5 m y una sobrecarga de 2.7 ton/m².

La geometría de losa de cimentación irregular distinta a las analizadas que fue verificada tiene una longitud de 15 m, un ancho

de 5 m, un área de 130 m² y un perímetro de 57 m.

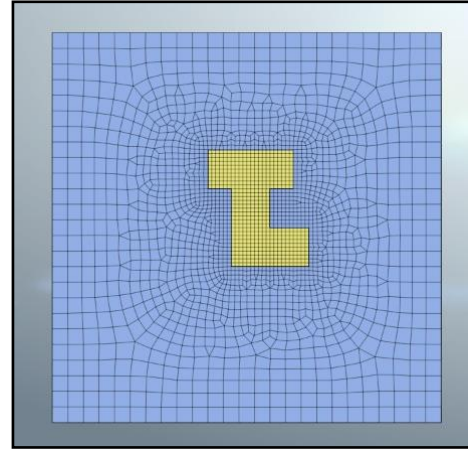


Figura 13. Grafica geometría a verificar en GTS NX

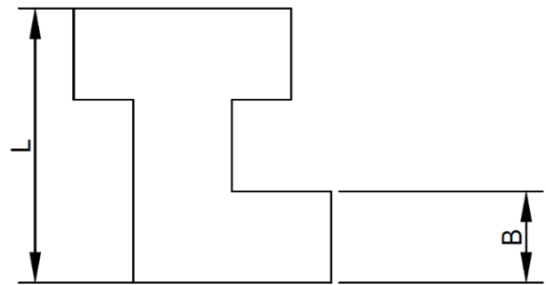


Figura 14. Grafica geometría a verificar

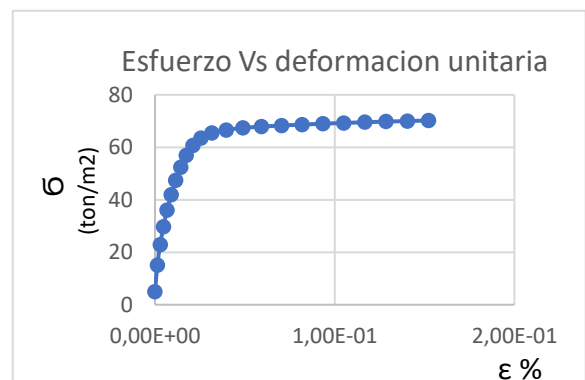


Figura 15. Grafica esfuerzo vs deformaciones unitarias.

Molina, Pimentel / Ajuste de los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con MIDAS GTS NX

La capacidad de carga última del suelo obtenida en el software Midas GTS NX como muestra la gráfica 14 arrojó un valor de 71.4 ton/m².

A su vez la ecuación de Meyerhof con los factores de forma ajustados, obtenidos en esta investigación arrojó un valor de 78,29 ton/m², existiendo un error del 8,8%.

Mientras que los resultados obtenidos mediante la ecuación de Meyerhof sin ajustar los factores de forma, dió un valor de 52.23 ton/m², existiendo un error del 36,7%. Los factores de corrección por forma ajustados disminuyen el error brindando resultados aceptables que se ajustan a la realidad.

4. Conclusiones

- Mediante la modelación numérica a través de MIDAS GTS-NX se validaron en una losa de geometría regular, cuadrada de dimensiones B=4 m y L= 4 m. Los distintos escenarios propuestos para los valores de qu, mismos que fueron planteados en los 3 términos de la Ec. de Meyerhof para cálculo de capacidad de carga última: qu1, qu2 y qu3 logrando así, que los valores obtenidos con las ecuaciones parciales para cada tramo de la ecuación de Meyerhof se asemejaran a los valores entregados por la modelación numérica.

$$Fcs = 0.921962 + 0.0818266Nc - 0.101821 * Nq - 0.0477894 * \frac{A}{P}$$

$$Fqs = 1.91282 + 0.681343 * Fqs \text{ Meyerhof} + 0.037509 * B - 0.0140618 * L + 0.627003 * Nq - 0.376407 * Nc$$

$$Fys = -0.252937 - 0.0250142 * A + 0.0751643 * P$$

- Los modelos irregulares de características geométricas “Ce”, “Cruz” y “L” fueron generados adecuadamente en cada uno de los escenarios validados con la geometría regular. Se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación mismas que permitieron identificar la zona de falla del suelo en cada uno de los escenarios ANEXO 3.
- Para encontrar los parámetros dependientes fue necesario utilizar un artificio matemático: igualar a cero el factor de corrección por forma de Meyerhof en la ecuación de cada tramo, haciendo que el valor de cada Factor de corrección por forma irregular (Fi), sea una relación:

$$Fcsi = \frac{qu_{GTS-NX1}}{qu_{1ANALITICO}}$$

$$Fqsi = \frac{qu_{GTS-NX2}}{qu_{2ANALITICO}}$$

$$Fysi = \frac{qu_{GTS-NX3}}{qu_{3ANALITICO}}$$

- En el caso del tercer escenario, para el factor de corrección por forma irregular (encontrado en esta investigación), se mantiene en función únicamente de la geometría de la losa irregular: longitud y ancho menor, al igual que en la expresión de Meyerhof.
- Con los factores calculados a partir de la relación; Modelo numérico – cálculo analítico (Meyerhof), se obtuvieron las variables dependientes (Fi) y las variables independientes, que para efectos de esta investigación fueron: ancho (B), longitud (L), Nc, Nq, área, perímetro, con las cuales se realizó las correlaciones lineales múltiples con la que se logró obtener las ecuaciones para el cálculo de los factores de corrección por forma ajustados. Las ecuaciones obtenidas son:

- En la comparación de resultados de los factores de forma entre los obtenidos con los modelos numéricos y con las fórmulas propuestas, se aprecia un margen de error bajo, debido a que los coeficientes de determinación obtenidos (R^2) dieron valores superiores al 90 %.
- Los factores de forma ajustados presentan valores semejantes a la modelación numérica para las geometrías de las losas ensayadas, de la misma manera en geometrías distintas como la verificada (J), en el numeral 6 presenta un error permisible dentro de los límites aceptables.
- Se corroboró que con el aumento del ángulo de fricción la capacidad de carga última del suelo tiende a aumentar.
- Para el ajuste de los factores de forma se utilizó correlaciones lineales múltiples debido a que los parámetros no se ajustaron para otro tipo de correlación. Donde se pudo observar cómo se ajustaban a la línea de tendencia. En la gráfica 8 se evidencia que tan solo un punto intenta salir de la tendencia, así también en la gráfica 10 donde se está representando la tendencia de las variables independientes para la obtención del factor de corrección por forma ajustado de la tercera parte de la ecuación (F_{ys}) de cálculo de la capacidad de carga última, mientras que en la gráfica 9 (F_{qs}) se observa una clara tendencia en todos sus puntos y un ajuste muy marcado entre sus variables independientes.

Referencias

[1] BARRETO, A. P; VALENCIA, Y; ECHEVERRI, O. (2013). Evaluación comparativa de la capacidad de carga

en cimentaciones profundas formulas analíticas y ensayos de carga. *BOLETIN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. Núm. 33. PP.: 93-109.* Obtenido de: <https://www.redalyc.org/pdf/1695/169528792007.pdf>

[2] BRAJA M. DAS (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones 7ma.*

[3] MONTERO GRANADOS. R (2016): Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada. España.
Nilson, A. (2001). Diseño de Estructuras de Cimientos. Bogotá: McGraw-Hill.

[4] User Manual Midas GTS NX Analysis Reference_Chapter-4 Materials, 2019

[5] User Manual Midas GTS NX Analysis Reference_Chapter-3 Elements, 2019

[6] Autor Universidad de los Andes, «Revisión e implementación de modelos constitutivos para suelos,» Universidad de los Andes, Bogotá, 2011.

[7] A. Nieto Leal, J. F. Camacho Tauta y E. F. Ruiz Blanco, «Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos,» Revista de ingenierías de la Universidad de Medellín, Medellín, 2009.

Molina, Pimentel / Ajuste de los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con MIDAS GTS NX

[8] C. Vintimilla Ávila, «Análisis de modelos constitutivos para representar el comportamiento de los suelos del Sector las Orquídeas de la Ciudad de Cuenca, Ecuador,» Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, 2016.

[9] Revistas ingenierías Universidad de Medellín; DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LOS MODELOS ELASTOPLÁSTICOS MOHR-COULOMB Y HARDENING SOIL EN SUELOS ARCILLOSOS. Nieto A. Camacho J. Ruiz E. 2009

[10] MONTERO GRANADOS. R (2016): Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada. España.
Nilson, A. (2001). Diseño de Estructuras de Cimientos. Bogotá: McGraw-Hill.

[11] Canavos, George C. (1988). "Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos". Ed.: McGraw Hill.

[12] Lambe W y Whitman R, 2004, Mecánica de Suelos, México.

[13] Nilson, A. (2001). Diseño de Estructuras de Cimientos. Bogotá: McGraw-Hill.

[14] Reissner, E., "On a variational theorem in elasticity," Journal of Mathematical Physics, Vol. 29, 1950.

[15] JUAREZ BADILLO E. y RICO RODRIGUEZ, A. Mecánica de Suelos, Tomo 11. Segunda edición, Editorial Limusa, México, 1973.

ANEXOS

ANEXO 1

Resumen de tipo de cimentación, parámetros geo mecánicos y resultados del modelo numérico y analítico

Escenario 1

Forma	ángulo de fricción (Ø)	GTS-NX (ton/m2)	ANALITICO O (ton/m2)	Fcs	Fcs Cal Meyerhof	B (m)	L (m)	A(real)	P(real)	Nc	Nq	A/P
Regular	0	12.9	10.28	1.255	1.195	4	4	16	16	5.14	1	1
Regular	5	11.7	12.98	1.448	1.242	4	4	16	16	6.489	1.568	1
Regular	10	11.7	16.69	1.522	1.296	4	4	16	16	8.345	2.471	1
Regular	18	11.4	26.21	1.759	1.401	4	4	16	16	13.104	5.258	1
Regular	30	95.7	60.28	1.588	1.611	4	4	16	16	30.14	18.401	1
Regular	35	135	92.25	1.463	1.722	4	4	16	16	46.124	33.296	1
Ce	0	18.8	10.28	1.138	1.081	5	12	110	54	5.14	1	2.037
Ce	5	15.9	12.98	1.225	1.101	5	12	110	54	6.489	1.568	2.037
Ce	10	15.4	16.69	1.270	1.123	5	12	110	54	8.345	2.471	2.037
Ce	18	14.9	26.21	1.415	1.167	5	12	110	54	13.104	5.258	2.037
Ce	30	54.5	60.28	0.904	1.254	5	12	110	54	30.14	18.401	2.037
Ce	35	98.5	92.25	1.068	1.301	5	12	110	54	46.124	33.296	2.037
Cruz	z	25.4	10.28	1.138	1.065	6	18	180	72	5.14	1	2.5
Cruz	5	21.2	12.98	1.186	1.081	6	18	180	72	6.489	1.568	2.5
Cruz	10	20.8	16.69	1.246	1.099	6	18	180	72	8.345	2.471	2.5
Cruz	18	20.3	26.21	1.339	1.134	6	18	180	72	13.104	5.258	2.5
Cruz	30	51.34	60.28	0.852	1.204	6	18	180	72	30.14	18.401	2.5
Cruz	35	83.335	92.25	0.903	1.241	6	18	180	72	46.124	33.296	2.5
L	0	46.1	10.28	1.109	1.065	6	18	144	60	5.14	1	2.4
L	5	37.1	12.98	1.148	1.081	6	18	144	60	6.489	1.568	2.4
L	10	35.1	16.69	1.216	1.099	6	18	144	60	8.345	2.471	2.4
L	18	34.1	26.21	1.301	1.134	6	18	144	60	13.104	5.258	2.4
L	30	45.845	60.28	0.761	1.204	6	18	144	60	30.14	18.401	2.4
L	35	78.74	92.25	0.854	1.241	6	18	144	60	46.124	33.296	2.4

Escenario 2

Forma	ángulo de fricción (Ø)	GTS-NX (ton/m2)	ANALITICO (ton/m2)	Fqs	Fqs Cal Meyerhof	B (m)	L (m)	A(real)	P(real)	Nc	Nq	A/P
Regular	0	5.7	1.7	1.68	1	4	4	16	16	5.14	1	1
Regular	5	5.1	2.76	1.32	1.087	4	4	16	16	6.489	1.568	1
Regular	10	9.1	4.45	1.16	1.176	4	4	16	16	8.345	2.471	1
Regular	18	15.6	9.63	1.29	1.325	4	4	16	16	13.104	5.258	1
Regular	30	92.3	33.54	2.752	1.577	4	4	16	16	30.14	18.401	1
Regular	35	31	60.21	0.515	1.7	4	4	16	16	46.124	33.296	1
Ce	0	4.5	1.7	0.92	1	5	12	110	54	5.14	1	2.037
Ce	5	6.3	2.74	1.15	1.036	5	12	110	54	6.489	1.568	2.037
Ce	10	10	4.4	1.06	1.073	5	12	110	54	8.345	2.471	2.037
Ce	18	20.6	9.49	1.08	1.135	5	12	110	54	13.104	5.258	2.037
Ce	30	106.5	33.54	3.175	1.241	5	12	110	54	30.14	18.401	2.037
Ce	35	122.60	60.21	2.036	1.292	5	12	110	54	46.124	33.296	2.037
Cruz	0	3.96	1.7	1.02	1	6	18	180	72	5.14	1	2.5
Cruz	5	5.8	2.73	1.14	1.029	6	18	180	72	6.489	1.568	2.5
Cruz	10	9.1	4.37	1.04	1.059	6	18	180	72	8.345	2.471	2.5
Cruz	18	19.8	9.4	1.01	1.108	6	18	180	72	13.104	5.258	2.5
Cruz	30	112.23	33.54	3.35	1.192	6	18	180	72	30.14	18.401	2.5
Cruz	35	59.68	60.21	0.99	1.233	6	18	180	72	46.124	33.296	2.5
L	0	4.4	1.7	0.81	1	6	18	144	60	5.14	1	2.4
L	5	5.9	2.73	1.09	1.029	6	18	144	60	6.489	1.568	2.4
L	10	8.79	4.37	1.05	1.059	6	18	144	60	8.345	2.471	2.4
L	18	34.1	9.4	0.98	1.108	6	18	144	60	13.104	5.258	2.4
L	30	101.745	33.54	3.034	1.192	6	18	144	60	30.14	18.401	2.4
L	35	44.495	60.21	0.738	1.233	6	18	144	60	46.124	33.296	2.4

Escenario 3

Forma	ángulo de fricción (Ø)	GTS-NX (ton/m2)	ANALITICO O (ton/m2)	Fys	Fys Cal Meyerhof	B (m)	L (m)	A(real)	P(real)	Nc	Nq	A/P
Regular	10	4.65	6.24	0.74	0.7	6	8	48	28	8.345	2.471	1.71428571
Ce	10	3.88	4.45	0.87	0.6	4	4	16	16	8.345	2.471	1
Cruz	10	5.55	5.2	1.06	0.833	5	12	110	54	8.345	2.471	2.037
L	10	4.44	6.24	0.71	0.867	6	18	180	72	8.345	2.471	2.5

ANEXO 2

Calculo capacidad de carga última factores de corrección por forma Meyerhof

Escenario 1

Forma	ángulo de fricción (ϕ)	B menor(m)	L(m)	quANALITICO
Regular	0	4	4	12,284
Regular	5	4	4	16,113
Regular	10	4	4	21,633
Regular	18	4	4	36,723
Regular	30	4	4	97.082
Regular	35	4	4	158.84
Ce	0	2	12	10,617
Ce	5	2	12	13,5
Ce	10	2	12	17,514
Ce	18	2	12	27,96
Ce	30	2	12	66.413
Ce	35	2	12	103.346
Cruz	0	6	18	10,95
Cruz	5	6	18	14,023
Cruz	10	6	18	18,337
Cruz	18	6	18	29,712
Cruz	30	6	18	72.547
Cruz	35	6	18	114.445
L	0	6	18	10,95
L	5	6	18	14,023
L	10	6	18	18,337
L	18	6	18	29,712
L	30	6	18	72.547
L	35	6	18	114.445

Escenario 2

Forma	ángulo de fricción (ϕ)	$B_{\text{menor}}(\text{m})$	L(m)	$q_{\text{ANALITICO}}(\text{ton/m}^2)$
Regular	0	4	4	1,7
Regular	5	4	4	3,004
Regular	10	4	4	5,24
Regular	18	4	4	12,761
Regular	30	4	4	52.904
Regular	35	4	4	102.364
Ce	0	2	12	1,7
Ce	5	2	12	2,901
Ce	10	2	12	4,846
Ce	18	2	12	10,884
Ce	30	2	12	39.242
Ce	35	2	12	71.257
Cruz	0	6	18	1,7
Cruz	5	6	18	2,809
Cruz	10	6	18	4,627
Cruz	18	6	18	10,418
Cruz	30	6	18	39.097
Cruz	35	6	18	72.778
L	0	6	18	1,7
L	5	6	18	2,809
L	10	6	18	4,627
L	18	6	18	10,418
L	30	6	18	39.097
L	35	6	18	72.778

Escenario 3

Forma	ángulo de fricción (ϕ)	Bmenor(m)	L(m)	qu_{ANALITICO}(ton/m²)
Regular	0	4	4	0
Regular	5	4	4	0,917
Regular	10	4	4	2,497
Regular	18	4	4	8,296
Regular	30	4	4	76.168
Regular	35	4	4	163.298
Ce	0	2	12	0
Ce	5	2	12	0,713
Ce	10	2	12	1,942
Ce	18	2	12	6,452
Ce	30	2	12	38.084
Ce	35	2	12	81.649
Cruz	0	6	18	0
Cruz	5	6	18	1,986
Cruz	10	6	18	5,411
Cruz	18	6	18	17,974
Cruz	30	6	18	114.253
Cruz	35	6	18	244.947
L	0	6	18	0
L	5	6	18	1,986
L	10	6	18	5,411
L	18	6	18	17,974
L	30	6	18	114.253
L	35	6	18	244.947

ANEXO 3

Curvas esfuerzo vs deformación unitaria

Losas regulares e irregulares

Ángulo de fricción interna 0

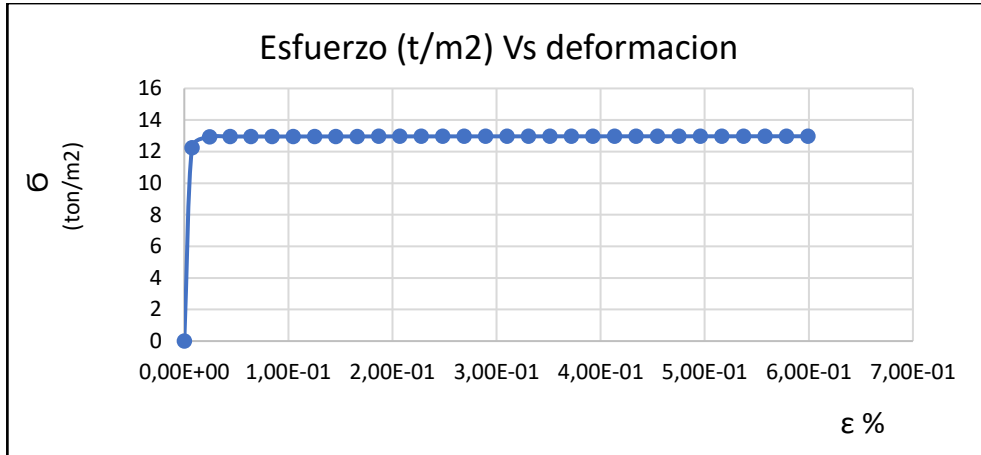


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 1 ángulo fricción 0

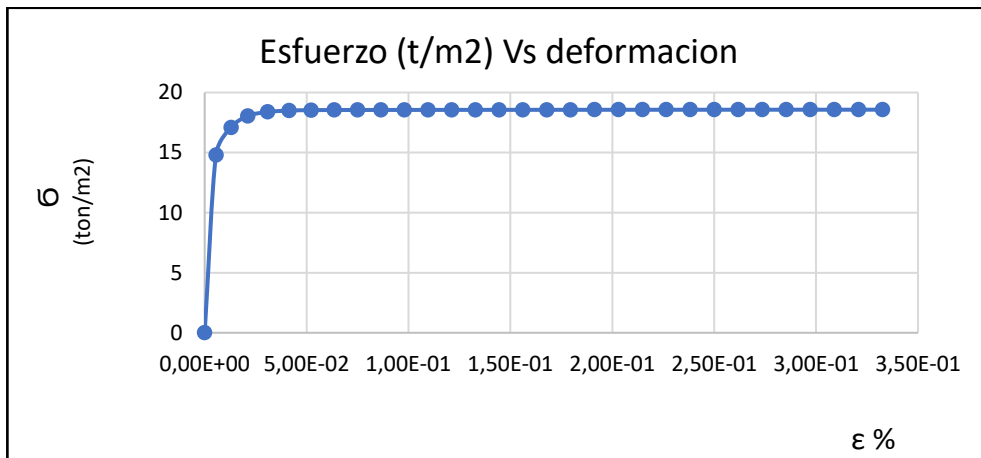


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 2 ángulo fricción 0

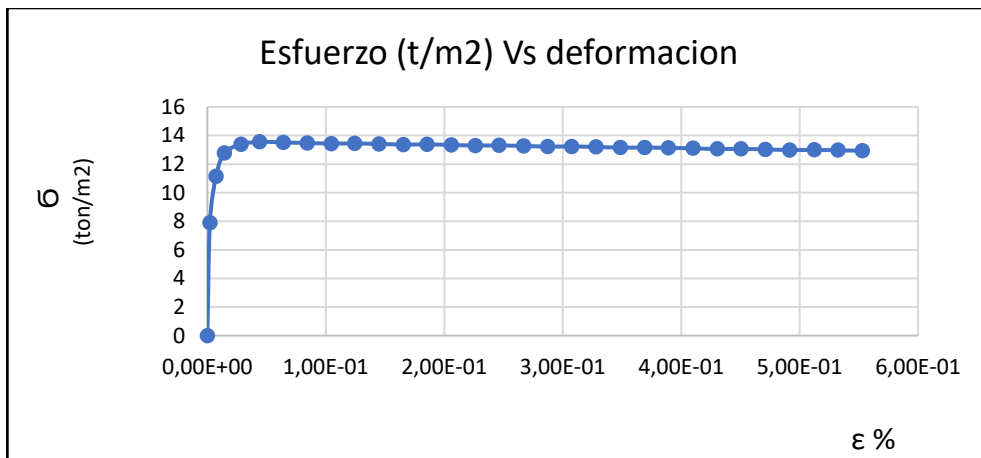


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 3 ángulo fricción 0

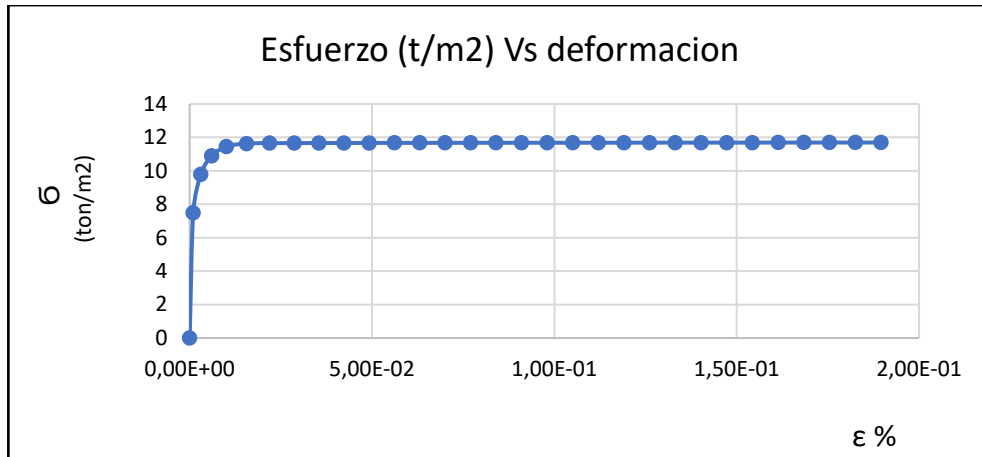


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 1 ángulo fricción 0

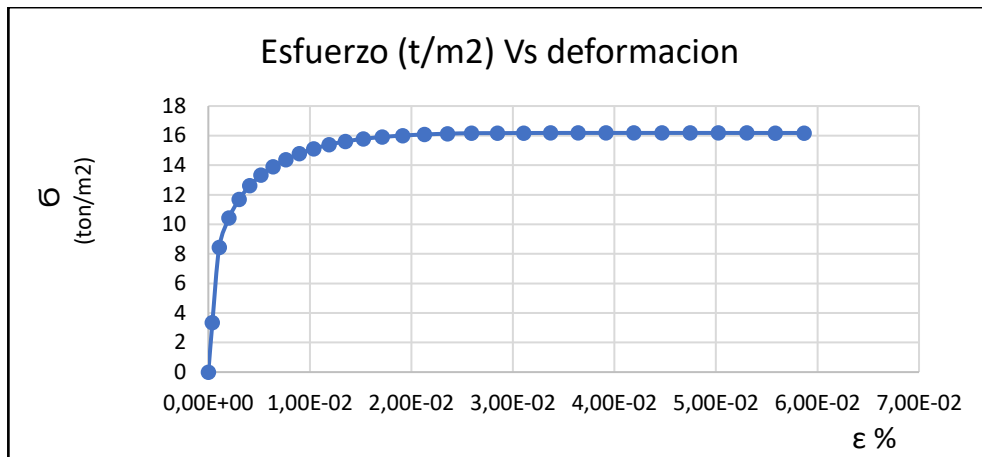


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 2 ángulo fricción 0

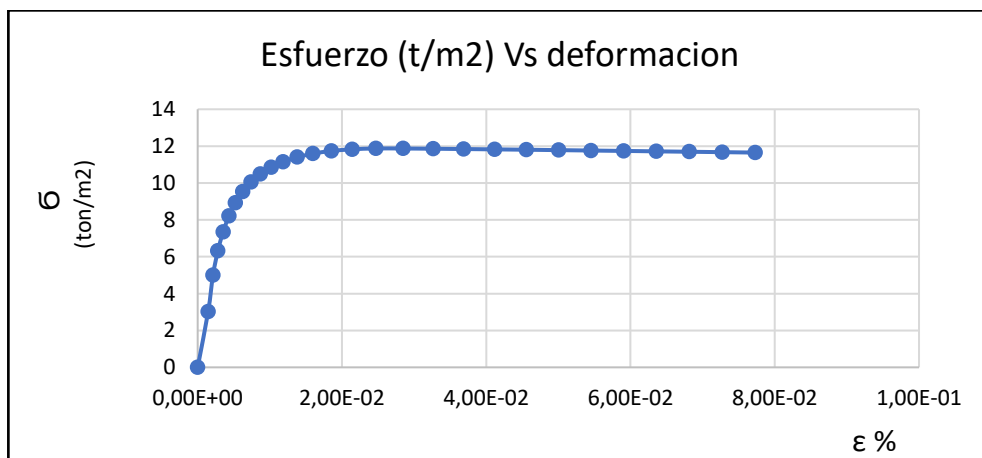


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 3 ángulo fricción 0

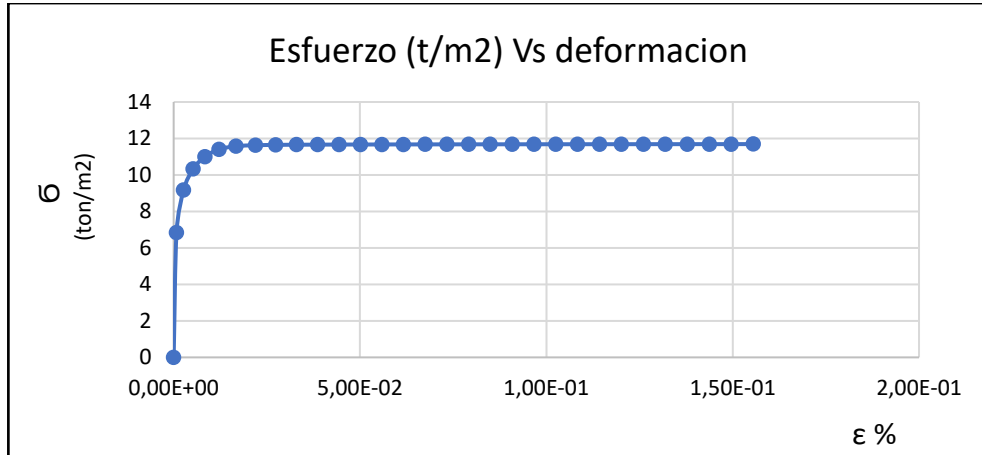


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 1 ángulo fricción 0

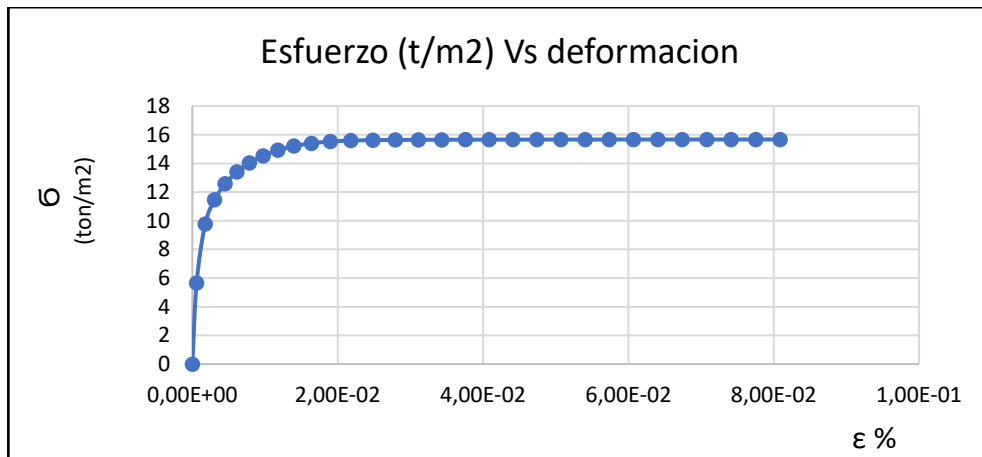


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 2 ángulo fricción 0

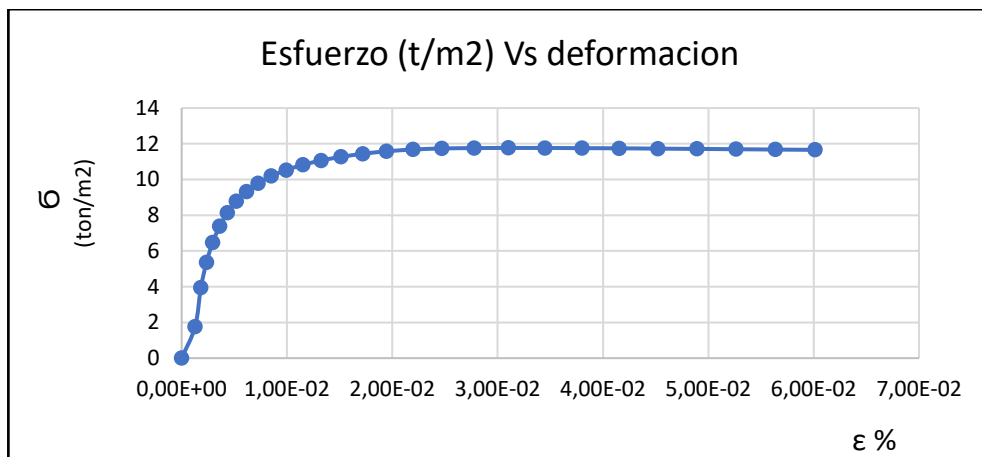


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 3 ángulo fricción 0

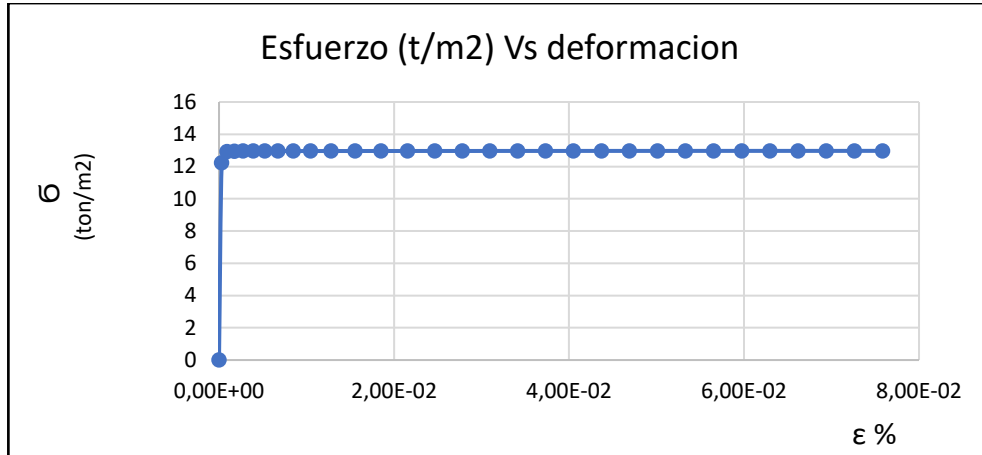


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 1 ángulo fricción 0

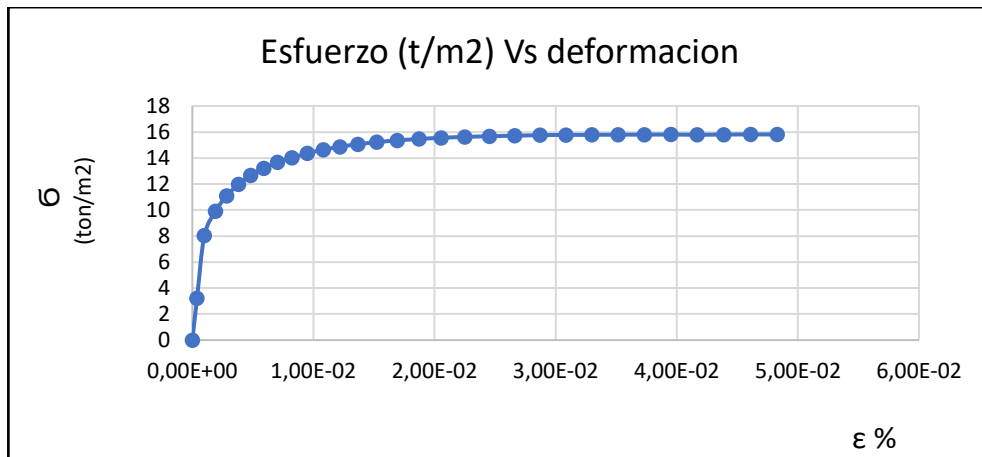


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 2 ángulo fricción 0

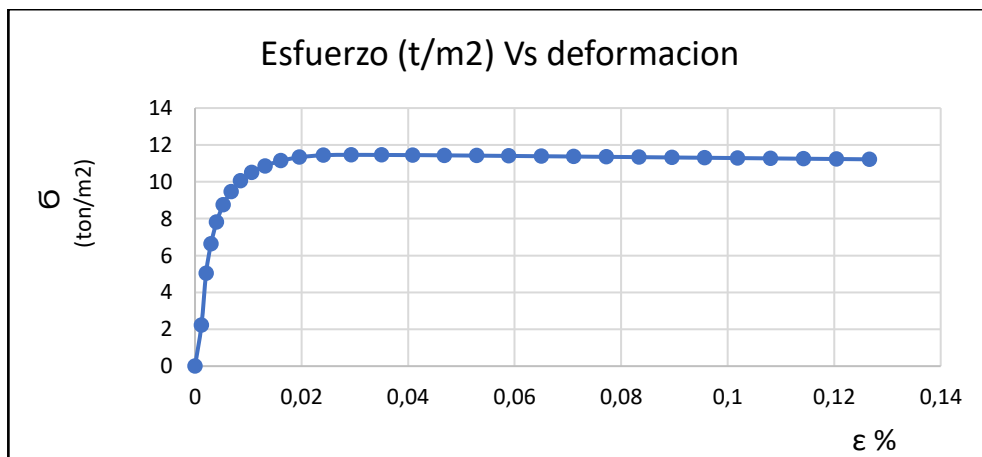


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 3 ángulo fricción 0

Ángulo de fricción interna 5

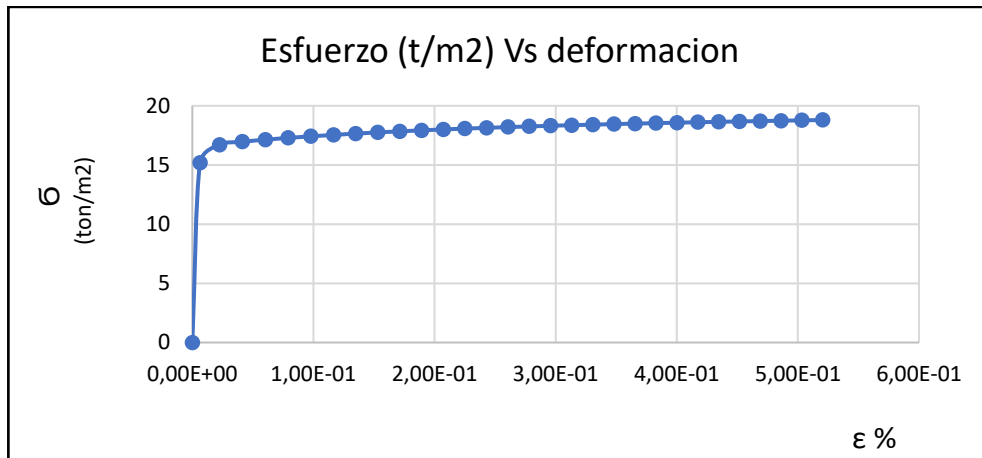


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 1 ángulo fricción 5

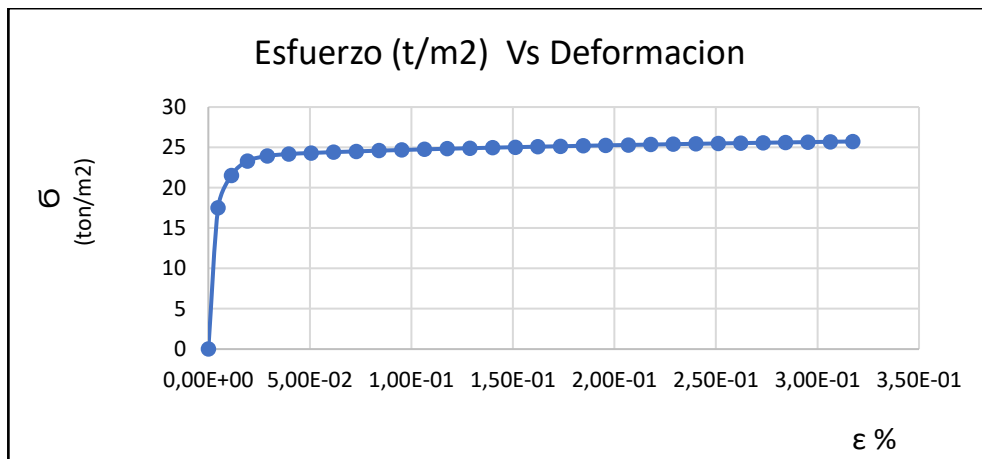


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 2 ángulo fricción 5

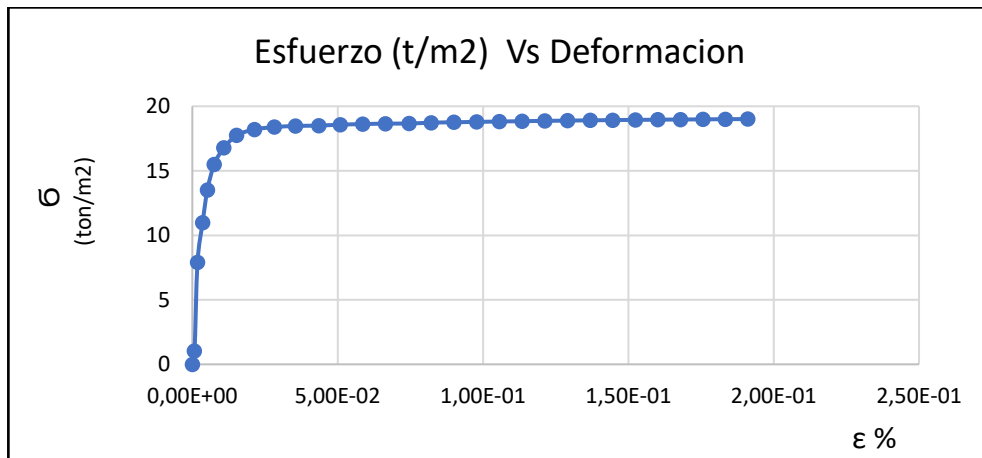


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 3 ángulo fricción 5

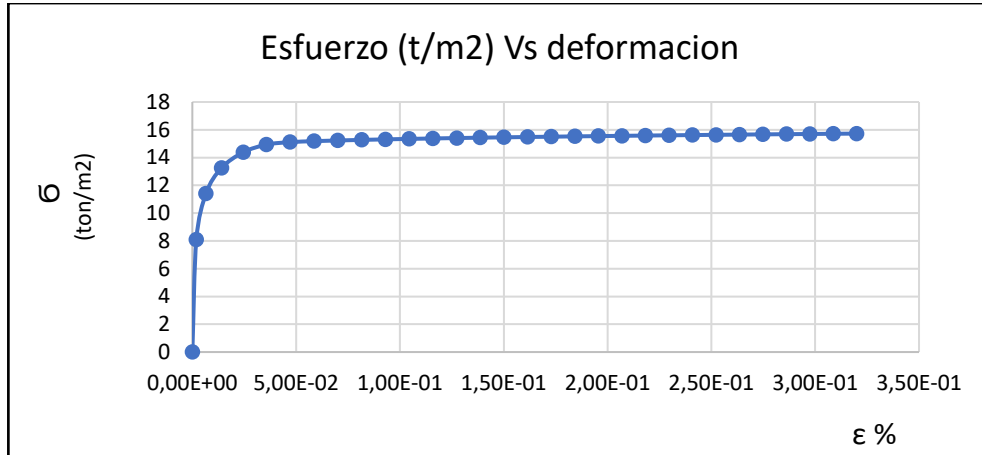


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 1 ángulo fricción 5

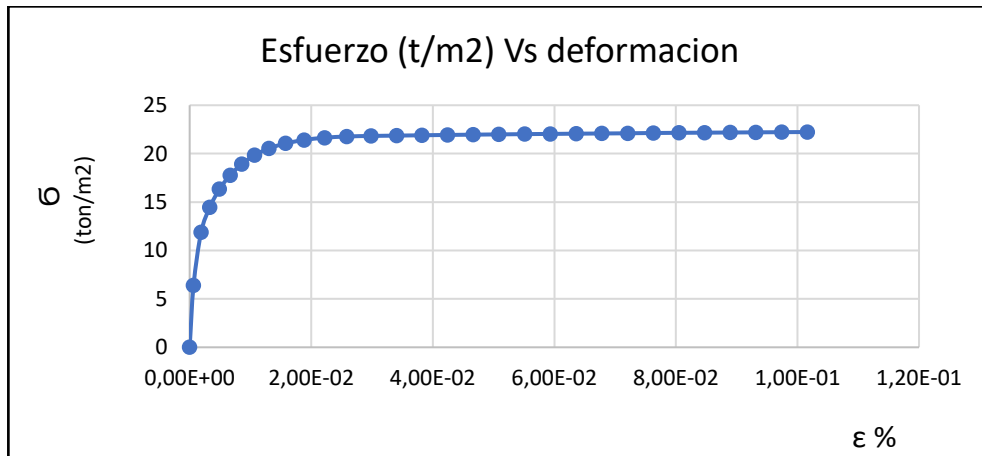


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 2 ángulo fricción 5

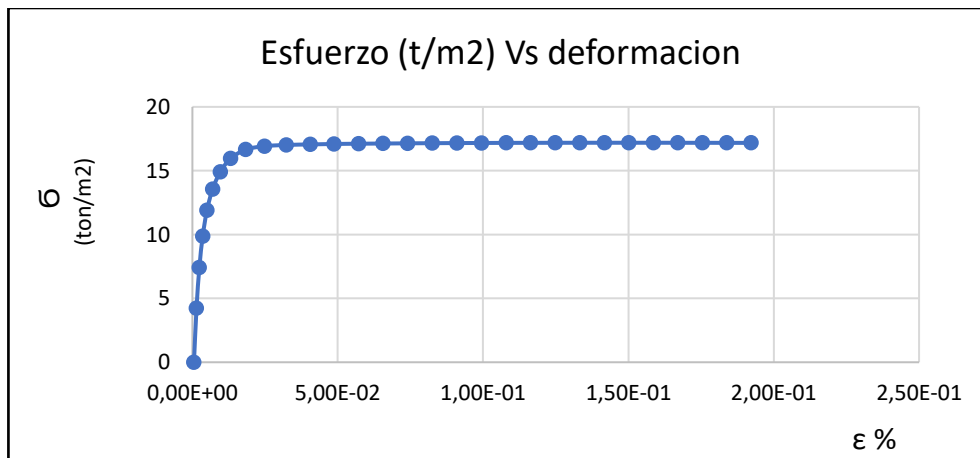


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 3 ángulo fricción 5

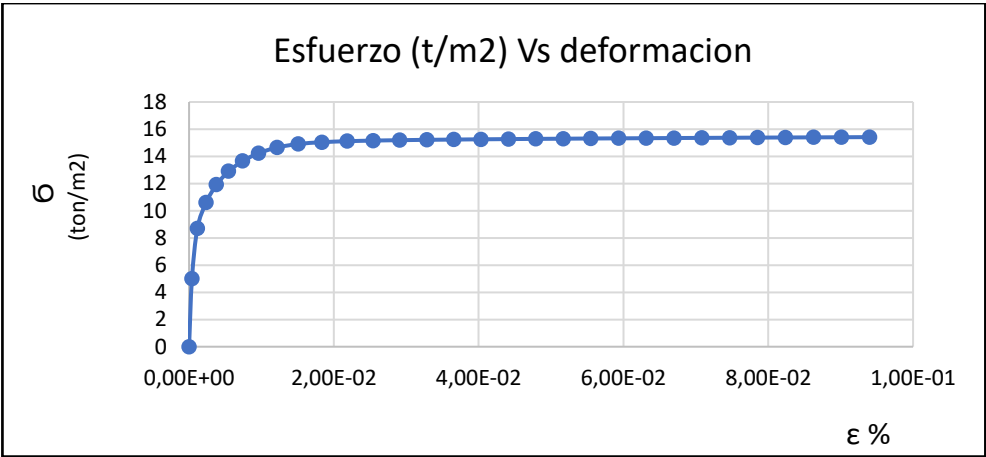


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 1 ángulo fricción 5

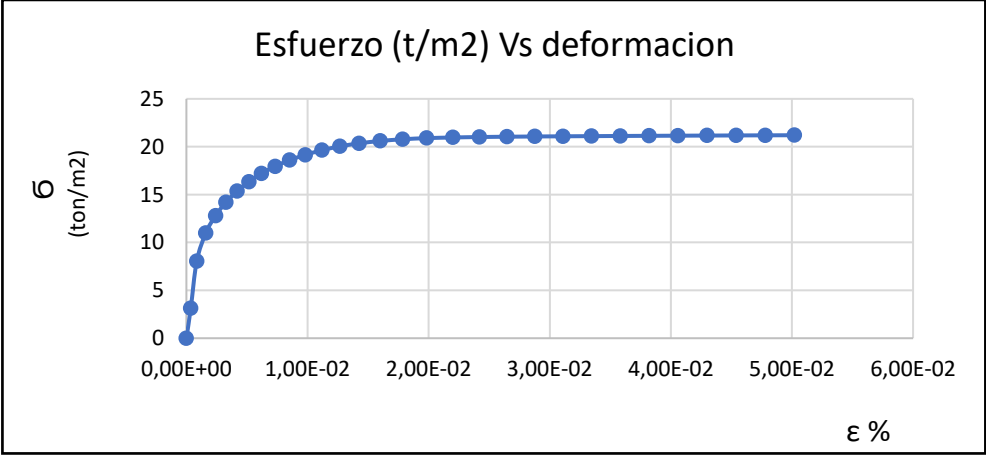


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 2 ángulo fricción 5

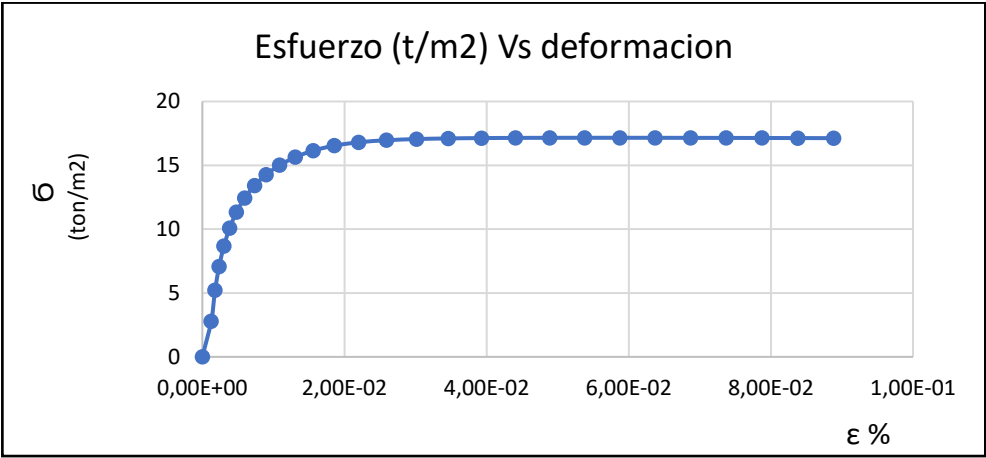


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 3 ángulo fricción 5

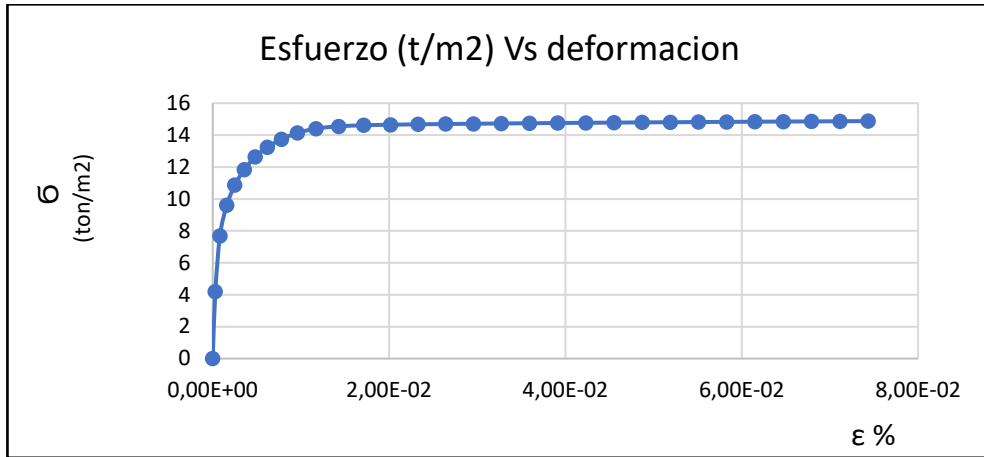


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 1 ángulo fricción 5

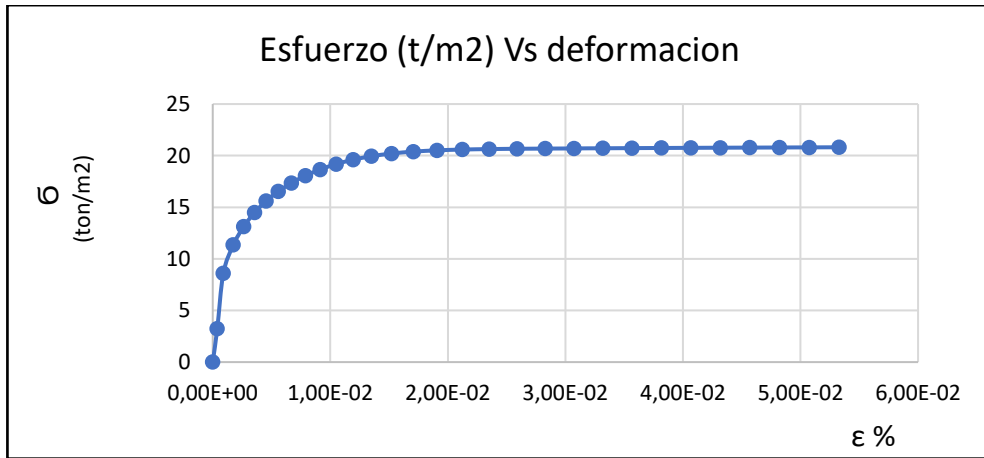


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 2 ángulo fricción 5

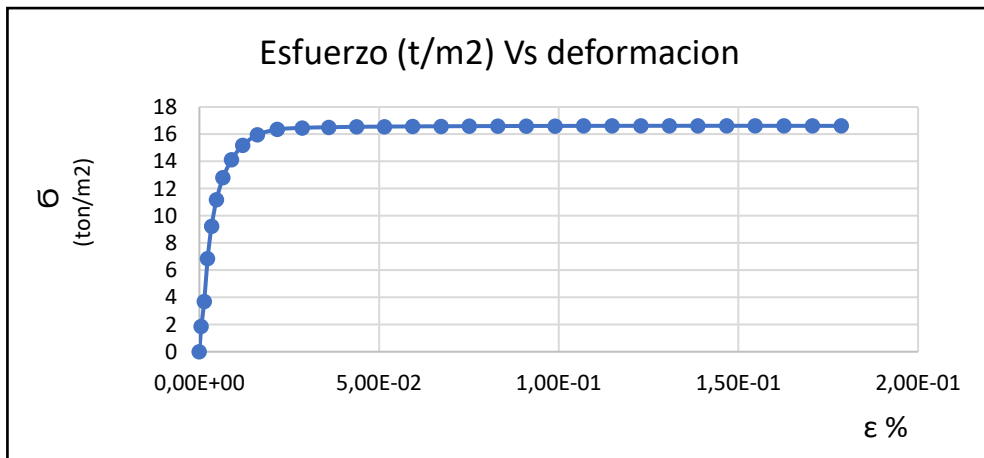


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 3 ángulo fricción 5

Ángulo de fricción interna 10

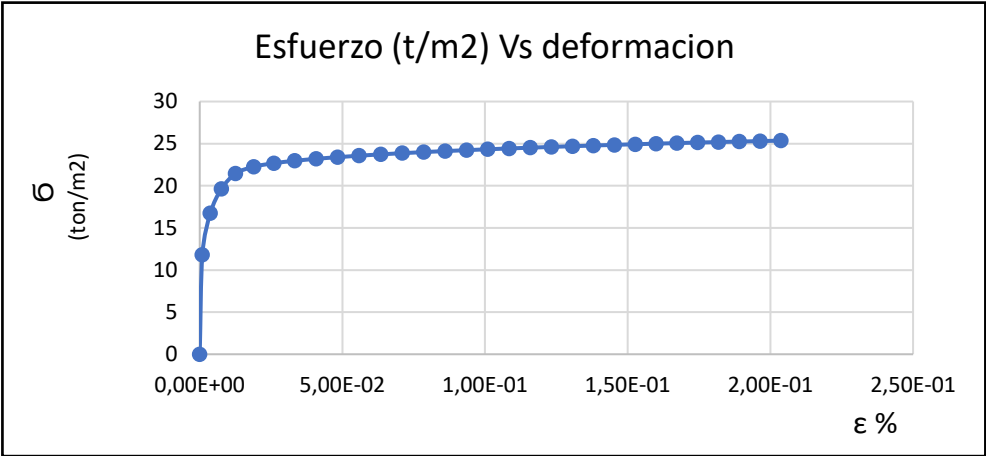


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 1 ángulo fricción 10

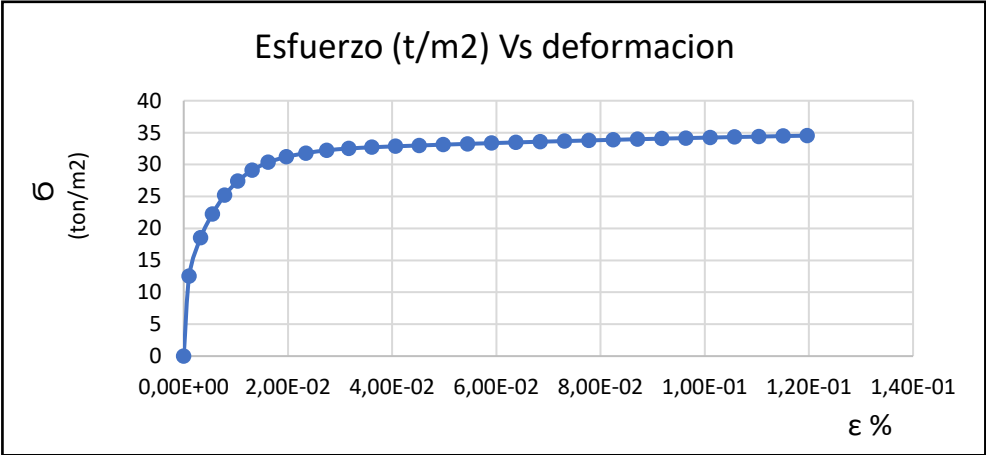


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 2 ángulo fricción 10

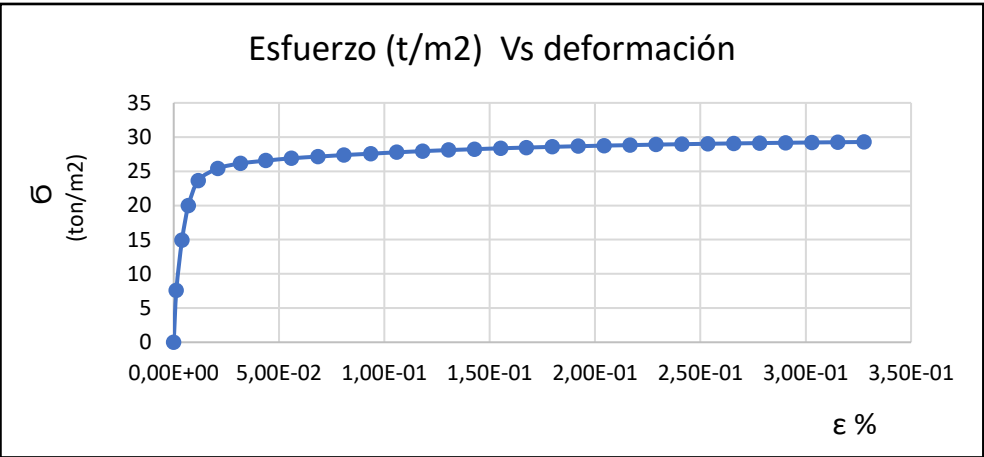


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 3 ángulo fricción 10

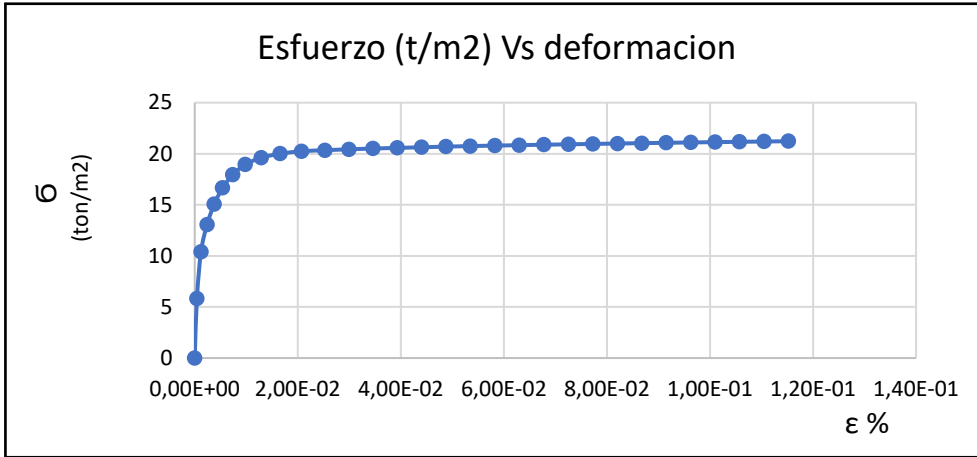


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 1 ángulo fricción 10

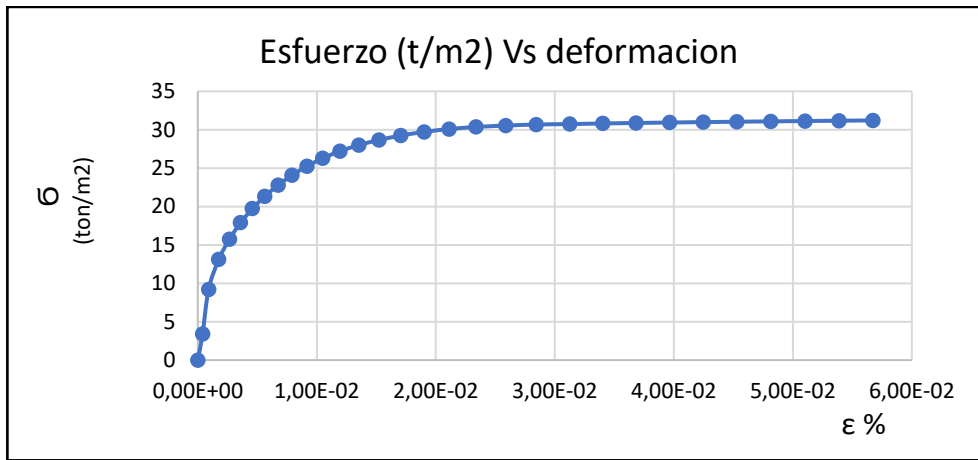


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 2 ángulo fricción 10

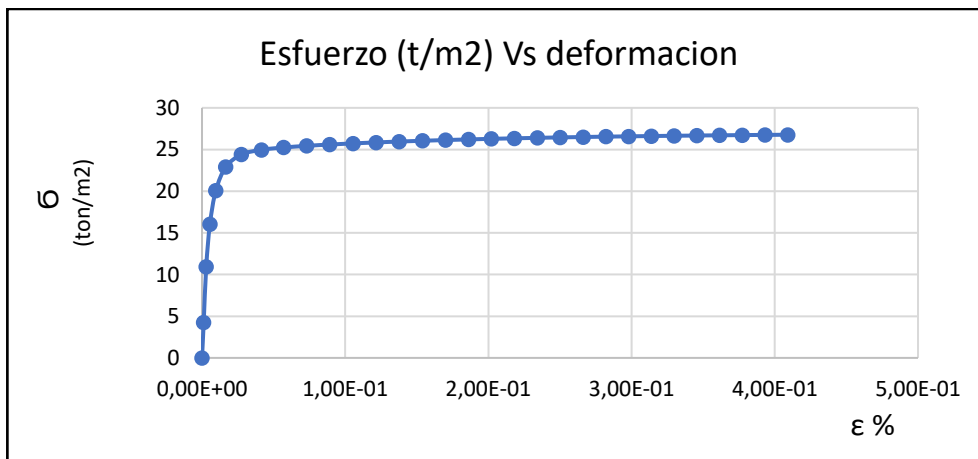


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 3 ángulo fricción 10

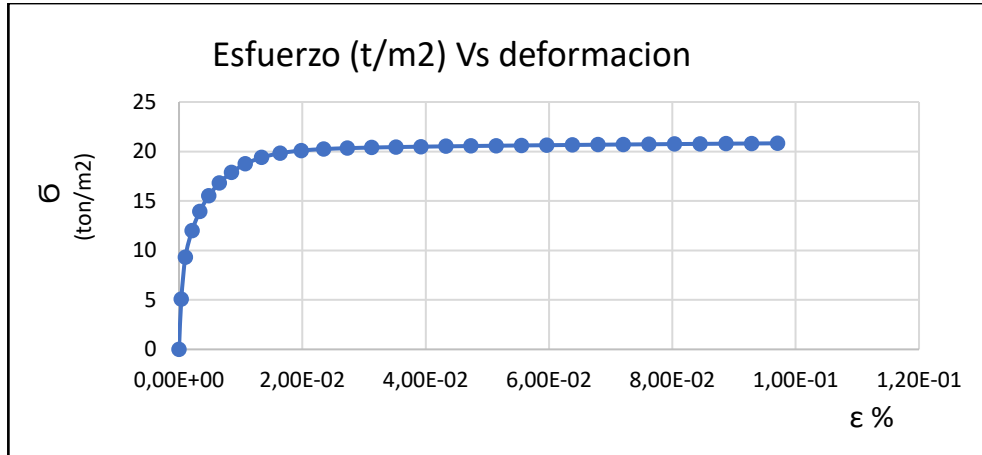


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 1 ángulo fricción 10

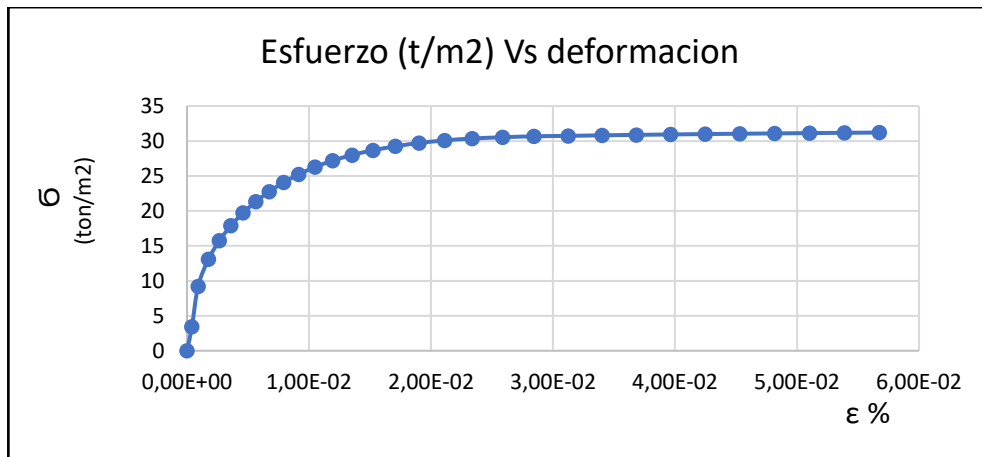


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 2 ángulo fricción 10

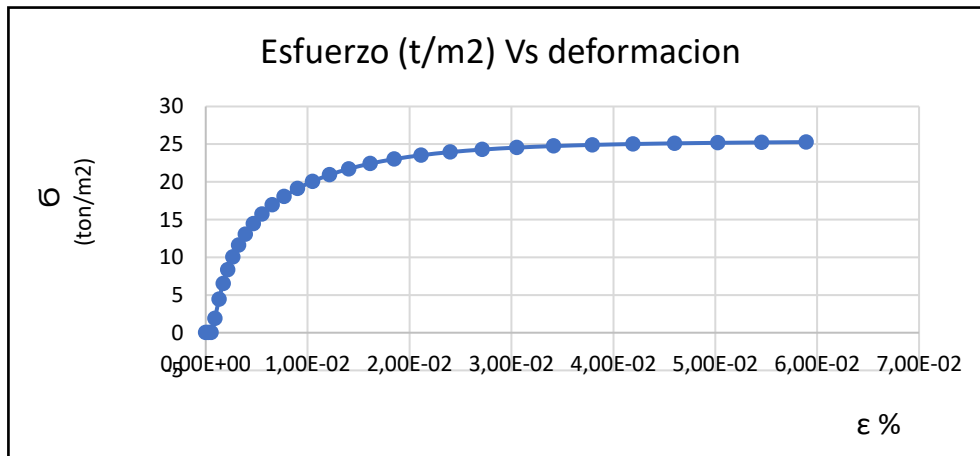


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 3 ángulo fricción 10

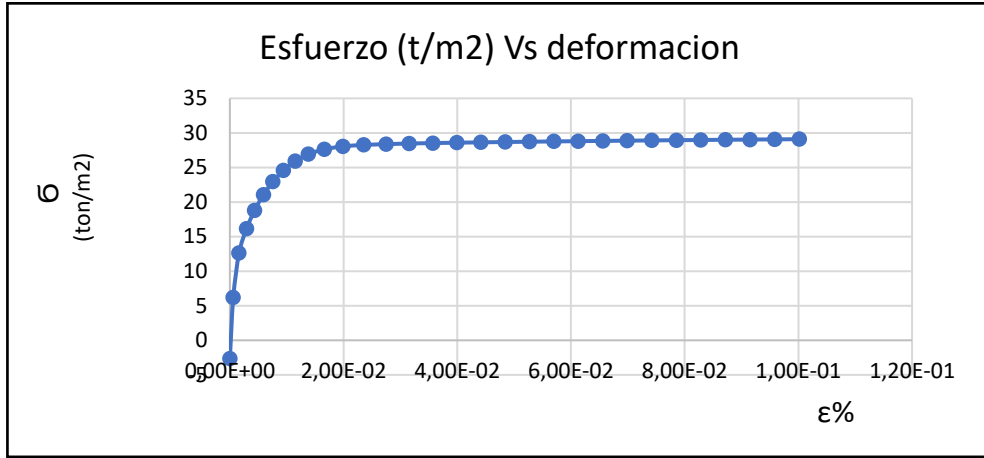


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 1 ángulo fricción 10

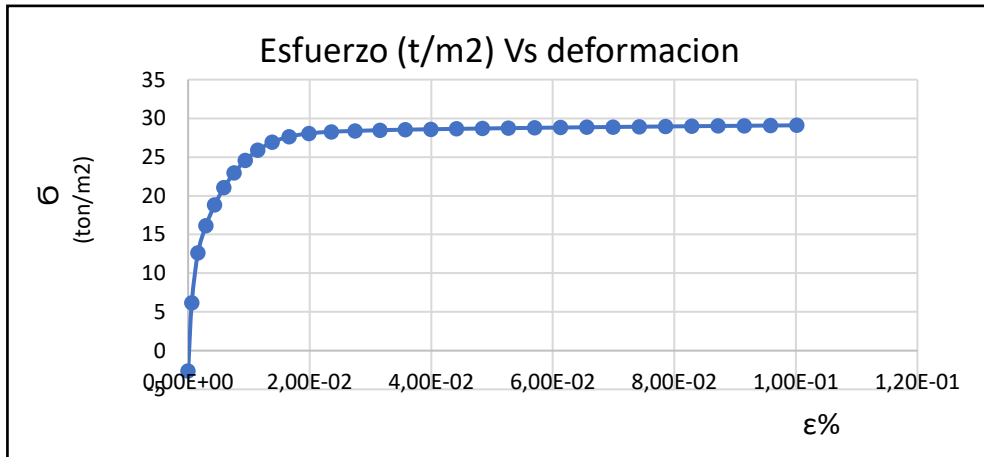


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 2 ángulo fricción 10

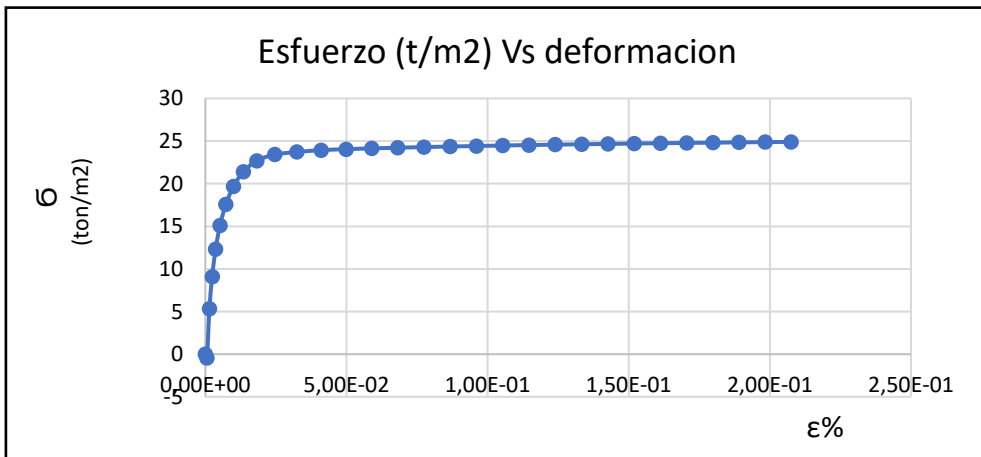


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 3 ángulo fricción 10

Ángulo de fricción interna 18

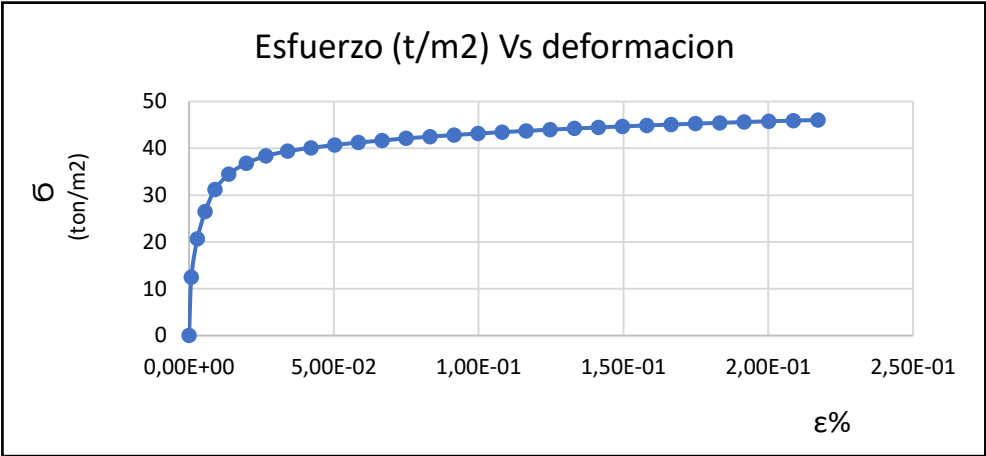


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 1 ángulo fricción 18

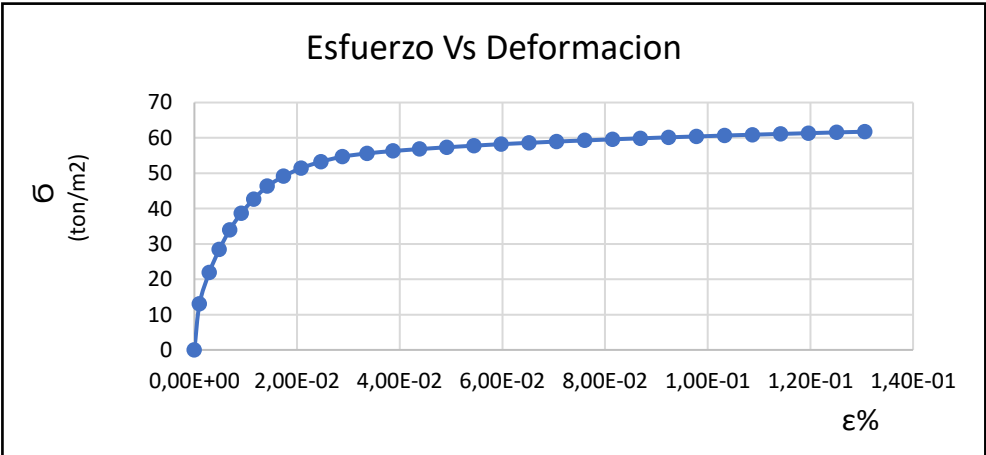


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 2 ángulo fricción 18

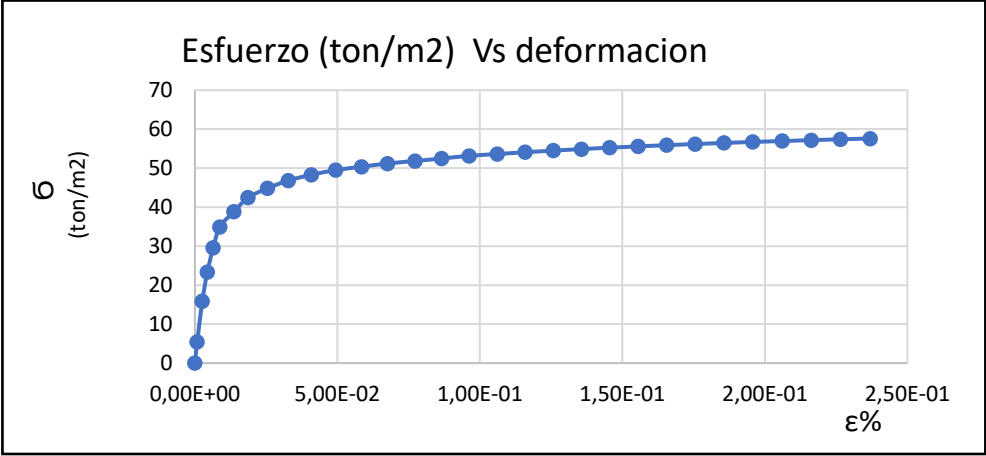


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 3 ángulo fricción 18

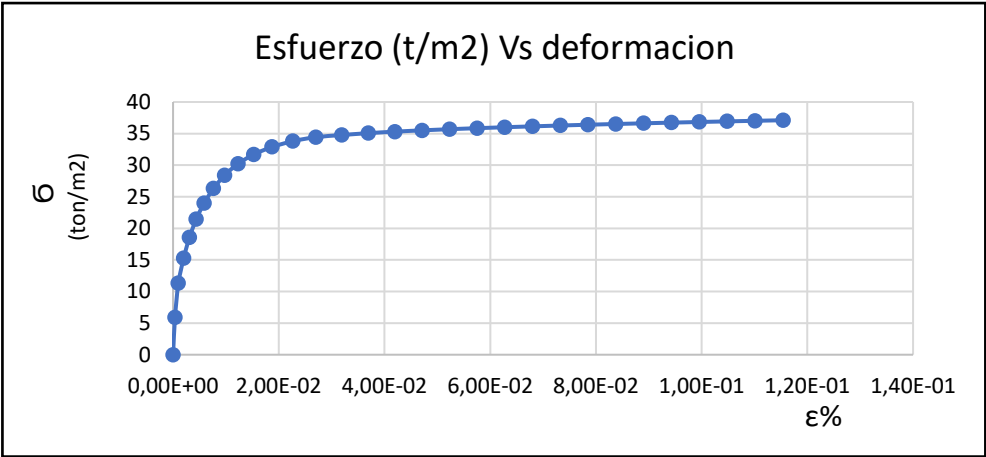


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 1 ángulo fricción 18

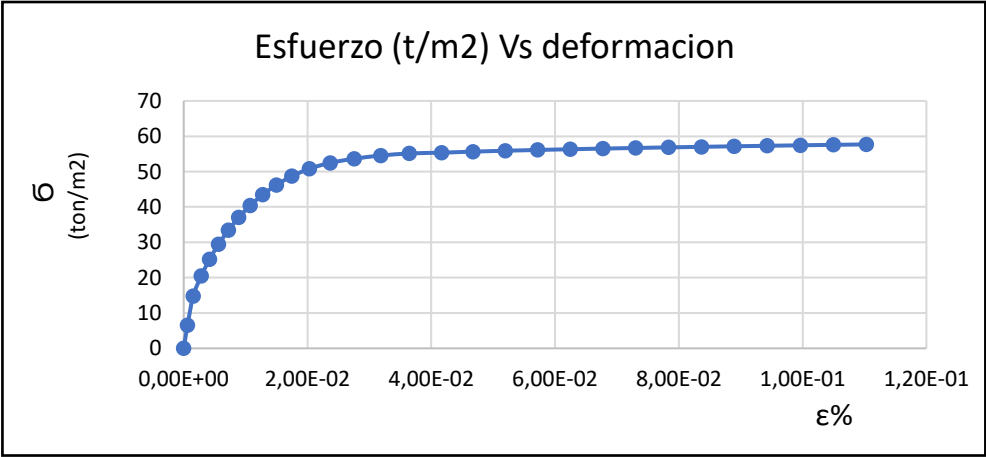


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 2 ángulo fricción 18

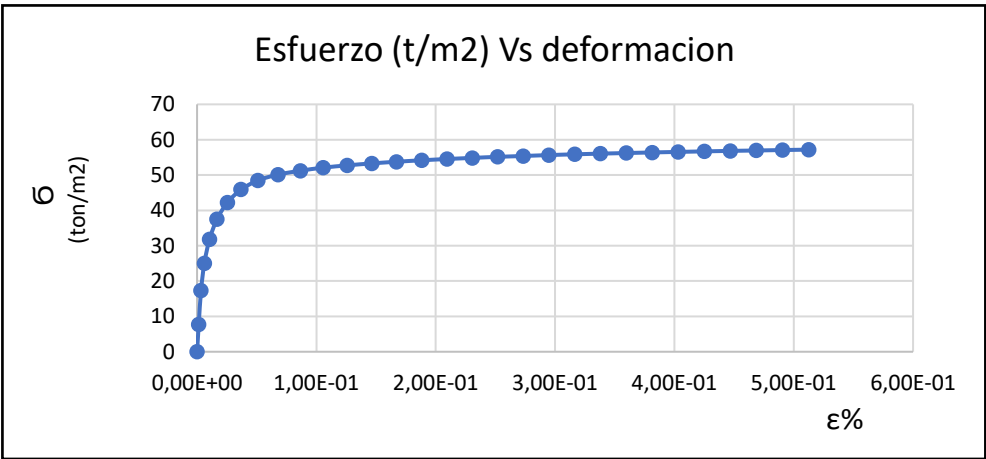


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 3 ángulo fricción 18

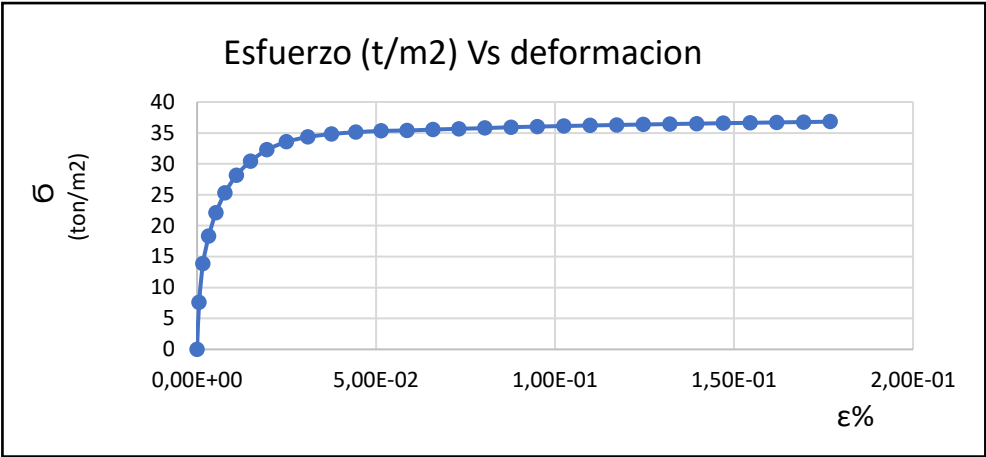


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 1 ángulo fricción 18

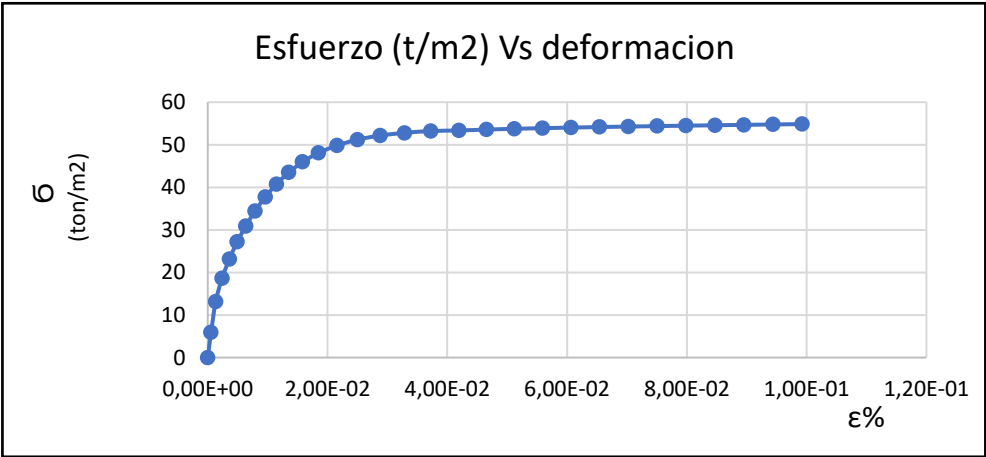


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 2 ángulo fricción 18

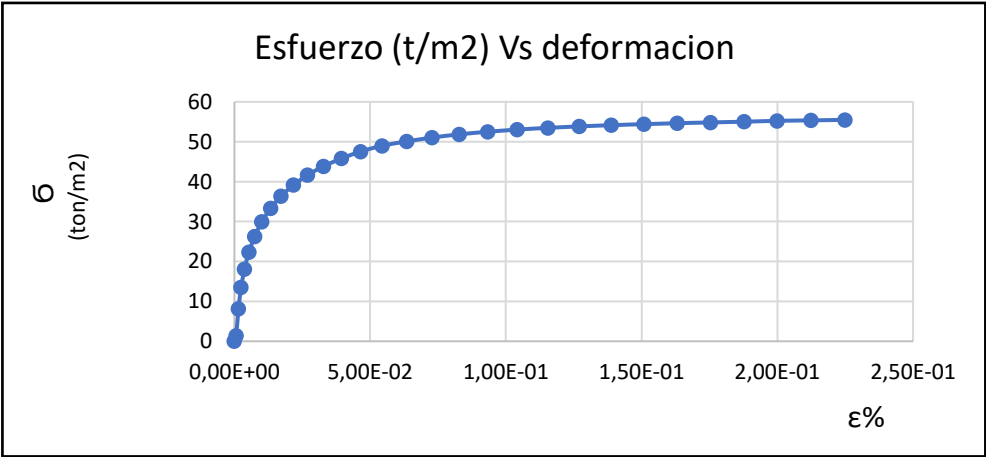


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 3 ángulo de fricción 18

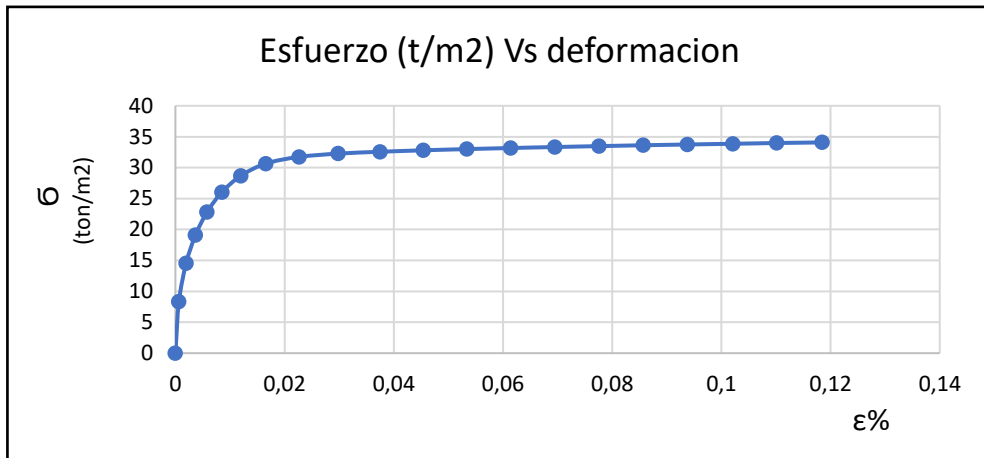


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 1 ángulo fricción 18

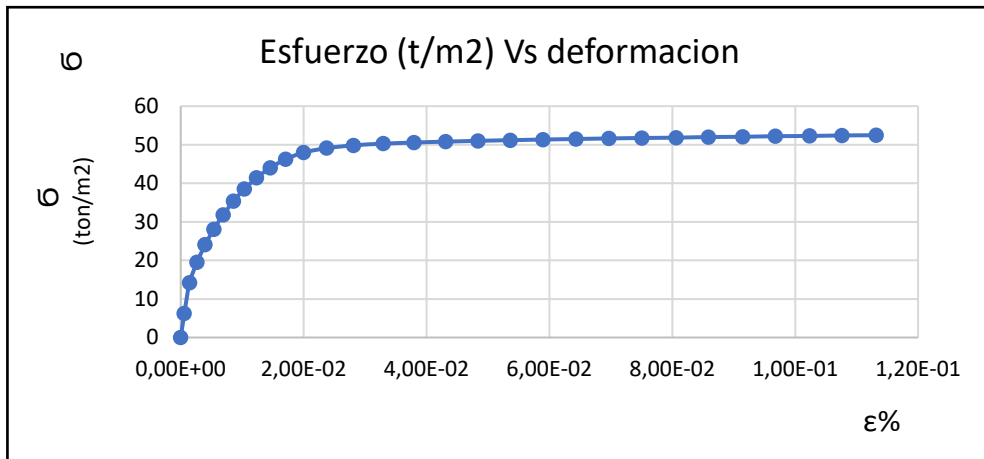


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 2 ángulo fricción 18

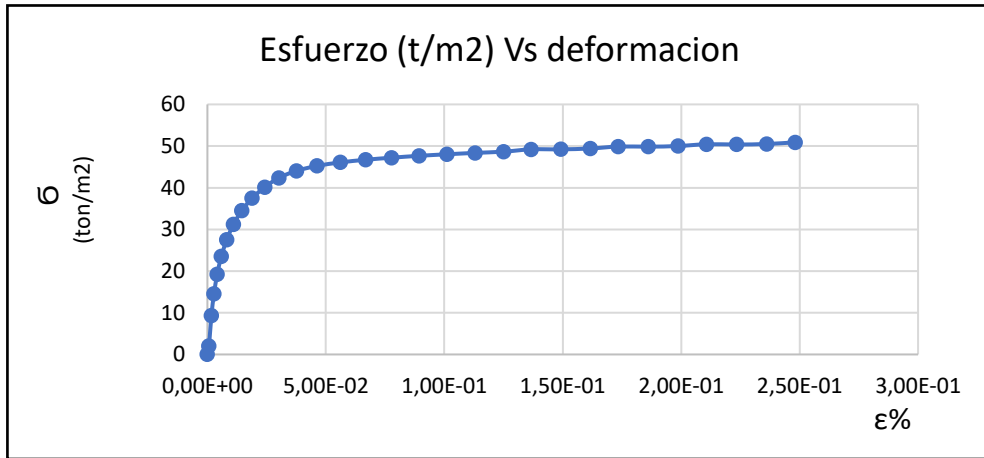


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 3 ángulo fricción 18

Ángulo de fricción interna 30

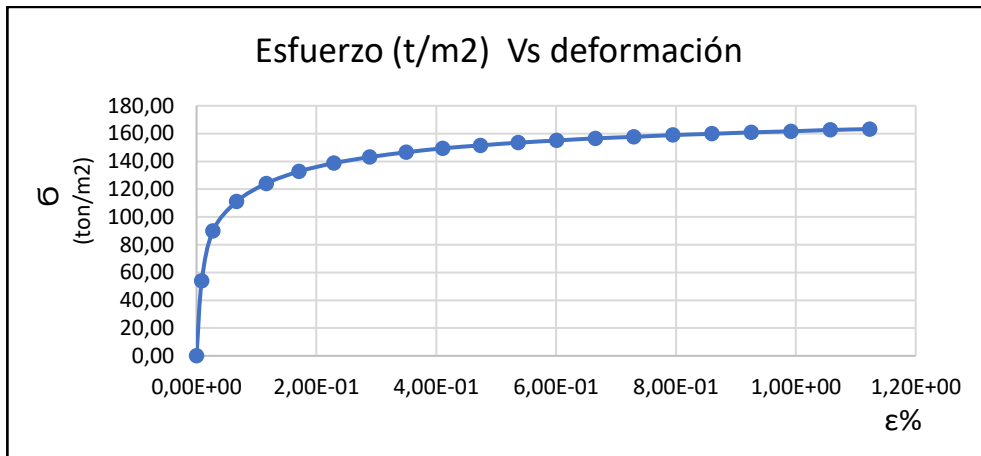


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 1 ángulo fricción 30

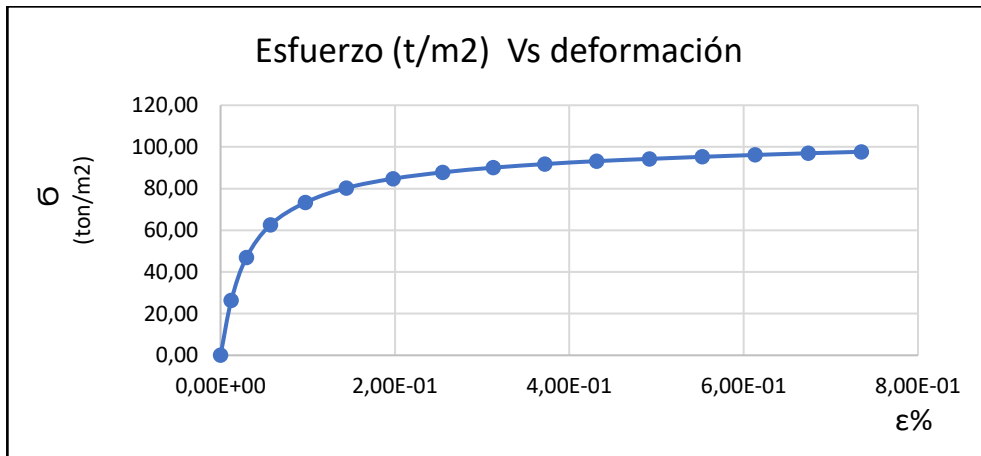


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 2 ángulo fricción 30

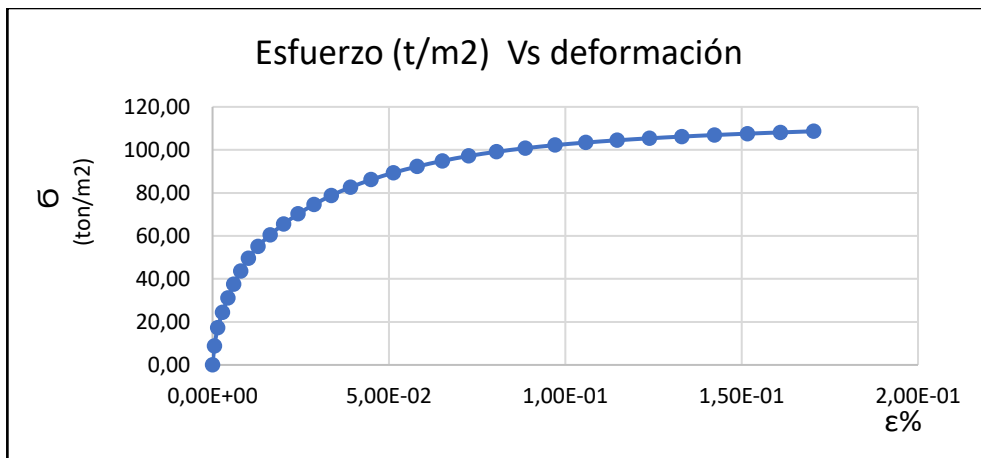


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 1 ángulo fricción 30

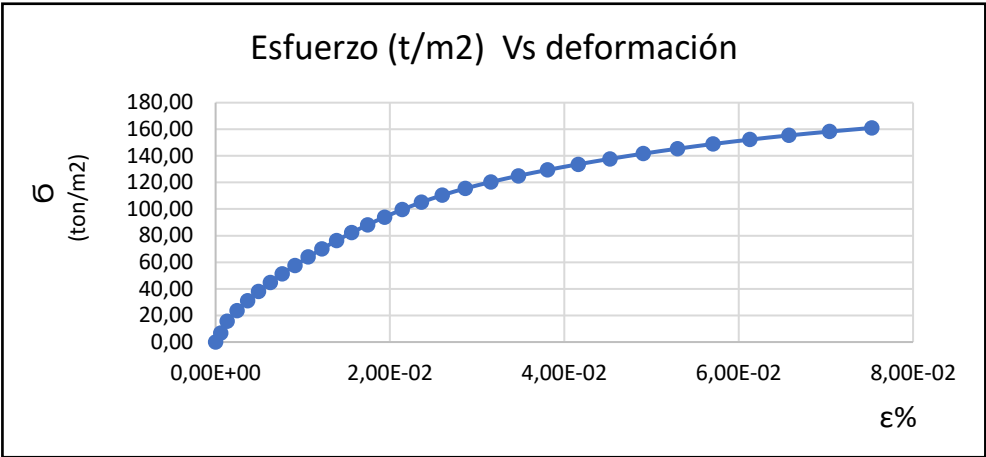


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 2 ángulo fricción 30

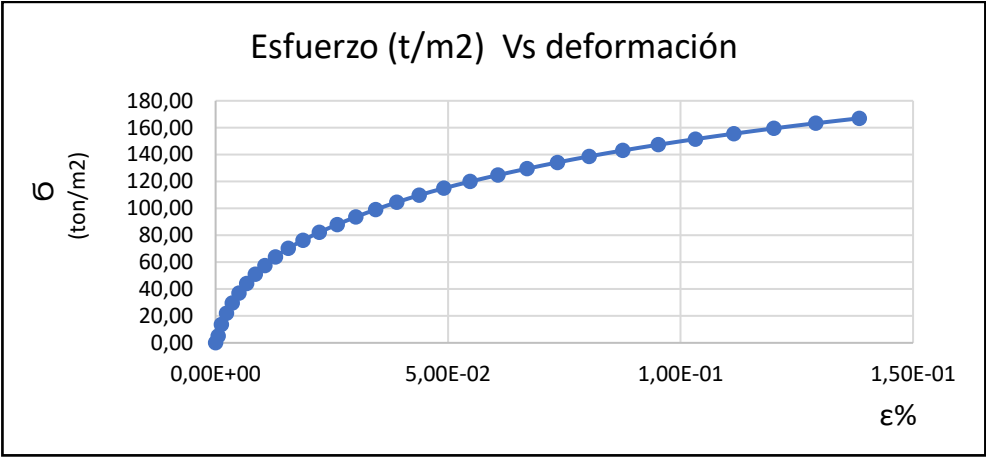


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 3 ángulo fricción 30

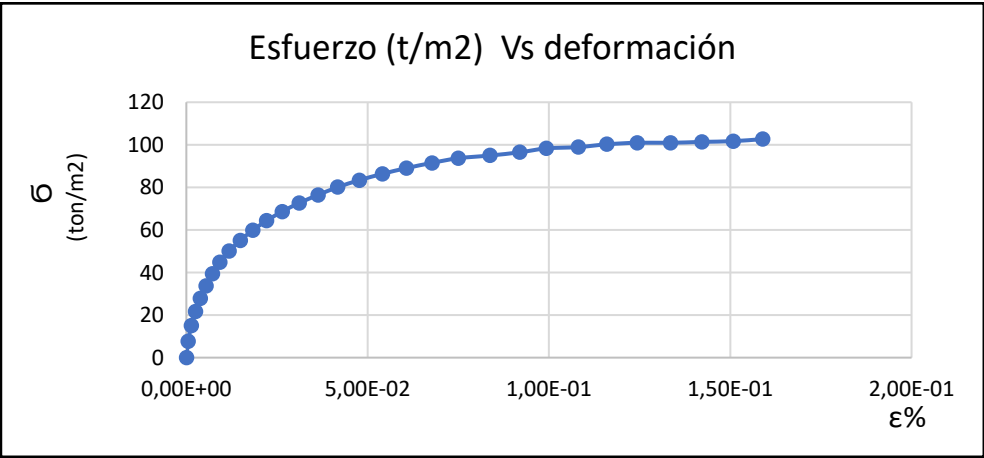


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 1 ángulo fricción 30

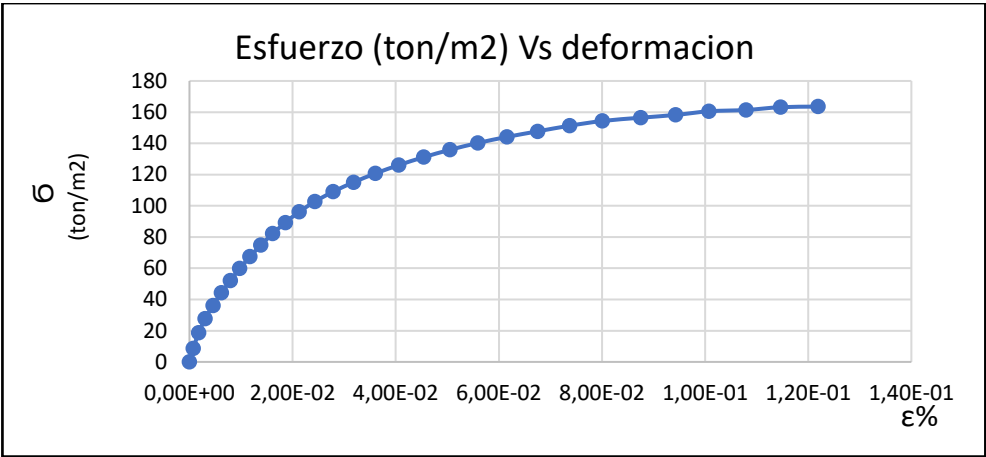


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 2 ángulo fricción 30

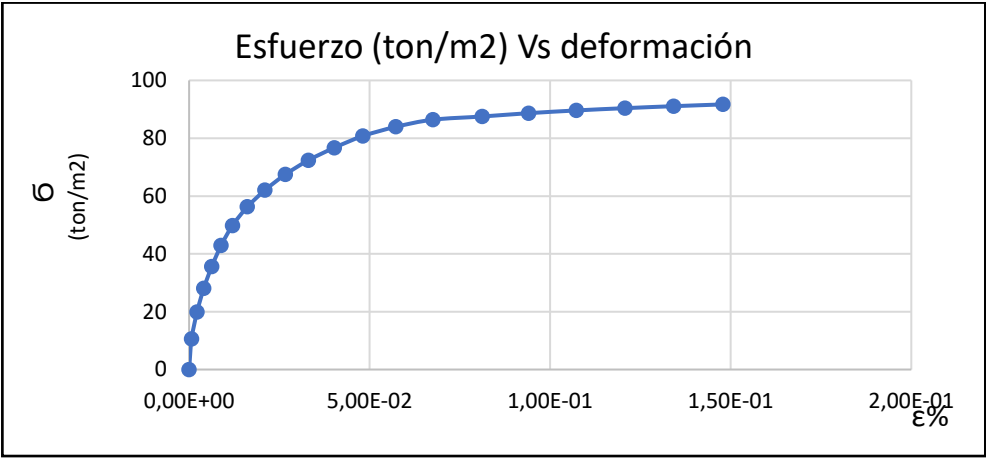


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 1 ángulo fricción 30

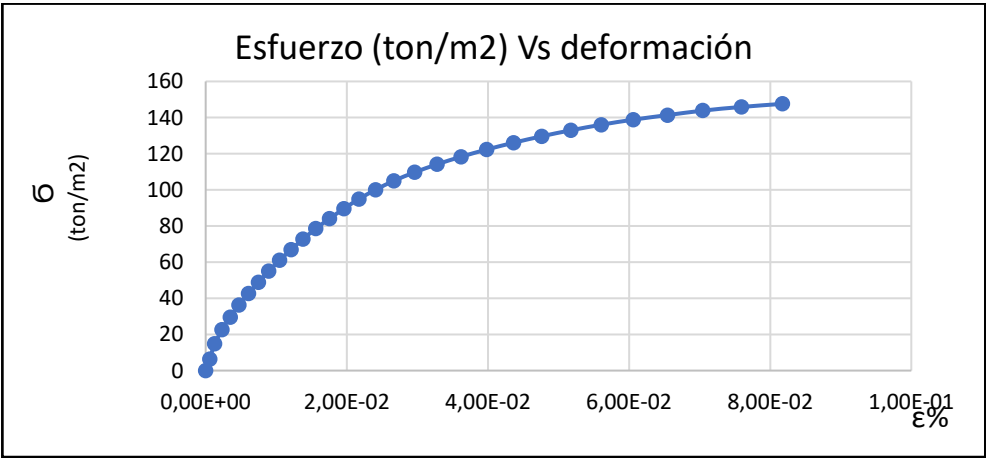


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 2 ángulo fricción 30

Ángulo de fricción interna 35

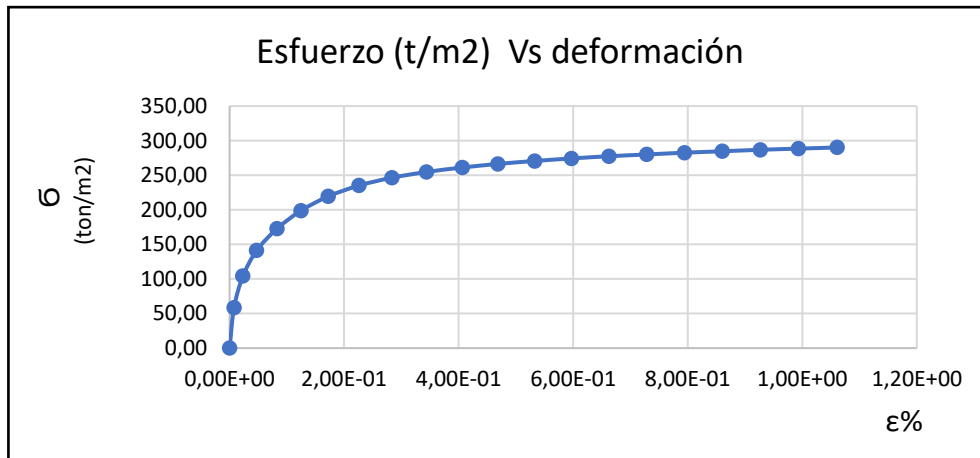


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 1 ángulo fricción 35

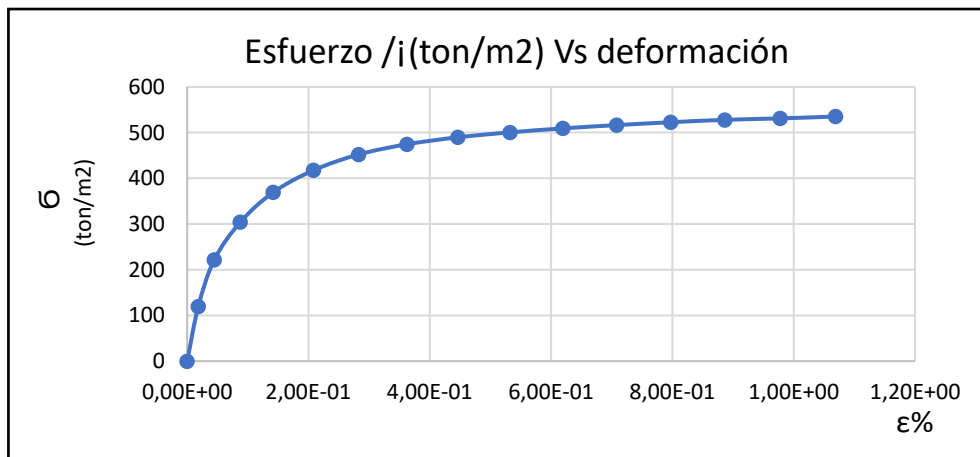


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Regular escenario 2 ángulo fricción 35

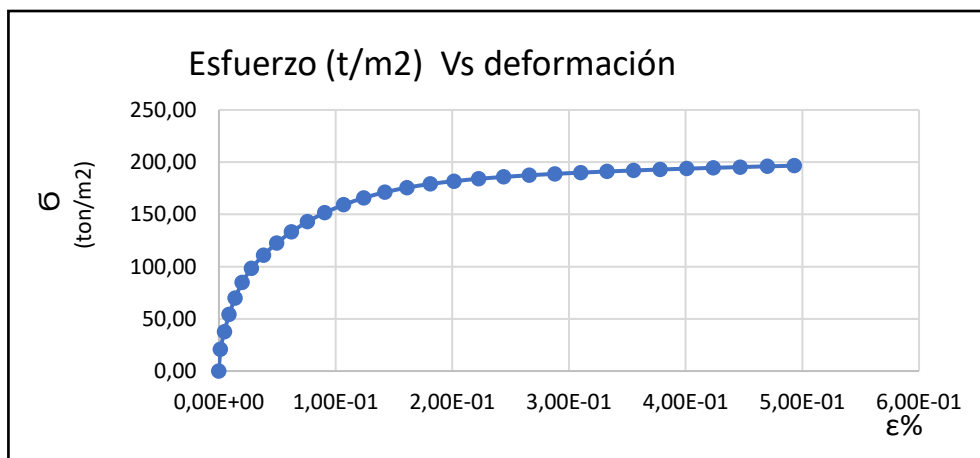


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 1 ángulo fricción 35

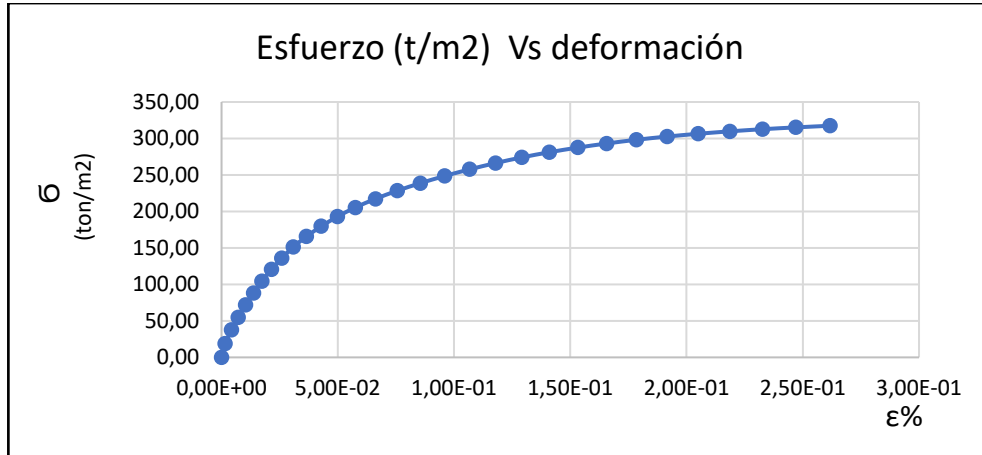


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 2 ángulo fricción 35

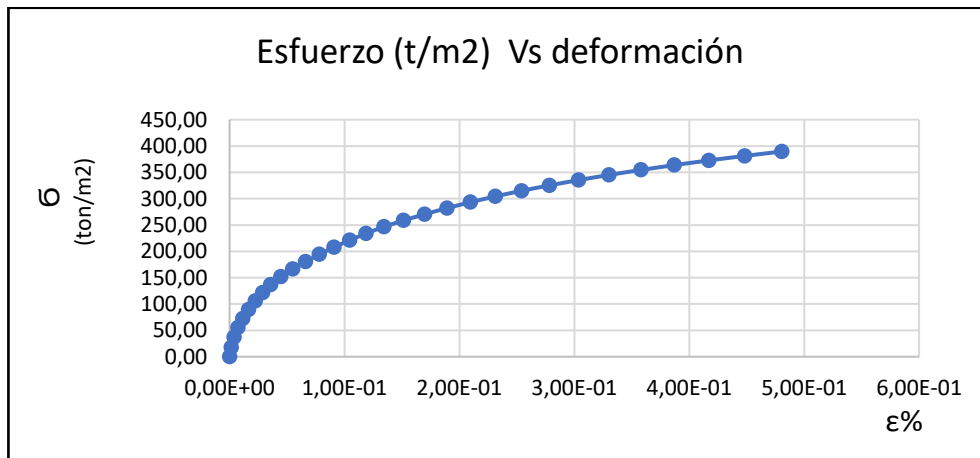


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Ce escenario 3 ángulo fricción 35

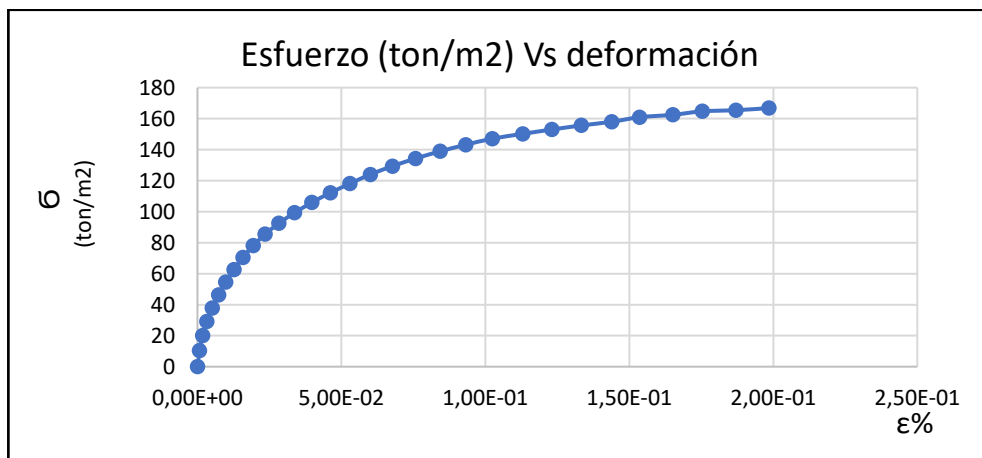


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 1 ángulo fricción 35

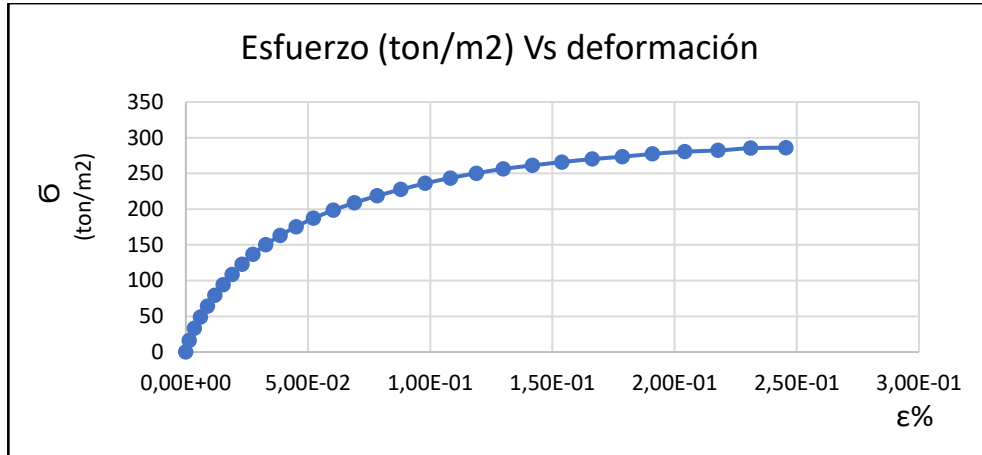


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo Cruz escenario 2 ángulo fricción 35

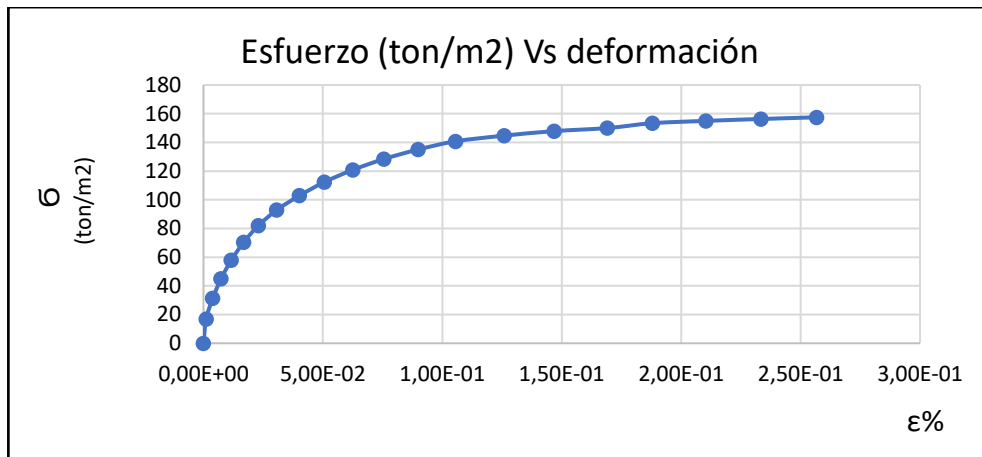


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 1 ángulo fricción 35

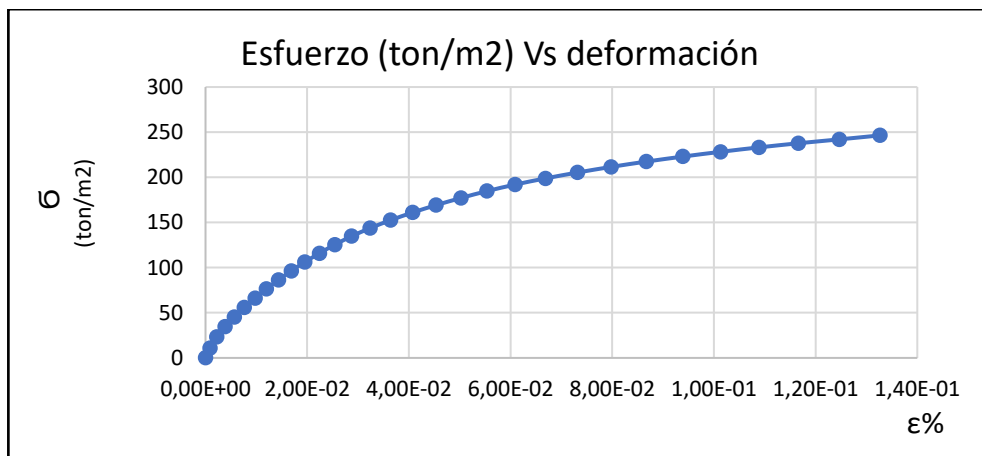


Gráfico: Esf-def unitaria para losa de cimentación tipo L escenario 2 ángulo fricción 35