

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**COMPARACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICO Y NUMÉRICOS (FEM)
APLICADO AL DISEÑO DE LOSAS DE CIMENTACIÓN SOBRE UN
TERRENO TRATADO CON INCLUSIONES RÍGIDAS**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Giosser Gianinni Arica Castro

ASESOR:

Salvador Sobrecases Martí

Lima, marzo, 2022

RESUMEN

Cuando se tienen suelos que pueden generar diferentes problemas geotécnicos, como licuación, grandes asentamientos o expansión del suelo, entre otros, se suele proponer cimentaciones profundas como la solución más factible. Sin embargo, estas en muchos casos pueden llegar a ser muy costosas, por la gran cantidad de materiales necesarios para su construcción y bajos rendimientos. Es por ello que los tratamientos y mejoramientos de terreno surgen como una solución más efectiva ante la presencia de estos problemas. En específico las Columnas de Módulo Controlado (CMC) son un método de mejora del terreno que consiste en una malla de columnas semirrígidas compuestas por mortero u hormigón fluido bajo un colchón de reparto de cargas, con el fin de mejorar las propiedades del terreno y reducir los asentamientos diferenciales. El sistema de transmisión de cargas es generado por la interacción entre el colchón de reparto, el suelo circundante y las columnas de módulo controlado.

En el presente trabajo de investigación se presenta el estado del arte del método analítico empleado para el diseño de las Columnas de Módulo Controlado (CMC) y de los métodos numéricos aplicados en esta solución. Esto con el fin de aplicarlos en un caso en específico variando el espesor del colchón de reparto y el espaciamiento entre inclusiones, y obtener las deformaciones y los esfuerzos producidos a lo largo de la columna y del suelo circundante a esta. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos, considerando variables como el asentamiento producido, profundidad del eje neutro, tasa de reducción esfuerzos (SRR) y eficiencia, por ambos métodos con el fin de conocer sus diferencias en cuanto a cálculos. Es así que se observa que el modelo de deformación plana propuesto representa mejor la distribución de esfuerzos y de asentamientos que el método axisimétrico, y se asemejan mucho más a los resultados obtenidos por el método analítico.

AGRADECIMIENTOS

Le dedico este trabajo de investigación a todas las personas que me han apoyado en toda mi formación académica y profesional. Pero sobre todo quiero agradecer infinitamente a mi familia por siempre haberme brindado su apoyo incondicional, sé que sin ellos no hubiera podido llegar hasta este punto de mi carrera. Asimismo, quiero agradecer a GEOPUCP, asociación que para mí ha sido como una familia, que me ha permitido crecer mucho a nivel profesional, sin ellos no hubiera podido conocer esta rama que tanto me apasiona, que es la geotecnia. Finalmente, agradezco a mi asesor de tesis, el ing. Salvador Sobrecases, que me brindó su tiempo, asesoría y apoyo para poder concretar satisfactoriamente esta tesis.



ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos:	2
1.3 Organización	2
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Introducción	4
2.2 Tratamientos de terreno.....	4
2.2.1 Refuerzo y consolidación con elementos estructurales.....	5
2.2.2 Densificación y/o mejora del drenaje.....	6
2.3 Inclusiones rígidas con columnas de módulo controlado.....	9
2.3.1 Proceso de ejecución	10
2.3.2 Propiedades de los materiales	11
2.3.3 Aplicabilidad de la tecnología.....	12
2.3.4 Funcionalidad de la columna.....	14
2.3.5 Verificación geotécnica.....	18
2.3.6 Verificación estructural	19
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	22
3.1 Introducción	22
3.2 Método analítico.....	22
3.3 Métodos numéricos	30
3.4 Evaluación de la interacción entre elementos del conjunto	36
CAPÍTULO 4. CASOS PLANTEADOS	39
4.1. Introducción	39
4.2. Perfil Estratigráfico	39
4.3. Parámetros resistentes y elásticos	40
4.4. Características de los casos estudiados	42
CAPÍTULO 5. MÉTODOS ANALÍTICOS	44
5.1 Introducción	44
5.2 Losa de cimentación.....	44
5.2.1. Diseño con CMC	44
5.2.2. Comparación de la profundidad del eje neutro.....	46
5.2.3. Comparación del asentamiento.....	47
5.2.4. Comparación del SRR	49
5.2.5. Comparación de la eficiencia	50
CAPÍTULO 6. MÉTODOS NUMÉRICOS	53
6.1 Introducción	53
6.2 Modelo axisimétrico.....	53
6.2.1. Modelamiento en Plaxis	53
6.2.2. Comparación de la profundidad del eje neutro.....	59
6.2.3. Comparación del asentamiento.....	60
6.2.4. Comparación del SRR	61
6.2.5. Comparación de la eficiencia	63
6.3 Modelo de deformación plana.....	64

6.3.1.	Modelamiento en Plaxis	64
6.3.2.	Comparación de la profundidad del eje neutro.....	71
6.3.3.	Comparación del asentamiento.....	72
6.3.4.	Comparación del SRR	73
6.3.5.	Comparación de la eficiencia	74
CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS		77
7.1	Introducción	77
7.2	Profundidad del punto neutro.....	77
7.3	Asentamientos	84
7.4	Comparación de valores de SRR.....	91
7.5	Comparación de valores de Eficiencia	98
7.6	Comparación de distribución de esfuerzos y asentamientos.....	105
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES		107
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA.....		110
ANEXOS		
ANEXO A: RESULTADOS DE MÉTODO ANALÍTICO		
ANEXO B: RESULTADOS DE PLAXIS		
ANEXO B.1: MODELO AXISIMÉTRICO		
ANEXO B.1.1: ESFUERZOS OBTENIDOS		
ANEXO B.1.2: ASENTAMIENTOS OBTENIDOS		
ANEXO B.2: MODELO DE DEFORMACIÓN PLANA		
ANEXO B.2.1: ESFUERZOS OBTENIDOS		
ANEXO B.2.2: ASENTAMIENTOS OBTENIDOS		

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Hélice de perforación en forma de tornillo de la barrena (Chatte & Ciri3n, 2013).	10
Figura 2.2: Proceso de ejecuci3n de las columnas de m3dulo controlado (MENARD, 2016b).	11
Figura 2.3: Esquema de distribuci3n de las inclusiones r3gidas (MENARD, 2016b).15	
Figura 2.4: Transmisi3n de las cargas del terreno blando hacia una parte del fuste de la inclusi3n (MENARD, 2016b).....	16
Figura 3.1: Dimensi3n de la malla de inclusiones r3gidas	24
Figura 3.2: Leyes de la movilizaci3n de cargas seg3n el desplazamiento relativo en la punta de la inclusi3n r3gida.....	25
Figura 3.3: Leyes de la movilizaci3n de cargas seg3n el desplazamiento relativo en la secci3n lateral de la inclusi3n r3gida.....	26
Figura 3.4: Leyes de la movilizaci3n de cargas ajustada seg3n el desplazamiento relativo en la secci3n lateral de la inclusi3n r3gida.....	27
Figura 3.5: Sistema de un modelo axisim3trico (Racinais & Plomteux, 2011).....	32
Figura 4.1: Perfil estratigráfico propuesto para el análisis de todos los casos.....	39
Figura 5.1: Gráfico hc (m) vs hr (m).....	47
Figura 5.2: Gráfico asentamiento vs hr.....	48
Figura 5.3: Gráfico SRR vs hr	50
Figura 5.4: Gráfico Eficiencia vs hr (m).....	52
Figura 6.1: Geometr3a del modelo axisim3trico para el caso de el espesor del colch3n de reparto igual a 0.5 m y espaciamiento igual a 1.4 m.....	54
Figura 6.2: Interfaces creadas en el modelo axisim3trico.....	55
Figura 6.3: Carga distribuida por la losa de cimentaci3n en el modelo axisim3trico	55
Figura 6.4: Malla generada entre la inclusi3n r3gidas, el colch3n de reparto y el suelo blando	56
Figura 6.5: Proceso constructivo para el modelo axisim3trico de espesor del colch3n de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamiento igual a 1.4 metros. a) condiciones iniciales, b) excavaci3n hasta profundidad de instalaci3n de CMC, c) instalaci3n de inclusi3n r3gida d) instalaci3n de colch3n de reparto y cargas distribuida	58

Figura 6.6: Resultados obtenidos de Plaxis para el modelo axisimétrico de espesor del colchón de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamiento igual a 1.4 metros: a) deformaciones obtenidas b) esfuerzos obtenidos.....	59
Figura 6.7: Gráfico hc (m) vs hr (m).....	60
Figura 6.8: Gráfico asentamiento vs hr.....	61
Figura 6.9: Gráfico SRR vs hr	63
Figura 6.10: Gráfico Eficiencia vs hr (m).....	64
Figura 6.11: Geometría del modelo de deformación plana para el caso de el espesor del colchón de reparto igual a 0.5 m y espaciamiento igual a 1.4 m.....	66
Figura 6.12: Interfaces creadas en el modelo de deformación plana.....	67
Figura 6.13: Carga distribuida por la losa de cimentación en el modelo axisimétrico.....	67
Figura 6.14: Malla generada entre la inclusión rígidas, el colchón de reparto y el suelo blando	68
Figura 6.15: Proceso constructivo para el modelo de deformación plana de espesor del colchón de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamiento igual a 1.4 metros. a) condiciones iniciales, b) excavación hasta profundidad de instalación de CMC, c) instalación de inclusión rígida d) instalación de colchón de reparto y cargas distribuida	70
Figura 6.16: Resultados obtenidos de Plaxis para el modelo de deformación plana de espesor del colchón de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamiento igual a 1.4 metros: a) deformaciones obtenidas b) esfuerzos obtenidos.....	71
Figura 6.17: Gráfico hc (m) vs hr (m).....	72
Figura 6.18: Gráfico asentamiento vs hr.....	73
Figura 6.19: Gráfico SRR vs hr	74
Figura 6.20: Gráfico Eficiencia vs hr (m).....	76
Figura 7.1: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.0 metro	79
Figura 7.2: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.4 metros.....	80
Figura 7.3: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.8 metros.....	81
Figura 7.4: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.2 metros.....	82
Figura 7.5: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.6 metros.....	83

Figura 7.6: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 3.0 metros.....	84
Figura 7.7: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.0 metro.....	86
Figura 7.8: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.4 metros.....	87
Figura 7.9: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.8 metros.....	88
Figura 7.10: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.2 metros.....	89
Figura 7.11: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.6 metros.....	90
Figura 7.12: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 3.0 metros.....	91
Figura 7.13: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.0 metro.....	93
Figura 7.14: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.4 metros.....	94
Figura 7.15: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.8 metros.....	95
Figura 7.16: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.2 metros.....	96
Figura 7.17: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.6 metros.....	97
Figura 7.18: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 3.0 metros.....	98
Figura 7.19: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.0 metro.....	100
Figura 7.20: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.4 metros.....	101
Figura 7.21: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.8 metros.....	102
Figura 7.22: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.2 metros.....	103

Figura 7.23: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 2.6 metros 104

Figura 7.24: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 3.0 metros 105



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Valores asignados de coeficientes de caso de carga ULS (Asiri National Project & IREX, 2012).....	18
Tabla 2.2: Valores asignados de coeficientes de caso de carga SLS (Asiri National Project & IREX, 2012).....	19
Tabla 2.3: Valores asignados de C_{max} y k_1 (Asiri National Project & IREX, 2012).....	20
Tabla 2.4: Valores asignados de k_3 (Asiri National Project & IREX, 2012).....	21
Tabla 3.1: Relación entre los valores de $k_{tan\delta}$ y el tipo de suelo (MENARD, 2016b).....	29
Tabla 3.2: Parámetros de los modelos de Mohr-Coulomb, Soft soil, Soft soil creep y Hardening Soil (Asiri National Project & IREX, 2012).....	35
Tabla 4.1: Propiedades de la columna de módulo controlado	40
Tabla 4.2: Propiedades resistentes y elásticas del colchón de reparto	40
Tabla 4.3: Parámetros resistentes y elásticos de los suelos del perfil estratigráfico presentado	41
Tabla 4.4: Parámetros para Hardening Soil de cada estrato de suelo	42
Tabla 4.5: Resumen de la geometría de la malla de inclusiones rígidas y colchón de reparto	43
Tabla 5.1: Resumen de los valores de la profundidad de eje neutro para todos los casos	46
Tabla 5.2: Resumen de los valores de asentamientos para todos los casos	48
Tabla 5.3: Resumen de los valores de SRR para todos los casos	49
Tabla 5.4: Resumen de los valores de eficiencia para todos los casos	50
Tabla 6.1: Radio de la malla equivalente para el modelo axisimétrico para los diferentes espaciamientos	54
Tabla 6.2: Resumen de los valores de la profundidad de eje neutro para todos los casos	59
Tabla 6.3: Resumen de los valores de asentamientos para todos los casos	61
Tabla 6.4: Resumen de los valores de SRR para todos los casos	62
Tabla 6.5: Resumen de los valores de eficiencia para todos los casos	63
Tabla 6.6: Ancho del modelo y radio de la inclusión rígida para el modelo de deformación plana para los diferentes espaciamientos	65
Tabla 6.7: Resumen de los valores de la profundidad de eje neutro para todos los casos	71

Tabla 6.8: Resumen de los valores de asentamientos para todos los casos	72
Tabla 6.9: Resumen de los valores de SRR para todos los casos	74
Tabla 6.10: Resumen de los valores de eficiencia para todos los casos	75
Tabla 7.1: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 1.0 m y diferentes espesores.....	78
Tabla 7.2: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 1.4 m y diferentes espesores.....	79
Tabla 7.3: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 1.8 m y diferentes espesores.....	80
Tabla 7.4: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 2.2 m y diferentes espesores.....	81
Tabla 7.5: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 2.6 m y diferentes espesores.....	82
Tabla 7.6: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 3.0 m y diferentes espesores.....	83
Tabla 7.7: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.0 metro y diferentes espesores de reparto	85
Tabla 7.8: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.4 metros y diferentes espesores de reparto	86
Tabla 7.9: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.8 metros y diferentes espesores de reparto	87
Tabla 7.10: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 2.2 metros y diferentes espesores de reparto	88
Tabla 7.11: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 2.6 metros y diferentes espesores de reparto	89

Tabla 7.12: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 3.0 metros y diferentes espesores de reparto	90
Tabla 7.13: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.0 metro y diferentes espesores de reparto	92
Tabla 7.14: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.4 metros y diferentes espesores de reparto	93
Tabla 7.15: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.8 metros y diferentes espesores de reparto	94
Tabla 7.16: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 2.2 metros y diferentes espesores de reparto	95
Tabla 7.17: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 2.6 metros y diferentes espesores de reparto	96
Tabla 7.18: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 3.0 metros y diferentes espesores de reparto	97
Tabla 7.19: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.0 metro y diferentes espesores de reparto	99
Tabla 7.20: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.4 metros y diferentes espesores de reparto	100
Tabla 7.21: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.8 metros y diferentes espesores de reparto	101
Tabla 7.22: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 2.2 metros y diferentes espesores de reparto	102
Tabla 7.23: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 2.6 metros y diferentes espesores de reparto	103
Tabla 7.24: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 3.0 metros y diferentes espesores de reparto	104

LISTA DE SÍMBOLOS

D_p	= Diámetro de la columna de modulo controlado
D_s	= Diámetro del suelo circundante
R_p	= Radio de la columna de modulo controlado
A_p	= Área de la columna de modulo controlado
H_p	= Profundidad de la columna de modulo controlado
L_p	= Longitud de la columna de modulo controlado
e_p	= Empotramiento de la columna de modulo controlado
E_p	= Módulo de Young de la columna de modulo controlado
h_r	= Espesor del colchón de reparto de cargas
q_r	= Carga distribuida en la base del colchón de reparto de cargas
Q_r	= Carga aplicada en la base del colchón de reparto de cargas
q_0	= Sobrecarga uniforme aplicada por la losa de cimentación
b	= Espaciamiento entre las columnas de módulo controlado
A	= Área de una malla
R	= Radio equivalente de celda
q_p	= Resistencia del suelo en punta de la columna de módulo controlado
q_s	= Resistencia del suelo a lo largo de la columna de módulo controlado
m_q	= Primer coeficiente de Frank & Zhao
m_τ	= Segundo coeficiente de Frank & Zhao
w_2	= Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfico de Frank & Zhao
$6w_2$	= Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfico de Frank & Zhao
$w(z)$	= Asentamiento relativo en una profundidad z
q	= Carga distribuida soportada en punta de la columna de módulo controlado
$Q_p(z)$	= Carga soportada en una profundidad z de la columna de módulo controlado
F	= Fricción lateral a lo largo de la columna de módulo controlado
F_{lim}	= Fricción lateral límite
F_n	= Fricción negativa
F_p	= Fricción positiva
h_c	= Profundidad de eje neutro
$Q_s(z)$	= Carga soportada en una profundidad z del suelo circundante
y_p	= Asentamiento de la columna de módulo controlado

y_s	= Asentamiento del suelo circundante
f_{ck}	= Valor característico de la resistencia a la compresión del concreto o mortero a los 28 días
$q_{ref,ULS}$	= Resistencia media en ULS en la superficie de referencia bajo la zapata
$q_{sol,ULS}$	= Resistencia admisible del suelo sin refuerzo en ULS
$Q_{col,ULS}$	= Carga admisible de las columnas de módulo controlado en ULS
S	= Superficie de referencia de Meyerhof
q_p	= Resistencia última del suelo en punta de la inclusión
q_s	= Resistencia última de rozamiento lateral bajo el punto neutro
n	= Número de columnas de módulo controlado
$\gamma_{R;d;\gamma_b}$	= Coeficiente de seguridad que considera la resistencia por punta
$\gamma_{R;d;\gamma_s}$	= Coeficiente de seguridad que considera el rozamiento lateral
$\gamma_{R;d};\gamma_{R;d}$	= Coeficiente de seguridad que considera la presión límite del suelo
$q_{ref,SLS}$	= Resistencia media en SLS en la superficie de referencia bajo la zapata
$q_{sol,SLS}$	= Resistencia admisible del suelo sin refuerzo en SLS
$Q_{col,SLS}$	= Carga admisible de las columnas de módulo controlado en SLS
f_{ck}^*	= Valor característico de la resistencia a la compresión del concreto o mortero
$f_{ck}(t)$	= Valor característico de la resistencia a la compresión del concreto o mortero en un tiempo de t días
k_1	= Coeficiente que depende del método de ejecución y de la relación de esbeltez
k_2	= Coeficiente que depende de la relación de esbeltez
k_3	= Coeficiente que depende del tipo de control realizado
α_{cc}	= Coeficiente que depende de la presencia o no de refuerzo
C_{max}	= Resistencia a la compresión máxima tomando en cuenta la consistencia requerida de concreto o mortero, dependiendo de la técnica usada
γ_C	= Coeficiente parcial con un valor igual a 1.5 para ULS fundamental y 1.2 para ULS accidental
f_{cd}	= Resistencia a la compresión máxima
d	= Dimensión más pequeña de la columna de módulo controlado
L	= Dimensión más grande de la columna de módulo controlado
Δh	= Asentamiento diferencial entre los puntos donde se observan las deformaciones verticales
h	= Distancia entre puntos
q	= Sobrecarga Aplicada
E_{oed}	= Módulo Edométrico
$f_{cd,max,ULS}$	= Resistencia a la compresión máxima en ULS
$f_{cd,med,ULS}$	= Resistencia a la compresión media en ULS

$f_{cd,max,SLS}$	= Resistencia a la compresión máxima en SLS
$f_{cd,med,SLS}$	= Resistencia a la compresión media en SLS
π	= Pi
E_M	= Módulo Presiométrico
τ	= Esfuerzo cortante
$\sigma'_h(z)$	= Esfuerzo efectivo horizontal en una profundidad z
z	= Profundidad del modelo
K	= Coeficiente de empuje
$k \tan \delta$	= Coeficiente de fricción entre la inclusión rígida y el suelo circundante
P	= Perímetro de la columna de módulo controlado
γ_p	= Peso específico de la columna de módulo controlado
γ_s	= Peso específico del suelo
E_s	= Módulo de Young del suelo
B	= Ancho del modelo de deformación plana
b_c	= Radio de la columna de módulo controlado para el modelo de deformación plana
ν	= Coeficiente de Poisson
φ'	= Ángulo de fricción
c	= Cohesión
ψ	= Ángulo de dilatancia
$\lambda *$	= Índice de compresión
$\kappa *$	= Índice de descompresión y recompresión
$\mu *$	= Índice de creep del modelo soft soil creep
E_{50}^{ref}	= Valor referencial del módulo secante al 50% de resistencia
E_{oed}^{ref}	= Valor referencial del módulo edométrico tangente
m	= Exponente para niveles de esfuerzos dependientes de la rigidez
E_{ur}^{ref}	= Valor referencial del módulo de descarga y recarga
ν_{ur}	= Coeficiente de Poisson de descarga y recarga
p^{ref}	= Presión atmosférica referencial
R_f	= Relación de falla
E	= Eficiencia
W	= Peso del terraplén
Q	= Carga total aplicada sobre el sistema
q_s^+	= Esfuerzo residual del suelo circundante

μ_r	= Coeficiente de ecuación diferencial del método de Combarieu
γ_r	= Peso específico del colchón de reparto de cargas
φ_r	= Ángulo fricción del colchón de reparto de cargas
h_a	= Altura crítica del colchón de reparto
$p_l *$	= Presión límite neta del suelo
α	= Coeficiente reológico



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En la actualidad, se han encontrado muchos problemas ante la necesidad de cimentar en terrenos con baja capacidad portante, baja resistencia al corte o en suelos muy deformables en los cuales se puedan presentar grandes asentamientos, por lo que se ha visto necesario adoptar nuevas alternativas de cimentación, siendo unas más viables que otras dependiendo del proyecto de cimentación que se tiene. Habitualmente, cuando se tienen suelos inadecuados suele optarse por cimentaciones profundas que alcancen un estrato resistente; sin embargo, este tipo de soluciones de manera general son económicamente costosas y poco sostenibles. En los últimos años han tomado protagonismo en el sector de la ingeniería civil las cimentaciones intermedias, generalmente más económicas, constituidas por cimentaciones superficiales apoyadas en un terreno mejorado y el costo total del proyecto puede salir menor cuando se usan este tipo de mejoramientos o tratamientos del suelo (Pearlman, 2012). Estas técnicas permiten aumentar los parámetros elásticos y resistentes del terreno con el fin de incrementar la capacidad de soporte del suelo y poder reducir los posibles asentamientos que se presenten.

Actualmente existen en el mercado numerosas técnicas de tratamiento de suelos, como la compactación dinámica, columnas de grava, precargas, jet grouting, etc. La elección de una técnica u otra depende del tipo de obra, clase de terreno, tecnología disponible, etc.

Una de estas técnicas de mejoramiento de terreno que en los últimos años ha venido desarrollándose en Perú son las llamadas inclusiones rígidas, que consiste en construir en el terreno una malla de columnas de mortero. Esta técnica puede resultar muy beneficiosa económicamente, ya que puede reemplazar a las cimentaciones profundas por una cimentación superficial en un terreno con inclusiones rígidas y también reducir el volumen de la cimentación superficial.

Una limitación para este método de tratamiento de terreno es que actualmente existe poca información bibliográfica esclarecedora sobre cómo afrontar su diseño mediante métodos analíticos y numéricos. En el presente proyecto de tesis se estudiarán los métodos analíticos y numéricos aplicados al diseño de losas de cimentación sobre un terreno tratado con inclusiones rígidas.

1.2 Objetivos:

Se tiene como objetivo general el comparar los métodos analíticos y numéricos (FEM) para el diseño de inclusiones rígidas con losas de cimentación con el fin de calcular los asentamientos y distribución de tensiones entre el terreno y las inclusiones.

Por otro lado, los objetivos específicos del proyecto de investigación se muestran a continuación.

Objetivos específicos:

- Revisar la bibliografía del tema.
- Examinar las deformaciones y transferencia de tensiones en un terreno tratado con inclusiones rígidas mediante el software de elementos finitos Plaxis, usando el modelo Hardening Soil, considerando diferentes valores del espesor del colchón de reparto de cargas y del espaciamiento entre inclusiones rígidas.
- Examinar los asentamientos y transferencia de cargas en un terreno tratado con inclusiones rígidas mediante el método analítico empleado en la actualidad, considerando diferentes valores del espesor del colchón de reparto de cargas y del espaciamiento entre inclusiones rígidas.
- Comparar la profundidad del eje neutro, asentamientos, distribución de esfuerzos y eficiencia obtenidas de los métodos analítico y numérico del terreno tratado con inclusiones rígidas considerando diferentes valores del espesor del colchón de reparto de cargas y del espaciamiento entre inclusiones rígidas.

1.3 Organización

El presente trabajo de investigación se compone de 5 capítulos:

- El capítulo 1 es la introducción, donde se describe brevemente el objetivo general, los objetivos específicos y la metodología del trabajo de la investigación. Además, se esquematiza y resume cada capítulo de la tesis.

- El capítulo 2 describe el marco teórico de los tratamientos de terreno. Se detalla principalmente a las inclusiones rígidas, en específico a las columnas de módulo controlado.
- En el Capítulo 3 se presenta la metodología para el diseño de una inclusión rígida. Asimismo, se detalla la función de cada elemento del sistema del método de cimentación para una correcta transmisión de cargas. Finalmente, se explican las asunciones del método analítico que se ha realizado en la actualidad y los modelos a realizar por el método de elementos finitos.
- El Capítulo 4 contempla la evaluación de un caso de estudio para ser analizado tanto por métodos analíticos como por elementos finitos. Además, se presentan las propiedades del suelo y parámetros a considerar.
- En el Capítulo 5 se presentan los cálculos realizados por el método analítico para el caso presentado en el capítulo 4. Además, se analizarán los resultados obtenidos por este.
- En el Capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos para los 2 modelos por elementos finitos realizados en el software empleado. Además, se analizan los resultados obtenidos para cada modelo.
- En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones en donde se presenta una breve comparación de los resultados obtenidos por métodos analítico y por los métodos numéricos con elementos finitos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

En el presente capítulo se definen los tratamientos de terreno en general, mencionando su clasificación para luego profundizar más en la información que se tiene hasta la actualidad sobre las inclusiones rígidas, dando a conocer su proceso de ejecución, propiedades de los materiales, aplicabilidad, funcionalidad y las verificaciones que se hacen a nivel de diseño. Por lo general, su funcionamiento se basa en la distribución de esfuerzos en un sistema compuesto por la inclusión rígida, un colchón de reparto y el suelo circundante.

Particularmente, las Columnas de Módulo Controlado tienen un procedimiento constructivo que las distingue del resto de tratamientos en su tipo que se conocen, esto en conjunto con un dimensionado característico hacen que esta tecnología resulte más viable que otros métodos de cimentación que se usan en la actualidad como las cimentaciones superficiales, profundas y los tratamientos de terreno conocidos.

Debido a que esta tecnología fue diseñada por la empresa francesa Menard solo se tiene información certera del manual realizado por ellos, el cual lleva el nombre de Manual de Dimensionado y Ejecución: Tratamiento de Mejora y/o refuerzo del terreno mediante Columnas de Mortero o Módulo Controlado (CMC) y también de las recomendaciones brindadas por el ASIRI National Project para el mejoramiento de cimentaciones en suelo al incluir inclusiones rígidas en el terreno.

2.2 Tratamientos de terreno

Los tratamientos de terreno constituyen en la actualidad un medio relativamente novedoso dentro del mundo de las cimentaciones en Perú. Estos le otorgan un incremento a las propiedades resistentes y elásticas del suelo, brindando más beneficios que las cimentaciones tradicionales en ciertos casos como una mayor resistencia de las cargas transmitidas, menor costo, reducción de riesgo de licuación en casos de sismo en suelos arenosos con presencia de nivel freático, aceleración de la consolidación del terreno y reducción de asentamientos.

Los beneficios mencionados dependen del tipo de tratamiento de terreno; los cuales se pueden clasificar según su función. Estos serían, en primer lugar, los empleados para refuerzo y consolidación con elementos estructurales; dentro de este apartado se encuentran las

inclusiones rígidas, las inyecciones o el jet grouting. Estos tienen el objetivo principal de mejorar la resistencia del suelo. En segundo lugar, se encuentran los usados para la densificación y mejora del drenaje, donde las principales técnicas que cumplen con este objetivo son el saneo y sustitución de suelos, precarga y drenes verticales, compactación dinámica, compactación por explosivos, vibro compactación/vibro flotación, vibro sustitución/columnas de grava y el rebajamiento del nivel freático (Schaefer et al., 2017).

2.2.1 Refuerzo y consolidación con elementos estructurales

- Soil Mixing

El método consiste en introducir mediante una perforadora giratoria un material aglomerante (pueden ser cemento, cal o bentonita) en el terreno por la perforación de esta máquina, creando de esta manera a unas columnas hechas de un material mejorado de tipo suelo-cemento que se irá mezclando con el suelo natural, el cual se recomienda que sea uno cohesivo. Este le brinda mejores propiedades al terreno incrementando su resistencia, disminuyendo su permeabilidad, mejorando su capacidad portante, mitigando el riesgo por licuación y una disminución del empuje activo de los muros de contención. Con este sistema se crean barreras hidrogeológicas, aumenta el empuje pasivo de los muros pantalla y se reduce la comprensibilidad del terreno tratado. La diferencia con el jet grouting es que en estas no se ejecutan las columnas con una gran presión (Valiente Sanz, 2018).

- Jet Grouting

Consiste en la desagregación del terreno mediante un fluido radial de gran energía y su mezcla con un agente cementante que se inyecta de abajo hacia arriba resultando en una columna de mayor rigidez (hecho de una mezcla uniforme entre el suelo tratado con lechada) que el suelo circundante con el cual se obtienen mejores propiedades mecánicas (resistentes y elásticas) del suelo mejorado, lo que produce un incremento en la resistencia del terreno. Eso se debe a que el fluido cementante entra con una gran presión y saca provecho de su capacidad para erosionar el suelo. Además, se genera una reducción de asentamientos y reducción de permeabilidad. Asimismo, se produce un incremento en la resistencia al esfuerzo del corte cíclico causado por sismo; por tanto, un descenso de riesgo por licuación del terreno. Para este método se pueden llegar a usar hasta tres tipos de jet grouting según el número de fluidos que se usen en el proceso constructivo. El primero es el que solo usa un fluido que generalmente es una lechada con la

que se desagrega y cementa el terreno; el segundo usa dos fluidos para ello, los cuales son el aire o agua de alta presión sumado con una lechada; el tercero necesita de tres fluidos que son el agua a alta presión, aire a presión y lechada (Valiente Sanz, 2018).

2.2.2 Densificación y/o mejora del drenaje

- Saneos y sustitución de suelos

Es un tratamiento de suelo que consiste en retirar el terreno malo en el que se pensaba cimentar mediante excavaciones para luego poder cambiarlo por un relleno con mejores propiedades y compactado. Esta técnica llega a ser eficiente cuando se trabaje en suelos con un nivel freático que permita un control adecuado del terreno y no involucre un problema durante la excavación. Además, en el aspecto económico se recomienda que solo sea usado a profundidades pequeñas de hasta 2 o 3 metros de espesor de excavación del suelo, ya que si se quiere excavar un gran volumen de material para luego reemplazarlo por un relleno resultaría un costo muy elevado, por lo que se sugiere en estos casos la búsqueda de otra alternativa de tratamiento. Asimismo, se debe buscar no afectar a las estructuras vecinas con respecto a las excavaciones que se lleven a cabo en el proyecto correspondiente.

- Precarga y drenes verticales

Estas dos técnicas se trabajan generalmente juntas, cada una aportando al mejoramiento del suelo. En primer lugar, la precarga consiste en un peso o carga vertical mayor al que transmitiría la estructura que se quería cimentar (entre 1 y 2 veces más que el peso de la estructura) que se coloca sobre el terreno a cimentar con el fin de producir esfuerzos verticales sobre este causando así asentamientos en esta zona antes de la construcción de la estructura. Además, permite una compactación del terreno y una consecuente consolidación de este; por lo tanto, se incrementa la capacidad portante del suelo y su densidad. Asimismo, se sugiere que esta técnica sea aplicada en suelo cohesivos saturados o en suelos granulares con un contenido de humedad bajo. En segundo lugar, las mechas drenantes consisten en vías verticales planas o cilíndricas, generalmente se colocan con un espaciamiento entre estas igual a diez veces su sección, hechas de material granular o geosintéticos que permiten disipar las sobrepresiones intersticiales en el suelo mediante la salida del agua por esta tecnología. Además, cumple la función de densificar el suelo gracias a su método de instalación; sin embargo, no incrementa la capacidad portante

del terreno. Al trabajar estas dos técnicas en conjunto se logra un aumento en la velocidad de consolidación y una mitigación del riesgo por licuación (Valiente Sanz, 2018).

- Compactación Dinámica

Según Valiente Sanz (2018), la técnica consiste en aplicar golpes al suelo repetidas veces a gran energía mediante una gran masa que va entre 10 a 40 toneladas a diferentes puntos de un área determinada, las cuales deberán ser asignadas y evaluadas por el profesional responsable. Dicha pesa se deja caer desde unos 15 m hasta los 30 m produciéndose que el suelo se densifique y se asiente a unas profundidades entre 0.6 y 1.2 metros en los puntos donde se hizo impactar la masa. Además, esto permite un reacomodo de las partículas del suelo disminuyendo el volumen de huecos del terreno y causando un aumento de la capacidad portante del terreno. Otros objetivos que se cumplen son la mejora tanto de los parámetros resistentes y elásticos, disminución de asentamientos totales y diferenciales, mitigación del riesgo de licuación y la homogenización del comportamiento del terreno.

Este tratamiento cuenta con dos limitaciones; la primera se debe a la profundidad máxima de aplicabilidad; el cual va entre los 10 y 12 metros. La segunda, se debe al área de trabajo, ya que se debe contar con 15 mil metros cuadrados para que esta tecnología sea rentable.

- Sustitución Dinámica

Consiste en la introducción de una inclusión hecha de un material granular de hasta 7 metros (suelen tener un diámetro que va entre los 2 y 3 metros con espaciamentos de 5 a 6 metros) por medio de una compactación dinámica, que permite la reducción del tiempo de consolidación del terreno (generalmente constituido por terrenos cohesivos para este tipo de tratamiento), acelera los asentamientos antes de la construcción de la estructura gracias a la compactación dinámica y mitiga el riesgo de licuación. Además, gracias a su baja esbeltez no se tiene una limitación por coacción lateral.

- Compactación por explosivos

Este tratamiento consiste en introducir explosivos en el terreno a mejorar de tal manera que al actuar esta genere una rotura, alrededor del explosivo, provocada por las cargas distribuidas causadas por la tecnología, además de desplazamientos del terreno próximo. Esto produce que el terreno se vuelva más estable y se densifique, aunque esta densificación no es tan homogénea

como la que se obtiene mediante otros tratamientos de terreno. Asimismo, en arenas finas se pueden conseguir dos cosas, inducir a la licuación del suelo e incrementar la densidad considerablemente.

Como otros métodos de mejora de terreno, este también tiene ciertas limitaciones como es el caso del porcentaje de finos; el cual si supera el valor de 20% se pierde la efectividad de la tecnología. Además, se debe tener en cuenta un control de vibraciones, ya que estos explosivos pueden llegar a perjudicar a las estructuras vecinas.

- Vibro compactación / vibro flotación

El método consiste en la introducción de una herramienta vibradora giratoria (con una fuerza centrífuga de 240 KN) con el fin de densificar el terreno circundante a este gracias al reordenamiento de los granos del suelo que esta energía vibratoria produce. Además, se induce a unos asentamientos de un 15% del total del suelo a mejorar, entonces se reducen los asentamientos y se mitigan los problemas por licuación. Asimismo, se mejora la capacidad portante del suelo.

La aplicabilidad de la tecnología se basa en los suelos granulares con un porcentaje de finos menor a 15%, generalmente entre un 10 y 15%. Además, se pueden llegar hasta una gran profundidad de 50 metros y se tiene una mejor eficiencia en arenas limpias sin finos. Sin embargo, hay ciertas limitaciones al igual que el resto de los tratamientos como es el caso del contenido de finos en que se reduce su efectividad y se reduce la permeabilidad del terreno (Valiente Sanz, 2018).

- Vibro sustitución / columnas de grava

El método consiste en la incorporación de una malla de inclusiones granulares con propiedades que le brindan una mayor capacidad drenante y rigidez al terreno mediante la perforación de la zona por una máquina vibradora. El proceso resulta en unas columnas que distribuyen las cargas tanto en estas (reciben entre un 50 y 70% de la carga total) como en el terreno circundante a comparación de los pilotes que reciben ellos la carga total de la estructura de la cimentación. Esto se debe a que al igual que las columnas de módulo controlado, también cuentan con una capa de transferencia de cargas hecha de un material granular, que generalmente es el mismo del material de las columnas empleadas en la técnica de vibrosustitución (Valiente Sanz, 2018).

Otros beneficios que brinda este método es la mejora de la capacidad portante debido a la mejora de los parámetros resistentes y elásticos que se les da al terreno equivalente del sistema suelo-columna de grava, reduce los asentamientos por su rigidez, aumenta la velocidad de consolidación y reduce el riesgo de licuación en la zona.

Al igual que los otros tratamientos de terreno, este también cuenta con varias limitaciones, entre las que se presenta a los suelos cohesivos blandos con C_u menor a 15 KPa, en los cuales no se puede construir dichas columnas de grava por problemas con la resistencia lateral del terreno blando (se recomienda su uso en suelos cohesivos con consistencia entre firme y blanda como valores de C_u entre 15KPa y 50 KPa); además, en terrenos con alto contenido de material orgánico (entre 5 y 10%), terrenos evolutivos, degradables y en suelos sensitivos con resistencia al corte que pueda disminuir abruptamente por la vibración no se recomienda su uso.

Como se podrá observar este método tiene muchas semejanzas a las Columnas de Módulo Controlado una de las cuales es el uso de un terreno de trabajo horizontal hecho con una capa granular compactada de 40 cm conocido como colchón de reparto.

2.3 Inclusiones rígidas con columnas de módulo controlado

Consisten en una malla de columnas semirrígidas desarrolladas por la empresa francesa Menard, inyectadas mediante una barrena helicoidal, compuestas generalmente por mortero; sin embargo, en el “Manual de dimensionado y ejecución: Tratamiento de mejora y/o del refuerzo del terreno mediante columnas de mortero o módulo controlado (CMC)” de Menard, se indica que también pueden estar compuestas de hormigón fluido o lechada que contenga un ligante hidráulico. Además, estas pueden llevar un colchón de reparto que cumple la función de transmitir las cargas de los elementos a los que se les está cimentando tanto a las columnas como al terreno circundante desarrollando de esta manera el efecto de arco y evitando así el punzonamiento; pero si la distancia entre las columnas es demasiada o el espesor del colchón de reparto es excesiva ya no se producirá este efecto (Emersleben & Meyer, 2011). Asimismo, estas columnas cumplen la principal función de reforzar el terreno de cimentación, además de poder reducir los asentamientos tanto diferenciales como totales, aumentar la capacidad portante del suelo, disminuir el volumen de residuos y huella de carbono y densificar el terreno circundante (Varaksin et al., 2011).

2.3.1 Proceso de ejecución

El proceso de instalación de las Columnas de Modulo Controlado se lleva a cabo mediante maquinarias especiales para la construcción de estas inclusiones rígidas que cuenta con una hélice de perforación en forma de tornillo con una longitud de 3.2 metros que usa fuerzas tanto en compresión como en rotación o torsión y una bomba de hormigonado con una capacidad de 500 litros, un caudal de $80 \text{ m}^3/\text{h}$ y presiones de hasta 30 bares. La hélice está conformada por dos partes como se puede observar en **la Figura 2.1**: La primera permite extraer el terreno excavado en la punta, mientras que la segunda parte libera el terreno por extrusión lateral al mismo terreno permitiendo así que se densifique el suelo tratado, lo cual beneficia aún más el empuje estático generado en el terreno por la misma hélice al entrar en el suelo, ya que también permite una compactación del terreno y de esta manera mejora los parámetros y consecuente comportamiento del suelo de cimentación. Además, esta barrena no necesita de vibraciones para perforar el suelo, lo cual es un gran beneficio principalmente en zonas urbanas donde puede causar malestar a los vecinos. Esta barrena además cuenta con varios sensores que permiten un constante monitoreo de los parámetros de perforación y de la continuidad del hormigonado (MENARD, 2016b).

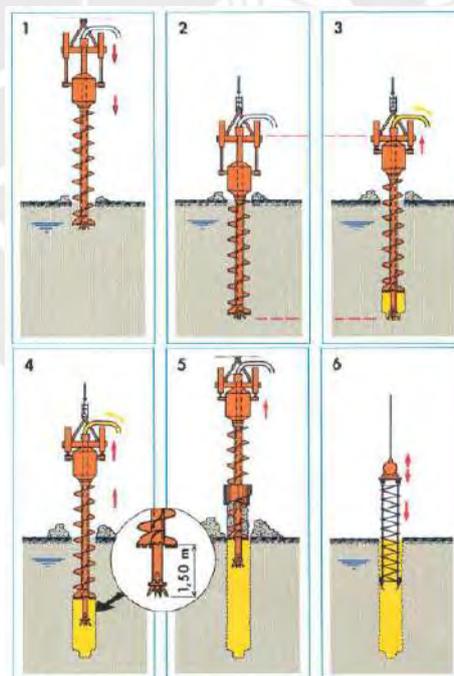


Figura 2.1: Hélice de perforación en forma de tornillo de la barrena (Chatte & Ciri3n, 2013).

La hélice de perforación es bajada mediante un tubo Kelly (tubo metálico hueco con una longitud de aproximadamente 9 metros que en su parte superior cuenta con varias mangueras que se conectan a la bomba de hormigonado) hasta unos 30 metros de profundidad.

Una vez que esta barrena perfora el suelo hasta la profundidad requerida para el largo de la columna de módulo controlado se levanta este tornillo de tal manera que también libera el material del que está compuesto la inclusión rígida. Esta inyección se da a una presión de aproximadamente 150 psi, la cual como se mencionó antes generalmente es mortero fluido y de esta manera se crea a la columna de módulo controlado, como se observa en la **Figura 2.2**, con un diámetro que depende del auger con el que se empleó para la construcción de esta (generalmente entre 0.28 y 0.45 metros) (Pearlman, 2012).

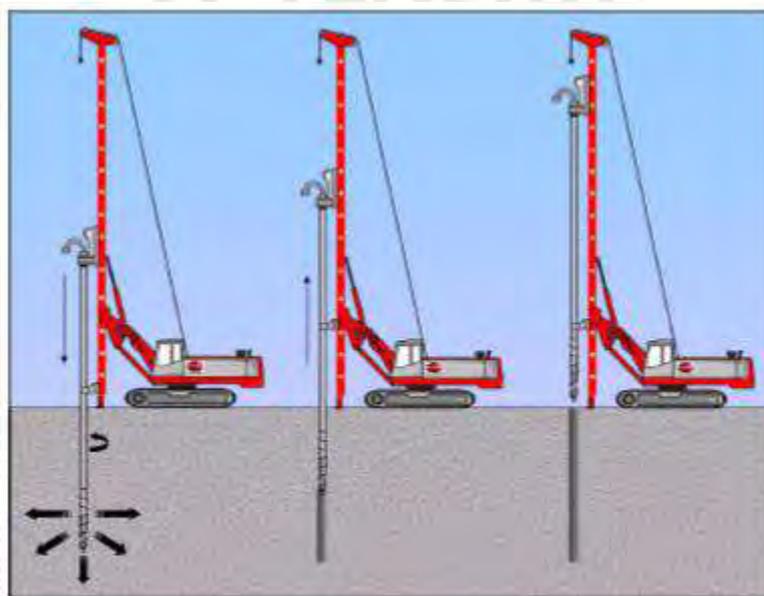


Figura 2.2: Proceso de ejecución de las columnas de módulo controlado (MENARD, 2016b).

2.3.2 Propiedades de los materiales

Las columnas de módulo controlado suelen tener un módulo de deformación entre 5000 y 10000 MPa para una resistencia a la compresión a 28 días del material entre 5 y 20 MPa. Este valor dependerá del tipo de material que se emplee para la inclusión rígida. Este módulo de deformación se puede determinar con las siguientes fórmulas dependiendo si el material es concreto o mortero.

$$E_p = 3700f_{ck}^{1/3}, \text{ para concreto} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$E_p = 2700f_{ck}^{1/3}, \text{ para mortero} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

2.3.3 Aplicabilidad de la tecnología

Según Menard (2016b), esta tecnología es aplicable tanto en terrenos artificiales como naturales como son en primer lugar en suelos arenosos y granulares de baja resistencia (valores de número de golpes de SPT menores a 15 – 20 golpes) o una densidad relativa menor a 45% (con una compacidad que va de media suelta a muy suelta) y módulos de deformación inferiores a 150 kg/cm². En segundo lugar, se menciona a los suelos cohesivos de consistencia blanda a rígida con una resistencia a la compresión menor a los 2 kg/cm² y presiones límites menores a los 1.5 a 2 MPa con resistencia en la punta del penetrómetro estático menor a 15 o 20 MPa. Asimismo, se pueden usar en rellenos antrópicos, escombreras, vertederos, suelos con un contenido alto de material orgánico (terrenos evolutivos y degradables), suelos muy deformables, terrenos con parámetros no homogéneos.

Además, las columnas de módulo controlado también pueden reemplazar a otras técnicas de tratamientos de terreno en caso de que el suelo a mejorar no cumpla con los requisitos que exige dicha tecnología, este es el caso de las columnas de grava que tiene ciertas limitaciones correspondiente a los suelos que tienen una resistencia al corte menor a los 15 KPa y tienen poca resistencia lateral. Además, existen otras técnicas que cuentan con ciertas limitaciones en suelos con carga admisible de cimentación superior a 2 kg/cm² y con módulo de deformación del terreno mejorado superior a 200 kg/cm².

Por su método constructivo y forma de instalación que densifica el terreno sin producir vibraciones al entrar en el suelo ni necesita de extracciones del terreno a tratar, permite trabajar en suelos contaminados o en zonas donde se necesita de extraer muestras del terreno, en lugares donde no se pueda realizar vibraciones debido a que se cuenta con suelos muy blandos que pueden causar asentamiento en viviendas aledañas a la zona de trabajo y en zonas con suelos blandos con poca estabilidad y nivel freático alto, y finalmente en suelos con alto peligro de contaminación que generalmente se encuentran cerca de acuíferos.

Ante los tipos de terrenos mencionados se suele dar uso a las cimentaciones profundas (pilotes); los cuales resultan ser muy costosas económicamente, por lo que se ve la necesidad de plantear mejoramientos de suelo que al no necesitar buscar una zona dónde empotrar el refuerzo, ni

acero en su interior, permiten economizar los proyectos. Asimismo, se sabe que para el caso de pilotes generalmente vienen con longitudes que no son exactas a las que se necesitan en el proyecto; por lo que, es necesario cortar esta, a diferencia de las CMC que se puede adaptar fácilmente a la altura exacta a la cual se quiere llegar (Pearlman, 2012). Además, cuenta con muy buenos rendimientos de trabajo (entre 400 a 500 ml/jornada) (Montejano & Pérez Rodríguez, 2012). Por todo esto, se les considera como una alternativa sostenible de cimentación en comparación de las cimentaciones profundas; es decir una alternativa atractiva frente a las cimentaciones profundas (Montejano & Pérez Rodríguez, 2012; Pearlman, 2012). Apoyando dicha idea se han hecho análisis de sustentabilidad tanto para columnas de módulo controlado como para pilotes, donde se observa que las primeras mencionadas solo necesitan de grout para su ejecución, mientras que los pilotes requieren de otros materiales que son menos sustentables como el acero y el concreto; permitiendo así que las CMC dejen una menor huella de carbono en el ambiente (Masse, Parinella, et al., 2011). Asimismo, estas inclusiones evitan el contacto entre posibles acuíferos cercanos al terreno impidiendo que se produzca el fenómeno de barrera al presentarse materiales permeables en este (Taube & Masse, 2010).

Las columnas de módulo controlado también pueden combinarse con otras tecnologías cuando se presenten casos especiales. Por ejemplo, se ha visto que para el caso de un terraplén en donde se tenga un gran potencial de licuación se pueden usar drenes con las CMC generando buenos resultados y permitiendo la densificación y mejora de la resistencia del suelo tratado (Plomteux & Lazacedieu, 2007). También, es posible acoplar el método del dimensionado que hay en la actualidad para la ejecución de las columnas de módulo controlado en zonas donde se tiene un espacio limitado o poco aire para su realización; lo cual la hace muy beneficiosa a comparación de otras tecnologías (Plomteux & Liausu, 2007). Asimismo, se puede aplicar en tanques de almacenamiento o bajo estructuras que soportan líquidos, es por ello por lo que es común encontrarse con estas tecnologías en refinerías o industrias. Además, es común que estos tanques se encuentren sobre suelos que ya estén contaminado; por lo que, el uso de columnas de módulo controlado llega a ser factible para este tipo de estructuras (Masse et al., 2009). También se ha aplicado este tipo de soluciones para muros de suelo reforzado, permitiendo que por su propia composición no drene el agua por este y así no se transportan materiales contaminantes del agua que pueda haber (Masse, Carey, et al., 2011). Finalmente, se ha encontrado en los últimos años una gran aplicabilidad para otros tipos de proyectos como taludes, ferrocarriles, parques eólicos, pistas de aterrizaje en aeropuertos, plantas de energía y petroquímicas (Leclaire et al., 2017).

2.3.4 Funcionalidad de la columna

La inclusión rígida soporta la carga transmitida de la estructura a cimentar según una malla regular que transporta las cargas tanto al suelo circundante como a la inclusión rígida en sí, gracias a la existencia de un suelo granular compactado al 95% con Proctor modificado con un contenido de finos entre 10% y 40%, denominado colchón de reparto de cargas. Esta capa se encarga de distribuir de manera uniforme el peso, llevando así una mayor parte de la carga hacia la inclusión rígida, procedente de la carga muerta y viva de la estructura, del peso propio de la plataforma y de la fricción generada por la interacción entre la CMC con el suelo circundante y una menor al terreno tratado. Generalmente esta cuenta con un espesor entre 30 y 60 cm, y puede llevar elementos detectores de fugas y protección catódica en su interior (2016a).

La distribución de las cargas se da de tal manera que se puede llegar al equilibrio entre los asentamientos producidos en la columna con los que se presenten en el terreno blando; además según Menard (2016b), se da de tal manera que las columnas deben soportar entre un 60 y 95 % de la carga total generada, enviando gran parte del peso hacia el suelo más profundo que deberá ser más resistente al terreno tratado con las inclusiones; el resto de la carga lo debe soportar el terreno densificado que rodea a las inclusiones (gracias al proceso de empuje lateral que produce la barrena al entrar en el suelo e inyecta la columna de mortero).

El esquema descrito en el Manual de Dimensionado y Ejecución: Tratamiento de Mejora y/o refuerzo del terreno mediante Columnas de Mortero o Módulo Controlado (CMC) de Menard que se muestra en la **Figura 2.3** indica que la carga vertical producida por la estructura a cimentar en la columna hace que se formen fuerzas de fricción entre la columna y el suelo, además de una carga en sentido contrario en la punta de la inclusión.

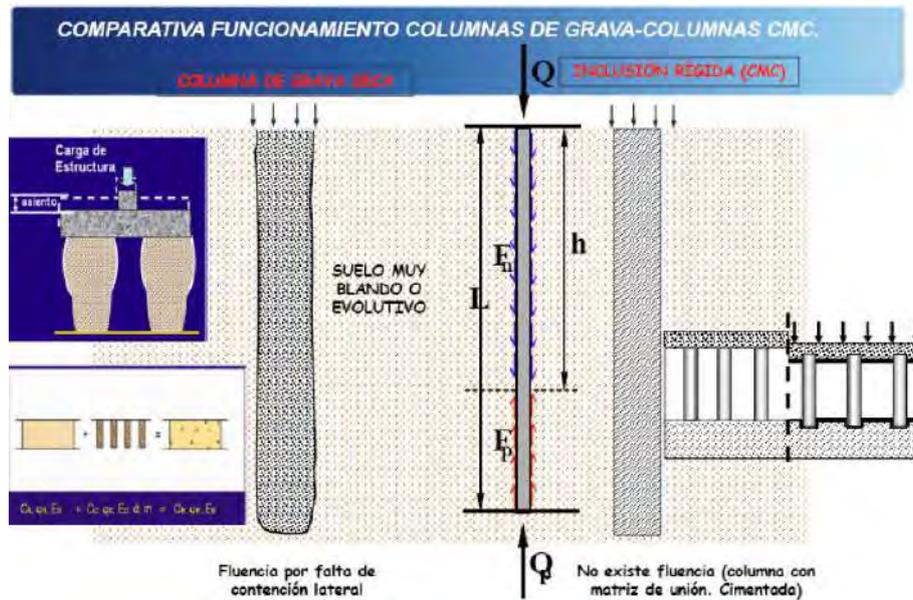


Figura 2.3: Esquema de distribución de las inclusiones rígidas (MENARD, 2016b).

Asimismo, las fuerzas de fricción o rozamiento se presentan en sentido tanto positivo como negativo en la inclusión rígida, generándose una negativa en la parte superior de la columna y positiva en la contraparte. La separación entre dichas distribuciones se da en el eje neutro del elemento. El rozamiento negativo en el fuste según Menard (2016b), se debe a la transmisión de las cargas de la estructura al terreno mejorado, que va entre un 5 a 40 % del total; esta distribución afectará la superficie lateral de la columna como se puede observar en la **Figura 2.4** de tal manera que si esta área se incrementa también aumentará la homogeneidad de comportamiento del elemento y la distribución de esfuerzos será más uniforme. Entonces, el equilibrio de la distribución de fuerzas en la CMC resulta en la **Ecuación 2.3** en donde se tienen a las componentes principales. Según Plomteux & Lazacedieu (C Plomteux & Lazacedieu, 2007), para que se produzca la condición de equilibrio presentada, se debe de generar un asentamiento en la inclusión rígida.

$$Q + F_n = F_p + Q_p \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Como se observa toda la distribución de cargas consiste en fuerzas verticales, mas no horizontales, esto se debe a que según Menard el rozamiento interno que se produce en la columna es independiente de la capacidad de contención que tiene el suelo mejorado.

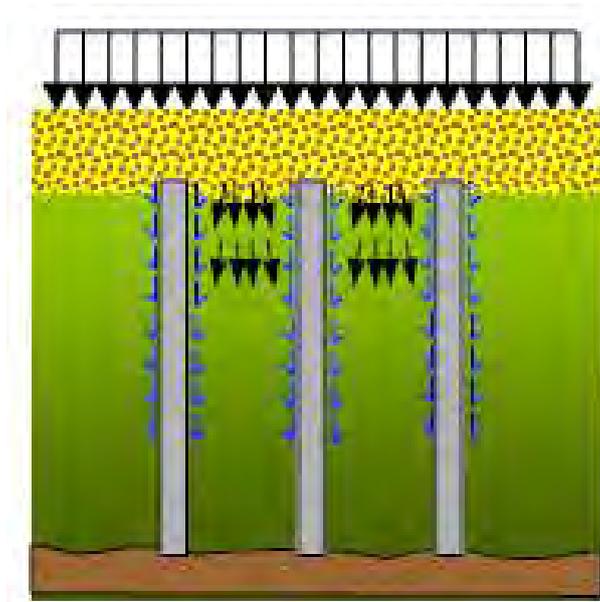


Figura 2.4: Transmisión de las cargas del terreno blando hacia una parte del fuste de la inclusión (MENARD, 2016b).

Adicionalmente las columnas pueden llevar refuerzos extra en caso sea necesario, como una barra de acero al centro de las mismas inclusiones rígidas cuando estas sufran de tensiones de tracción o también se pueden colocar geosintéticos como geomallas en el colchón de reparto para absorber los desplazamientos horizontales (Walker et al., 2011).

Todo el sistema está compuesto por una serie de elementos donde cada uno de los cuales cumple una función para que el conjunto funcione de manera adecuada. Una parte importante para esto ocurra es el análisis de la interacción que hay entre cada uno de ellos, ya que se deben cumplir ciertos criterios en estos que deben ser verificados.

Se sabe que estos elementos están conformados por: La estructura a cimentar, la losa de cimentación o zapata, el colchón de reparto de cargas, la inclusión rígida y el suelo circundante a esta última. Asimismo, se conoce que cada uno de estos elementos hará contacto con uno o más de los otros indicados. La plataforma o colchón de reparto de cargas hará contacto en su base con el suelo circundante y la inclusión rígida, y en la parte superior con la estructura (incluyendo a la cimentación correspondiente).

- Fricción negativa

Una de las partes más importantes para la transmisión de cargas es la interacción del suelo circundante con la inclusión rígida, que también está muy relacionada con la transmisión de

cargas en el colchón de reparto por la fricción negativa en la columna ficticia que propone Combarieu de lo cual se entrará a mayor detalle luego. Las inclusiones rígidas reciben dos cargas, una carga por el efecto de campana que se produce directamente en la cabeza y la otra es por la fricción negativa y positiva que recibe del suelo circundante. La fricción negativa se produce en los primeros metros del largo de la columna hasta llegar al punto o eje neutro. Esto se debe al asentamiento relativo que hay entre la inclusión y el suelo circundante, asentándose más el terreno que la inclusión al nivel de la cabeza de la CMC, debido a la propia compresibilidad del suelo (cuando se tiene una losa de cimentación se confina más el terreno al nivel de la cabeza de la inclusión). Y esa bajo esta premisa que se asume que en algún punto el asentamiento de la inclusión y el del suelo circundante serán iguales y será en ese punto donde se termine la fricción negativa para pasar a una positiva. A este punto se le conoce como eje neutro. La fricción negativa permite que el suelo blando circundante pueda transferir de manera gradual sus cargas hacia la CMC con el fin de que se deforme en menor proporción el suelo tratado en el área que hay entre inclusiones. Cuando el suelo tratado es uno blando se espera que se asiente por consolidación a largo plazo; por lo tanto, la fricción negativa alcanzará su valor más alto a largo plazo. Por otro lado, la fricción positiva ayuda a la resistencia en punta de la inclusión a resistir las cargas aplicadas en la cabeza de la columna y de la fricción negativa. Además, la punta de la inclusión queda incrustada en una capa de suelo más resistente para poder mejorar la capacidad portante del suelo reforzado.

- Colchón de reparto de cargas

Existen dos métodos para determinar la distribución de cargas en el colchón de reparto. Está el método de Combarieu que considera la columna ficticia desde el punto de vista de la fricción negativa que propone y está el método de cono de difusión de carga que indica que hay un ángulo de inclinación sobre la cabeza de la inclusión de tal manera que forma un cono truncado sobre esta, por donde pasarán las cargas de la estructura a lo largo de la plataforma. Sin embargo, se puede obtener otras formulaciones para determinar la fricción negativa a partir de otros métodos analíticos empleados en cimentaciones profundas (Mánica Malcom, 2013).

- Asentamientos

El manual de Menard y la investigación realizada por Asiri National Project, proponen que los asentamientos pueden ser calculados por un módulo edométrico equivalente (E_{oed}) conociendo

la sobrecarga aplicada y la profundidad a evaluar. Entonces, el asentamiento se puede obtener por la siguiente expresión.

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{q}{E_{oed}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

2.3.5 Verificación geotécnica

- Capacidad portante global ULS

Una vez realizado los cálculos se debe hacer una verificación determinando una carga de referencia del dominio de aplicación de la columna de módulo controlado para la condición de estado límite último (ULS) (MENARD, 2016b). Para lo cual se usan las siguientes expresiones.

$$q_{ref,ULS} \leq \frac{q_{sol,ULS}(S - nA_c) + nQ_{col,ULS}}{S} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$Q_{col,ULS} = A_p \min \left(f_{cd}, \frac{\frac{q_p}{\gamma_{R;d\gamma_b}} + \frac{q_s}{\gamma_{R;d\gamma_s}}}{A_p} \right) \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$q_{sol,ULS} = k_p \frac{p_{le}^*}{\gamma_{R;d;v}\gamma_{R;d}} + q'_0 \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Asimismo, los coeficientes de las expresiones presentadas para los casos de carga para ULS se determinan de la siguiente tabla.

Tabla 2.1: Valores asignados de coeficientes de caso de carga ULS (Asiri National Project & IREX, 2012)

$\gamma_{R;d\gamma_b}$	1.375
$\gamma_{R;d\gamma_s}$	1.375
$\gamma_{R;d;v}\gamma_{R;d}$	1.68

- Capacidad portante global SLS

Una vez realizados los cálculos se debe hacer una verificación determinando una carga de referencia del dominio de aplicación de la columna de módulo controlado para la condición de estado límite último (ULS) (MENARD, 2016b). Para lo cual se usan las siguientes expresiones.

$$q_{\text{ref,SLS}} \leq \frac{q_{\text{sol,SLS}}(S - nA_c) + nQ_{\text{col,SLS}}}{S} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$Q_{\text{col,SLS}} = A_c \min \left(0.6k_3 f_{ck}^*, 0.6f_{ck}, \frac{\frac{q_p}{\gamma_{R;d}\gamma_b} + \frac{q_s}{\gamma_{R;d}\gamma_s}}{A_c} \right) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$q_{\text{sol,SLS}} = k_p \frac{p_{le}^*}{\gamma_{R;d}\gamma_{R;d}} + q'_0 \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Asimismo, los coeficientes de las expresiones presentadas para los casos de carga para ULS se determinan de la siguiente tabla.

Tabla 2.2: Valores asignados de coeficientes de caso de carga SLS (Asiri National Project & IREX, 2012)

Tipo de inclusión	Con desplazamiento	Sin desplazamiento
$\gamma_{R;d}\gamma_b$	1.96	2.75
$\gamma_{R;d}\gamma_s$	1.96	1.96
$\gamma_{R;d}\gamma_{R;d}$	2.76	2.76

2.3.6 Verificación estructural

Según el Eorucode 7 National Application Standard (NFP 94 262 for Deep Foundation) se debe establecer una resistencia a la compresión máxima (f_{cd}) del concreto o mortero en función de ciertos parámetros y coeficientes reductores que dependen del modo de ejecución, tipos de ensayos y obra a realizar.

$$f_{ck}^* = \inf(f_{ck}(t); C_{\text{max}}; f_{ck}) \frac{1}{k_1 k_2} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$f_{cd} = \text{Min} \left(\alpha_{cc} k_3 \frac{f_{ck}^*}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{f_{ck}(t)}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{C_{\text{max}}}{\gamma_c} \right) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde:

f_{ck}^* : Valor característico de la resistencia a la compresión del concreto o mortero

$f_{ck}(t)$: Valor característico de la resistencia a la compresión del concreto o mortero en un tiempo de t días

f_{ck} : Valor característico de la resistencia a la compresión del concreto o mortero a los 28 días

C_{\max} : Resistencia a la compresión máxima tomando en cuenta la consistencia requerida de concreto o mortero, dependiendo de la técnica usada

k_1 : Coeficiente que depende del método de ejecución y de la relación de esbeltez

k_2 : Coeficiente que depende de la relación de esbeltez

k_3 : Coeficiente que depende del tipo de control realizado

α_{cc} : Coeficiente que depende de la ausencia o presencia de refuerzo de acero, igual a 1 cuando sí está reforzado y a 0.8 cuando no es así

γ_C : Coeficiente parcial con un valor igual a 1.5 para ULS fundamental y 1.2 para ULS accidental

Los valores de los coeficientes de C_{\max} y k_1 se determinan por tablas como la que se presenta a continuación.

Tabla 2.3: Valores asignados de C_{\max} y k_1 (Asiri National Project & IREX, 2012)

Modo de ejecución	C_{\max} (MPa)	k_1
Inclusiones perforadas con extracción de suelo	35	1.3
Inclusiones perforadas con barreno hueco con extracción de suelo	30	1.4
Inclusiones perforadas con barreno hueco con desplazamiento de suelo	35	1.3
Inclusiones impulsadas por vibraciones o lanzado en el lugar	35	1.3
Incorporación de un aglutinante con el suelo	*	**

(*) Valor que se determina mediante pruebas de campo.

(**) Columnas de suelo tratado usando una herramienta mecánica que garantiza la geometría de la sección horizontal.

Los valores de k_2 se determinan usando las siguientes expresiones para diferentes casos:

$$k_2 = 1.05, \text{ para inclusiones donde } d/L \text{ es menor a } 1/20 \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$k_2 = 1.3 - d/2, \text{ para inclusiones donde } d \text{ es menor que } 0.60 \text{ m} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

$$k_2 = 1.35 - d/2, \text{ para inclusiones que cumplen con las condiciones antes mencionadas} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Los valores del coeficiente k_3 se determina por la siguiente tabla.

Tabla 2.4: Valores asignados de k_3 (Asiri National Project & IREX, 2012)

k_3	Sin ensayo	Con ensayo de impedancia o reflexión	Con ensayo de calidad	Con ensayo de capacidad de carga	Con ensayo de control del mejorado
Inclusiones rígidas requeridas para estabilidad	*	0.75	**	1.2	1.4
Inclusiones rígidas no requeridas para estabilidad	0.65	0.85	1.4	1.5	1.7

(*) Este ensayo es necesario

(**) Deben ser al menos ensayos de carga

Asimismo, se debe definir la resistencia a la compresión máxima y media de diseño tanto para el estado límite último (ULS) y el estado límite de servicio (SLS). Para el ULS se determinan la resistencia a la compresión máxima y media con la **Ecuación 2.16** y la **Ecuación 2.17**, respectivamente. Mientras que para el SLS se definen la **Ecuación 2.18** y **Ecuación 2.19**.

$$f_{cd,max,ULS} = f_{cd} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

$$f_{cd,med,ULS} = \text{Min}(f_{cd}, 7\text{MPa}) \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$f_{cd,max,SLS} = \text{Min}(0.6k_3 f_{ck}^*, 0.6f_{ck}) \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$f_{cd,med,SLS} = \text{Min}(f_{cd}, 7\text{MPa}) \quad \text{Ecuación 2.19}$$

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Esta sección presenta a detalle las asunciones generales para el método analítico y la forma en que se calculan los asentamientos relativos entre la inclusión rígida y el suelo circundante, cargas en punta, cabeza y fricción a lo largo de la columna de módulo controlado, la fricción negativa y todas las cargas transmitidas a lo largo de la inclusión y el suelo circundante considerando la teoría de Combarieu y de Frank & Zhao. Asimismo, será necesario realizar un análisis por métodos numéricos, exactamente por elementos finitos. Este análisis se deberá hacer para dos modelos distintos. En ambos, se analizará una celda sola para lo cual se usarán los modelos axisimétrico y de deformación plana. Con este último método se podrá al igual que por el método analítico determinar los asentamientos y la transferencia de cargas tanto en la inclusión rígida como en el suelo circundante.

3.2 Método analítico

Los métodos analíticos en general consisten en ecuaciones basadas en geometrías sencillas que mediante un planteamiento simple, ideal o más simplificado permiten determinar ciertos valores que generalmente requerirían de un análisis más exhaustivo. Estos métodos pueden llegar a determinar de una manera aproximada la distribución de cargas o esfuerzos entre la inclusión rígida y el suelo circundante a esta y los asentamientos tanto de la columna de módulo controlado como del suelo blando. Sin embargo, la precisión de estos métodos es algo a debatir, debido al exceso de simplificaciones que se toman al momento de analizar las deformaciones y tensiones, y sus limitaciones según la idealización de los casos asumidos para su análisis.

El proceso de cálculo para las columnas de módulo controlado (CMC) se basa en procesos iterativos, asumiendo un diámetro determinado para la columna de mortero, cierto espaciamiento y valores de malla de la red para así determinar si los valores de la distribución de tensiones son los admisibles y de igual manera con los asentamientos calculados por separado tanto para el terreno como para las columnas.

De acuerdo con Menard (2016b), este proceso se basa en los métodos desarrollados por Combarieu (O. Combarieu & Laboratoire régional des Ponts-et-Chaussées de Rouen, 1988) y el método de Frank & Zhao, asumiendo un comportamiento elástico de la CMC. El primero

mencionado indicó en 1974 la ubicación de un punto neutro en la inclusión rígida que limita la zona del rozamiento negativo con el positivo. Asimismo, el método de Combarieu desarrolló el parámetro $k_{tan}\delta$ que se relaciona con el rozamiento interno entre el suelo circundante y la CMC (Combarieu & Laboratoire régional des Ponts-et-Chaussées de Rouen, 1988). El método de Frank & Zhao se basa en el asentamiento relativo de las inclusiones con respecto al terreno circundante para determinar las leyes de movilización de cargas. Sin embargo, existen otros dos métodos adicionales al de Combarieu según Asiri National Project & IREX (Asiri National Project & IREX, 2012), para el caso de contar con cimentaciones superficiales. Estos son el método de Glandy y Frossard (2002) y de Simon (2010).

Estos métodos pese a las diferencias que tiene en sus análisis coinciden en el comportamiento de los elementos del sistema. En primer lugar, se asume que la inclusión rígida o el material del cual está compuesto esta tenga un comportamiento elástico con su respectivo módulo de elasticidad (E) y un factor que pueda contemplar un diseño resistente. En segundo lugar, el suelo blando circundante se espera que sea compresible para que funcione adecuadamente el sistema, basado en la fricción negativa producida por el desplazamiento relativo entre la inclusión y el suelo blando; por lo que, cuenta con un módulo de deformación que se considera como un tipo de módulo edométrico E_{oed} . Además, se sabe que el material del colchón de reparto debe contar con un grado de compactación adecuado como se explicó líneas arriba. Asimismo, este cuenta con un módulo de Young.

- Radio equivalente

Según Asiri National Project & IREX (Asiri National Project & IREX, 2012), cuando ya se toma en cuenta a un grupo de inclusiones, se genera una malla de estas desde una vista en planta, la cual se presenta en la **Figura 3.1**. Esta malla tendrá una determinada dimensión en donde se puede observar el radio de influencia o radio equivalente, que depende de la dimensión de la malla como se observa en la **Ecuación 3.1**.

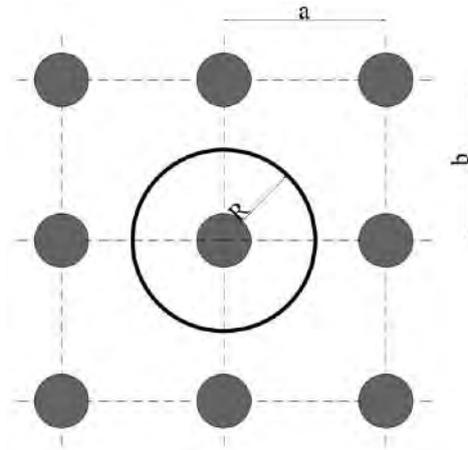


Figura 3.1: Dimensión de la malla de inclusiones rígidas

$$R = \sqrt{\frac{a \times b}{\pi}}$$

Ecuación 3.1

- Asentamiento relativo

Como se mencionó antes, las leyes que controlan a la movilización de las fuerzas en las inclusiones rígidas están en función de los desplazamientos relativos entre la inclusión rígida y el suelo circundante, sea para la fricción positiva y negativa a lo largo de la inclusión, o por la fricción negativa en las columnas ficticias que se generan en la plataforma de transferencia de cargas para determinar la carga en la cabeza de la inclusión y en la punta de la inclusión se sabe que se determina la carga por la diferencia de asentamientos entre la inclusión con el terreno resistente al cual se incrusta la columna de módulo controlado. La manera de determina este desplazamiento relativo se puede observar en la **Ecuación 3.2**.

$$w(z) = y_p(z) - y_s(z)$$

Ecuación 3.2

Frank & Zhao propusieron gráficas para determinar la movilización de las cargas para la punta de la inclusión, la sección lateral de esta y en su cabeza al relacionarlas con el desplazamiento relativo que ocurre en cada una de estas partes. De cada una de estas gráficas se pueden obtener parámetros como se observará a continuación.

- Movilización de cargas en la punta de la inclusión rígida

En la **Figura 3.2** se observa que hay dos pendientes en la gráfica en las cuales se cuenta con el parámetro K_q . En la **Ecuación 3.3** se observa que K_q está en función de m_q , del módulo presiométrico normalizado de Menard y del diámetro equivalente de la punta de la inclusión. El primer parámetro mencionado varía dependiendo del tipo de suelo y del método de instalación de la columna de módulo controlado.

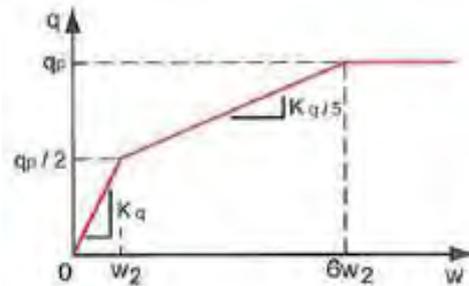


Figura 3.2: Leyes de la movilización de cargas según el desplazamiento relativo en la punta de la inclusión rígida

$$K_q = \frac{m_q \times E_M}{D_p} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

El valor de m_q también puede ser determinado por valores propuestos para una columna de módulo controlado, sugeridos en el Manual de Menard. Dichos valores se presentan a continuación.

→ m_q para suelos finos se considera igual a 11

→ m_q para suelos granulares se considera igual a 4.8

Combarieu sugirió otra forma de determinar el desplazamiento relativo. Esto se puede observar en la **Ecuación 3.4**.

$$w = -\frac{D_p \times q_p}{m_q \times E_M} \ln\left(1 - \frac{q}{q_p}\right) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

- Movilización de cargas en la sección lateral de la inclusión rígida

Esta movilización se va desarrollando en la fricción entre la inclusión rígida y el suelo circundante; por lo que, esta se relaciona directamente con la cortante a lo largo de dicha frontera y con el desplazamiento relativo, como se mencionó en líneas anteriores. Por lo que, Frank & Zhao sugieren la curva presente en la **Figura 3.3**. Donde se observa que hay dos

pendientes donde se presenta al parámetro K_t que está en función de m_τ , el módulo presiométrico normalizado por Menard y el diámetro equivalente en la sección transversal de la inclusión rígida a lo largo de su fuste como se presenta en la **Ecuación 3.5**.

A pesar de que Frank & Zhao se basaron en una buena cantidad de ensayos de carga en suelos granulares y de grano fino para obtener las curvas propuestas, que además resultó en una buena interacción entre la inclusión y el suelo alrededor, Combarieu desarrolló otra curva bajo el dominio de otras leyes como se presentan en la **Ecuación 3.6**.

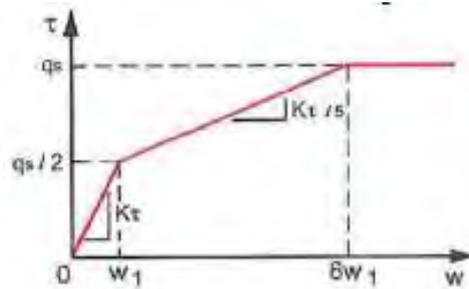


Figura 3.3: Leyes de la movilización de cargas según el desplazamiento relativo en la sección lateral de la inclusión rígida

$$K_t = \frac{m_\tau \times E_M}{D_s} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Al igual que para el caso de la movilización de cargas en la punta, acá también se puede determinar el valor de m_t según valores sugeridos por el Manual de Menard. Estos se presentan a continuación.

- m_τ para suelos finos se considera igual a 2
- m_τ para suelos granulares se considera igual a 0.8

En la curva ajustada propuesta por Combarieu (1988) se observa que el primer tramo termina ya no en el valor de $q_s/2$ sino que se aproxima más al valor de $2 \cdot q_s/5$.

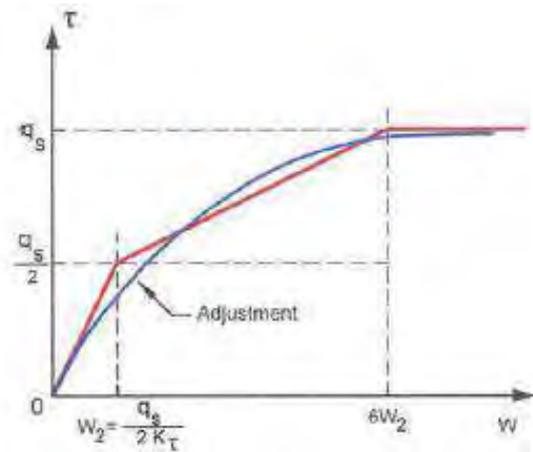


Figura 3.4: Leyes de la movilización de cargas ajustada según el desplazamiento relativo en la sección lateral de la inclusión rígida

$$w = -\frac{D_s q_s}{m_\tau E_M} \ln\left(1 - \frac{\tau}{q_s}\right) \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Asimismo, se pueden determinar los valores de la carga en punta o esfuerzo cortante en la inclusión rígida para 3 casos. Considerando que sus asentamientos relativos están en el primer tramo de la gráfica, que están en el segundo tramo o en el tercero. Esto se puede observar en la **Ecuación 3.7**, **Ecuación 3.8** y **Ecuación 3.9**.

$$\tau = \frac{m_\tau E_M w}{D_s}, w \leq \frac{D_s q_s}{2m_\tau E_M} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$\tau = \frac{m_\tau E_M w}{5D_s} + \frac{2q_s}{5}, \frac{D_s q_s}{2m_\tau E_M} \leq w \leq \frac{3D_s q_s}{m_\tau E_M} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

$$\tau = q_s, w \geq \frac{3D_s q_s}{m_\tau E_M} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Vale mencionar que las ecuaciones anteriormente mencionadas también cumplen para la carga por punta.

- Fricción negativa

El valor de la fricción negativa desde la cabeza de la inclusión considerándolo como el nivel 0 hasta el punto neutro denominado con la profundidad h_c , la cual se puede observar en la **Ecuación 3.10** (Asiri National Project & IREX, 2012)

$$F_N = \int_0^{h_c} \tau(z) \pi D dz \quad \text{Ecuación 3.10}$$

- Valor límite de la fricción

El cálculo de la fricción negativa a nivel de esfuerzo, ya no se hace bajo la premisa de los desplazamientos relativos, sino se hace desde el enfoque de métodos de falla bajo esfuerzos efectivos. Estos esfuerzos efectivos deben ser calculados a nivel vertical para luego obtener los horizontales. Esto se consigue al multiplicar las tensiones verticales a lo largo de la inclusión por el coeficiente de empuje en la interfaz entre el suelo blando – inclusión rígida como se observa en la **Ecuación 3.11**. A esta tensión horizontal se le multiplica el término que relaciona el esfuerzo horizontal con el esfuerzo cortante a lo largo de toda la inclusión como se observa en la **Ecuación 3.12** para obtener el valor del esfuerzo cortante para la fricción. Entonces, ahora se tiene dos términos que estarán estrechamente ligados; los cuales son el coeficiente de empuje y la tangente del ángulo de fricción entre el suelo y la inclusión rígida (llamado también coeficiente de fricción entre el suelo circundante – inclusión rígida).

$$\sigma'_h(z) = K \times \sigma'_v(z) \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$q_s = K \times \sigma'_v(z) \times \tan \delta \quad \text{Ecuación 3.12}$$

En caso de que a determinada profundidad se tiene un asentamiento de la inclusión rígida mayor al del suelo blando o igual a cero se considerará el valor de q_s igual a la fricción lateral límite del suelo y no como se calcula en la **Ecuación 3.11**, ya que ahí no se cumple la premisa de la fricción negativa.

Además, para determinar el valor del factor $k \tan \delta$ se cuenta con una tabla que relaciona al tipo de suelo que se tiene en la zona de estudio presentado en el Manual de Menard. Esta tabla se presenta a continuación.

Tabla 3.1: Relación entre los valores de $k \tan \delta$ y el tipo de suelo (MENARD, 2016b)

VALORES DE $K.tan\delta$		Con Desplazamiento	Sin Desplazamiento
TIPOS DE TERRENO		$K.tan\delta$	$K.tan\delta$
TURBA	Suelos orgánicos	0.20	0.15
ARCILLAS, LIMOS	Blandos	0.20	0.15
	Firmes a duro	0.30	0.20
ARENAS, GRAVAS	Muy flojas	0.35	0.35
	Flojas	0.45	0.45
	Otros	1.00	1.00

- Movilización de cargas en la cabeza de la inclusión rígida

Según Frank & Zhao, la carga en la cabeza de la inclusión rígida se determina al considerar que la movilización generada en este punto se da gracias a la fricción negativa en la columna ficticia que se encuentra en el colchón de reparto. Además, se le asigna un valor límite a la carga que resulta de multiplicar al coeficiente de fricción suelo – inclusión rígida por el esfuerzo efectivo vertical. Considerando los siguientes valores de los coeficientes de Frank & Zhao valor de $K \tan \delta$ igual a 1 y un valor de m_τ igual a 2.

- Cargas de la inclusión rígida y suelo blando

El modelo, base para los métodos analíticos, de las mallas de inclusiones considera que la celda unitaria tiene una forma de cilindro. Este cuenta con deformaciones laterales y esfuerzos de corte iguales a cero en sus bordes. Además, la base de dicho cilindro debe estar ubicada a una profundidad tal que se pueda considerar que el esfuerzo vertical se vuelve constante o una a la cual se considera un asentamiento que tienda a cero.

El cálculo para dicho modelo se realiza mediante ecuaciones diferenciales, las cuales describen a la movilización de las fuerzas en la inclusión. Dichas cargas se pueden separar en las que son de suelo con las que son de la inclusión rígida como se muestra en la **Ecuación 3.13** y en la **Ecuación 3.14**. Además, como se mencionó anteriormente esta movilización está ligada con los asentamientos relativos; por lo que, se puede obtener las ecuaciones diferenciales de los asentamientos, tal como se presentan en la **Ecuación 3.15** y **Ecuación 3.16**. Este asentamiento relativo se determina al restar las soluciones de la **Ecuación 3.15** con la de la **Ecuación 3.16**. Asimismo, como se explicó en líneas anteriores el corte se relaciona directamente con la movilización relativa de los elementos.

$$dQ_p(z) = (P\tau + \gamma_p A_p) dz \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$$dQ_s(z) = (-P\tau + \gamma_s A_s) dz \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$dy_p(z) = \frac{Q_p(z)}{A_p E_p} dz \quad \text{Ecuación 3.15}$$

$$dy_s(z) = \frac{Q_s(z)}{A_s E_s} dz \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Con todas estas ecuaciones diferenciales se podrá resolver el sistema de las inclusiones rígidas mediante un proceso iterativo para lo cual se deberán de tomar algunas asunciones, como son la carga total aplicada al nivel del colchón de reparto, la fracción de la carga total que recibe la inclusión rígida ficticia en su cabeza. La carga total aplicada en la cabeza del modelo se puede considerar como la carga que aporta la estructura a cimentar al suelo y la parte de la carga total que se aplica en la cabeza de la columna ficticia se puede determinar considerando que el asentamiento a ese nivel del suelo blando es igual al de la columna ficticia. Es así que la carga que recibirá la cabeza de la columna ficticia será diferente y además mayor que la que se aplica en el suelo tratado circundante.

3.3 Métodos numéricos

Los métodos numéricos son herramientas que permiten simular a estructuras complejas que pueden llegar a ser casi imposibles de resolver de manera analítica. Asimismo, estos consideran factores importantes para el cálculo de deformaciones, desplazamientos y esfuerzos del modelo como el proceso constructivo, las interfaces entre materiales del conjunto. Algunos de los métodos numéricos más usados en la actualidad son el método de elementos finitos y el de diferencias finitas.

El Método de los Elementos Finitos (FEM) consiste en resolver una serie de sistemas de ecuaciones, lo cual se consigue al realizar una discretización de un modelo en un medio continuo planteado. Esta discretización consiste en simplificar un número infinito de puntos del modelo a un número más reducido dependiendo de qué tanta precisión se requiera en los resultados, aunque al exigir mucha precisión puede llevar una mayor cantidad de tiempo en correr el modelo y requerirá de un buen sistema operativo computacional para poder soportar

tales cálculos. Esta discretización conlleva a realizar un enmallado el cual consiste en la unión de una cantidad de nodos de los que se compone cada uno de los elementos del modelo. Para este modelo se deben determinar las propiedades y el comportamiento de los materiales de los cuales se compone el modelo. Asimismo, se determinará el modelo constitutivo según el comportamiento de cada material del sistema y de sus condiciones, lo cual a la vez dependerá de la cantidad de los ensayos que se han podido realizar. Esto se debe a que cada modelo constitutivo puede llegar a ser más complejo que otros dependiendo de la cantidad de parámetros que se requerirán como datos de entrada. Es por ello que comúnmente se usa el modelo más sencillo y que proporciona buenos resultados, que es el Mohr Coulomb para el cual solo se necesita el ángulo de fricción, la cohesión, la dilatación, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, siendo los tres primeros los parámetros resistentes y los otros dos los parámetros elásticos. Además, se deben determinar las cargas a los que serán sometidos los materiales, las interfaces entre los materiales estructurales y del suelo, las condiciones de borde y las fases de construcción (Asiri National Project & IREX, 2012). Asimismo, se sabe que el cálculo empleado por estos métodos inicia por determinar los desplazamientos en los nodos, que son interpolados a los puntos de Gauss para luego, mediante relaciones cinemáticas y ecuaciones constitutivas se obtengan a las deformaciones y las tensiones, respectivamente.

Este método es empleado en el “Manual de dimensionado y ejecución: Tratamiento de mejora y/o del refuerzo del terreno mediante columnas de mortero o módulo controlado (CMC)”, realizado por la empresa Menard, y consisten en el modelo axisimétrico y en el modelo de deformación plana; sin embargo, son usados tan solo como una comprobación de lo ya obtenido mediante los métodos analíticos.

- Modelado en dos dimensiones

El modelo axisimétrico usado con el fin de simular un modelo en 3D, consiste en analizar una columna de módulo controlado por separado considerando una malla paralelepípedica de sección L^2 (asumiendo que los lados a y b de la **Ecuación 3.1** son iguales) que al rotarla en su eje será igual a una malla cilíndrica con radio igual a $L/\sqrt{\pi}$. Además, se deben dar condiciones de contacto entre la columna y el terreno tratado (interfaz) y los parámetros del suelo mediante la cual se obtendrá para la CMC sola las tensiones que soporta y los asentamientos que sufre variando la malla empleada para llegar a los valores adecuados determinados según los diseños de capacidad portante del suelo y asentamientos permisibles, todo ello está en una hoja de cálculo realizada por Menard (Lauzon et al., 2009).

Este modelo evidentemente no representa adecuadamente los resultados necesarios para un diseño adecuado, ya que se limita a que este modelado sea solo en una celda tal que solo se pueda analizar el comportamiento de una columna de módulo controlado y el suelo circundante a ella. En específico la celda evaluada es justo la que se encuentra al centro de toda la malla de inclusiones. Entonces, al asumir esto en el modelo se deja de lado al comportamiento de grupo que se debería de tomar en cuenta en este tipo de tecnologías, porque al no tomarlo en cuenta se estaría sobredimensionando.

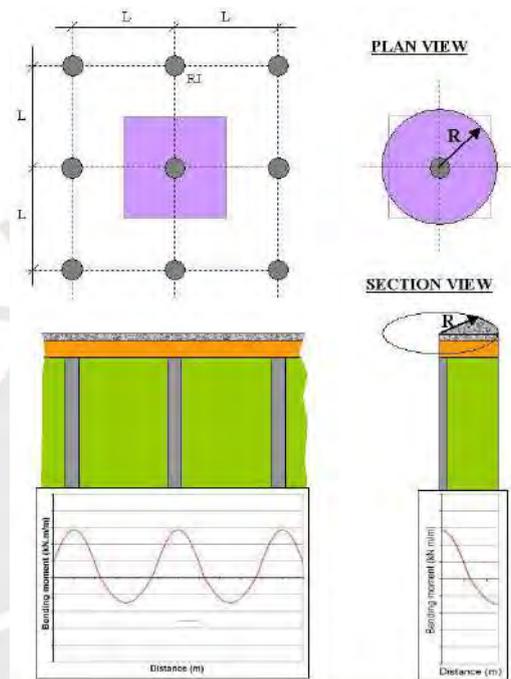


Figura 3.5: Sistema de un modelo axisimétrico (Racinais & Plomteux, 2011)

El modelo de deformación plana consiste en un diseño en 2D en donde se asume que en la sección en un eje se tendrá una dimensión mucho mayor en comparación a la otra. Con esta hipótesis se podrá determinar los asentamientos, esfuerzos sobre las CMCs, simulando que son un elemento rígido, pero con un comportamiento elástico otorgándole parámetros que le den rigidez a la flexión y resistencia al esfuerzo axial según el espaciado de la malla usada. Para este modelo se deben de fijar los límites tanto verticales como horizontales de la celda, a diferencia del modelo axisimétrico en donde solo se fija el límite horizontal, porque el mismo modelo te fija el vertical.

Asimismo, para este análisis se pueden plantear el modelado de toda una fila del grupo de inclusiones rígidas modelándolas como si fueran unas estructuras de tipo muro. Sin embargo, debido a que el análisis realizado tanto por el método analítico como por el del modelo

axisimétrico es para una sola inclusión rígida y el fin de esta investigación es hacer una comparación de los resultados obtenidos, se puede hacer uso de una simplificación del modelo de deformación plana para el análisis de una celda. Para ello se deben hacer variaciones a la geometría del modelo axisimétrico y mantener los parámetros resistentes del suelo y de la columna. Las variaciones que sufre la geometría son en el radio equivalente o zona de influencia a analizar para el modelo de deformación plana (B) y en el ancho del radio de la inclusión rígida modelada (b_c) haciendo uso de las siguientes expresiones (Tan et al., 2008). Tan et al. (2008) también propone otra manera de hacer una simplificación del modelo de deformación plana obteniendo un módulo de deformación equivalente de la columna, en función del área de la sección del suelo circundante y la columna y sus módulos de deformación. Sin embargo, en su investigación se obtiene valores muy diferentes a los obtenidos por el modelo axisimétrico y al primer modelo de deformación plana simplificado presentado.

$$R = 1.13B$$

Ecuación 3.17

$$b_c = B \frac{R_p^2}{R^2}$$

Ecuación 3.18

Esta simplificación del modelo de deformación plana convencional es que en este tipo de modelado se deben obtener los asentamientos reales de todo el terreno con las columnas de módulo controlado (Gómez Pérez, 2012). Sin embargo, este modelo de deformación plana convencional también tiene una limitación y es que al tomar en cuenta a solo una fila no está tan apegado a la realidad, porque la malla de inclusiones está compuesta por varias filas. Es debido a ello que será más preciso realizar un modelo de todo el sistema en 3D.

- Comportamiento de la inclusión rígida

Se considera que las inclusiones rígidas tienen un comportamiento lineal elástico. Este podrá ser modelado tanto como un elemento volumétrico como uno lineal. El beneficio de considerarlo como uno volumétrico como un elemento linealmente elástico es que se puede considerar como un elemento tipo viga basando su rigidez en los parámetros EA. Esto facilitaría el análisis de la columna de módulo controlado al momento de determinar las fuerzas que recibe, ya que los programas de elementos finitos permiten mostrar directamente los diagramas de momentos y de fuerzas axiales y cortantes de estos elementos.

- Comportamiento del colchón de reparto

Como se sabe esta capa está compuesta por un material granular; por lo que, las características de este pueden ser bien representado por el modelo constitutivo de Mohr Coulomb, al ser este un modelo elastoplástico perfecto. Sin embargo, cuando el comportamiento de este tipo de suelos depende del estado de tensiones será mejor emplear un modelo constitutivo más avanzado (Asiri National Project & IREX, 2012).

- Comportamiento de la cimentación superficial

La cimentación superficial descrita tanto por la losa de cimentación como por una zapata aislada podrá ser modelada directamente como una carga puntual o distribuida sobre el colchón de reparto. También se podrá modelar como un elemento volumétrico linealmente elástico considerando una interface con un factor de reducción igual a 1.

- Modelo constitutivo del suelo

Para determinar el modelo constitutivo a analizar se debe tener en cuenta a la cantidad de parámetros que se pueden obtener de los ensayos realizados con los penetrómetros o presiómetros y de laboratorio, ya que dependerá de esta data obtenida del que se pueda usar un modelo constitutivo o no. En caso se cuente con información básica de los estratos del suelo de los parámetros resistentes y elásticos se puede usar el modelo constitutivo más simple que es el Mohr-Coulomb. Este modelo es un modelo elástico-perfectamente plástico, cuyos parámetros de entrada son: el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, el ángulo de fricción del suelo, la cohesión del suelo y el ángulo de dilatación. Este modelo asume una bilinearidad, una dilatación infinita, un material isotrópico y que el material se deforma elástica hasta antes de llegar a su estado crítico. Algunos de sus asunciones por ser un modelo simple no son adecuadas. Por ejemplo, el módulo de carga y descarga del suelo lo asume igual al módulo de carga inicial; también tiene limitantes para considerar el grado de sobreconsolidación (OCR) en un suelo blando, al no tomar en cuenta el módulo edométrico del suelo. Es por ello que se recomiendan usar otros modelos constitutivos más avanzados como son el soft soil, soft soil creep y el Hardening Soil. A continuación, se presenta un resumen de los parámetros que requieren los cuatro modelos constitutivos mencionados.

Tabla 3.2: Parámetros de los modelos de Mohr-Coulomb, Soft soil, Soft soil creep y Hardening Soil (Asiri National Project & IREX, 2012)

Mohr-Coulomb	Soft Soil	Soft Soil Creep	Hardening Soil
E (módulo de Young)	$\lambda *$ (índice de compresión)	$\lambda *$ (índice de compresión)	E_{50}^{ref} (valor referencial del módulo secante al 50% de resistencia)
ν (coeficiente de Poisson)	$\kappa *$ (índice de descompresión y recompresión)	$\kappa *$ (índice de descompresión y recompresión)	E_{oed}^{ref} (valor referencial del módulo edométrico tangente)
ϕ' (ángulo de fricción)	ϕ' (ángulo de fricción)	$\mu *$ (índice de creep)	m (exponente para niveles de esfuerzos dependientes de la rigidez)
c (cohesión)	c (cohesión)	ϕ' (ángulo de fricción)	E_{ur}^{ref} (valor referencial del módulo de descarga y recarga)
ψ (ángulo de dilatancia)	ψ (ángulo de dilatancia)	c (cohesión)	ν_{ur} (coeficiente de Poisson de descarga y recarga)
-	-	ψ (ángulo de dilatancia)	p^{ref} (presión atmosférica referencial)
-	-	-	R_f (relación de falla)
-	-	-	ϕ' (ángulo de fricción)
-	-	-	c (cohesión)
-	-	-	ψ (ángulo de dilatancia)

- Interfaz o interacción suelo-CMC

La modelización de este efecto es necesaria para poder cuantificar la fricción negativa que se produce a lo largo de la columna de módulo controlado gracias al efecto de la deformación relativa entre el suelo blando con la inclusión rígida. Es por ello que se necesita primero determinar el modelo constitutivo que se usará para el suelo blando que será uno elastoplástico. Como parámetros de este se tienen el ángulo de fricción y la cohesión de la arcilla blanda, para ello se debe introducir como parámetros de la interfaz dichos valores con una reducción. Sin embargo, cuando se realiza un modelado en 2D no es necesario añadir el material y la propiedad de interface, ya que el factor de reducción de los parámetros resistentes se puede considerar igual a 1 (Rodríguez Rebolledo, 2010). Pero, para considerar el efecto de la fricción negativa se debe realizar un mayor refinado de la malla en los bordes de las inclusiones rígidas tanto en las zonas laterales de esta como en la cabeza y en la punta de la columna de módulo controlado. Sin embargo, el Manual de Menard indica que se debe considerar una interfaz igual a 2/3 para suelos granulares y 1/2 para suelos cohesivos. Para esta investigación, se considerará lo recomendado por Menard.

3.4 Evaluación de la interacción entre elementos del conjunto

Como se mencionó en el marco teórico, el aspecto más importante para la transferencia de cargas y de donde se desliga a la fricción negativa y a la transferencia de cargas por el colchón de reparto es la interacción entre los elementos que conforman a todo el sistema de las inclusiones rígidas.

- Eficiencia

Desde un punto de vista general, la interacción entre la estructura, la plataforma de carga y la cabeza de la inclusión es la capacidad de transmitir las cargas del colchón de reparto. La forma de cuantificar esta capacidad es determinando su eficiencia. La eficiencia (E) de la plataforma se determina al medir la relación que hay entre la carga vertical que recibe la cabeza de la inclusión con la suma de la sobrecarga que ocurre en la parte superior de esta plataforma, debido a la carga viva de la estructura, con el peso de la plataforma sobre la cabeza de la inclusión; esto se puede observar en la **Ecuación 3.19**. (Asiri National Project & IREX, 2012).

$$E = \frac{Q_P}{W + Q} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

Un parámetro importante para asegurar una buena eficiencia en la plataforma de transferencia de carga es la altura de este elemento, ya que existe un valor límite de esta distancia a la cual se llega en las zonas cónicas del efecto de arco que se desarrollan dentro del colchón, producto de los esfuerzos cortantes producidos en este elemento. Por lo tanto, se tendrá una buena eficiencia siempre y cuando se tenga un espesor de la plataforma menor a este valor crítico. Asimismo, este valor de espesor crítico depende del espaciamiento entre inclusiones, el módulo de deformación de la plataforma y su ángulo de fricción. Además, este se puede determinar con la relación hallada entre el espesor de la plataforma con el espacio libre entre inclusiones, según Baudouin (2010) en su investigación con ensayos centrifugados. Si se obtiene una relación igual a 1.3, ya no se producirá el efecto arco, lo cual implicará que el sistema no funciona correctamente y se produzcan asentamientos diferenciales. (Coronilla, 2015)

- Tasa de reducción de esfuerzos (SRR)

Se introduce el término SRR, que significa tasa de reducción de esfuerzos, el cual se puede calcular con la **Ecuación 3.20**. Este valor como se observa depende de la carga residual sobre el suelo blando circundante a las inclusiones rígidas y del esfuerzo vertical producido por la

plataforma de transferencia al nivel de la cabeza de las columnas de módulo controlado. Combarieu emplea esta relación con el fin de obtener un valor apropiado para las dimensiones de la malla en función de este SRR. Sin embargo, se observa que este valor aumentará con el espesor de la plataforma de distribución de cargas, lo cual se contradice con los resultados obtenidos de los modelos a pequeña escala y por la teoría de Hewlett o Kempton, ya que según ellos este valor llega a un umbral (Asiri National Project & IREX, 2012; Combarieu, 2008). Esto es comprensible, debido a que lo evaluado por Combarieu en 1988 fue para terraplenes; por lo que, en realidad el valor de h_r es la altura de esta masa de suelo.

$$\text{SRR} = \frac{q_s^+}{\gamma_r h_r} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Para este cálculo inicialmente Combarieu propuso la siguiente expresión para calcular el esfuerzo residual del suelo circundante:

$$q_s^+ = \frac{\gamma_r}{\mu_r} (1 - e^{-\mu_r h_r}) + q_0 e^{-\mu_r h_r} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

$$\mu_r = \frac{2r_p K \tan \varphi_r}{b/2^2 - r_p^2} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Sin embargo, justo por este problema con el parámetro de SRR es que se hizo una mejora al método de Combarieu. Para ello se introdujo el término h_a que es determinado de forma empírica en función de la dimensión de la columna de módulo controlado y de la zona de influencia. Esto se presenta bajo la premisa de que la relación entre el radio de influencia y el radio de la inclusión sea mayor y menor a 6.

$$\frac{h_a}{r_p} = 10 - 0.4 \left(6 - \frac{R}{r_p}\right)^2 \quad \text{Ecuación 3.23}$$

$$\frac{h_a}{r_p} = 10 \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Es así que luego se propuso una nueva forma de determinar el esfuerzo residual del suelo blando circundante en función de este nuevo parámetro.

$$q_s^+ = \frac{\gamma_r}{\mu_r} (1 - e^{-\mu_r h_a}) + \gamma_r (h_r - h_a) e^{-\mu_r h_a} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

Sin embargo, para el cálculo del esfuerzo residual no se usarán ninguna de las expresiones presentadas. En su lugar se determinará usando las expresiones presentas en Asiri National Project (2012), que es la más adecuada para el análisis que se quiere hacer que es para una cimentación superficial y no para un terraplén.



CAPÍTULO 4. CASOS PLANTEADOS

4.1.Introducción

En el presente acápite se propondrán diferentes casos para hacer una comparación entre los resultados obtenidos tanto por el método analítico presentado como por el modelo numérico por el método de elementos finitos. Para este último se realiza un análisis por un modelo axisimétrico y por un modelo de deformación plana.

En ambos casos se analizará a una losa de cimentación con una carga distribuida igual a 50 KPa, para la cual se considera un colchón de reparto con un espesor variable y el suelo blando sobre el que se ubican es tratado con inclusiones rígidas con diferentes espaciamientos entre ellas para obtener varios modelos. El espesor del colchón de reparto y el espaciamiento entre inclusiones rígidas analizados se encuentran en el rango sugerido por Menard. Todo ello con el fin de poder comparar los resultados obtenidos de los métodos analíticos de los métodos numéricos.

4.2.Perfil Estratigráfico

Para la presente investigación se planteó el perfil estratigráfico mostrado en la **Figura 4.1**. En dicho perfil se puede observar que se tiene un suelo constituido por arcillas de consistencia blanda hasta una profundidad de 7.90 metros aproximadamente. Bajo dicho estrato se encuentra una arena densa a muy densa hasta una profundidad de 9.40 metros.

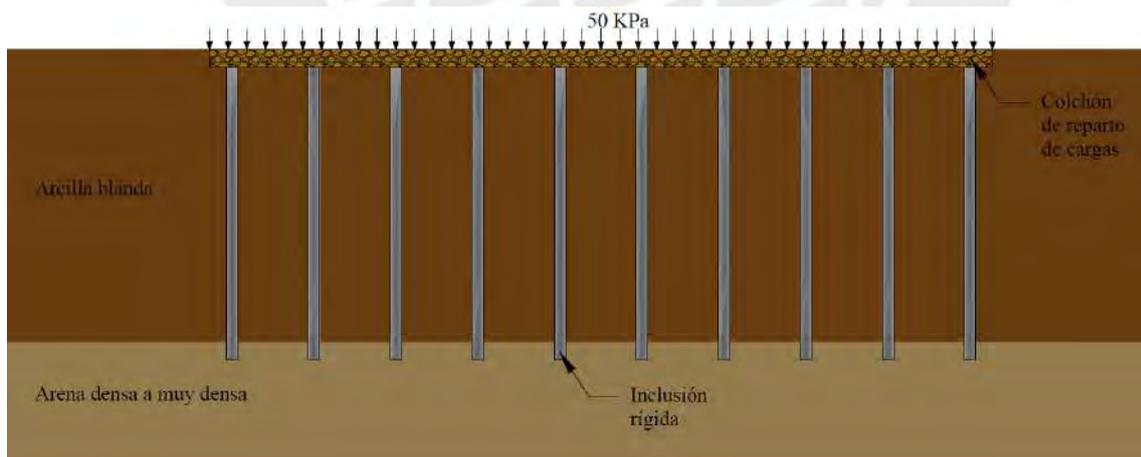


Figura 4.1: Perfil estratigráfico propuesto para el análisis de todos los casos.

4.3. Parámetros resistentes y elásticos

El material del que está compuesto las Columnas de Módulo Controlado en el caso a evaluar es mortero. Este material a fin de tener una resistencia adecuada se debe de esperar a tener la resistencia a compresión simple a los 28 días (entre 5 y 25 MPa comúnmente) para luego ser colocado en el terreno. Se asumió un valor de f_{ck} igual a 12 MPa. Con este valor se puede usar la Ecuación 2.2 para obtener el módulo de Young de la inclusión rígida. Es así que se obtiene un valor de este igual a 6200 MPa.

Tabla 4.1: Propiedades de la columna de módulo controlado

Peso específico	γ_p (KN/m ³)	19.0
Módulo de Young	E_p (MPa)	6200
Coefficiente de Poisson	ν	0.20

Para el colchón de reparto se debe considerar un material granular compactado al 95% de la su densidad máxima con el Proctor modificado y con un porcentaje de finos tal que cuente con una cohesión que haga que funcione de mejor manera la distribución de cargas. Para el método de elementos finitos se usará el modelo constitutivo de Mohr Coulomb, debido a las características del material. Es por ello que para este material se consideró las propiedades resistentes y elásticas que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.2: Propiedades resistentes y elásticas del colchón de reparto

Peso específico	γ_r (kN/m ³)	21.0
Módulo de Young	E_r (MPa)	60
Coefficiente de Poisson	ν	0.30
Cohesión	c (kPa)	20.0
Ángulo de fricción	ϕ (°)	32
Dilatancia	ψ (°)	2

Para los dos estratos de las capas de suelo encontrados se realizaron ensayos de campo y de laboratorio de los cuales se obtuvieron los siguientes valores de parámetros resistentes y elásticos.

Tabla 4.3: Parámetros resistentes y elásticos de los suelos del perfil estratigráfico presentado

Material	γ_s (kN/m ³)	p_1^* (kPa)	E_M (MPa)	α	ν	q_s (kPa)	c (kPa)	φ (°)	ψ (°)
Arcilla blanda	16	350	3.30	2/3	0.30	40	5	20	0
Arena densa a muy densa	19	2400	23.50	1/3	0.30	180	1	38	8

Para el método por elementos finitos se usará el modelo constitutivo Hardening Soil para lo cual se necesitan calcular otros parámetros, que son los presentados en la **Tabla 3.2**. Para ello se usarán las siguientes correlaciones presentadas (Colcha & Muñoz, 2021; Verbrugge & Schroeder, 2018).

$$E_s = \frac{E_M}{\alpha}$$

Ecuación 4.1

$$E_{oed} = \frac{E_s(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

Ecuación 4.2

$$E_{oed}^{ref} = \frac{E_{oed}}{\sqrt{\frac{\sigma'}{p^{ref}}}}$$

$$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$$

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$$

$$m = 1, \text{ en arcillas}$$

$$m = 0.5, \text{ en arenas}$$

$$p^{ref} = 100 \text{ KPa}$$

$$\nu_{ur} = 0.2$$

$$R_f = 0.9$$

Finalmente, usando las correlaciones mostradas se obtiene los siguientes parámetros para el modelo de Hardening Soil.

Tabla 4.4: Parámetros para Hardening Soil de cada estrato de suelo

Parámetros para Hardening Soil	Unidades	Arcilla	Arena
E_{50}^{ref}	kPa	8380	80000
E_{oed}^{ref}	kPa	8380	80000
m	-	0.8	0.5
E_{ur}^{ref}	kPa	$25.1 \cdot 10^3$	240000
ν_{ur}	-	0.2	0.2
p^{ref}	kPa	100	100
R_f	-	0.9	0.9
ϕ'	(°)	20	38
c	kPa	5	1
ψ	(°)	0	8

4.4. Características de los casos estudiados

Para los casos a analizar se plantea una losa de cimentación un terreno tratado con columnas de módulo controlado. Para esto se considerará una losa tal que transmita una carga de 50 kPa hacia el suelo tratado con las inclusiones rígidas. Además, sobre este suelo se encontrará el colchón de reparto de cargas el cual irá variando su espesor a fin de obtener varios modelos de estos. Entonces, se considerarán espesores de h_r iguales a 0.3, 0.4, 0.5 y 0.6 metros. Estos valores se han escogido, ya que, según el Manual de Menard, se sugieren que este espesor se encuentre entre los 0.3 y 0.6 metros. Además, se considerará un valor del diámetro de la columna de módulo controlado igual a 0.3 metros; el cual está dentro del rango común de valores sugeridos en el Manual de Menard, que indica que se suelen usar valores entre 0.25 y 0.45 metros de diámetro. Asimismo, se considerará un largo de la inclusión rígida que varía según el espesor del colchón de reparto y que se empotra 50 cm en el estrato de arena para todos los casos. Asimismo, se variará su espaciamiento igual a 1, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 y 3 metros. A continuación, se presentan los valores a trabajar con la malla de inclusiones y el colchón de reparto.

Tabla 4.5: Resumen de la geometría de la malla de inclusiones rígidas y colchón de reparto

Radio de la CMC	R_p (m)	0.15
Espaciamiento entre las CMCs	b (m)	1, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3
Longitud de la CMC	L_p (m)	8.1, 8, 7.9, 7.8
Espesor del colchón de reparto	h_r (m)	0.3, 0.4, 0.5, 0.6
Área de influencia	A (m²)	1, 1.96, 3.24, 4.84, 6.76, 9



CAPÍTULO 5. MÉTODOS ANALÍTICOS

5.1 Introducción

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos de distribución de esfuerzos y asentamientos producidos en el suelo tratado con columnas de módulo controlado y por el suelo. Estos cálculos se realizan basándose en la metodología propuesta por Combarieu y Frank & Zhao para cimentaciones superficiales. Asimismo, estos cálculos serán realizados para todos los casos propuestos en el capítulo anterior en donde se indica que varía el espaciamiento entre las inclusiones rígidas y también varía el espesor de la plataforma de transferencia de cargas (LTP).

Se podrá obtener mediante el método analítico propuesto en Asiri National Project la distribución de esfuerzos normales y cortantes, y asentamientos tanto de la columna de módulo controlado como del suelo. Además, al contar con ello se puede obtener la fricción negativa y positiva, la profundidad del eje neutro, las cargas aplicadas y asentamientos para diferentes profundidades.

Una vez obtenidos dichos resultados se podrá hacer una comparación de todos los casos planteados según los valores mismos obtenidos, los valores de eficiencia, de SRR, profundidad de eje neutro y asentamientos. Estos valores adicionales permitirán hacer un mejor análisis de los resultados obtenidos para todos los casos y a partir de ello sacar conclusiones que luego serán comparadas con lo obtenido por el método de elementos finitos.

5.2 Losa de cimentación

5.2.1. Diseño con CMC

En esta sección se realizará el diseño de una columna de módulo controlado en un suelo blando con las propiedades asumidas en el capítulo anterior. Para el diseño de la losa se evaluarán los resultados de las cargas soportadas por la CMC y los asentamientos producidos en ella. Este análisis se realizará bajo las expresiones propuestas por la investigación realizada en el Asiri National Project hasta el año 2011 considerando diferentes espesores del colchón de reparto (0.3, 0.4, 0.5 y 0.6 metros) y espaciamientos entre las inclusiones rígidas de 1, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 y 3 metros. Para una mejor comprensión de los cálculos realizados se presentará una

descripción de dicho proceso para el espaciamiento de 1 metro y espesor del colchón de reparto de 0.5 metros.

El primer paso tomar diferentes profundidades a lo largo de todo el estrato a evaluar, para lo cual se consideraron en este caso un total de 300 secciones. Cada una de estas tendrán sus parámetros de entrada para cada estrato, algunos ya definidos en el capítulo anterior como el módulo edométrico, módulo presiométrico y el peso volumétrico. Sin embargo, faltan definir los coeficientes de Frank & Zhao para el comportamiento en punta y de fuste de la inclusión rígida. Para ello se usarán los valores de m_q y m_τ mencionados en el capítulo 3 dependiendo si el suelo es granular o cohesivo. Asimismo, se determina el valor de $k \tan \delta$ de la **Tabla 3.1** considerando que el método de ejecución fue sin desplazamiento. Ahora, se definen las cargas que se le aplican a la celda hasta el nivel de la cabeza de la inclusión, la cual será la carga por el peso propio del colchón de reparto y la sobrecarga de 50 kPa. Luego, se define el valor límite de la fricción entre la inclusión rígida y el suelo circundante usando el dato del $k \tan \delta$ y del esfuerzo vertical aplicado para las diferentes profundidades analizadas, esto se reemplaza en la **Ecuación 3.12**. Seguidamente, se determina la fricción movilizada a nivel de esfuerzo usando las leyes de movilización ajustadas por Combarieu que se observa en la **Figura 3.4** y usando la **Ecuación 3.7**, **Ecuación 3.8** y **Ecuación 3.9**. Sin embargo, un dato de entrada en dichas ecuaciones es el asentamiento relativo entre la CMC y el suelo circundante. El cual deberá ser asumido en primera instancia sabiendo que este será igual a cero al nivel de la superficie del modelo; es por ello que se realizan una serie de iteraciones. Con esto se obtiene la fricción como tal usando la **Ecuación 3.10**. Asimismo, al ya conocerse la fricción y la carga en punta de la inclusión rígida (usando la **Figura 3.2** y las mismas ecuaciones usadas para determinar la fricción a nivel de esfuerzo) se puede conocer la carga normal aplicada a la CMC para cada profundidad. Al dividir esta fuerza por el área de la inclusión rígida que es constante en toda su longitud se conoce el esfuerzo normal a la inclusión. Además, se sabe que la carga restante se va hacia el suelo circundante. Es por ello que se considera que la carga aplicada hasta la cabeza de la inclusión menos la carga normal a esta me da la carga normal al suelo. Al dividir esta por el área del suelo circundante, que resulta de la resta del área de la CMC del área total de influencia, se obtiene el esfuerzo normal al suelo blando. Finalmente, para obtener los asentamientos tanto del suelo como de la inclusión rígida se emplea la **Ecuación 2.4** conociendo los módulos edométricos para cada estrato, sus esfuerzos normales y la profundidad. Conociendo estos asentamientos, se pueden restar y así obtener el asentamiento relativo con el cual se volverá a iterar hasta que se cumpla que este valor sea lo más cercano a

cero posible. En esta investigación se hicieron 40 iteraciones para todos los casos. El mismo procedimiento mencionado se realizó para todos los casos. En el Anexo A de este trabajo de investigación, se presentan los resultados obtenidos para todos los casos planteados. En ellos se puede observar la distribución de los esfuerzos cortantes, los esfuerzos normales tanto del suelo como de la inclusión rígida y sus respectivos asentamientos.

5.2.2. Comparación de la profundidad del eje neutro

Al determinar la fricción lateral mediante el método analítico se observa para las diferentes profundidades si el valor resulta negativo o positivo. En caso este resulte negativo evidentemente será la fricción negativa, entonces por teoría se sabe que el punto en el que esta fricción se vuelva positiva, se le denominará eje neutro. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la profundidad del eje neutro para diferentes espesores del colchón de reparto y espaciamientos entre inclusiones rígidas.

Tabla 5.1: Resumen de los valores de la profundidad de eje neutro para todos los casos

hr (m)	Profundidad de eje neutro (m)					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	5.29	5.71	6.09	6.72	7.01	7.18
0.4	5.41	5.83	6.30	6.80	7.01	7.18
0.5	5.54	6.00	6.51	6.88	7.09	7.26
0.6	5.67	6.17	6.63	6.93	7.14	7.30

En la **Figura 5.1** se observa que mientras mayor es el espesor del colchón de reparto, el eje neutro se encontrará a mayor profundidad. Esto se esperaba a que pase, ya que como se mencionó en el Capítulo 2, la plataforma de transferencia de cargas se encarga de transmitir la mayor cantidad de cargas a la inclusión rígida (peso propio de la plataforma, sobrecarga y fricción entre la inclusión y el suelo circundante). Entonces, al haber una mayor carga transportada hacia la CMC, se espera que se tenga también una mayor fricción negativa como parte de las cargas transportadas hacia ella. Por otro lado, se observa que a mayor espaciamiento hay una mayor profundidad del punto neutro. Esto está directamente relacionado al asentamiento relativo entre la inclusión rígida y el suelo circundante, ya que, al haber un mayor espacio entre inclusiones, habrá una mayor área del suelo blando que sufrirá un mayor asentamiento la no recibir el mismo nivel de reforzamiento que un sistema con un menor espaciamiento. Entonces, al producirse un mayor asentamiento del suelo, se producirá un mayor asentamiento relativo entre ambos, generando así una mayor zona de influencia de la

fricción negativa. Desde el espaciamiento de 2.2 m se observa que no hay mucha diferencia de las profundidades del eje neutro para diferentes espesores del colchón de reparto, lo cual se puede deber a que ya se está produciendo efecto de arco del colchón de reparto como se debería. Ya que, ya no importa el espesor del colchón de reparto, la transferencia de cargas es muy similar para cualquiera que se considere. Finalmente, se observa que las profundidades varían desde 5.29 m a 7.30 m.

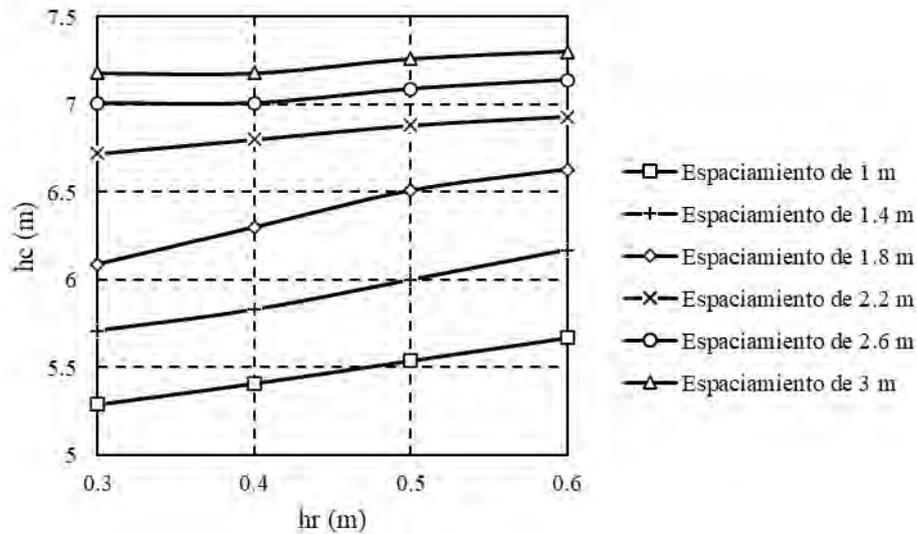


Figura 5.1: Gráfico h_c (m) vs h_r (m)

5.2.3. Comparación del asentamiento

Se sabe que el tratamiento del suelo blando con inclusiones rígidas, en este caso con columnas de módulo controlado, permite una reducción de los asentamientos generados en el terreno, debido a que gran parte de las cargas serán soportadas por las inclusiones rígidas, además que estas le darán una mejor capacidad portante al suelo blando el cual es tratado. Donde el asentamiento de la inclusión rígida se puede determinar usando la **Ecuación 3.15**, mientras que el del suelo blando con la **Ecuación 3.16**. Ya conociendo todos los resultados de asentamientos para todos los casos planteados se puede realizar una comparación entre todos estos valores. A continuación, se presentan los resultados y comparación de los asentamientos para todos los casos planteados.

Tabla 5.2: Resumen de los valores de asentamientos para todos los casos

hr (m)	Asentamiento (mm)					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	5.00	8.64	14.79	26.14	34.73	41.20
0.4	5.61	9.84	17.36	28.17	36.41	43.18
0.5	6.27	11.05	19.83	30.01	38.12	45.10
0.6	7.10	12.62	21.83	31.31	39.74	46.66

De la gráfica presentada en la **Figura 5.2** se observa que los valores de asentamientos vayan incrementando cuanto más grande sea el espesor de la plataforma de transferencia de cargas, porque se tendrá una mayor carga, producto del peso de dicha plataforma. Sin embargo, está claro que esto se compensa con la eficiencia y con el efecto de arco que se genera, enviando el mayor porcentaje de las cargas hacia la inclusión rígida. Además, se ve que conforme aumenta el espaciamiento entre inclusiones rígidas se obtiene un mayor asentamiento, porque si bien es cierto el área de influencia será más grande, su efectiva se reducirá conforme más área ocupe el suelo circundante. Consecuentemente, se aprecia que las pendientes de las funciones lineales que se forman en la gráfica van aumentando conforme aumenta el espaciamiento entre inclusiones rígidas, esto se hace más evidente desde el espaciamiento de 1.8 m en adelante, y justo desde ahí se obtienen valores muy altos de asentamientos variando desde 26 a 47 mm aproximadamente.

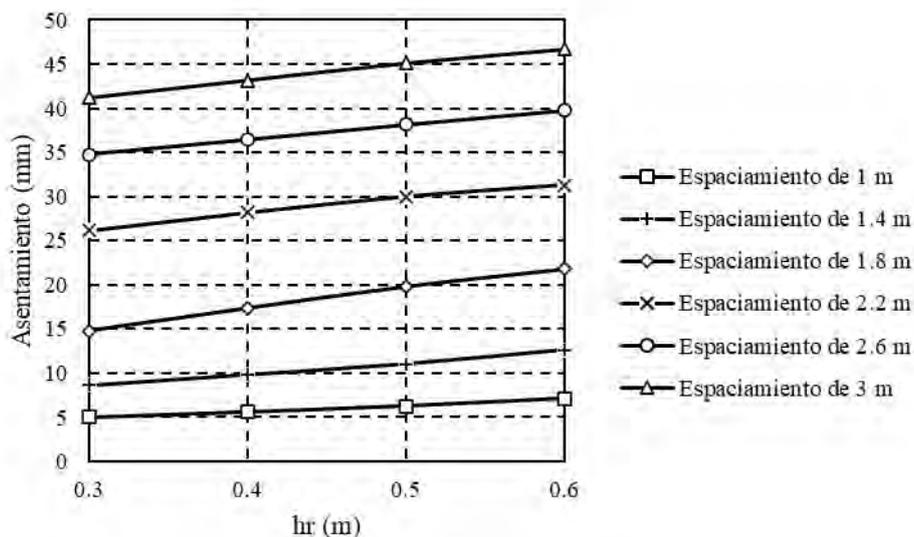


Figura 5.2: Gráfico asentamiento vs hr

5.2.4. Comparación del SRR

Combarieu también propuso una manera de determinar el beneficio del uso de un colchón de reparto como reductor de las fuerzas transmitidas hacia el terreno tratado. Dicha reducción se debe a la fricción negativa que se genera en dicha plataforma por las columnas ficticias generadas ahí.

Para determinar los valores de SRR se recurre a la **Ecuación 3.20** que se presenta en el Capítulo 3. Sin embargo, esta expresión propuesta estaba pensada para ser usada en terraplenes; por lo que, para este caso se deberá de añadir en el denominador a la sobrecarga aplicada por la estructura y el peso de la losa de cimentación. Este valor se calcula para todos los casos planteados al igual que con la eficiencia considerando variaciones en el espesor de la plataforma de transferencia de cargas (LTP) y las variaciones en el espaciamiento entre las inclusiones rígidas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de estos casos.

Tabla 5.3: Resumen de los valores de SRR para todos los casos

hr (m)	SRR					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	22.56%	26.80%	34.99%	53.37%	64.88%	73.04%
0.4	24.74%	29.55%	39.85%	55.46%	65.68%	74.04%
0.5	26.41%	31.54%	43.40%	56.58%	66.23%	74.61%
0.6	30.03%	35.43%	46.68%	57.73%	67.72%	75.83%

En la gráfica presentada en la **Figura 5.3** se puede observar que el SRR aumenta conforme mayor es el espesor del colchón de reparto. Esto es un error que se comenta por el Asiri National Project con este parámetro al momento de usar este parámetro basándose en el método de Combarieu. Se dice que este parámetro no es muy confiable porque según investigaciones el valor de SRR llegará a un umbral. Sin embargo, este último usaba este parámetro con el fin de definir la geometría de la malla del sistema, más que para conocer el aporte del colchón de reparto en la transferencia de cargas y estaba pensando cómo se mencionó antes para ser usado en terraplenes. Evaluando el espaciamiento como lo hacía Combarieu, se observa que a mayor espacio entre inclusiones rígidas el suelo circundante se llevará una mayor parte de la carga aplicada sobre el sistema. Además, se observa que hasta el espaciamiento de 1.8 m se tiene una pendiente considerable, lo cual indica que hasta dicho espaciamiento el colchón de reparto aporta al sistema de manera más representativa.

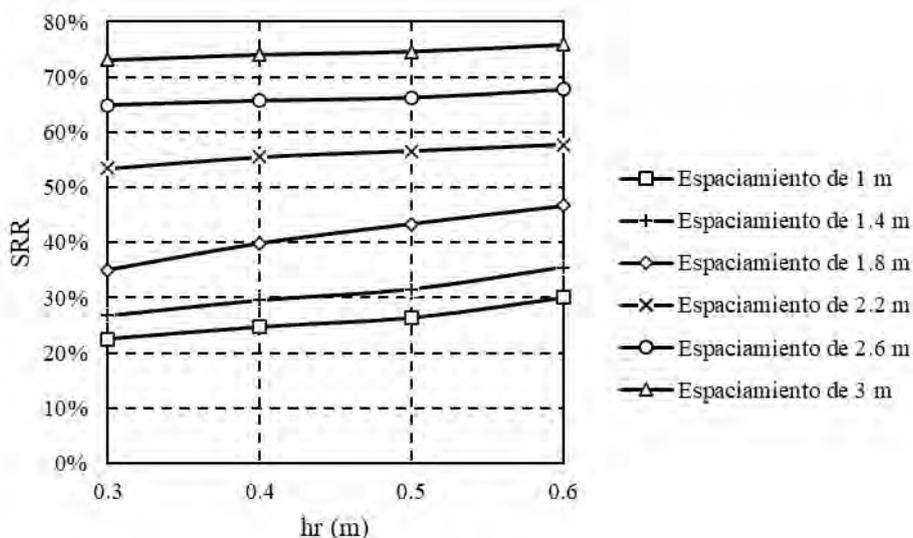


Figura 5.3: Gráfico SRR vs hr

5.2.5. Comparación de la eficiencia

Como se mencionó en el Capítulo 3 una forma de determinar la capacidad que tiene el colchón de reparto de transmitir cargas a las columnas de módulo controlado y al suelo circundante es mediante la determinación de la eficiencia. Esta se determina mediante la **Ecuación 3.19** tomando en cuenta la carga total que se lleva la inclusión rígida en la cabeza como numerador y como denominador de dicha expresión a la suma de la sobrecarga (que en este caso vendría a ser la carga de la losa de cimentación y las cargas de la estructura que se cimenta) y el peso del colchón de reparto.

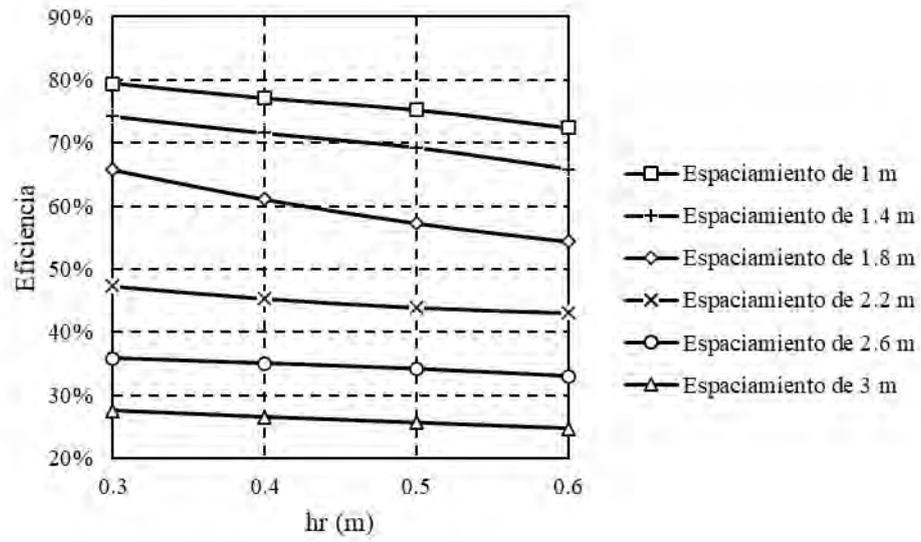
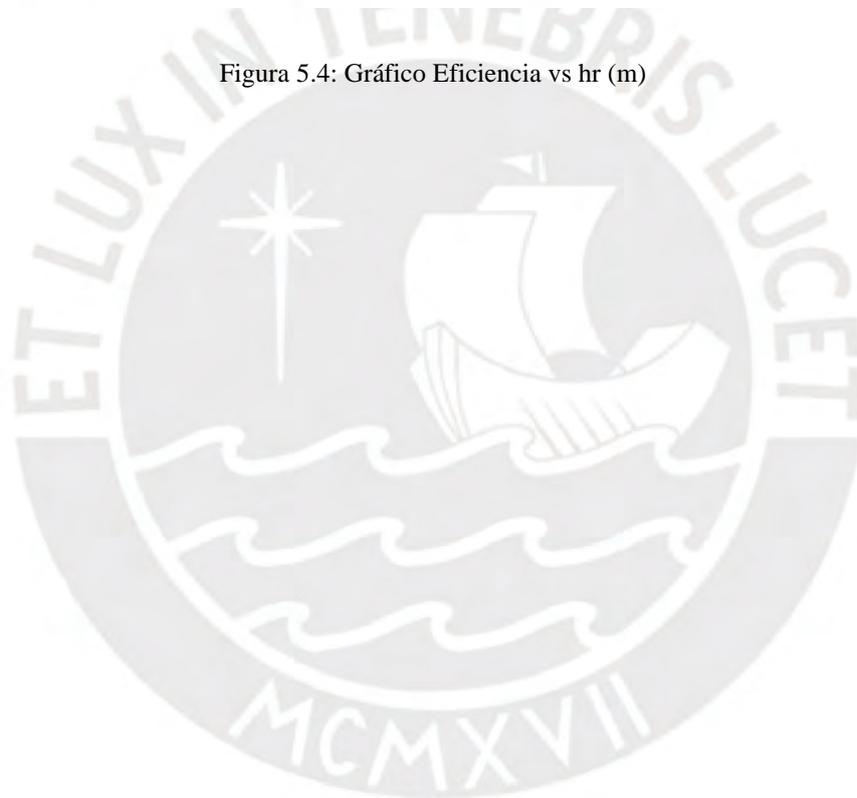
Se procede a realizar el cálculo para todos los casos presentados considerando las variaciones del espesor del colchón de reparto y en el espaciamiento entre las inclusiones rígidas. A continuación, se presentan los valores obtenidos de la eficiencia.

Tabla 5.4: Resumen de los valores de eficiencia para todos los casos

hr (m)	Eficiencia					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	79.40%	74.22%	65.73%	47.34%	35.81%	27.53%
0.4	77.05%	71.55%	61.04%	45.35%	35.01%	26.54%
0.5	75.21%	69.24%	57.24%	43.92%	34.13%	25.66%
0.6	72.36%	65.85%	54.33%	43.04%	32.99%	24.76%

En la gráfica de la **Figura 5.4** se observa que la eficiencia “disminuye” conforme más grande es el espesor del colchón de reparto ubicado sobre las inclusiones rígidas. Esto debido a que

como se mencionó en el capítulo 3 de la presente tesis, este colchón permite una mejor transferencia de las cargas hacia tanto el suelo blando circundante y a las inclusiones rígidas mismas. Se observa que a mayor espesor del colchón de reparto, menor es la parte de la carga total que recibe la cabeza de la inclusión, con el fin de que el resto se transmita por fricción negativa en la CMC. Además, se conoce que si el espaciamiento entre las columnas de módulo controlado son muy grandes, se transmitirá más carga hacia el suelo blando y una menor hacia las inclusiones rígidas por el mismo efecto de arco que se genera en la plataforma de transferencia de cargas producido por la fricción negativa según Combarieu tanto a lo largo de las columnas ficticias en el colchón de reparto como también en las inclusiones rígidas y por el efecto de cono truncado según la teoría de este por el ángulo de fricción del material de dicho colchón de reparto de cargas. También, se sabe que se puede correr el riesgo de que cuando mayor sea el espaciamiento entre las inclusiones rígidas mayor deberá ser la fricción negativa transmitida por el suelo circundante, transmitiéndole así más carga a las inclusiones rígidas y aumentando así de sobremano la carga total en las inclusiones rígidas. En este caso se observa que a mayor espaciamiento menor es la eficiencia, lo cual quiere decir que por el efecto campana de la inclusión se transmite muy poca carga a la cabeza de la columna y una de gran medida por fricción negativa. Entonces, se observa que esta reducción de la eficiencia puede ser beneficiosa cuando se varía el espesor del colchón de reparto en espaciamientos no tan grandes, ya que si bien se reduce la parte de la carga total que soporta la cabeza de la CMC, se controla de cierta manera la carga que se transmitirá por fricción negativa a diferencia de los casos de grandes espaciamientos. Esto se evidencia para los espaciamientos de 2.2 m a más, al recibir una carga muy baja en la cabeza y una reducción muy pequeña de la carga soportada al variar el espesor del colchón de reparto.

Figura 5.4: Gráfico Eficiencia vs hr (m)

CAPÍTULO 6. MÉTODOS NUMÉRICOS

6.1 Introducción

En el presente capítulo se realizará el modelado por elementos finitos en el software Plaxis versión 2020 de los casos planteados en el capítulo 4 en donde se toman a diferentes valores de espaciamiento entre las inclusiones rígidas y diferentes valores del espesor del colchón de reparto sobre las columnas de módulo controlado. Para este método de análisis se realizarán dos tipos de modelamientos. El modelo axisimétrico y el de deformación plana considerarán el modelado de una celda unitaria de toda la red de inclusiones rígidas planteadas. Asimismo, para ambos casos se determinarán datos importantes para el correcto modelado basado en la geometría de este, las condiciones de borde y los modelos constitutivos a usar. Entonces, se realizará al final una comparación de los resultados obtenidos para todos los casos planteados en el capítulo 4 para la losa de cimentación a estudiar mediante los modelos constitutivos de Mohr-Coulomb (para el colchón de reparto de cargas) y Hardening Soil (para la arcilla y arena).

6.2 Modelo axisimétrico

6.2.1. Modelamiento en Plaxis

- Geometría del modelo

En general para el modelo axisimétrico se debe considerar una celda con un radio equivalente, hallado mediante la **Ecuación 3.1**, la cual está en función de la sección de una celda de la red de inclusiones rígidas. Además, se deben considerar los espesores de la capa o colchón de reparto de cargas y de la losa de cimentación. Para esta última se considera un espesor de 50 cm. Asimismo, en los bordes de la inclusión rígida se deberán de añadir los dos estratos de suelo contemplados para este caso, que se presentó en el perfil estratigráfico del capítulo 4. A continuación, se presentan en la **Tabla 6.1** los radios equivalentes para la celda obtenidos según los espaciamientos de 1, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 y 3 metros. El radio de la columna de módulo controlado se mantiene igual a 0.15 metros para todos los casos modelados. En la **Figura 6.1** se presenta la geometría realizada en Plaxis para el caso de un espesor del colchón de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 1.4 metros. La geometría del modelo para este caso va desde la cota 0.00 en la parte inferior hasta la cota 9.90 en la parte superior. Entonces, para este caso se consideró que la losa de cimentación va desde 9.90 a 9.40

metros, seguido por el colchón de reparto hasta 8.90 m, para luego pasar al estrato de arcilla hasta 1.50 metros y terminar con el estrato de arena hasta la base del modelo.

Tabla 6.1: Radio de la malla equivalente para el modelo axisimétrico para los diferentes espaciamientos

Espaciamiento (m)	Radio de la malla (m)
1.00	0.5642
1.40	0.7899
1.80	1.0155
2.20	1.2412
2.60	1.4669
3.00	1.6926

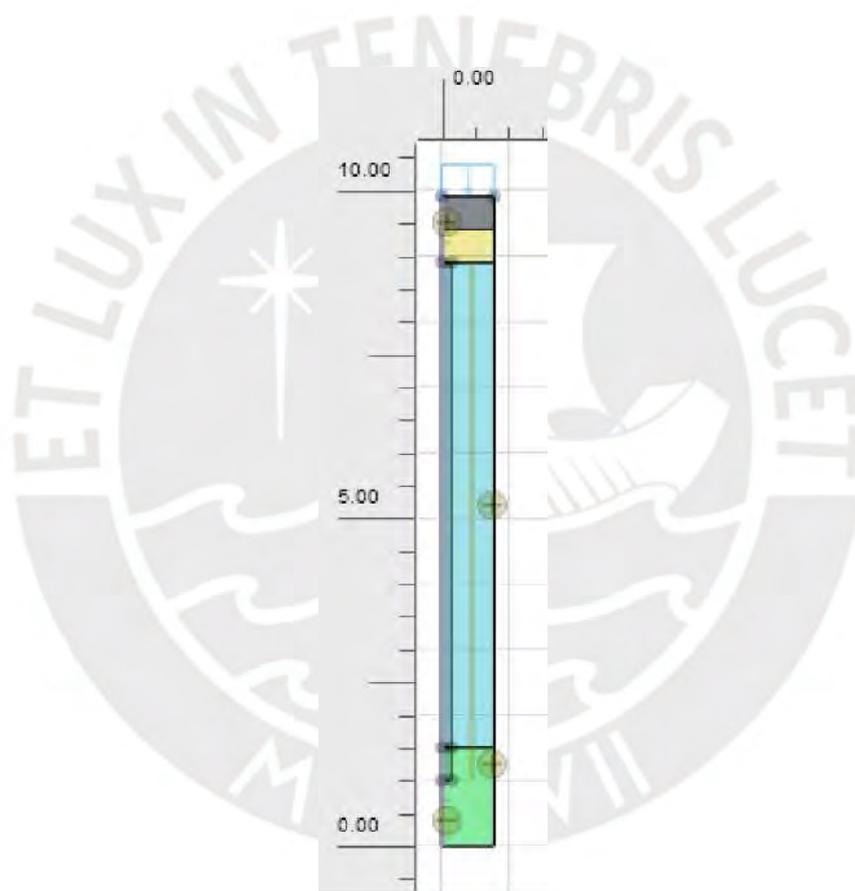


Figura 6.1: Geometría del modelo axisimétrico para el caso de el espesor del colchón de reparto igual a 0.5 m y espaciamiento igual a 1.4 m

- Definición y propiedades de los materiales

Los parámetros elásticos y resistentes para el colchón de reparto, el suelo blando, el suelo duro y la columna de módulo controlado fueron presentados en la **Tabla 4.1**, **Tabla 4.2**, **Tabla 4.3** y **Tabla 4.4**. Estos parámetros son definidos en Plaxis para todos los materiales de los modelos. Asimismo, se considera una interface en cada lado de la CMC en contacto con otro material.

Para lo cual se consideró un R_{inter} igual a 0.7 para la arena densa a muy densa y un valor de 0.5 para el estrato de arcilla blanda que es lo recomendado para estos materiales, según el Manual de Menard (2016b).



Figura 6.2: Interfaces creadas en el modelo axisimétrico

- Cargas asignadas al modelo

La carga externa que fue asignada al modelo fue la carga distribuida sobre la losa de cimentación igual a 50 kPa con el fin de simular a la carga de la estructura. Esta fue colocada directamente sobre la losa de cimentación como un line load. Esto se puede observar en la **Figura 6.3** presentada a continuación.

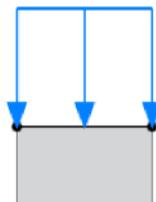


Figura 6.3: Carga distribuida por la losa de cimentación en el modelo axisimétrico

- Enmallado

Para el enmallado se consideró un mayor refinado a lo largo de toda la columna de módulo controlado en su geometría. En la zona de la losa de cimentación y del colchón de reparto de

cargas no se refinó tanto la malla. Asimismo, se consideró una distribución de elementos fina. A continuación, se presenta el mesh obtenido de Plaxis. Finalmente, se consideró una forma de los elementos de malla triangular, ya que estos permiten modelar mejor a la interacción que hay entre el elemento con el material circundante (Rodríguez Rebolledo, 2010).



Figura 6.4: Malla generada entre la inclusión rígidas, el colchón de reparto y el suelo blando

- Condiciones de borde

Se sabe por teoría que las condiciones de borde para un modelo axisimétrico deben cumplir lo siguiente. En primer lugar, se considera que solo habrá desplazamientos verticales en los bordes de la celda; por lo tanto, se debe restringir el movimiento horizontal en el modelo tanto en la zona del eje de la columna de módulo controlado como en el borde límite vertical asignado al modelo. En segundo lugar, se deberá considerar un desplazamiento igual a cero en la base de la celda del modelo; es decir, se deberán asignar restricciones en ambos ejes en esta zona. Esto ya no es necesario definirlo en Plaxis, a diferencia de otros programas de elementos finitos como Midas GTS NX donde sí se debe especificar las condiciones de borde.

- Construcción por etapas

Una vez hecho el enmallado se procede a definir las etapas constructivas de la CMC y como se indicó en el Capítulo 2, el proceso consiste en los siguientes puntos.

- a. Condiciones iniciales del suelo: El suelo no sufre ninguna alteración. Se consideran los esfuerzos efectivos iniciales. Entonces, se considera que la cota de la arcilla va de 9.90 m a 1.50 m y por debajo de esta capa, se encuentra la arena.
- b. Excavación hasta el nivel requerido: Se excava hasta la profundidad a la cual se encontrará el colchón de reparto de cargas, nivelando la zona. Se considera el reinicio de los desplazamientos y pequeñas deformaciones. Se consideró como el nivel de inicio del modelo a los 9.90 m menos 0.50 m de la losa de cimentación y el espesor del colchón de reparto correspondiente para cada caso.
- c. Instalación de la columna de módulo controlado: Se perfora mediante una hélice en forma de tornillo hasta la profundidad requerida de la inclusión rígida permitiendo extraer el suelo perforado en parte y desplazar lateralmente el mismo, densificándolo. Finalmente, al levantar el mástil se va inyectando el mortero. Sin embargo, en este modelo no se ha considerado los efectos de la instalación de la inclusión rígida (wished in place). Se considera el reinicio de los desplazamientos y pequeñas deformaciones. Se aplica a la inclusión rígida en el modelo en Plaxis.
- d. Aplicación de cargas sobre la inclusión: Se aplica el colchón de reparto, para luego instalar la losa de cimentación y finalmente aplicar la carga distribuida.

A continuación, se presentan los modelos para las 4 etapas constructivas mencionadas para un caso en la **Figura 6.5**.

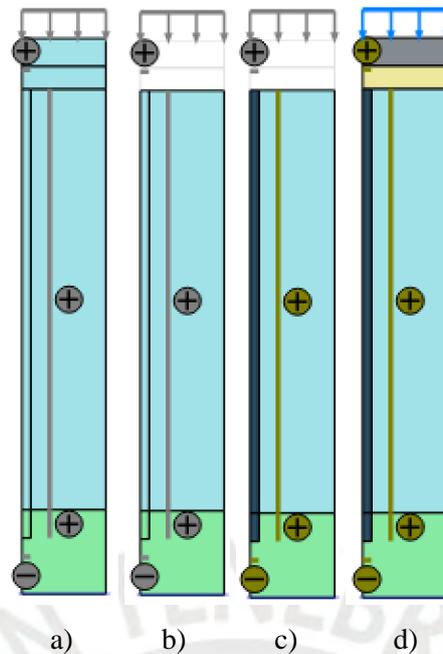


Figura 6.5: Proceso constructivo para el modelo axisimétrico de espesor del colchón de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamiento igual a 1.4 metros. a) condiciones iniciales, b) excavación hasta profundidad de instalación de CMC, c) instalación de inclusión rígida d) instalación de colchón de reparto y cargas distribuida

En los resultados obtenidos para las deformaciones del modelo axisimétrico para este caso, se puede observar que se asienta en mayor medida la zona en la cual no existe la inclusión rígida; es decir, en el espacio que hay entre una columna de módulo controlado y otra. Asimismo, se observa que el suelo blando se va asentando menos mientras más va aumentando la profundidad y el suelo duro casi no se asienta. Por otro lado, en la zona de la inclusión rígida se observa un asentamiento mucho menor a comparación de la zona del suelo blando. Por otro lado, en los resultados de los esfuerzos obtenidos se observa que donde se concentran más estos es en la inclusión rígida. Asimismo, se observa cómo se distribuyen los esfuerzos, enviando el colchón de reparto la mayor parte de las cargas a la CMC. Los resultados mencionados para el caso de un espesor de colchón de reparto de cargas igual a 0.5 metros y un espaciamiento igual a 1.4 metros se observa en la **Figura 6.6**.

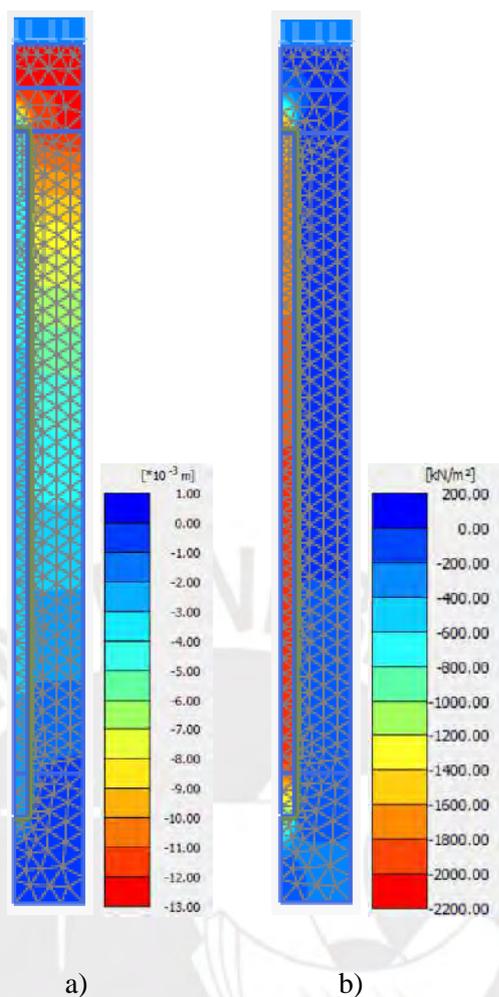


Figura 6.6: Resultados obtenidos de Plaxis para el modelo axisimétrico de espesor del colchón de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamento igual a 1.4 metros: a) deformaciones obtenidas b) esfuerzos obtenidos

6.2.2. Comparación de la profundidad del eje neutro

Al igual que con el método analítico, se puede observar el esfuerzo cortante del suelo a lo largo del contacto entre la inclusión rígida, lo cual permite Plaxis al crear un “line cross section” en el output. Por teoría, el punto en que se produce el cambio de fricción negativa a positiva será la profundidad correspondiente al eje neutro. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la profundidad del eje neutro para diferentes espesores del colchón de reparto y espaciamentos entre inclusiones rígidas.

Tabla 6.2: Resumen de los valores de la profundidad de eje neutro para todos los casos

hr (m)	Profundidad de eje neutro (m)					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	5.34	5.20	5.50	5.60	5.60	5.60
0.4	5.54	5.60	5.80	6.00	5.90	6.00
0.5	5.74	5.80	6.10	6.20	6.20	6.30
0.6	5.93	6.00	6.30	6.40	6.40	6.40

En la **Figura 6.7** en líneas generales se observa que mientras mayor es el espesor del colchón de reparto, el eje neutro se encontrará a mayor profundidad. Esto se esperaba a que pase, por las mismas razones que se explicaron en lo obtenido por el método analítico. Por otro lado, se observa que a mayor espaciamiento hay una mayor profundidad del punto neutro, también explicado en el caso del método analítico. Sin embargo, esto último no se cumple para el caso de un espesor de colchón de reparto igual a 0.3 m y un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual 1.40 m, ya que se genera una profundidad del eje neutro menor a la obtenida para un espaciamiento igual a 1.0 m. Desde el espaciamiento de 2.2 m se observa que se obtienen profundidades del eje neutro muy similares para cada espesor del colchón de reparto e inclusive son iguales cuando el valor de estos son 0.3 y 0.6 m. Finalmente, se observa que las profundidades varían desde 5.34 m a 6.40 m.

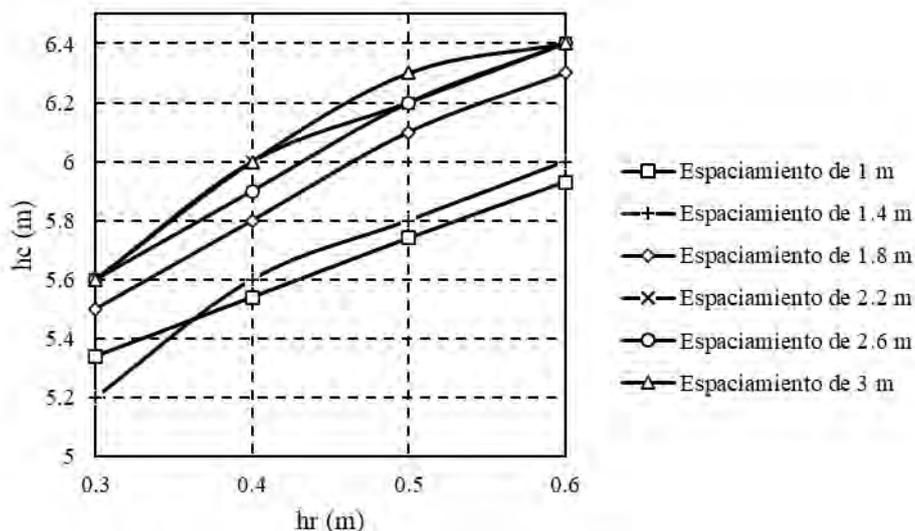


Figura 6.7: Gráfico h_c (m) vs h_r (m)

6.2.3. Comparación del asentamiento

Se sabe que el tratamiento del suelo blando con inclusiones rígidas, en este caso con columnas de módulo controlado, permite una reducción de los asentamientos generados en el terreno, debido a que gran parte de las cargas serán soportadas por las inclusiones rígidas, además que estas le darán una mejor capacidad portante al suelo blando el cual es tratado. Los asentamientos generados tanto en la inclusión rígida como en el suelo blando se pueden obtener directamente creando dos “line cross section”, ubicados en los dos extremos laterales del modelo. Ya conociendo todos los resultados de asentamientos para todos los casos planteados

se puede realizar una comparación entre todos estos valores. A continuación, se presentan los resultados y comparación de los asentamientos para todos los casos planteados.

Tabla 6.3: Resumen de los valores de asentamientos para todos los casos

hr (m)	Asentamiento (mm)					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	5.50	11.24	19.27	27.34	33.58	38.40
0.4	6.23	12.83	21.52	29.76	35.51	40.51
0.5	6.80	14.05	23.26	31.40	37.72	42.39
0.6	7.30	15.00	24.49	32.67	38.79	43.26

De la gráfica presentada en la **Figura 6.8** se observa que los valores de asentamientos se van incrementando cuanto más grande es el espesor de la plataforma de transferencia de cargas, por lo explicado en los asentamientos obtenidos por el método analítico. Además, se ve que conforme aumenta el espaciamiento entre inclusiones rígidas se obtiene un mayor asentamiento. Consecuentemente, se aprecia que las pendientes de las funciones que se forman en la gráfica van aumentando conforme aumenta el espaciamiento entre inclusiones rígidas, esto se hace más evidente desde el espaciamiento de 1.8 m en adelante, y justo desde ahí se obtienen valores muy altos de asentamientos variando desde 20 a 43 mm aproximadamente.

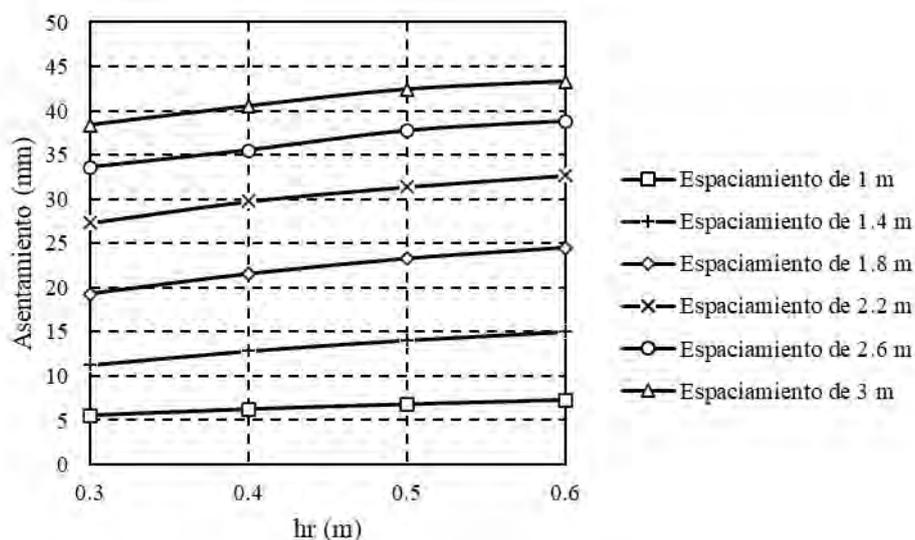


Figura 6.8: Gráfico asentamiento vs hr

6.2.4. Comparación del SRR

Para determinar los valores de SRR se recurre a la **Ecuación 3.20** que se presenta en el Capítulo 3. Sin embargo, se deberá de añadir en el denominador a la sobrecarga aplicada por la estructura

y el peso de la losa de cimentación. El valor de la carga aplicada sobre el suelo circundante se obtuvo directamente del esfuerzo vertical al nivel de la base del colchón de reparto usando el mismo “line cross section” usado para determinar los asentamientos del suelo circundante. Este valor se calcula para todos los casos planteados considerando variaciones en el espesor de la plataforma de transferencia de cargas (LTP) y las variaciones en el espaciamiento entre las inclusiones rígidas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de estos casos.

Tabla 6.4: Resumen de los valores de **SRR** para todos los casos

hr (m)	SRR					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	18.67%	25.92%	34.95%	45.64%	54.77%	62.08%
0.4	21.88%	29.56%	39.50%	50.26%	58.42%	66.01%
0.5	23.93%	32.69%	42.99%	53.49%	62.36%	69.50%
0.6	25.51%	35.03%	45.60%	55.99%	64.64%	71.26%

En la gráfica presentada en la **Figura 6.9** se puede observar que el SRR aumenta conforme mayor es el espesor del colchón de reparto. Esto es un error que se comenta por el Asiri National Project con este parámetro al momento de usar este parámetro basándose en el método de Combarieu, por lo que se explicó en el Capítulo 5. Evaluando el espaciamiento como lo hacía Combarieu, se observa que a mayor espacio entre inclusiones rígidas el suelo circundante se llevará una mayor parte de la carga aplicada sobre el sistema. Además, se observa que las pendientes de las funciones observadas en la gráfica son muy similares, siendo las curvas obtenidas casi paralelas.

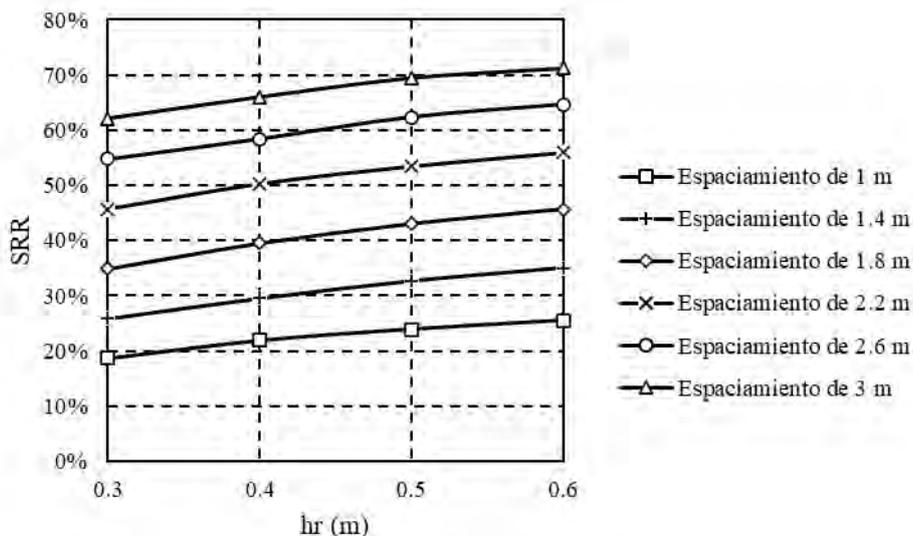


Figura 6.9: Gráfico SRR vs hr

6.2.5. Comparación de la eficiencia

Esta se determina mediante la **Ecuación 3.19** tomando en cuenta la carga total que se lleva la inclusión rígida en su cabeza como numerador (obtenido directamente del esfuerzo vertical a ese nivel en la inclusión rígida usando el mismo “line cross section” usado para determinar los asentamientos de la inclusión rígida) y como denominador de dicha expresión a la suma de la sobrecarga (que en este caso vendría a ser la carga de la losa de cimentación y las cargas de la estructura que se cimenta) y el peso del colchón de reparto. Se procede a realizar el cálculo para todos los casos presentados considerando las variaciones del espesor del colchón de reparto y en el espaciamiento entre las inclusiones rígidas. A continuación, se presentan los valores obtenidos de la eficiencia.

Tabla 6.5: Resumen de los valores de eficiencia para todos los casos

hr (m)	Eficiencia					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	72.42%	69.34%	65.80%	58.29%	36.36%	32.22%
0.4	72.24%	68.95%	64.83%	55.01%	32.23%	26.89%
0.5	72.64%	69.27%	62.49%	52.22%	35.13%	27.43%
0.6	72.37%	67.45%	60.17%	50.09%	30.49%	28.84%

En la gráfica de la **Figura 6.10** se observa que la eficiencia “disminuye” conforme más grande es el espesor del colchón de reparto ubicado sobre las inclusiones rígidas; por lo explicado en el Capítulo 5. Sin embargo, esto no ocurre del todo para los espaciamientos de 2.6 y 3 m, lo

cual es un indicador de que no se tiene una buena repartición de cargas para estos casos. Asimismo, para los espaciamientos de 1 y 1.4 m se observa que a pesar de que el espesor del colchón de reparto aumenta, la eficiencia se mantiene igual; por lo que, también es un indicador de que no se produce una buena transferencia de cargas. En este caso se observa que a mayor espaciamiento menor es la eficiencia; lo cual quiere decir que por el efecto de arco de la inclusión se transmite muy poca carga a la cabeza de la columna y una de gran medida por fricción negativa. Entonces, se observa que esta reducción de la eficiencia puede ser beneficiosa cuando se varía el espesor del colchón de reparto en espaciamientos no tan grandes, ya que si bien se reduce la parte de la carga total que soporta la cabeza de la CMC, se controla de cierta manera la carga que se transmitirá por fricción negativa a diferencia de los casos de grandes espaciamientos. Esto se evidencia para los espaciamientos de 2.6 m a más, al recibir una carga muy baja en la cabeza y un aumento de la eficiencia conforme aumenta el espesor del colchón de reparto.

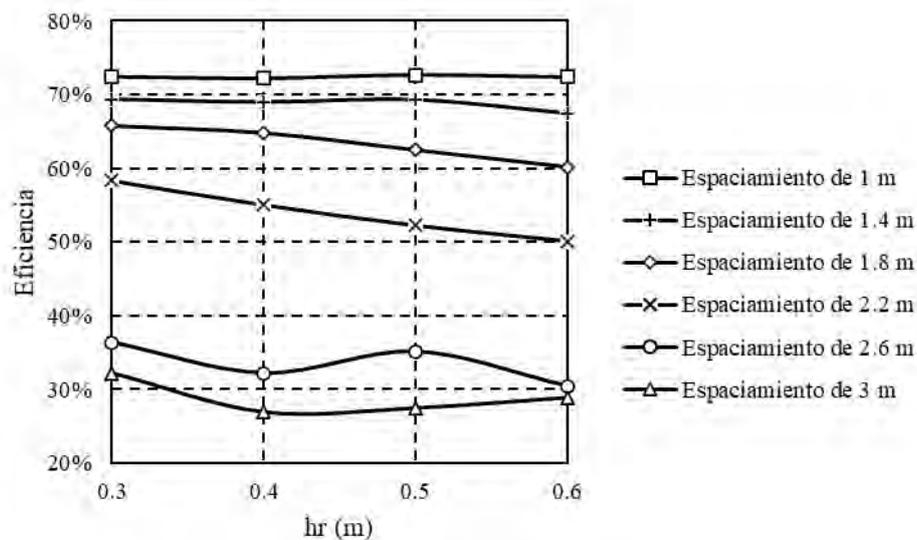


Figura 6.10: Gráfico Eficiencia vs hr (m)

6.3 Modelo de deformación plana

6.3.1. Modelamiento en Plaxis

- Geometría del modelo

En general para el modelo de deformación plana empleado, se debe considerar una celda con un radio equivalente o zona de influencia, hallado mediante la **Ecuación 3.17** y la **Ecuación 3.18**, las cuales están en función del radio real de la inclusión rígida y del radio equivalente

usado para el modelo axisimétrico. Además, se deben considerar los espesores de la capa o colchón de reparto de cargas y de la losa de cimentación al igual que en el modelo axisimétrico. Para ello se consideraron los espesores usados en el modelo axisimétrico (la geometría en el eje vertical no varía, solo cambia en el eje horizontal). Asimismo, en los bordes de la inclusión rígida se deberán de añadir los dos estratos de suelo contemplados para este caso, que se presentó en el perfil estratigráfico del Capítulo 4. A continuación, se presentan en la **Tabla 6.6** los anchos del modelo obtenidos según los espaciamientos de 1, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 y 3 metros, al igual que en el modelo axisimétrico. Mientras que el radio de la columna de módulo controlado se mantiene igual a 0.15 metros para todos los casos modelados. En la **Figura 6.11** se presenta la geometría realizada en Plaxis para el caso de un espesor del colchón de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 1.4 metros. Entonces, para este caso se consideró que la losa de cimentación va desde 9.90 a 9.40 metros, seguido por el colchón de reparto hasta 8.90 m, para luego pasar al estrato de arcilla hasta 1.50 metros y terminar con el estrato de arena hasta la base del modelo. En la mencionada figura se puede observar que los valores del radio de la inclusión rígida son muy pequeños a comparación de su valor real. Esto provoca que las columnas modeladas como muros, sean muy esbeltas (Castro et al., 2016).

Tabla 6.6: Ancho del modelo y radio de la inclusión rígida para el modelo de deformación plana para los diferentes espaciamientos

Espaciamiento (m)	Ancho del modelo (m)	Radio de la inclusión rígida (m)
1.00	0.4993	0.0353
1.40	0.6990	0.0252
1.80	0.8987	0.0196
2.20	1.0984	0.0160
2.60	1.2981	0.0136
3.00	1.4979	0.0118

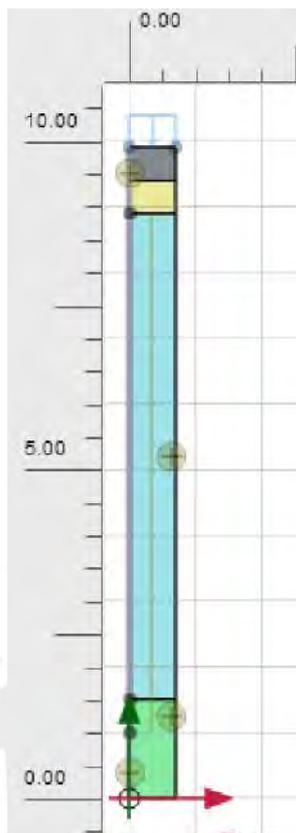


Figura 6.11: Geometría del modelo de deformación plana para el caso de el espesor del colchón de reparto igual a 0.5 m y espaciamiento igual a 1.4 m

- Definición y propiedades de los materiales

Los parámetros elásticos y resistentes para el colchón de reparto, el suelo blando, el suelo duro y la columna de módulo controlado fueron presentados en la **Tabla 4.1**, **Tabla 4.2**, **Tabla 4.3** y **Tabla 4.4**. Estos parámetros son definidos en Plaxis para todos los materiales de los modelos. Asimismo, se considera una interface en cada lado de la CMC en contacto con otro material. Para ello se consideró un R_{inter} igual a 0.7 para la arena densa a muy densa y un valor de 0.5 para el estrato de arcilla blanda que es lo recomendado para estos materiales, según el Manual de Menard (2016b).



Figura 6.12: Interfaces creadas en el modelo de deformación plana

- Cargas asignadas al modelo

La carga externa que fue asignada al modelo fue la carga distribuida sobre la losa de cimentación igual a 50 kPa con el fin de simular a la carga de la estructura. Esta fue colocada directamente sobre la losa de cimentación como un line load. Esto se puede observar en la **Figura 6.13** presentada a continuación.

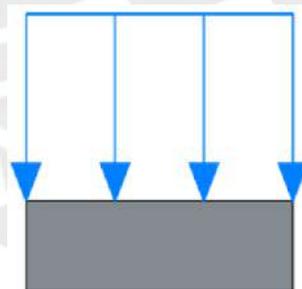


Figura 6.13: Carga distribuida por la losa de cimentación en el modelo axisimétrico

- Enmallado

Para el enmallado se consideró un mayor refinado a lo largo de toda la columna de módulo controlado en su geometría. En la zona de la losa de cimentación y del colchón de reparto de cargas no se refinó tanto la malla. Asimismo, se consideró una distribución de elementos fina. A continuación, se presenta el mesh obtenido de Plaxis. Finalmente, se consideró una forma de

los elementos de malla triangular, ya que estos permiten modelar mejor a la interacción que hay entre el elemento con el material circundante (Rodríguez Rebolledo, 2010).



Figura 6.14: Malla generada entre la inclusión rígidas, el colchón de reparto y el suelo blando

- Condiciones de borde

Se sabe por teoría que las condiciones de borde para un modelo de deformación plana deben cumplir lo siguiente. En primer lugar, se considera que solo habrá desplazamientos verticales en los bordes de la celda; por lo tanto, se debe restringir el movimiento horizontal en el modelo tanto en la zona del eje de la columna de módulo controlado como en el borde límite vertical asignado al modelo. En segundo lugar, se deberá considerar un desplazamiento igual a cero en la base de la celda del modelo; es decir, se deberán asignar restricciones en ambos ejes en esta zona. Esto ya no es necesario definirlo en Plaxis, a diferencia de otros programas de elementos finitos como Midas GTS NX donde sí se debe especificar las condiciones de borde.

- Construcción por etapas

Una vez hecho el enmallado se procede a definir las etapas constructivas de la CMC y como se indicó en el Capítulo 2, el proceso consiste en los siguientes puntos.

- a. Condiciones iniciales del suelo: El suelo no sufre ninguna alteración. Se consideran los esfuerzos efectivos iniciales. Entonces, se consideró que de 9.90 m a 1.50 m a la arcilla y por debajo a la arena.
- b. Excavación hasta el nivel requerido: Se excava hasta la profundidad a la cual se encontrará el colchón de reparto de cargas, nivelando la zona. Se considera el reinicio de los desplazamientos y pequeñas deformaciones. Se consideró como el nivel de inicio del modelo a los 9.90 m menos 0.50 m de la losa de cimentación y el espesor del colchón de reparto correspondiente para cada caso.
- c. Instalación de la columna de módulo controlado: Se perfora mediante una hélice en forma de tornillo hasta la profundidad requerida de la inclusión rígida permitiendo extraer el suelo perforado en parte y desplazar lateralmente el mismo, densificándolo. Finalmente, al levantar el mástil se va inyectando el mortero. Sin embargo, en este modelo no se ha considerado los efectos de la instalación de la inclusión rígida (wished in place). Se considera el reinicio de los desplazamientos y pequeñas deformaciones. Se aplica a la inclusión rígida en el modelo en Plaxis.
- d. Aplicación de cargas sobre la inclusión: Se aplica el colchón de reparto, para luego instalar la losa de cimentación y finalmente aplicar la carga distribuida.

A continuación, se presentan los modelos para las 4 etapas constructivas mencionadas para un caso en la **Figura 6.15**.

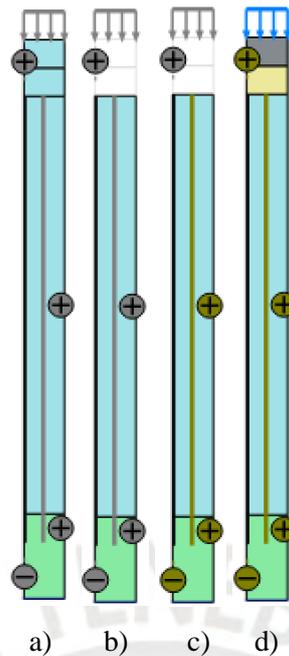


Figura 6.15: Proceso constructivo para el modelo de deformación plana de espesor del colchón de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamiento igual a 1.4 metros. a) condiciones iniciales, b) excavación hasta profundidad de instalación de CMC, c) instalación de inclusión rígida d) instalación de colchón de reparto y cargas distribuidas

En los resultados obtenidos para las deformaciones del modelo de deformación plana para este caso, se puede observar que se asienta en mayor medida la zona en la cual no existe la inclusión rígida; es decir, en el espacio que hay entre una columna de módulo controlado y otra. Asimismo, se observa que el suelo blando se va asentando menos mientras más va aumentando la profundidad y el suelo duro casi no se asienta. Por otro lado, en la zona de la inclusión rígida se observa un asentamiento mucho menor a comparación de la zona del suelo blando. Por otro lado, en los resultados de los esfuerzos obtenidos se observa que donde se concentran más estos es en la inclusión rígida. Asimismo, se observa cómo se distribuyen los esfuerzos, enviando el colchón de reparto la mayor parte de las cargas a la CMC. Los resultados mencionados para el caso de un espesor de colchón de reparto de cargas igual a 0.5 metros y un espaciamiento igual a 1.4 metros se observa en la **Figura 6.16**.

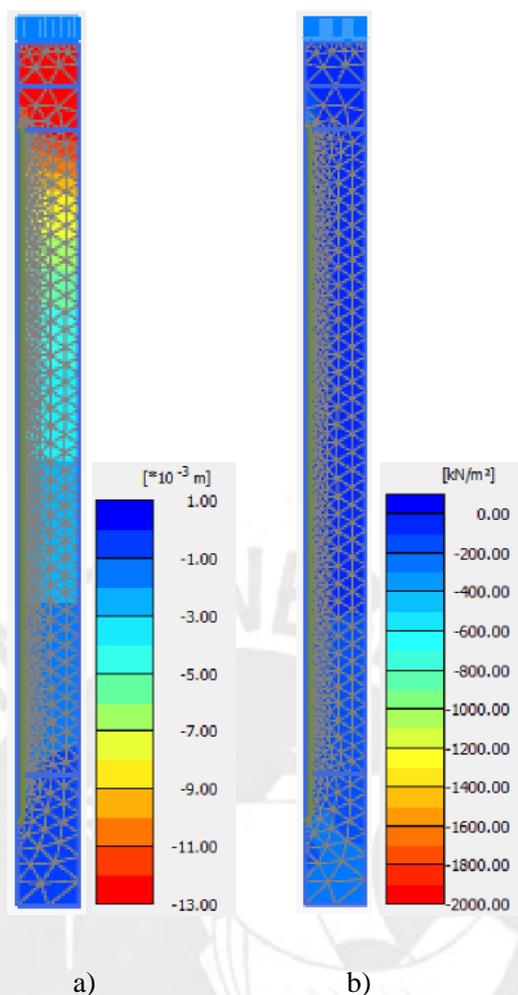


Figura 6.16: Resultados obtenidos de Plaxis para el modelo de deformación plana de espesor del colchón de reparto igual a 0.5 metros y un espaciamiento igual a 1.4 metros: a) deformaciones obtenidas b) esfuerzos obtenidos

6.3.2. Comparación de la profundidad del eje neutro

Al igual que con el modelo axisimétrico, se puede observar el esfuerzo cortante del suelo a lo largo del contacto entre la inclusión rígida, lo cual permite Plaxis al crear un “line cross section” en el output. Por teoría, el punto en que se produce el cambio de fricción negativa a positiva será la profundidad correspondiente al eje neutro. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la profundidad del eje neutro para diferentes espesores del colchón de reparto y espaciamientos entre inclusiones rígidas.

Tabla 6.7: Resumen de los valores de la profundidad de eje neutro para todos los casos

hr (m)	Profundidad de eje neutro (m)					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	5.60	5.95	6.44	6.77	7.01	7.18
0.4	5.81	6.09	6.52	6.87	7.08	7.26
0.5	5.97	6.22	6.58	6.91	7.14	7.30
0.6	6.02	6.32	6.70	6.98	7.22	7.34

En la **Figura 6.17** se observa que mientras mayor es el espesor del colchón de reparto, el eje neutro se encontrará a mayor profundidad. Esto se esperaba a que pase, por las mismas razones que se explicaron en lo obtenido por el método analítico. Por otro lado, se observa que a mayor espaciamiento hay una mayor profundidad del punto neutro, también explicado en el caso del método analítico. Desde el espaciamiento de 1.8 m se observa que se obtienen profundidades del eje neutro muy similares para cada espesor del colchón de reparto. Finalmente, se observa que las profundidades varían desde 5.60 m a 7.34 m.

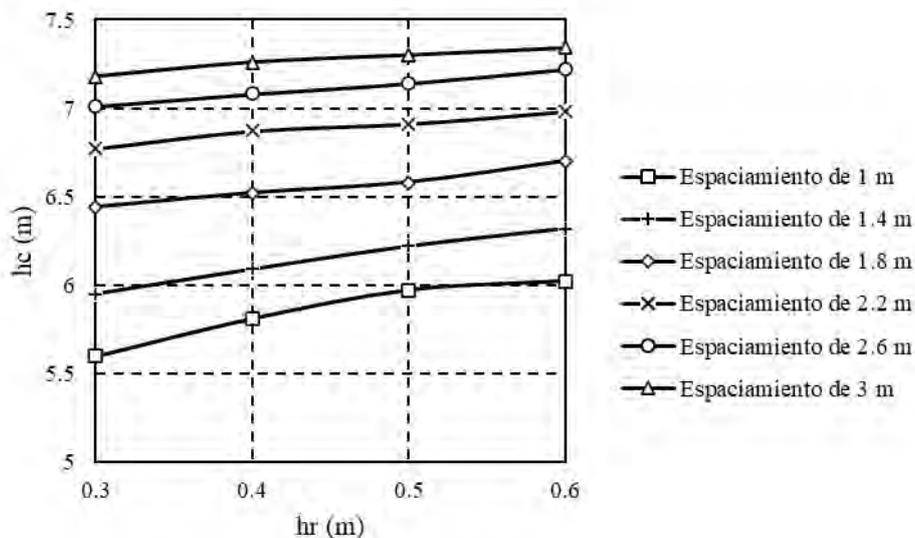


Figura 6.17: Gráfico h_c (m) vs h_r (m)

6.3.3. Comparación del asentamiento

Los asentamientos de la inclusión rígida y del suelo blando se puede obtener directamente con dos *line cross section*, uno ubicado en el borde izquierdo y el otro en el borde derecho del modelo, respectivamente. Ya conociendo todos los resultados de asentamientos para todos los casos planteados se puede realizar una comparación entre todos estos valores. A continuación, se presentan los resultados y comparación de los asentamientos para todos los casos planteados.

Tabla 6.8: Resumen de los valores de asentamientos para todos los casos

h_r (m)	Asentamiento (mm)					
	$b = 1$	$b = 1.4$	$b = 1.8$	$b = 2.2$	$b = 2.6$	$b = 3$
0.3	4.98	11.11	19.70	27.66	34.08	38.57
0.4	5.64	12.05	20.64	28.63	34.72	39.25
0.5	6.11	12.53	20.88	29.04	35.40	39.84
0.6	6.40	13.13	22.05	29.83	36.29	40.05

De la gráfica presentada en la **Figura 6.18** se observa que los valores de asentamientos se van incrementando cuanto más grande es el espesor de la plataforma de transferencia de cargas, por lo explicado en los asentamientos obtenidos por el método analítico. Además, se ve que conforme aumenta el espaciamiento entre inclusiones rígidas se obtiene un mayor asentamiento.

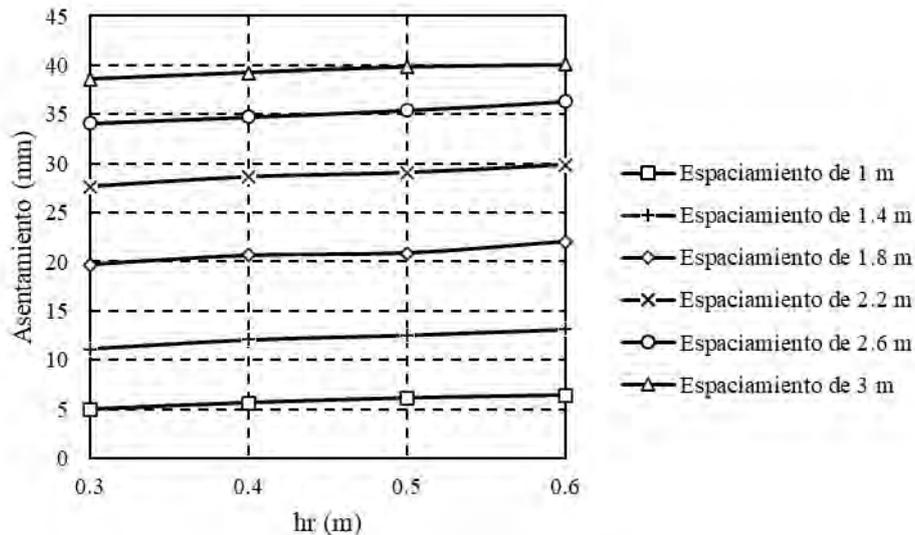


Figura 6.18: Gráfico asentamiento vs hr

6.3.4. Comparación del SRR

Para determinar los valores de SRR se recurre a la **Ecuación 3.20** que se presenta en el Capítulo 3. Sin embargo, se deberá de añadir en el denominador a la sobrecarga aplicada por la estructura y el peso de la losa de cimentación. El valor de la carga aplicada sobre el suelo circundante se obtuvo directamente del esfuerzo vertical al nivel de la base del colchón de reparto usando el mismo “line cross section” usado para determinar los asentamientos del suelo circundante, al igual que con el modelo axisimétrico. Este valor se calcula para todos los casos planteados considerando variaciones en el espesor de la plataforma de transferencia de cargas (LTP) y las variaciones en el espaciamiento entre las inclusiones rígidas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de estos casos.

Tabla 6.9: Resumen de los valores de SRR para todos los casos

hr (m)	SRR					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	19.05%	30.07%	43.03%	53.88%	62.55%	68.51%
0.4	22.50%	33.57%	45.95%	56.18%	63.98%	69.86%
0.5	24.55%	35.16%	46.79%	57.24%	65.32%	70.98%
0.6	25.76%	36.93%	49.32%	58.90%	67.00%	71.49%

En la gráfica presentada en la **Figura 6.19** se puede observar que el SRR aumenta conforme mayor es el espesor del colchón de reparto. Como se mencionó anteriormente, esto es un error criticado por Asiri National Project. Evaluando el espaciamiento, se observa que a mayor espacio entre inclusiones rígidas el suelo circundante se llevará una mayor parte de la carga aplicada sobre el sistema. Además, se observa que las pendientes de las funciones observadas en la gráfica son muy similares, siendo las curvas obtenidas casi paralelas. Sin embargo, la diferencia entre valores de SRR se va reduciendo conforme aumenta el espaciamiento.

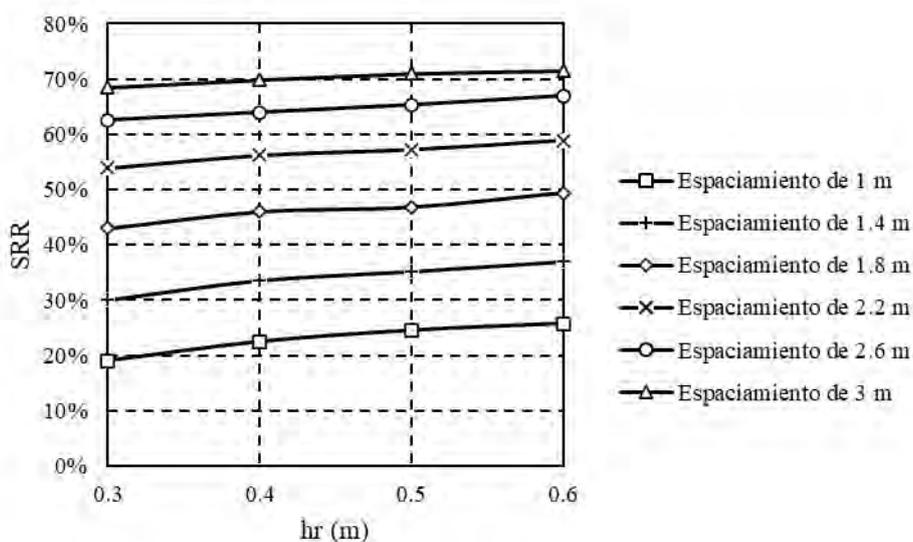


Figura 6.19: Gráfico SRR vs hr

6.3.5. Comparación de la eficiencia

Esta se determina mediante la **Ecuación 3.19** tomando en cuenta la carga total que se lleva la inclusión rígida en su cabeza como numerador (obtenido directamente del esfuerzo vertical a ese nivel en la inclusión rígida usando el mismo “line cross section” usado para determinar los asentamientos de la inclusión rígida) y como denominador de dicha expresión a la suma de la sobrecarga (que en este caso vendría a ser la carga de la losa de cimentación y las cargas de la

estructura que se cimenta) y el peso del colchón de reparto. Se procede a realizar el cálculo para todos los casos presentados considerando las variaciones del espesor del colchón de reparto y en el espaciamiento entre las inclusiones rígidas. A continuación, se presentan los valores obtenidos de la eficiencia.

Tabla 6.10: Resumen de los valores de eficiencia para todos los casos

hr (m)	Eficiencia					
	b = 1	b = 1.4	b = 1.8	b = 2.2	b = 2.6	b = 3
0.3	72.31%	65.55%	64.53%	43.73%	39.61%	27.12%
0.4	81.07%	72.11%	63.28%	49.65%	33.87%	26.73%
0.5	81.56%	73.34%	51.03%	47.13%	38.05%	29.20%
0.6	78.13%	71.71%	55.67%	48.07%	33.32%	24.03%

En la gráfica de la **Figura 6.20** se observa que la eficiencia es muy variable para cada espaciamiento entre inclusiones rígidas. Para los espaciamientos iguales a 1 y 1.4 m se observa que aumenta la eficiencia conforme aumenta el espesor del colchón de reparto hasta que este último toma el valor de 0.50 m, para luego disminuir, en general se tiene la tendencia a aumentar conforme aumenta el espesor. Para el espaciamiento de 1.8 m ocurre lo opuesto, se tiene la tendencia de reducir conforme aumenta el espesor del colchón de reparto. Por otro lado, el espaciamiento de 2.2 m aumenta hasta un espesor del colchón de 0.4 m para luego reducirse en 0.5 m para luego volver a aumentar, pero en general se tiene la tendencia a aumentar ligeramente. Finalmente, para los espaciamientos de 2.6 m y 3 m se tiene la tendencia a reducir conforme aumenta el espesor. Sin embargo, el mejor espaciamiento observado es el de 1.8 m, ya que es el que tiene más presente la tendencia a reducir. Asimismo, se observa que conforme más grande sea el espaciamiento entre las columnas menor será la eficiencia.

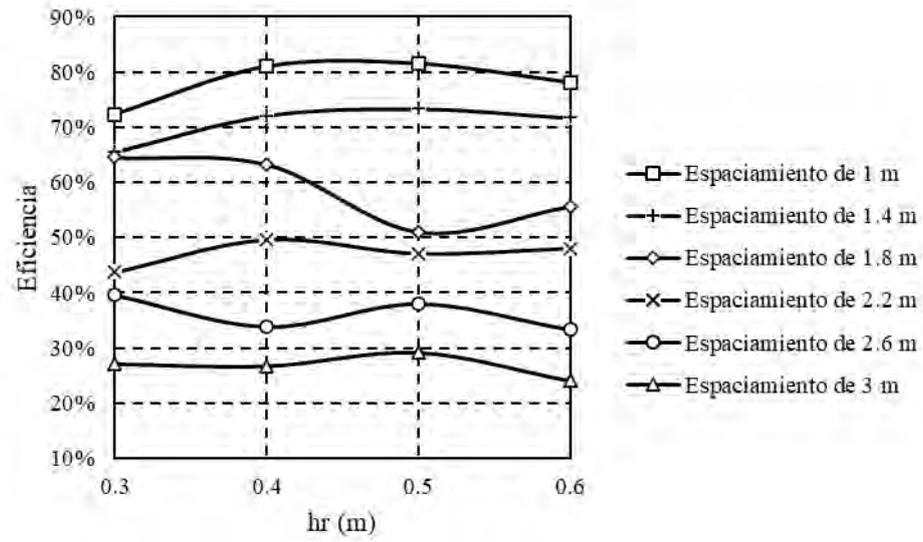
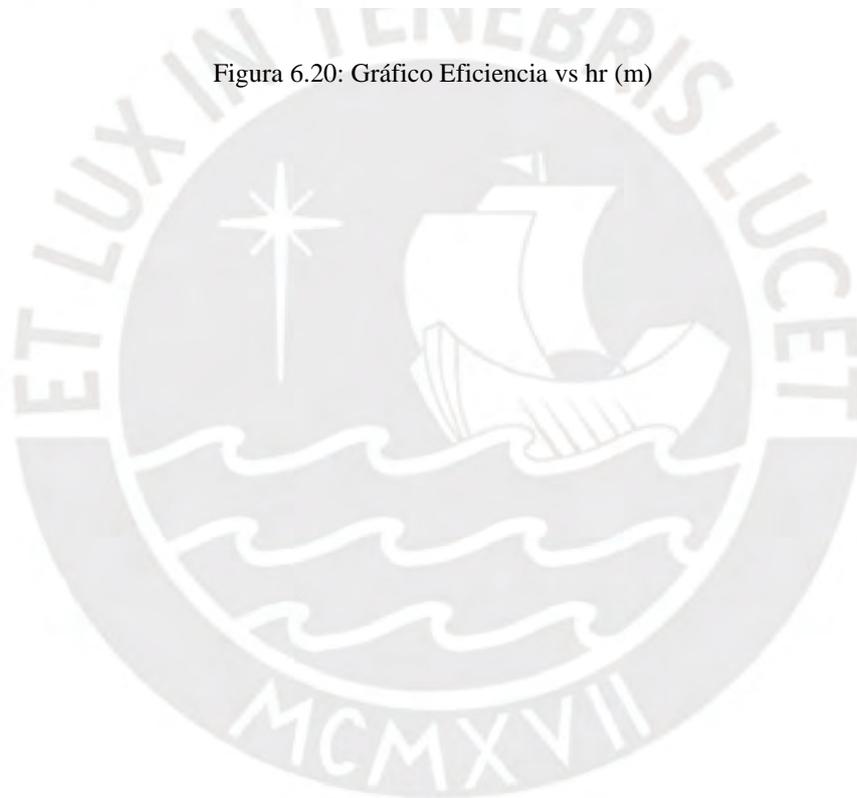


Figura 6.20: Gráfico Eficiencia vs hr (m)



CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Introducción

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos tanto con el método analítico como con los métodos numéricos. El método usado en el primero mencionado fue el recomendado por Asiri National Project producto de las investigaciones hechas por Combarieu y Frank & Zhao, mientras que el segundo fue el método de elementos finitos. Entonces, se realiza una comparación de la profundidad del eje neutro, asentamientos, SRR, eficiencia, distribución de esfuerzos y asentamientos para todos los casos analizados en el presente trabajo de investigación. Asimismo, a fin de hacer una discusión de los resultados obtenidos por estos métodos, se determinan las diferencias porcentuales del método numérico respecto al método analítico para observar cuánta es la diferencia en los resultados obtenidos por ambos métodos y se compararán las gráficas obtenidas para cada espaciamiento entre inclusiones rígidas para cada uno de los aspectos evaluados.

7.2 Profundidad del punto neutro

De los resultados obtenidos para diferentes espaciamientos entre columnas y espesores de colchón de reparto presentados en la **Tabla 7.1**, **Tabla 7.2**, **Tabla 7.3**, **Tabla 7.4**, **Tabla 7.5** y **Tabla 7.6**, se observa que la profundidad del eje neutro aumenta conforme aumenta el espesor del colchón de reparto de cargas. Esto ocurre porque el colchón se encarga de hacer una distribución de cargas entre la inclusión rígida y el suelo circundante, enviando la mayor parte al primero mencionado. Entonces, como hay una mayor carga transmitida hacia la columna de módulo controlado por fricción negativa (por el efecto de arco que se genera), se espera que la profundidad de este eje se encuentre sea mayor a fin de que la fricción negativa se vaya disipando hasta pasar a una fricción positiva. Asimismo, se observa que a mayor espaciamiento entre columnas de módulo controlado hay una mayor profundidad del eje neutro. Esto se debe al asentamiento relativo que hay entre la inclusión rígida y el suelo blando circundante, ya que al haber un mayor espacio entre columnas habrá una mayor área del suelo blando que es propenso a sufrir grandes asentamientos a bajas cargas. Además, este último no recibe el mismo nivel de reforzamiento que si estuviera a una distancia más cercana al centro de la zona de influencia de la columna de módulo controlado (un sistema con un menor espaciamiento). Es así que al generarse un mayor asentamiento del suelo que de la inclusión rígida, se generará una mayor fricción negativa. Esta se disipará con un mayor espesor de la zona en la que se produce dicha fricción y por ende se tendrá una mayor profundidad del eje neutro. El único

caso en el que no se produce esto, es en el que el espesor del colchón de reparto es igual a 0.30 m y el espaciamiento entre inclusiones es 1.4 m del modelo axisimétrico. Asimismo, se observa que a mayor espaciamiento entre columnas de módulo controlado más lejana se encuentra la línea de tendencia del modelo axisimétrico del resto de métodos y consecuentemente también aumenta la diferencia porcentual con respecto al método analítico, llegando a tener una igual a 22.01%. Esto se explicará a más detalle en el punto 7.6, pero es básicamente por la mala distribución de esfuerzos que brinda el modelo axisimétrico. Asimismo, se observa que a mayor espaciamiento más cercanas son las líneas de tendencia del método analítico y del modelo de deformación plana, llegando a tener diferencias porcentuales de hasta 0.00%. Adicionalmente, se observa que conforme aumenta el espaciamiento entre las inclusiones rígidas se va reduciendo cada vez más la diferencia de las profundidades del eje neutro entre un espaciamiento y otro para un mismo espesor del colchón de reparto. Esto se debe a que, a mayor espaciamiento entre columnas, se genera un menor efecto del arco mencionado; de cierta forma se puede entender este efecto como que al aumentar el espaciamiento se tendrá que ir abriendo cada vez más. A continuación, se presentan las comparaciones de las profundidades del eje neutro obtenidas para todos los casos analizados.

Tabla 7.1: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 1.0 m y diferentes espesores

hr (m)	Profundidad de eje neutro (m)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	5.29	5.34	5.60	+ 0.95%	+ 5.86%
0.4	5.41	5.54	5.81	+ 2.40%	+ 7.39%
0.5	5.54	5.74	5.97	+ 3.61%	+ 7.76%
0.6	5.67	5.93	6.02	+ 4.59%	+ 6.17%

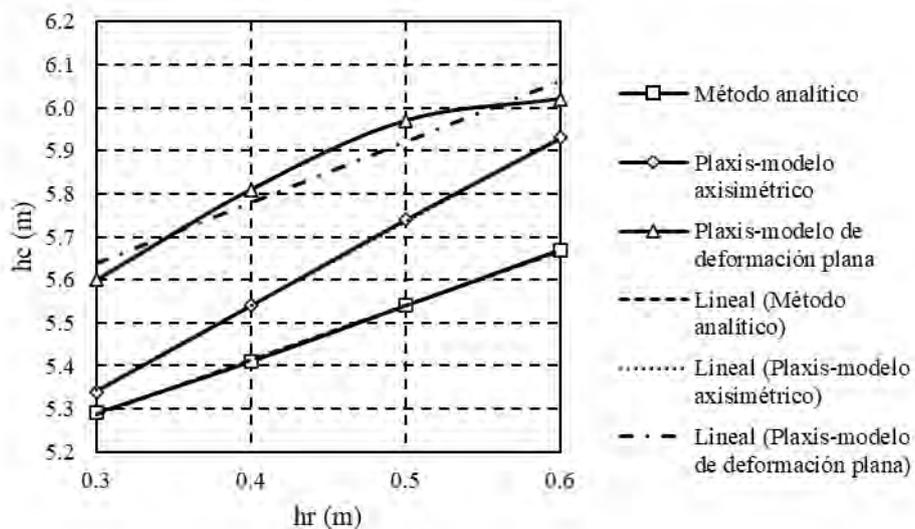


Figura 7.1: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.0 metro

Tabla 7.2: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 1.4 m y diferentes espesores

hr (m)	Profundidad de eje neutro (m)			Diferencia porcentual del Método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	5.71	5.20	5.95	- 8.93%	+ 4.20%
0.4	5.83	5.60	6.09	- 3.95%	+ 4.46%
0.5	6.00	5.80	6.22	- 3.33%	+ 3.67%
0.6	6.17	6.00	6.32	- 2.76%	+ 2.43%

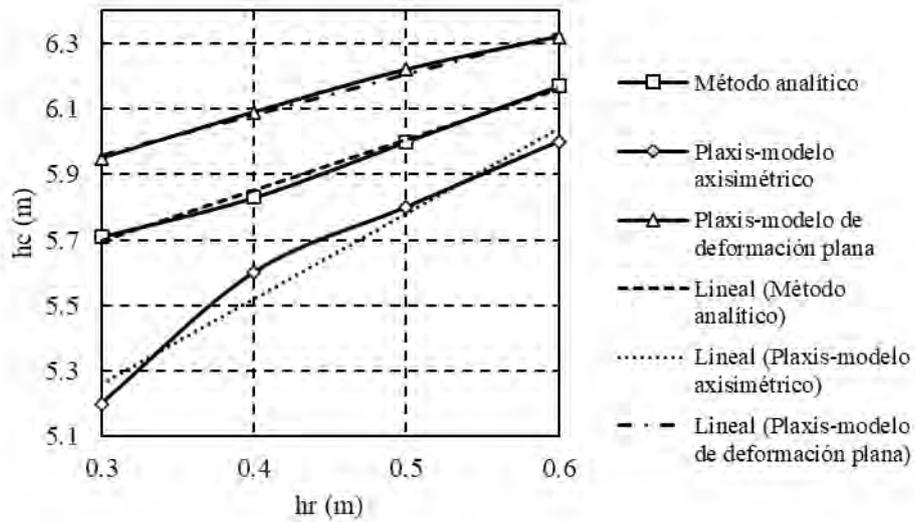


Figura 7.2: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.4 metros

Tabla 7.3: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 1.8 m y diferentes espesores

h_r (m)	Profundidad de eje neutro (m)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	6.09	5.50	6.44	- 9.69%	+ 5.75%
0.4	6.30	5.80	6.52	- 7.94%	+ 3.49%
0.5	6.51	6.10	6.58	- 6.30%	+ 1.08%
0.6	6.63	6.30	6.70	- 4.98%	+ 1.06%

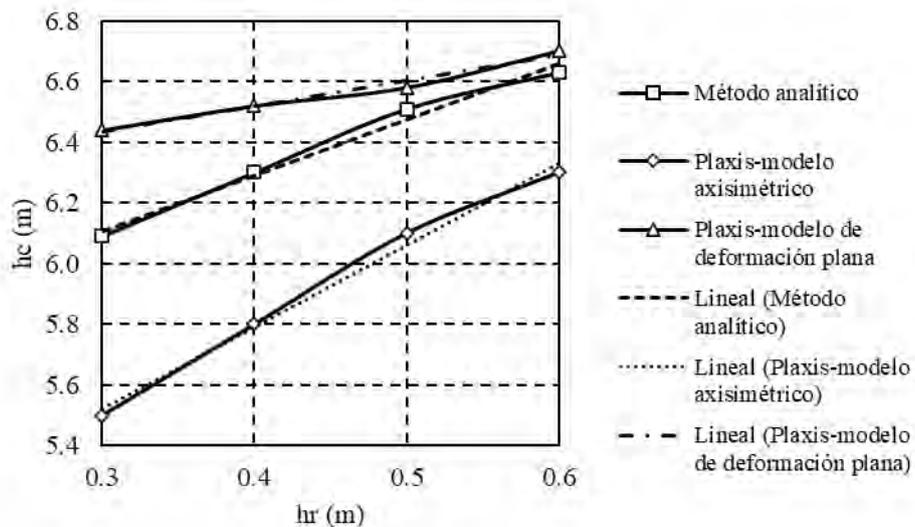


Figura 7.3: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 1.8 metros

Tabla 7.4: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 2.2 m y diferentes espesores

hr (m)	Profundidad de eje neutro (m)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	6.72	5.60	6.77	- 16.67%	+ 0.74%
0.4	6.80	6.00	6.87	- 11.76%	+ 1.03%
0.5	6.88	6.20	6.91	- 12.79%	+ 0.44%
0.6	6.93	6.40	6.98	- 7.65%	+ 0.72%

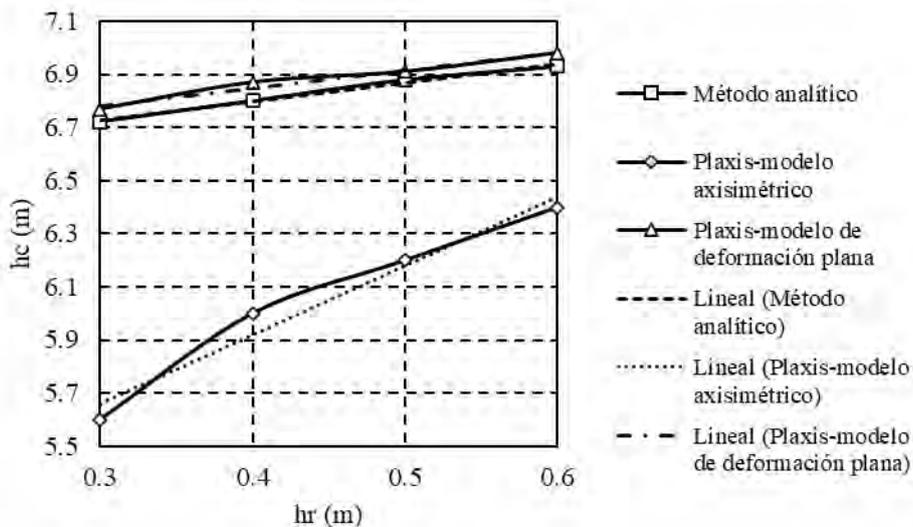


Figura 7.4: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.2 metros

Tabla 7.5: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 2.6 m y diferentes espesores

hr (m)	Profundidad de eje neutro (m)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	7.01	5.60	7.01	- 20.11%	0.00%
0.4	7.01	5.90	7.08	- 15.83%	+ 1.00%
0.5	7.09	6.20	7.14	- 12.55%	+ 0.71%
0.6	7.14	6.40	7.22	- 10.36%	+ 1.12%

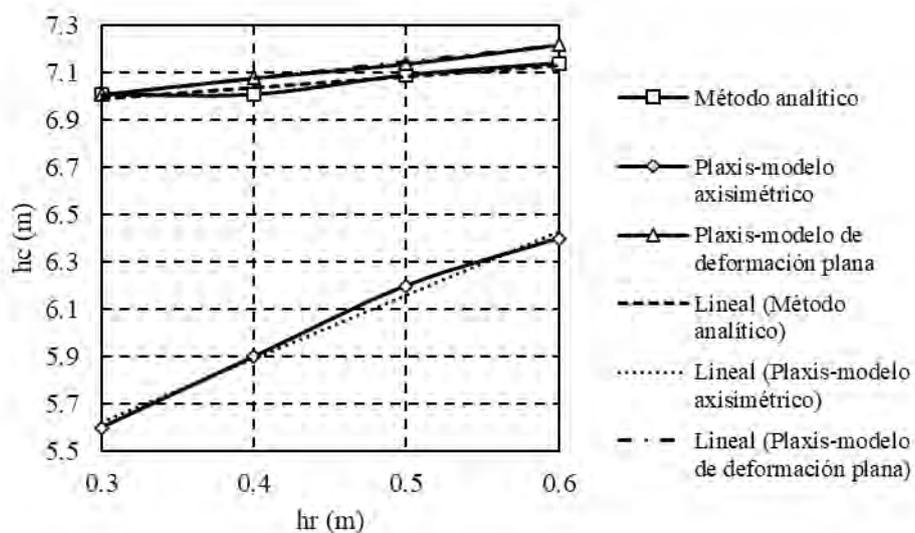


Figura 7.5: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.6 metros

Tabla 7.6: Comparación de los valores de la profundidad del punto neutro obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 3.0 m y diferentes espesores

hr (m)	Profundidad de eje neutro (m)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	7.18	5.60	7.18	- 22.01%	0.00%
0.4	7.18	6.00	7.26	- 16.43%	+ 1.11%
0.5	7.26	6.30	7.30	- 13.22%	+ 0.55%
0.6	7.30	6.40	7.34	- 12.33%	+ 0.55%

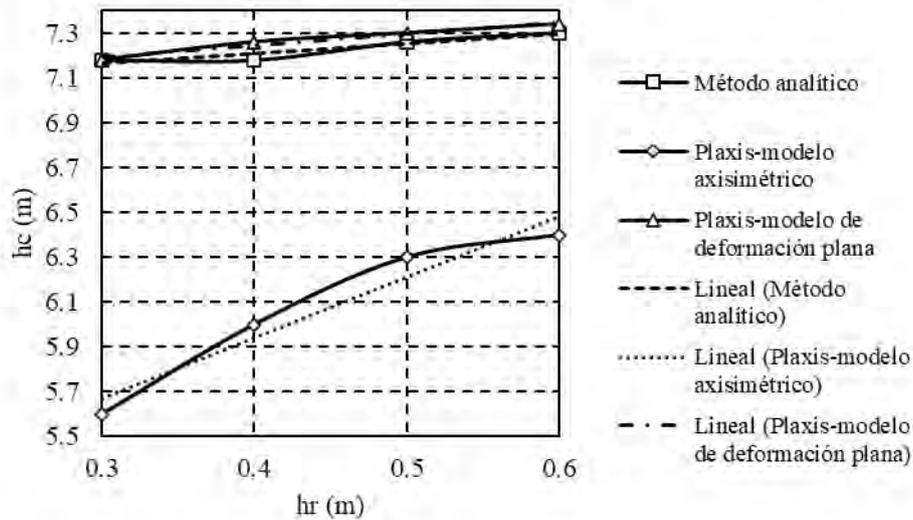


Figura 7.6: Gráfica que compara la profundidad del eje neutro vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 3.0 metros

7.3 Asentamientos

De los resultados obtenidos para diferentes espaciamientos entre columnas y espesores de colchón de reparto presentados en la **Tabla 7.7**, **Tabla 7.8**, **Tabla 7.9**, **Tabla 7.10**, **Tabla 7.11** y **Tabla 7.12**, se observa que conforme aumenta el espesor del colchón de reparto aumenta el asentamiento total del suelo. Esto se debe a que aumenta la carga que debe soportar el suelo blando circundante producto del incremento del peso de la plataforma de transferencia de cargas, teniendo un aumento de hasta 3 mm en un aumento del espesor del colchón de reparto de 0.1 m. Esto está directamente ligado a la forma en que se distribuyen las cargas por el efecto de arco que genera el colchón de reparto y es que a mayor espesor de este mayor será la carga que se envíe a la inclusión rígida por fricción negativa y por ende un mayor asentamiento relativo entre estos dos elementos. Se sabe que uno de los beneficios de contar con un colchón de reparto de cargas es que reduce los asentamientos, ya que si no estuviera las cargas se aplicarían directamente al suelo blando y a la inclusión rígida y no habría algo que distribuya las cargas; entonces, se tendrían asentamientos muy altos y por ende también habría problemas por punzonamiento. Sin embargo, se debe limitar el espesor de esta plataforma, ya que puede también generar un aumento del asentamiento por su propio peso y por ende también un mayor punzonamiento de la CMC en el colchón de reparto. Por otro lado, se observa que a mayor espaciamiento entre las columnas, se genera un incremento considerable de los asentamientos. Si bien es cierto el área de influencia de la CMC será mayor, tendrá una menor eficacia al

transmitir las cargas. Entonces, el suelo blando tendrá que soportar mayores cargas y enviarlas a la inclusión rígida por fricción negativa. Esto producirá que el suelo blando se asiente más. Además, se observa que desde el espaciamiento entre columnas de módulo controlado igual a 2.2 m aumenta la pendiente de las líneas de tendencia de las funciones observadas en las gráficas presentadas para los tres métodos empleados. Lo cual indica que desde dicho espaciamiento se generarán mayores asentamientos al aumentar el espesor del colchón de reparto, lo cual significa un peligro por la posibilidad de generarse problemas por punzonamiento. Entonces, las tres mejores alternativas de espaciamientos son los de 1.0, 1.4 y 1.8 m. Asimismo, al verlo desde la parte económica puede resultar muy caro tener espaciamientos de 1.0 o 1.4 m, porque esto significaría una mayor cantidad de columnas de módulo controlado. Es por ello que la mejor alternativa para el espaciamiento a nivel de asentamientos es el de 1.8 m.

Se observa que, al comparar las líneas de tendencia de los tres métodos, siempre la pendiente obtenida por el modelo de deformación plana resulta menor a comparación las obtenidas por el método analítico y modelo axisimétrico. Por otro lado, se observa que las diferencias porcentuales son mayores para los espaciamientos de 1.4 y 1.8 m de los modelos axisimétrico y de deformación plana. La diferencia porcentual más grande para el modelo axisimétrico con respecto al método analítico es igual a 30.39%, mientras que la menor es de 0.97%, mientras que el modelo de deformación plana sus valores máximos y mínimos son 33.20% y 0.40%, respectivamente. En general se tienen diferencias muy pequeñas considerando que estos valores están en porcentajes y que inclusive los valores de asentamiento están en milímetros. Los valores más cercanos a los obtenidos por el método analítico son los del modelo de deformación plana al menos hasta el espaciamiento de 2.2 m.

Tabla 7.7: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.0 metro y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Asentamiento (mm)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	5.00	5.50	4.98	+ 10.00%	- 0.40%
0.4	5.61	6.23	5.64	+ 11.05%	+ 0.53%
0.5	6.27	6.80	6.11	+ 8.45%	- 2.55%
0.6	7.10	7.30	6.40	+ 2.82%	- 9.86%

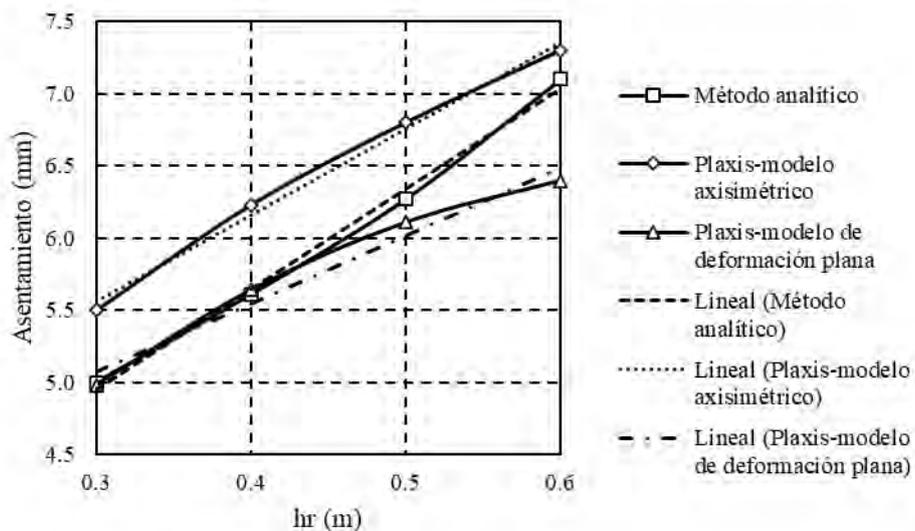


Figura 7.7: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 1.0 metro

Tabla 7.8: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 1.4 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Asentamiento (mm)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	8.64	11.24	11.11	+ 30.09%	+ 28.59%
0.4	9.84	12.83	12.05	+ 30.39%	+ 22.46%
0.5	11.05	14.05	12.53	+ 27.15%	+ 13.39%
0.6	12.62	15.00	13.13	+ 18.86%	+ 4.04%

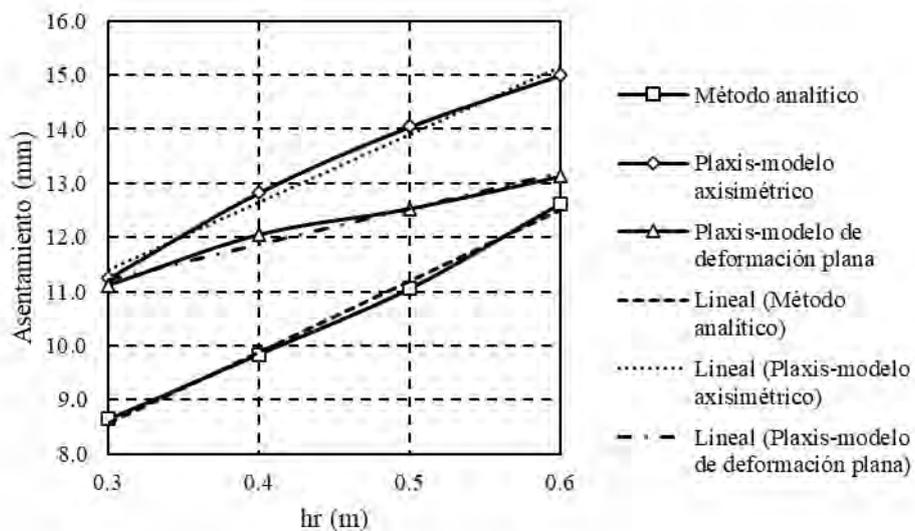


Figura 7.8: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 1.4 metros

Tabla 7.9: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 1.8 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Asentamiento (mm)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	14.79	19.27	19.70	+ 30.29%	+ 33.20%
0.4	17.36	21.52	20.64	+ 23.96%	+ 18.89%
0.5	19.83	23.26	20.88	+ 17.30%	+ 5.30%
0.6	21.83	24.49	22.05	+ 12.19%	+ 1.01%

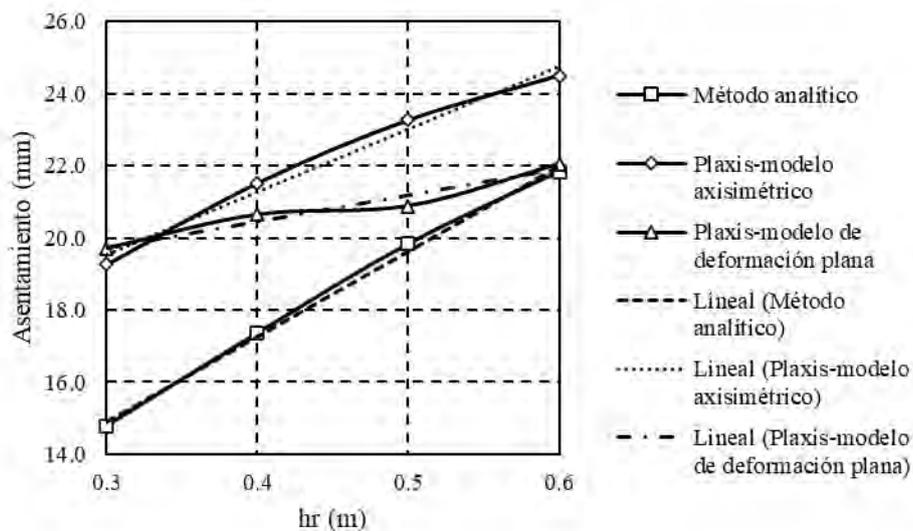


Figura 7.9: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 1.8 metros

Tabla 7.10: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 2.2 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Asentamiento (mm)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	26.14	27.34	27.66	+ 4.59%	+ 5.81%
0.4	28.17	29.76	28.63	+ 5.64%	+ 1.63%
0.5	30.01	31.40	29.04	+ 0.97%	- 3.23%
0.6	31.31	32.67	29.83	+ 4.34%	- 4.73%

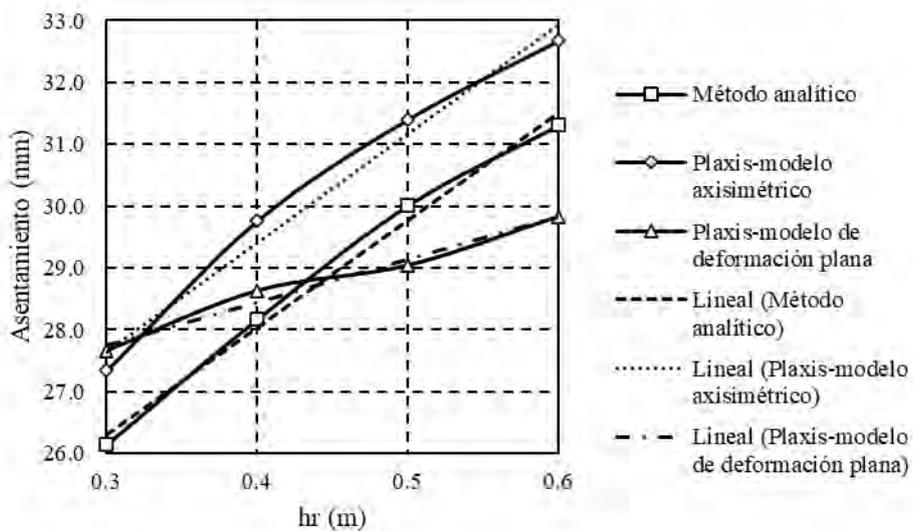


Figura 7.10: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 2.2 metros

Tabla 7.11: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 2.6 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Asentamiento (mm)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	34.73	33.58	34.08	- 3.31%	- 1.87%
0.4	36.41	35.51	34.72	- 2.47%	- 4.64%
0.5	38.12	37.72	35.40	- 1.05%	- 7.14%
0.6	39.74	38.79	36.29	- 2.39%	- 8.6% 8

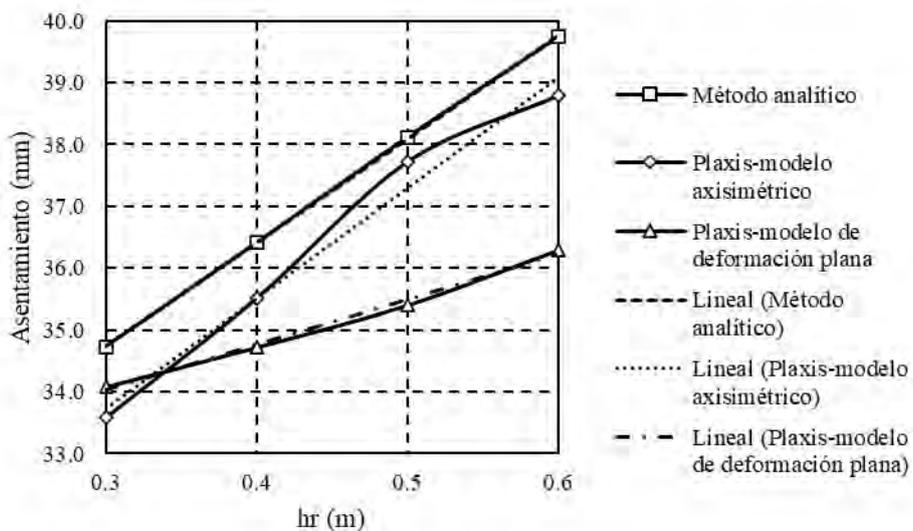


Figura 7.11: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 2.6 metros

Tabla 7.12: Comparación de los valores obtenidos de asentamientos por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 3.0 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Asentamiento (mm)			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	41.20	38.40	38.57	- 6.80%	- 6.38%
0.4	43.18	40.51	39.25	- 6.18%	- 9.10%
0.5	45.10	42.39	39.84	- 6.01%	- 11.66%
0.6	46.66	43.26	40.05	- 7.29%	- 14.17%

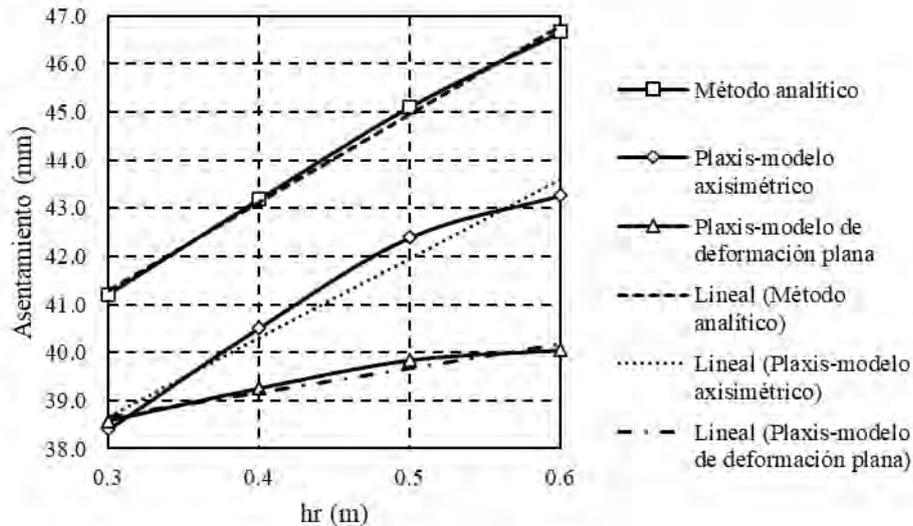


Figura 7.12: Gráfica que compara los asentamientos vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 3.0 metros

7.4 Comparación de valores de SRR

De los resultados obtenidos para diferentes espaciamientos entre columnas y espesores de colchón de reparto presentados en la **Tabla 7.13**, **Tabla 7.14**, **Tabla 7.15**, **Tabla 7.16**, **Tabla 7.17** y **Tabla 7.18**, se observa que conforme aumenta el espesor del colchón de reparto aumenta el valor de SRR. Esto según Asiri National Project (2012), se debe a un error del parámetro SRR propuesto por Combarieu, el cual se supone que calcula la parte de la carga total que recibe el suelo circundante a la columna de módulo controlado. Esto lo toman como un error porque luego de haber realizado ensayos a escala reducida se observó que el valor de SRR llega a un umbral en el cual ya se vuelve constante. Sin embargo, todo lo mencionado fue aplicado para terraplenes, donde la variable hr era la altura del terraplén; por lo que es de suponerse que el peso generado por toda esa masa de suelo producirá mayores cargas y se hará el valor de SRR cada vez mayor al aumentar dicha altura a tal punto que ya se vuelva contraproducente. Sin embargo, para este caso se considera que es un buen indicador de la tasa reducción de esfuerzos en la superficie del suelo blando. Y es que tiene sentido que este valor aumente conforme se incremente la altura del colchón de reparto, porque este generará que por su peso se transmitan más cargas al suelo el cual se las transmitirá a la inclusión rígida por fricción negativa. Además, como era de esperarse, conforme aumenta el espaciamento entre inclusiones rígidas también aumentará el valor de SRR. Esto se debe a que no se generará bien el efecto de arco; por lo que, no se podrá transmitir de forma adecuada las cargas hacia la

inclusión rígida, llegándole una mayor parte al suelo blando circundante. Además, se observa que la pendiente de las líneas de tendencia para los tres métodos empleados va aumentando conforme aumenta el espaciado hasta que llega al espaciado de 1.8 m para luego reducirse al aumentar el espacio entre inclusiones rígidas a tal punto que esta llega a ser casi horizontal para los casos calculados mediante el método analítico y del modelo de deformación plana. Esto indica que hasta este espaciado de 1.8 metros se tiene un aporte considerable del colchón de reparto al sistema, de ahí en adelante ya no afecta considerablemente a la reducción de esfuerzos.

Se observa que, al comparar las líneas de tendencia de los tres métodos, la pendiente obtenida por el modelo de deformación plana resulta menor a comparación las obtenidas por el método analítico y modelo axisimétrico hasta el espaciado entre inclusiones de 2.2 m para luego ser la obtenida por el método analítico la menor. La diferencia porcentual más grande para el modelo axisimétrico con respecto al método analítico es igual a - 17.24%, mientras que la menor es de 0.03%, mientras para que el modelo de deformación plana sus valores máximos y mínimos son 22.98% y 0.96%, respectivamente. Los valores más cercanos a los obtenidos por el método analítico son los del modelo axisimétrico al menos hasta el espaciado de 1.8 m.

Tabla 7.13: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciado igual a 1.0 metro y diferentes espesores de reparto

hr (m)	SRR			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	22.56%	18.67%	19.05%	- 17.24%	- 15.56%
0.4	24.74%	21.88%	22.50%	- 11.56%	- 9.05%
0.5	26.41%	23.93%	24.55%	- 9.39%	- 7.04%
0.6	30.03%	25.51%	25.76%	- 15.05%	- 14.22%

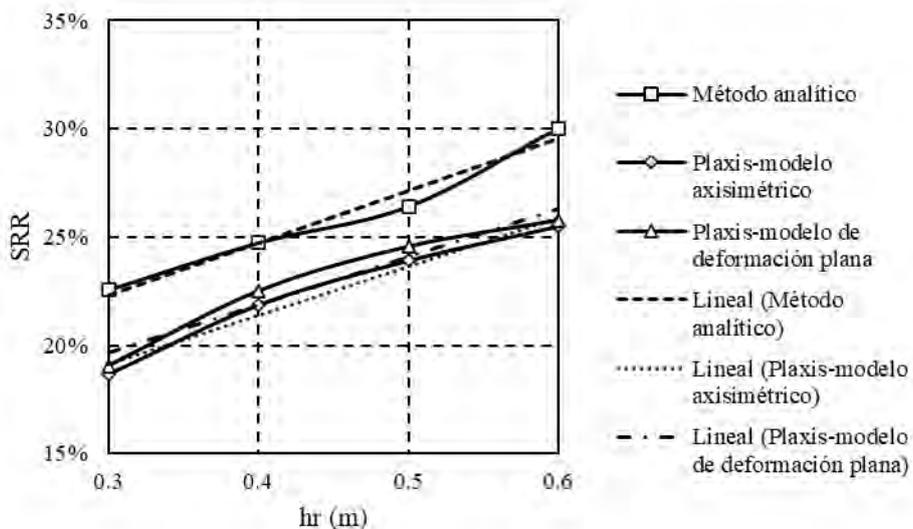


Figura 7.13: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 1.0 metro

Tabla 7.14: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 1.4 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	SRR			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	26.80%	25.92%	30.07%	- 3.28%	+ 12.20%
0.4	29.55%	29.56%	33.57%	+ 0.03%	+ 13.60%
0.5	31.54%	32.69%	35.16%	+ 3.65%	+ 11.48%
0.6	35.43%	35.03%	36.93%	- 1.13%	+ 4.23%

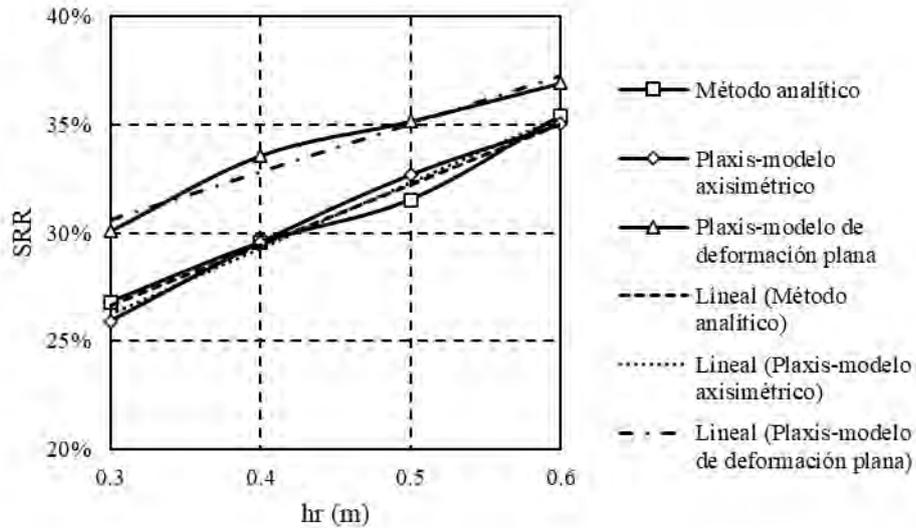


Figura 7.14: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 1.4 metros

Tabla 7.15: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 1.8 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	SRR			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico			
		Axisimétrico	Deformación plana	Axisimétrico	Deformación plana
0.3	34.99%	34.95%	43.03%	- 0.11%	+ 22.98%
0.4	39.85%	39.50%	45.95%	- 0.88%	+ 15.31%
0.5	43.40%	42.99%	46.79%	- 0.94%	+ 7.81%
0.6	46.68%	45.60%	49.32%	- 2.31%	+ 5.66%

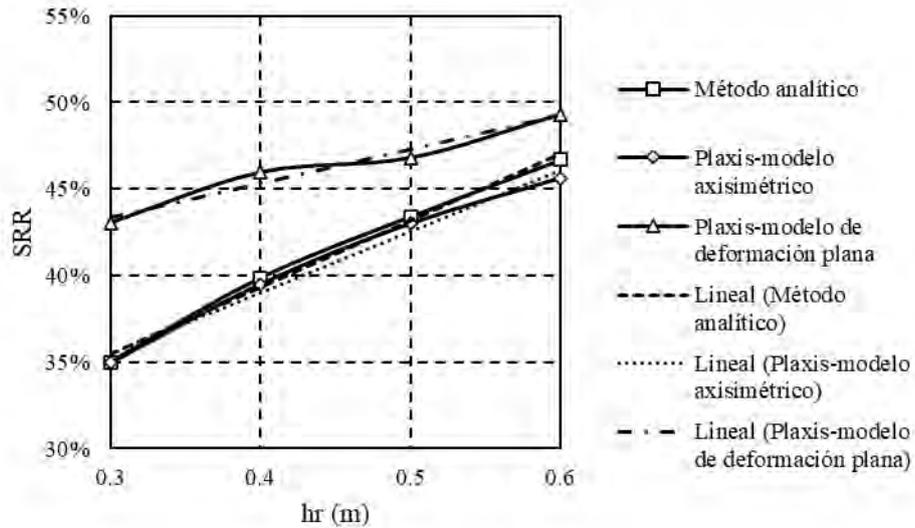


Figura 7.15: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 1.8 metros

Tabla 7.16: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 2.2 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	SRR			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico			
		Axisimétrico	Deformación plana	Axisimétrico	Deformación plana
0.3	53.37%	45.64%	53.88%	- 14.48%	+ 0.96%
0.4	55.46%	50.26%	56.18%	- 9.38%	+ 1.30%
0.5	56.58%	53.49%	57.24%	- 2.76%	+ 1.17%
0.6	57.73%	55.99%	58.90%	- 3.01%	+ 2.03%

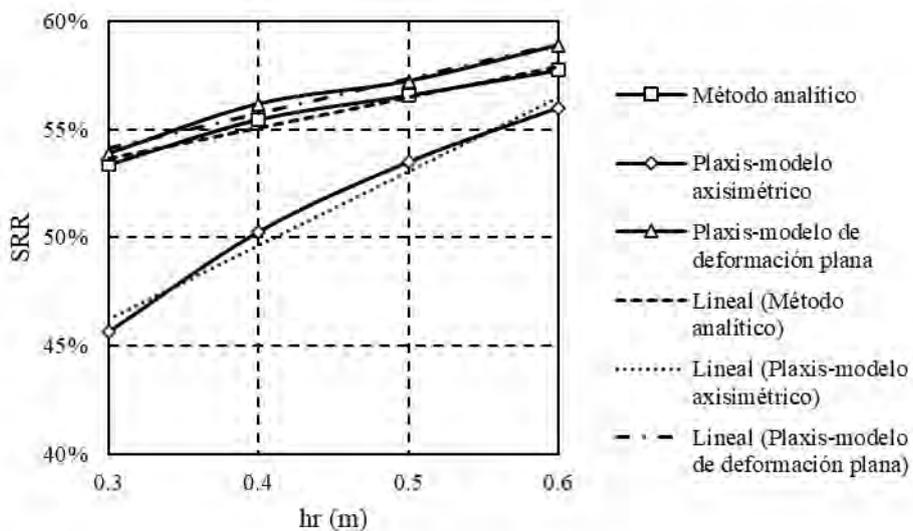


Figura 7.16: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 2.2 metros

Tabla 7.17: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 2.6 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	SRR			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	64.88%	54.77%	62.55%	- 15.58%	- 3.59%
0.4	65.68%	58.42%	63.98%	- 11.05%	- 2.59%
0.5	66.23%	62.36%	65.32%	- 5.84%	- 1.37%
0.6	67.72%	64.64%	67.00%	- 4.55%	- 1.06%

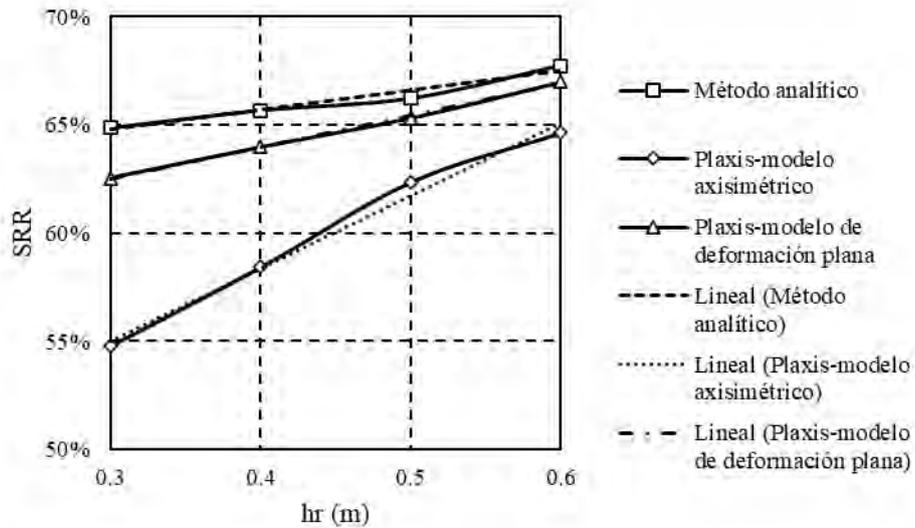


Figura 7.17: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 2.6 metros

Tabla 7.18: Comparación de los valores obtenidos de SRR por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 3.0 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	SRR			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	73.04%	62.08%	68.51%	- 15.01%	- 6.20%
0.4	74.04%	66.01%	69.86%	- 10.85%	- 5.65%
0.5	74.61%	69.50%	70.98%	- 6.85%	- 4.87%
0.6	75.83%	71.26%	71.49%	- 6.03%	- 5.72%

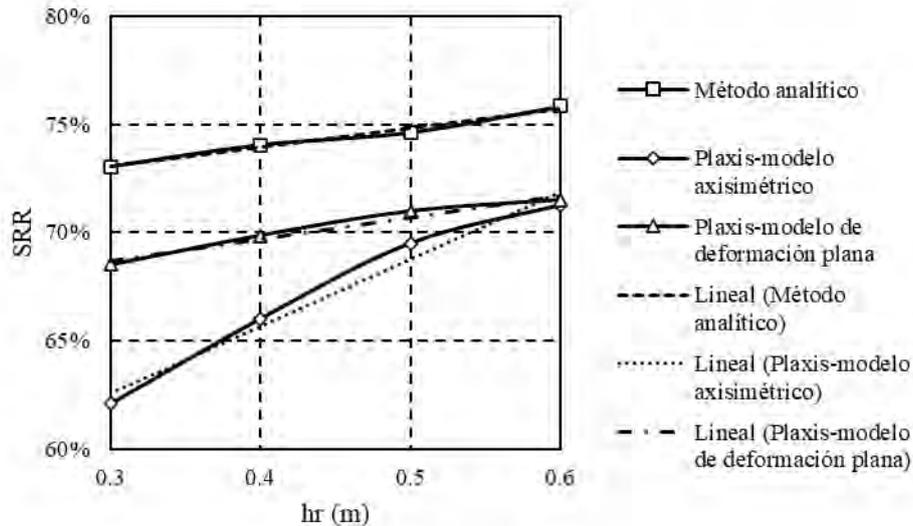


Figura 7.18: Gráfica que compara el SRR vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamiento igual a 3.0 metros

7.5 Comparación de valores de Eficiencia

En general de los resultados para diferentes espesores del colchón de reparto y espaciamientos entre inclusiones rígidas presentados en la **Tabla 7.19**, **Tabla 7.20**, **Tabla 7.21**, **Tabla 7.22**, **Tabla 7.23** y **Tabla 7.24**, se puede observar que lo obtenido por el modelo de deformación plana dista mucho de la eficiencia obtenida por el método analítico y el modelo axisimétrico refiriéndose en la tendencia que presentan. Sin embargo, las diferencias porcentuales con respecto al método analítico son relativamente bajas, siendo la mayor de estas para este modelo 13.80%. Asimismo, se observa que la pendiente de las líneas de tendencia del método analítico y del modelo axisimétrico se van acercando más conforme aumenta el espaciamiento entre inclusiones rígidas. A pesar de que los resultados del modelo axisimétrico se asemeja más a lo obtenido por el método analítico, este llega a tener una diferencia porcentual incluso mayor a la de deformación plana, siendo el máximo valor igual a 23.13%. Como se mencionó en los capítulos anteriores, la eficiencia por el método analítico y modelo axisimétrico siempre tienen la tendencia de decrecer conforme aumenta el espesor del colchón de reparto para todos los espaciamientos entre inclusiones rígidas. Donde mejor se asemejan los resultados obtenidos por los 3 métodos es para el espaciamiento de 1.8 m. Asimismo, es para este espaciamiento donde los 3 indican que se produce una mejor transferencia de cargas. Ya que, es en este espaciamiento donde se observa que la pendiente de la línea de tendencia no es ni tan grande ni tan pequeña, llegando a un equilibrio en la cantidad de carga que se distribuye por fricción

negativa y como carga normal a la inclusión rígida, para el método analítico. Para el modelo axisimétrico se observa para este mismo espaciamiento ocurre algo similar que con el método analítico (se observa que para el espaciamiento más bajo analizado prácticamente no varía la eficiencia a pesar de variar el espesor del colchón de reparto y conforme va aumentando el espaciamiento, está pendiente va disminuyendo hasta llegar al espaciamiento de 2.2 m que es donde vuelve a aumentar y desde el espaciamiento de 2.6 m se observa que a diferencia del resto de casos no decrece la eficiencia conforme aumenta el espesor del colchón de reparto, sino que aumenta en los espesores de 0.5 y 0.6 m) al llegar a un equilibrio en aproximadamente este espaciamiento. Finalmente, para el modelo de deformación plana se observa que empieza con una tendencia creciente conforme aumenta el espesor del colchón, lo cual no ocurre en los espaciamientos de 1.8, 2.6 y 3.0 m; sin embargo, en los dos últimos espaciamientos mencionados para un espesor de 0.5 m se observa un aumento de la eficiencia.

Tabla 7.19: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamiento igual a 1.0 metro y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Eficiencia			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	79.40%	72.42%	72.31%	- 8.79%	- 8.93%
0.4	77.05%	72.24%	81.07%	- 6.24%	+ 5.22%
0.5	75.21%	72.64%	81.56%	- 3.42%	+ 8.44%
0.6	72.36%	72.37%	78.13%	+ 0.01%	+ 7.97%

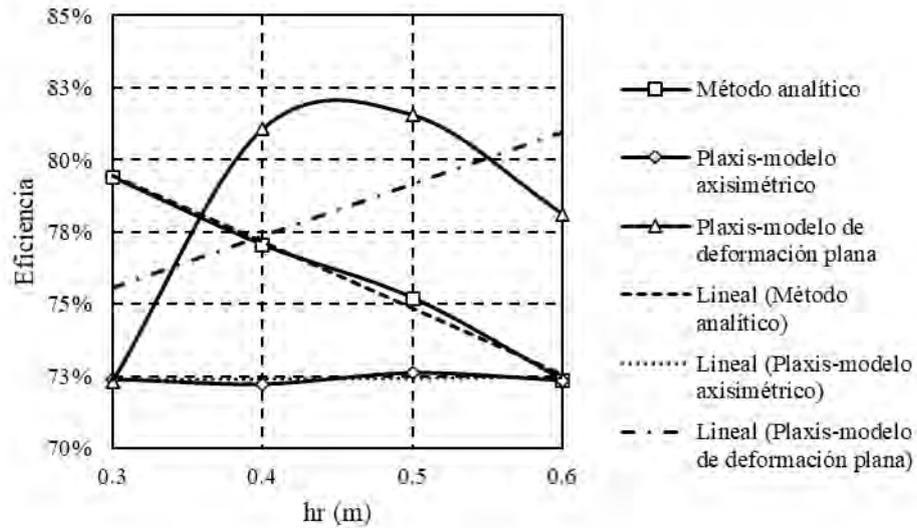


Figura 7.19: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 1.0 metro

Tabla 7.20: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 1.4 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Eficiencia			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	74.22%	69.34%	65.55%	- 6.58%	- 11.68%
0.4	71.55%	68.95%	72.11%	- 3.63%	+ 0.78%
0.5	69.24%	69.27%	73.34%	+ 0.04%	+ 5.92%
0.6	65.85%	67.45%	71.71%	+ 2.43%	+ 8.90%

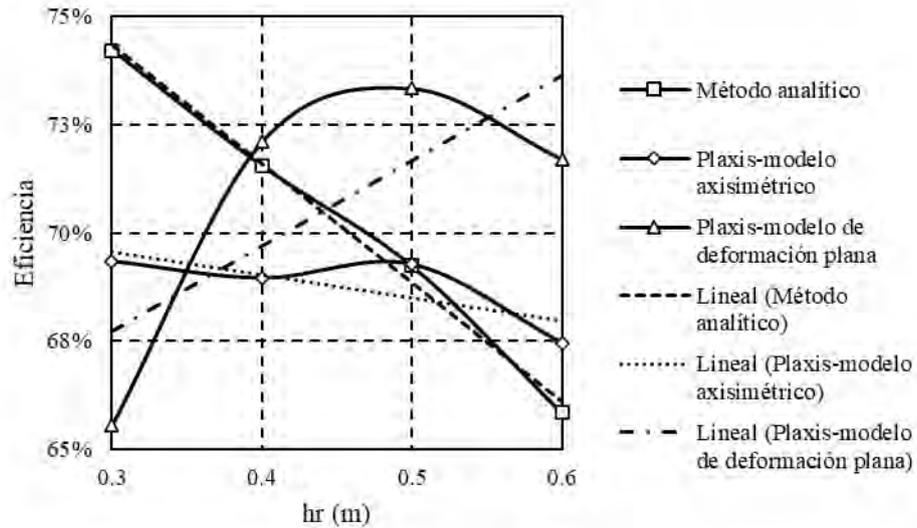


Figura 7.20: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 1.4 metros

Tabla 7.21: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 1.8 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Eficiencia			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	65.73%	65.80%	64.53%	+ 0.11%	- 1.83%
0.4	61.04%	64.83%	63.28%	+ 6.21%	+ 3.67%
0.5	57.24%	62.49%	51.03%	+ 9.17%	- 10.85%
0.6	54.33%	60.17%	55.67%	+ 10.75%	+ 2.47%

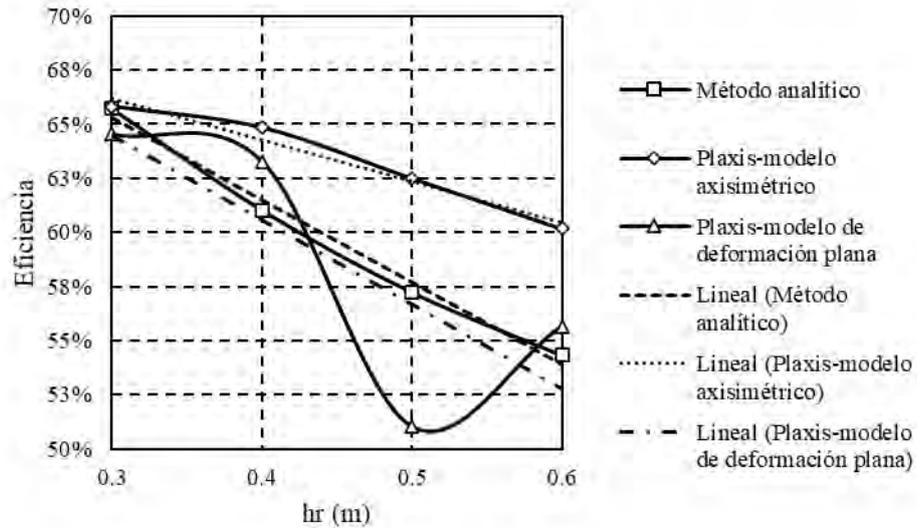


Figura 7.21: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 1.8 metros

Tabla 7.22: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 2.2 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Eficiencia			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	47.34%	58.29%	43.73%	+ 23.13%	- 7.63%
0.4	45.35%	55.01%	49.65%	+ 21.30%	+ 9.48%
0.5	43.92%	52.22%	47.13%	+ 19.65%	+ 7.31%
0.6	43.04%	50.09%	48.07%	+ 16.38%	+ 11.69%

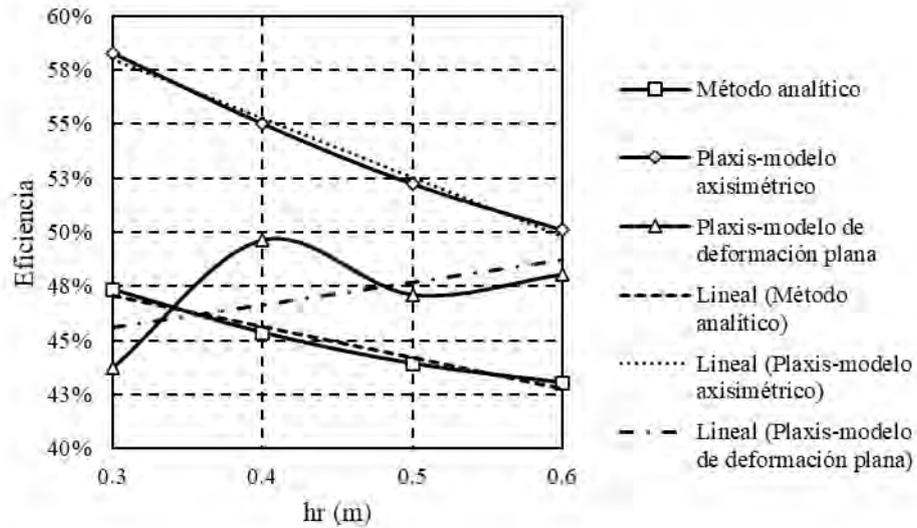


Figura 7.22: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 2.2 metros

Tabla 7.23: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 2.6 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Eficiencia			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	35.81%	36.36%	39.61%	+ 1.54%	+ 10.61%
0.4	35.01%	32.23%	33.87%	- 7.94%	- 3.26%
0.5	34.13%	35.13%	38.05%	+ 2.93%	+ 11.49%
0.6	32.99%	30.49%	33.32%	- 7.58%	+ 1.00%

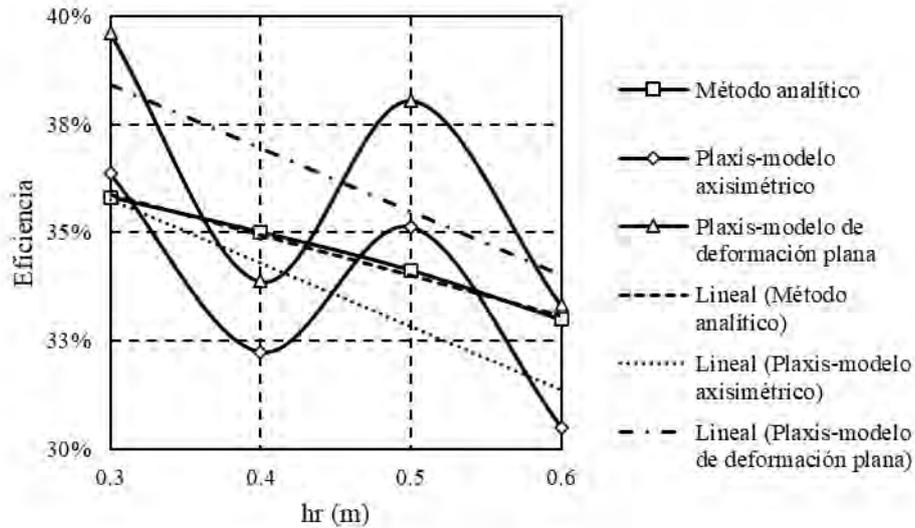


Figura 7.23: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 2.6 metros

Tabla 7.24: Comparación de los valores obtenidos de Eficiencia por métodos numéricos y métodos analíticos para un espaciamento igual a 3.0 metros y diferentes espesores de reparto

hr (m)	Eficiencia			Diferencia porcentual del método numérico respecto al método analítico (%)	
	Método analítico	Método numérico		Axisimétrico	Deformación plana
		Axisimétrico	Deformación plana		
0.3	27.53%	32.22%	27.12%	+ 17.04%	- 1.49%
0.4	26.54%	26.89%	26.73%	+ 1.32%	+ 0.72%
0.5	25.66%	27.43%	29.20%	+ 6.90%	+ 13.80%
0.6	24.76%	28.84%	24.03%	+ 16.48%	- 2.95%

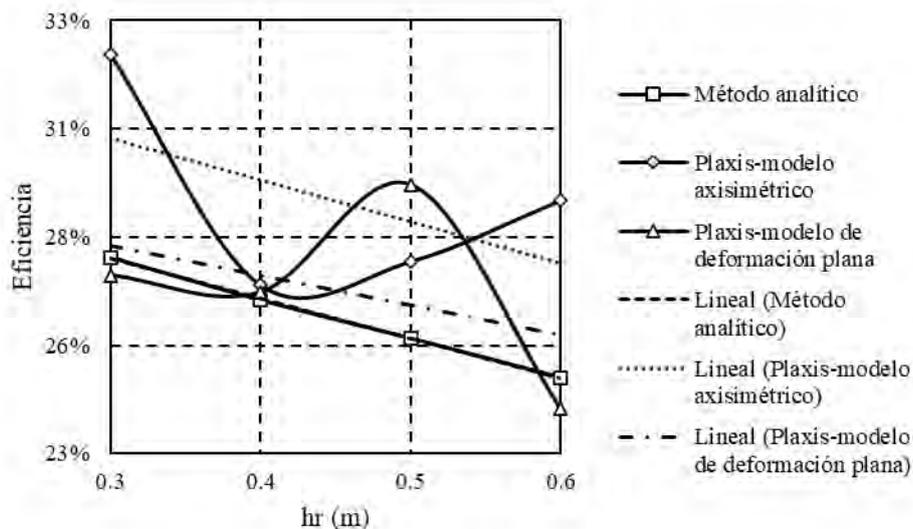


Figura 7.24: Gráfica que compara la Eficiencia vs el espesor del colchón de reparto para un espaciamento igual a 3.0 metros

7.6 Comparación de distribución de esfuerzos y asentamientos

Según lo presentado en el Anexo C de comparación de resultados, se puede observar que para un espaciamento entre inclusiones rígidas de 1.0 y 1.4 m se obtienen distribuciones muy similares de esfuerzos, tanto normales como por corte para los 3 métodos usados. Sin embargo, esto cambia para espaciamentos más grandes, ya que la distribución del modelo axisimétrico ya no conserva la misma forma que de los otros métodos empleados. Esto se hace más notorio en la distribución de los esfuerzos normales para diferentes profundidades al observarse que el del axisimétrico para una distribución de esfuerzos uniforme a lo largo de la CMC, cuando lo que debería pasar es que la mayoría de la carga se vaya hacia el eje neutro, que es lo que ocurre en lo obtenido por el método analítico y axisimétrico. Consecuentemente, esta mala distribución de esfuerzos provoca que el eje neutro varíe mucho a comparación de los otros métodos usados. Por otro lado, se observa que los esfuerzos normales obtenidos del modelo de deformación plana siempre resultan mayores que los del método analítico y del modelo axisimétrico y ocurre lo opuesto para los esfuerzos cortantes. Sin embargo, la distribución de asentamientos obtenida del modelo axisimétrico a lo largo de la inclusión rígida y del suelo blando resulta muy similar al del método analítico. Entonces, se puede inferir que el modelo axisimétrico permite obtener una distribución de asentamientos mejor que la del modelo de deformación plana, pero en cuanto a distribución de esfuerzos normales ocurre lo contrario. En cuanto a los esfuerzos cortantes y asentamientos del suelo, resultan muy similares en su

distribución tanto en el modelo axisimétrico como en el de deformación plana; sin embargo, la profundidad del eje neutro para el modelo axisimétrico dista mucho del resto y se sabe que este valor está directamente ligado tanto al asentamiento relativo entre inclusiones rígidas y el suelo blando como a la fricción negativa.



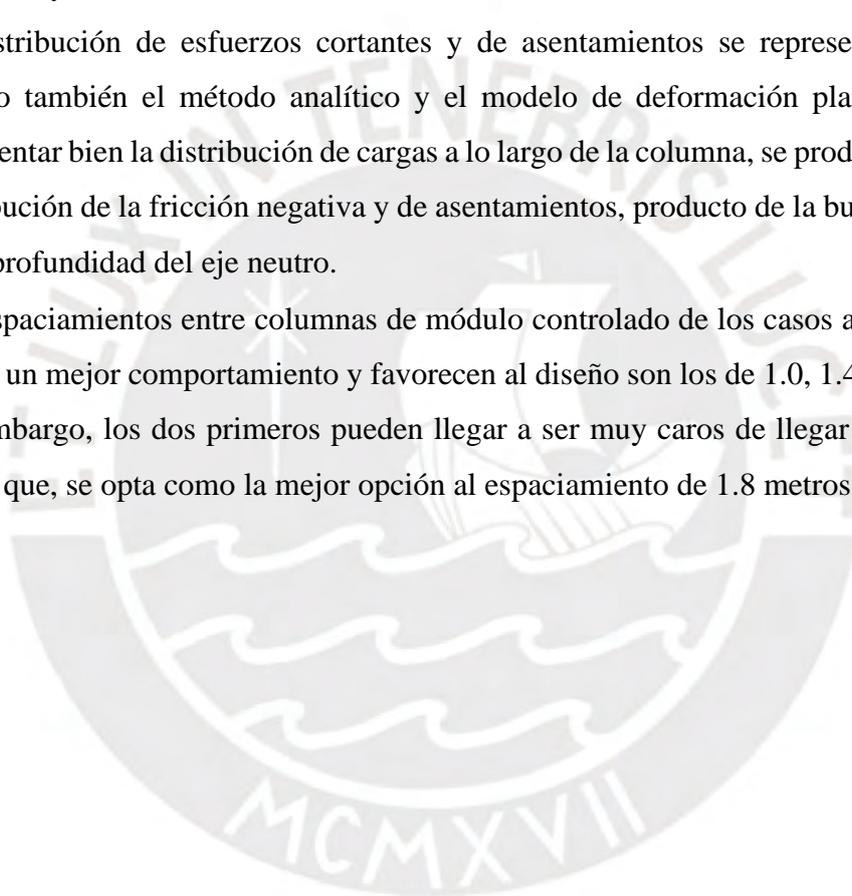
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

- Según los métodos analíticos y numéricos, la profundidad del eje neutro aumenta conforme se incrementa el espesor del colchón de reparto de cargas. Además, se observa que a mayor espaciamiento entre columnas de módulo controlado mayor será la profundidad de este. El primero producto a la carga extra generada por el peso del colchón y el segundo por el asentamiento relativo entre la inclusión rígida y el suelo blando.
- Se observa que para un mismo espesor de colchón de reparto, conforme se aumenta el espaciamiento entre las columnas se va reduciendo la diferencia de la profundidad del eje neutro entre estos. Por lo que, se concluye que, a mayor espaciamiento entre inclusiones, se genera un menor efecto de arco producido por el colchón de reparto. Sobre todo, desde el espaciamiento igual a 2.2 metros.
- A mayor espaciamiento entre las columnas de módulo controlado más lejana se encuentra la línea de tendencia del modelo axisimétrico del resto de métodos. Ello se debe a que este modelo tiene muchas limitaciones en cuanto a la distribución de esfuerzos. Además, se observa que la línea de tendencia del método analítico está más cercana a la del modelo de deformación plana. Por lo que, se recomienda el uso del modelo de deformación plana para determinar la profundidad del eje neutro, sobre todo cuando se tiene un mayor espaciamiento entre columnas.
- Según los métodos analíticos y numéricos, el asentamiento aumenta conforme se incrementa el espesor del colchón de reparto de cargas. Además, se observa que a mayor espaciamiento entre columnas de módulo controlado mayor el asentamiento. El primero producto a la carga extra generada por el peso del colchón y el segundo por el asentamiento relativo entre la inclusión rígida y el suelo blando, al igual que con la profundidad del eje neutro.
- Se observa que, desde el espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 2.2 metros las pendientes de las líneas de tendencia generadas por los tres métodos aumentan. Lo que quiere decir que desde este espaciamiento en adelante se generarán asentamientos mucho más grandes conforme se aumenta el espesor del colchón de reparto a comparación de los obtenidos para menores espaciamientos.
- Desde el espaciamiento entre inclusiones rígidas igual a 2.2 metros se puede generar un problema por punzonamiento entre la columna de módulo controlado y el suelo circundante.

- En general tanto el modelo axisimétrico como el de deformación plana son muy buenos para determinar los asentamientos, ya que brindan valores muy cercanos a los obtenidos por el método analítico. Sin embargo, los valores más cercanos a los obtenidos por el método analítico corresponden al modelo de deformación plana hasta el espaciamiento de 2.2 metros.
- Según los métodos analíticos y numéricos, la tasa de reducción de esfuerzos aumenta conforme se incrementa el espesor del colchón de reparto de cargas. Además, se observa que a mayor espaciamiento entre columnas de módulo controlado mayor es el valor del SRR. El primero es producto de la carga extra generada por el peso del colchón y el segundo debido a la reducción en la eficacia del efecto de arco conforme aumenta el espaciamiento.
- Desde el espaciamiento de 2.2 metros en adelante se observa un menor aporte del colchón de reparto de cargas en la reducción de esfuerzos que llega al suelo circundante. Esto debido a que se observa que las pendientes de las líneas de tendencia aumentan hasta el espaciamiento de 1.8 m, y luego empiezan a reducirse hasta generar que la línea de tendencia sea casi horizontal.
- El modelo axisimétrico brinda valores más cercanos de SRR con el método analítico a comparación del modelo de deformación plana hasta el espaciamiento de 1.8 metros.
- Según los métodos analíticos y el modelo axisimétrico, la eficiencia se reduce conforme se incrementa el espesor del colchón de reparto de cargas. Además, se observa que a mayor espaciamiento entre columnas de módulo controlado menor es el valor de la eficiencia. Sin embargo, para el modelo de deformación plana si bien también se cumple que la eficiencia disminuye cuando se incremente el espaciamiento entre inclusiones, no se cumple que también se reduce conforme aumenta el espesor del colchón de reparto.
- El espaciamiento de 1.8 metros, es el que brinda una mejor eficiencia, ya que es en este caso donde se genera una pendiente de las líneas de tendencia ni tan alta ni tan baja. Ello indica que llega a un equilibrio entre la cantidad de carga que proporciona a la cabeza de la columna de módulo controlado y al resto que se transfiere por fricción negativa a lo largo de esta.
- El modelo axisimétrico brinda valores más cercanos a la eficiencia con el método analítico. De hecho, el modelo de deformación proporciona valores irregulares de la eficiencia. Es por ello que para compararlo con los demás métodos se tuvo que hacer

uso de las líneas de tendencia. Sin embargo, el modelo axisimétrico puede llegar a tener valores de diferencia porcentual incluso más altos que los de deformación plana.

- La distribución de esfuerzos normales en la columna se representa muy bien usando el método analítico y el modelo de deformación plana del método numérico. Ya que, se genera una buena distribución de esfuerzos, enviando la mayoría a la profundidad del eje neutro. En cambio, el modelo axisimétrico considera que esta distribución es casi constante a lo largo de la columna de módulo controlado.
- La distribución de esfuerzos normales en el suelo se representa bien usando los métodos analíticos y numéricos.
- La distribución de esfuerzos cortantes y de asentamientos se representa muy bien usando también el método analítico y el modelo de deformación plana, ya que al representar bien la distribución de cargas a lo largo de la columna, se produce una buena distribución de la fricción negativa y de asentamientos, producto de la buena ubicación de la profundidad del eje neutro.
- Los espaciamientos entre columnas de módulo controlado de los casos analizados que tienen un mejor comportamiento y favorecen al diseño son los de 1.0, 1.4 y 1.8 metros. Sin embargo, los dos primeros pueden llegar a ser muy caros de llegar a ejecutarlos; por lo que, se opta como la mejor opción al espaciamiento de 1.8 metros.



CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA

- Asiri National Project, & IREX. (2012). Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements (p. 317).
- Castro, J., Sagasetta, C., da Costa, A., & Cañizal, J. (2016). Modelización de columnas de grava. Simposio Sobre El Reconocimiento, Tratamiento y Mejora Del Terreno, 567–588.
- Chatte, R., & Cirión, A. (2013). Mejoramiento de suelos - inclusiones rígidas - experiencias en México. 2° Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas - MÉXICO.
- Colcha, H. V., & Muñoz, J. C. (2021). Modelación numérica de pilotes sometidos a carga lateral pseudoestática utilizando el programa Midas GTS NX.
- Combarieu, O. (2008). Remblais sur sol compressible et inclusions rigides. Amélioration de l'approche du dimensionnement. *Revue Française de Géotechnique*, 122, 45–54.
- Combarieu, O., & Laboratoire régional des Ponts-et-Chaussées de Rouen. (1988). Amélioration des sols par inclusions rigides verticales application à l'édification de remblais sur sols médiocres. *Revue Française de Géotechnique*, 44, 57–79. <https://doi.org/10.1051/geotech/1988044057>
- Coronilla, N. (2015). Estudio de la mejora de terreno mediante columnas suelo-cemento tipo Mixpile.
- Emersleben, A., & Meyer, N. (2011). Use of Geocell Load Transfer Platforms over Vertical Columns. *Geo-Frontiers 2011* © ASCE 2011, 3255–3265.
- Gómez Pérez, R. (2012). INCLUSIONES RÍGIDAS – ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS Y LOS MÉTODOS NUMÉRICOS. <https://doi.org/10.13140/2.1.3061.0728>
- Lauzon, M., Desgranges, L., & Massé, F. (2009). Reinforcement of Soft Soils by Means of Controlled Modulus Columns. *GeoHalifax2009*, 199–204.
- Leclaire, F., Bourgoïn, Y., Ong, R., & Racinais, J. (2017). Application of Controlled Modulus Columns for Refinery and Petrochemical Tank Farm. *Journal of Earth Engineering (JEE)*, 2(1), 13–26.

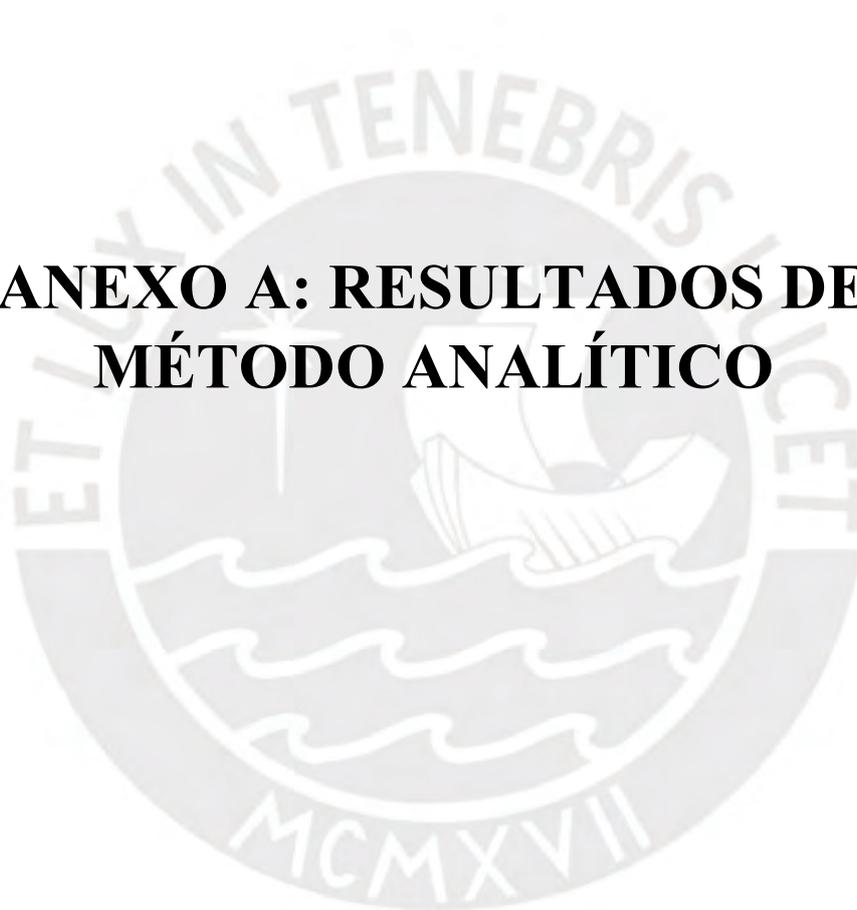
- Mánica Malcom, M. Á. (2013). COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE INCLUSIONES RÍGIDAS.
- Masse, F., Carey, M., & Ingram, I. (2011). Controlled Modulus Columns (CMC): Application to the support of Mechanically Stabilized Earth Walls (MSE Walls). 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, 1–10.
- Masse, F., Parinella, C., & Wyman, R. (2011). Redevelopment of Brownfield sites using Controlled Modulus Columns as an alternate to Deep Foundations. 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, 1–9.
- Masse, F., Pearlman, S. L., Taube, M. G., & MENARD. (2009). Controlled Modulus Columns™ (CMC) for Support of Above-Ground Storage Tanks.
- MENARD. (2016a). Columnas de Módulo Controlado.
- MENARD. (2016b). MANUAL DE DIMENSIONADO Y EJECUCIÓN TRATAMIENTO DE MEJORA Y/O REFUERZO DEL TERRENO MEDIANTE COLUMNAS DE MORTERO O MÓDULO CONTROLADO (CMC).
- Montejano, J. C., & Pérez Rodríguez, T. (2012). Columnas de Módulo Controlado (CMC): una alternativa atractiva frente a las cimentaciones. 9° SIMPOSIO NACIONAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA, CIMENTACIONES Y EXCAVACIONES PROFUNDAS, 125–138.
- Pearlman, S. L. (2012). Controlled Modulus Columns: Innovation in Ground Improvement. PEOPLE, PROJECTS AND EQUIPMENT, DEEP FOUNDATIONS, 73–75.
- Plomteux, C., & Lazacedieu, M. (2007). Embankment Construction on Extremely Soft Soils using Controlled Modulus Columns for Highway 2000 Project in Jamaica. Proceedings of the 16 Th Southeast Asian Geotechnical ..., 1–7.
- Plomteux, C., & Liausu, P. (2007). Use of controlled modulus columns for ground improvement in restricted areas: Utilisation des colonnes a module controle pour les renforcements de sol en milieux restreints. Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 3, 1521–1526.

- Racinais, J., & Plomteux, C. (2011). Design of slab-on-grades supported with soil reinforced by rigid inclusions. *Geotechnical Engineering: New Horizons: Proceedings of the 21st European Young Geotechnical Engineers' Conference*, Rotterdam 2011.
- Rodríguez Rebolledo, J. F. (2010). MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES E INCLUSIONES SOMETIDOS A CONSOLIDACIÓN REGIONAL, EN LA ZONA LACUSTRE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.
- Schaefer, V. R., Berg, R. R., Collin, J. G., Christopher, B. R., DiMaggio, J. A., Filz, G. M., Bruce, D. A., & Ayala, D. (2017). *Ground Modification Methods Reference Manual - Volume I [FHWA-NHI-16-027]*. *Geotechnical Engineering Circular No. 13, I(132034)*, 386.
- Tan, S. A., Tjahjono, S., & Oo, K. K. (2008). Simplified Plane-Strain Modeling of Stone-Column Reinforced Ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 185–194. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412008134:2185>
- Taube, M., & Masse, F. (2010). Supporting tanks with controlled modulus columns. *TANK STORAGE, GROUND PREPARATION*, 76–78.
- Valiente Sanz, R. (2018). ANÁLISIS DE CIMENTACIÓN EN EDIFICIO DE VIVIENDAS EN SUELOS COMPRESIBLES: COMPLEJO RESIDENCIAL “PUERTA DE DOLORES” DOLORES (ALICANTE).
- Varaksin, S., Meltz, A., & Yee, K. (2011). APPLICATION OF CONSOLIDATION ACCELERATION COMBINED WITH RIGID INCLUSIONS (CMC) FOR A SHIPYARD FOUNDATION ON DEEP VERY SOFT CLAY. *Proceedings of the Third International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation 2011 (GEDMAR 2011)*, 183–190. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Verbrugge, J.-C., & Schroeder, C. (2018). Geotechnical correlations for soils and rocks.
- Walker, M., Masse, F., & Swift, S. (2011). Controlled Modulus Columns: An attractive Alternative. *STRUCTURE Magazine*, 13–15.



ANEXOS

**ANEXO A: RESULTADOS DE
MÉTODO ANALÍTICO**



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.00 \text{ m}$, $h_r = 0.30 \text{ m}$

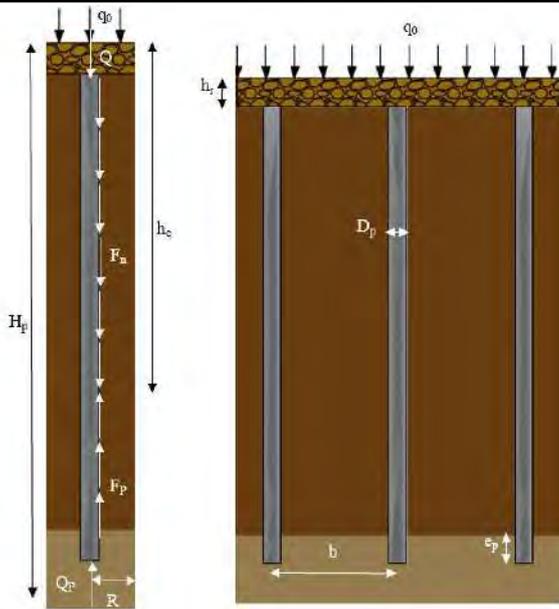
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.00
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	1.00
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	0.5642
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.30	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	6.30	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	0.85
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	6.30	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	320.26
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	22.64

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.30	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.30	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

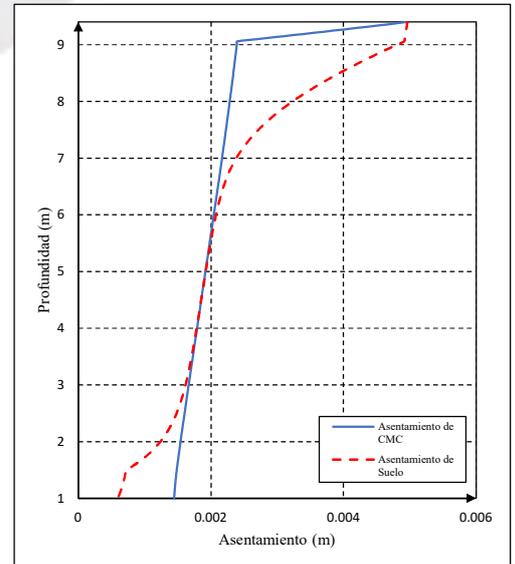
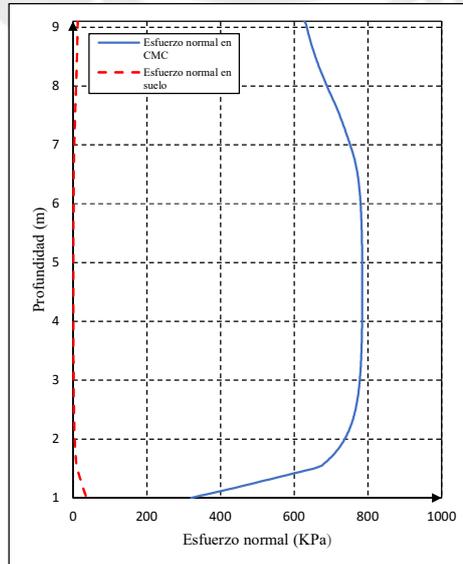
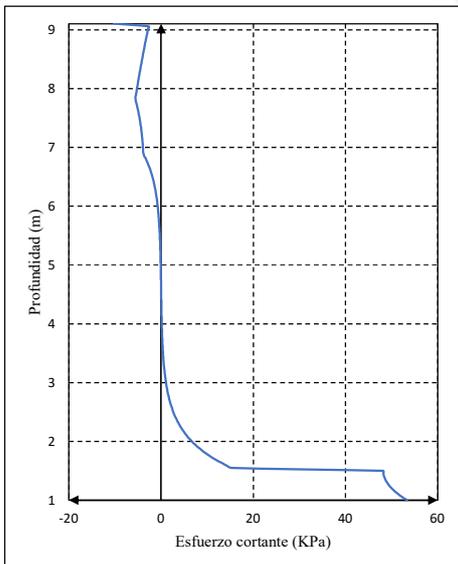
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	19.04
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	167.06
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	10.80
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	32.82
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	5.29
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	44.65
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	55.46
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	22.64
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	8.33
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	33.66
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	4.96
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	4.96
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.40 \text{ m}$, $h_r = 0.30 \text{ m}$

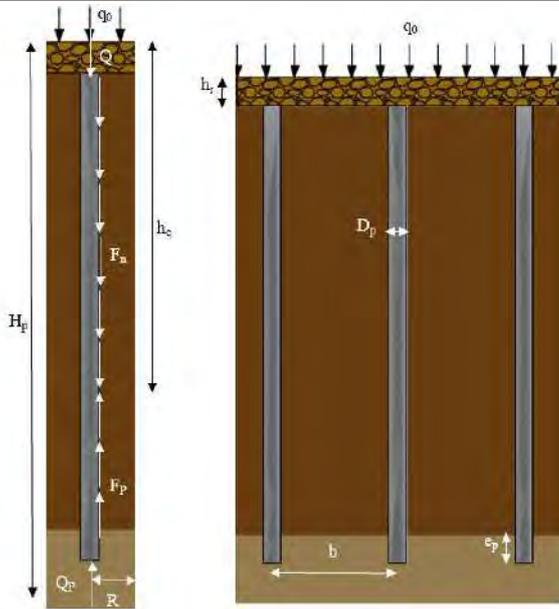
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.40
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	1.96
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	0.7899
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.30	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	6.30	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	1.54
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	12.35	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	578.03
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	40.86

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.30	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.30	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

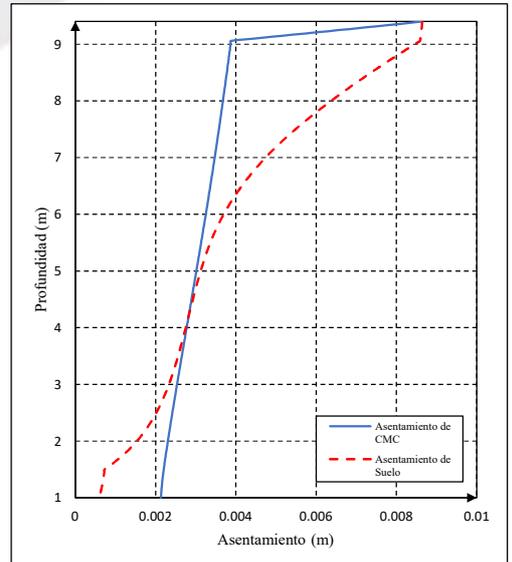
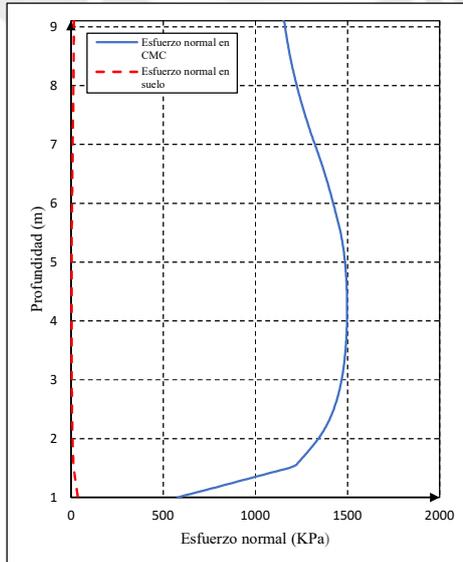
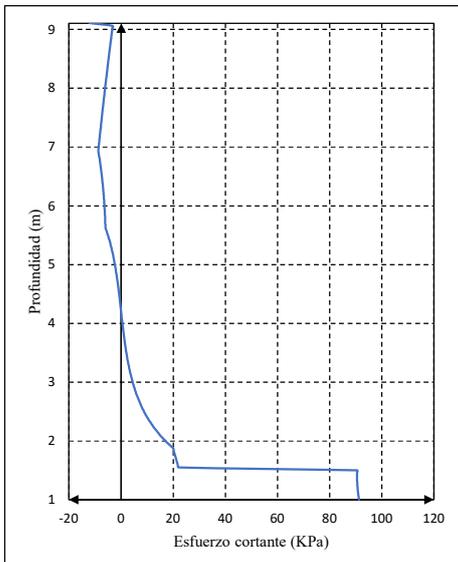
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	37.53
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	143.77
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	24.00
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	65.01
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	5.71
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	81.86
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	105.87
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	40.86
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	19.61
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	69.49
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	8.64
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	8.64
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.80 \text{ m}$, $h_r = 0.30 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000

DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.80
A :	Área de una malla (m^2)	3.24
R :	Radio equivalente de celda (m)	1.0155

LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS

q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	2.81
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1057.65
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	74.76

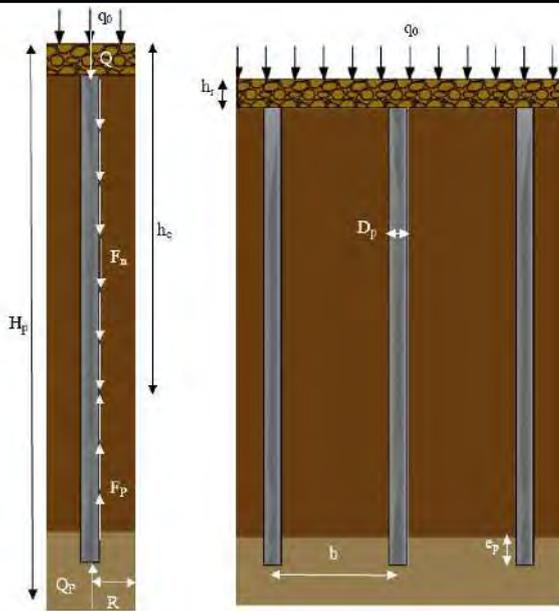
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO

h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.30
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	6.30
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	20.41
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

PERFIL ESTRATIGRAFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_τ	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.30	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.30	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

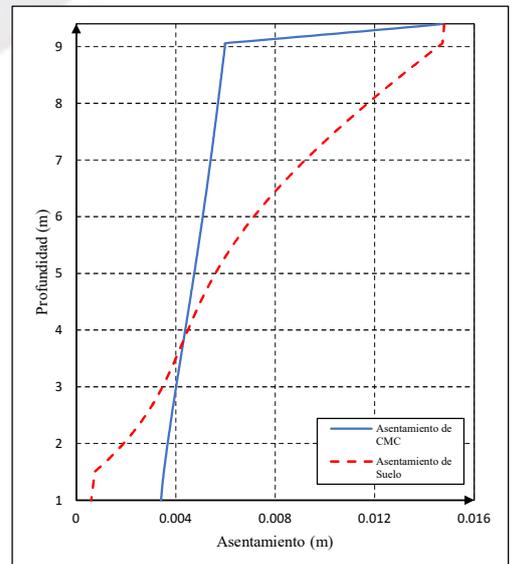
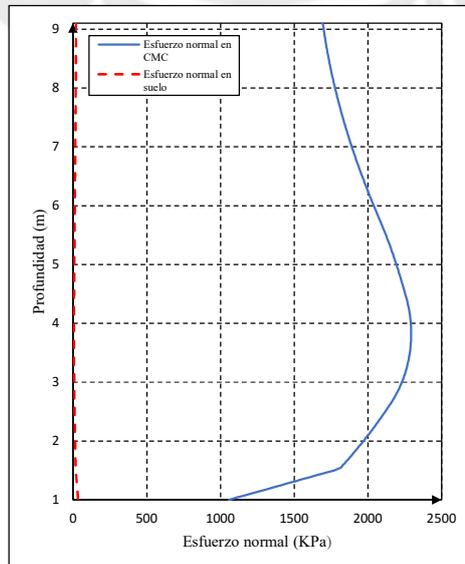
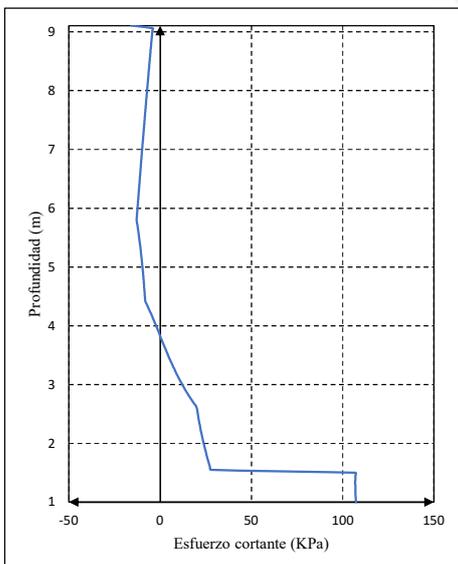
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	40.59
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	116.64
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	42.19
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	87.32
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.09
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	119.89
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	74.76
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	46.65
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	107.65
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	14.79
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	14.80
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	-0.01

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 2.20 \text{ m}$, $h_r = 0.30 \text{ m}$

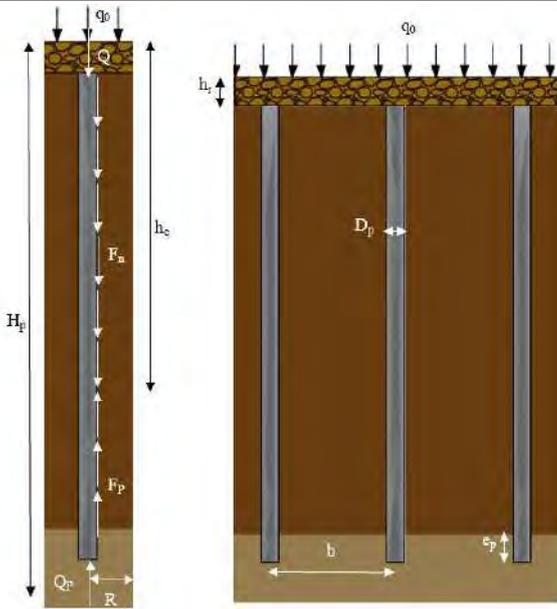
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	2.20
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	4.84
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	1.2412
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.30	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	6.30	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	3.95
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	30.49	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1484.30
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	104.92

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.30	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.30	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

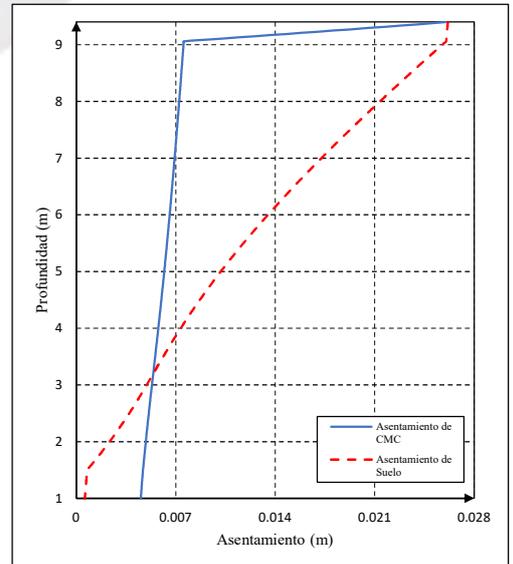
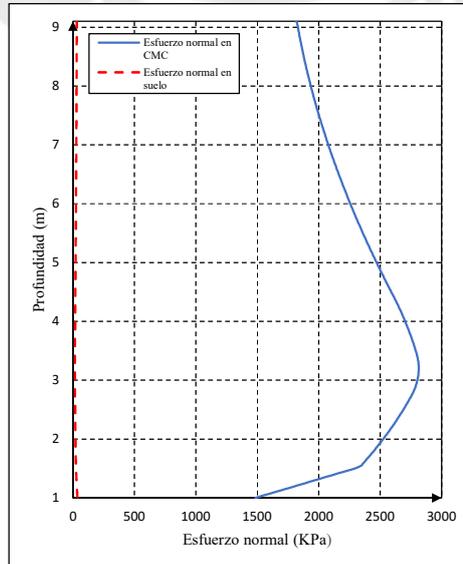
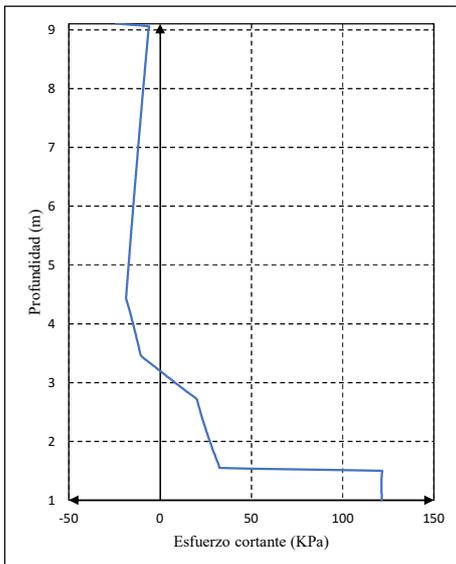
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	17.19
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	66.91
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	69.83
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	93.91
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.72
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	129.00
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	198.83
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	104.92
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	119.89
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	167.57
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	26.14
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	26.15
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	-0.01

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 2.60 \text{ m}$, $h_r = 0.30 \text{ m}$

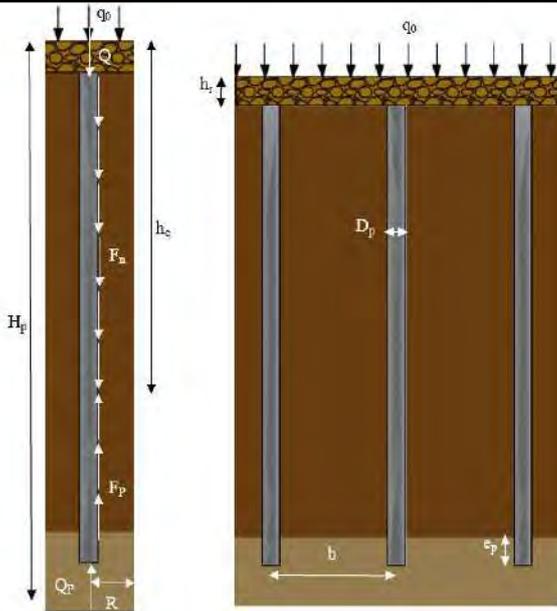
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	2.60
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	6.76
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	1.4669
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.30	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	6.30	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	4.74
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	42.59	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1783.56
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	126.07

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.30	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.30	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

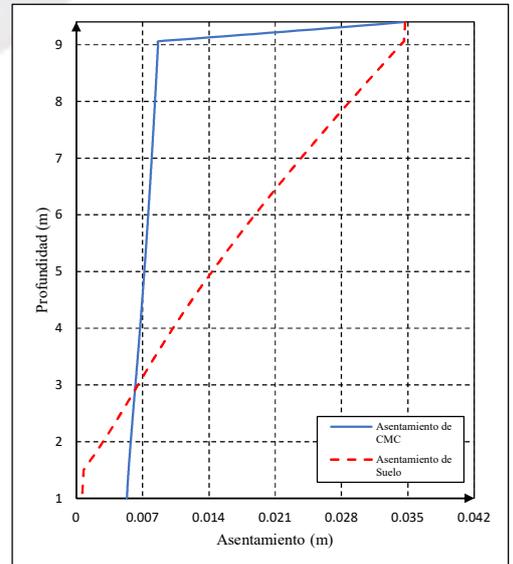
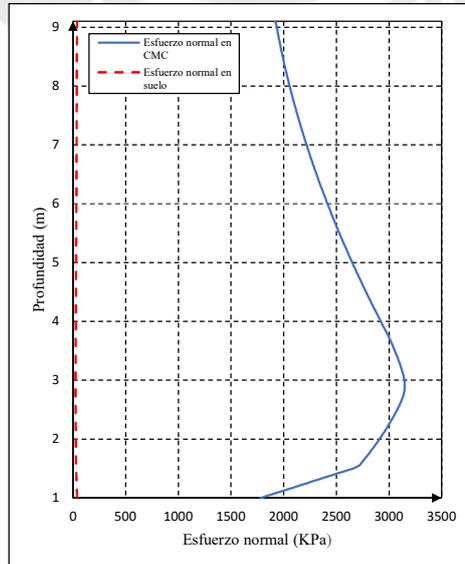
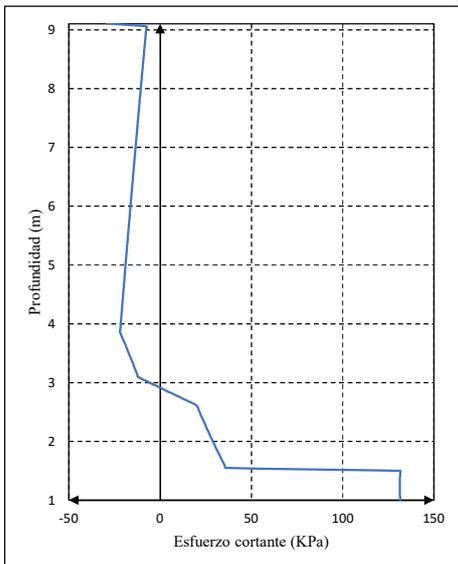
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	1.86
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	40.00
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	86.33
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	96.52
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	7.01
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	136.26
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	222.59
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	126.07
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	210.06
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	254.52
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	34.73
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	34.73
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 3.00 \text{ m}$, $h_r = 0.30 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO		
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.30
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	6.30
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	56.70
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

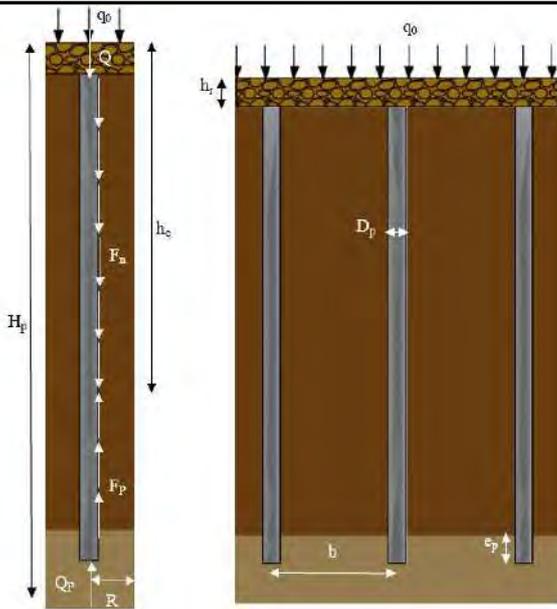
DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	3.00
A :	Área de una malla (m^2)	9.00
R :	Radio equivalente de celda (m)	1.6926
LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_1 :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	5.26
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1976.39
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	139.70

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.30	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.30	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

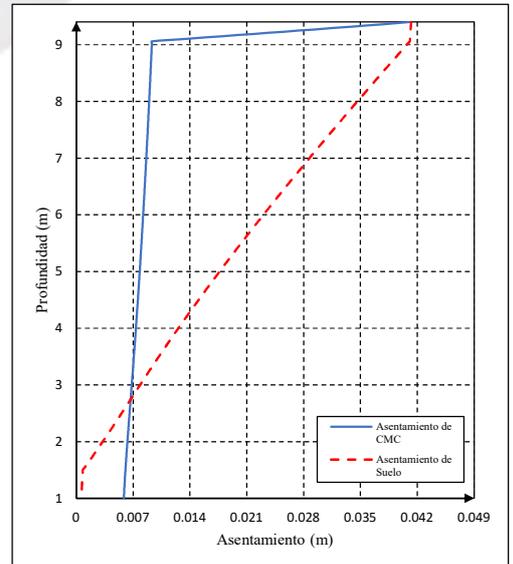
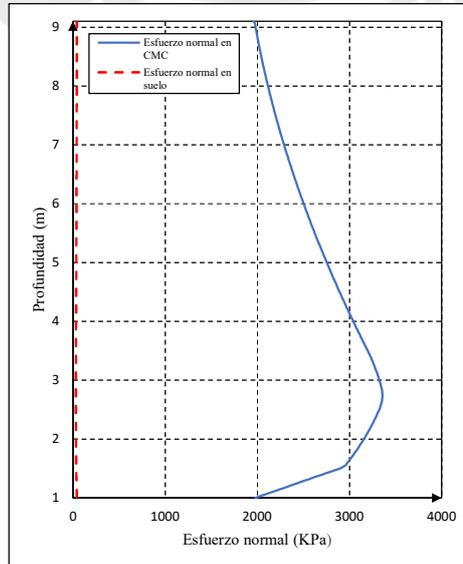
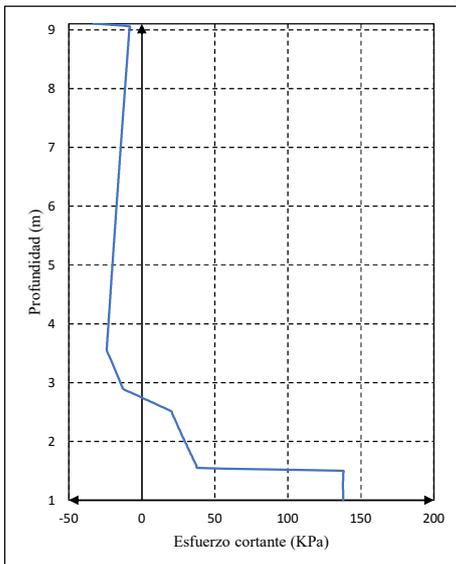
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	9.59
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	20.78
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	97.75
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	97.54
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	7.18
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	139.49
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	237.24
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	139.70
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	319.88
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	367.00
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	41.20
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	41.24
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	-0.04

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.00 \text{ m}$, $h_r = 0.40 \text{ m}$

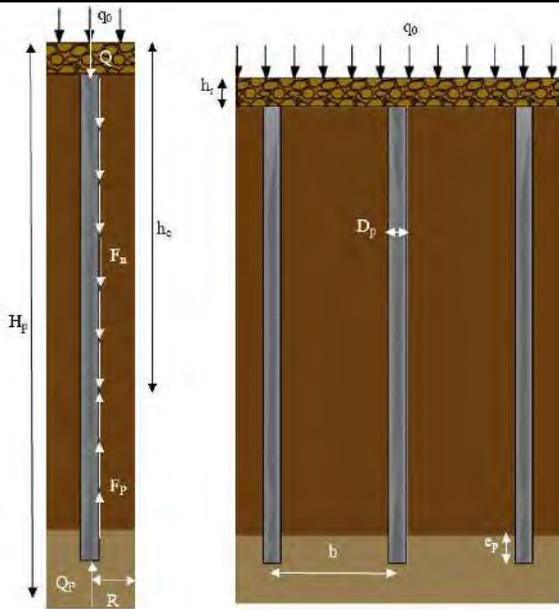
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.00
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	1.00
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	0.5642
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.40	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	8.40	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	0.88
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	8.40	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	332.20
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	23.48

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.40	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.40	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

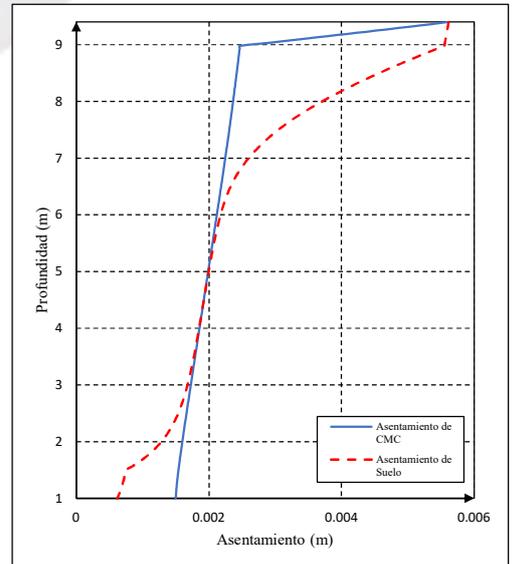
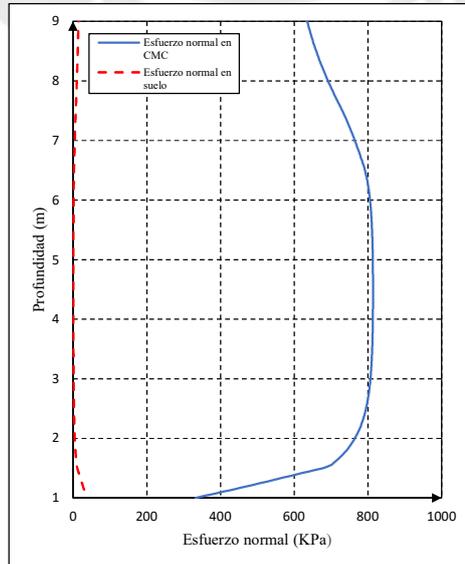
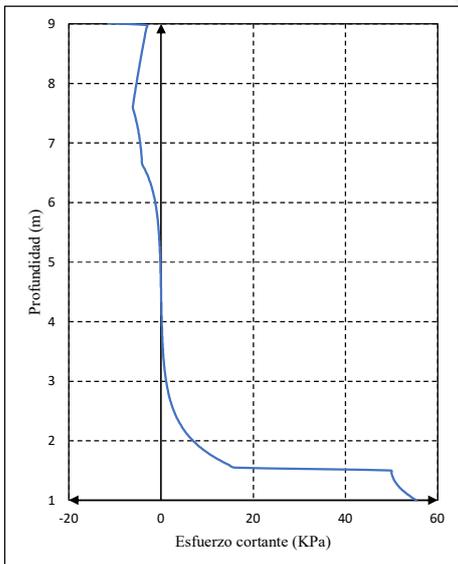
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	17.34
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	160.07
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	12.54
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	34.03
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	5.41
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	44.97
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	57.51
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	23.48
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	9.18
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	34.92
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	5.61
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	5.61
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.40 \text{ m}$, $h_r = 0.40 \text{ m}$

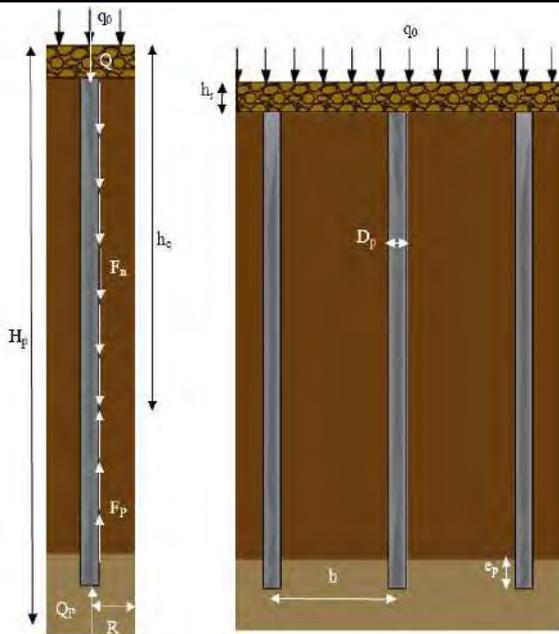
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.40
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	1.96
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	0.7899
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.40	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	8.40	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	1.63
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	16.46	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	611.89
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	43.25

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.40	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.40	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

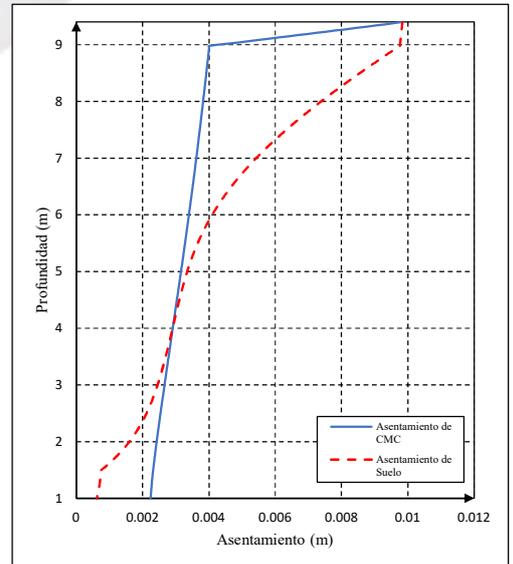
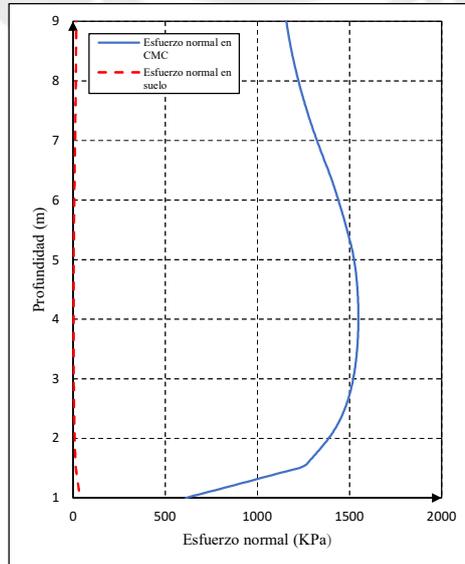
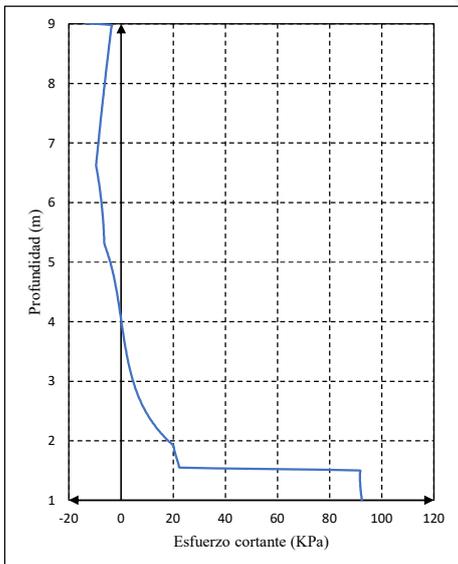
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	33.82
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	133.92
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	27.55
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	66.16
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	5.83
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	81.86
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	109.41
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	43.25
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	20.92
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	71.21
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	9.84
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	9.84
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.01

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.80 \text{ m}$, $h_r = 0.40 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000

DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.80
A :	Área de una malla (m^2)	3.24
R :	Radio equivalente de celda (m)	1.0155

LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS

q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	2.93
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1103.07
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	77.97

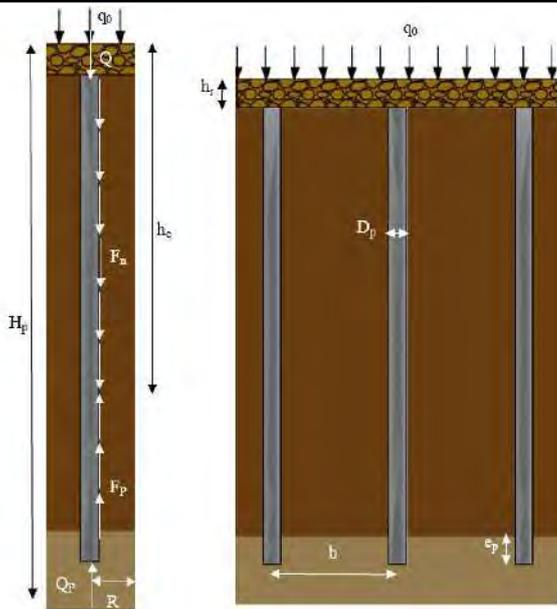
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO

h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.40
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	8.40
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	27.22
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.40	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.40	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

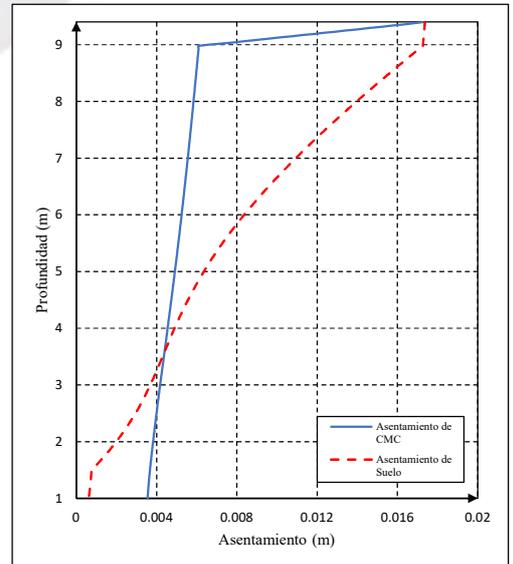
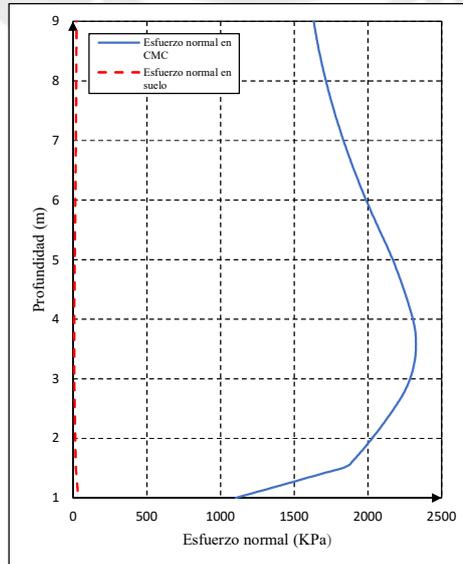
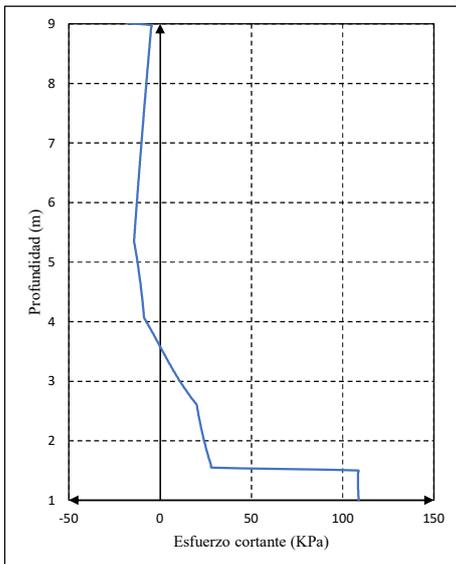
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	30.96
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	99.39
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	48.95
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	86.44
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.30
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	115.46
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	164.41
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	77.97
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	53.07
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	111.24
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	17.36
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	17.37
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	-0.01

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 2.20 \text{ m}$, $h_r = 0.40 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000

DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	2.20
A :	Área de una malla (m^2)	4.84
R :	Radio equivalente de celda (m)	1.2412

LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS

q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	4.06
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1528.07
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	108.01

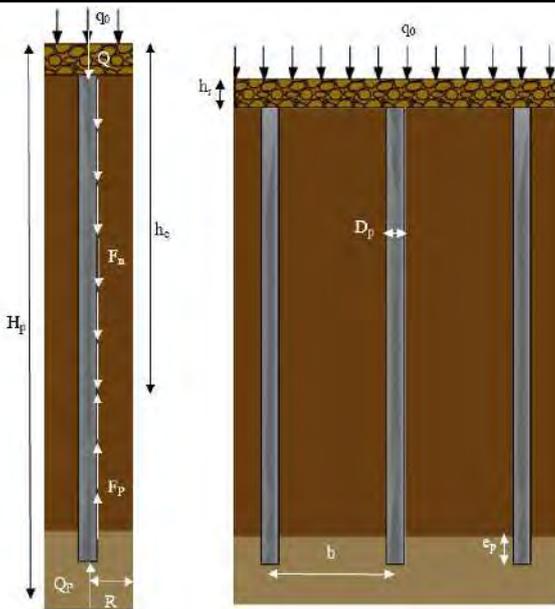
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO

h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.40
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	8.40
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	40.66
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_r	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.40	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.40	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

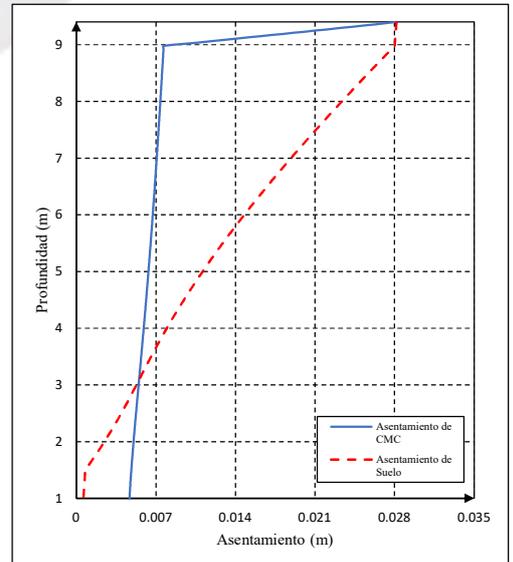
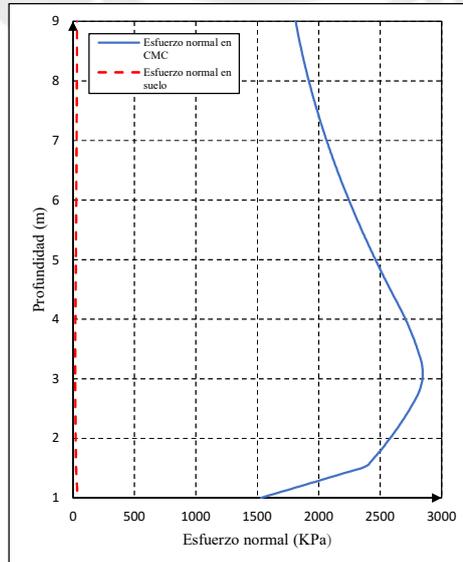
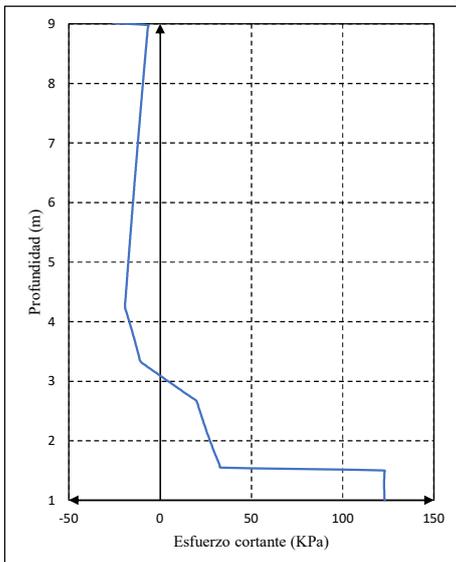
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	11.00
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	57.04
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	72.98
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	93.13
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.80
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	128.17
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	201.15
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	108.01
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	122.99
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	174.64
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	28.17
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	28.17
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 2.60 \text{ m}$, $h_r = 0.40 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000

DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	2.60
A :	Área de una malla (m^2)	6.76
R :	Radio equivalente de celda (m)	1.4669

LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS

q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	4.87
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1832.20
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	129.51

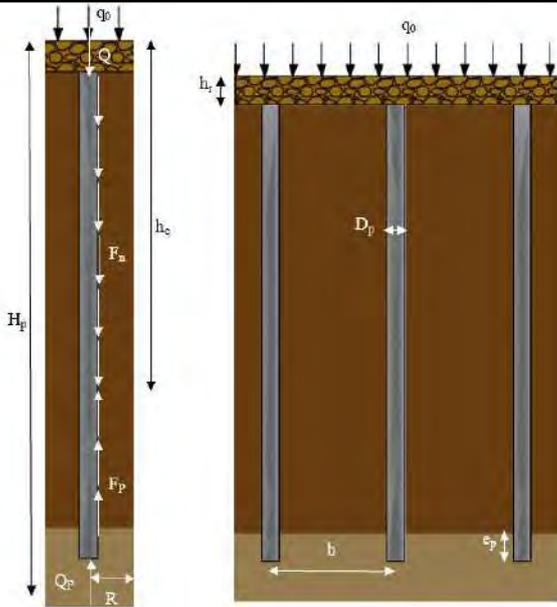
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO

h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.40
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	8.40
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	56.78
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.40	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.40	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

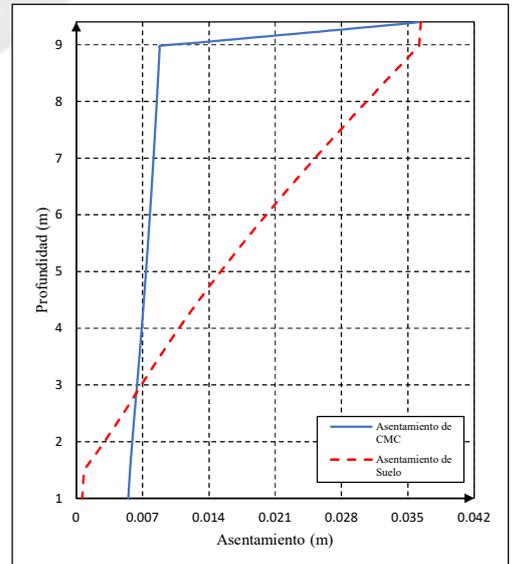
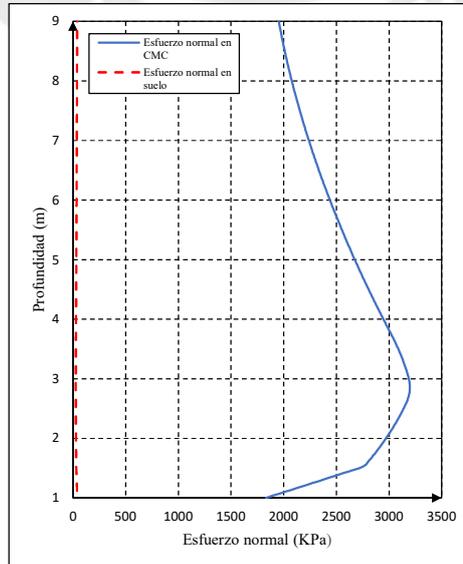
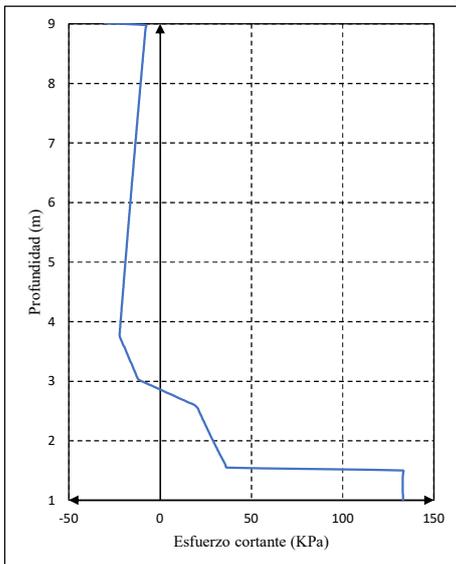
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	2.12
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	35.30
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	87.81
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	96.51
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	7.01
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	138.21
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	226.02
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	129.51
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	210.61
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	265.27
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	36.41
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	36.38
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.04

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 3.00 \text{ m}$, $h_r = 0.40 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO		
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.40
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	8.40
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	75.60
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

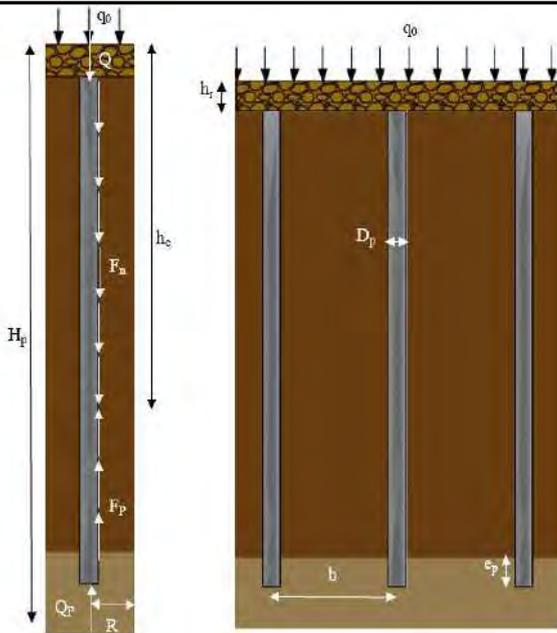
DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	3.00
A :	Área de una malla (m^2)	9.00
R :	Radio equivalente de celda (m)	1.6926
LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	5.35
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	2010.73
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	142.13

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.40	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.40	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

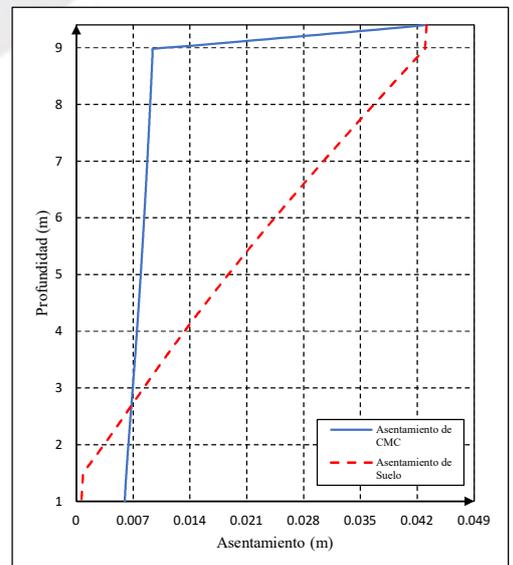
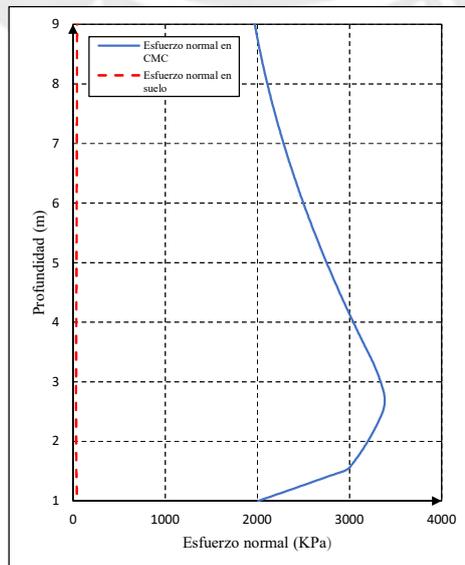
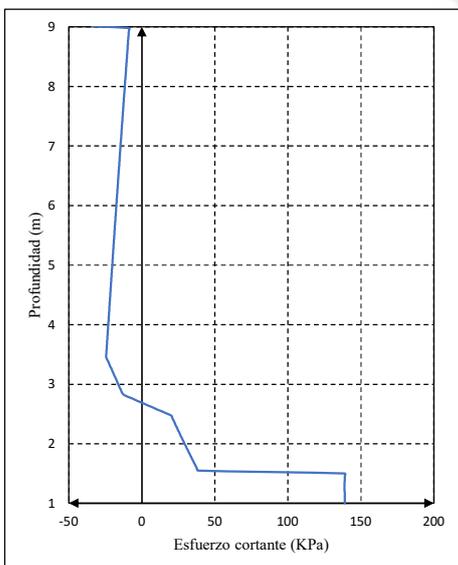
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	14.81
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	16.48
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	99.56
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	96.96
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	7.18
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	139.53
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	239.09
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	142.13
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	322.68
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	383.47
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	43.18
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	43.16
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.03

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.00 \text{ m}$, $h_r = 0.50 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000

DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.00
A :	Área de una malla (m^2)	1.00
R :	Radio equivalente de celda (m)	0.5642

LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS

q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	0.92
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	344.15
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	24.33

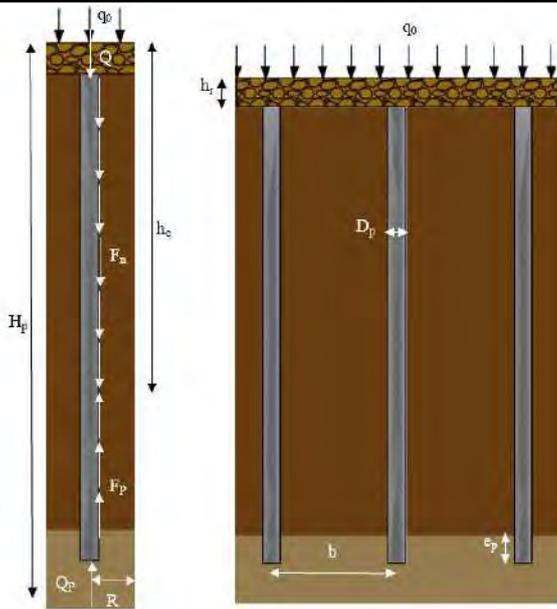
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO

h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.50
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	10.50
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	10.50
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.50	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.50	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

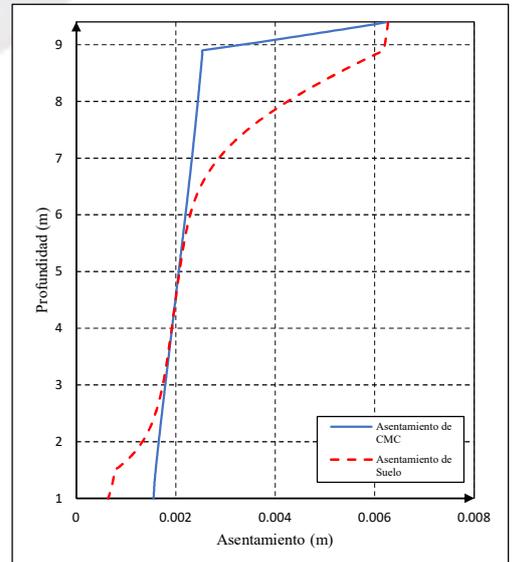
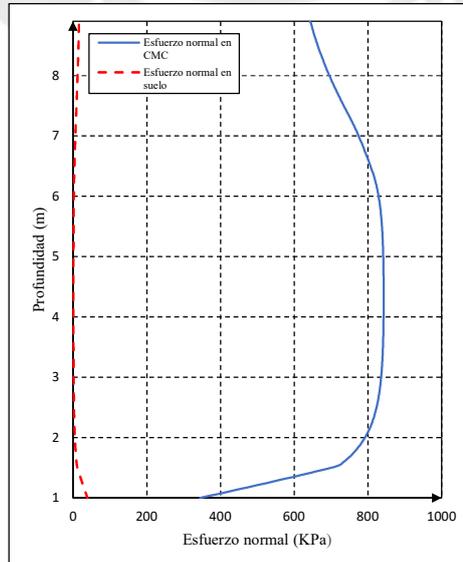
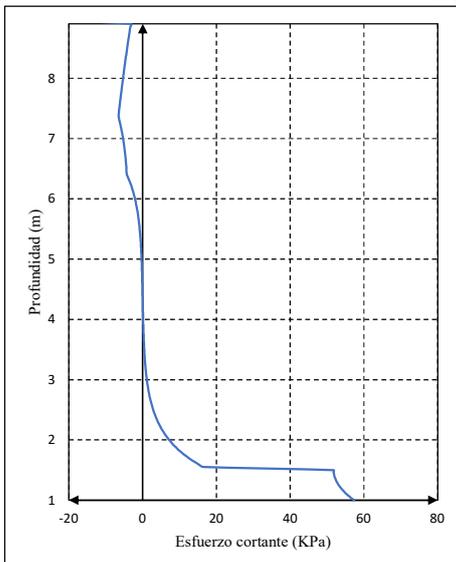
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	15.75
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	153.57
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	14.11
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	35.23
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	5.54
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	45.45
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	59.56
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	24.33
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	9.93
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	36.17
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	6.27
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	6.27
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.40 \text{ m}$, $h_r = 0.50 \text{ m}$

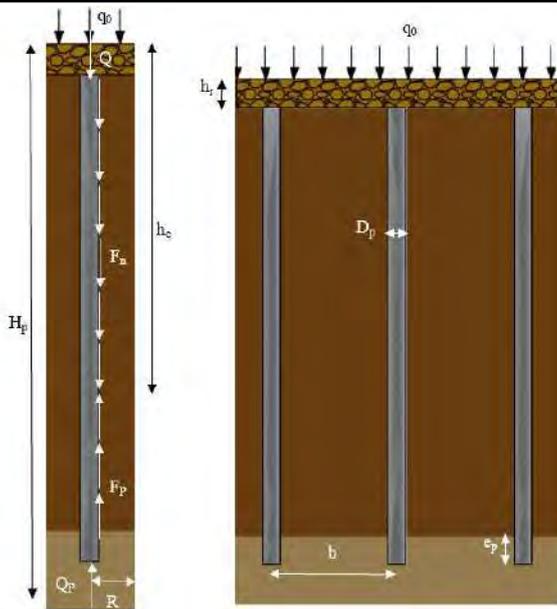
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.40
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	1.96
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	0.7899
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.50	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	10.50	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	1.72
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	20.58	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	645.84
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	45.65

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.50	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.50	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

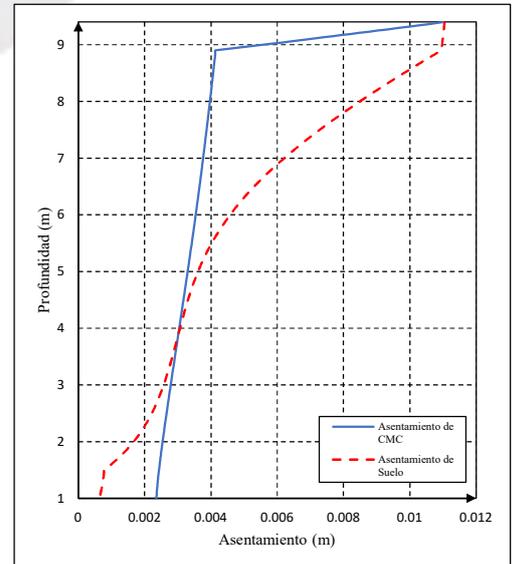
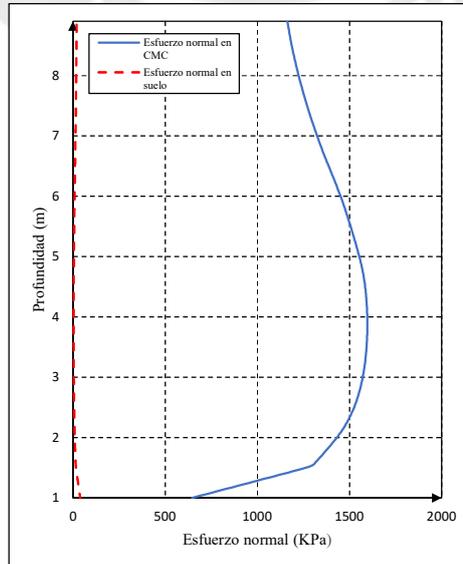
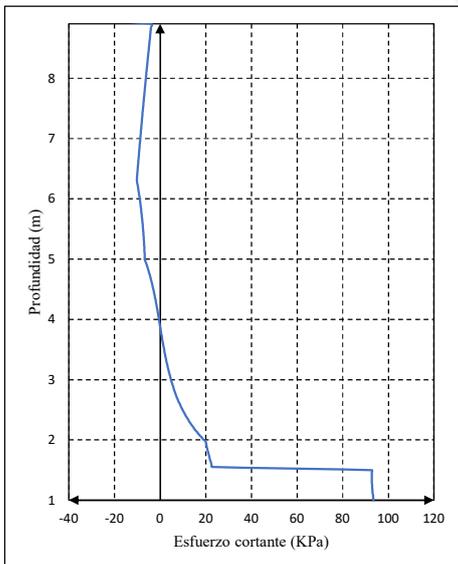
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	30.33
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	124.21
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	30.70
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	67.19
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.00
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	82.15
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	112.84
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	45.65
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	22.02
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	72.93
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	11.05
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	11.05
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.80 \text{ m}$, $h_r = 0.50 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000

DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.80
A :	Área de una malla (m^2)	3.24
R :	Radio equivalente de celda (m)	1.0155

LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS

q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	3.05
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1145.48
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	80.97

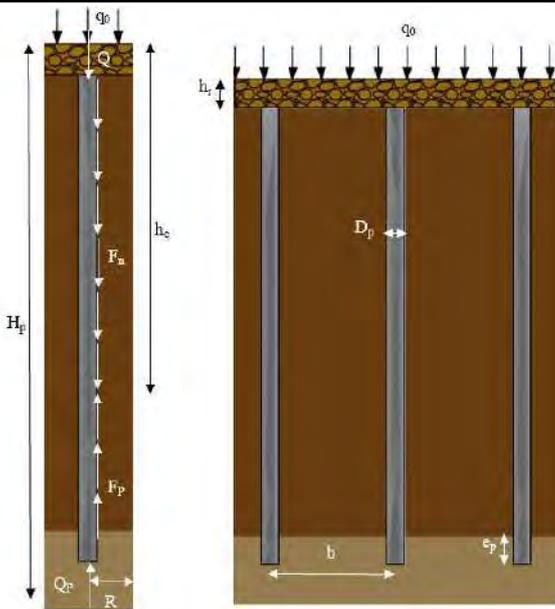
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO

h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.50
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	10.50
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	34.02
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

PERFIL ESTRATIGRAFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.50	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.50	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

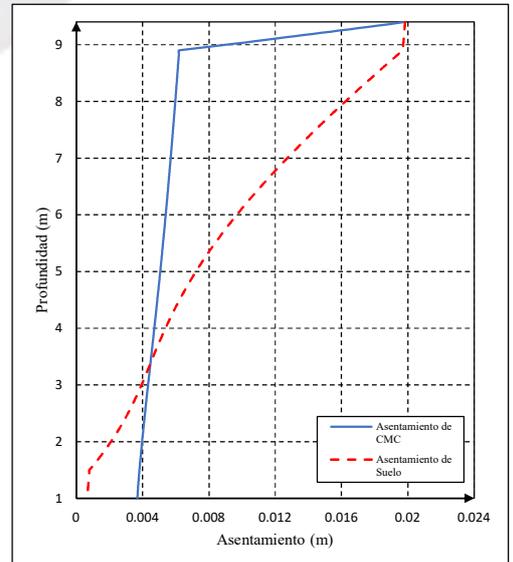
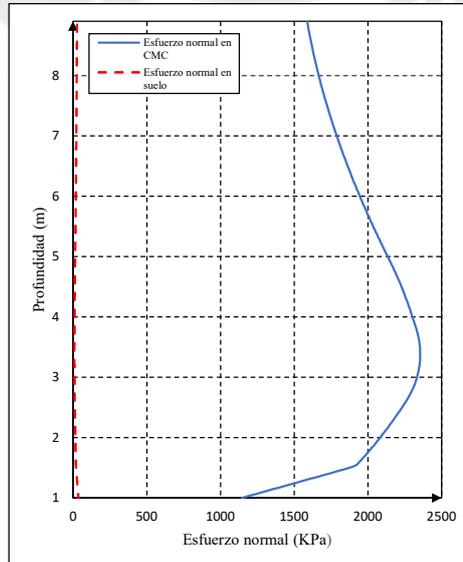
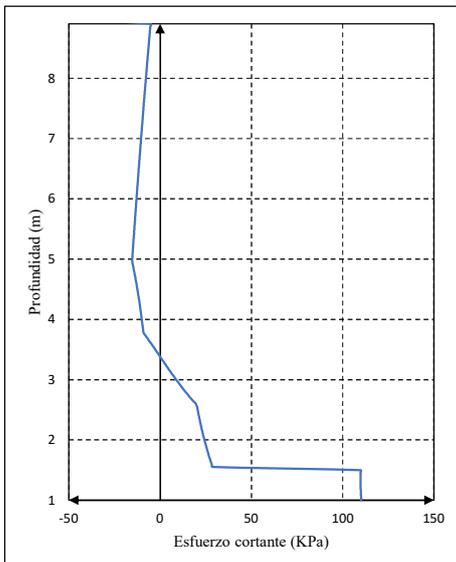
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	22.57
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	85.73
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	54.25
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	85.44
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.51
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	112.16
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	166.41
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	80.97
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	58.46
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	115.05
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	19.83
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	19.83
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 2.20 \text{ m}$, $h_r = 0.50 \text{ m}$

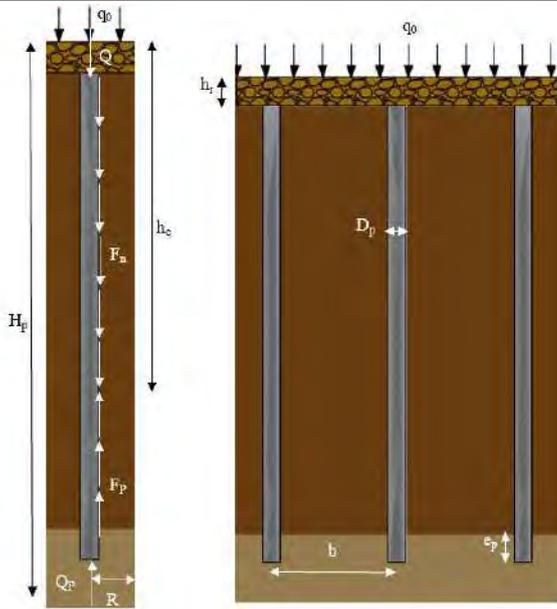
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	2.20
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	4.84
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	1.2412
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.50	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	10.50	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	4.18
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	50.82	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1570.70
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	111.03

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_r	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.50	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.50	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

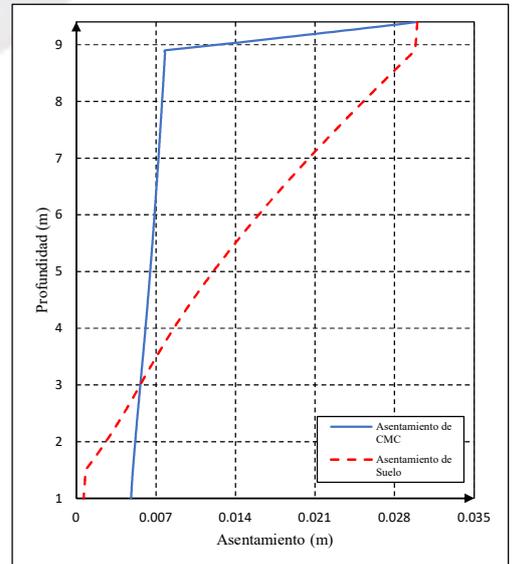
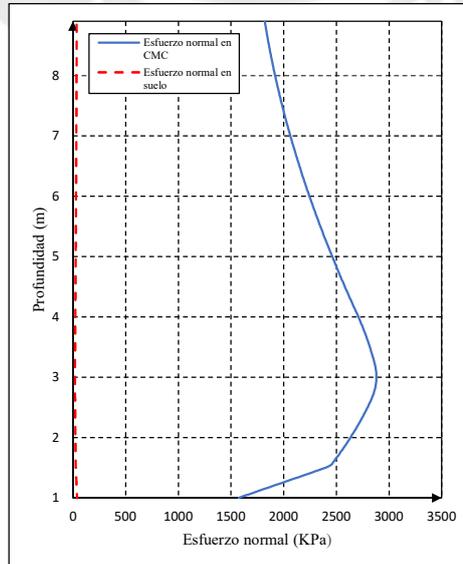
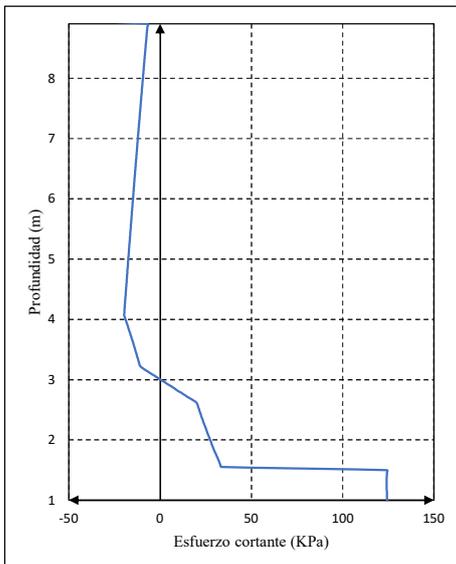
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	6.19
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	51.23
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	74.95
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	92.53
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.88
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	128.61
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	203.56
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	111.03
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	124.78
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	181.79
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	30.01
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	30.00
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.01

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 2.60 \text{ m}$, $h_r = 0.50 \text{ m}$

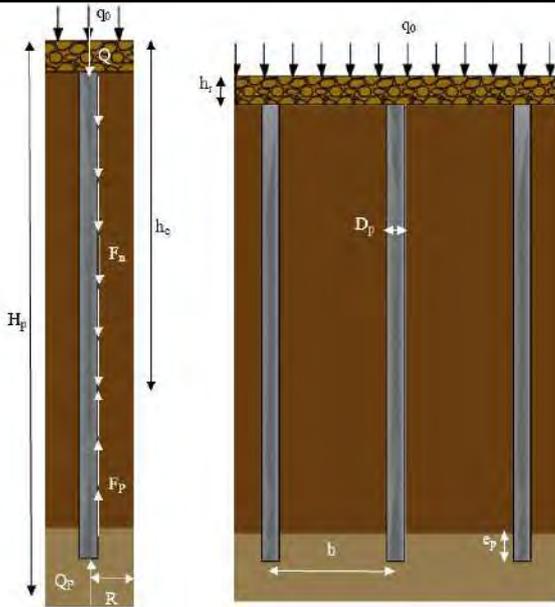
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO			
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)		2.60
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)		6.76
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)		1.4669
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS			
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)		5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao		4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)		6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.50	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)		39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	10.50	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)		4.98
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	70.98	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)		1872.83
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)		132.38

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.50	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.50	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

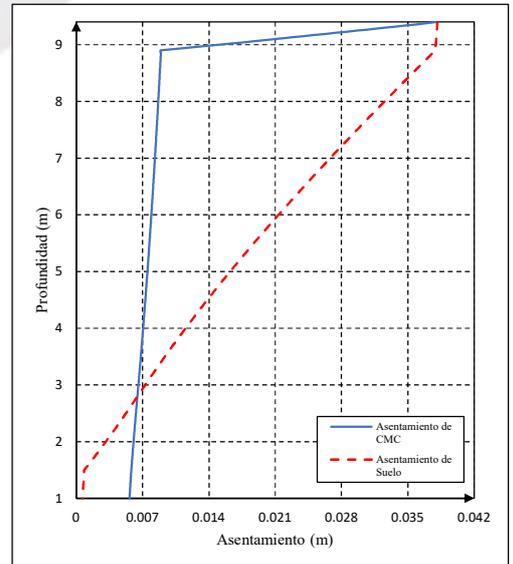
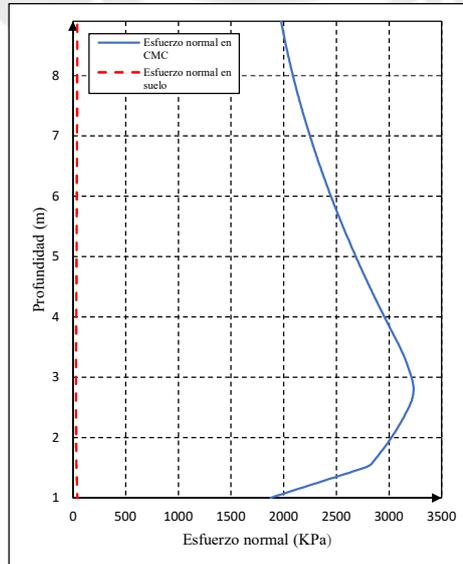
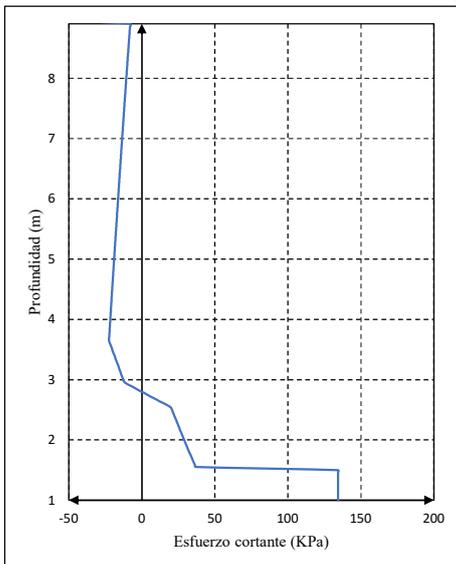
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	6.22
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	27.47
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	88.94
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	96.12
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	7.09
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	139.56
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	228.50
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	132.38
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	211.83
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	276.60
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	38.12
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	38.13
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	-0.01

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 3.00 \text{ m}$, $h_r = 0.50 \text{ m}$

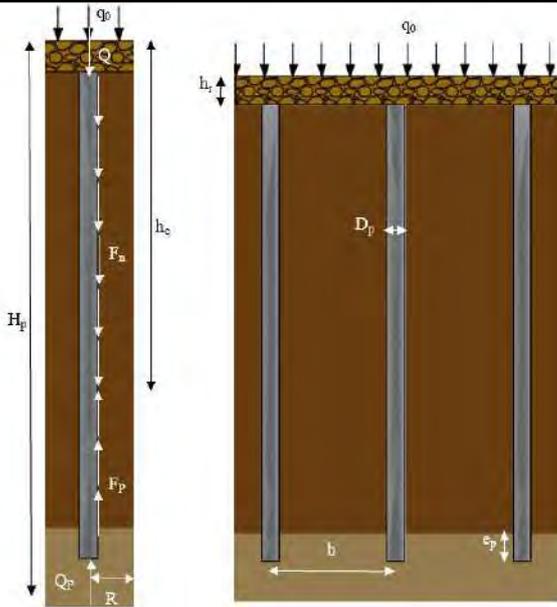
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	3.00
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	9.00
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	1.6926
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.50	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	10.50	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	5.42
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	94.50	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	2039.34
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	144.15

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.50	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.50	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

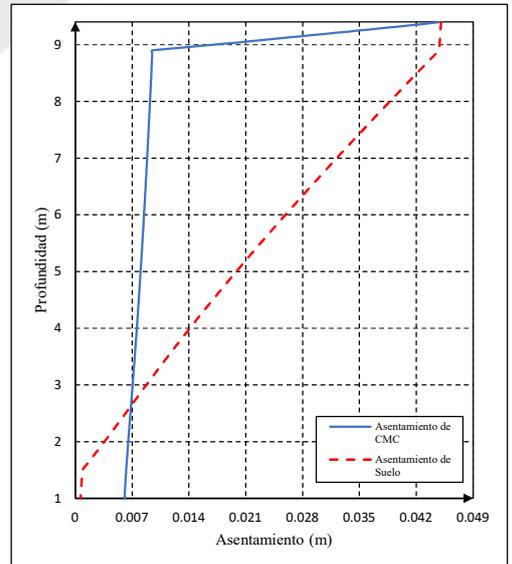
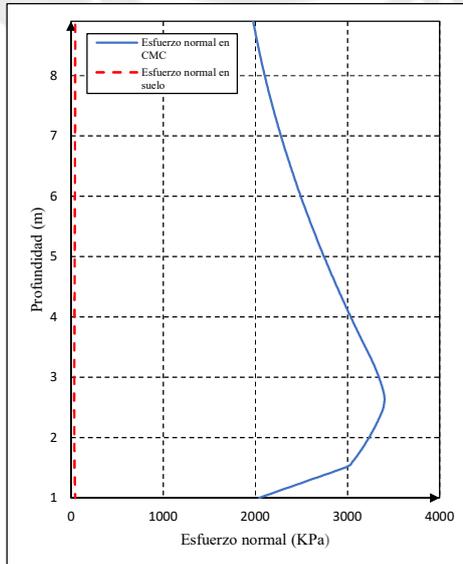
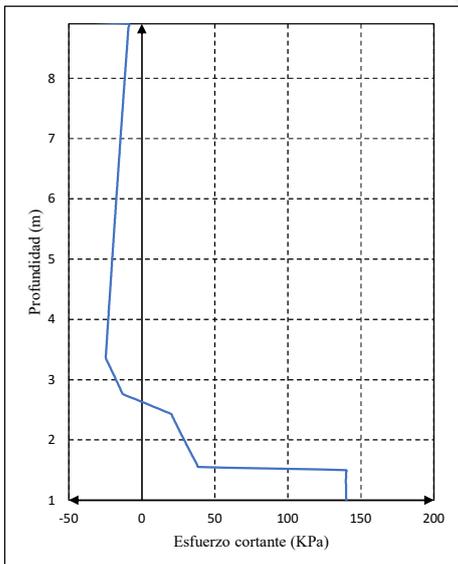
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	19.58
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	9.31
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	100.73
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	96.23
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	7.26
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	139.65
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	240.38
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	144.15
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	325.42
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	400.35
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	45.10
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	45.06
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.04

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.00 \text{ m}$, $h_r = 0.60 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000

DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.00
A :	Área de una malla (m^2)	1.00
R :	Radio equivalente de celda (m)	0.5642

LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS

q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	0.95
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	356.09
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	25.17

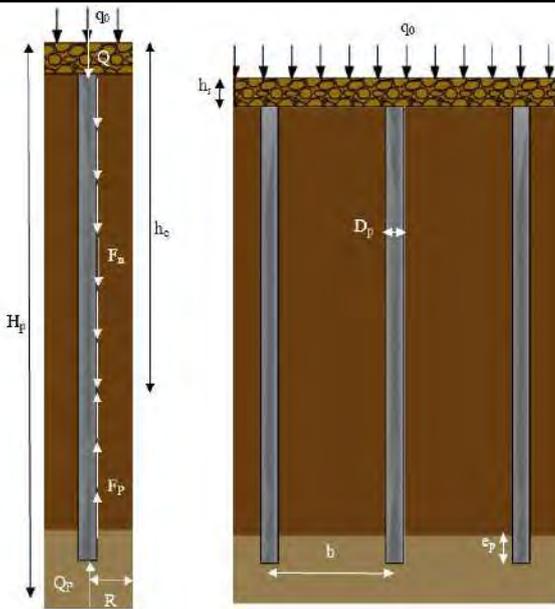
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO

h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.60
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	12.60
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	12.60
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.60	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.60	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

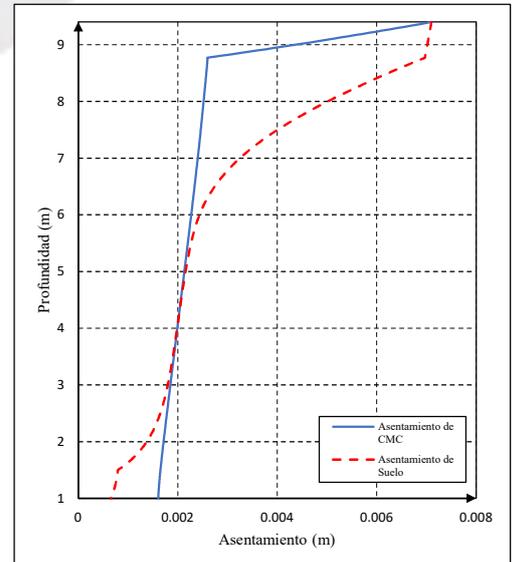
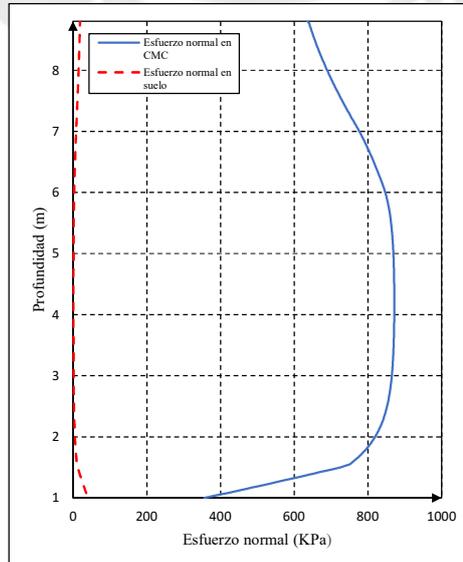
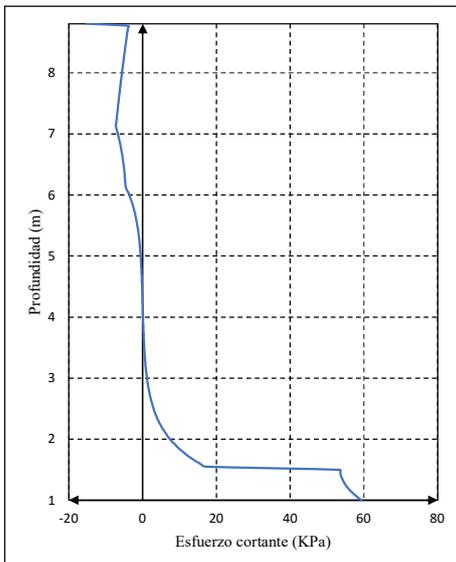
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	11.87
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	144.56
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	16.34
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	36.42
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	5.67
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	45.25
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	61.59
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	25.17
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	12.96
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	37.43
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	7.11
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	7.10
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.01

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.40 \text{ m}$, $h_r = 0.60 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000

DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.40
A :	Área de una malla (m^2)	1.96
R :	Radio equivalente de celda (m)	0.7899

LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS

q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	1.81
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	679.63
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	48.04

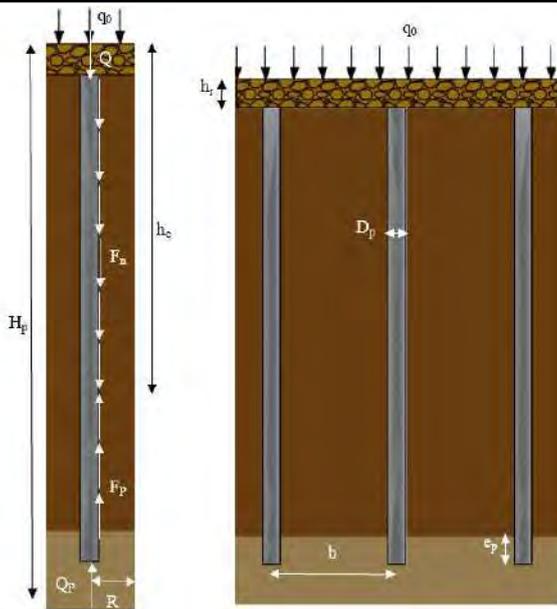
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO

h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.60
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	12.60
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	24.70
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.60	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.60	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

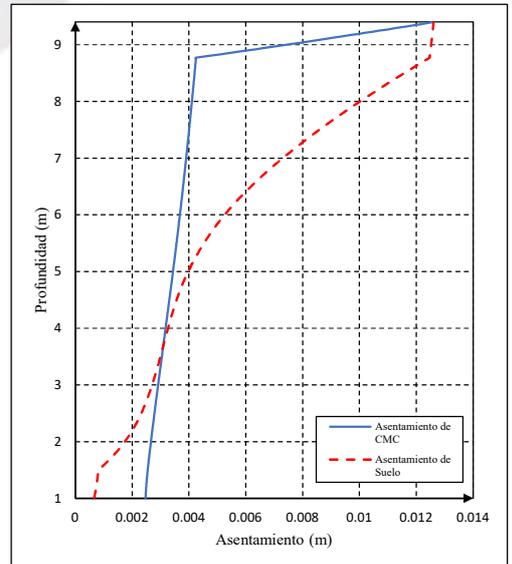
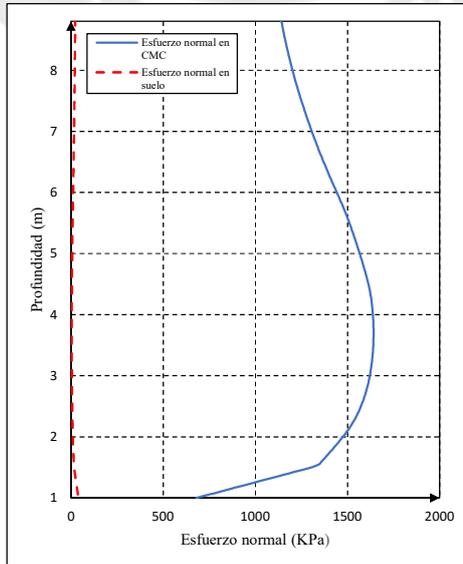
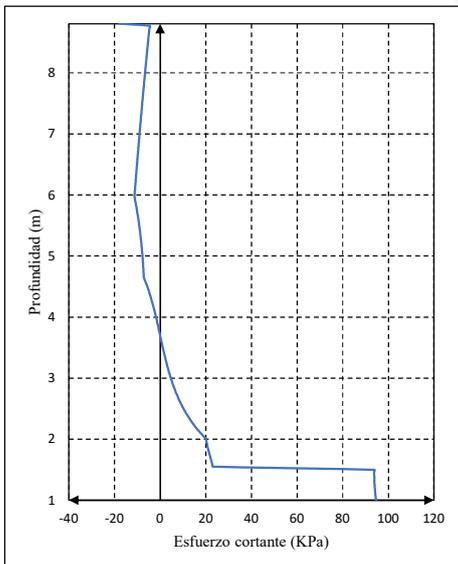
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	23.63
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	112.13
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	35.17
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	67.96
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.17
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	80.83
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	116.00
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	48.04
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	26.33
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	74.66
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	12.62
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	12.61
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.01

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 1.80 \text{ m}$, $h_r = 0.60 \text{ m}$

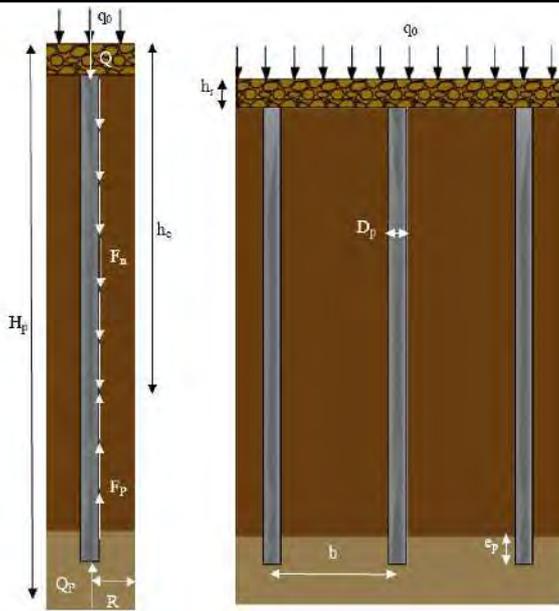
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	1.80
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	3.24
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	1.0155
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.60	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	12.60	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	3.16
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	40.82	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1186.75
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	83.89

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.60	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.60	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

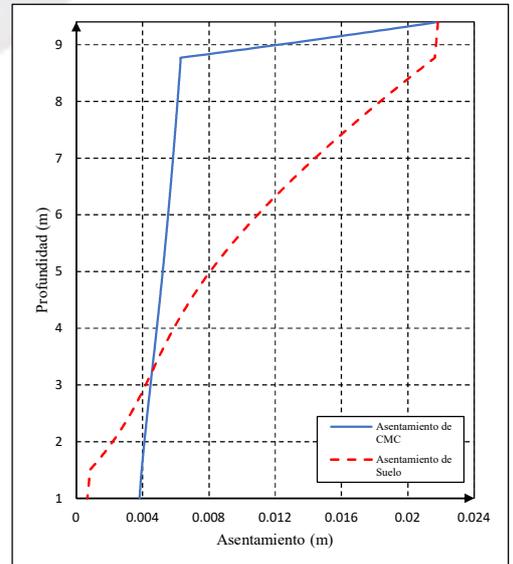
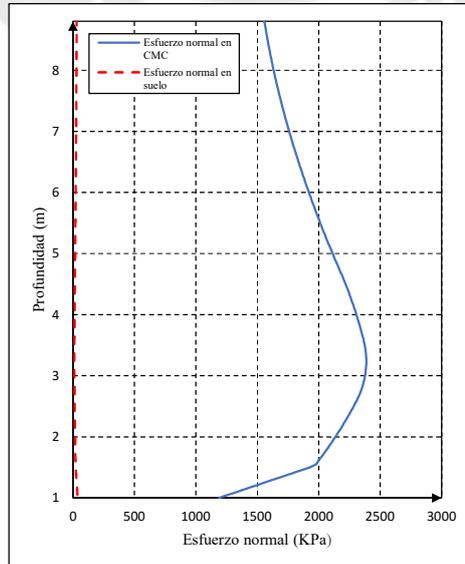
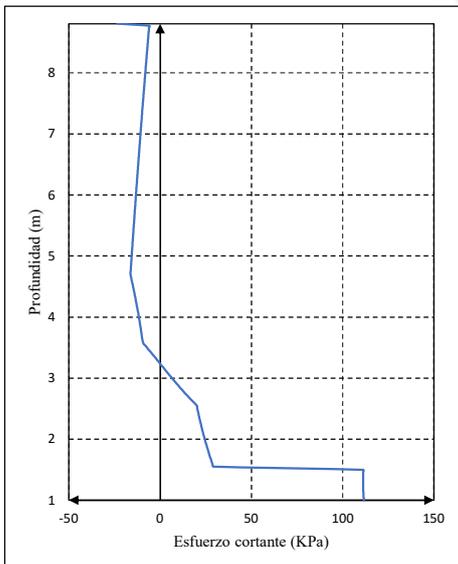
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	14.22
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	74.88
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	58.43
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	84.77
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.63
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	110.23
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	168.66
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	83.89
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	63.90
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	118.94
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	21.83
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	21.82
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.01

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 2.20 \text{ m}$, $h_r = 0.60 \text{ m}$

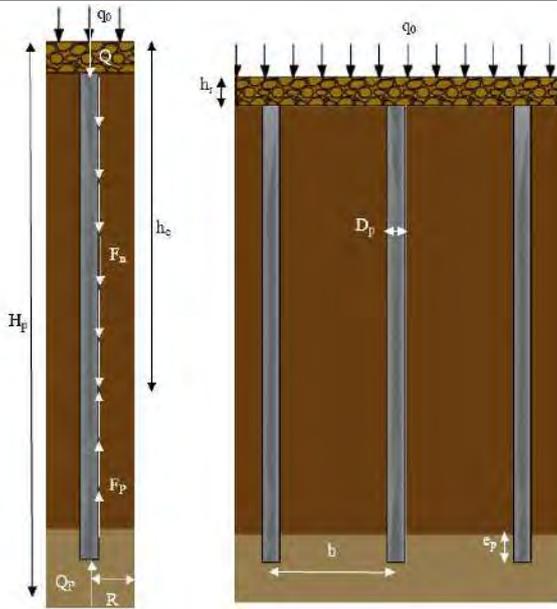
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	2.20
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	4.84
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	1.2412
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.60	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	12.60	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	4.30
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	60.98	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1617.05
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	114.30

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.60	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.60	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

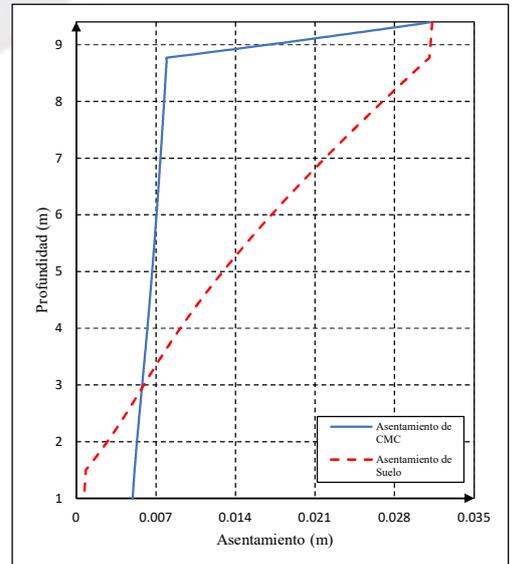
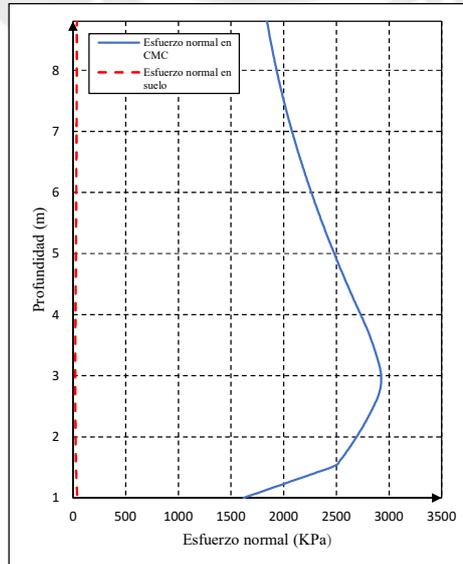
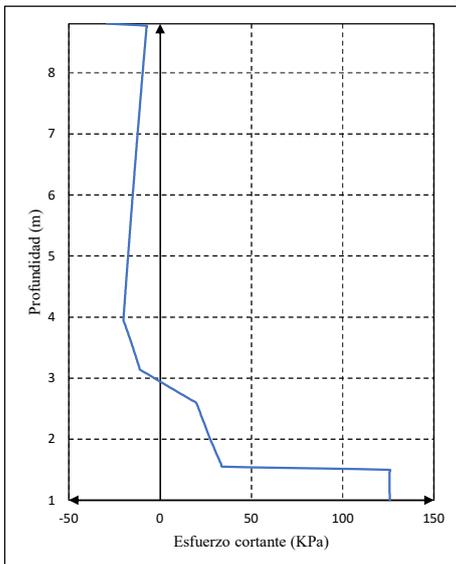
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	0.96
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	44.35
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	76.40
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	92.50
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	6.93
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	130.41
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	206.81
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	114.30
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	126.74
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	188.68
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	31.31
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	31.31
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 2.60 \text{ m}$, $h_r = 0.60 \text{ m}$

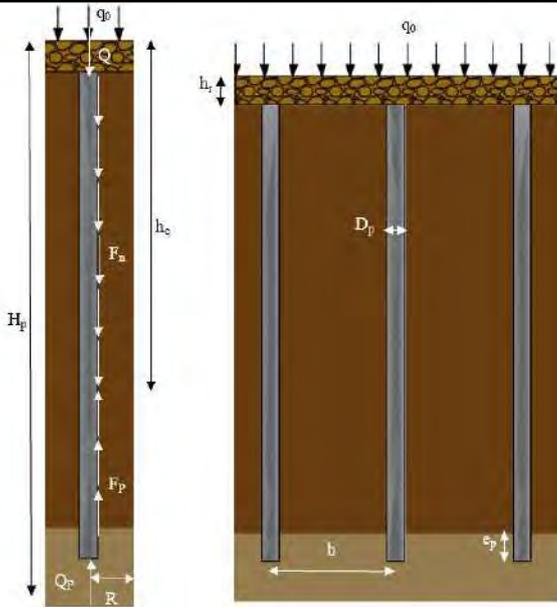
DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO			DATOS DEL MODELO COMPLETO		
D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30	b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	2.60
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15	A :	Área de una malla (m^2)	6.76
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07	R :	Radio equivalente de celda (m)	1.4669
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40	LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS		
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50	q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000	m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO			w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.60	$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	12.60	$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	5.07
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	85.18	q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	1907.16
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00	$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	134.81

PERFIL ESTRATIGRAFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.60	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.60	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

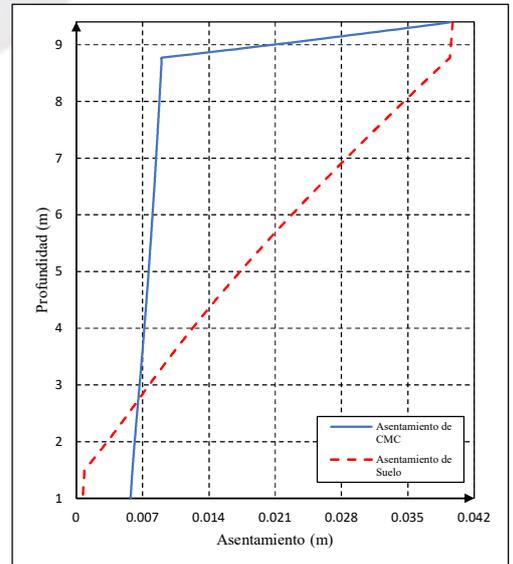
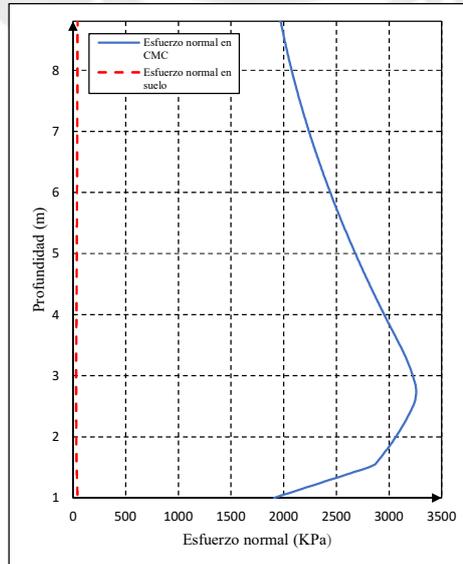
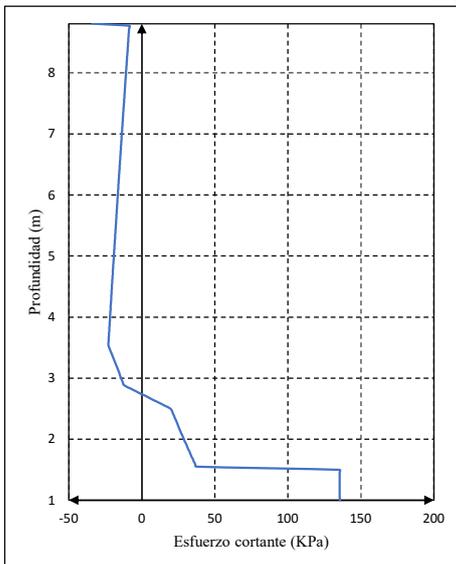
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	13.05
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	21.31
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	90.68
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	95.47
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	7.14
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	139.60
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	230.28
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	134.81
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	216.24
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	288.37
y_p	Asentamiento de la CMC (mm)	39.74
y_s	Asentamiento del suelo (mm)	39.73
$w(0)$	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.00

GRÁFICAS



CIMENTACIÓN SUPERFICIAL: LOSA - COLUMNAS DE MÓDULO CONTROLADO

CASO: $b = 3.00 \text{ m}$, $h_r = 0.60 \text{ m}$

DATOS GENERALES

DATOS DE LA COLUMNA DE MÓDULO CONTROLADO

D_p :	Diámetro de la CMC (m)	0.30
R_p :	Radio de la CMC (m)	0.15
A_p :	Área de la CMC (m^2)	0.07
H_p :	Profundidad de la CMC (m)	8.40
e_p :	Empotramiento de la CMC (m)	0.50
E_p :	Módulo de Young de la CMC (kPa)	6200000

DATOS DEL MODELO COMPLETO

b :	Espaciamiento entre CMCs (m)	3.00
A :	Área de una malla (m^2)	9.00
R :	Radio equivalente de celda (m)	1.6926

LEYES DE MOVILIZACIÓN DE CARGAS SEGÚN EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS

q_p :	Resistencia del suelo en punta de CMC (kPa)	5000.00
m_q :	Primer coeficiente de Frank y Zhao	4.80
w_2 :	Asentamiento relativo límite del primer tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	6.65
$6w_2$:	Asentamiento relativo límite del segundo tramo de gráfica de Frank & Zhao (mm)	39.89
$w(H_p)$:	Asentamiento relativo en punta de CMC (mm)	5.50
q :	Carga distribuida soportada en punta de CMC (kPa)	2066.80
$Q_p(H_p)$:	Carga soportada en punta de CMC (kN)	146.09

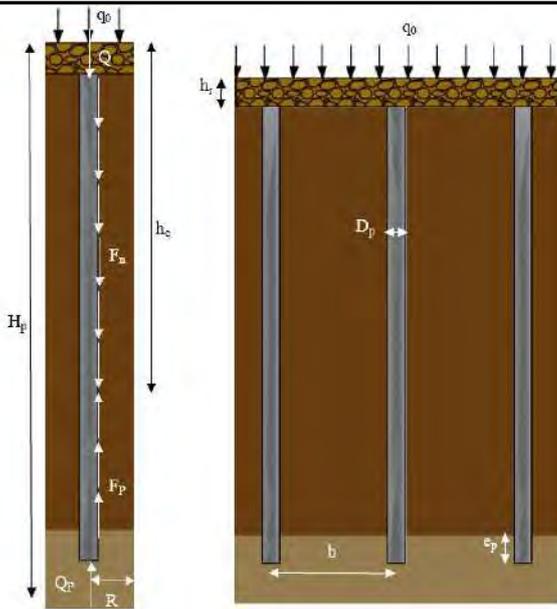
DATOS DEL COLCHÓN DE REPARTO

h_r :	Altura de la capa de repartición (m)	0.60
q_r :	Carga distribuida en la base (kPa)	12.60
Q_r :	Carga aplicada en la base (kN)	113.40
q_0 :	Sobrecarga uniforme aplicada por losa de cimentación (kPa)	50.00

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Descripción del material	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_s (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E_M (kPa)	α	E (kPa)	ν	E_{oed} (kPa)	q_s (kPa)	m_t	$ktan\delta$
Colchón de reparto de cargas	0	0.60	21	20	32	15000	0.25	60000	0.3	80769	-	0.8	0.8
Arcilla blanda	0.60	7.90	16	5	20	3300	0.67	4950	0.3	6663	40	2	0.2
Arena densa a muy densa	7.90	9.40	19	1	38	23500	0.33	70500	0.3	94904	180	0.8	1.0

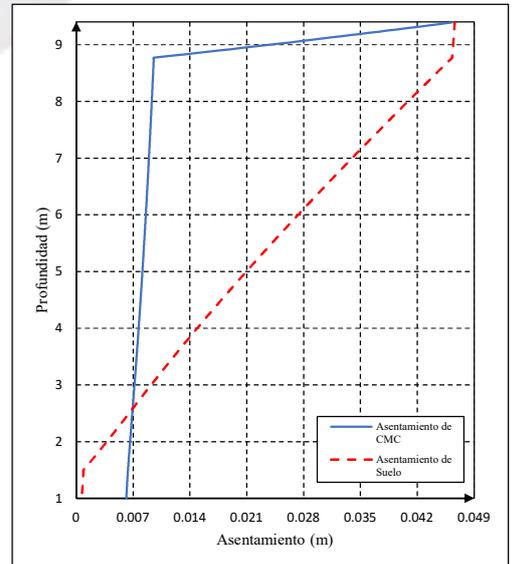
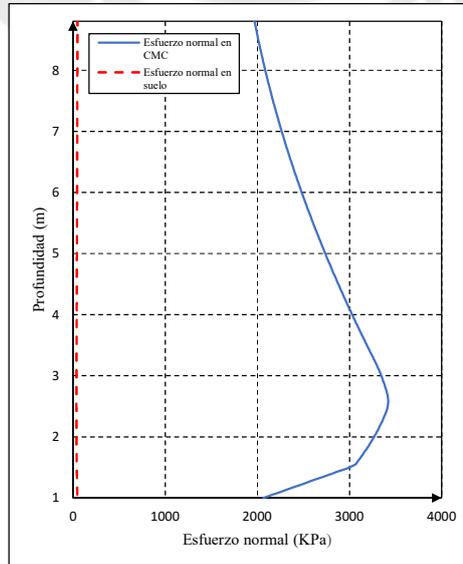
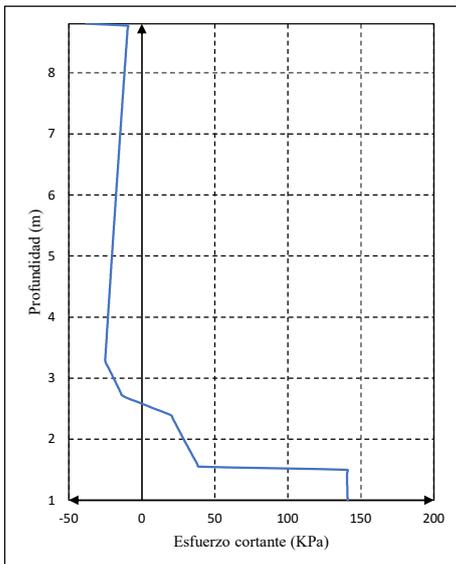
ESQUEMA



RESULTADOS

F	Fricción lateral a lo largo de la CMC (kN)	26.56
F_{lim}	Fricción lateral límite (kN)	1.73
F_n	Fricción negativa a lo largo de la CMC (kN)	102.13
F_p	Fricción positiva a lo largo de la CMC (kN)	95.57
h_c	Profundidad de eje neutro (m)	7.30
$Q_p(h_r)$	Carga soportada en cabeza de CMC (kN)	139.54
$Q_p(h_c)$	Carga soportada en eje neutro de CMC (kN)	241.66
$Q_p(H_p)$	Carga soportada en punta de CMC (kN)	146.09
$Q_s(h_r)$	Carga soportada por el suelo en superficie (kN)	330.47
$Q_s(H_p)$	Carga soportada por el suelo en punta de CMC (kN)	417.31
y_p :	Asentamiento de la CMC (mm)	46.66
y_s :	Asentamiento del suelo (mm)	46.62
$w(0)$:	Asentamiento relativo entre CMC y suelo (mm)	0.03

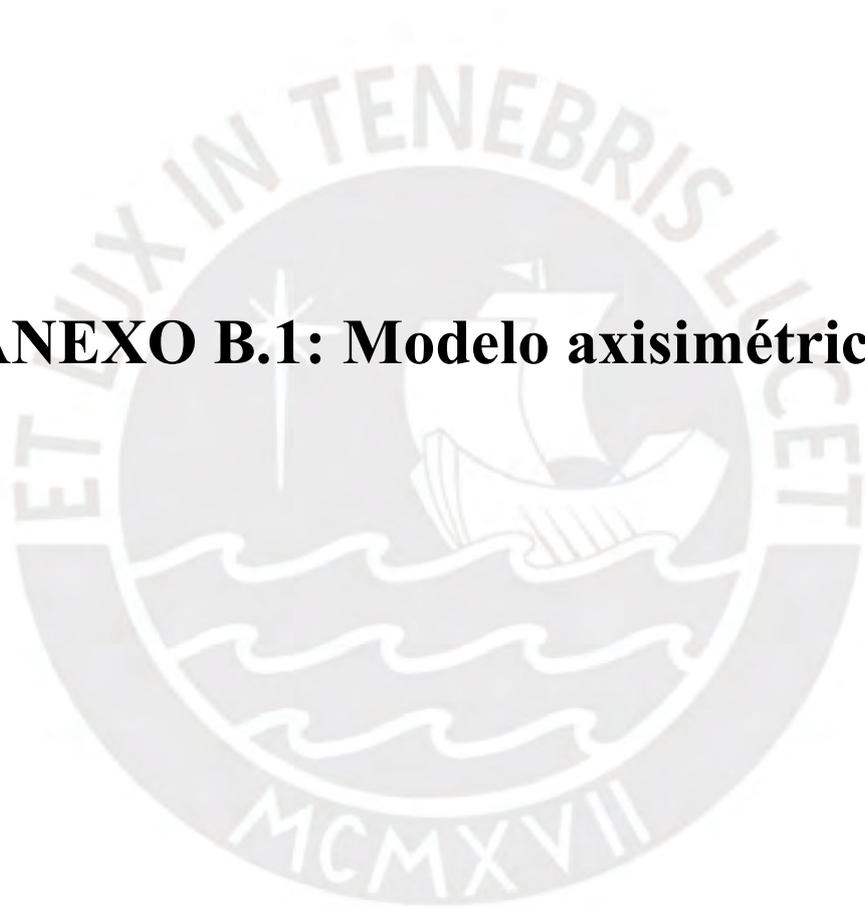
GRÁFICAS



ANEXO B: RESULTADOS DE PLAXIS

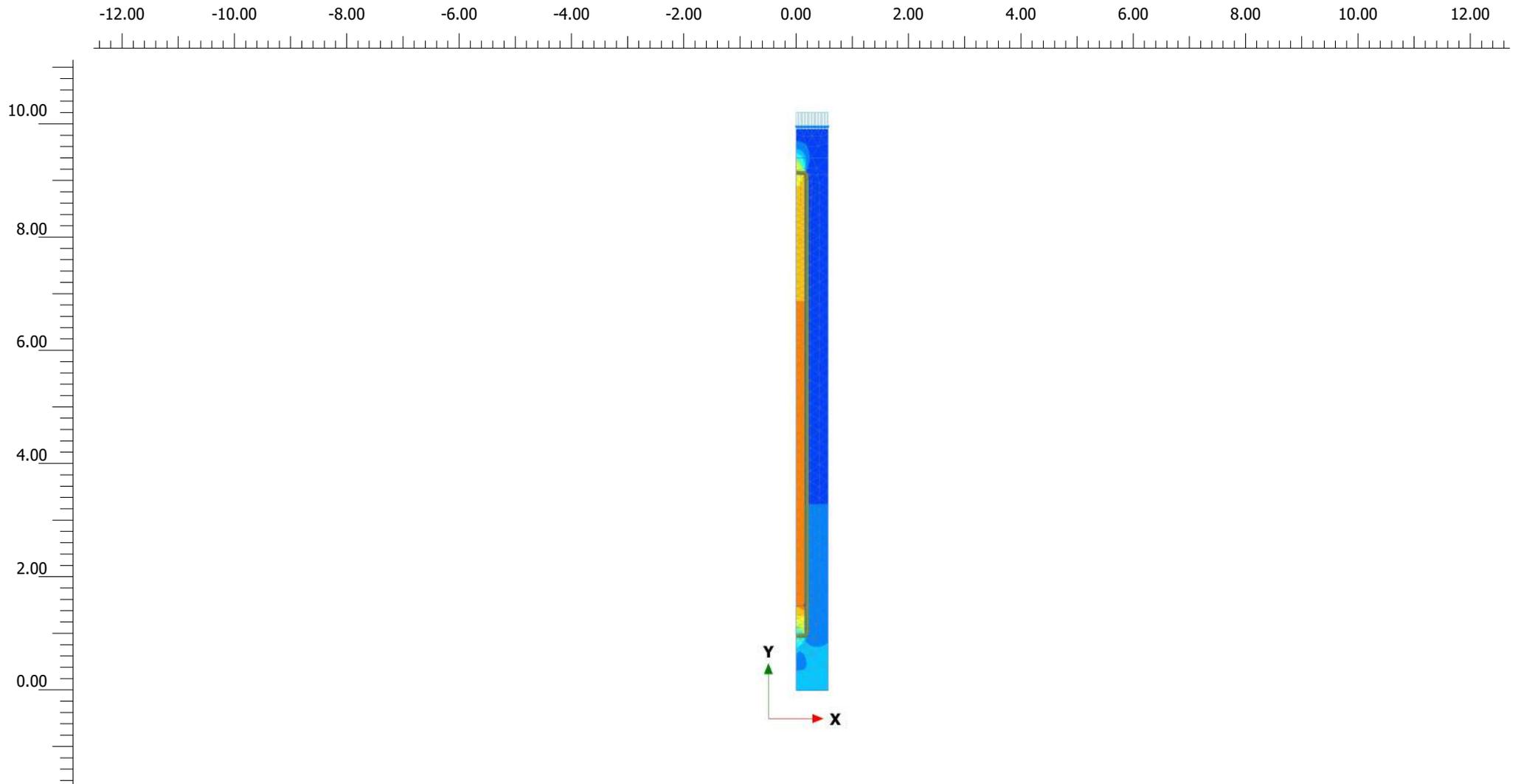


ANEXO B.1: Modelo axisimétrico



ANEXO B.1.1: Esfuerzos obtenidos





Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 4.803 kN/m² (Element 32 at Node 239)

Minimum value = -1181 kN/m² (Element 175 at Node 249)



Project description

hr=0.3, Req=0.5642 m Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

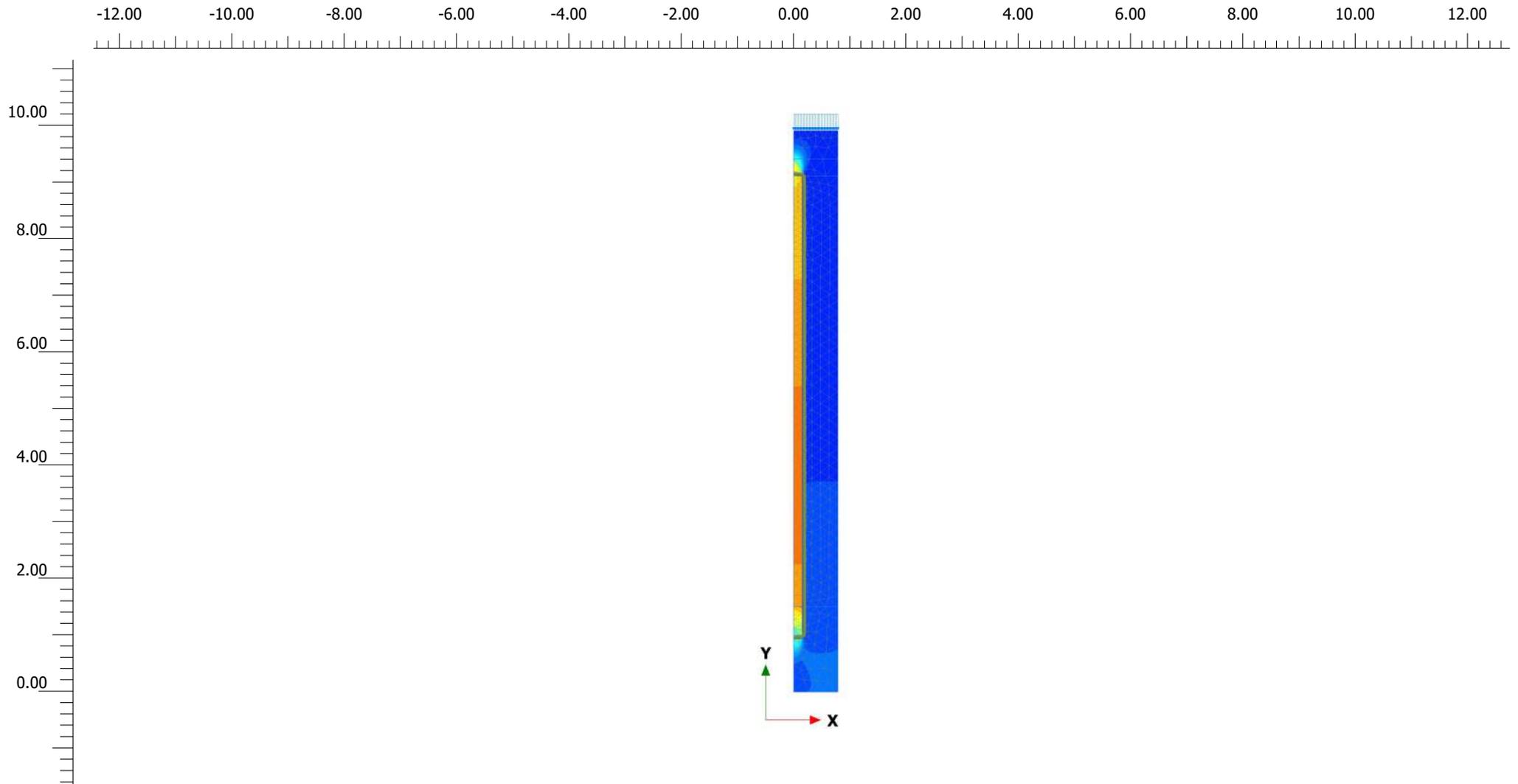
Project filename

hr=0.3, Req=0.5642 v2

Step

29

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 34.63 kN/m² (Element 43 at Node 241)

Minimum value = -1902 kN/m² (Element 184 at Node 251)

PLAXIS

Project description

hr=0.3, Req=0.7899 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

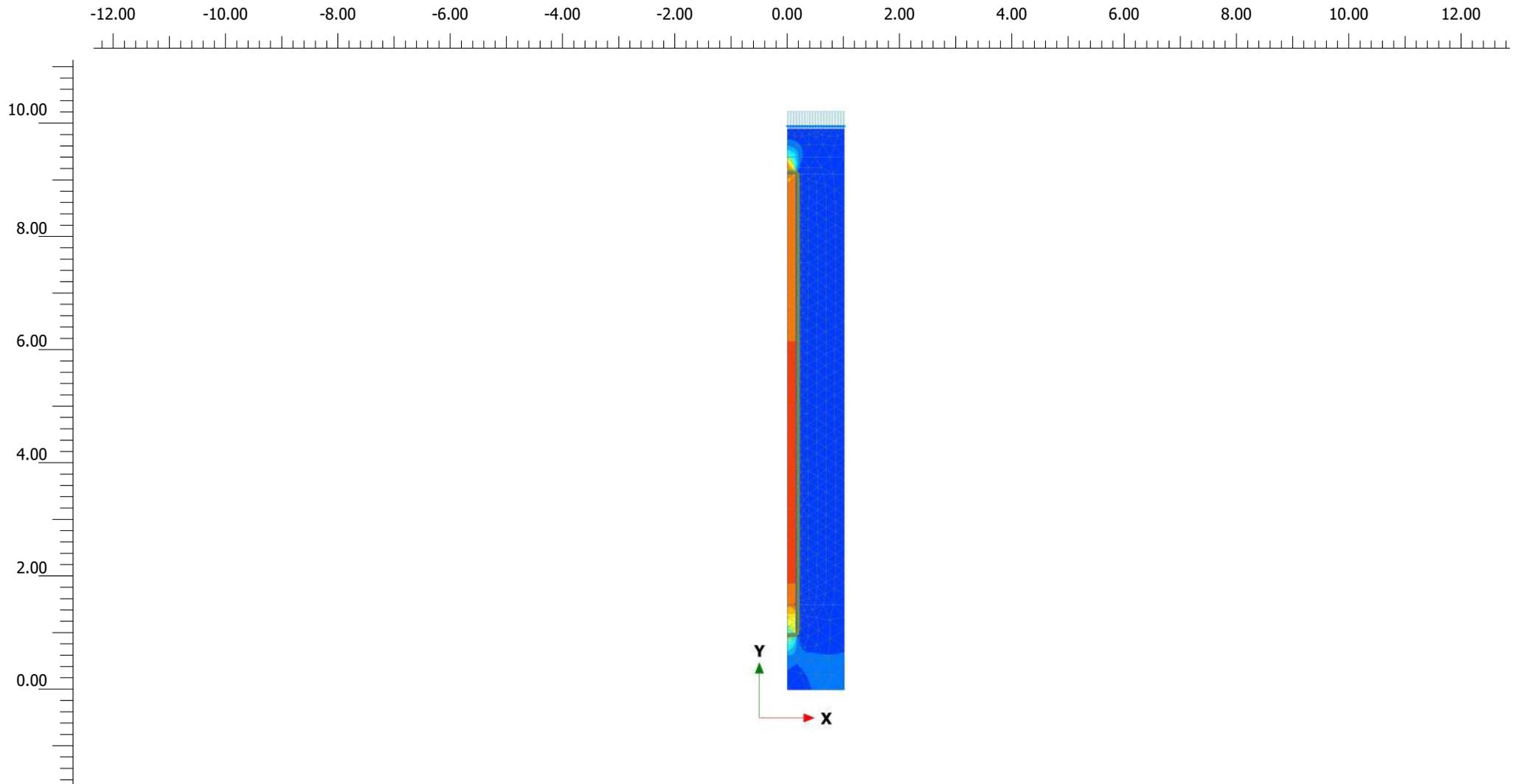
Project filename

hr=0.3, Req=0.7899 v2

Step

38

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 79.42 kN/m² (Element 61 at Node 430)

Minimum value = -2512 kN/m² (Element 202 at Node 289)



Project description

hr=0.3, Req=1.0155 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

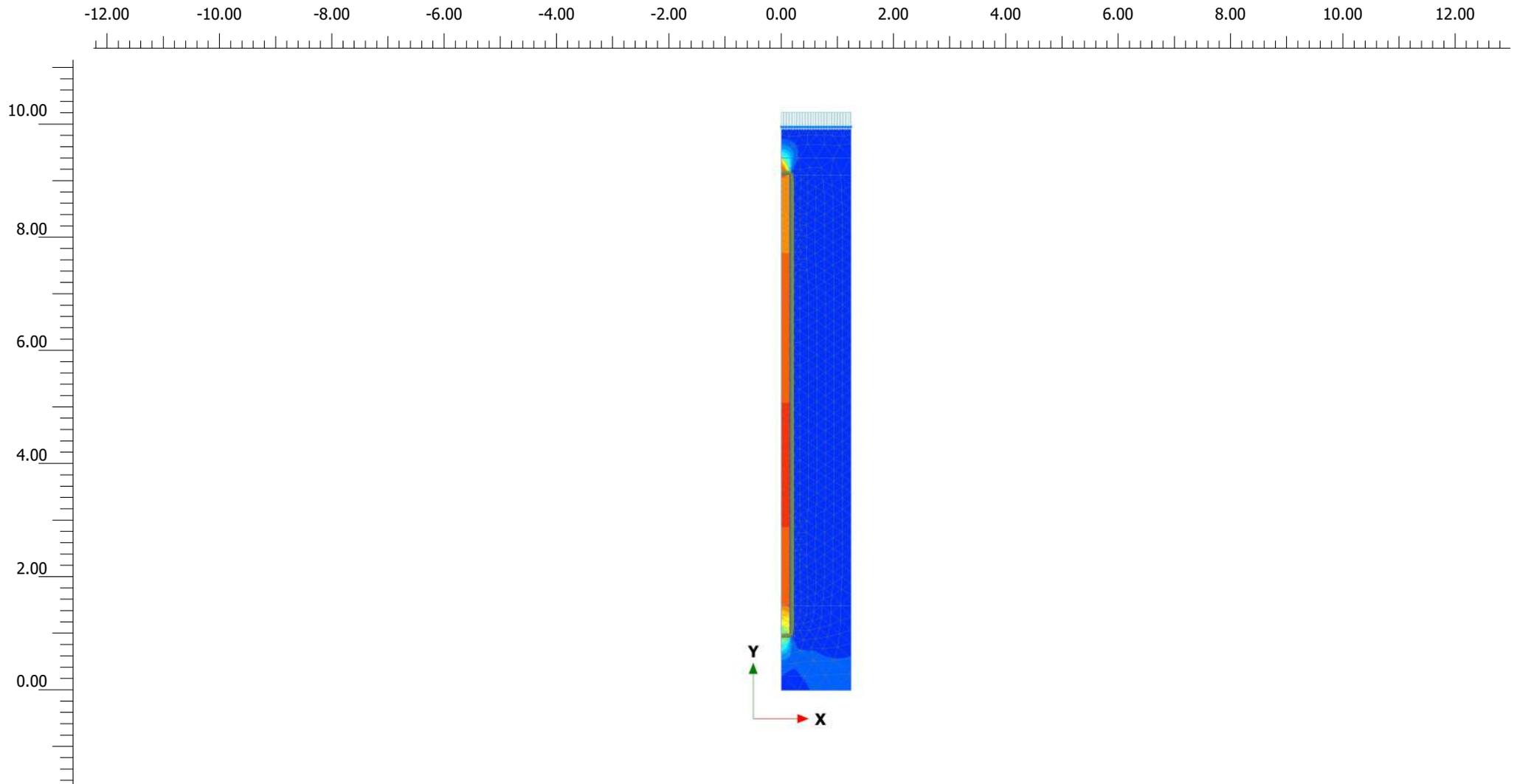
Project filename

hr=0.3, Req=1.0155 v2

Step

45

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 119.5 kN/m² (Element 63 at Node 289)

Minimum value = -3149 kN/m² (Element 204 at Node 299)

PLAXIS

Project description

hr=0.3, Req=1.2412 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

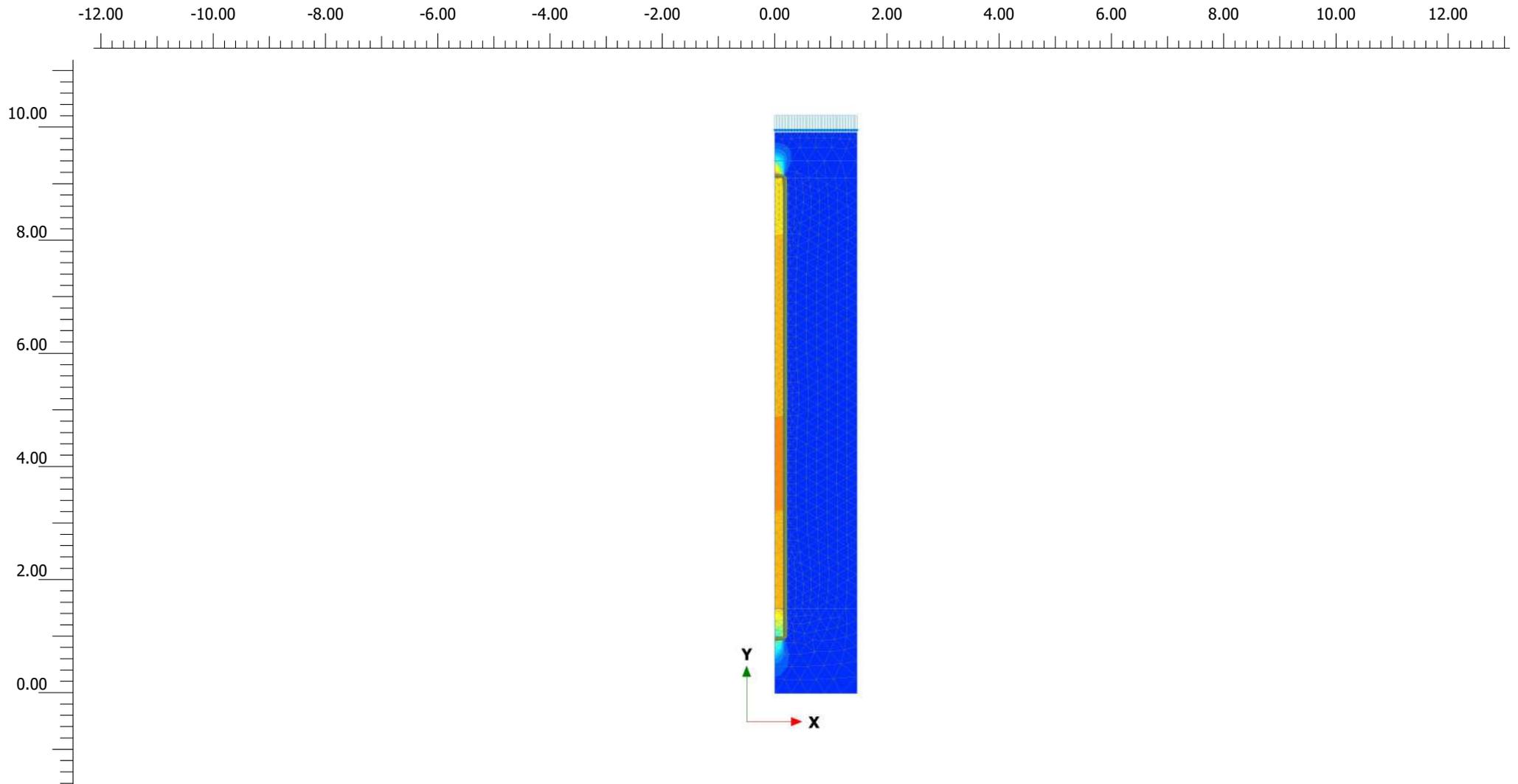
Project filename

hr=0.3, Req=1.2412 v2

Step

51

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 138.2 kN/m² (Element 72 at Node 241)

Minimum value = -4127 kN/m² (Element 255 at Node 254)



Project description

hr=0.3, Req=1.4669 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

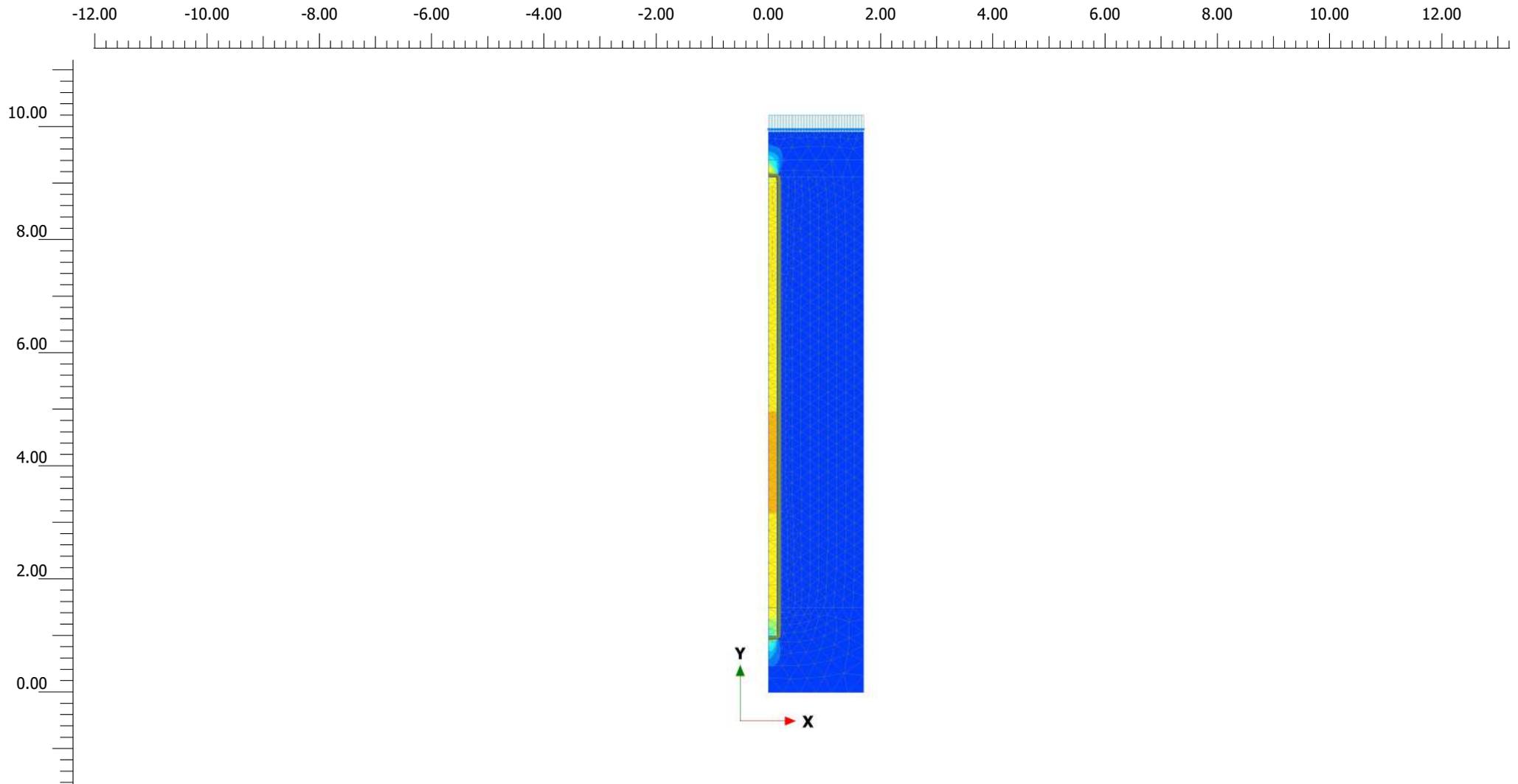
Project filename

hr=0.3, Req=1.4669 v2

Step

49

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 63.48 kN/m² (Element 85 at Node 370)

Minimum value = -5023 kN/m² (Element 184 at Node 227)



Project description

hr=0.3, Req=1.6926 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

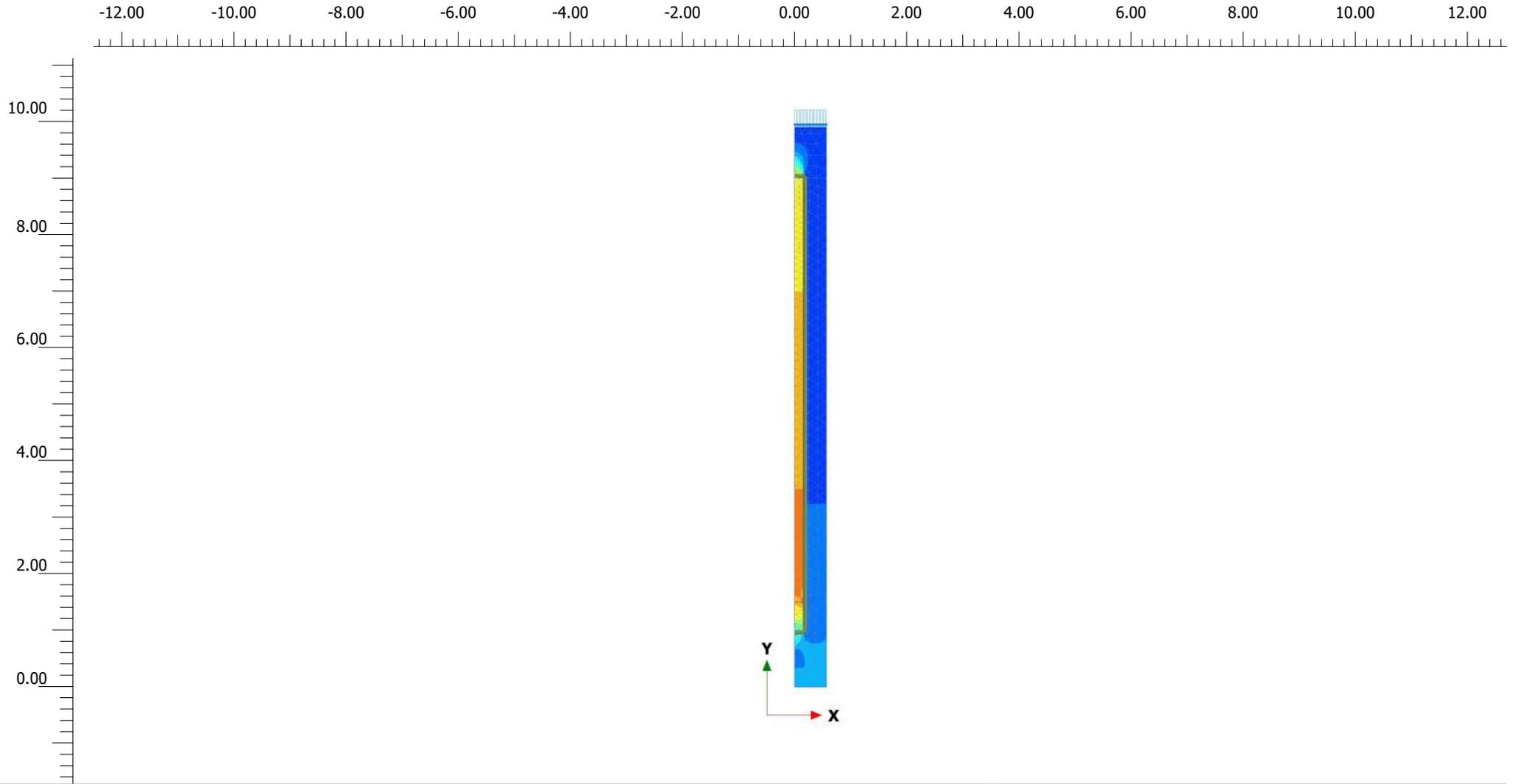
Project filename

hr=0.3, Req=1.6926 v2

Step

43

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 3.847 kN/m² (Element 38 at Node 307)

Minimum value = -1203 kN/m² (Element 178 at Node 317)



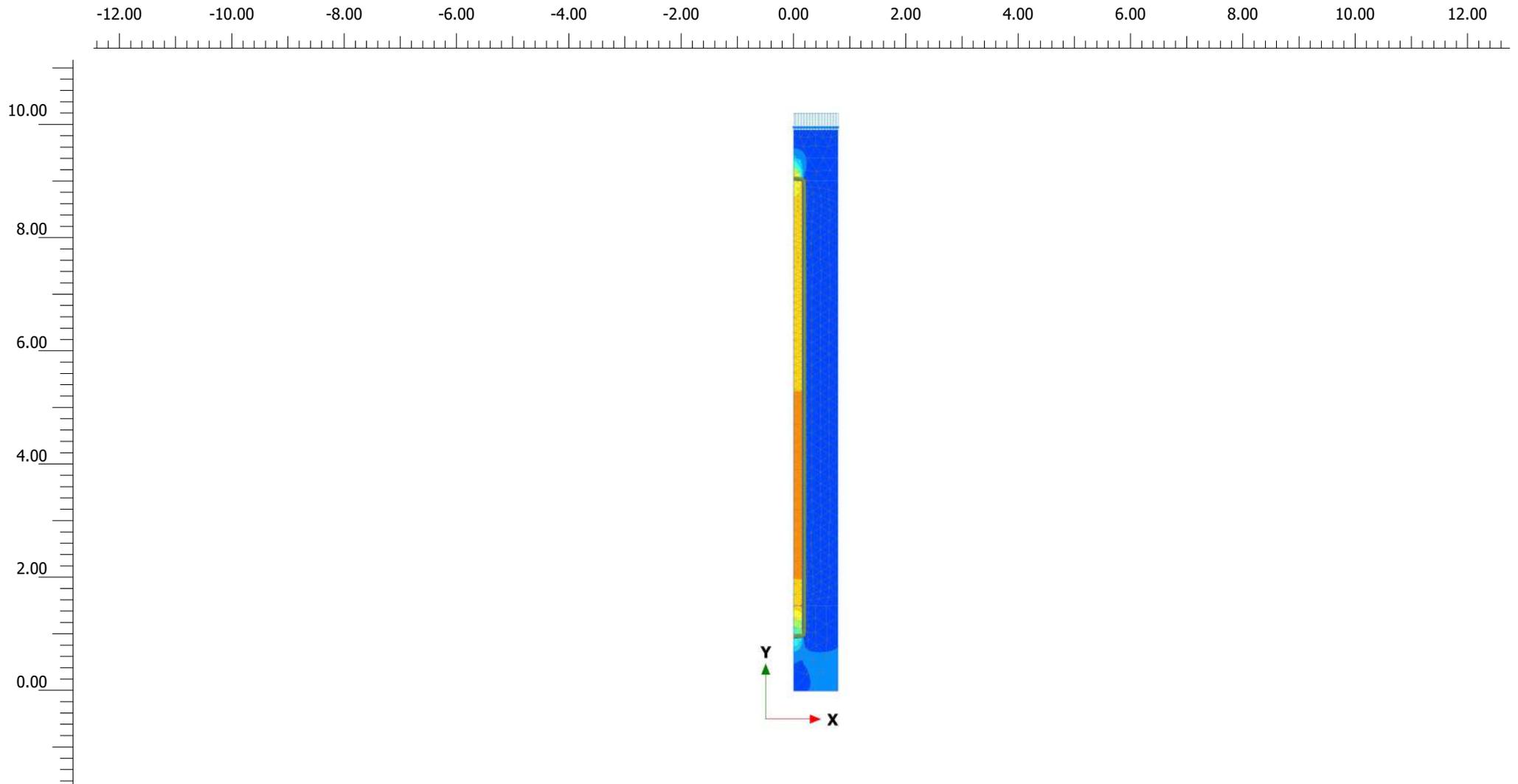
Project description
hr=0.4, Req=0.5642 Esfuerzos efectivos

Date
19/12/2021

Project filename
hr=0.4, Req=0.5642 v2

Step
29

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 4.346 kN/m² (Element 544 at Node 355)

Minimum value = -2001 kN/m² (Element 188 at Node 359)



Project description

hr=0.4, Req=0.7899 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

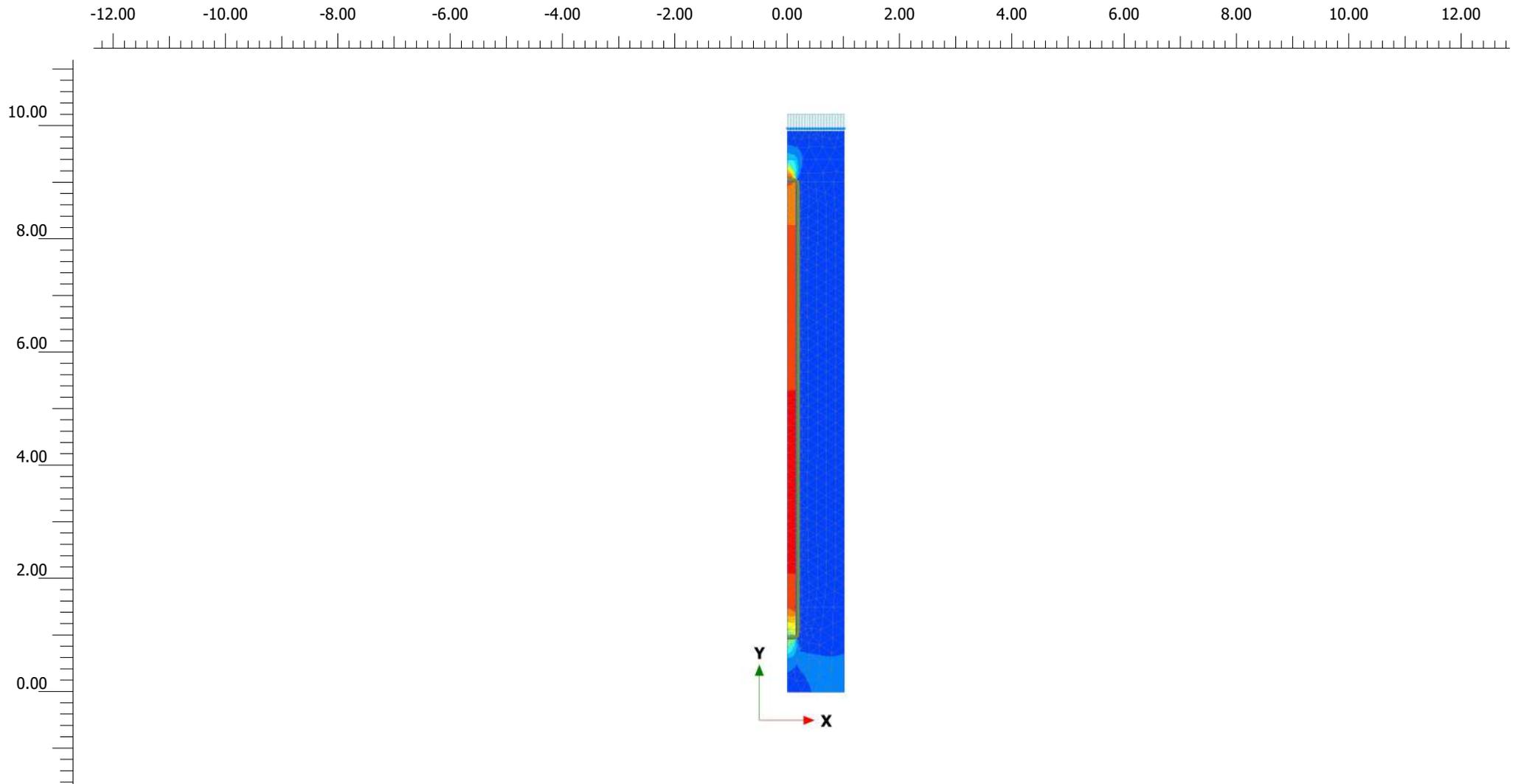
Project filename

hr=0.4, Req=0.7899 v2

Step

41

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 51.17 kN/m² (Element 64 at Node 424)

Minimum value = -2330 kN/m² (Element 89 at Node 6825)



Project description

hr=0.4, Req=1.0155 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

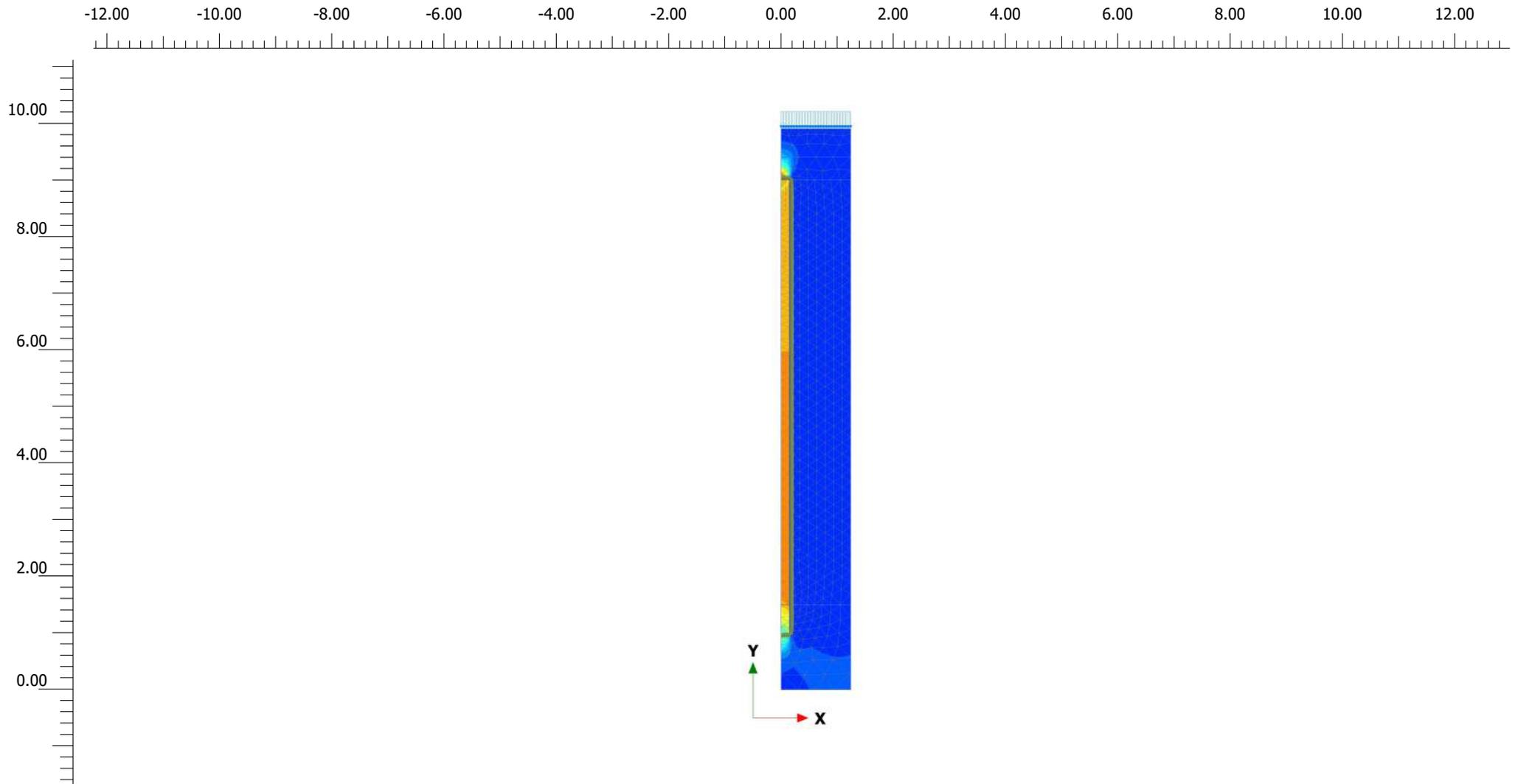
Project filename

hr=0.4, Req=1.0155 v2

Step

62

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 59.01 kN/m² (Element 69 at Node 279)

Minimum value = -3270 kN/m² (Element 208 at Node 289)



Project description

hr=0.4, Req=1.2412 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

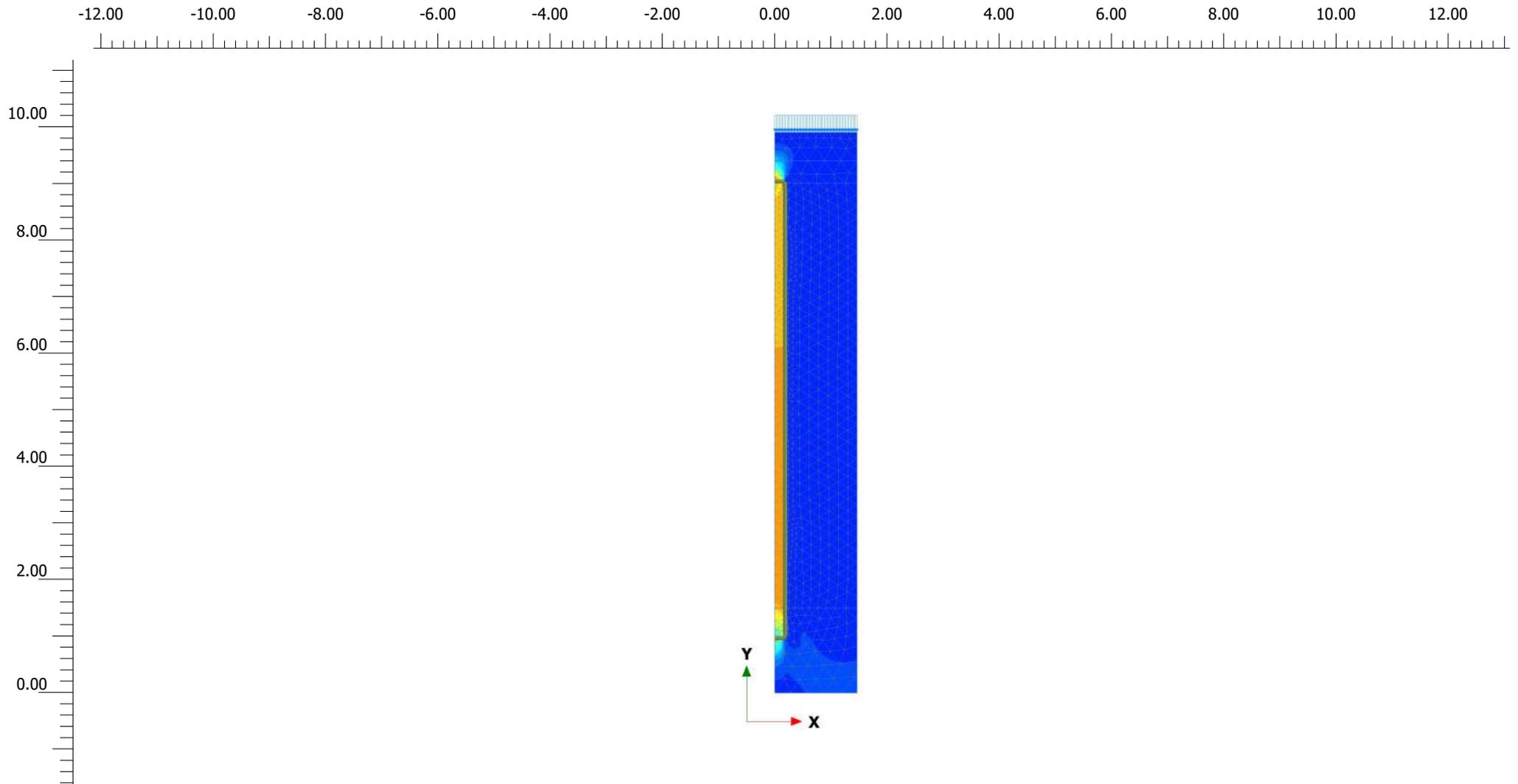
Project filename

hr=0.4, Req=1.2412 v2

Step

50

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 93.55 kN/m² (Element 76 at Node 433)

Minimum value = -3842 kN/m² (Element 177 at Node 446)



Project description

hr=0.4, Req=1.4669 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

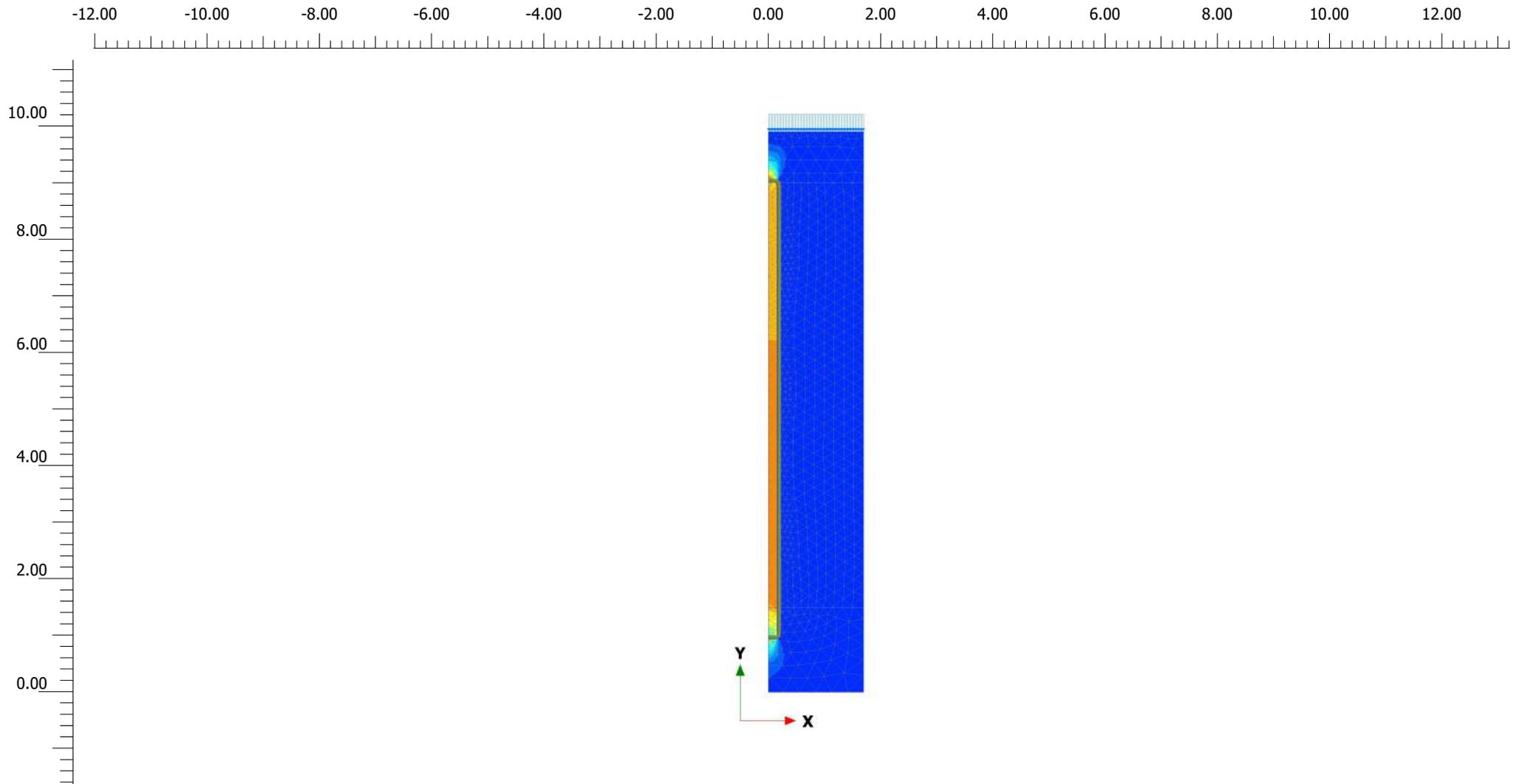
Project filename

hr=0.4, Req=1.4669 v2

Step

52

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 103.5 kN/m² (Element 89 at Node 529)

Minimum value = -4005 kN/m² (Element 191 at Node 240)



Project description

hr=0.4, Req=1.6926 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

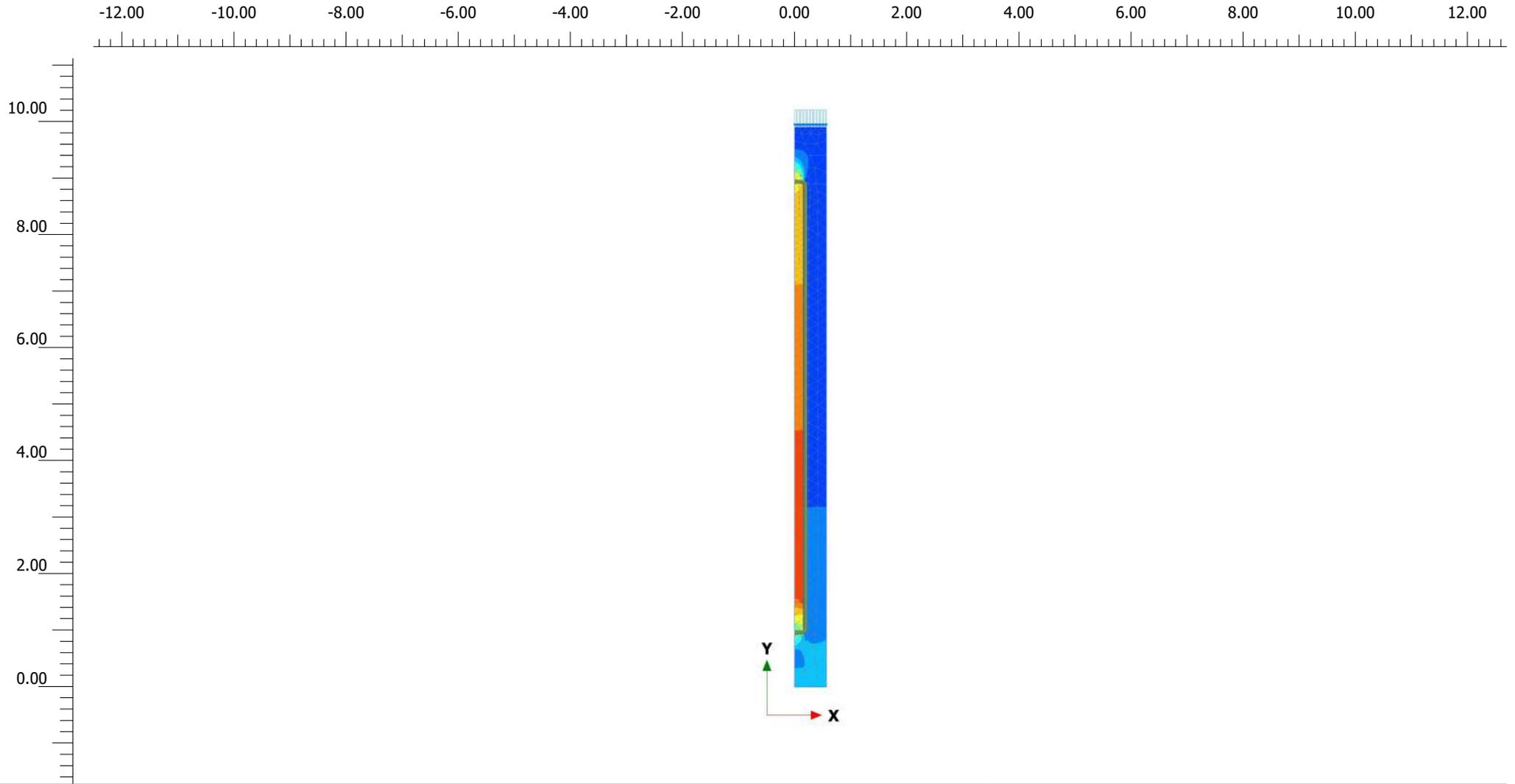
Project filename

hr=0.4, Req=1.6926 v2

Step

44

Company



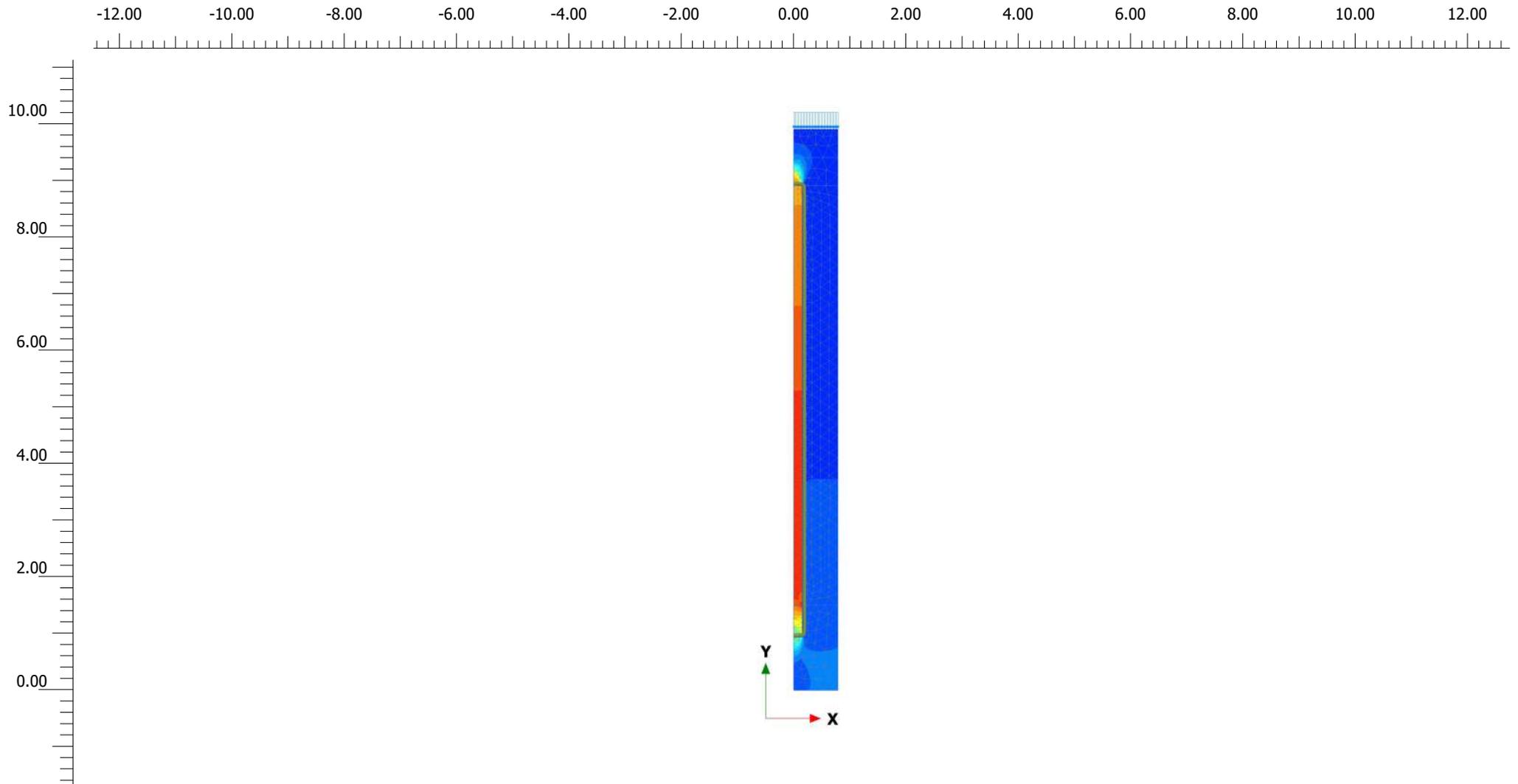
Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 26.31 kN/m² (Element 41 at Node 376)

Minimum value = -1145 kN/m² (Element 66 at Node 4131)



<i>Project description</i> hr=0.5, Req=0.5642 Esfuerzos efectivos		<i>Date</i> 19/12/2021	
<i>Project filename</i> hr=0.5, Req=0.5642 v2	<i>Step</i> 30	<i>Company</i>	



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 40.88 kN/m² (Element 55 at Node 430)

Minimum value = -1780 kN/m² (Element 81 at Node 6019)



Project description

hr=0.5, Req=0.7899 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

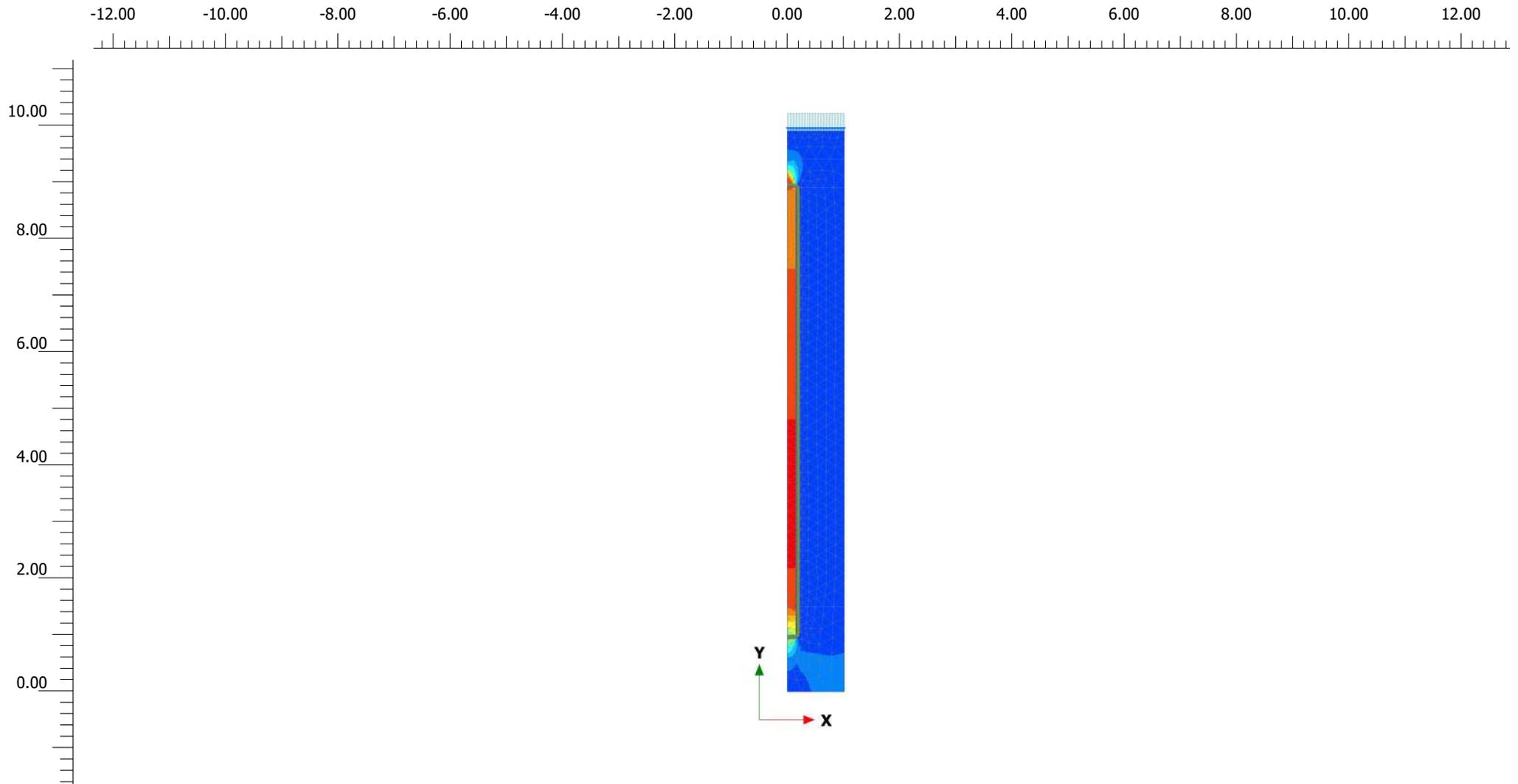
Project filename

hr=0.5, Req=0.7899 v2

Step

41

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 55.65 kN/m² (Element 78 at Node 516)

Minimum value = -2328 kN/m² (Element 103 at Node 6933)



Project description

hr=0.5, Req=1.0155 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

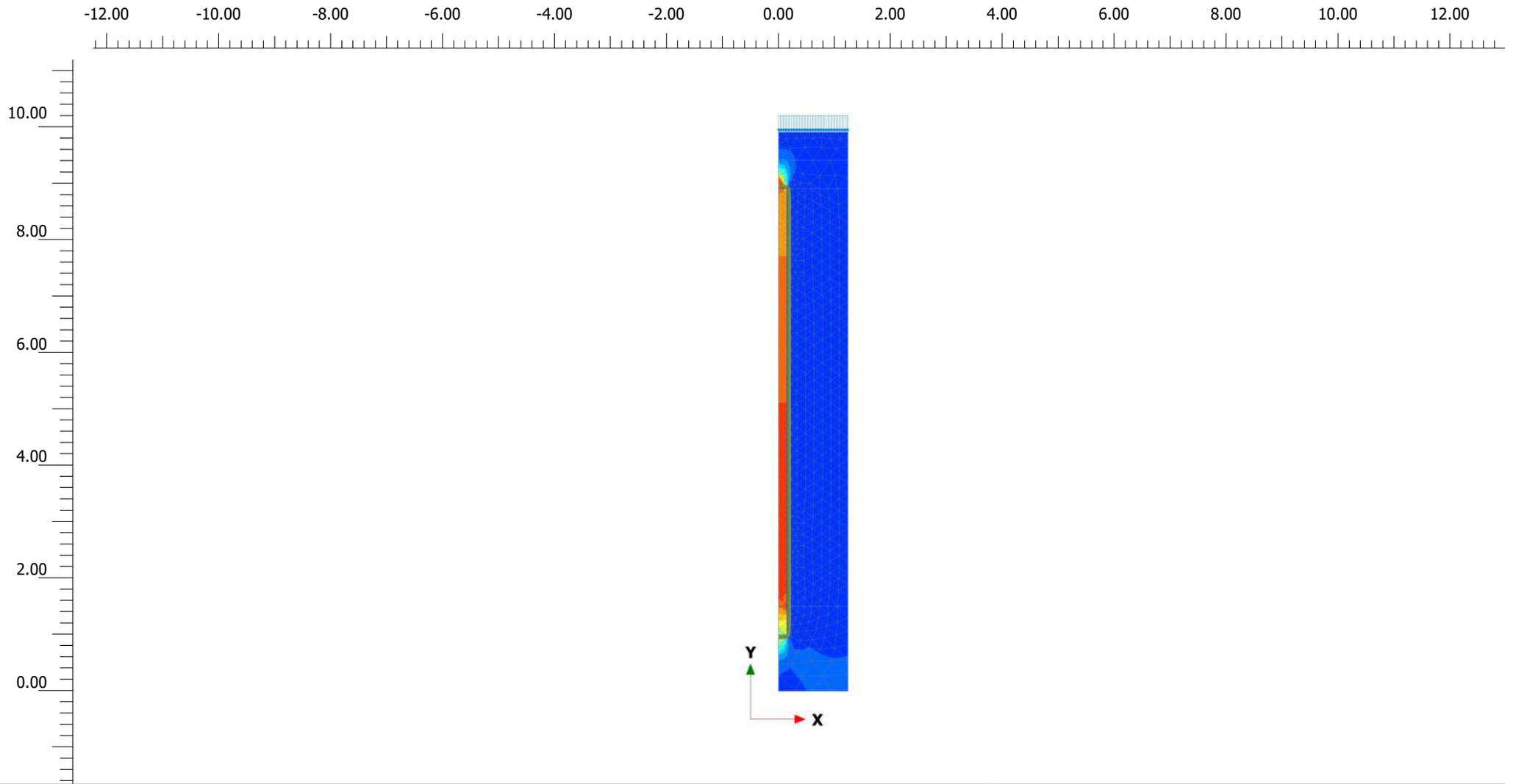
Project filename

hr=0.5, Req=1.0155 v2

Step

60

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 50.20 kN/m² (Element 76 at Node 526)

Minimum value = -2911 kN/m² (Element 951 at Node 8346)



Project description

hr=0.5, Req=1.2412 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

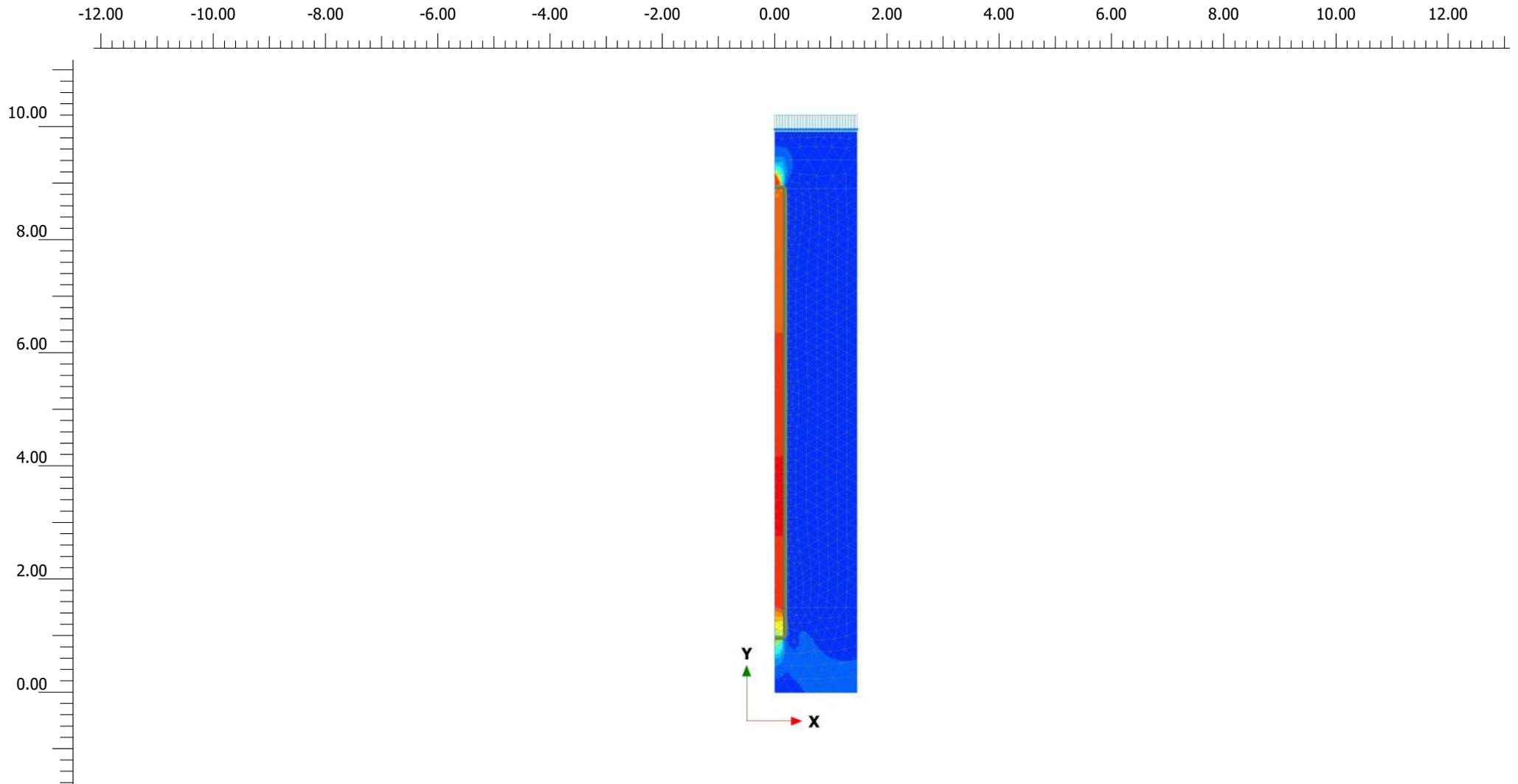
Project filename

hr=0.5, Req=1.2412 v2

Step

53

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 27.52 kN/m² (Element 994 at Node 8423)

Minimum value = -3187 kN/m² (Element 112 at Node 8419)



Project description

hr=0.5, Req=1.4669 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

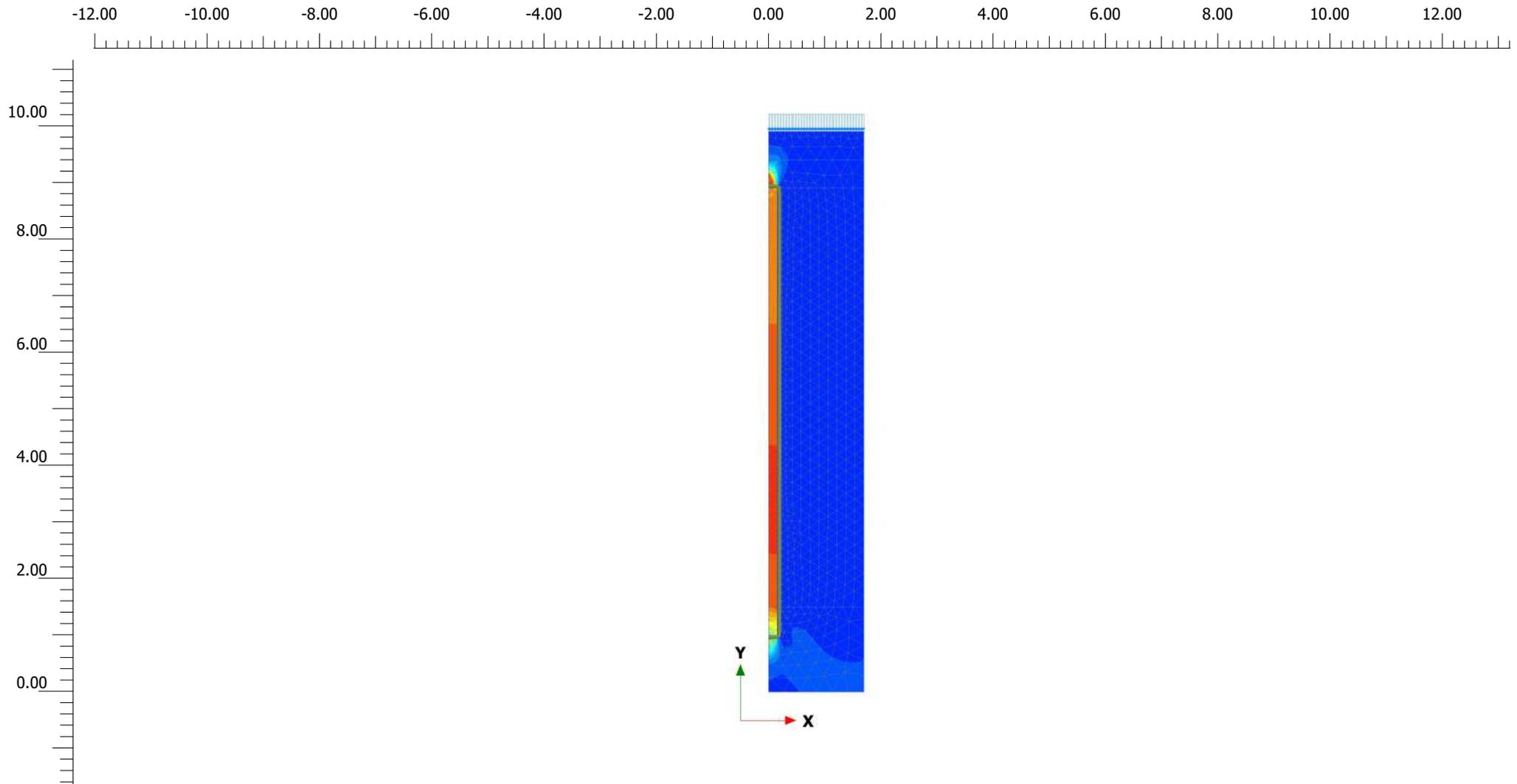
Project filename

hr=0.5, Req=1.4669 v2

Step

48

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 12.54 kN/m² (Element 105 at Node 678)

Minimum value = -3555 kN/m² (Element 104 at Node 216)

PLAXIS

Project description

hr=0.5, Req=1.6926 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

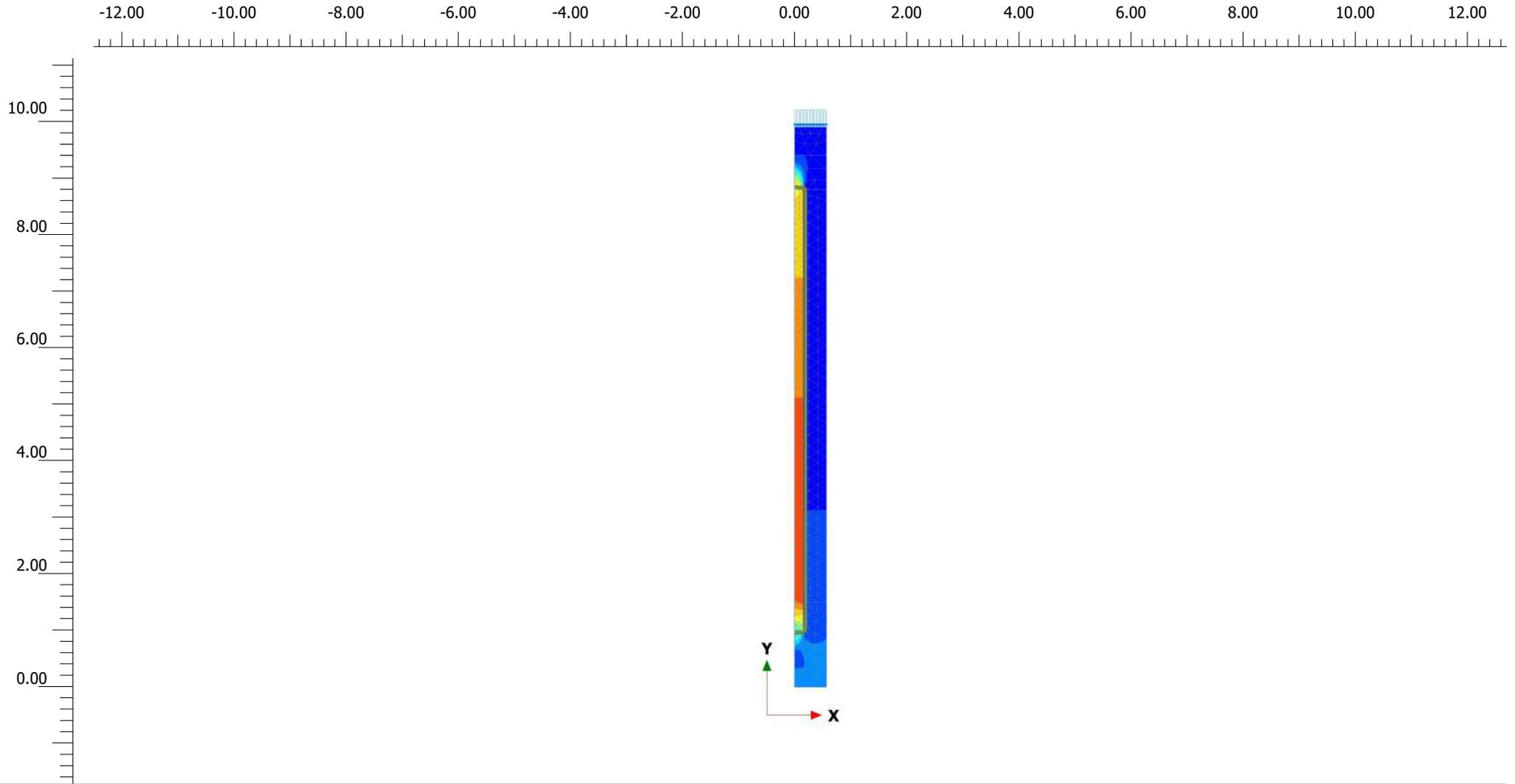
Project filename

hr=0.5, Req=1.6926 v2

Step

47

Company



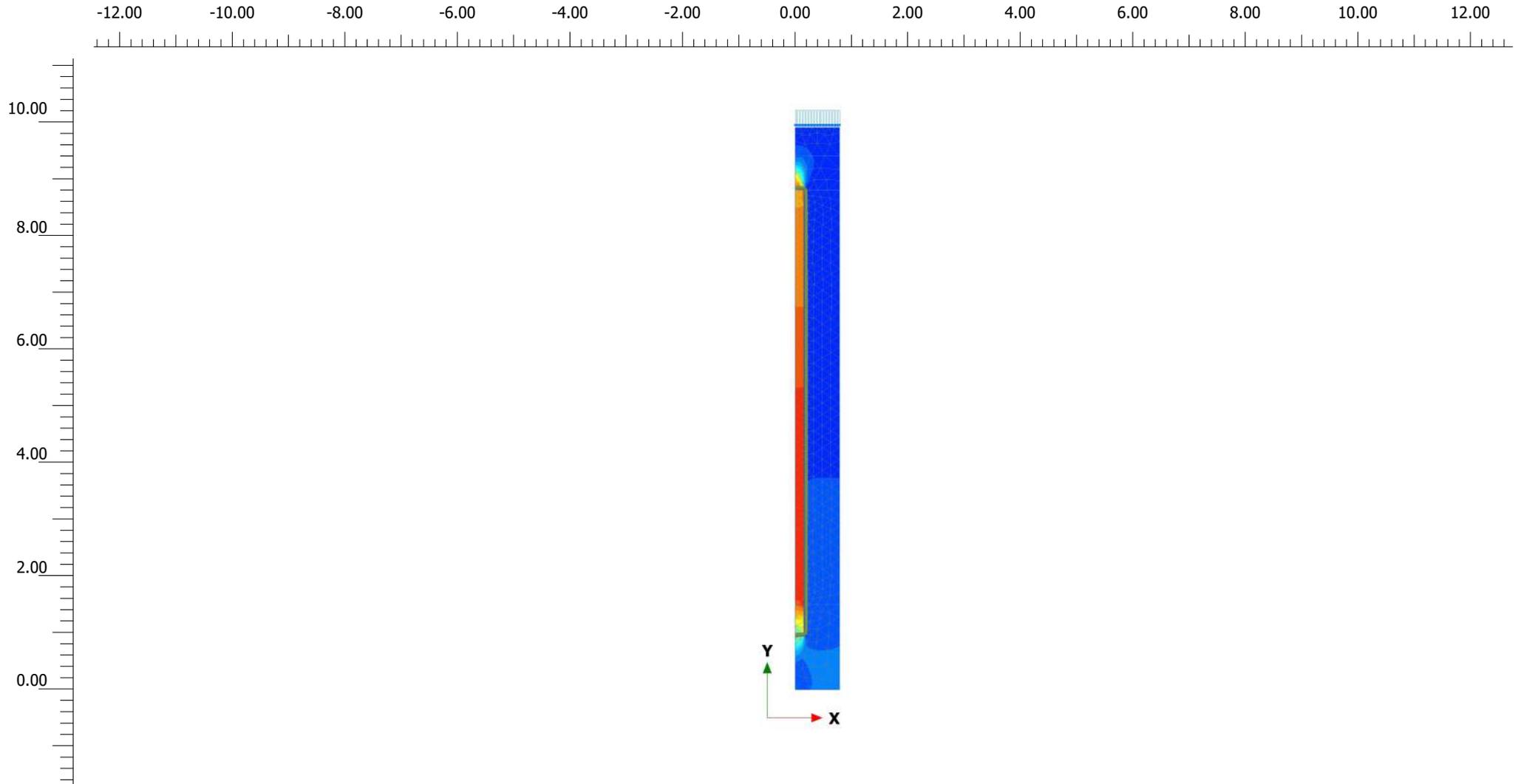
Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = -1.981 kN/m² (Element 449 at Node 327)

Minimum value = -1163 kN/m² (Element 61 at Node 4079)



<i>Project description</i> hr=0.6, Req=0.5642 Esfuerzos efectivos		<i>Date</i> 19/12/2021
<i>Project filename</i> hr=0.6, Req=0.5642 v2	<i>Step</i> 33	<i>Company</i>



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 4.486 kN/m² (Element 52 at Node 391)

Minimum value = -1798 kN/m² (Element 76 at Node 5897)



Project description

hr=0.6, Req=0.7899 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

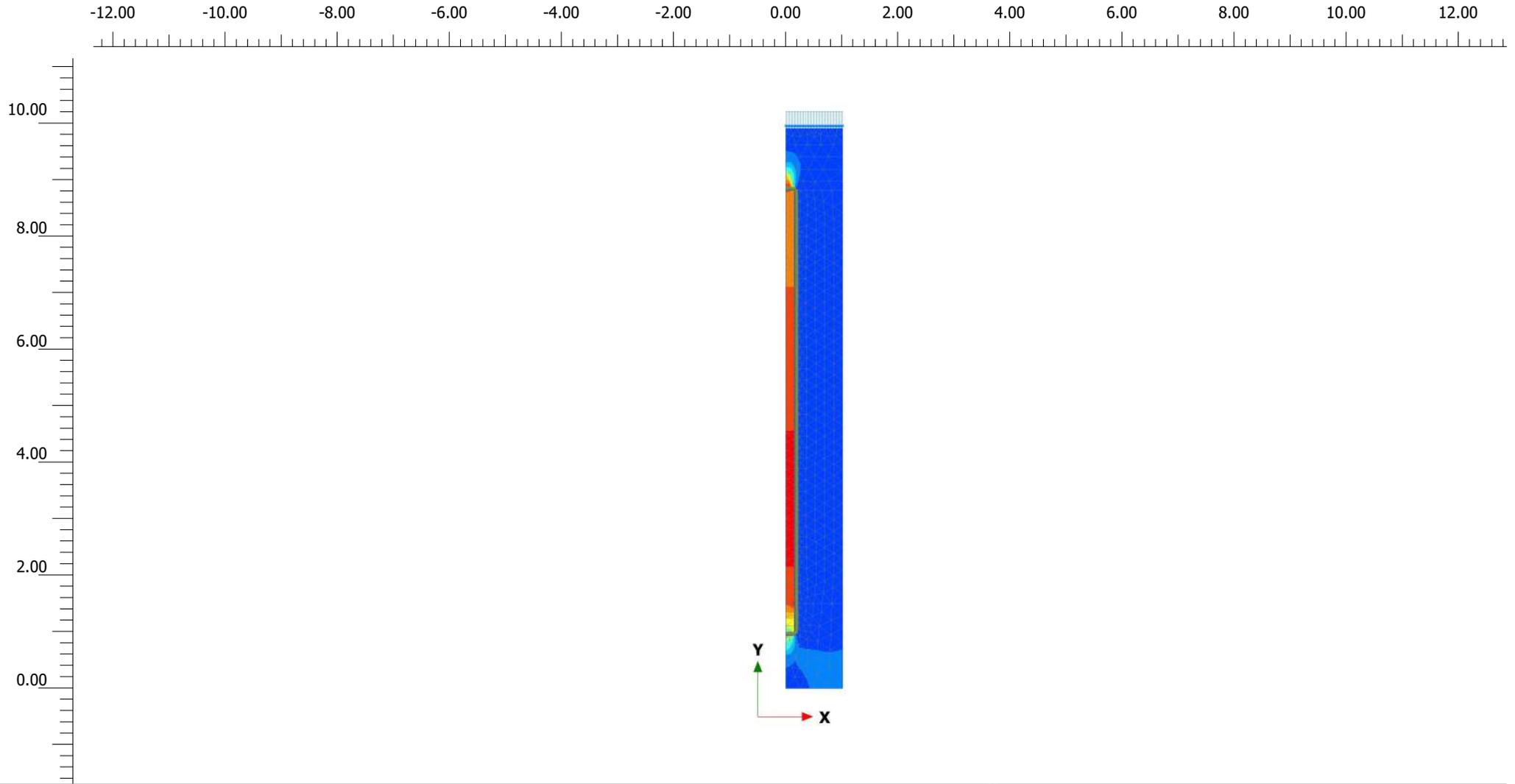
Project filename

hr=0.6, Req=0.7899 v2

Step

42

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 17.72 kN/m² (Element 773 at Node 6889)

Minimum value = -2336 kN/m² (Element 96 at Node 6753)



Project description

hr=0.6, Req=1.0155 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

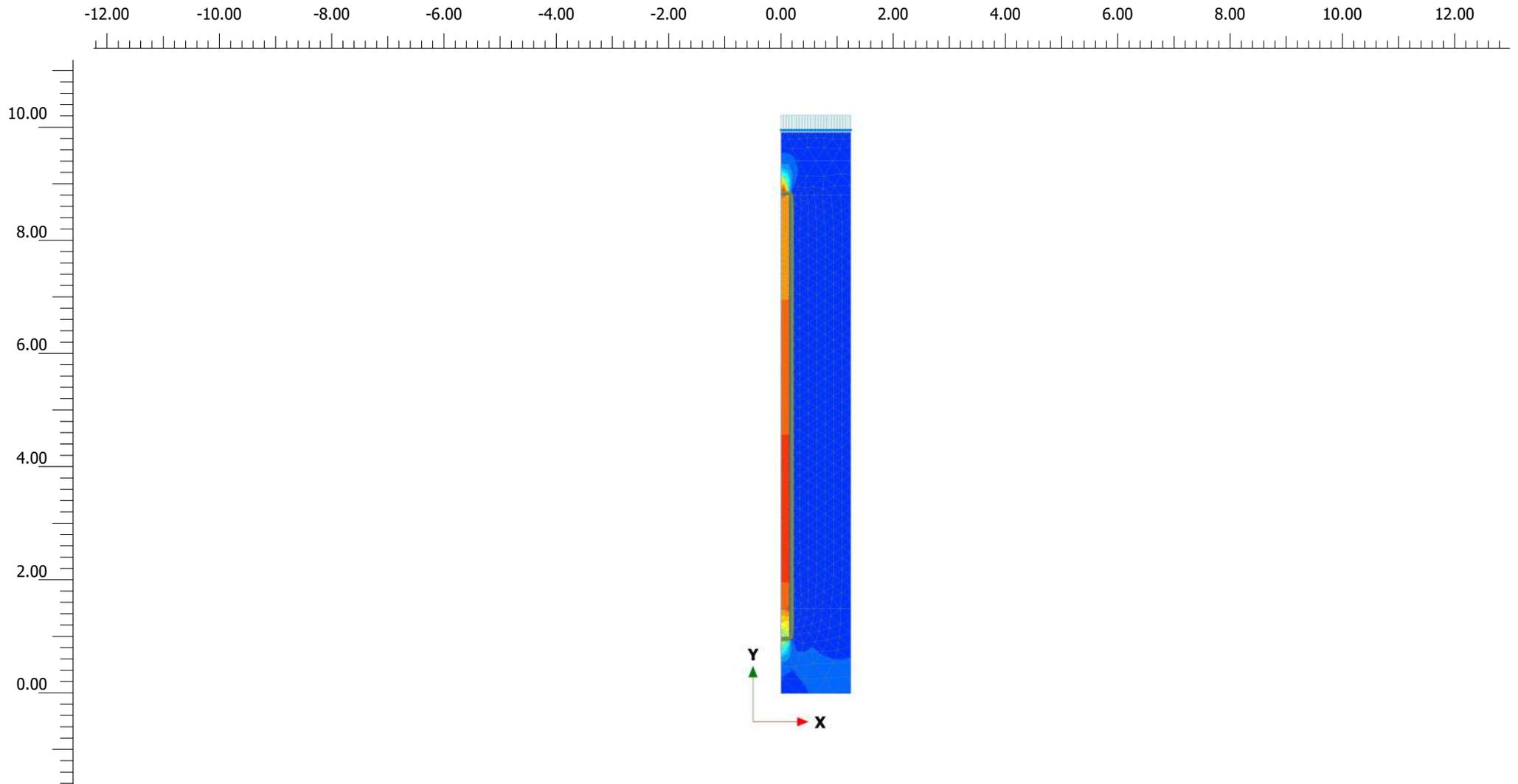
Project filename

hr=0.6, Req=1.0155 v2

Step

69

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 18.58 kN/m² (Element 916 at Node 7731)

Minimum value = -2880 kN/m² (Element 924 at Node 8128)



Project description

hr=0.6, Req=1.2412 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

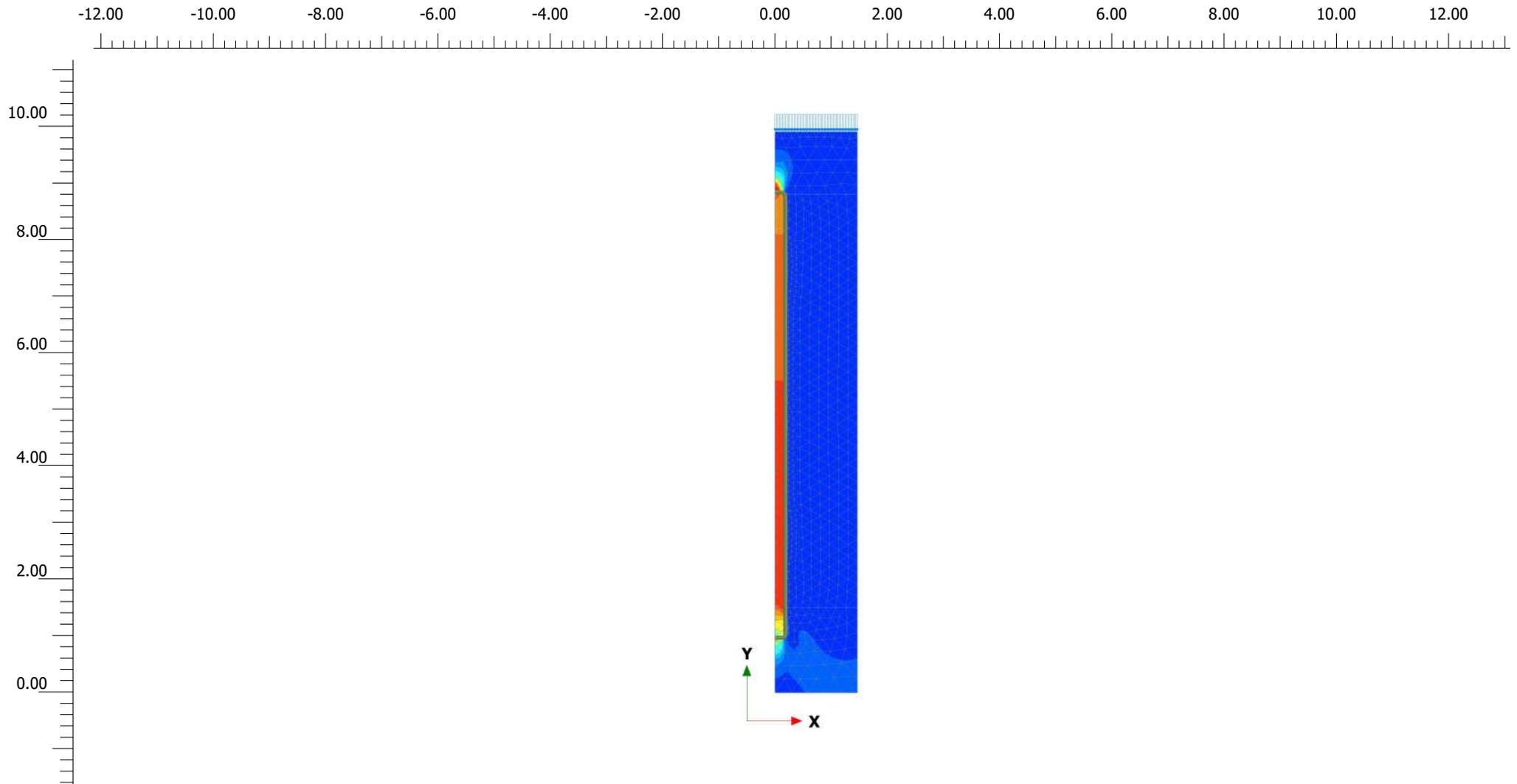
Project filename

hr=0.6, Req=1.2412 v2

Step

51

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 127.6 kN/m² (Element 90 at Node 533)

Minimum value = -3152 kN/m² (Element 113 at Node 9375)

PLAXIS

Project description

hr=0.6, Req=1.4669 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

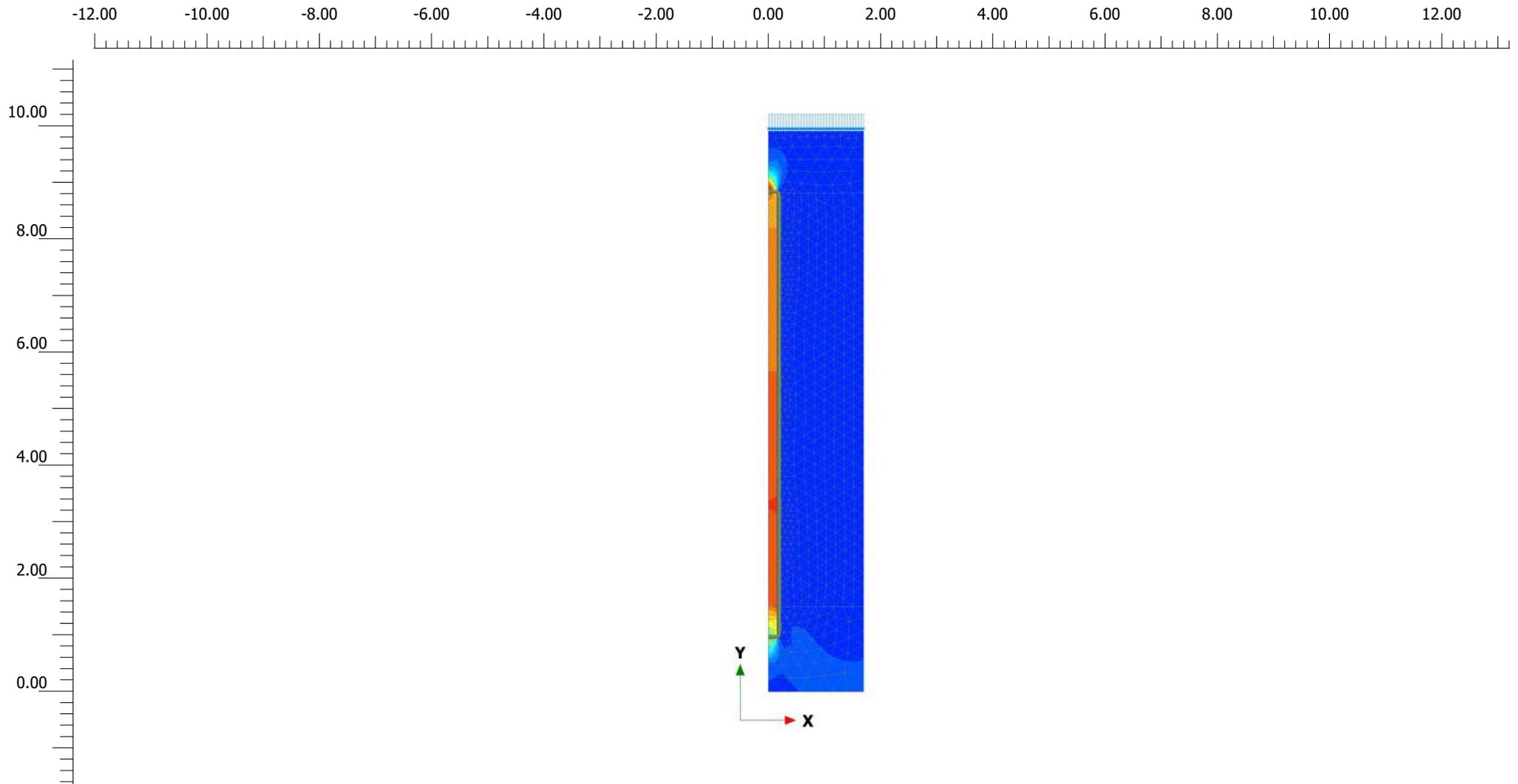
Project filename

hr=0.6, Req=1.4669 v2

Step

53

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 1.807 kN/m² (Element 108 at Node 463)

Minimum value = -3445 kN/m² (Element 205 at Node 255)



Project description

hr=0.6, Req=1.6926 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

Project filename

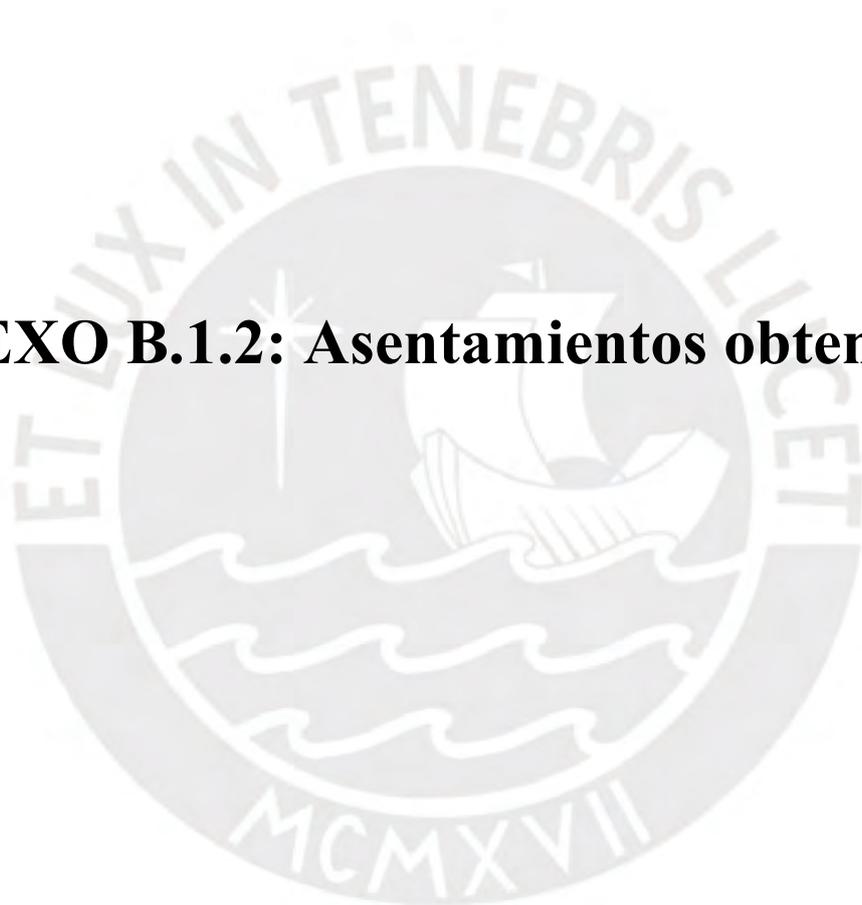
hr=0.6, Req=1.6926 v2

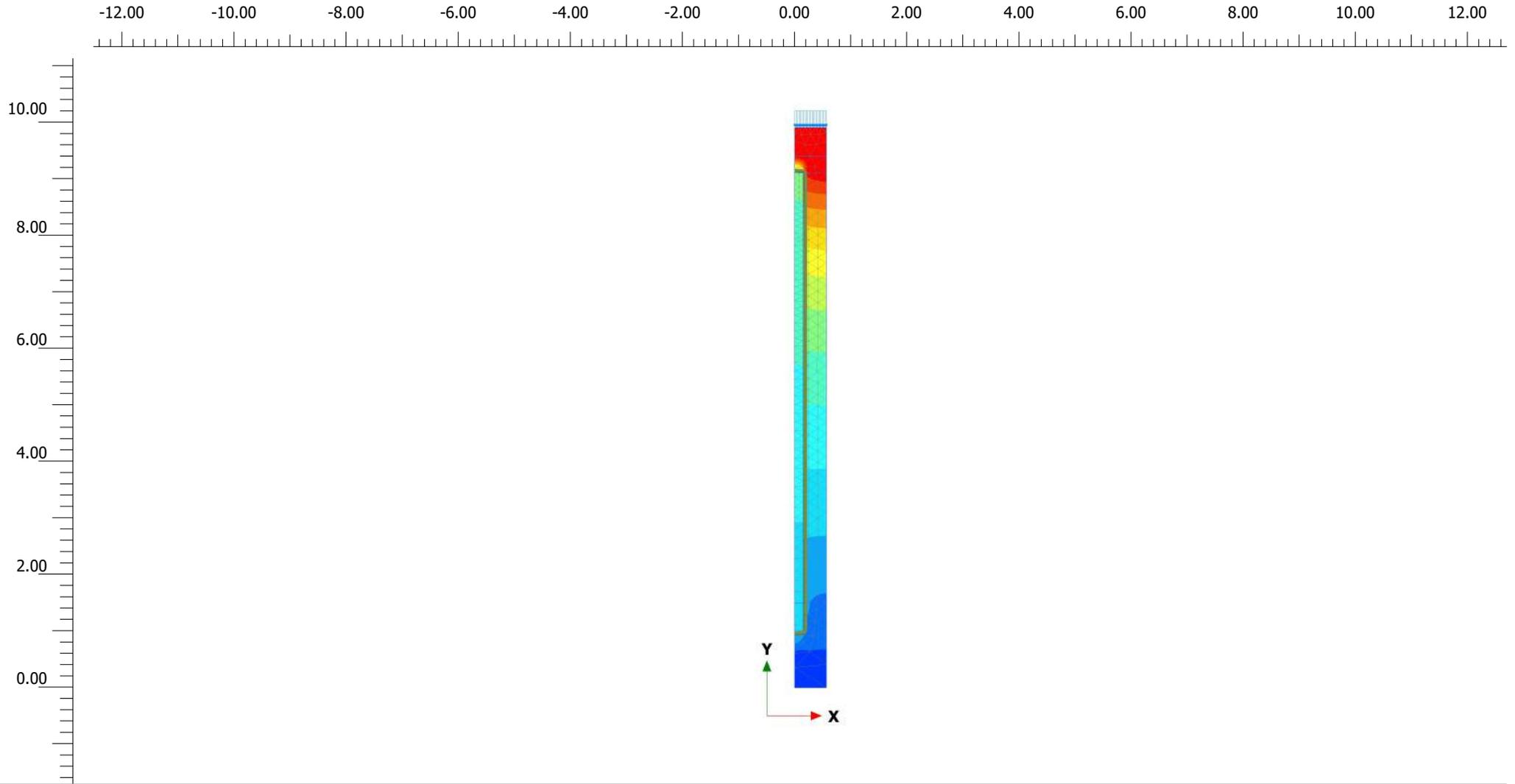
Step

42

Company

ANEXO B.1.2: Asentamientos obtenidos





Total displacements u_y (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 462 at Node 4567)

Minimum value = $-5.502 \cdot 10^{-3}$ m (Element 24 at Node 467)



Project description

hr=0.3, Req=0.5642 uy

Date

19/12/2021

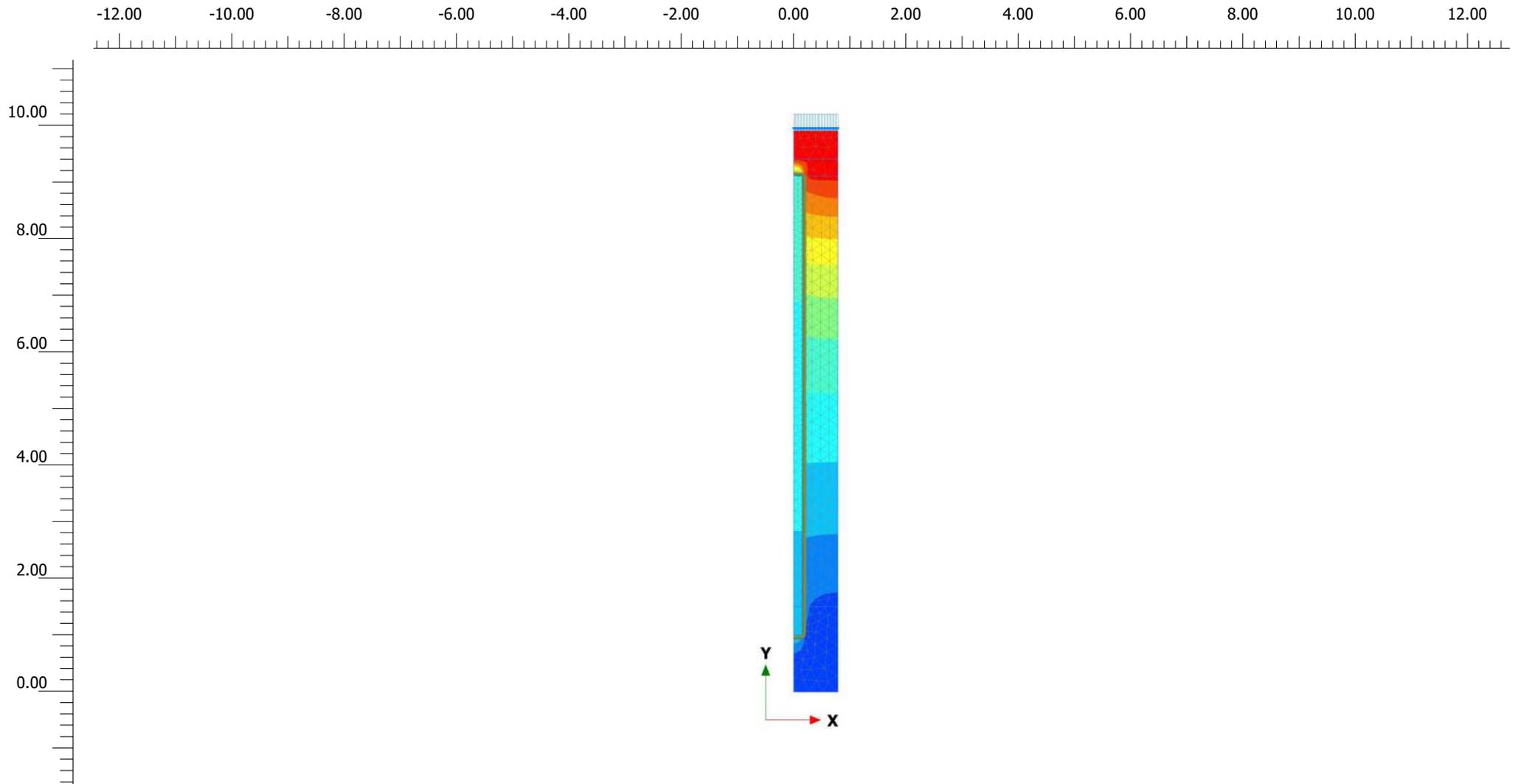
Project filename

hr=0.3, Req=0.5642 v2

Step

29

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 695 at Node 6629)

Minimum value = -0.01130 m (Element 39 at Node 571)



Project description

hr=0.3, Req=0.7899 uy

Date

19/12/2021

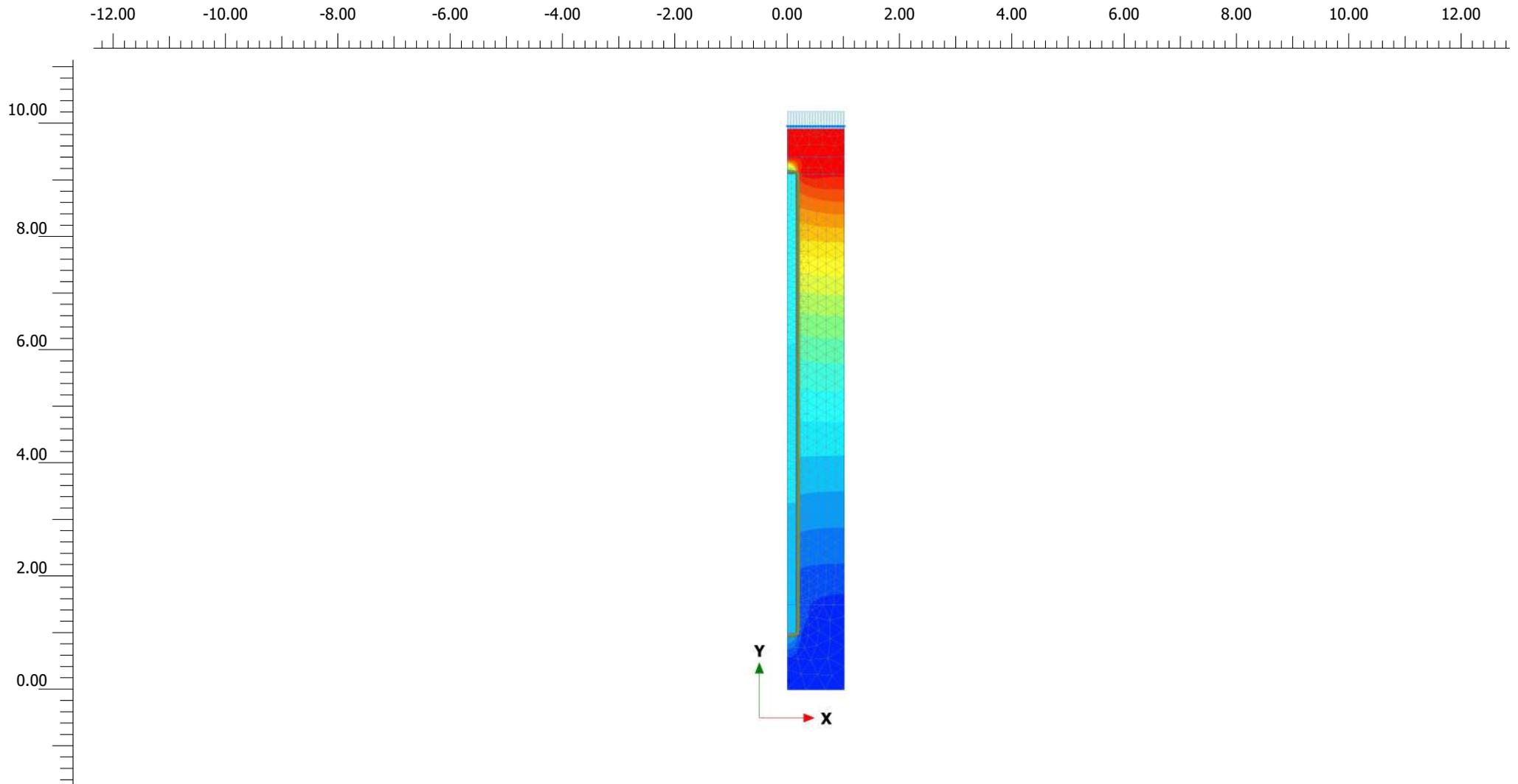
Project filename

hr=0.3, Req=0.7899 v2

Step

38

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = $4.796 \cdot 10^{-6}$ m (Element 829 at Node 7472)

Minimum value = -0.01949 m (Element 57 at Node 678)



Project description

hr=0.3, Req=1.0155 uy

Date

19/12/2021

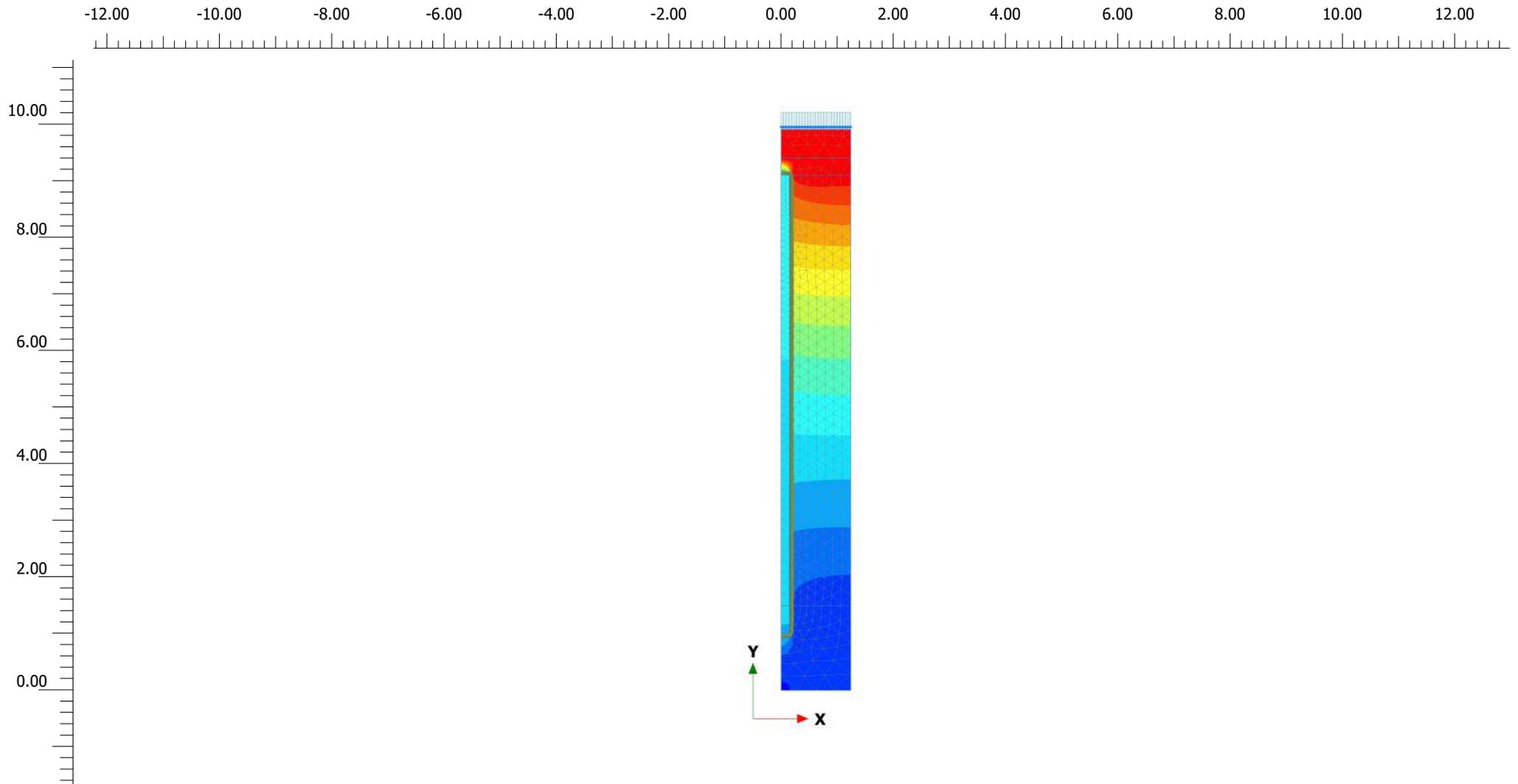
Project filename

hr=0.3, Req=1.0155 v2

Step

45

Company



Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = $8.898 \cdot 10^{-6}$ m (Element 958 at Node 9005)

Minimum value = -0.02777 m (Element 61 at Node 542)



Project description

hr=0.3, Req=1.2412 uy

Date

19/12/2021

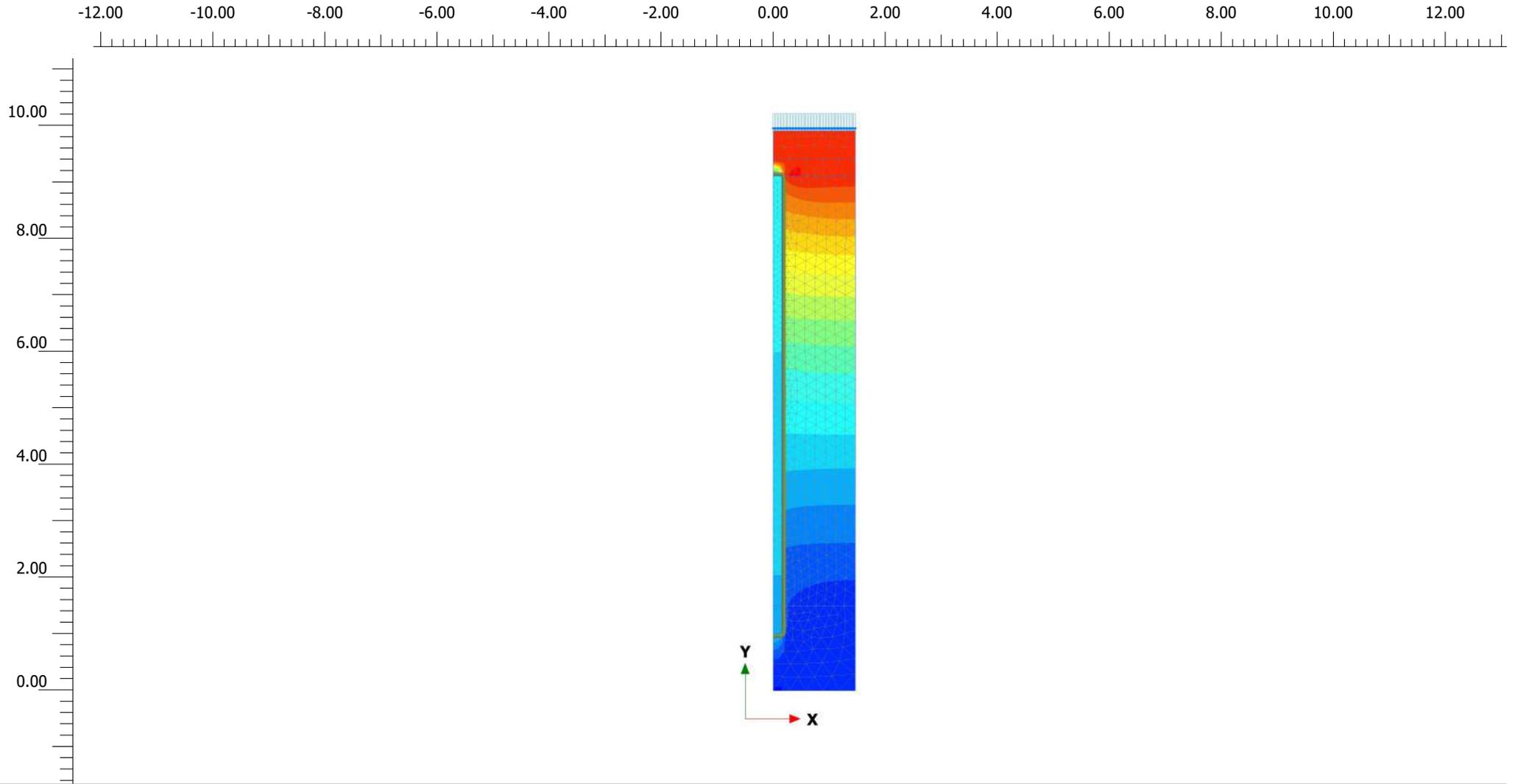
Project filename

hr=0.3, Req=1.2412 v2

Step

51

Company



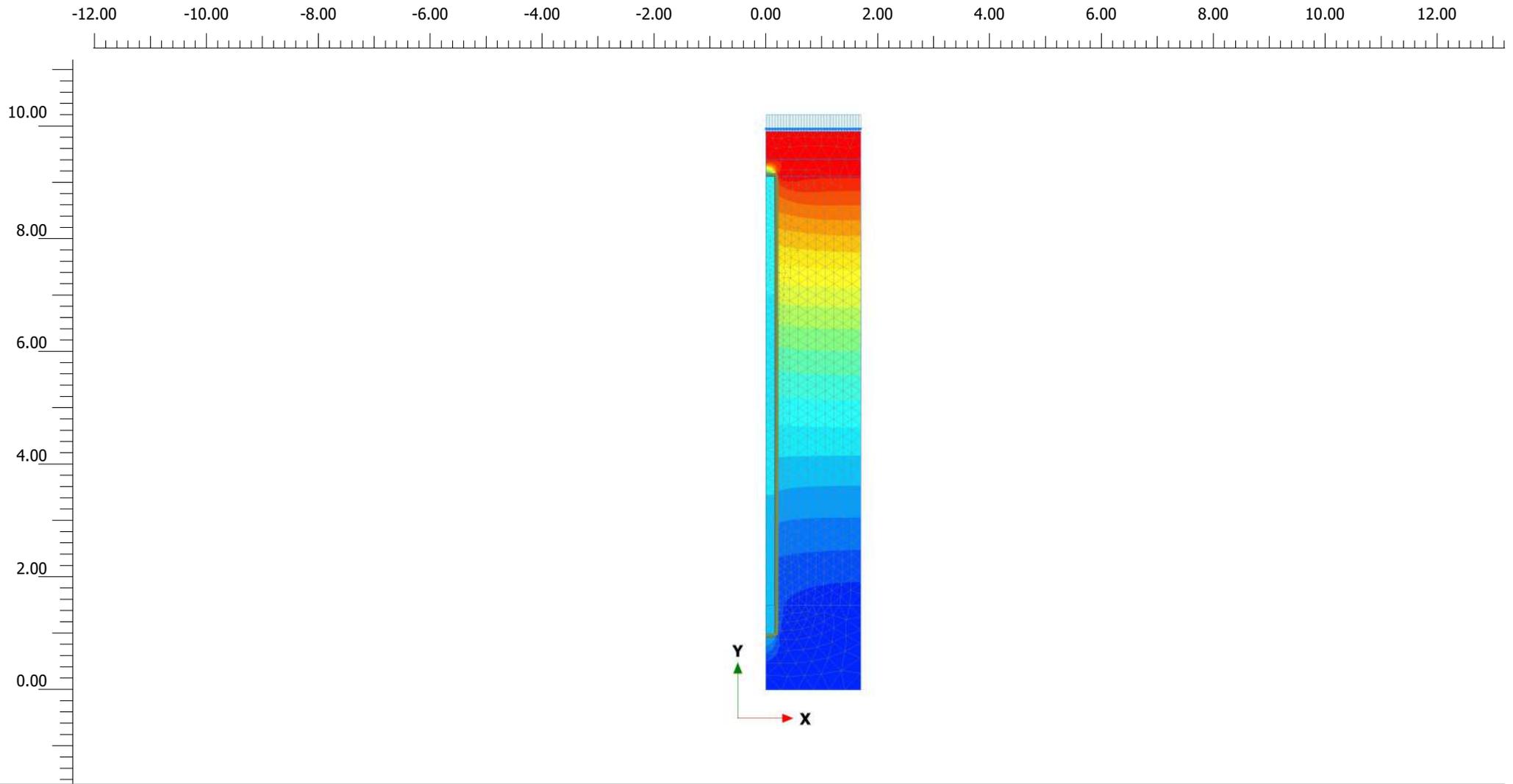
Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = $1.827 \cdot 10^{-6}$ m (Element 1033 at Node 9693)

Minimum value = -0.03417 m (Element 73 at Node 489)



<p><i>Project description</i> hr=0.3, Req=1.4669 uy</p>	<p><i>Date</i> 19/12/2021</p>
<p><i>Project filename</i> hr=0.3, Req=1.4669 v2</p>	<p><i>Step</i> 49</p> <p><i>Company</i></p>



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 1281 at Node 11570)

Minimum value = -0.03921 m (Element 87 at Node 352)



Project description

hr=0.3, Req=1.6926 uy

Date

19/12/2021

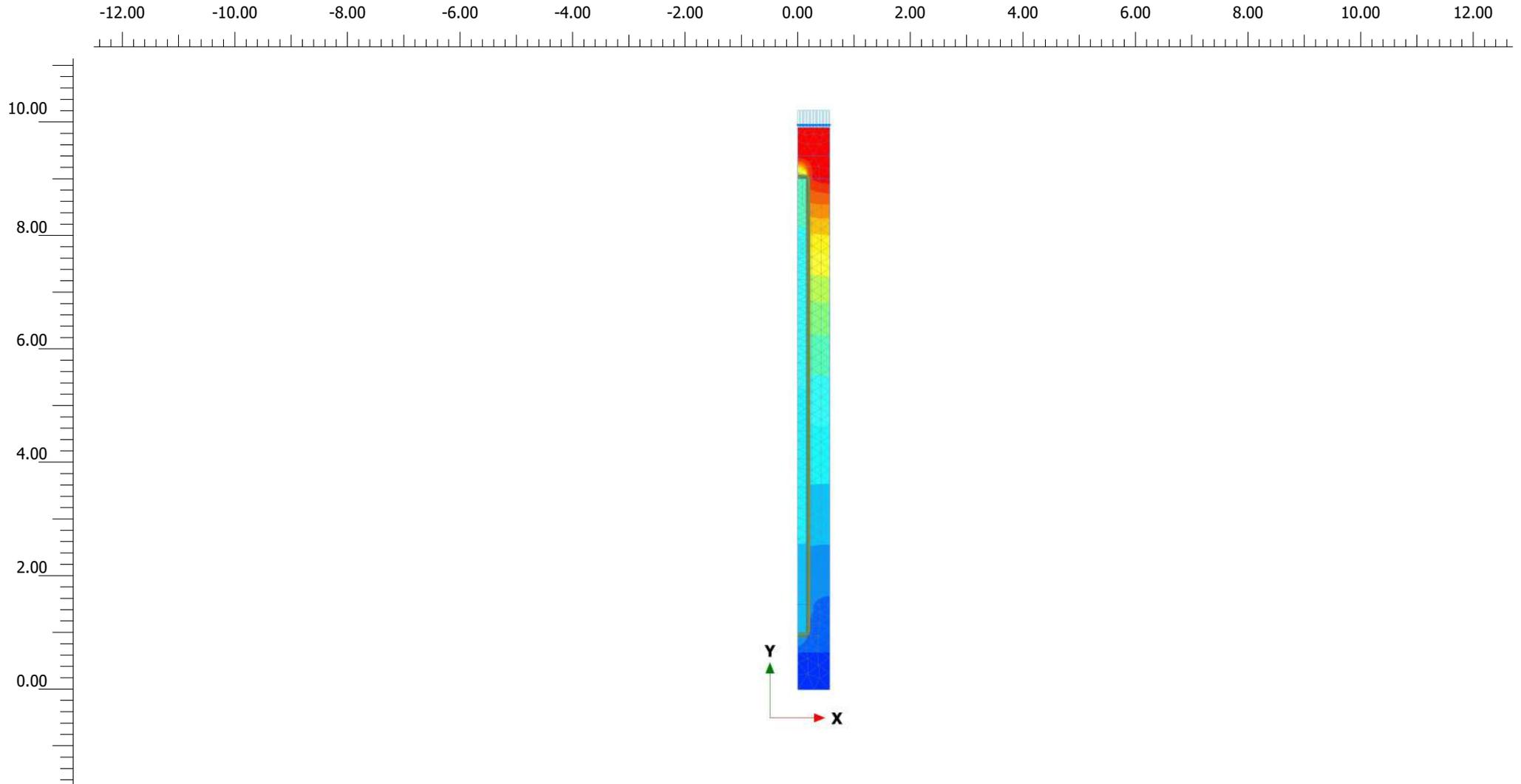
Project filename

hr=0.3, Req=1.6926 v2

Step

43

Company



Total displacements u_y (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 464 at Node 4673)

Minimum value = $-6.228 \cdot 10^{-3}$ m (Element 21 at Node 118)



Project description

hr=0.4, Req=0.5642 uy

Date

19/12/2021

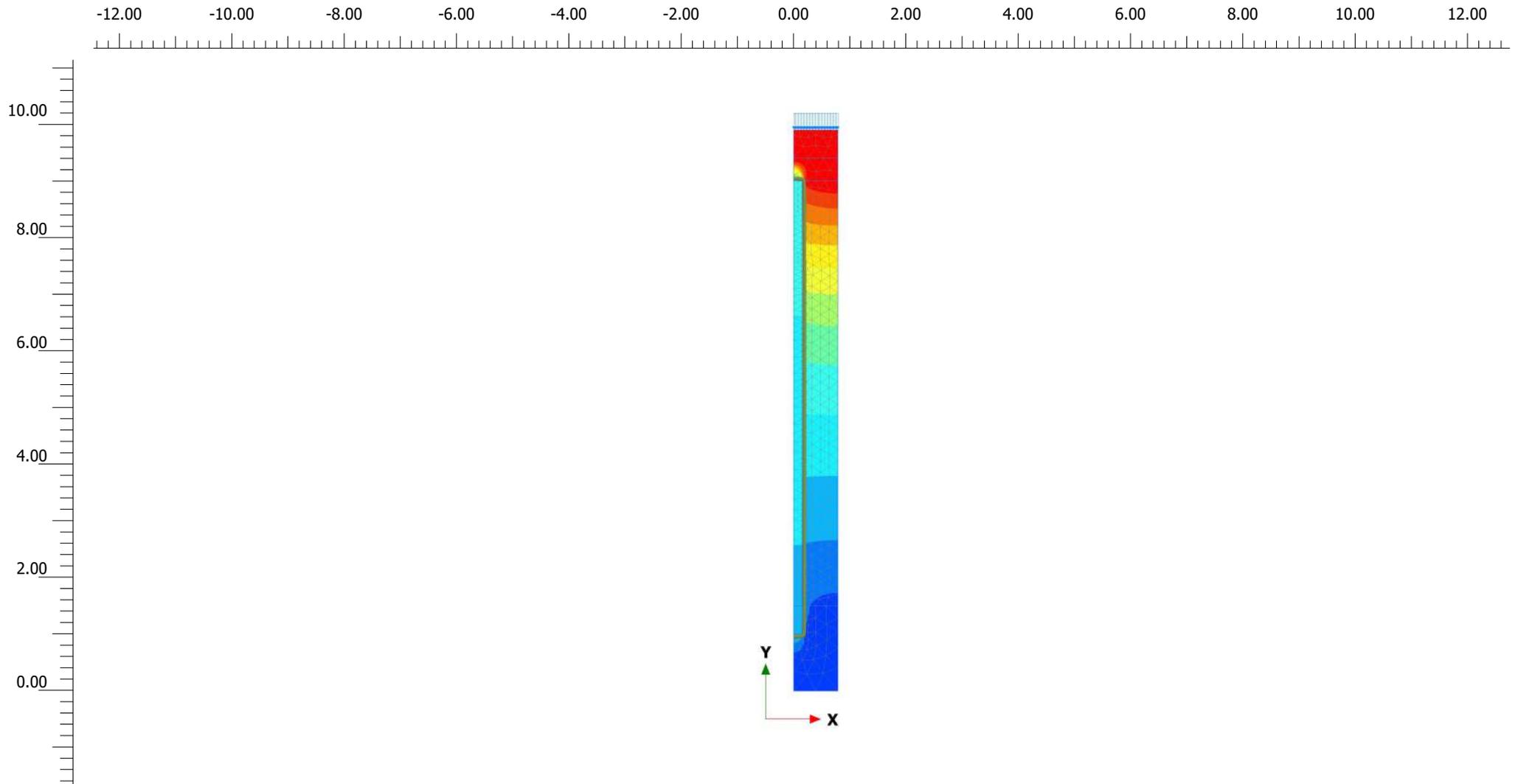
Project filename

hr=0.4, Req=0.5642 v2

Step

29

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 691 at Node 6547)

Minimum value = -0.01284 m (Element 40 at Node 604)



Project description

hr=0.4, Req=0.7899 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

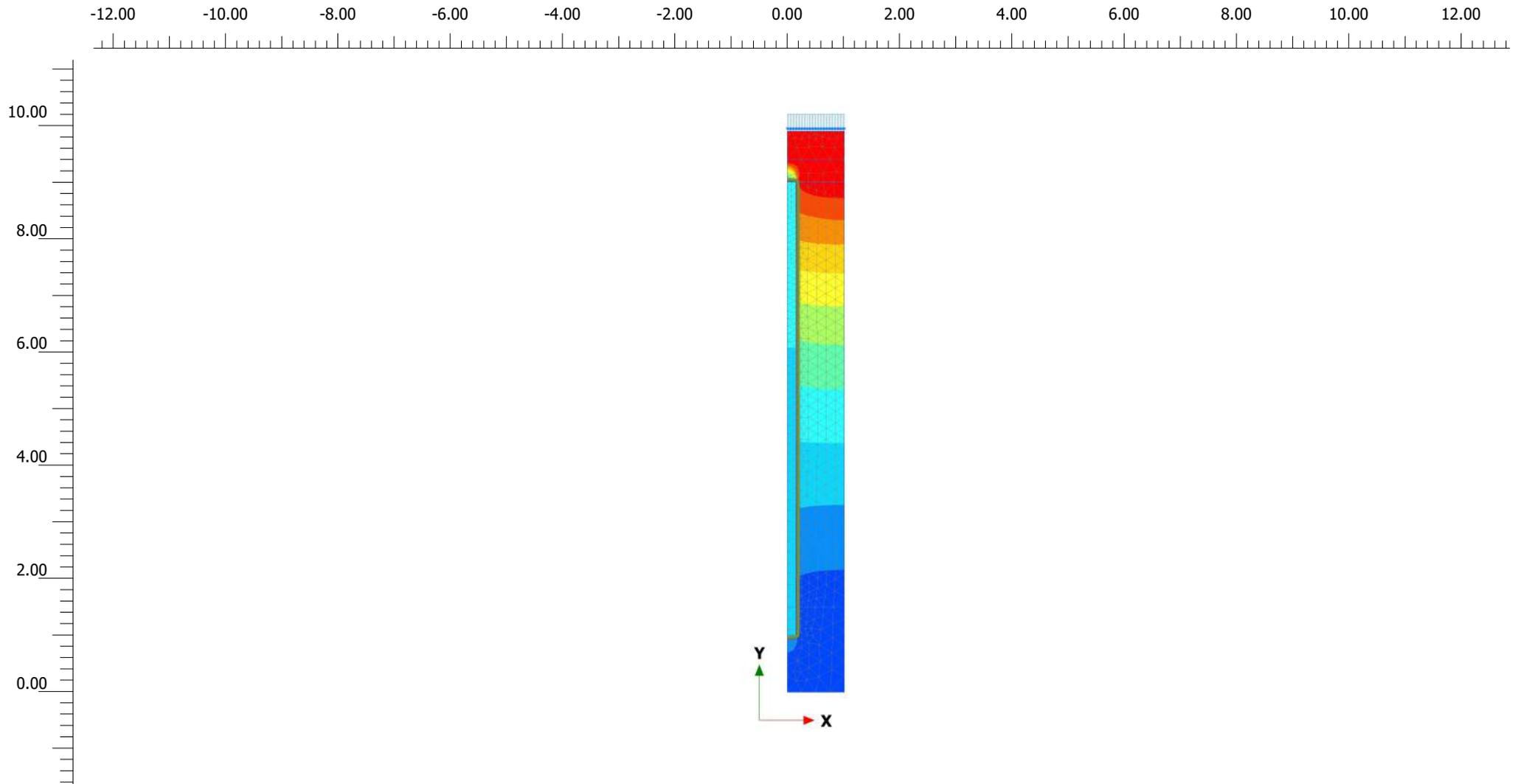
Project filename

hr=0.4, Req=0.7899 v2

Step

41

Company



Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = $1.076 \cdot 10^{-6}$ m (Element 830 at Node 7910)

Minimum value = -0.02159 m (Element 59 at Node 764)



Project description

hr=0.4, Req=1.0155 uy

Date

19/12/2021

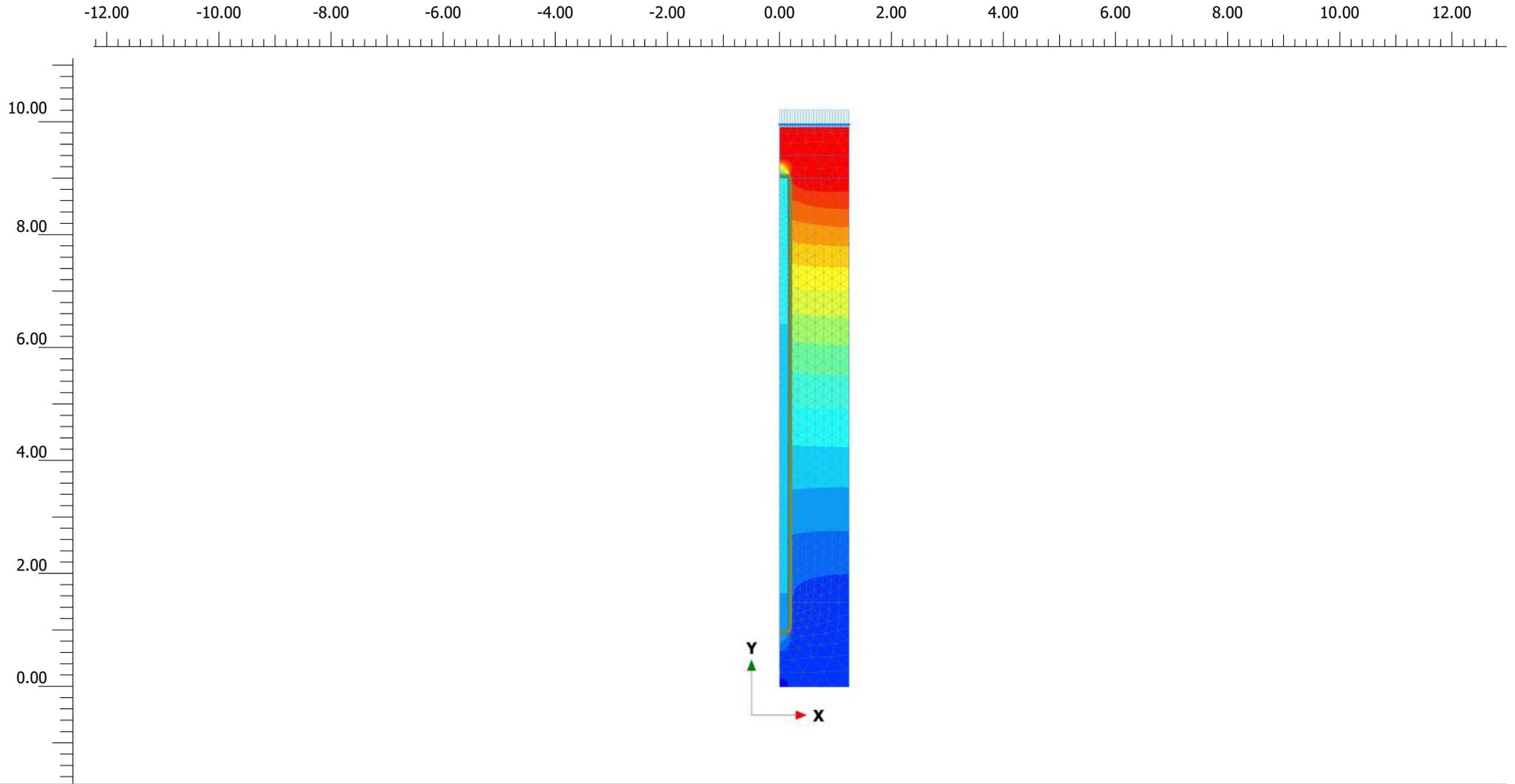
Project filename

hr=0.4, Req=1.0155 v2

Step

62

Company



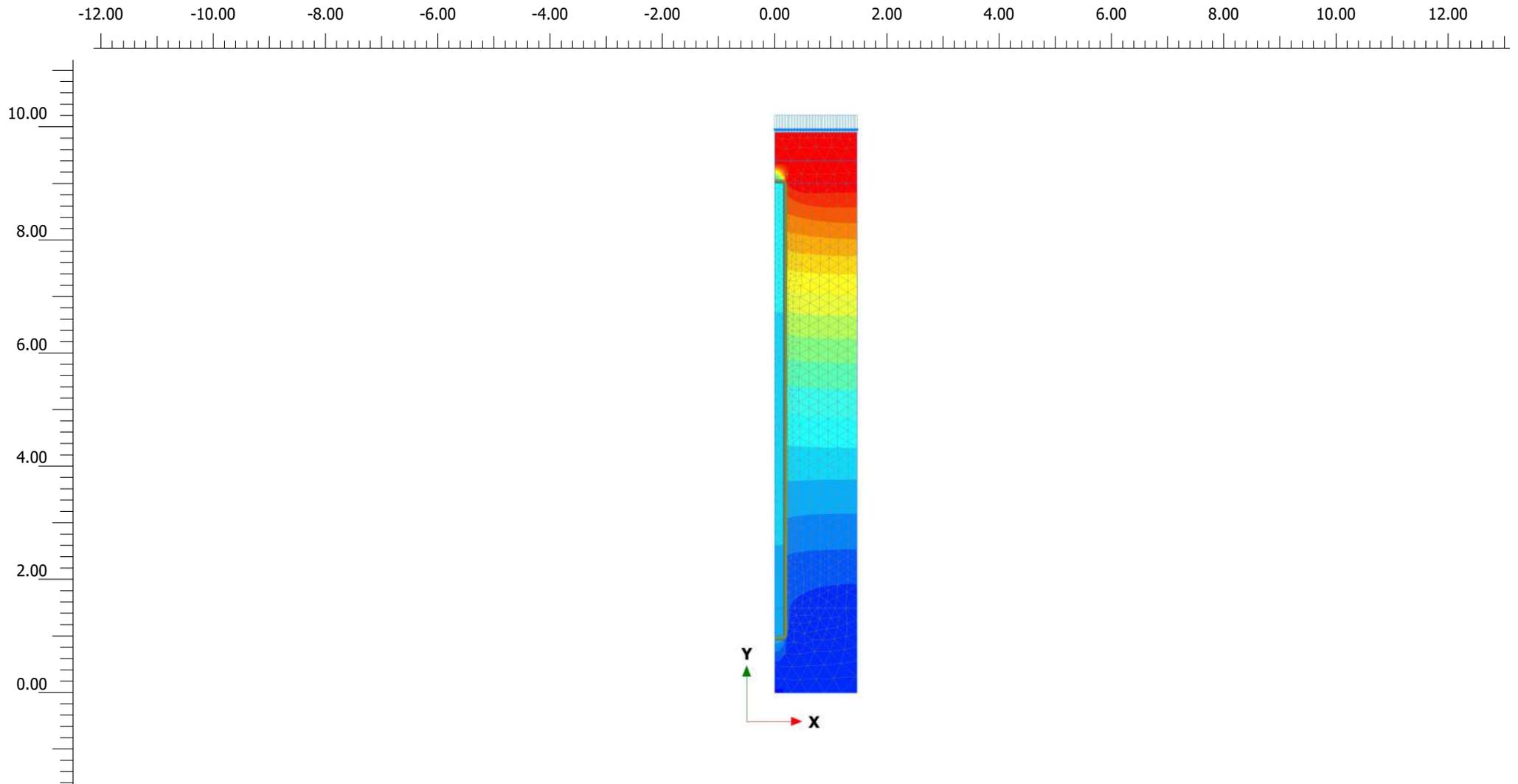
Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = $8.647 \cdot 10^{-6}$ m (Element 940 at Node 8857)

Minimum value = -0.02991 m (Element 64 at Node 719)



<p><i>Project description</i> hr=0.4, Req=1.2412 uy</p>	<p><i>Date</i> 19/12/2021</p>
<p><i>Project filename</i> hr=0.4, Req=1.2412 v2</p>	<p><i>Step</i> 50</p> <p><i>Company</i></p>



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = $2.519 \cdot 10^{-6}$ m (Element 1154 at Node 10662)

Minimum value = -0.03572 m (Element 75 at Node 828)



Project description

hr=0.4, Req=1.4669 uy

Date

19/12/2021

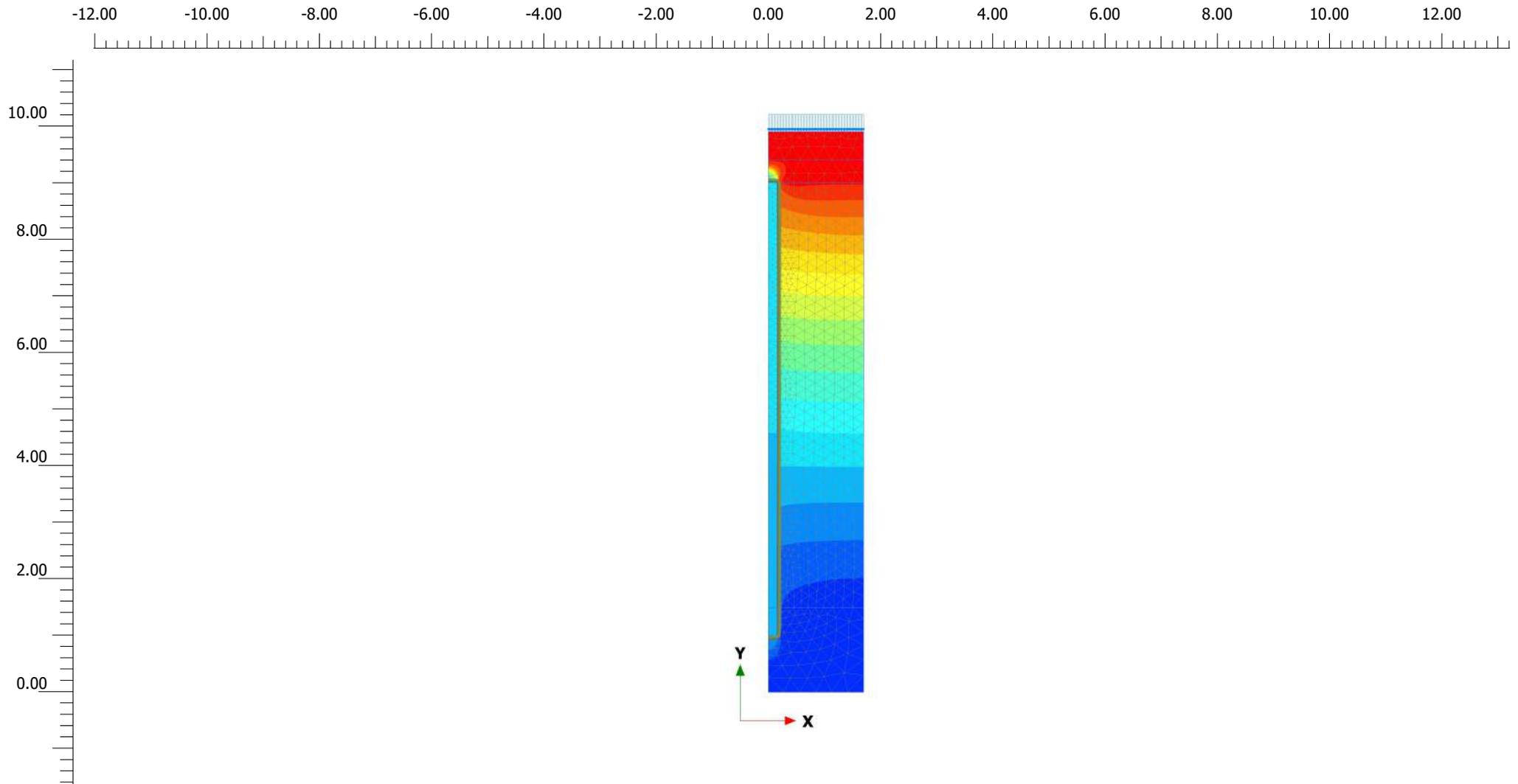
Project filename

hr=0.4, Req=1.4669 v2

Step

52

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 1241 at Node 11158)

Minimum value = -0.04074 m (Element 92 at Node 936)



Project description

hr=0.4, Req=1.6926 uy

Date

19/12/2021

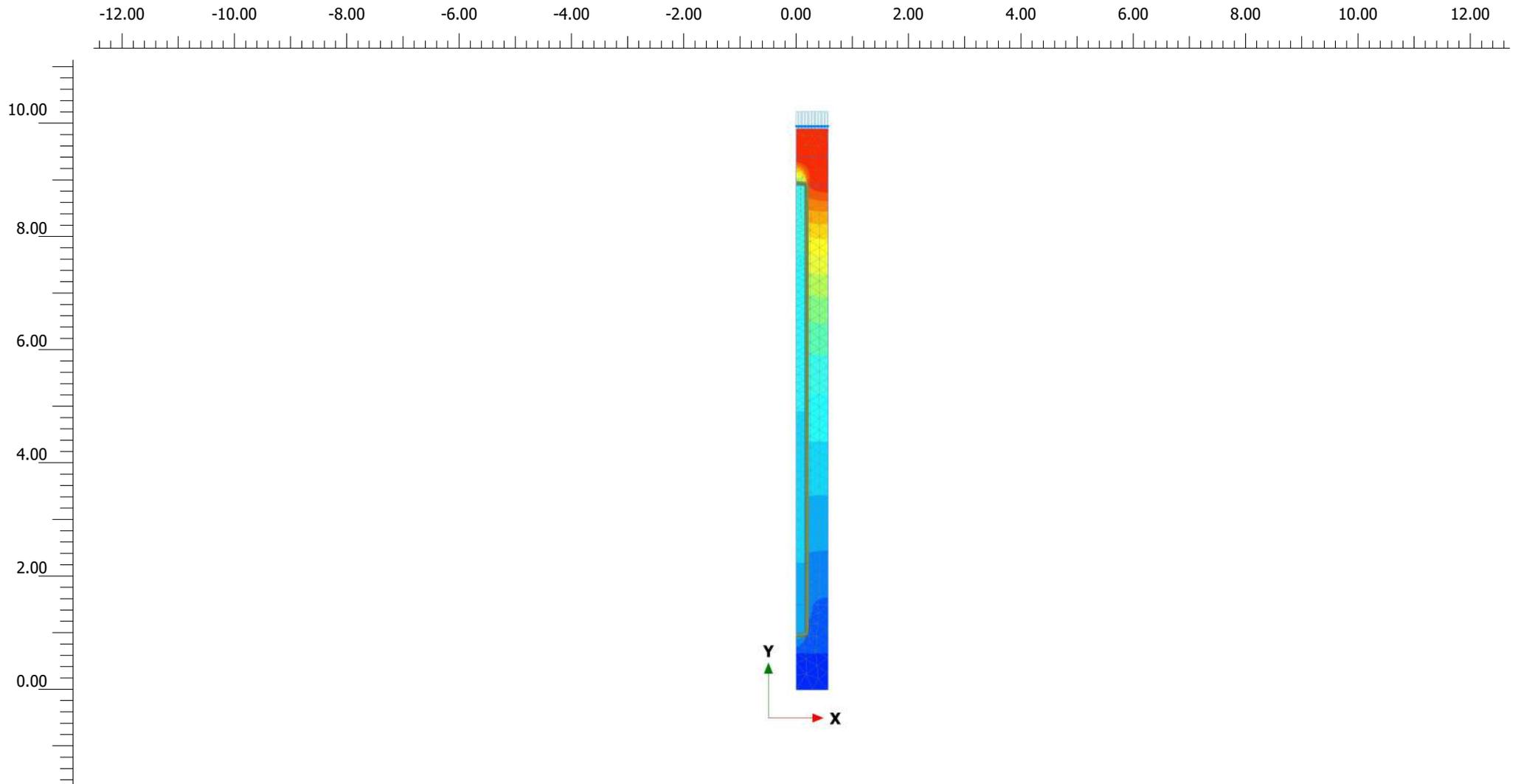
Project filename

hr=0.4, Req=1.6926 v2

Step

44

Company



Total displacements u_y (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 466 at Node 4685)

Minimum value = $-6.798 \cdot 10^{-3}$ m (Element 21 at Node 118)



Project description

hr=0.5, Req=0.5642 uy

Date

19/12/2021

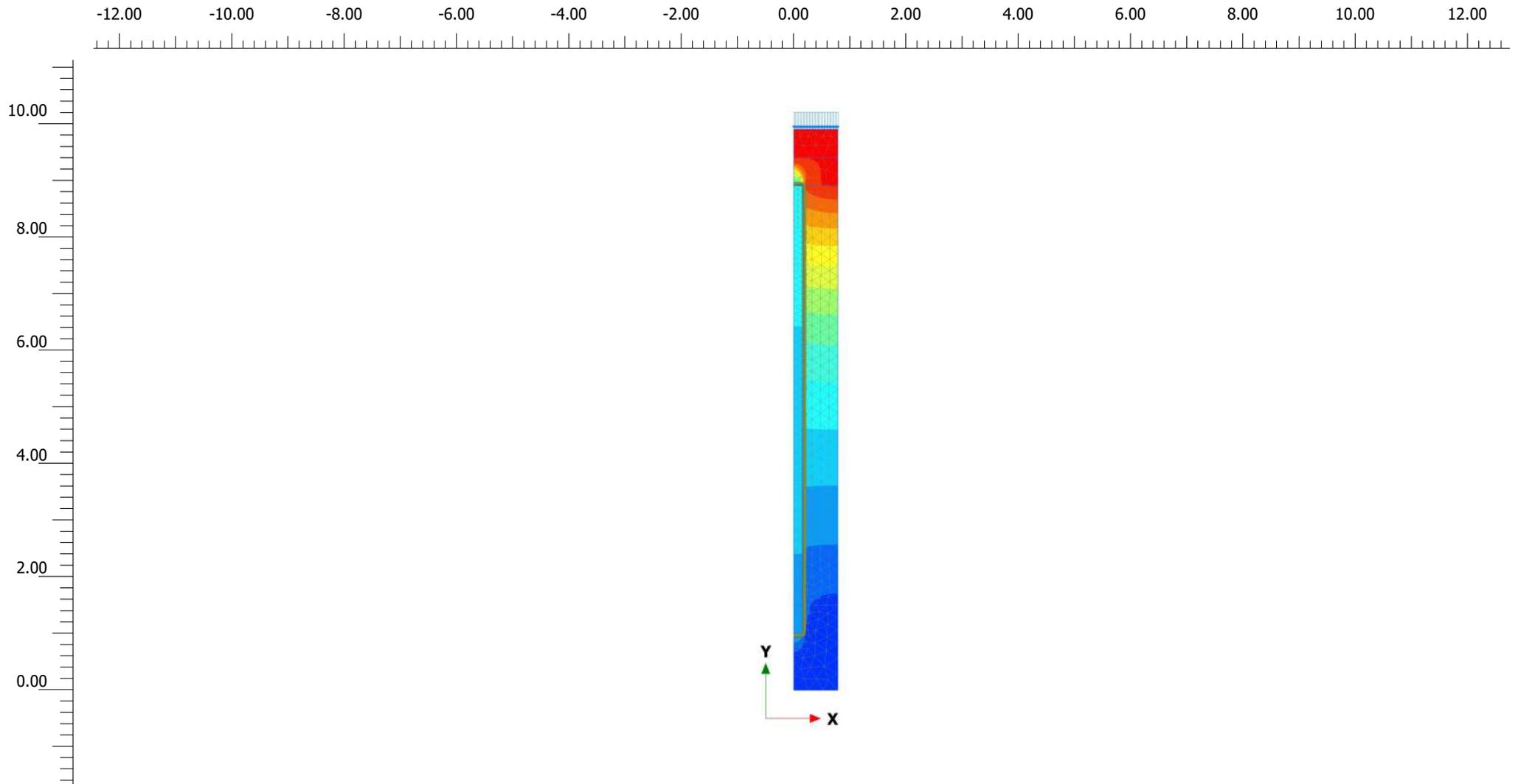
Project filename

hr=0.5, Req=0.5642 v2

Step

30

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 701 at Node 6669)

Minimum value = -0.01406 m (Element 30 at Node 276)



Project description

hr=0.5, Req=0.7899 uy

Date

19/12/2021

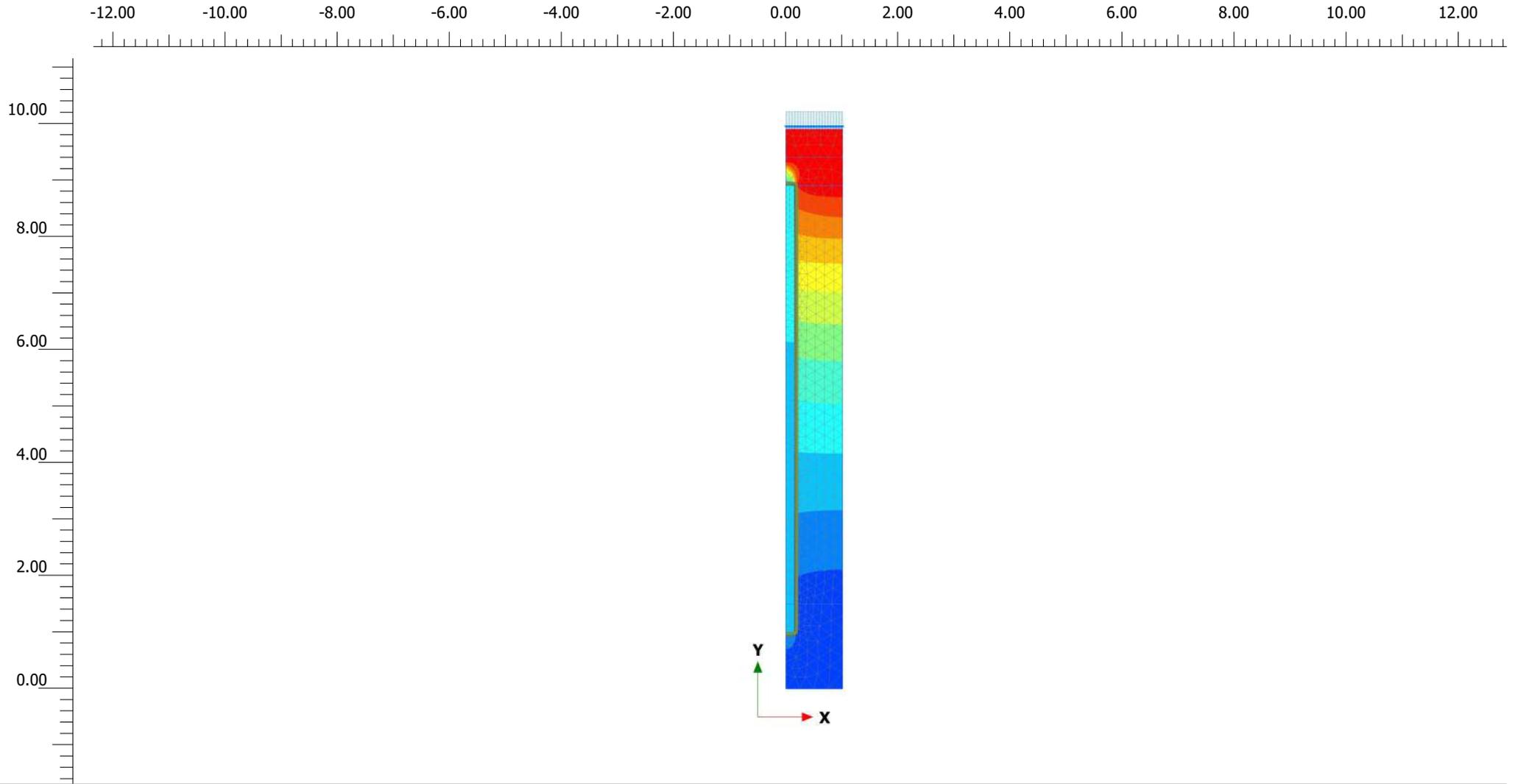
Project filename

hr=0.5, Req=0.7899 v2

Step

41

Company



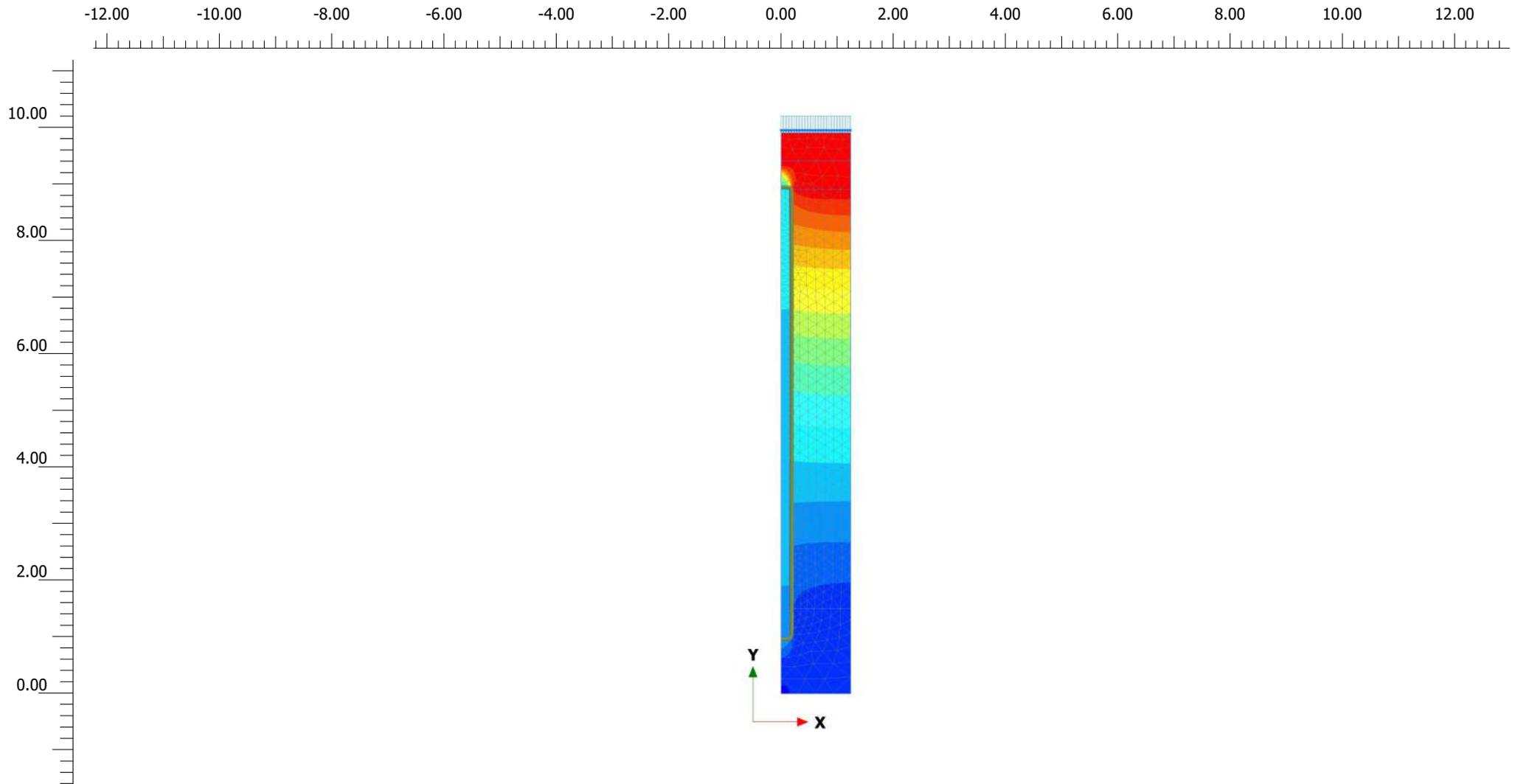
Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 835 at Node 7820)

Minimum value = -0.02326 m (Element 40 at Node 418)



<i>Project description</i> hr=0.5, Req=1.0155 uy		<i>Date</i> 19/12/2021	
<i>Project filename</i> hr=0.5, Req=1.0155 v2	<i>Step</i> 60	<i>Company</i>	



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = $8.107 \cdot 10^{-6}$ m (Element 957 at Node 8987)

Minimum value = -0.03142 m (Element 44 at Node 695)



Project description

hr=0.5, Req=1.2412 uy

Date

19/12/2021

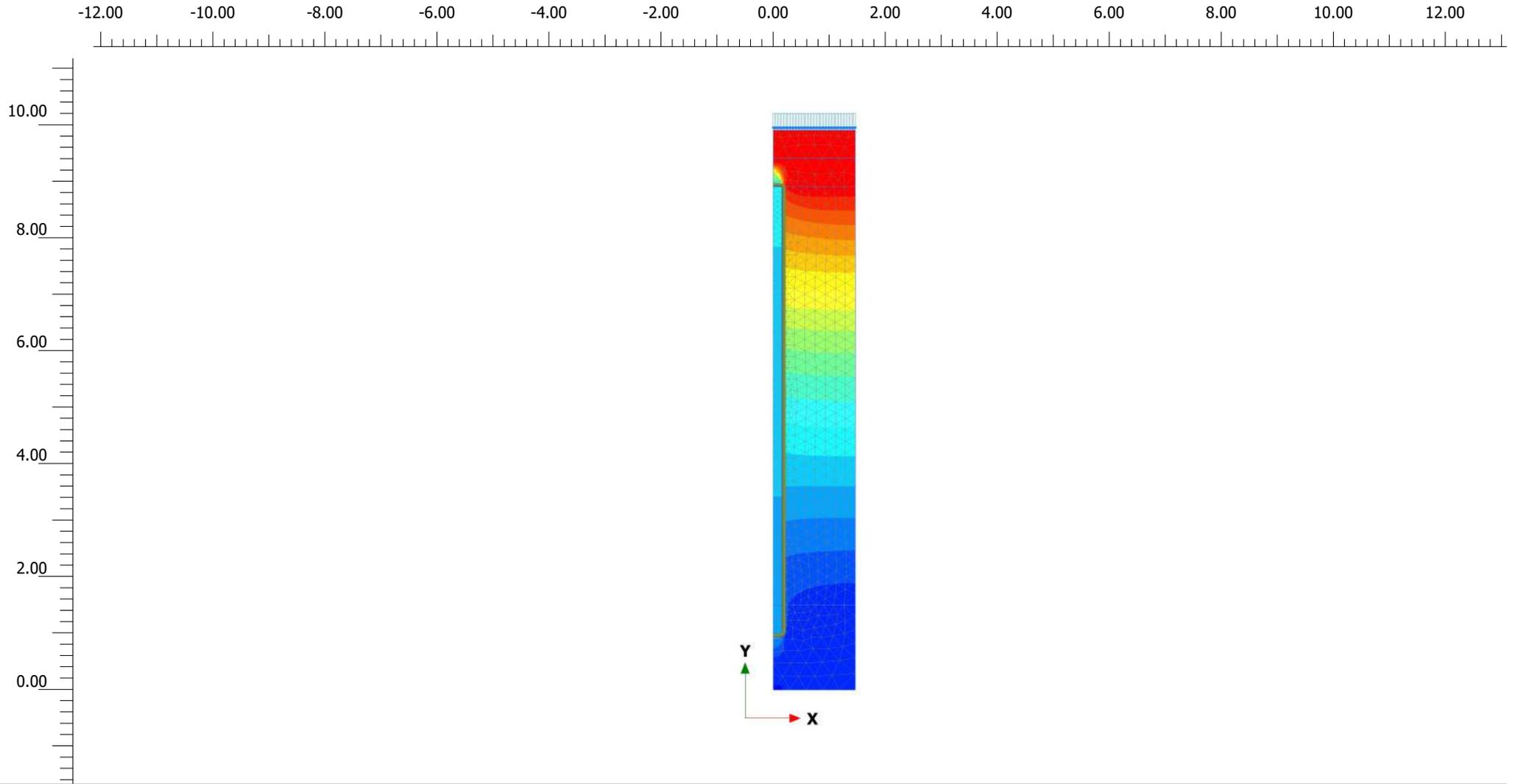
Project filename

hr=0.5, Req=1.2412 v2

Step

53

Company



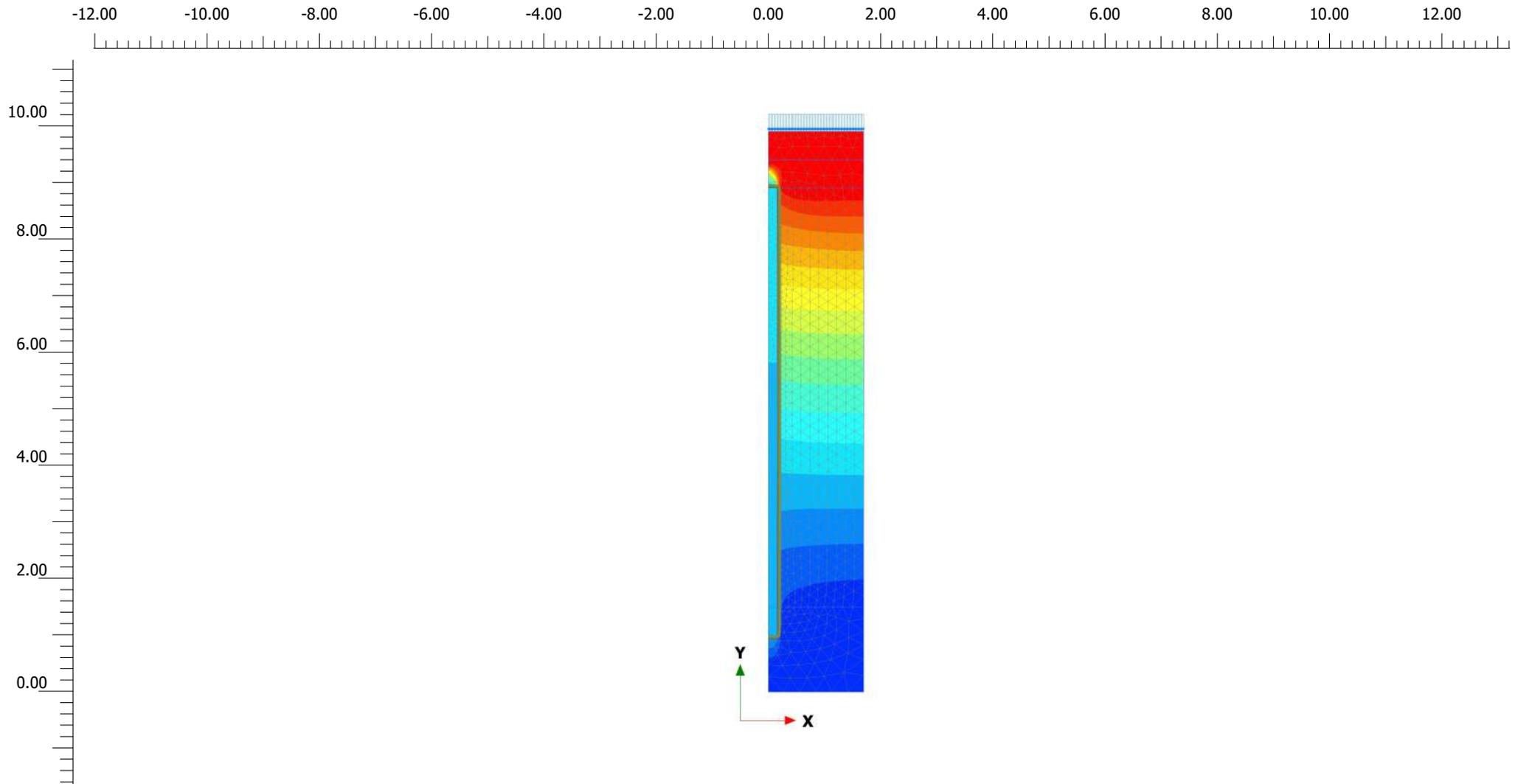
Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = $4.720 \cdot 10^{-6}$ m (Element 1014 at Node 9538)

Minimum value = -0.03775 m (Element 67 at Node 826)



<i>Project description</i> hr=0.5, Req=1.4669 uy		<i>Date</i> 19/12/2021	
<i>Project filename</i> hr=0.5, Req=1.4669 v2	<i>Step</i> 48	<i>Company</i>	



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 1273 at Node 11326)

Minimum value = -0.04242 m (Element 80 at Node 922)



Project description

hr=0.5, Req=1.6926 uy

Date

19/12/2021

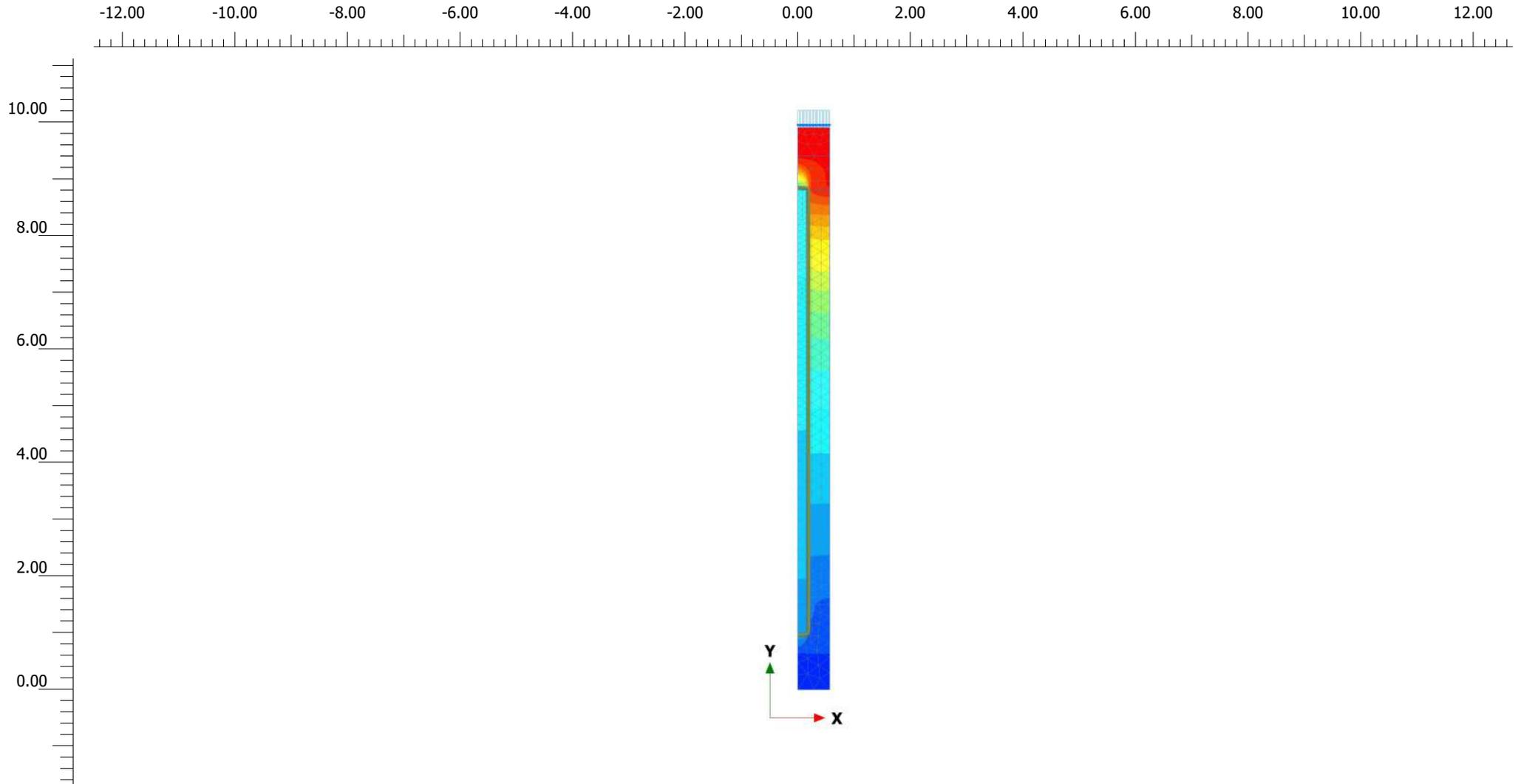
Project filename

hr=0.5, Req=1.6926 v2

Step

47

Company



Total displacements u_y (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 460 at Node 4633)

Minimum value = $-7.291 \cdot 10^{-3}$ m (Element 21 at Node 92)



Project description

hr=0.6, Req=0.5642 uy

Date

19/12/2021

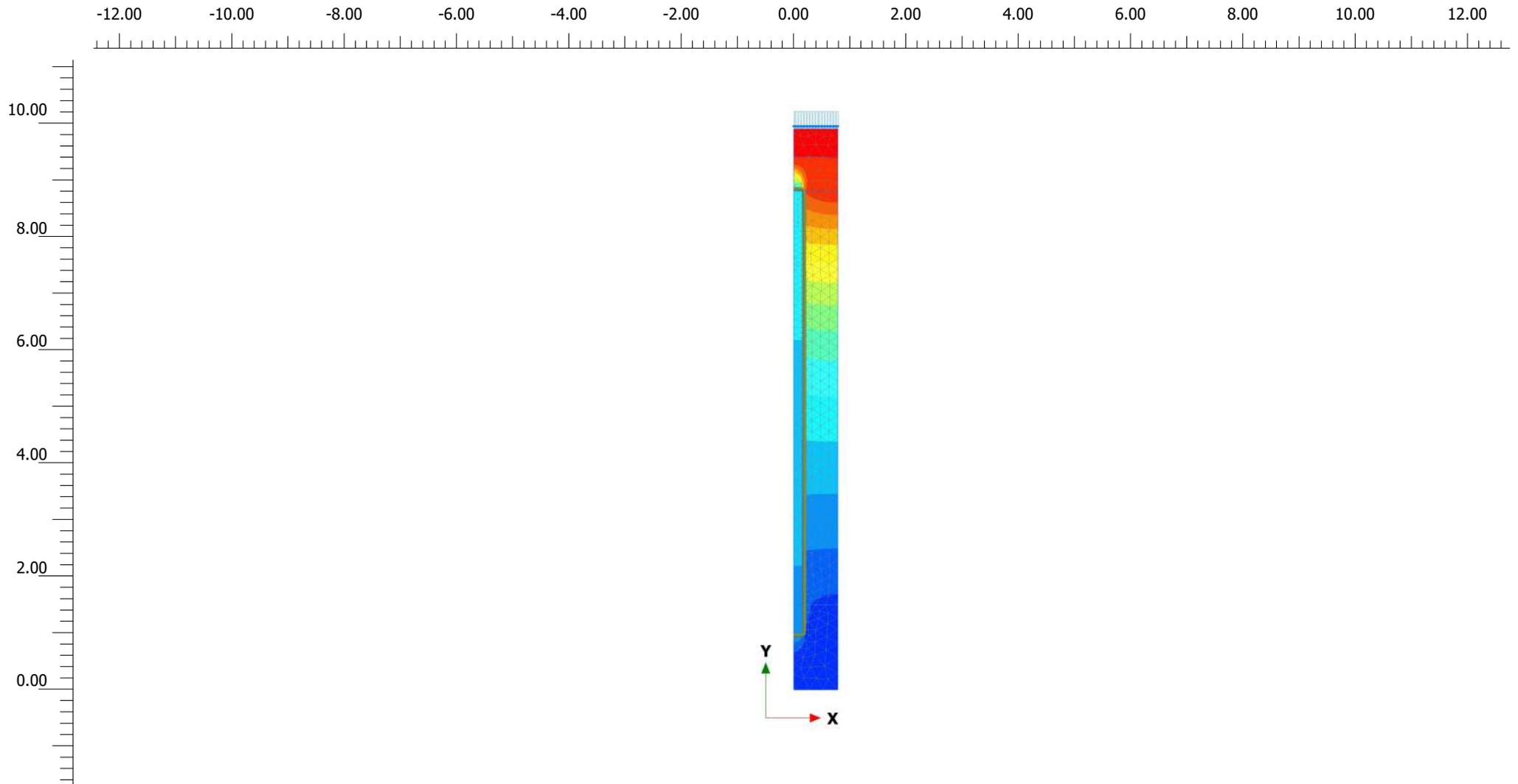
Project filename

hr=0.6, Req=0.5642 v2

Step

33

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 683 at Node 6521)

Minimum value = -0.01501 m (Element 30 at Node 150)



Project description

hr=0.6, Req=0.7899 uy

Date

19/12/2021

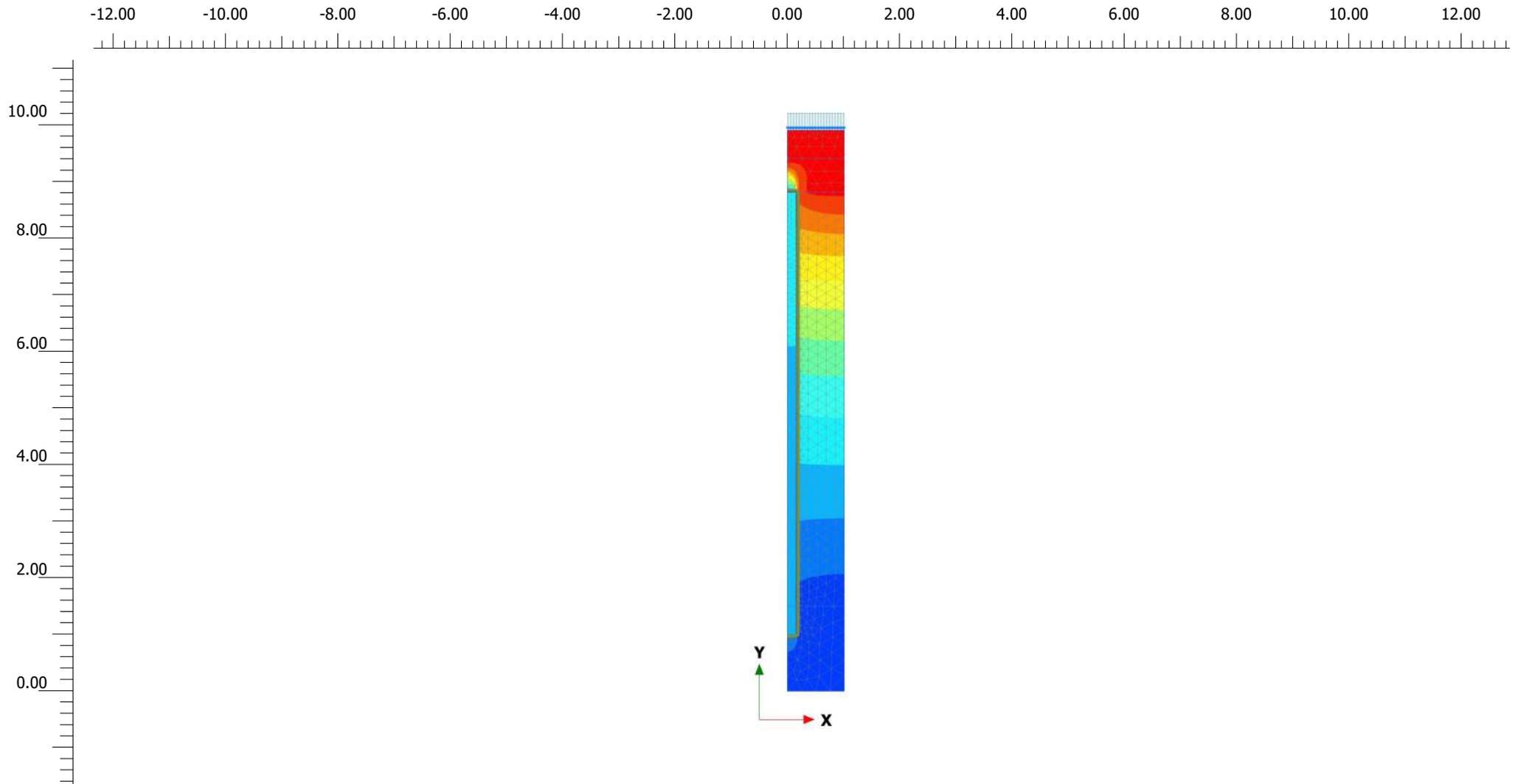
Project filename

hr=0.6, Req=0.7899 v2

Step

42

Company



Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 813 at Node 7640)

Minimum value = -0.02449 m (Element 40 at Node 214)



Project description

hr=0.6, Req=1.0155 uy

Date

19/12/2021

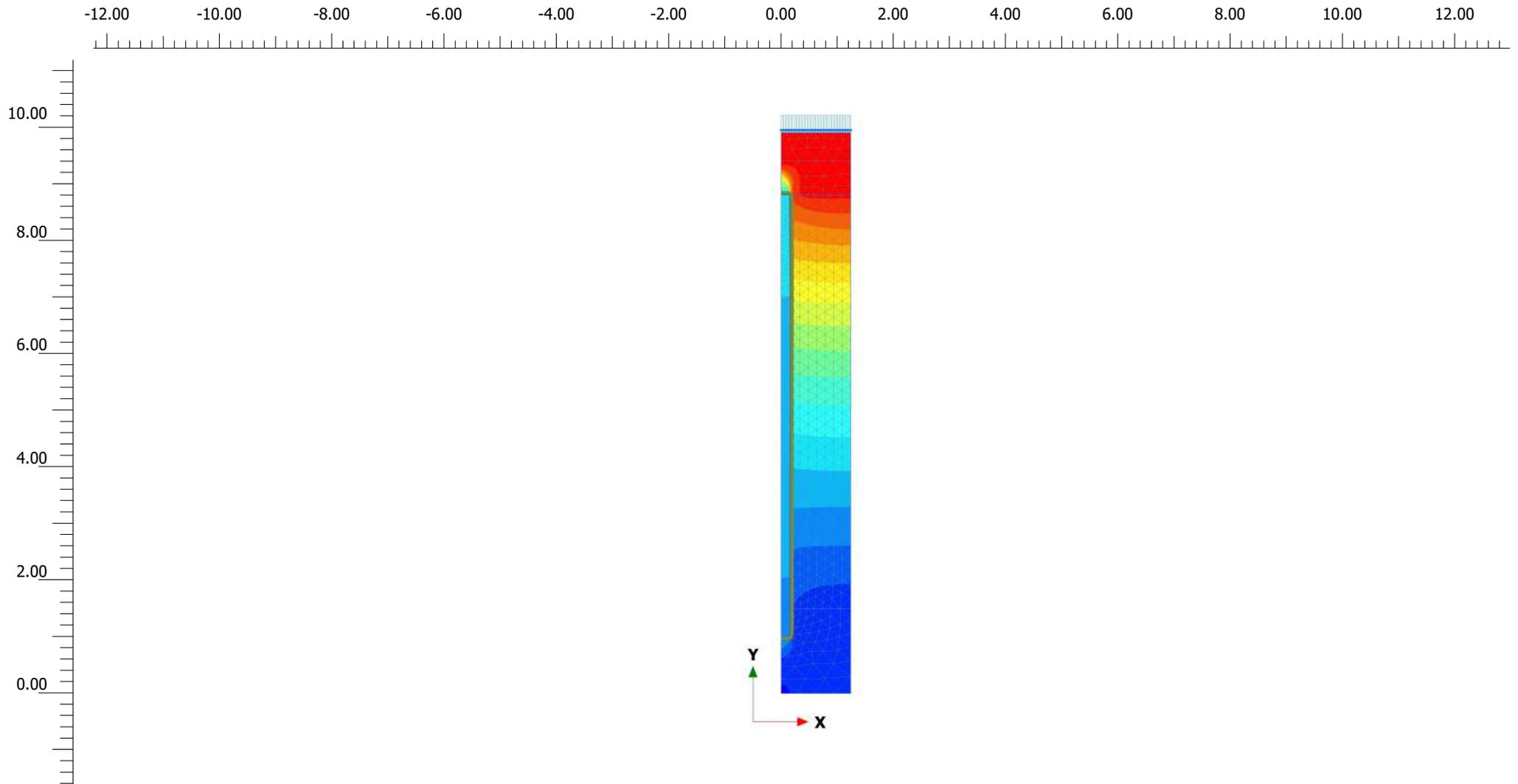
Project filename

hr=0.6, Req=1.0155 v2

Step

69

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = $7.439 \cdot 10^{-6}$ m (Element 930 at Node 8769)

Minimum value = -0.03268 m (Element 42 at Node 202)



Project description

hr=0.6, Req=1.2412 uy

Date

19/12/2021

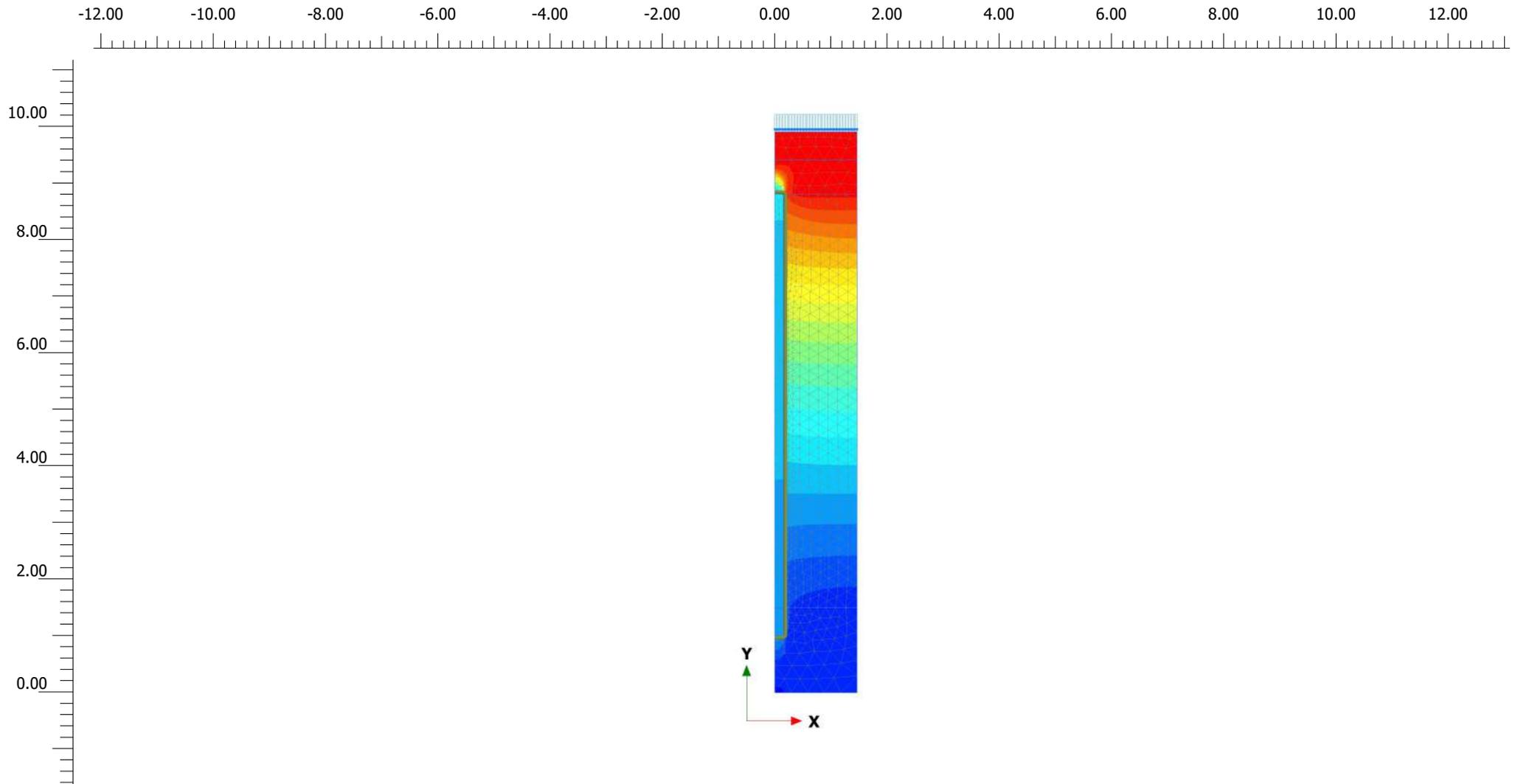
Project filename

hr=0.6, Req=1.2412 v2

Step

51

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = $5.497 \cdot 10^{-6}$ m (Element 1134 at Node 10494)

Minimum value = -0.03879 m (Element 52 at Node 218)



Project description

hr=0.6, Req=1.4669 uy

Date

19/12/2021

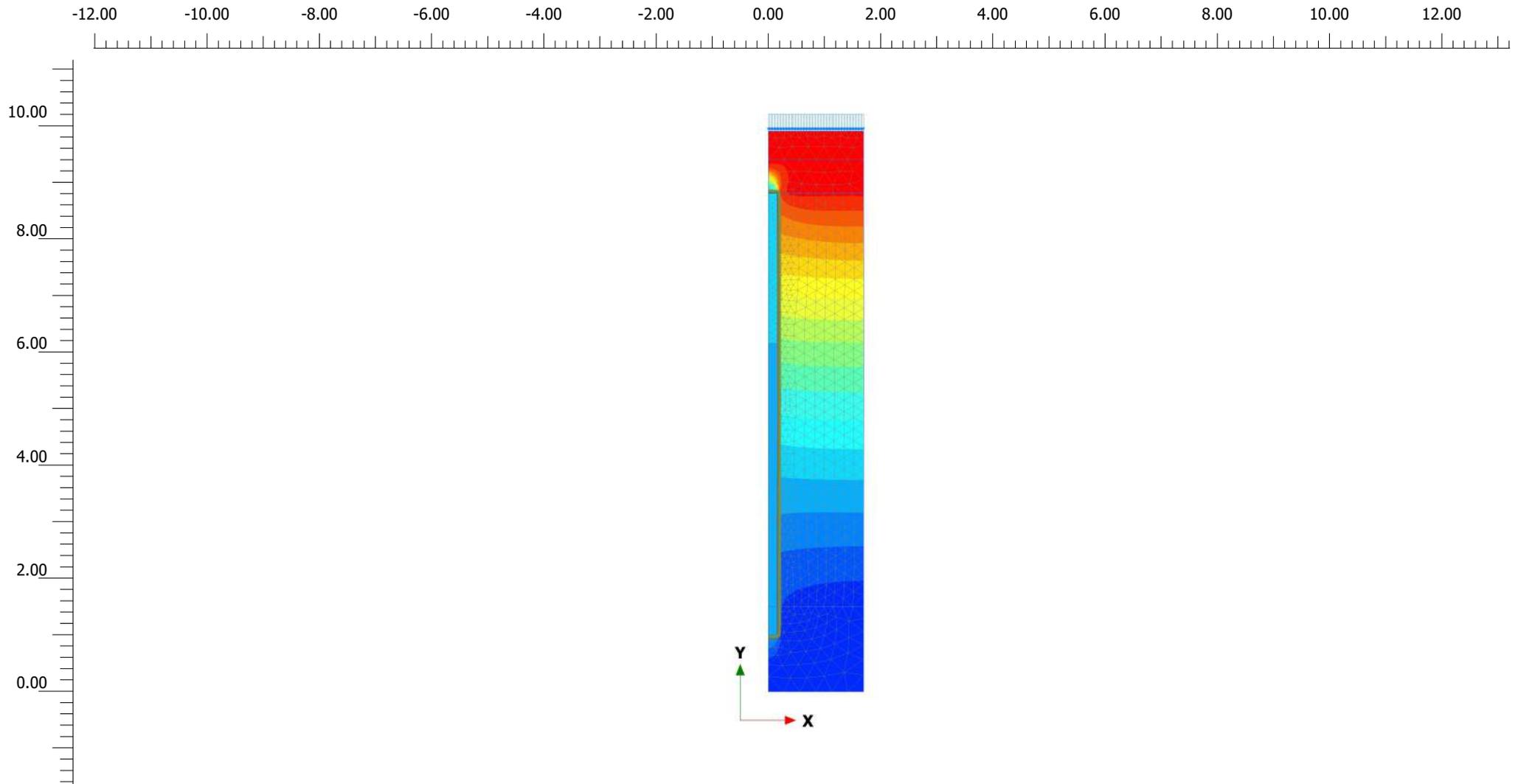
Project filename

hr=0.6, Req=1.4669 v2

Step

53

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 1229 at Node 11365)

Minimum value = -0.04326 m (Element 61 at Node 704)



Project description

hr=0.6, Req=1.6926 uy

Date

19/12/2021

Project filename

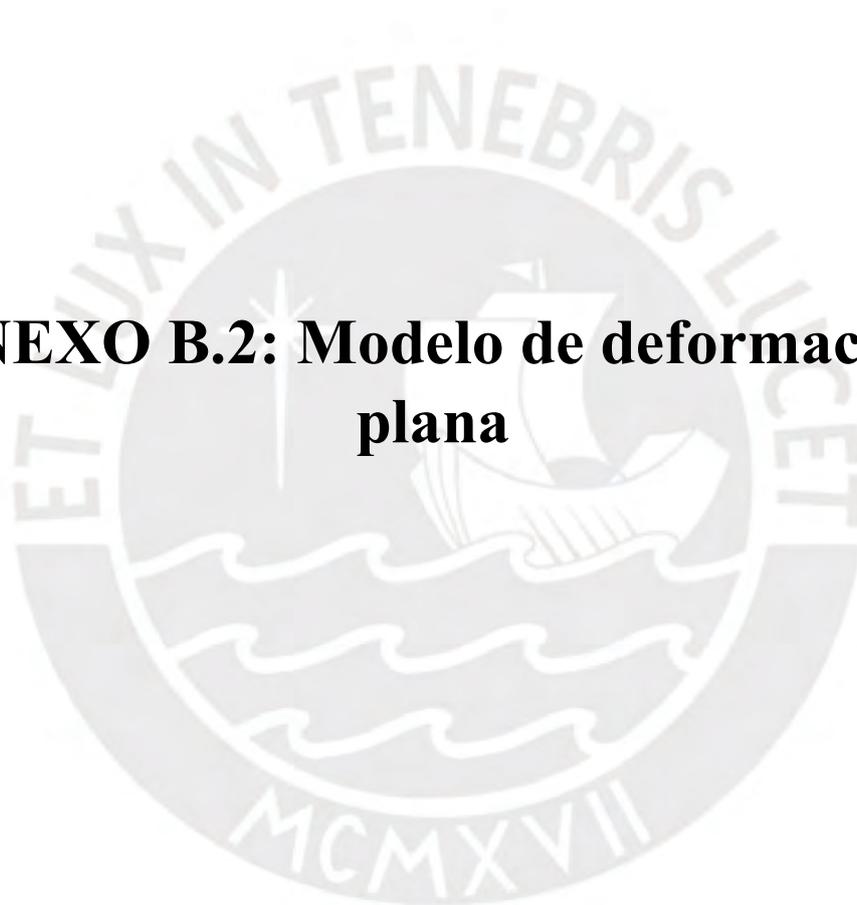
hr=0.6, Req=1.6926 v2

Step

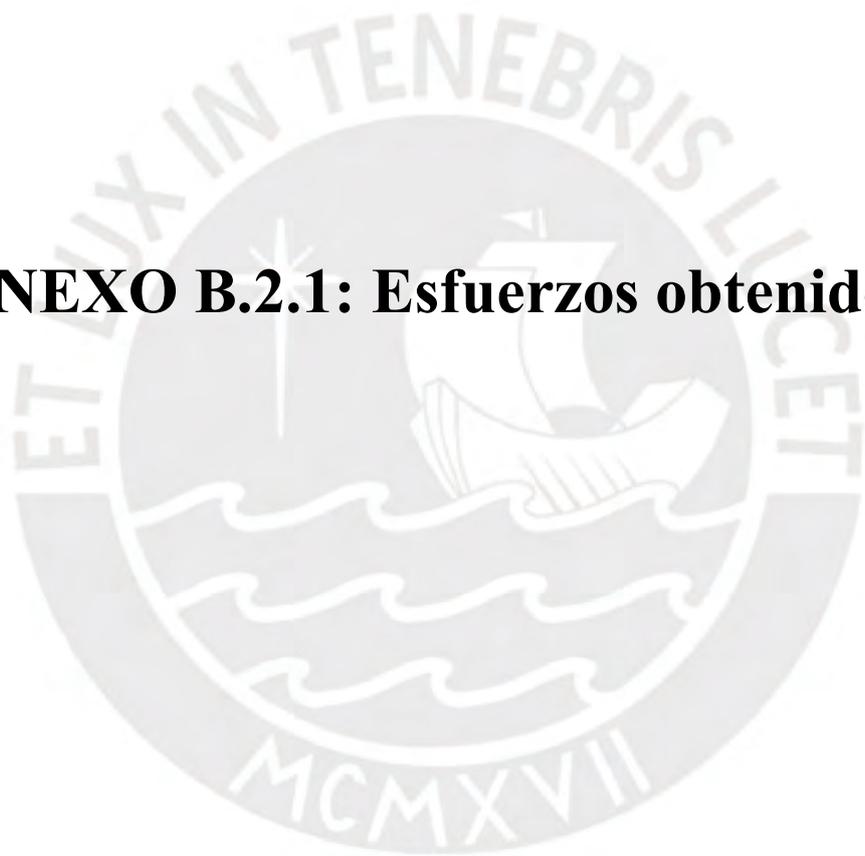
42

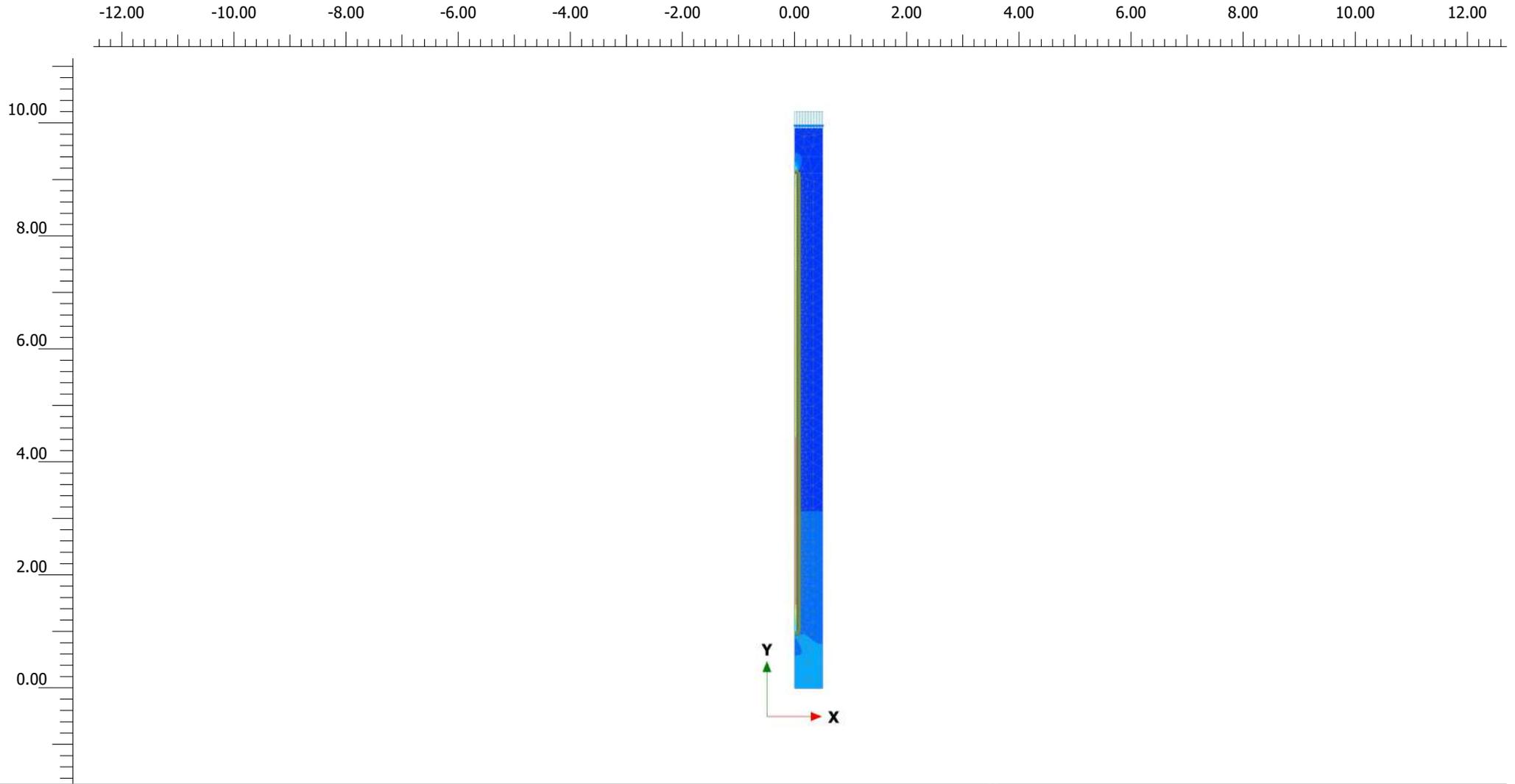
Company

**ANEXO B.2: Modelo de deformación
plana**



ANEXO B.2.1: Esfuerzos obtenidos





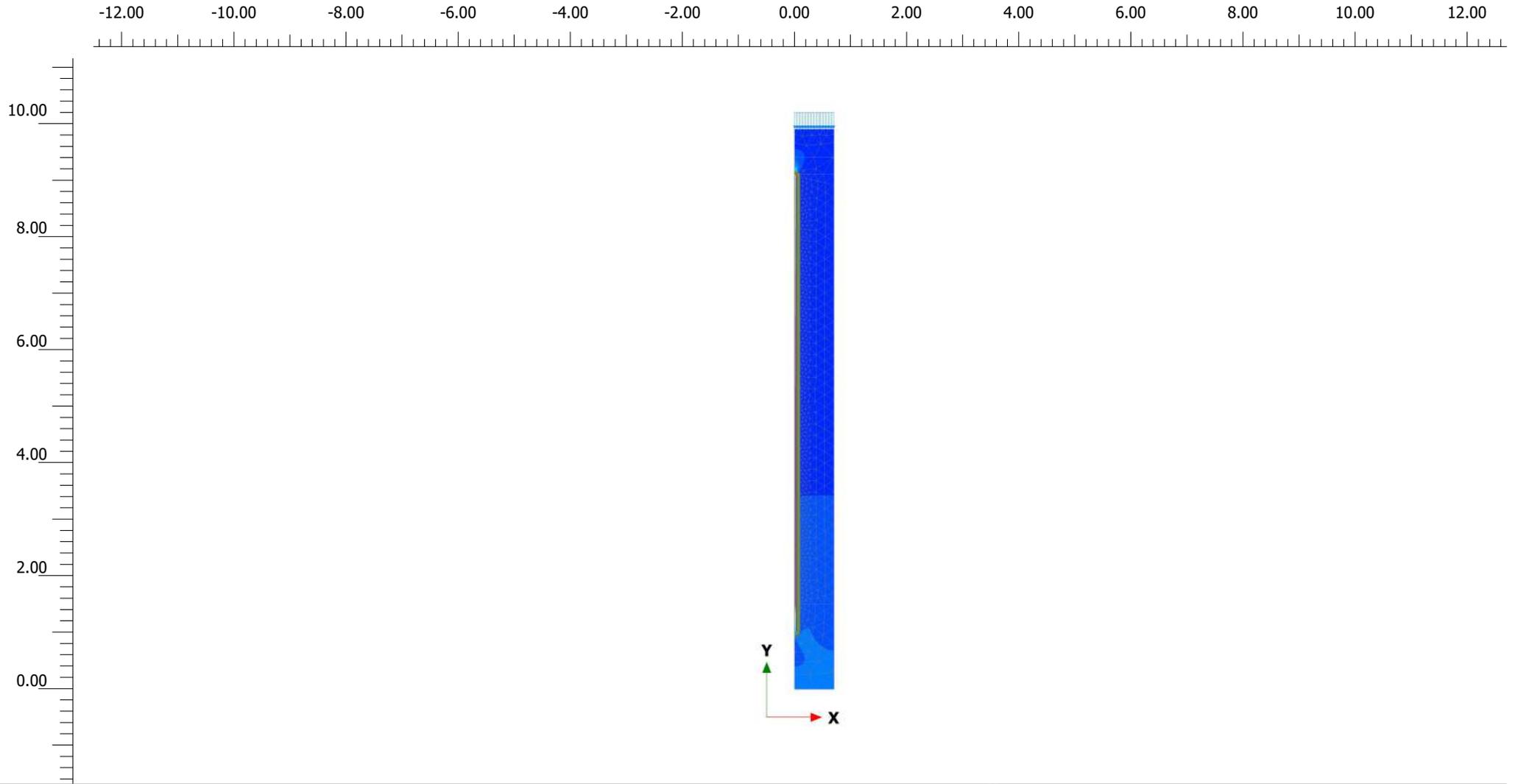
Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 29.28 kN/m² (Element 30 at Node 231)

Minimum value = -1330 kN/m² (Element 317 at Node 225)



<p><i>Project description</i> hr=0.3, Req=0.4993 Esfuerzos efectivos</p>	<p><i>Date</i> 19/12/2021</p>	
<p><i>Project filename</i> hr=0.3, Req=0.4993 ps</p>	<p><i>Step</i> 28</p>	<p><i>Company</i></p>



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 55.06 kN/m² (Element 37 at Node 247)

Minimum value = -1866 kN/m² (Element 440 at Node 241)



Project description

hr=0.3, Req=0.699 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

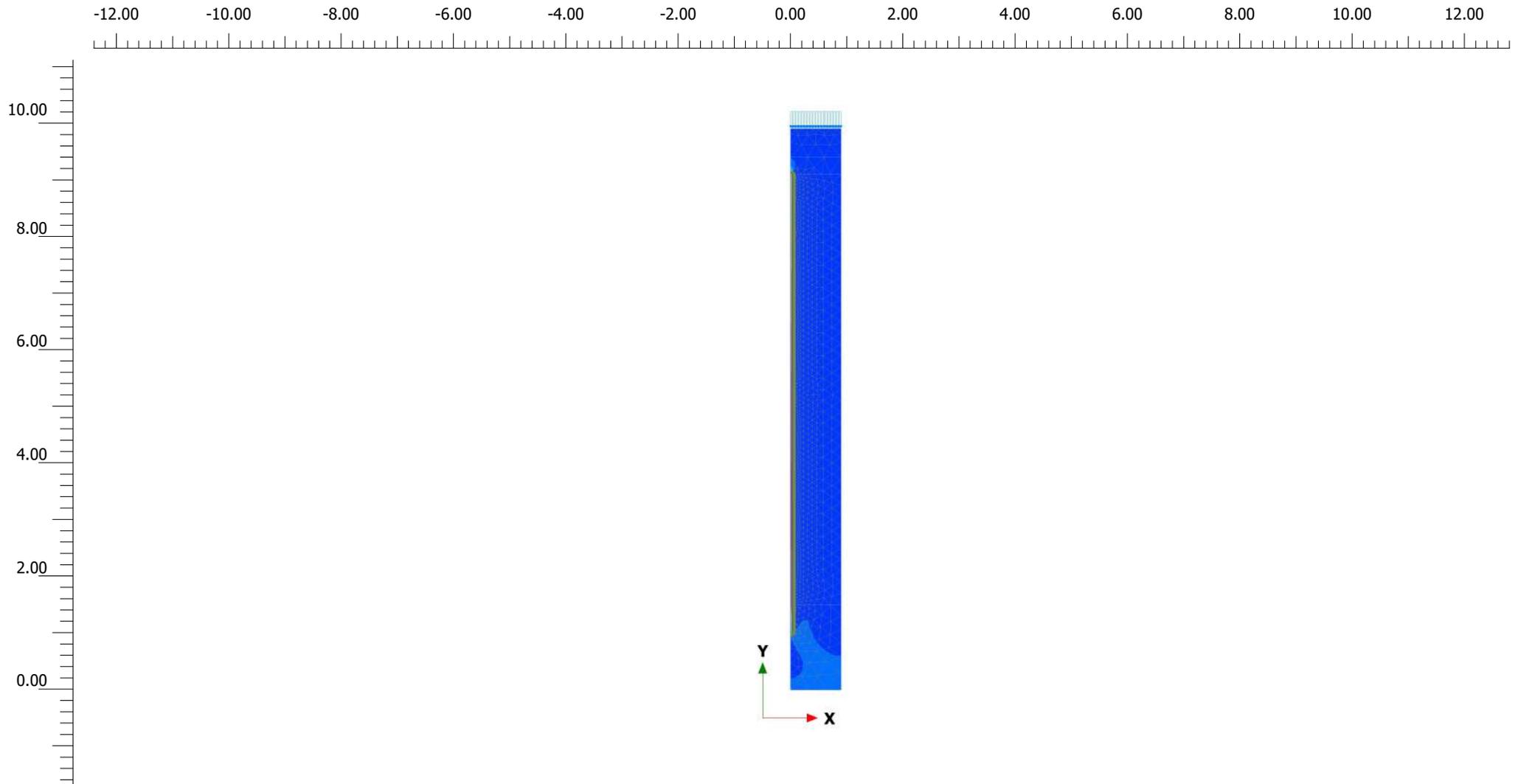
Project filename

hr=0.3, Req=0.699 ps

Step

63

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 35.08 kN/m² (Element 53 at Node 391)

Minimum value = -2682 kN/m² (Element 574 at Node 26003)



Project description

hr=0.3, Req=0.8987 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

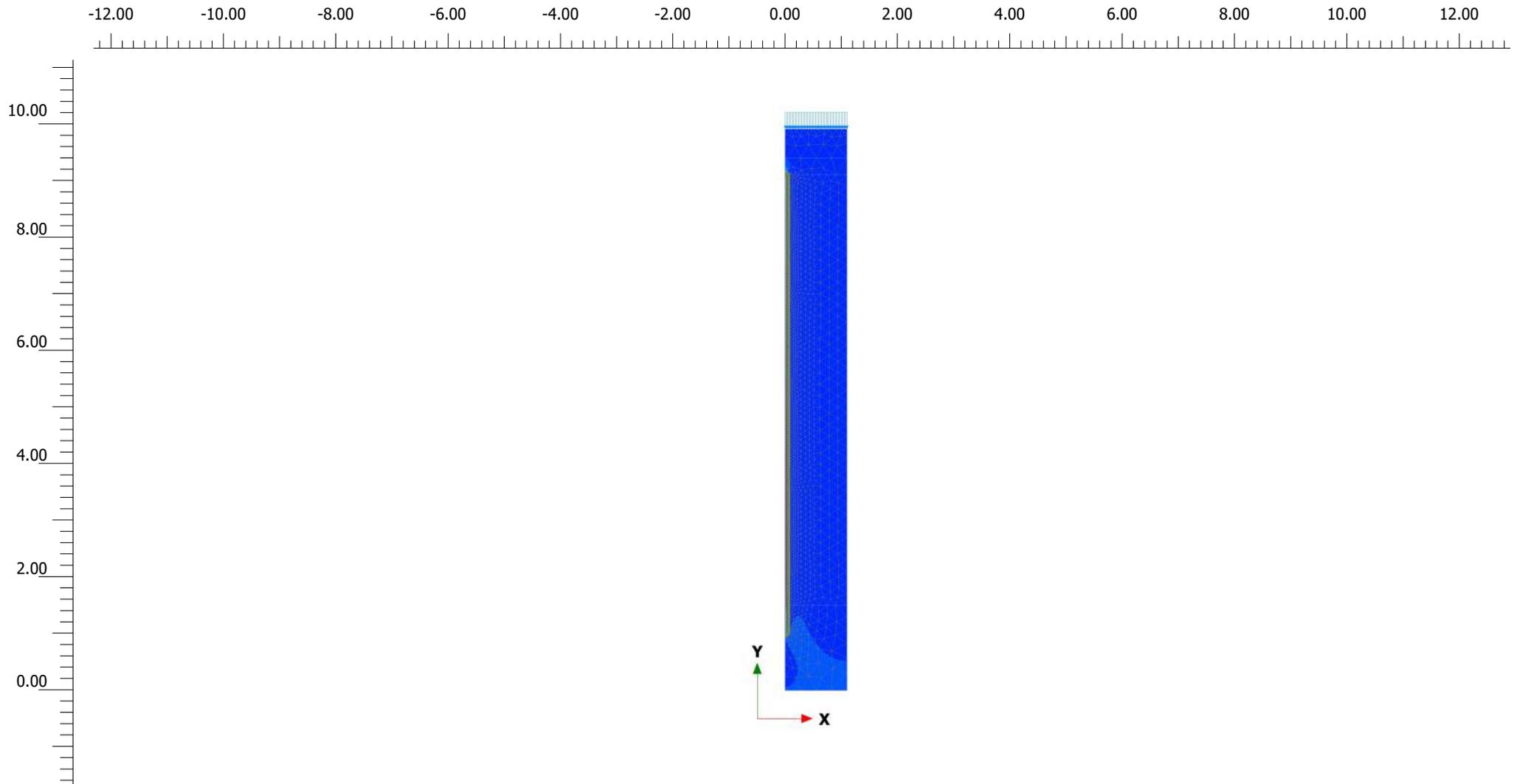
Project filename

hr=0.3, Req=0.8987 ps

Step

142

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 56.42 kN/m² (Element 73 at Node 347)

Minimum value = -3532 kN/m² (Element 707 at Node 33109)

PLAXIS

Project description

hr=0.3, Req=1.0984 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

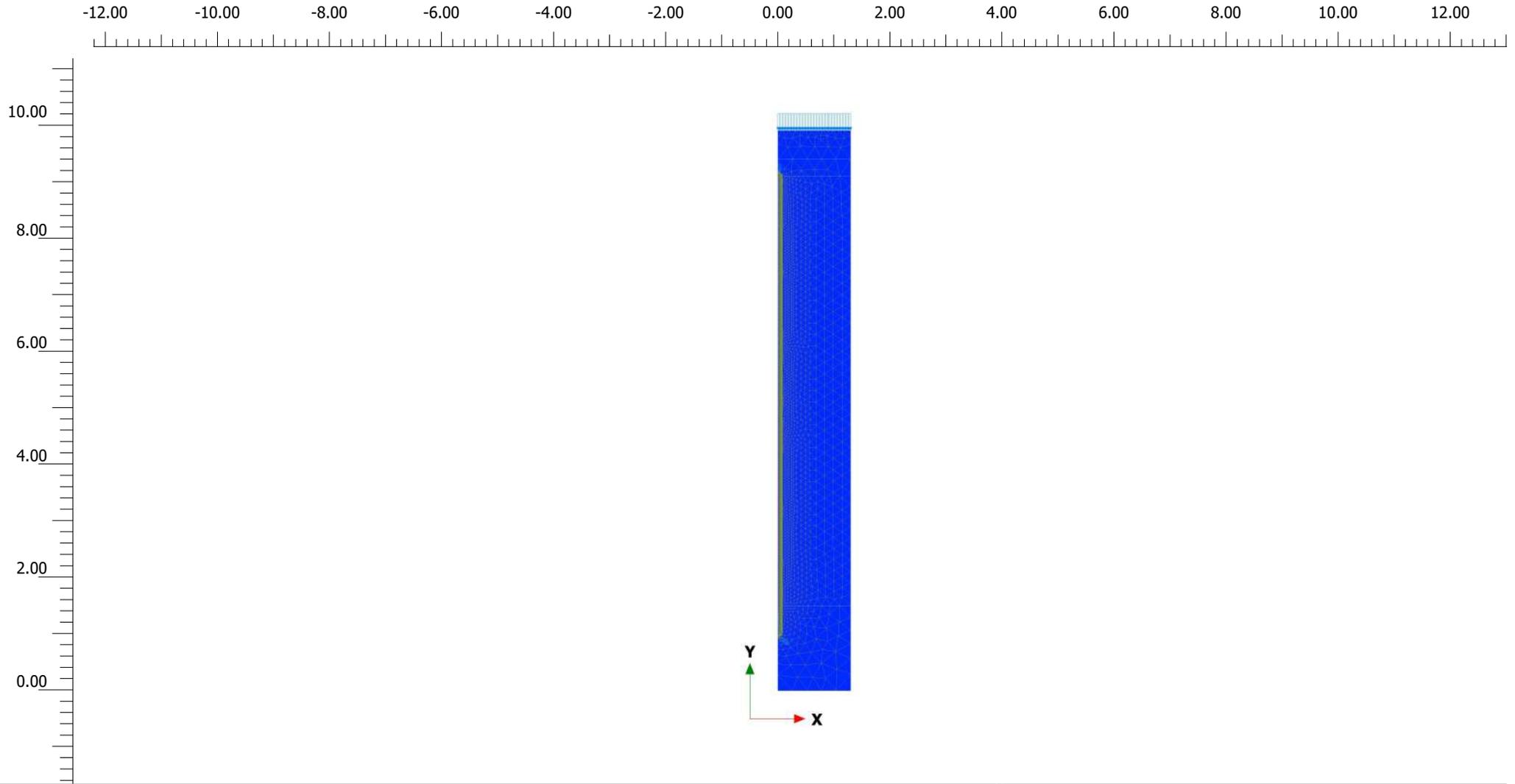
Project filename

hr=0.3, Req=1.0984 ps

Step

215

Company



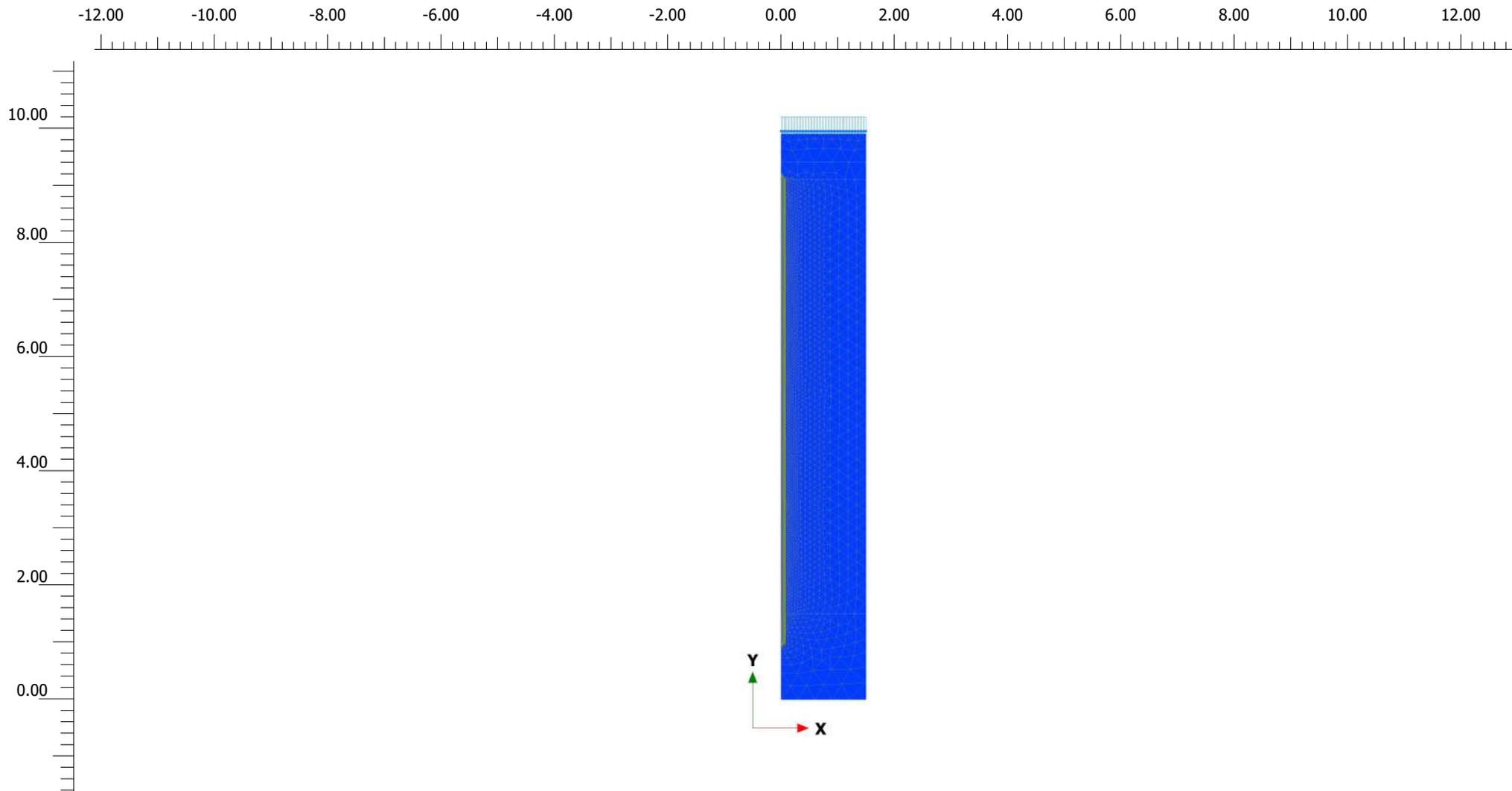
Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 31.21 kN/m² (Element 89 at Node 2163)

Minimum value = -4338 kN/m² (Element 838 at Node 42377)



<i>Project description</i> hr=0.3, Req=1.2981 Esfuerzos efectivos		<i>Date</i> 19/12/2021	
<i>Project filename</i> hr=0.3, Req=1.2981 ps	<i>Step</i> 366	<i>Company</i>	



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 20.74 kN/m² (Element 96 at Node 3122)

Minimum value = -5087 kN/m² (Element 855 at Node 54099)



Project description

hr=0.3, Req=1.4979 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

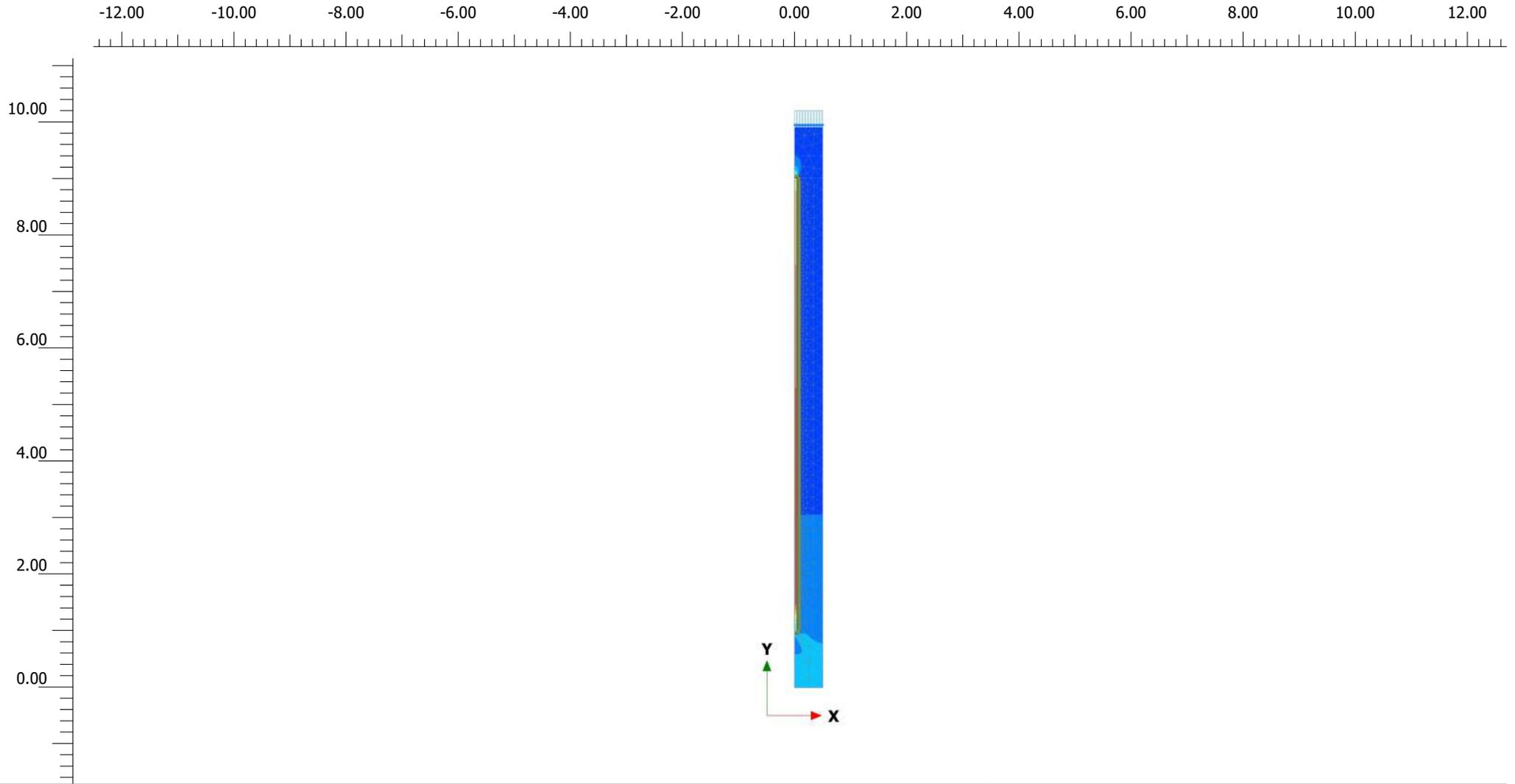
Project filename

hr=0.3, Req=1.4979 ps

Step

280

Company



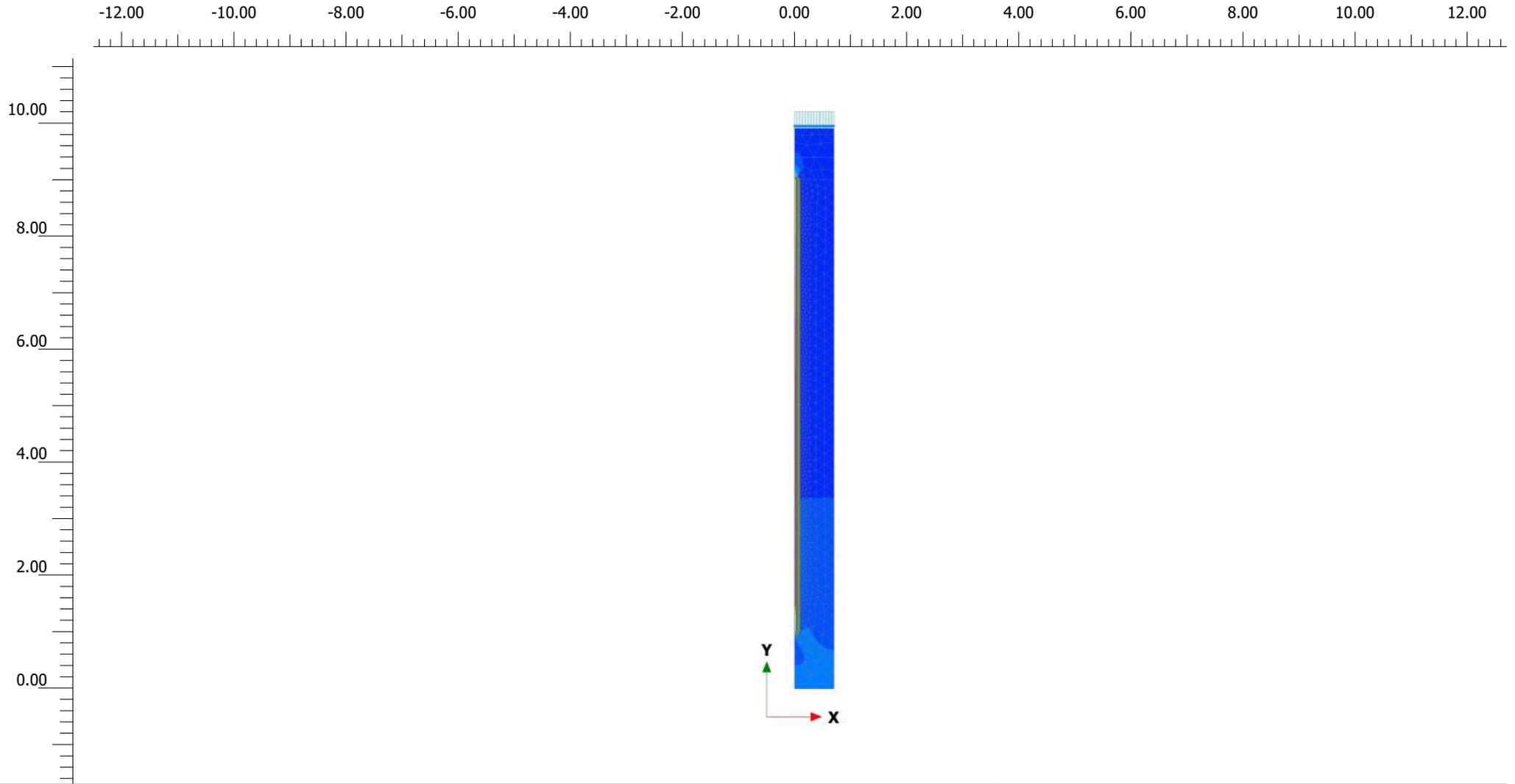
Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 4.546 kN/m² (Element 36 at Node 346)

Minimum value = -1134 kN/m² (Element 323 at Node 10287)



<i>Project description</i> hr=0.4, Req=0.4993 Esfuerzos efectivos		<i>Date</i> 19/12/2021
<i>Project filename</i> hr=0.4, Req=0.4993 ps	<i>Step</i> 29	<i>Company</i>



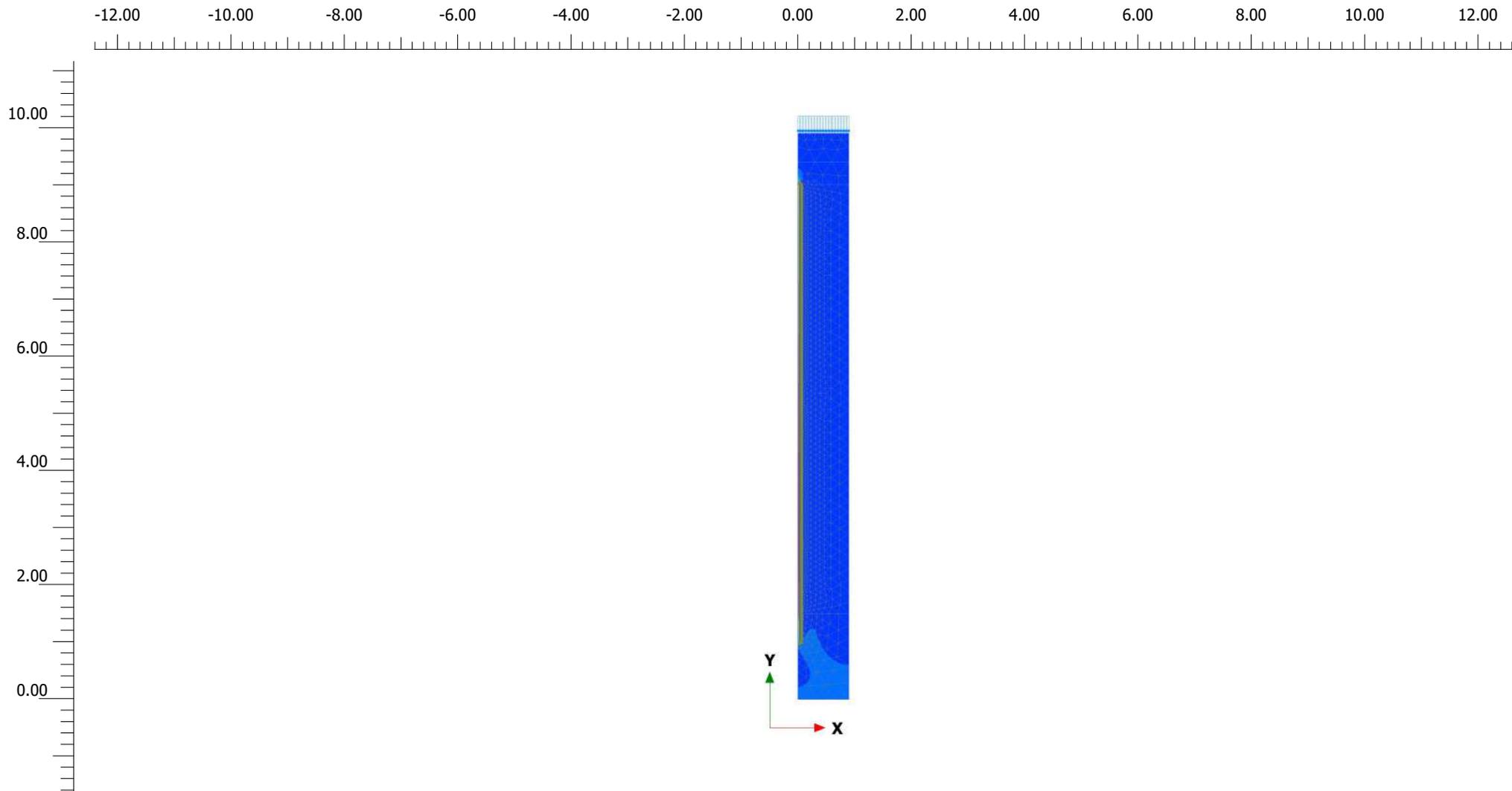
Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 19.33 kN/m² (Element 44 at Node 291)

Minimum value = -1891 kN/m² (Element 444 at Node 17291)



<i>Project description</i> hr=0.4, Req=0.699 Esfuerzos efectivos		<i>Date</i> 19/12/2021
<i>Project filename</i> hr=0.4, Req=0.699 ps	<i>Step</i> 71	<i>Company</i>



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 24.85 kN/m² (Element 65 at Node 469)

Minimum value = -2715 kN/m² (Element 576 at Node 24371)



Project description

hr=0.4, Req=0.8987 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

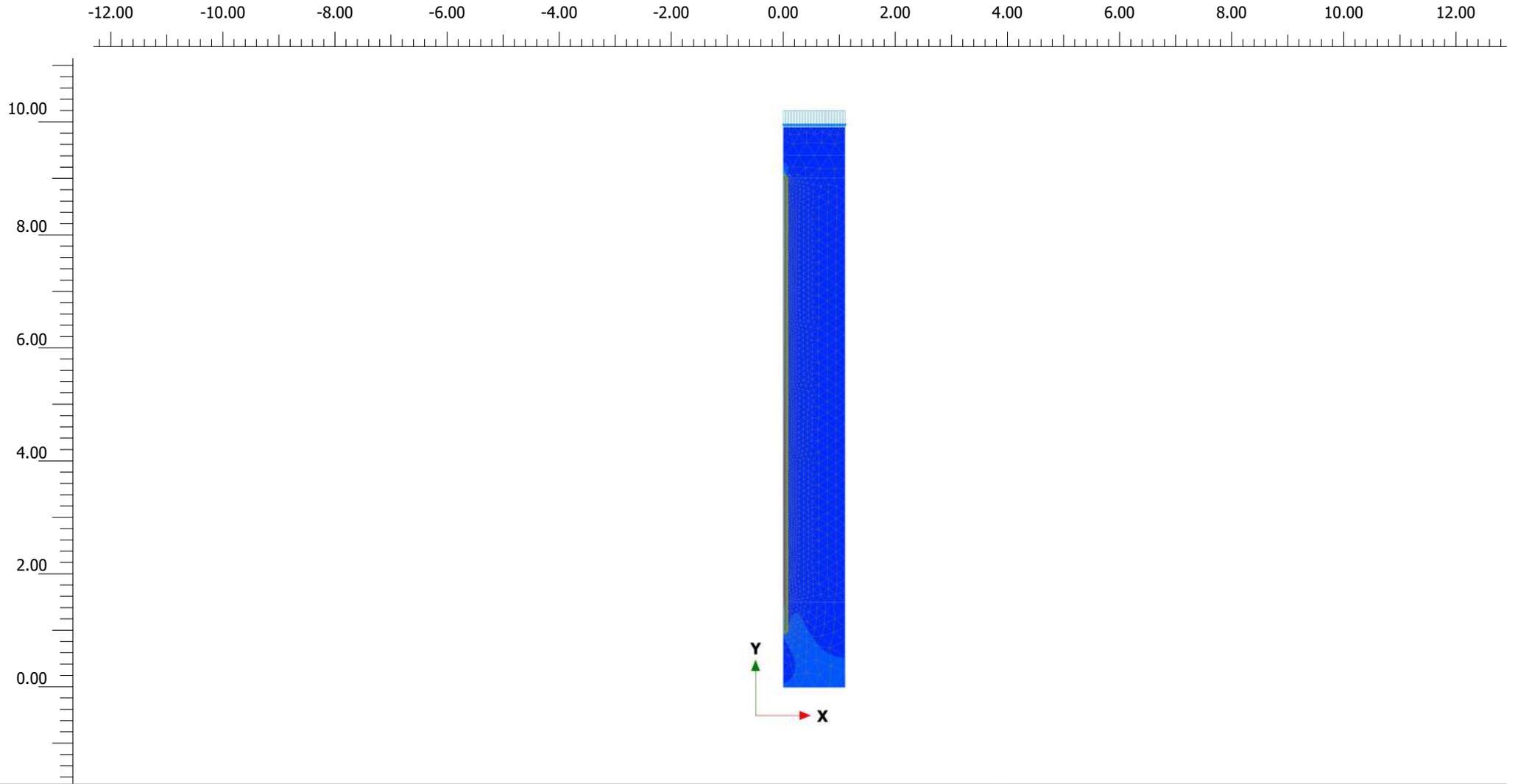
Project filename

hr=0.4, Req=0.8987 ps

Step

173

Company



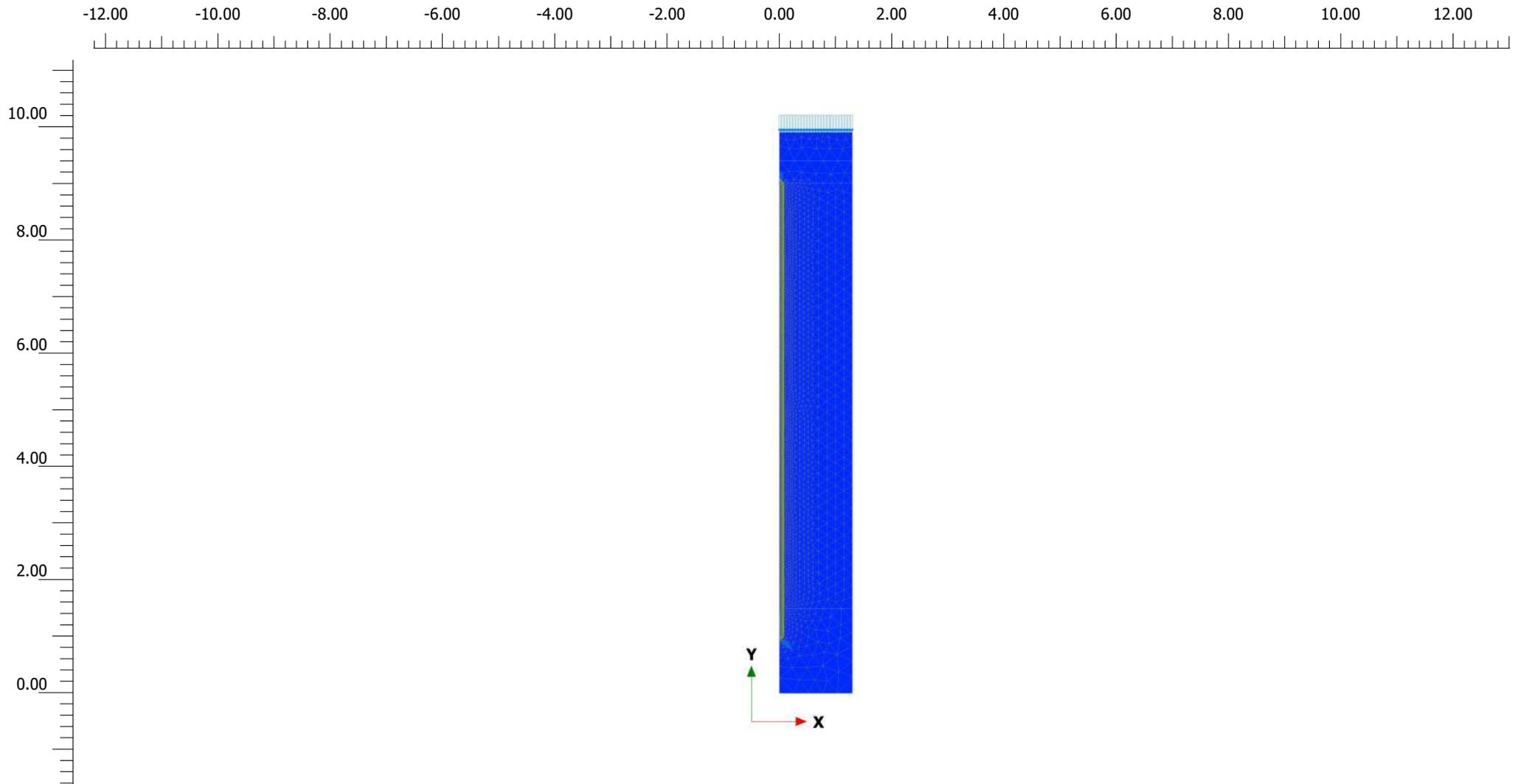
Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 22.97 kN/m² (Element 74 at Node 875)

Minimum value = -3566 kN/m² (Element 705 at Node 32913)



<i>Project description</i> hr=0.4, Req=1.0984 Esfuerzos efectivos		<i>Date</i> 19/12/2021	
<i>Project filename</i> hr=0.4, Req=1.0984 ps	<i>Step</i> 260	<i>Company</i>	



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 67.55 kN/m² (Element 95 at Node 395)

Minimum value = -4379 kN/m² (Element 834 at Node 43099)



Project description

hr=0.4, Req=1.2981 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

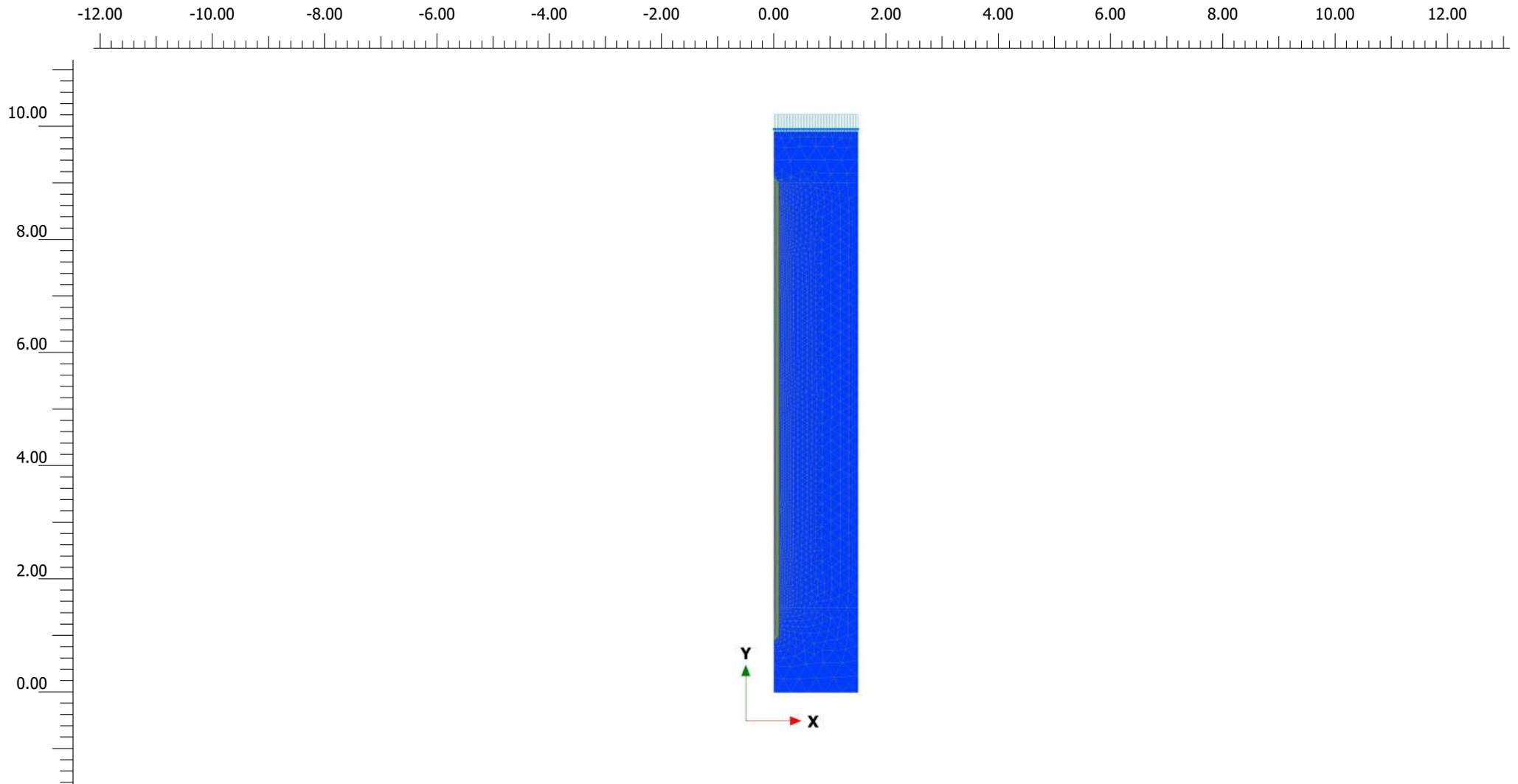
Project filename

hr=0.4, Req=1.2981 ps

Step

290

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 16.95 kN/m² (Element 99 at Node 4512)

Minimum value = -5121 kN/m² (Element 849 at Node 48265)



Project description

hr=0.4, Req=1.4979 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

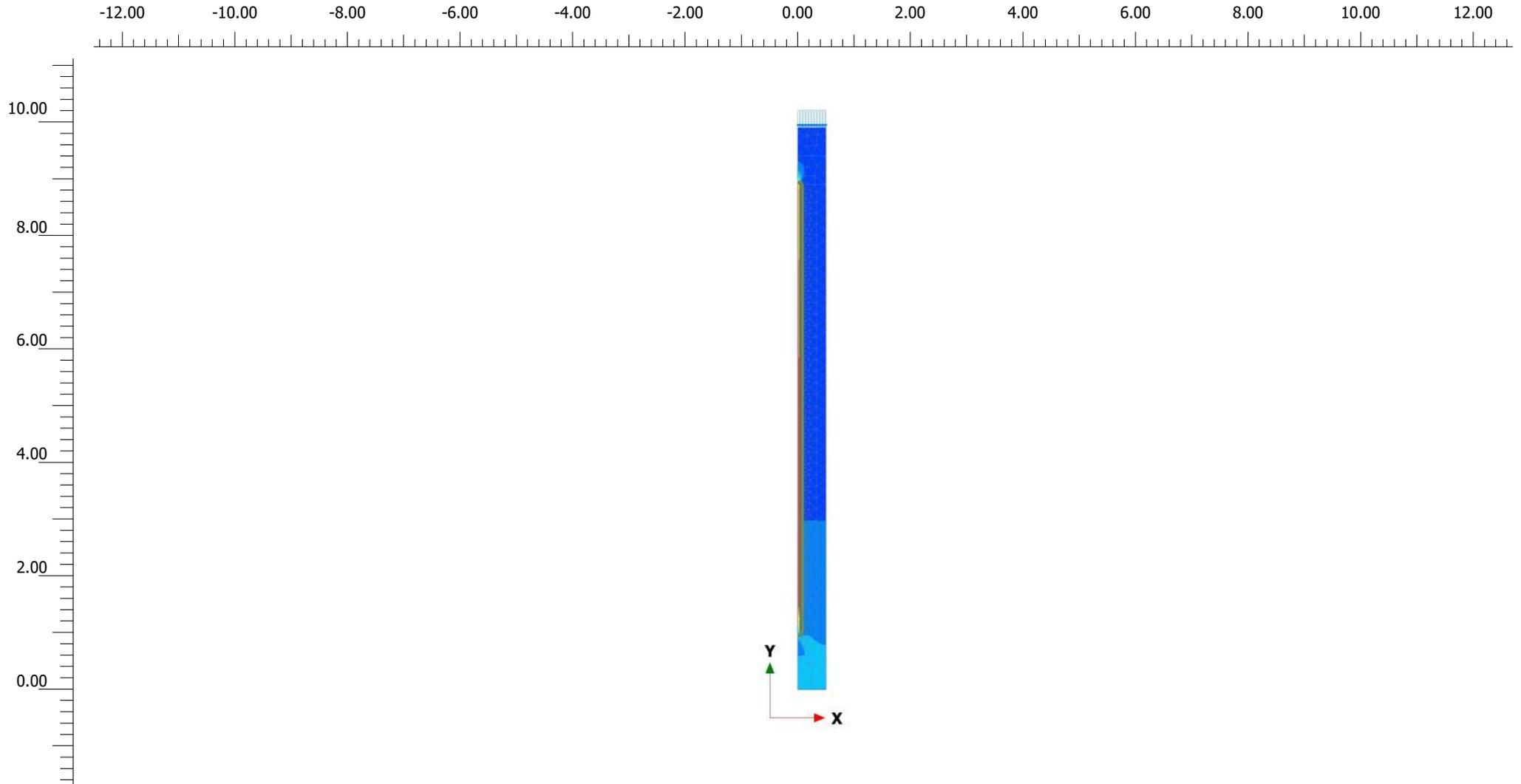
Project filename

hr=0.4, Req=1.4979 ps

Step

248

Company



Cartesian total stress σ_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 9.530 kN/m² (Element 40 at Node 378)

Minimum value = -1163 kN/m² (Element 322 at Node 10499)



Project description

hr=0.5, Req=0.4993 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

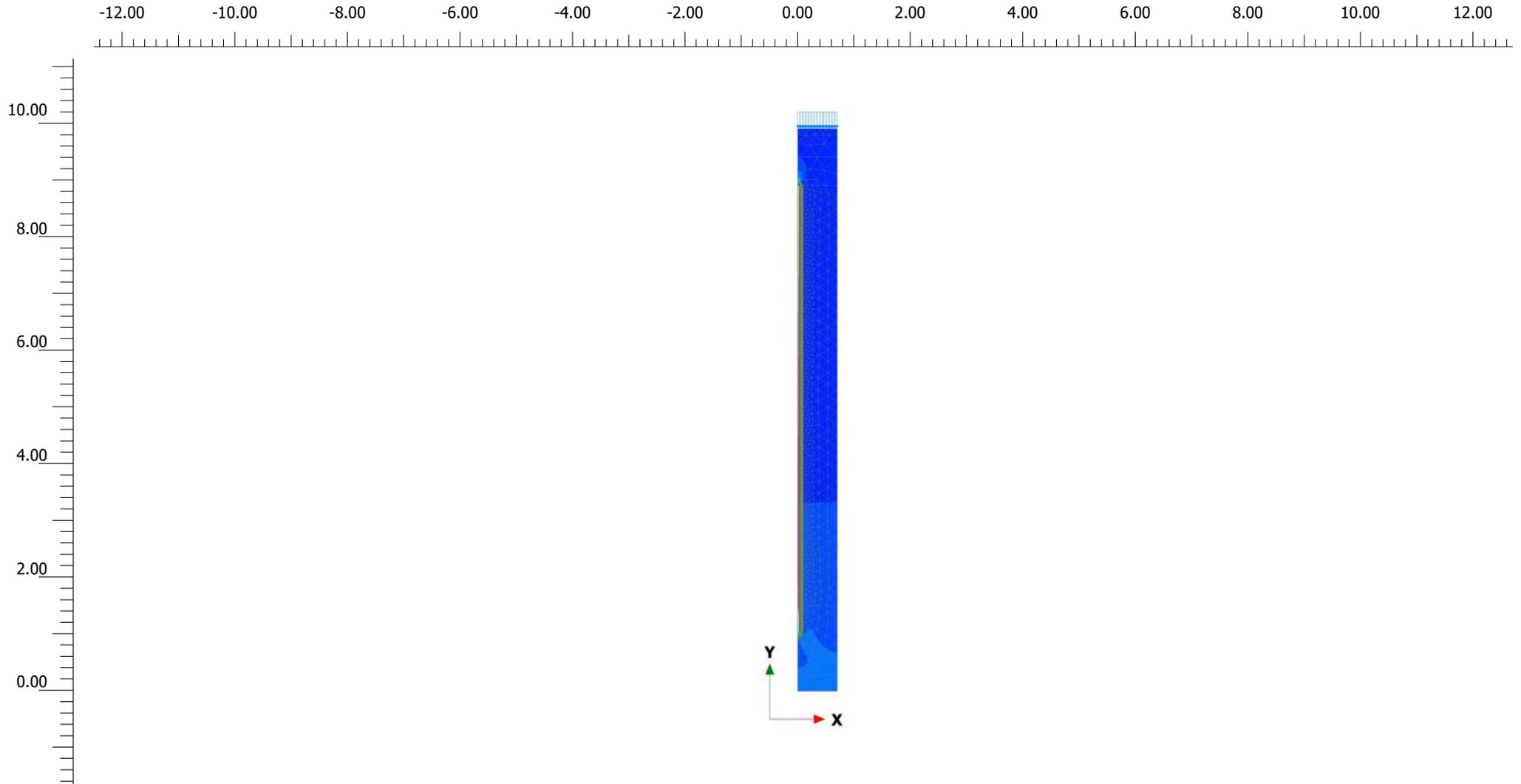
Project filename

hr=0.5, Req=0.4993 ps

Step

37

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 13.18 kN/m² (Element 46 at Node 301)

Minimum value = -1926 kN/m² (Element 443 at Node 16687)



Project description

hr=0.5, Req=0.699 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

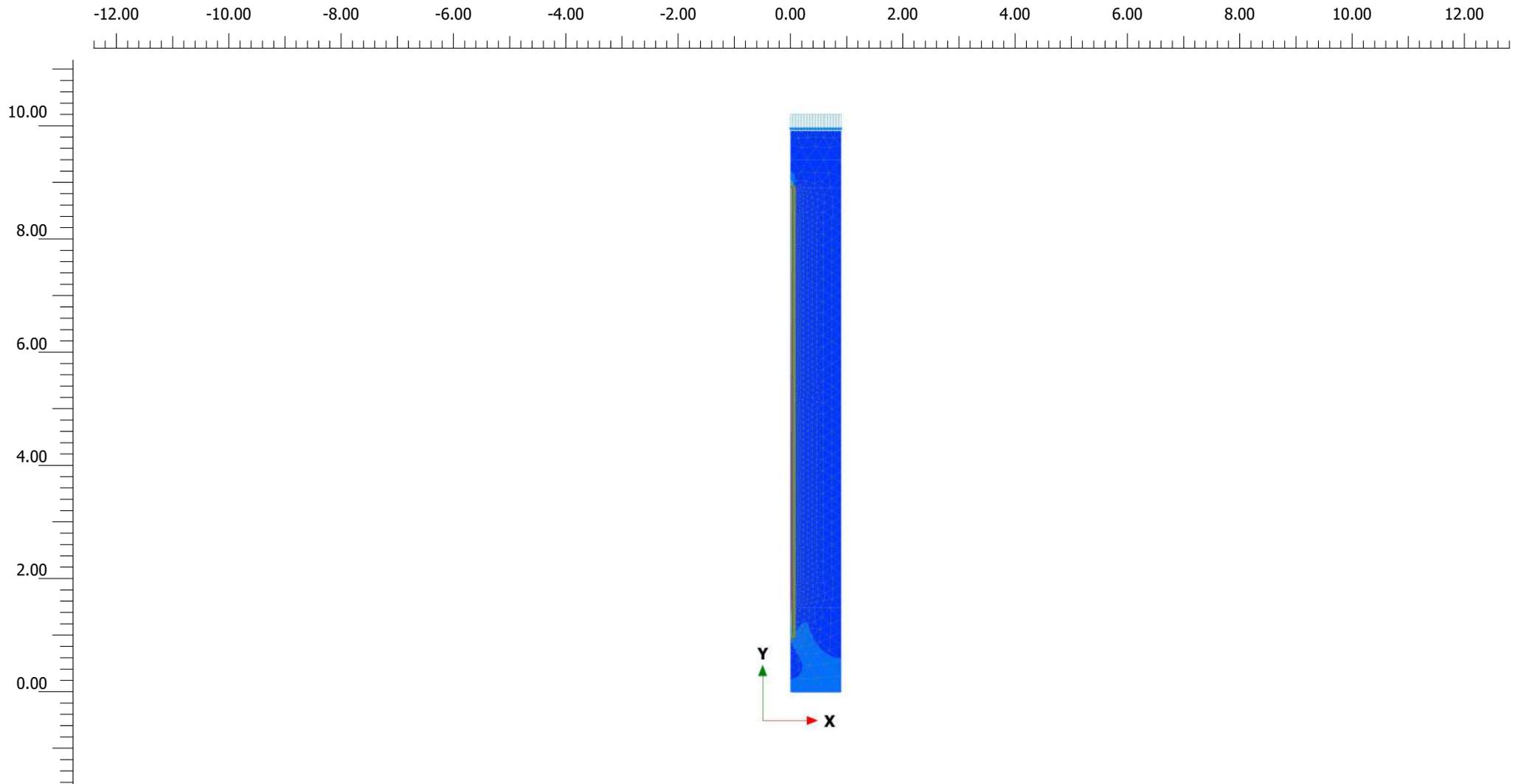
Project filename

hr=0.5, Req=0.699 ps

Step

76

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 75.59 kN/m² (Element 65 at Node 341)

Minimum value = -2757 kN/m² (Element 572 at Node 25371)



Project description

hr=0.5, Req=0.8987 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

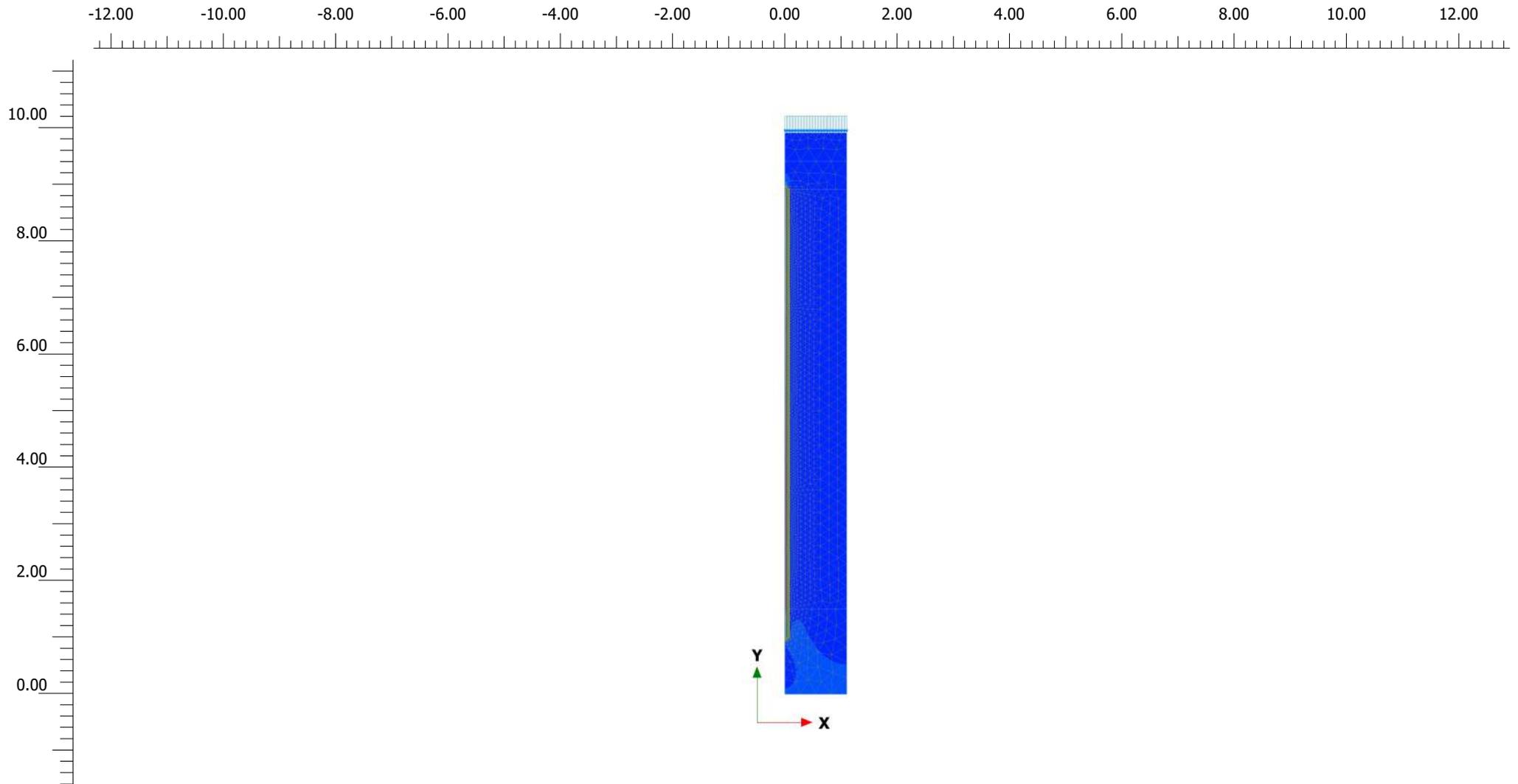
Project filename

hr=0.5, Req=0.8987 ps

Step

159

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 18.50 kN/m² (Element 89 at Node 600)

Minimum value = -3604 kN/m² (Element 695 at Node 32301)



Project description

hr=0.5, Req=1.0984 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

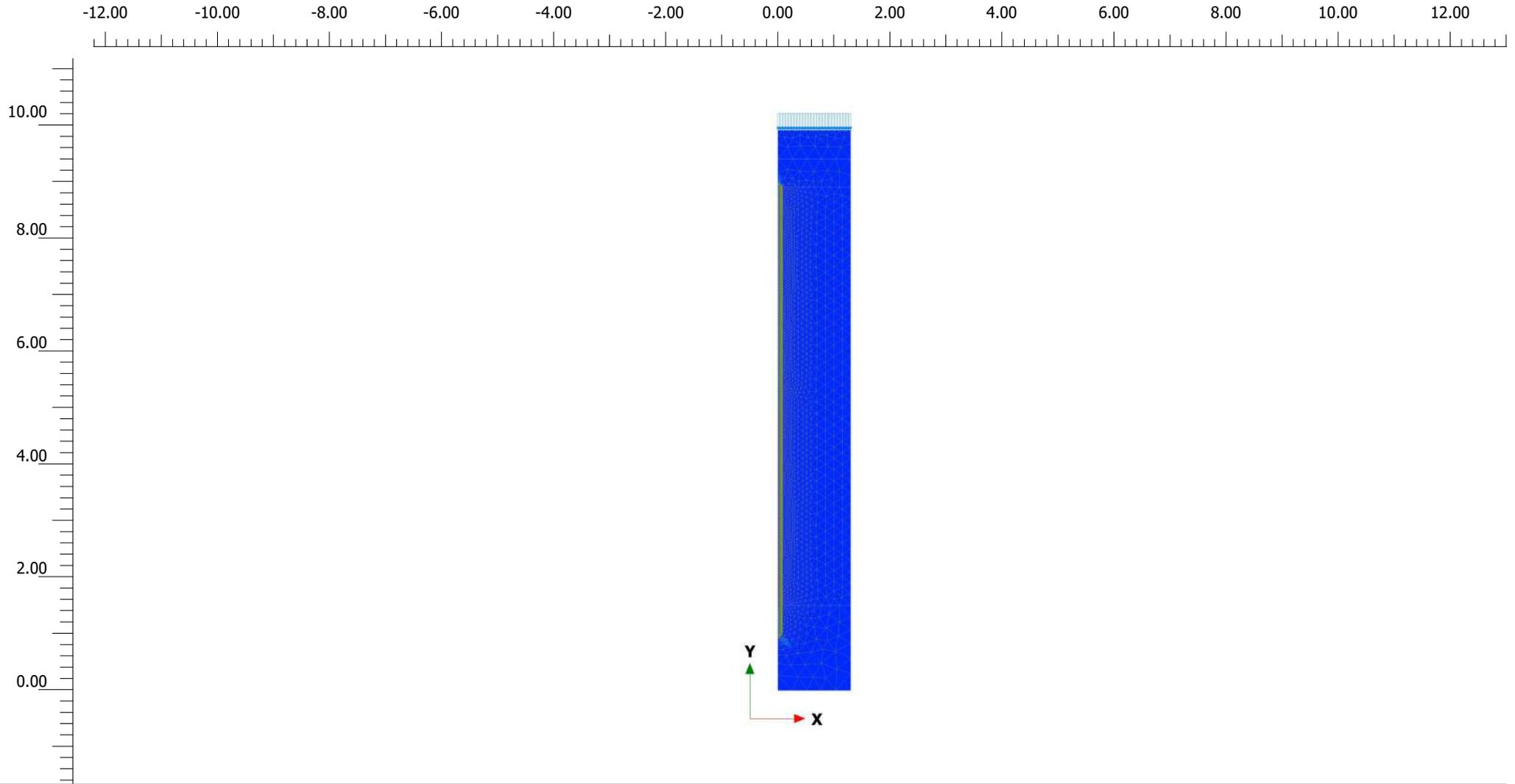
Project filename

hr=0.5, Req=1.0984 ps

Step

266

Company



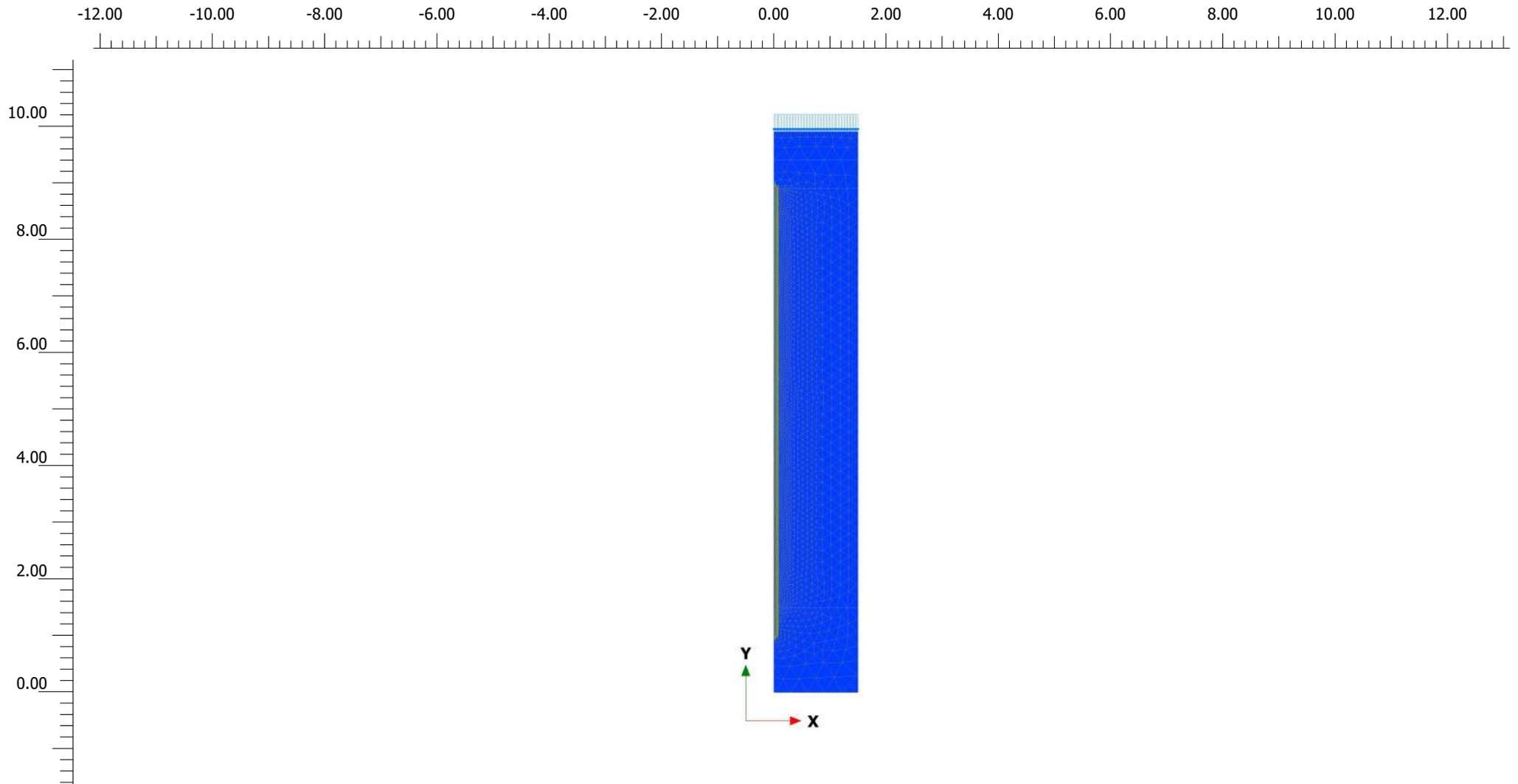
Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 24.97 kN/m² (Element 106 at Node 863)

Minimum value = -4400 kN/m² (Element 837 at Node 44993)



<i>Project description</i> hr=0.5, Req=1.2981 Esfuerzos efectivos		<i>Date</i> 19/12/2021	
<i>Project filename</i> hr=0.5, Req=1.2981 ps		<i>Step</i> 379	<i>Company</i>



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 17.50 kN/m² (Element 107 at Node 1819)

Minimum value = -5155 kN/m² (Element 850 at Node 52213)



Project description

hr=0.5, Req=1.4979 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

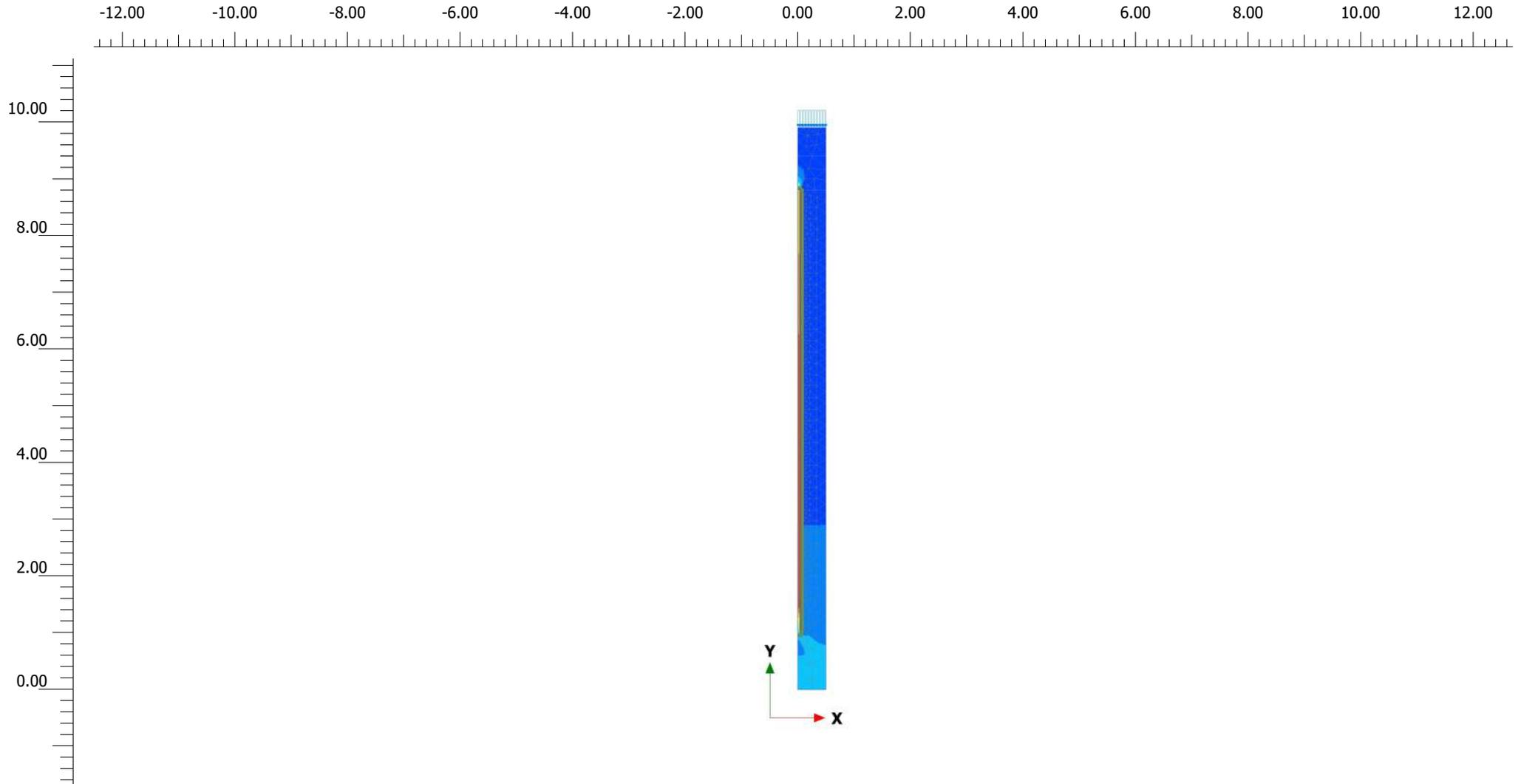
Project filename

hr=0.5, Req=1.4979 ps

Step

289

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 11.33 kN/m² (Element 42 at Node 342)

Minimum value = -1190 kN/m² (Element 319 at Node 10049)



Project description

hr=0.6, Req=0.4493 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

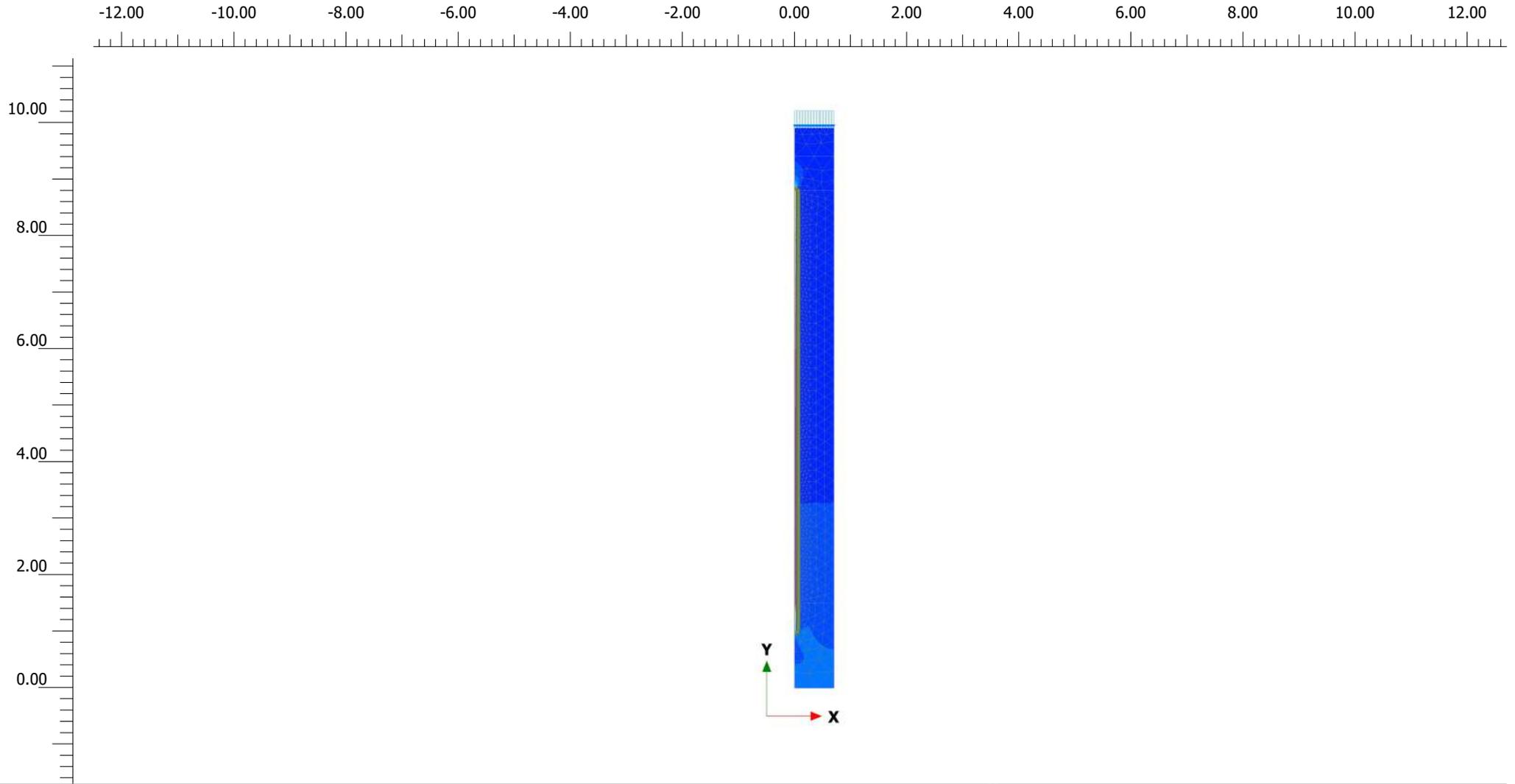
Project filename

hr=0.6, Req=0.4993 ps

Step

39

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.200 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 25.23 kN/m² (Element 56 at Node 363)

Minimum value = -1960 kN/m² (Element 443 at Node 18193)



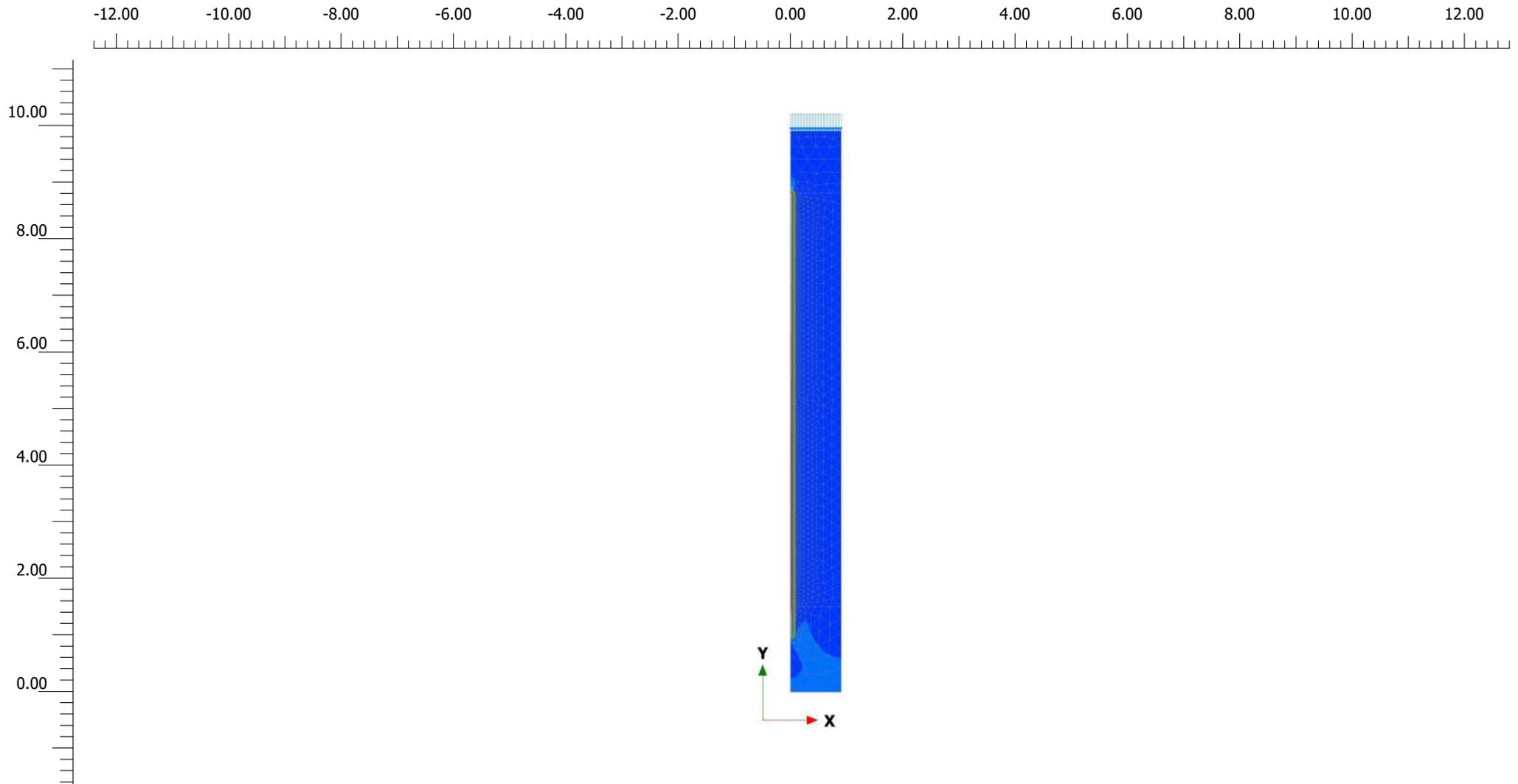
Project description
 hr=0.6, Req=0.699 Esfuerzos efectivos

Date
 19/12/2021

Project filename
 hr=0.6, Req=0.699 ps

Step
 84

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.100 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 82.71 kN/m² (Element 71 at Node 398)

Minimum value = -2794 kN/m² (Element 572 at Node 23935)



Project description

hr=0.6, Req=0.8987 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

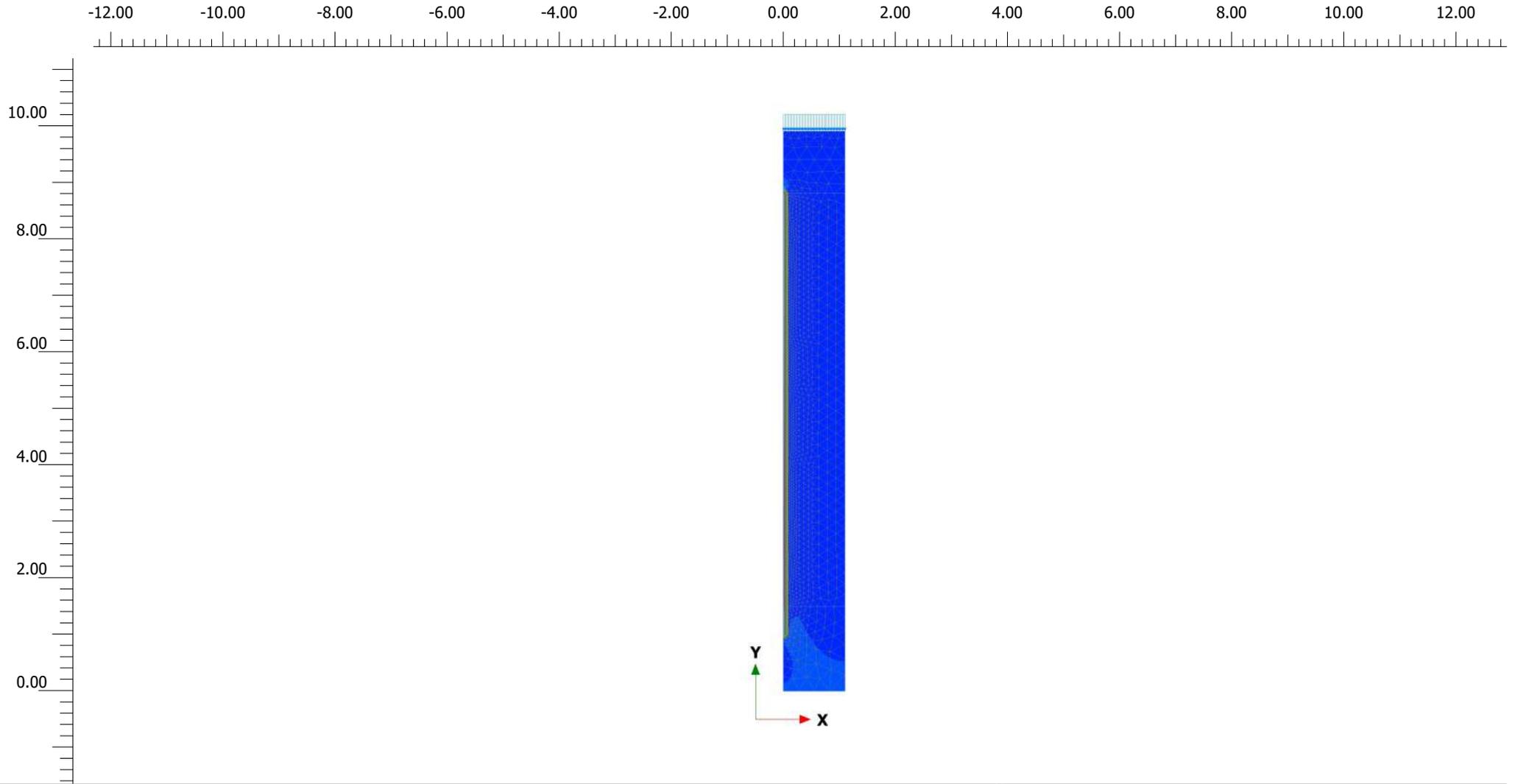
Project filename

hr=0.6, Req=0.8987 ps

Step

301

Company



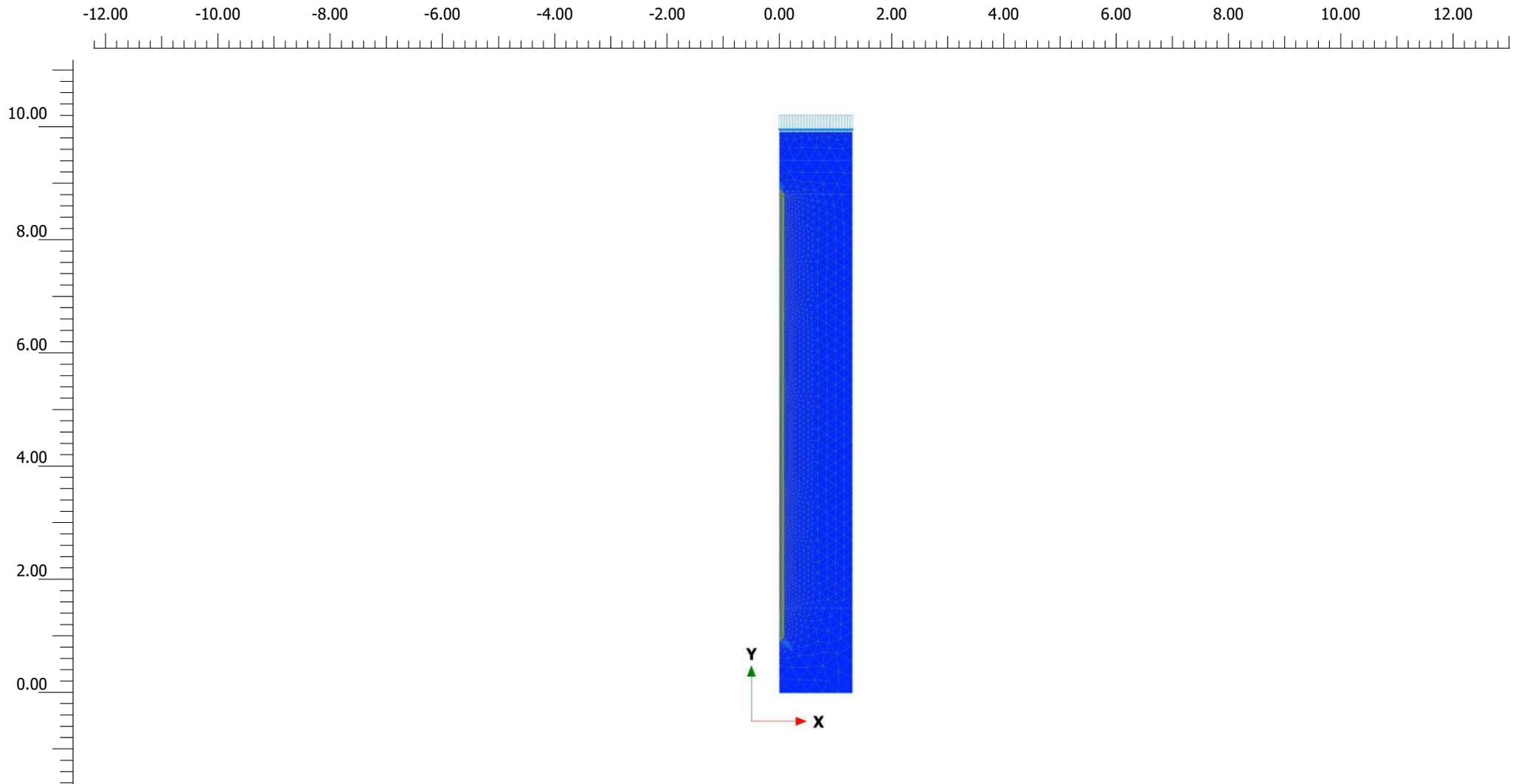
Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 39.96 kN/m² (Element 101 at Node 801)

Minimum value = -3635 kN/m² (Element 710 at Node 32279)



<i>Project description</i> hr=0.6, Req=1.0984 Esfuerzos efectivos		<i>Date</i> 19/12/2021	
<i>Project filename</i> hr=0.6, Req=1.0984 ps		<i>Step</i> 318	<i>Company</i>



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 55.97 kN/m² (Element 121 at Node 951)

Minimum value = -4436 kN/m² (Element 843 at Node 42243)



Project description

hr=0.6, Req=1.2981 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

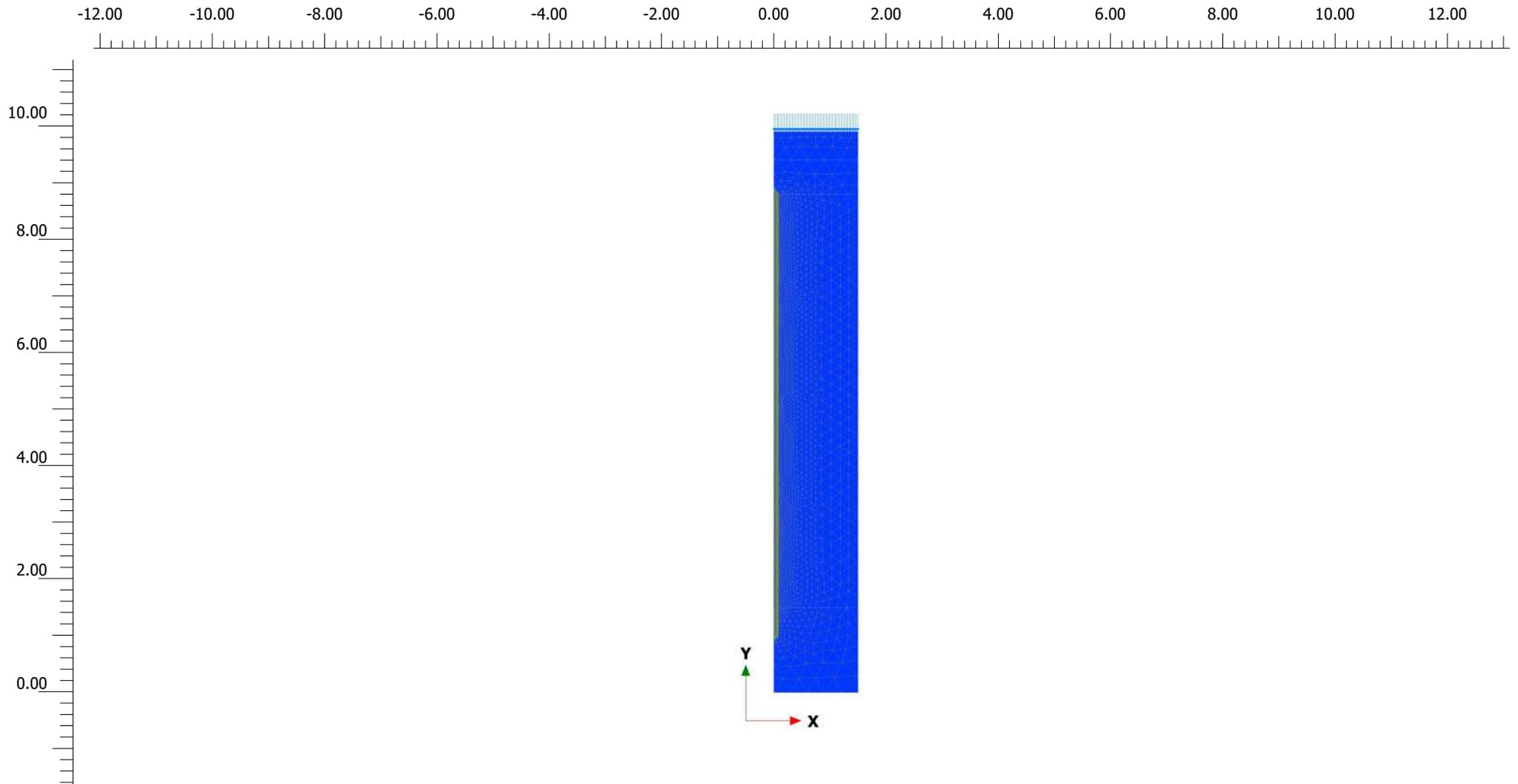
Project filename

hr=0.6, Req=1.2981 ps

Step

628

Company



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $0.0500 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = 36.20 kN/m² (Element 127 at Node 1499)

Minimum value = -5208 kN/m² (Element 856 at Node 50437)



Project description

hr=0.6, Req=1.4979 Esfuerzos efectivos

Date

19/12/2021

Project filename

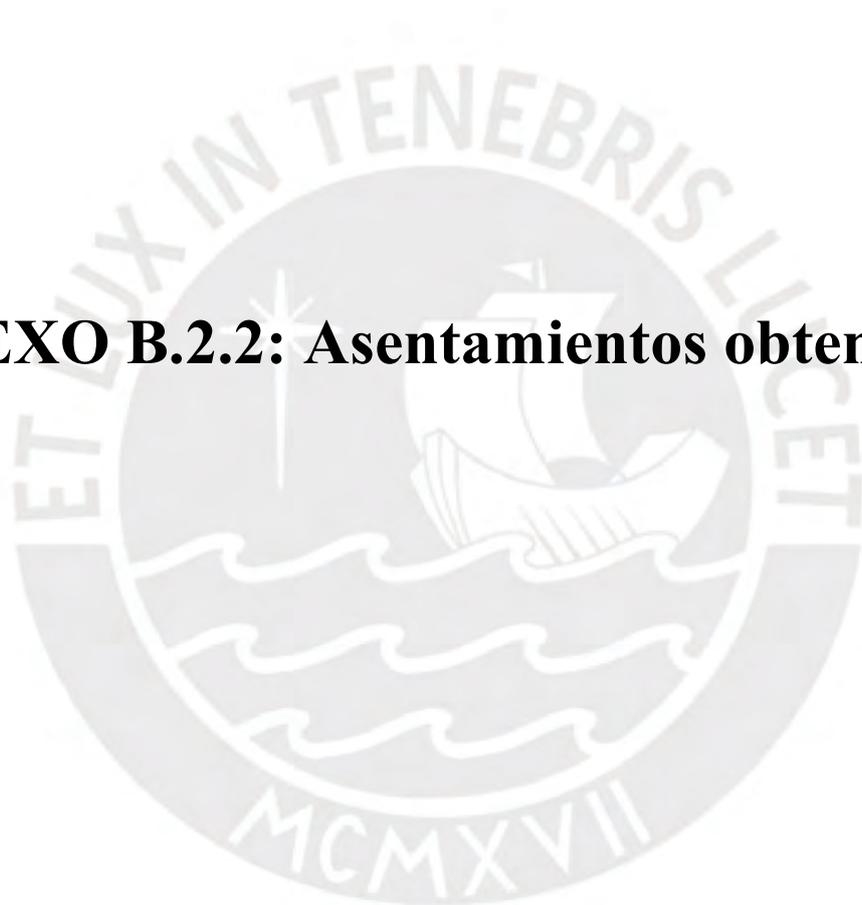
hr=0.6, Req=1.4979 ps

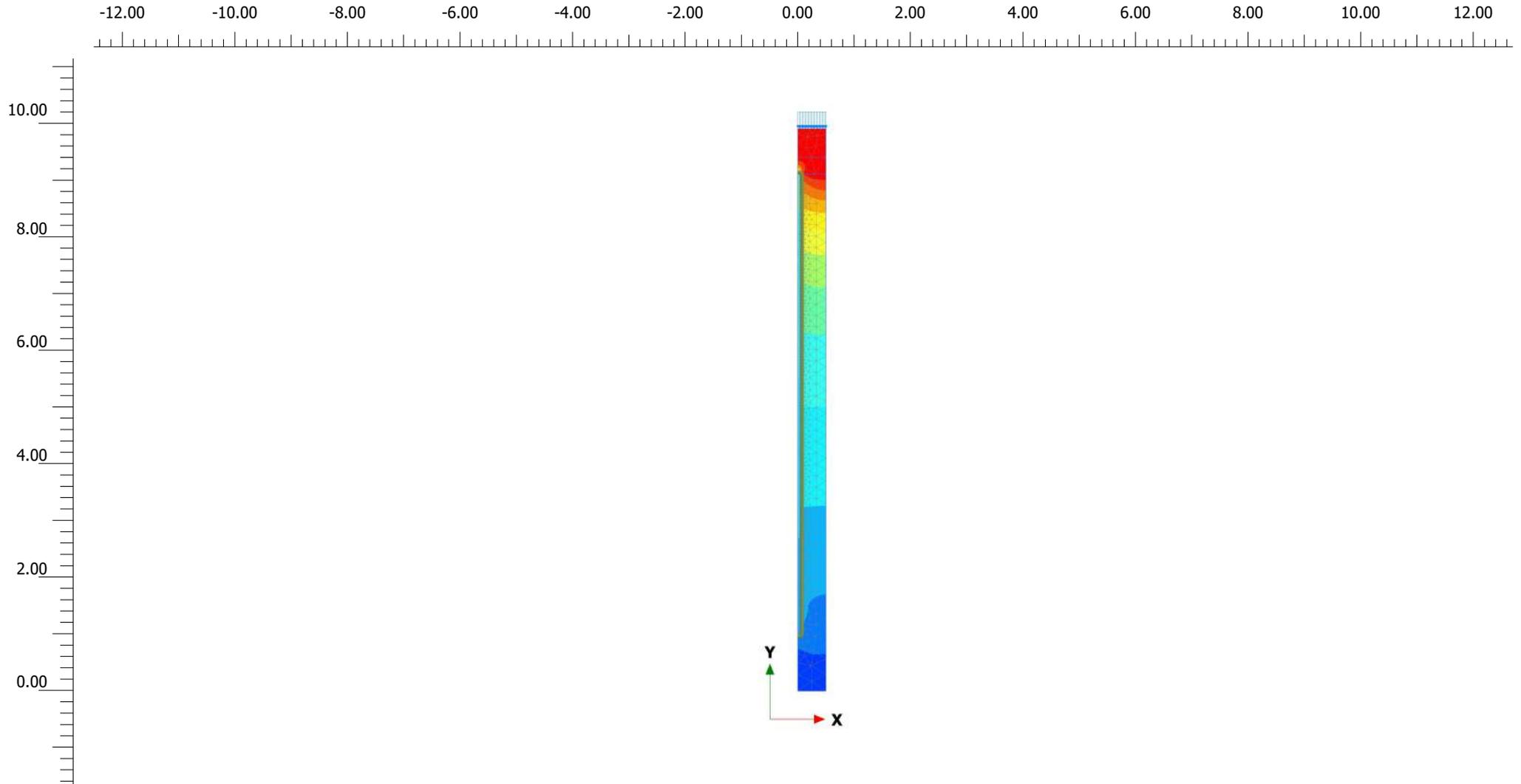
Step

245

Company

ANEXO B.2.2: Asentamientos obtenidos





Total displacements u_y (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 1244 at Node 11523)

Minimum value = $-5.005 \cdot 10^{-3}$ m (Element 24 at Node 854)

PLAXIS

Project description

hr=0.3, Req=0.4993 uy

Date

19/12/2021

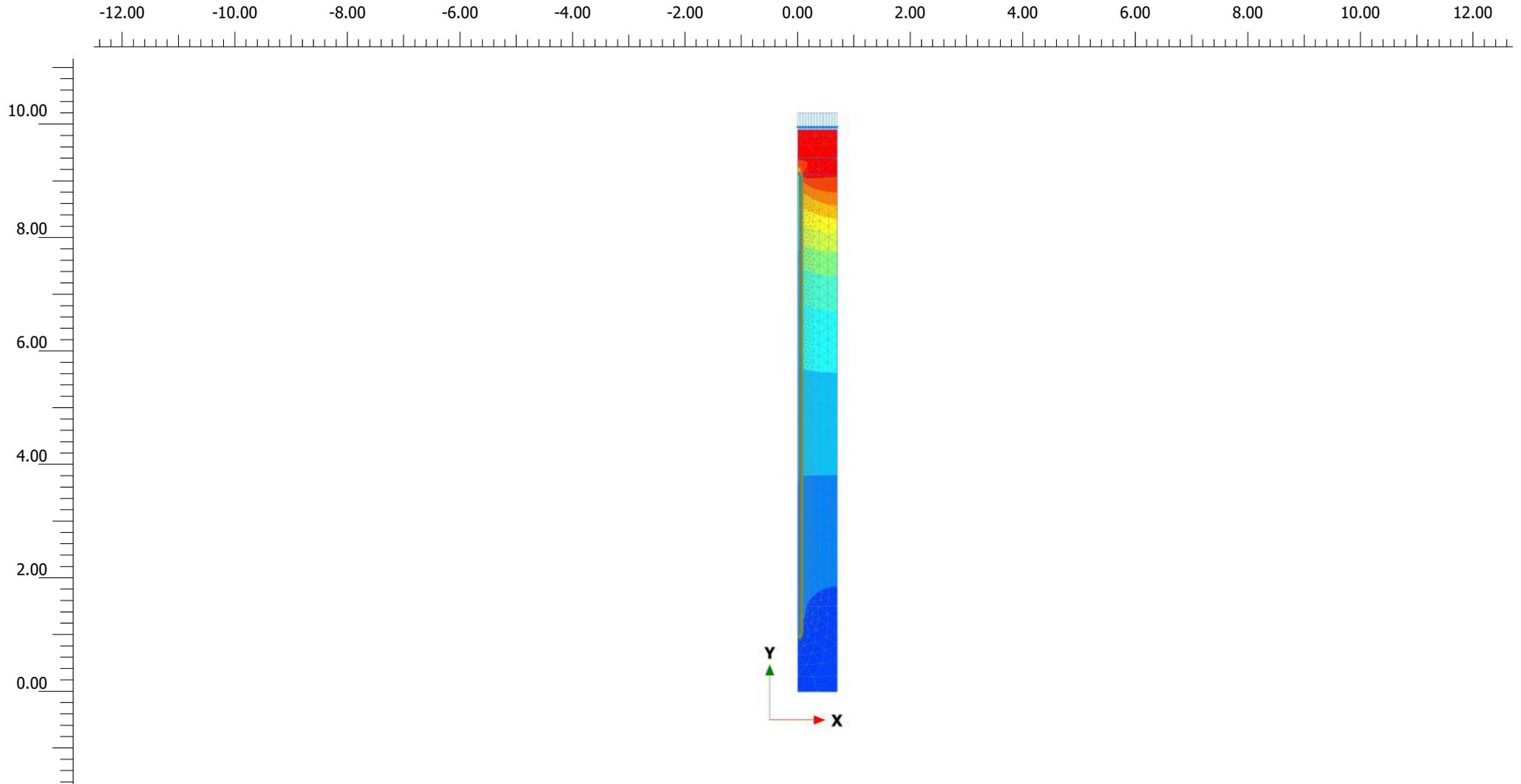
Project filename

hr=0.3, Req=0.4993 ps

Step

28

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 2034 at Node 16987)

Minimum value = -0.01147 m (Element 35 at Node 513)



Project description

hr=0.3, Req=0.699 uy

Date

19/12/2021

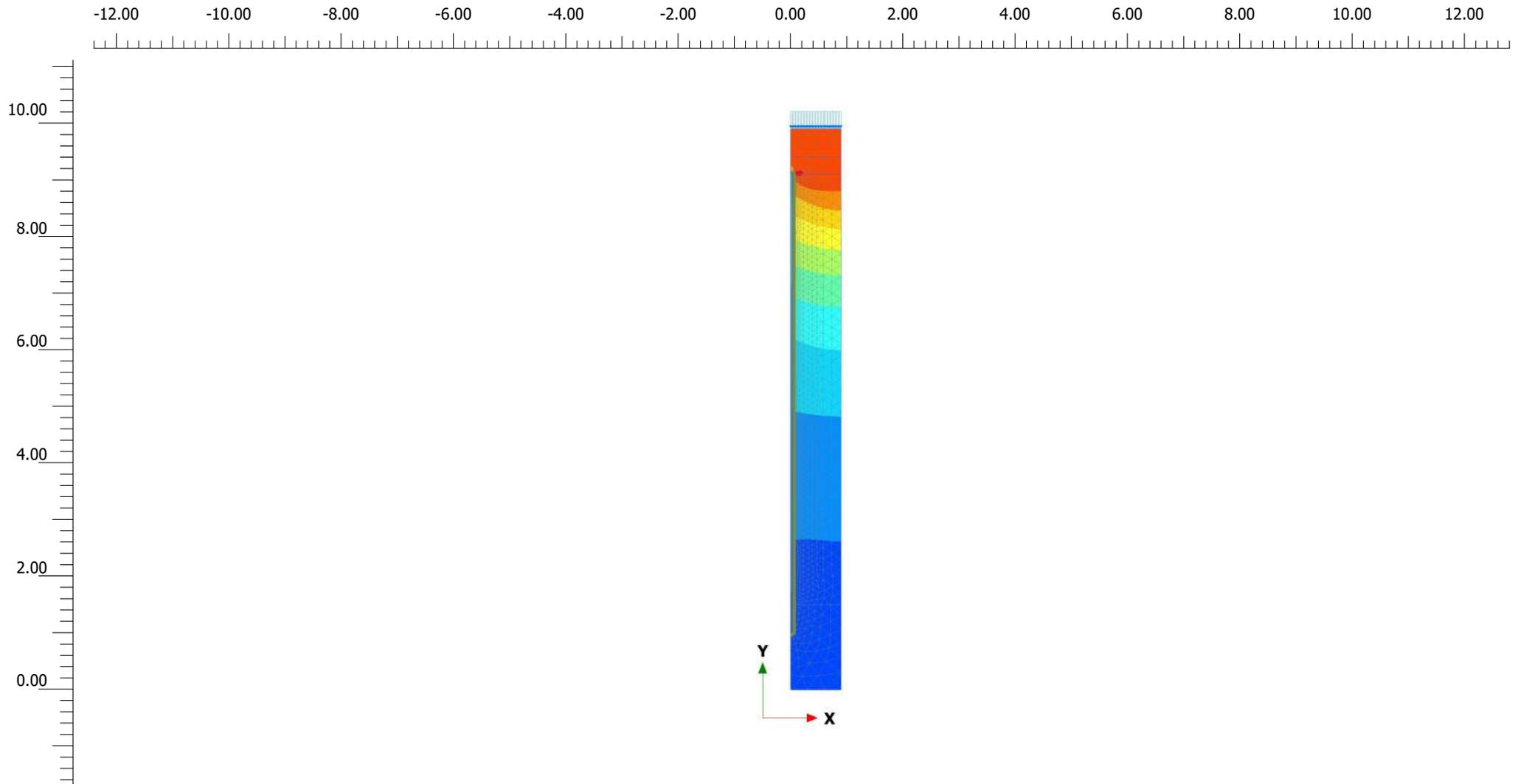
Project filename

hr=0.3, Req=0.699 ps

Step

63

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 2902 at Node 24007)

Minimum value = -0.02042 m (Element 49 at Node 1063)



Project description

hr=0.3, Req=0.8987 uy

Date

19/12/2021

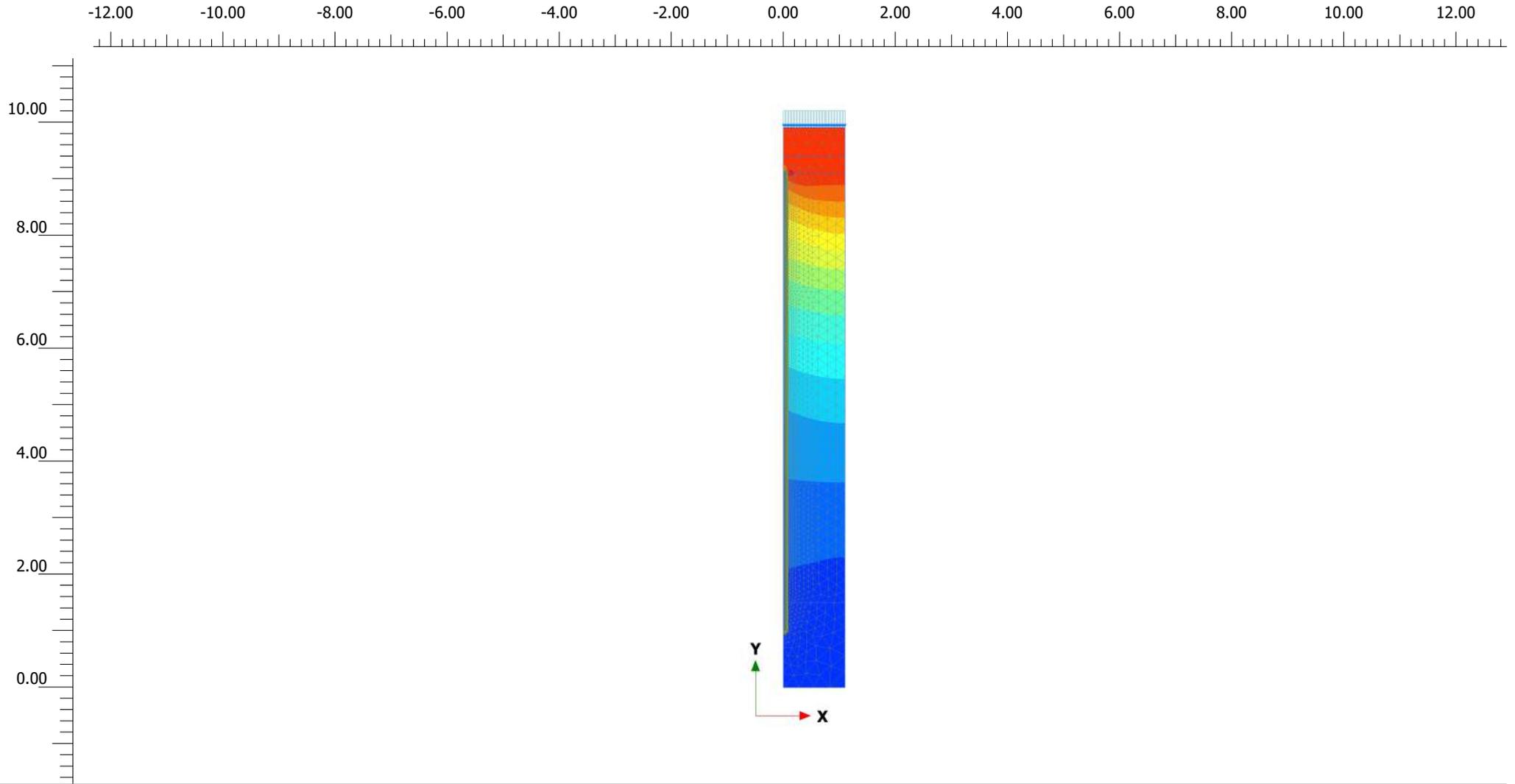
Project filename

hr=0.3, Req=0.8987 ps

Step

142

Company



Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 3993 at Node 34435)

Minimum value = -0.02960 m (Element 70 at Node 1648)



Project description

hr=0.3, Req=1.0984 uy

Date

19/12/2021

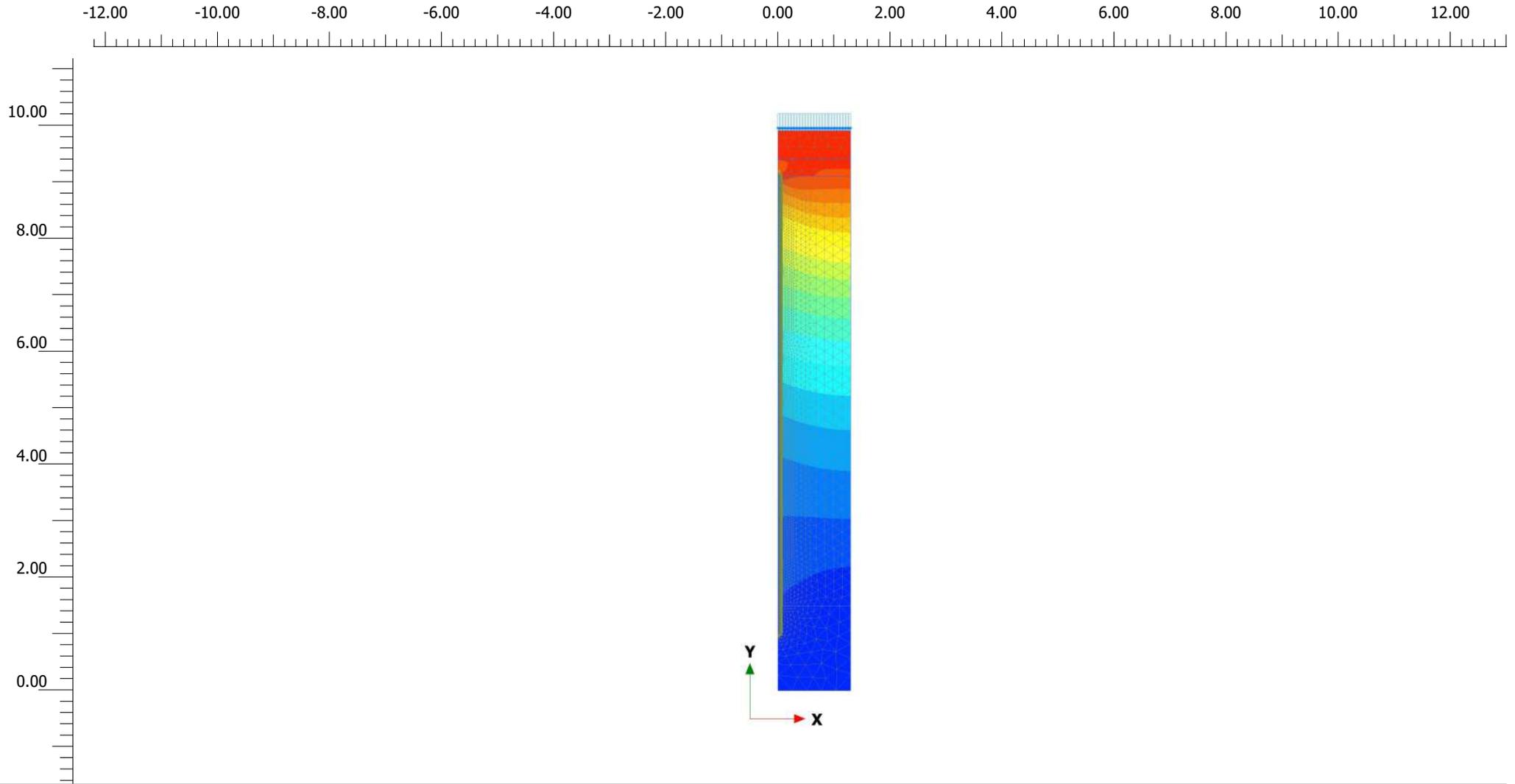
Project filename

hr=0.3, Req=1.0984 ps

Step

215

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 5101 at Node 42811)

Minimum value = -0.03596 m (Element 92 at Node 3070)



Project description

hr=0.3, Req=1.2981 uy

Date

19/12/2021

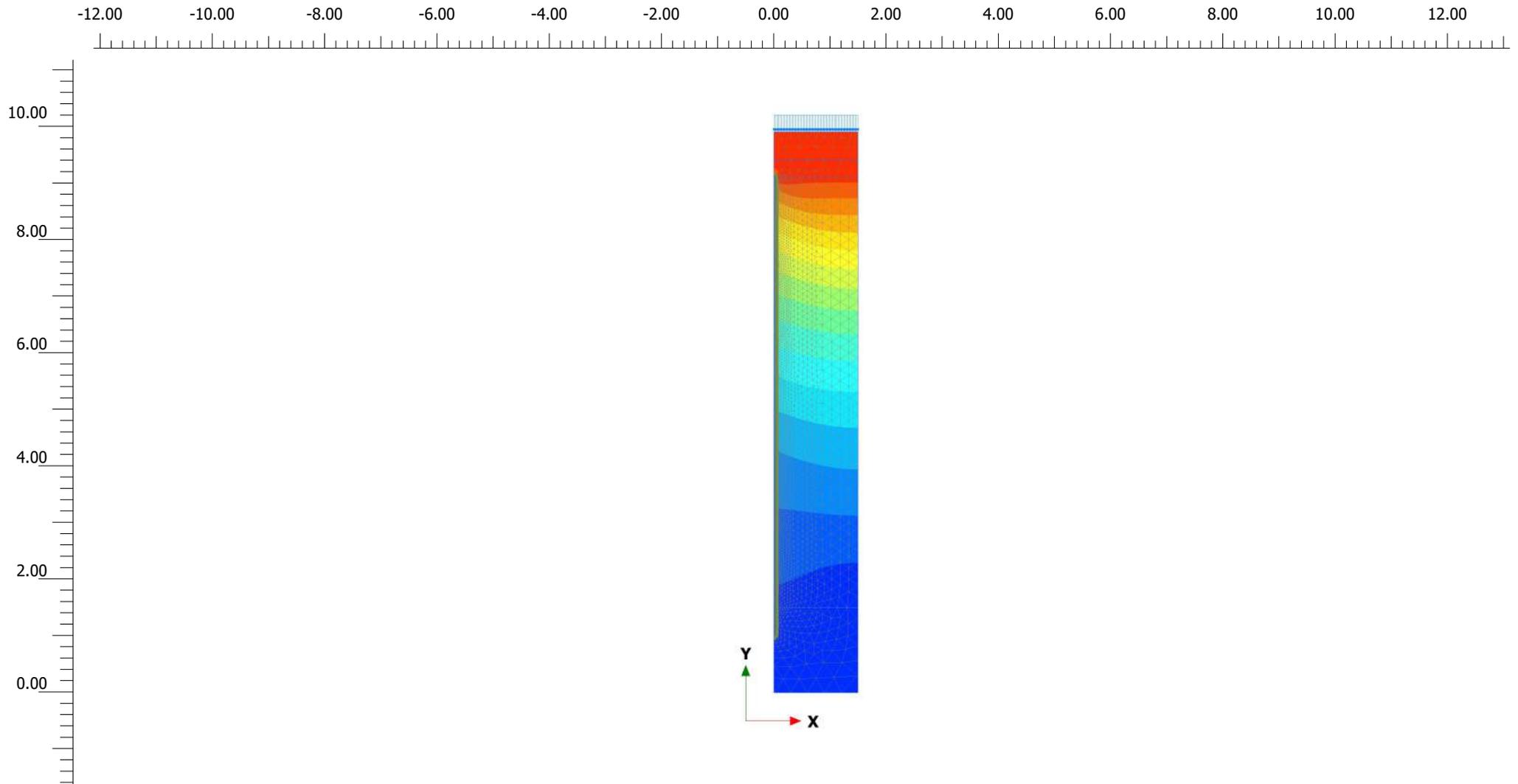
Project filename

hr=0.3, Req=1.2981 ps

Step

366

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 6127 at Node 48259)

Minimum value = -0.04078 m (Element 88 at Node 3111)



Project description

hr=0.3, Req=1.4979 uy

Date

19/12/2021

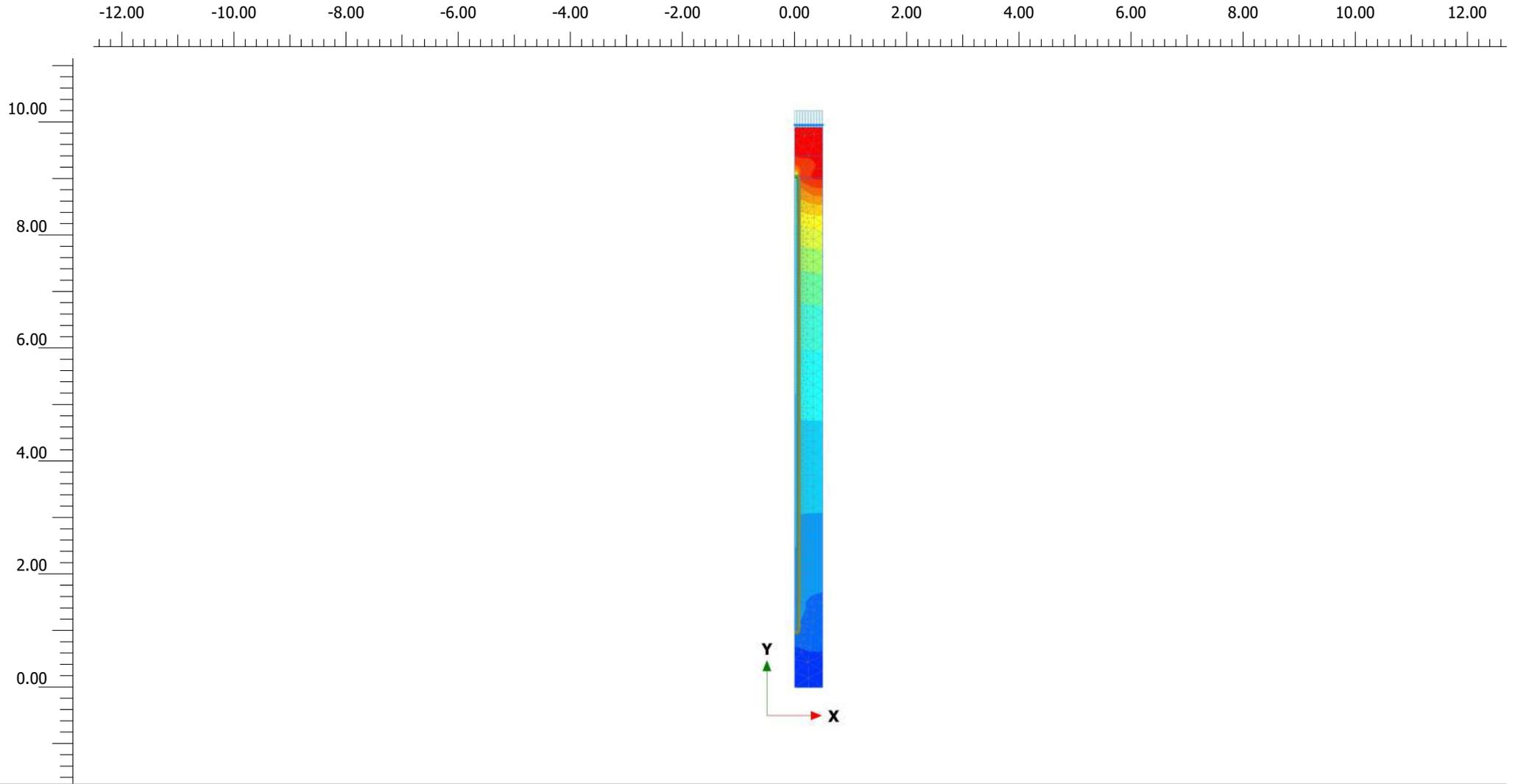
Project filename

hr=0.3, Req=1.4979 ps

Step

280

Company



Total displacements u_y (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 1196 at Node 11131)

Minimum value = $-5.648 \cdot 10^{-3}$ m (Element 27 at Node 1121)



Project description

hr=0.4, Req=0.4993 uy

Date

19/12/2021

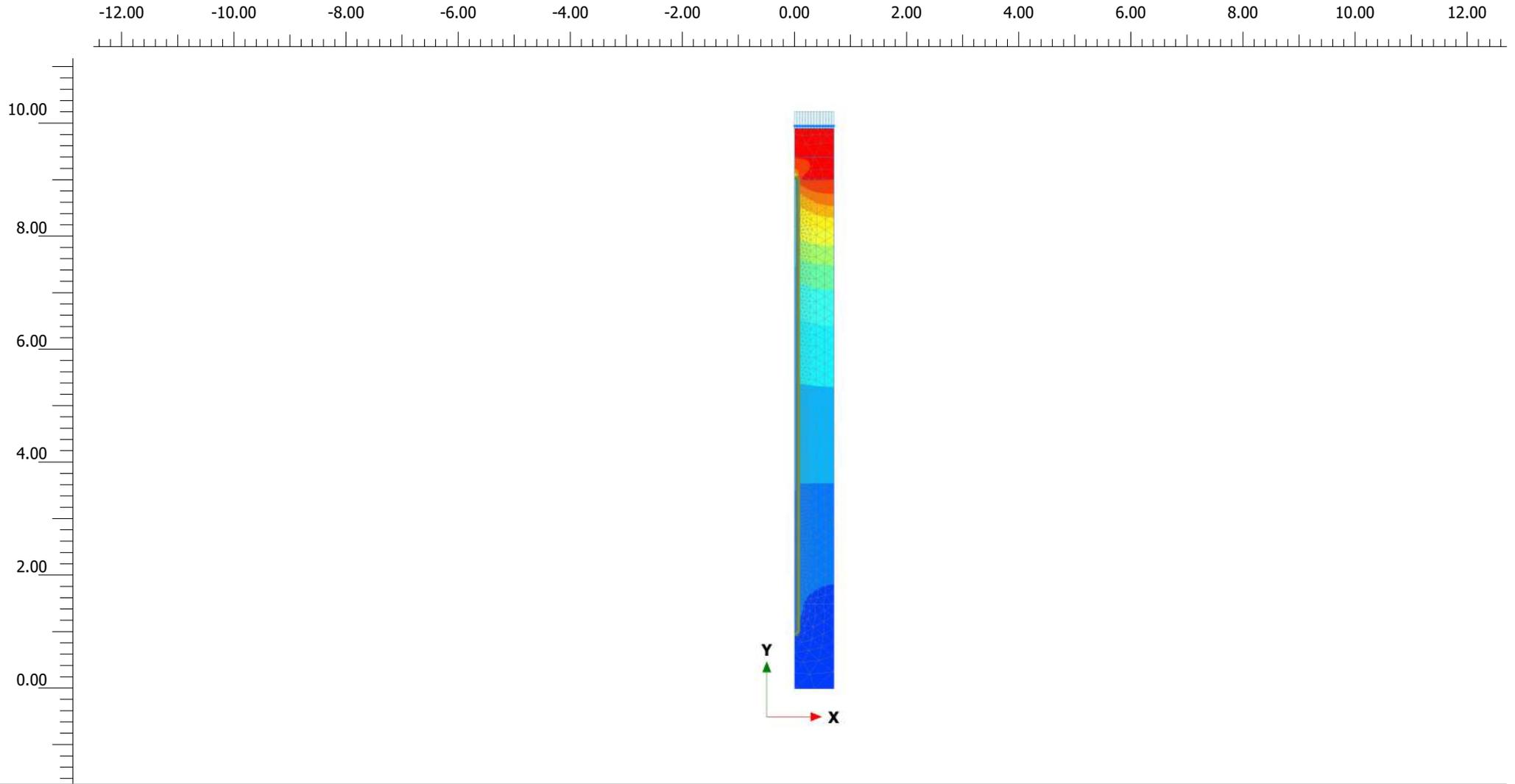
Project filename

hr=0.4, Req=0.4993 ps

Step

29

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 2061 at Node 18083)

Minimum value = -0.01206 m (Element 39 at Node 1335)



Project description

hr=0.4, Req=0.699 uy

Date

19/12/2021

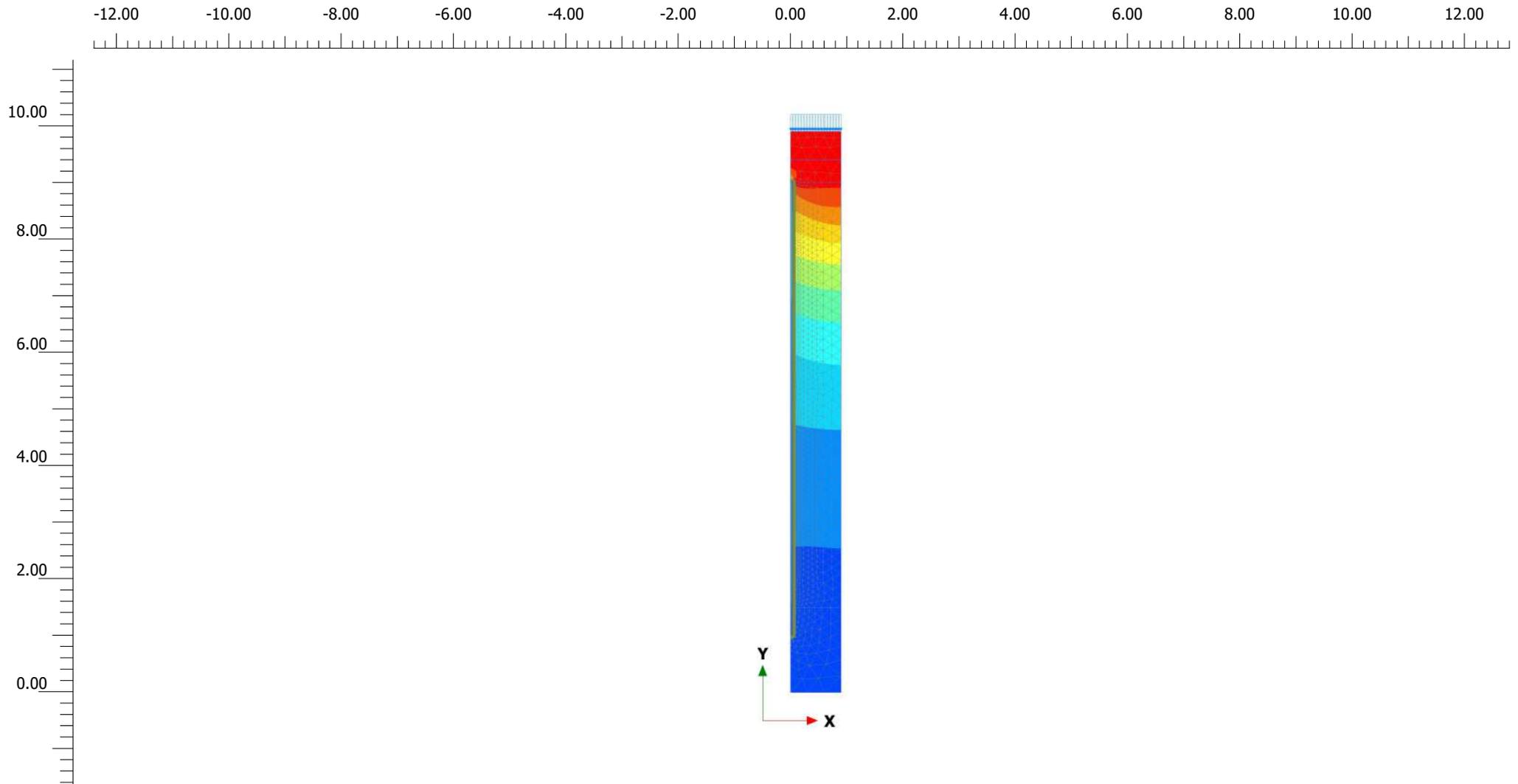
Project filename

hr=0.4, Req=0.699 ps

Step

71

Company



Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 2904 at Node 25021)

Minimum value = -0.02127 m (Element 58 at Node 1124)



Project description

hr=0.4, Req=0.8987 uy

Date

19/12/2021

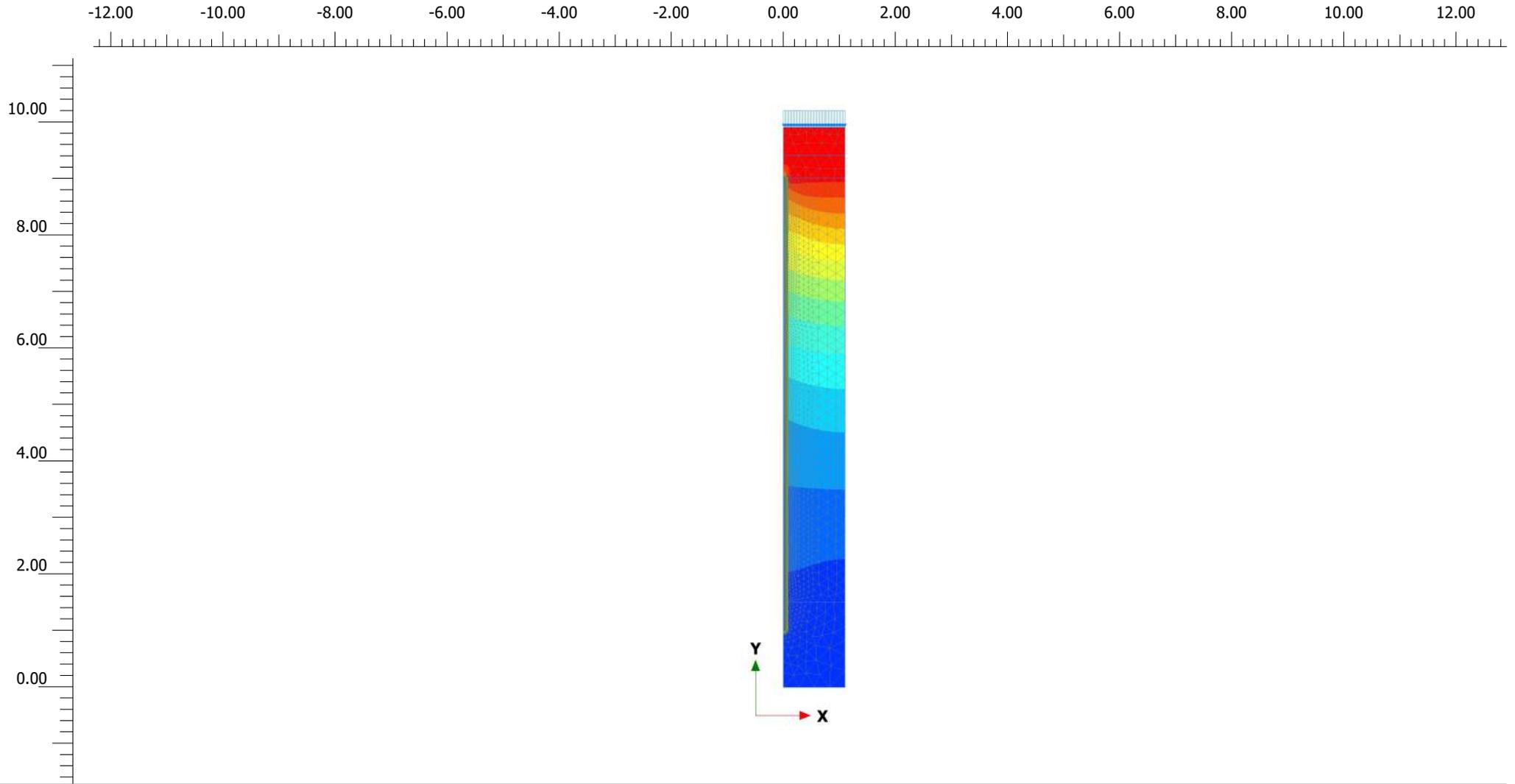
Project filename

hr=0.4, Req=0.8987 ps

Step

173

Company



Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 3973 at Node 34255)

Minimum value = -0.02955 m (Element 71 at Node 1763)



Project description

hr=0.4, Req=1.0984 uy

Date

19/12/2021

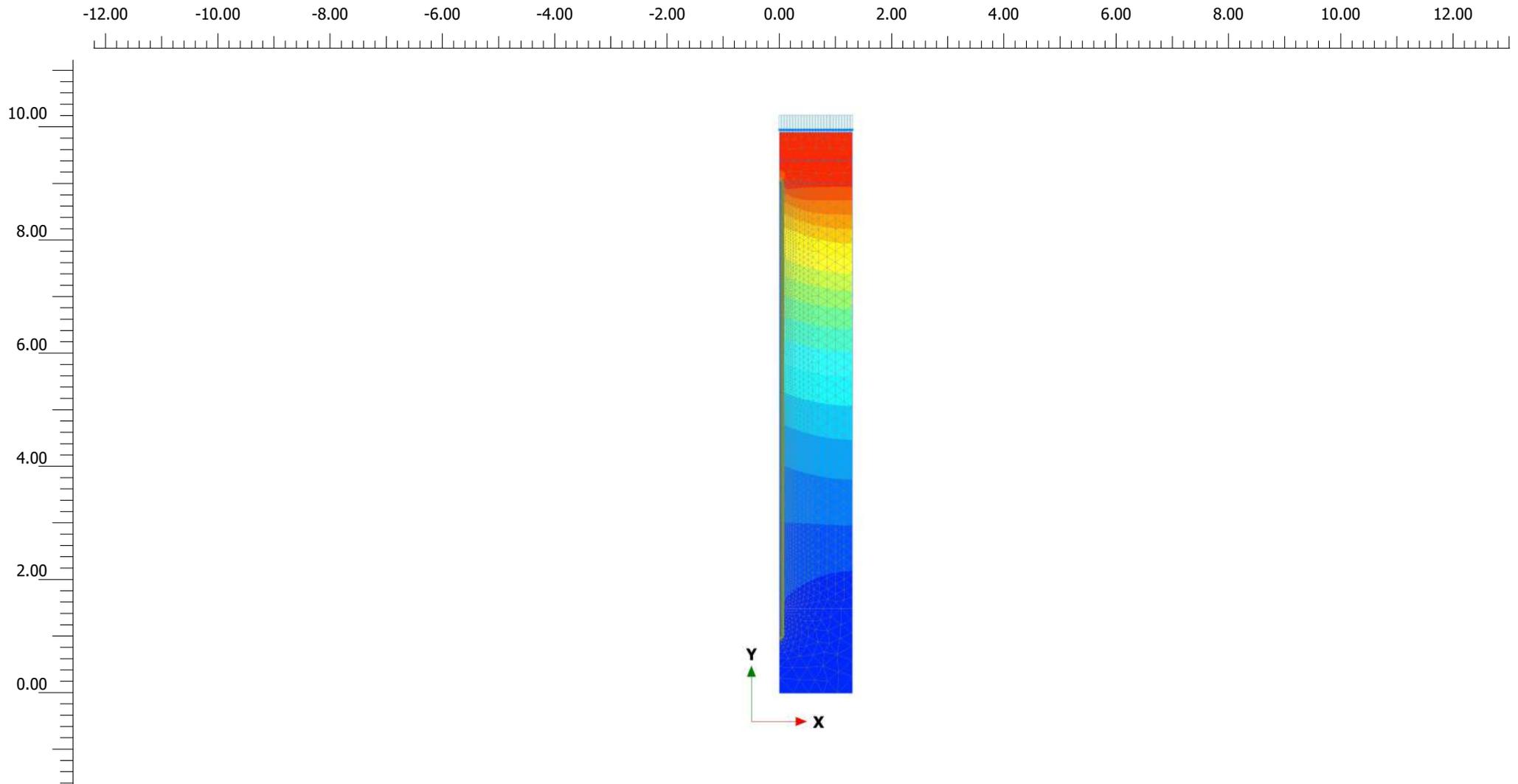
Project filename

hr=0.4, Req=1.0984 ps

Step

260

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 5098 at Node 42097)

Minimum value = -0.03627 m (Element 93 at Node 2296)



Project description

hr=0.4, Req=1.2981 uy

Date

19/12/2021

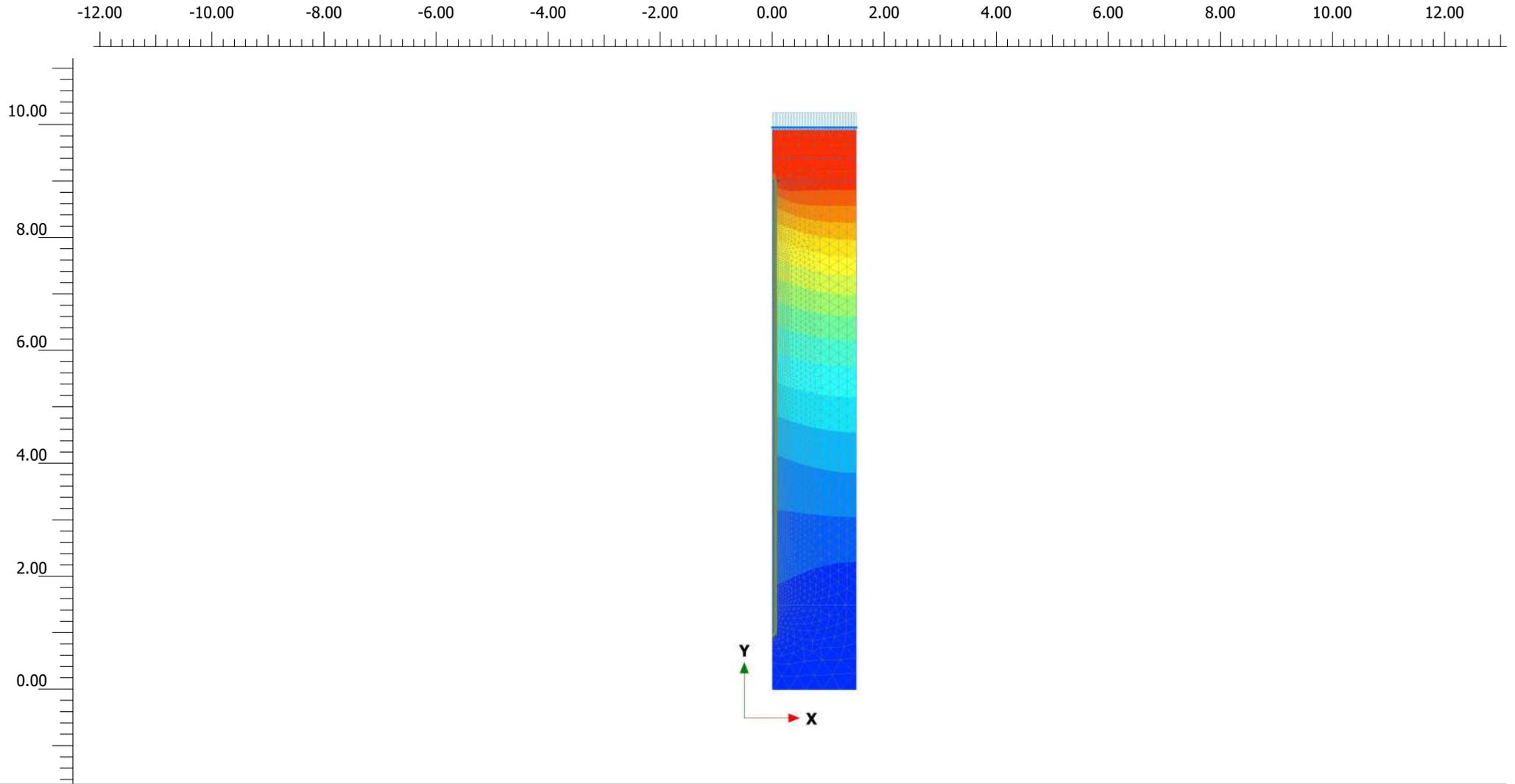
Project filename

hr=0.4, Req=1.2981 ps

Step

290

Company



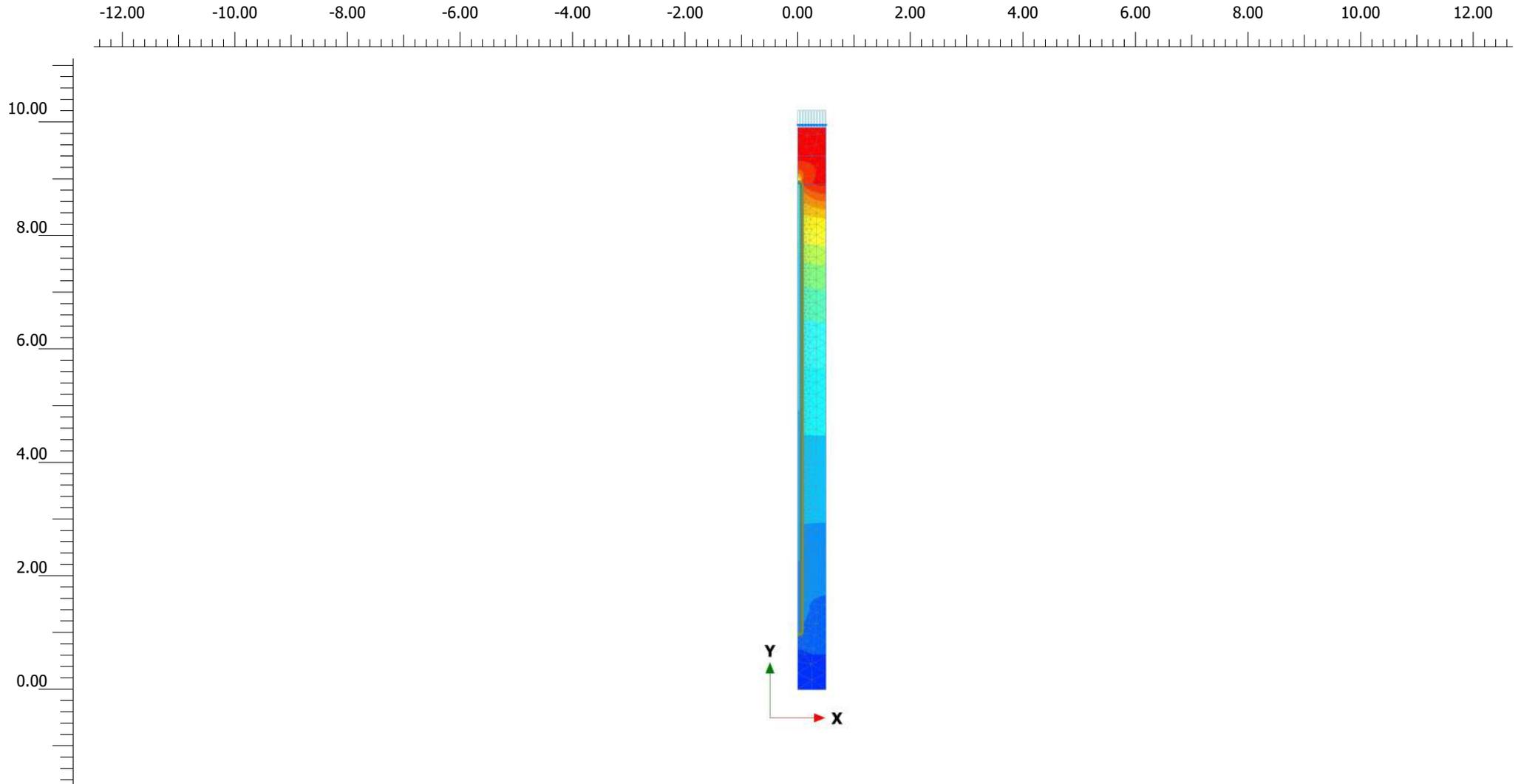
Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 5903 at Node 50115)

Minimum value = -0.04101 m (Element 97 at Node 5097)



<i>Project description</i> hr=0.4, Req=1.4979 uy		<i>Date</i> 19/12/2021	
<i>Project filename</i> hr=0.4, Req=1.4979 ps		<i>Step</i> 248	<i>Company</i>



Total displacements u_y (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 1224 at Node 11343)

Minimum value = $-6.107 \cdot 10^{-3}$ m (Element 18 at Node 78)



Project description

hr=0.5, Req=0.4993 uy

Date

19/12/2021

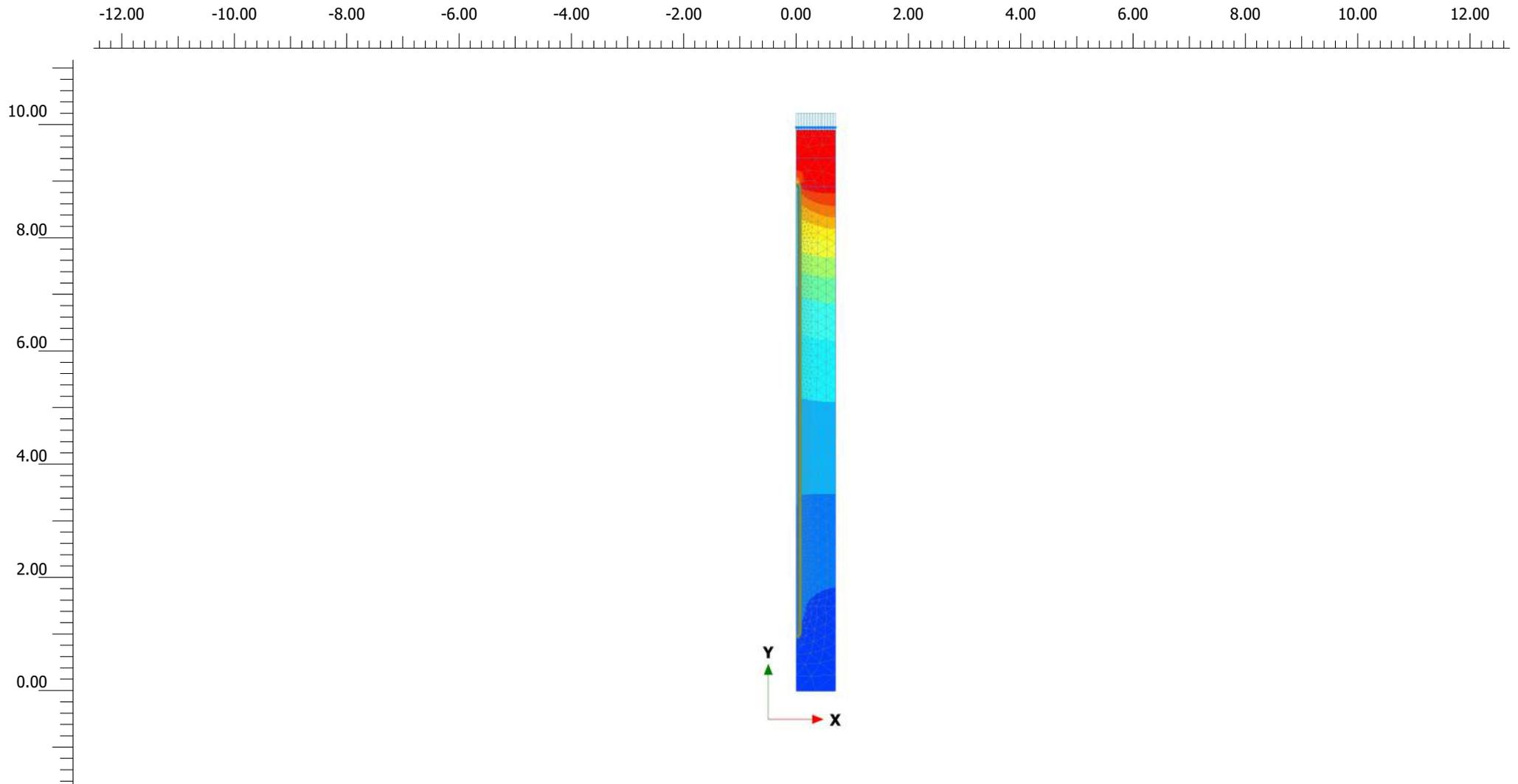
Project filename

hr=0.5, Req=0.4993 ps

Step

37

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 1987 at Node 17479)

Minimum value = -0.01254 m (Element 25 at Node 134)



Project description

hr=0.5, Req=0.699 uy

Date

19/12/2021

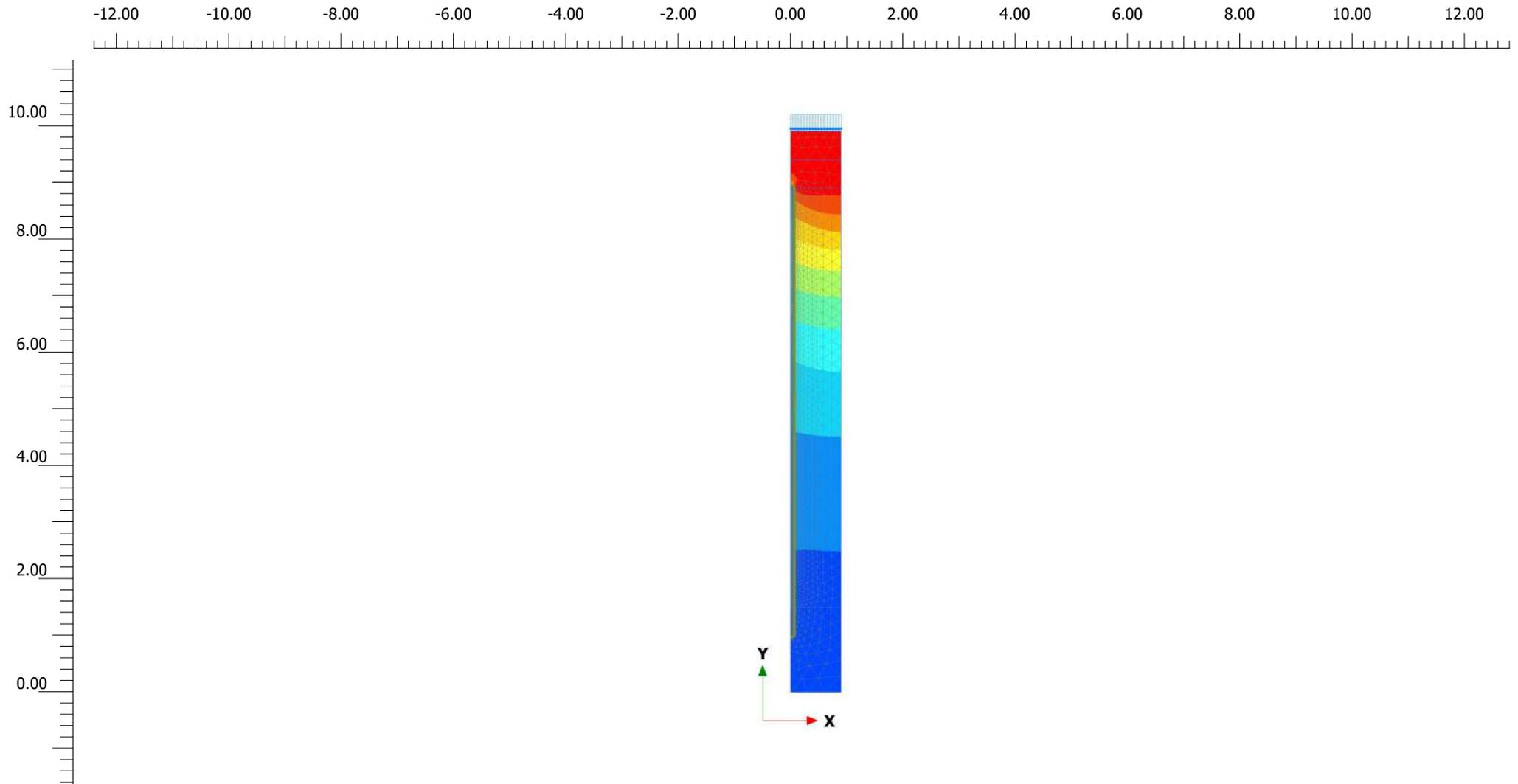
Project filename

hr=0.5, Req=0.699 ps

Step

76

Company



Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 2828 at Node 23375)

Minimum value = -0.02140 m (Element 57 at Node 1057)



Project description

hr=0.5, Req=0.8987 uy

Date

19/12/2021

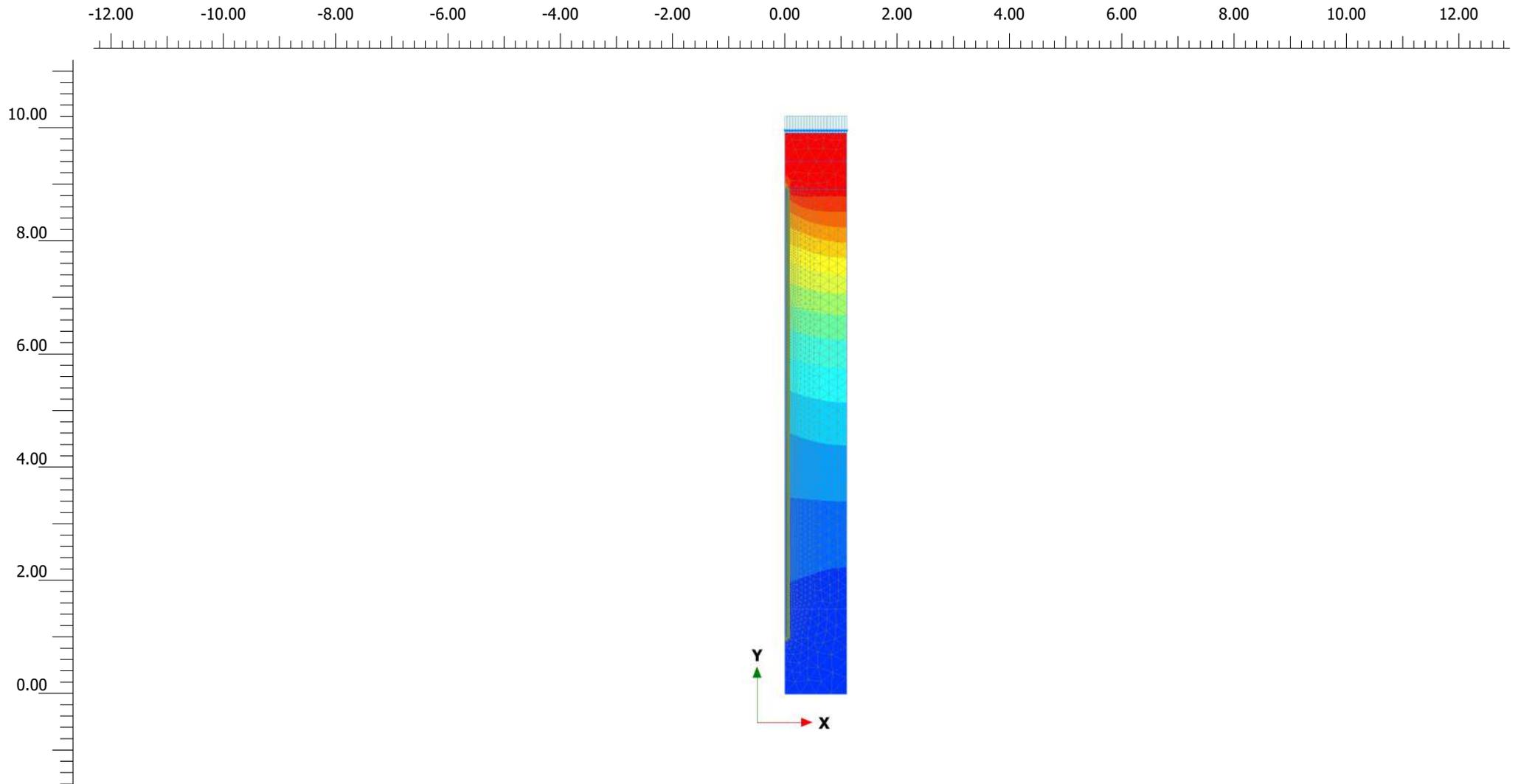
Project filename

hr=0.5, Req=0.8987 ps

Step

159

Company



Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 3900 at Node 33617)

Minimum value = -0.02987 m (Element 83 at Node 1439)



Project description

hr=0.5, Req=1.0984 uy

Date

19/12/2021

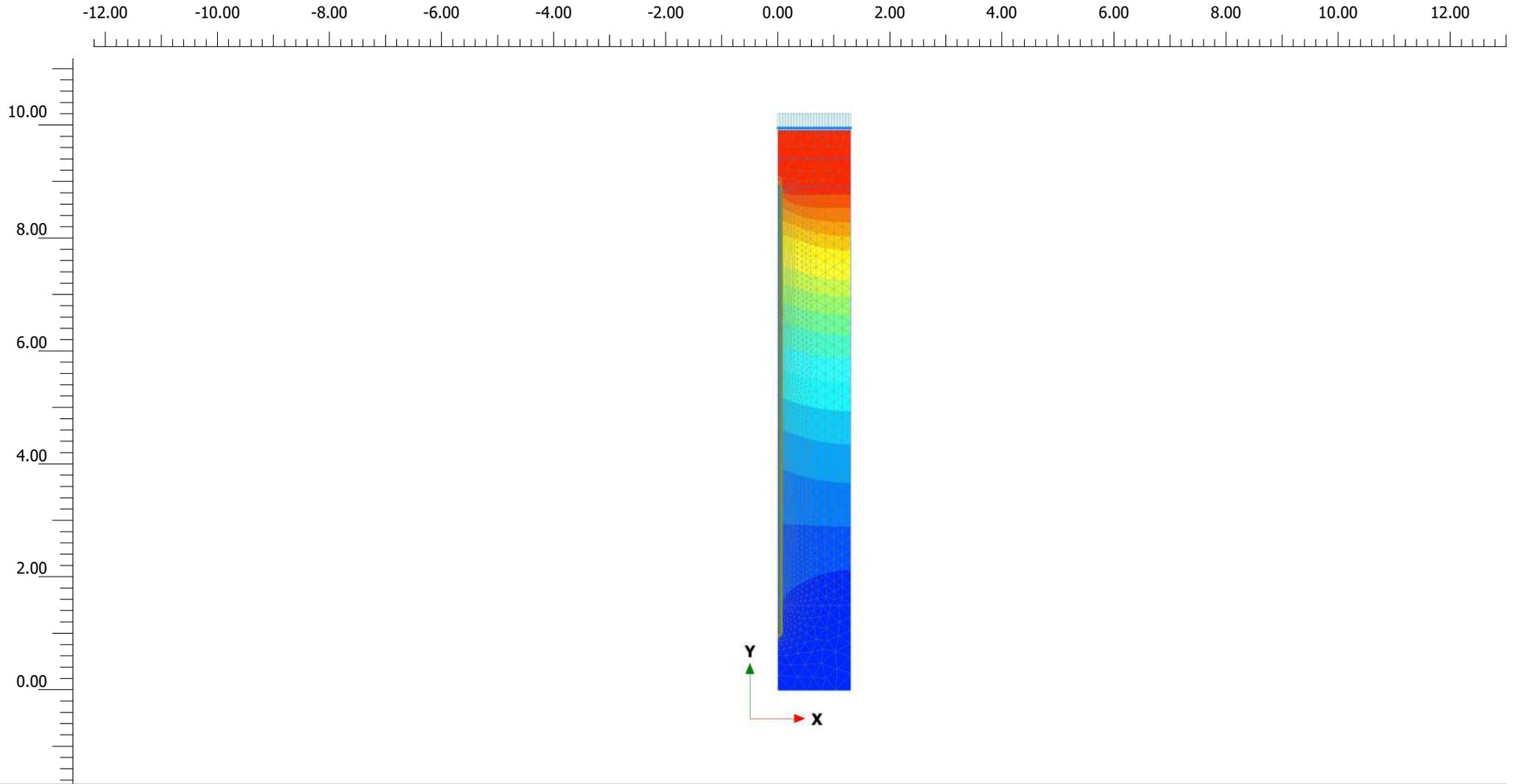
Project filename

hr=0.5, Req=1.0984 ps

Step

266

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 5349 at Node 44075)

Minimum value = -0.03652 m (Element 103 at Node 1664)



Project description

hr=0.5, Req=1.2981 uy

Date

19/12/2021

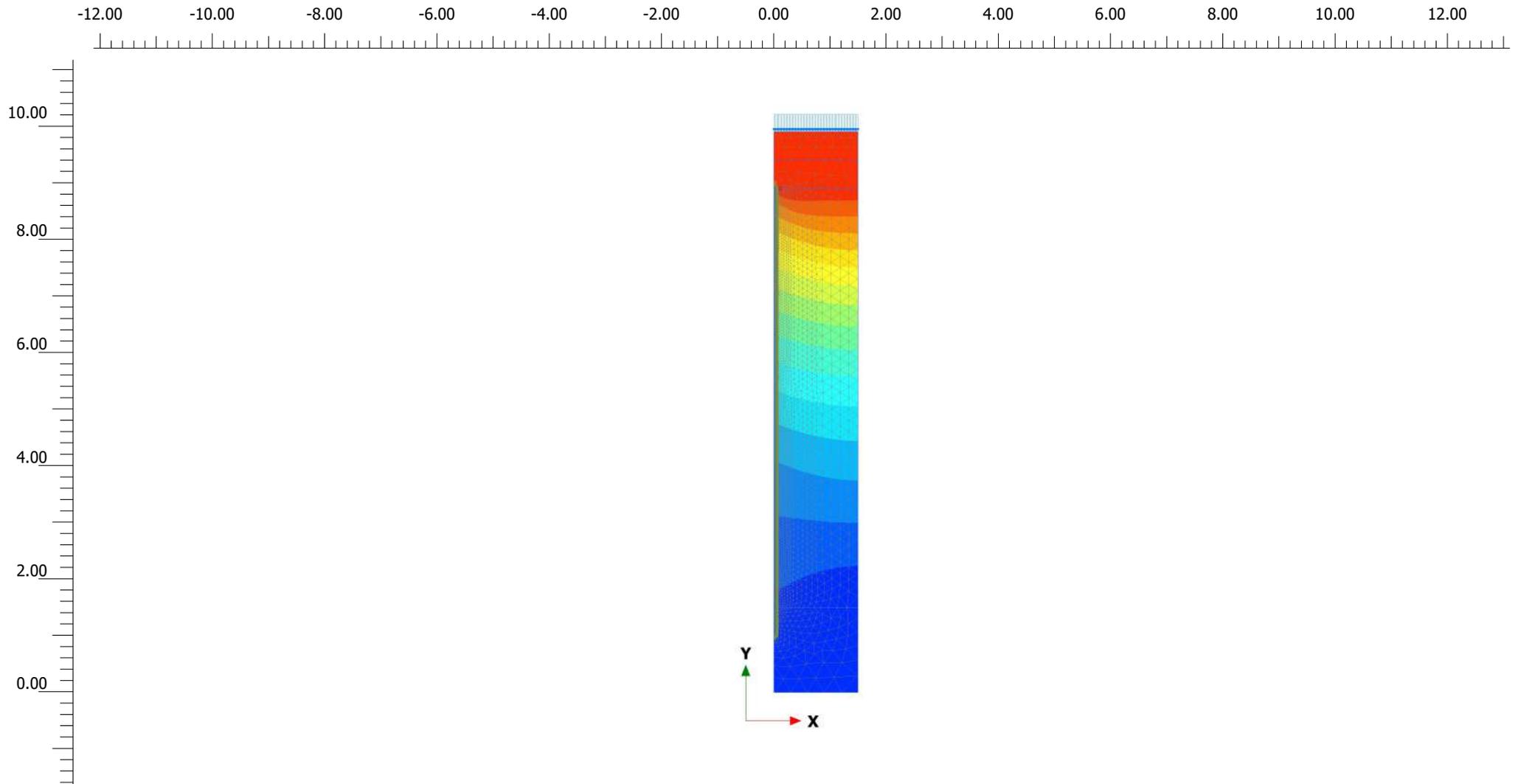
Project filename

hr=0.5, Req=1.2981 ps

Step

379

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 5965 at Node 47799)

Minimum value = -0.04118 m (Element 105 at Node 2715)



Project description

hr=0.5, Req=1.4979 uy

Date

19/12/2021

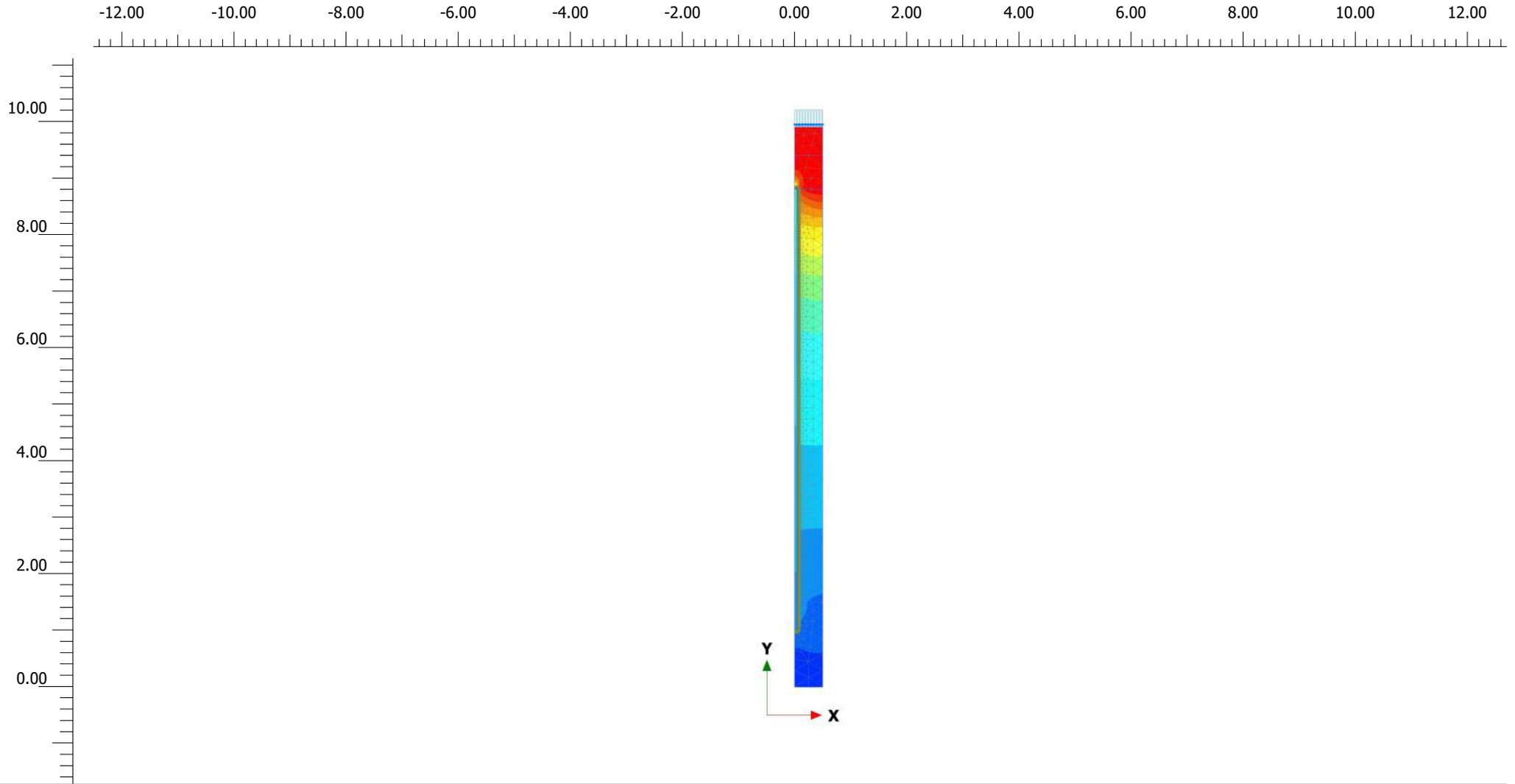
Project filename

hr=0.5, Req=1.4979 ps

Step

289

Company



Total displacements u_y (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 1169 at Node 10893)

Minimum value = $-6.379 \cdot 10^{-3}$ m (Element 17 at Node 4)



Project description

hr=0.6, Req=0.4493 uy

Date

19/12/2021

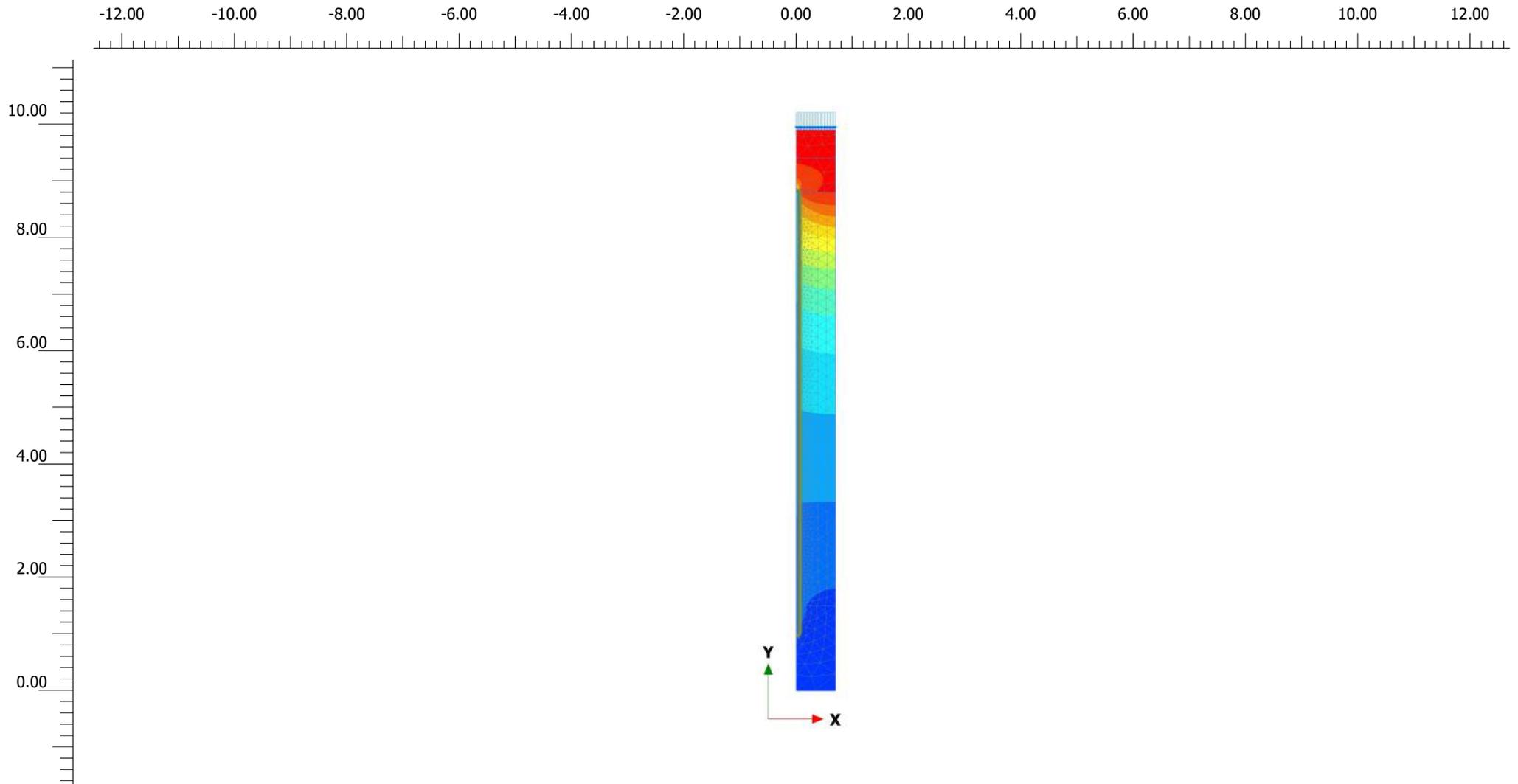
Project filename

hr=0.6, Req=0.4993 ps

Step

39

Company



Total displacements u_y (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 2012 at Node 16771)

Minimum value = -0.01313 m (Element 24 at Node 98)



Project description

hr=0.6, Req=0.699 uy

Date

19/12/2021

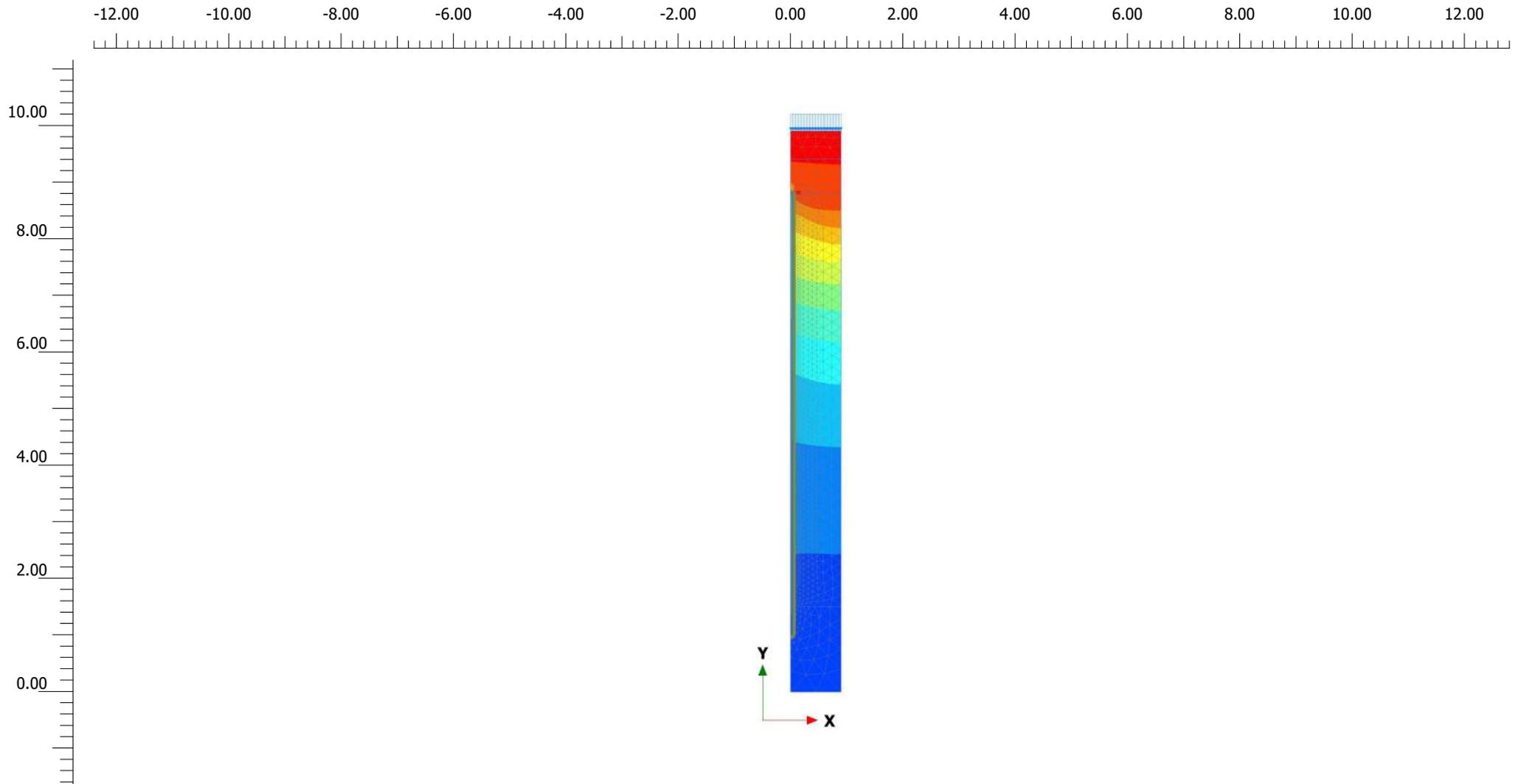
Project filename

hr=0.6, Req=0.699 ps

Step

84

Company



Total displacements u_y (scaled up 10.0 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 2840 at Node 24085)

Minimum value = -0.02226 m (Element 67 at Node 895)



Project description

hr=0.6, Req=0.8987 uy

Date

19/12/2021

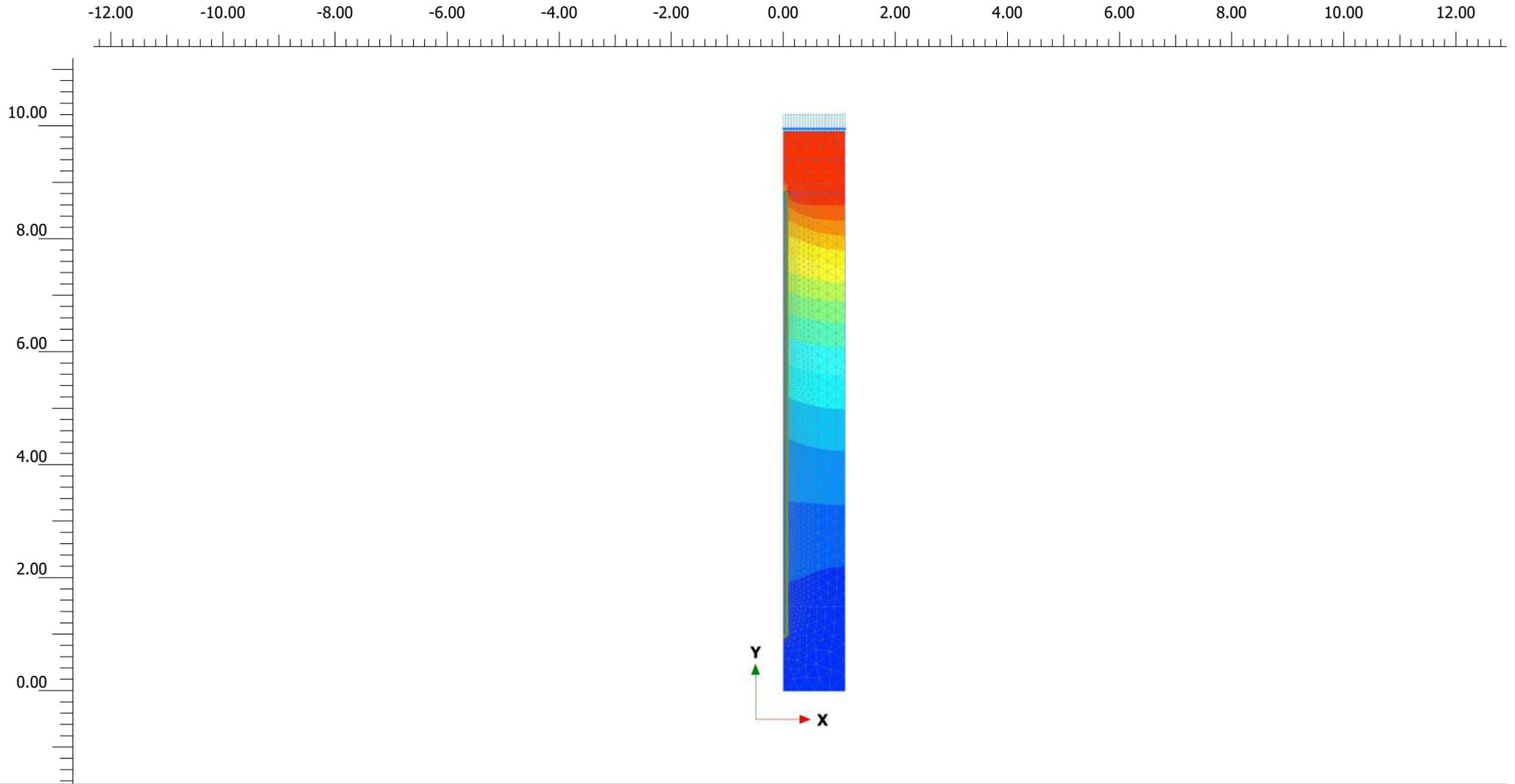
Project filename

hr=0.6, Req=0.8987 ps

Step

301

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 3900 at Node 33621)

Minimum value = -0.03047 m (Element 94 at Node 2071)



Project description

hr=0.6, Req=1.0984 uy

Date

19/12/2021

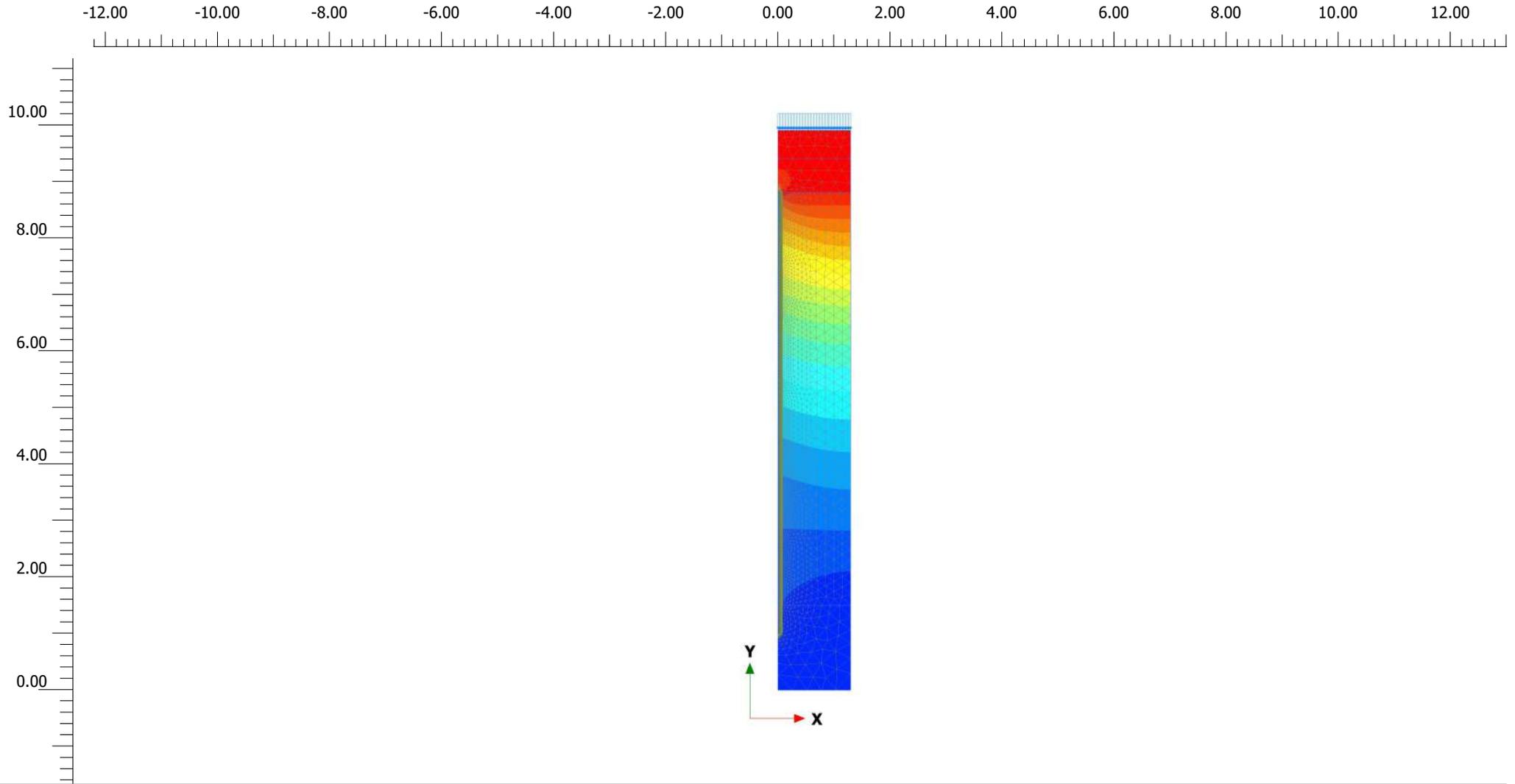
Project filename

hr=0.6, Req=1.0984 ps

Step

318

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 4996 at Node 41225)

Minimum value = -0.03722 m (Element 119 at Node 2025)



Project description

hr=0.6, Req=1.2981 uy

Date

19/12/2021

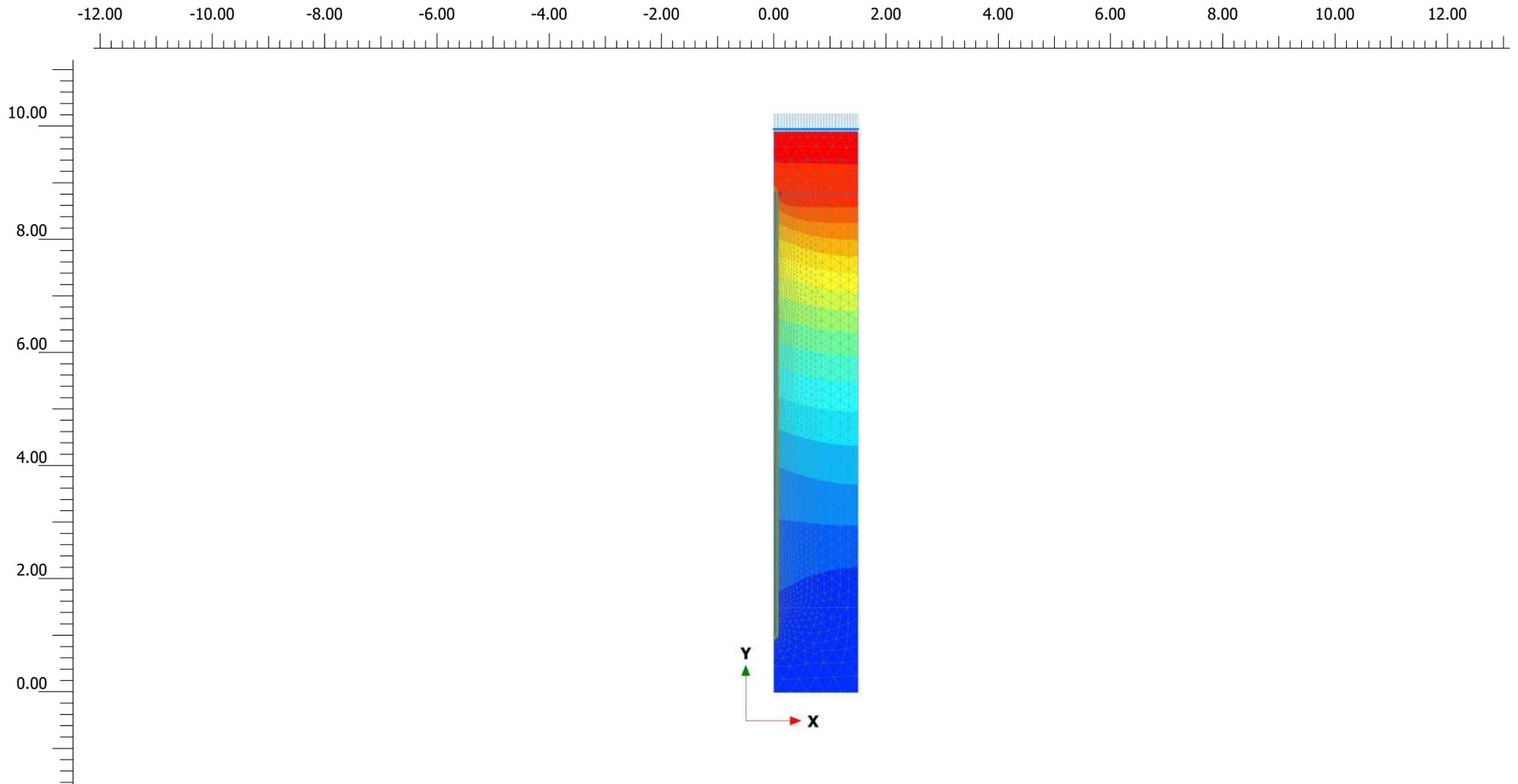
Project filename

hr=0.6, Req=1.2981 ps

Step

628

Company



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.000 m (Element 5675 at Node 44659)

Minimum value = -0.04141 m (Element 124 at Node 2167)



Project description

hr=0.6, Req=1.4979 uy

Date

19/12/2021

Project filename

hr=0.6, Req=1.4979 ps

Step

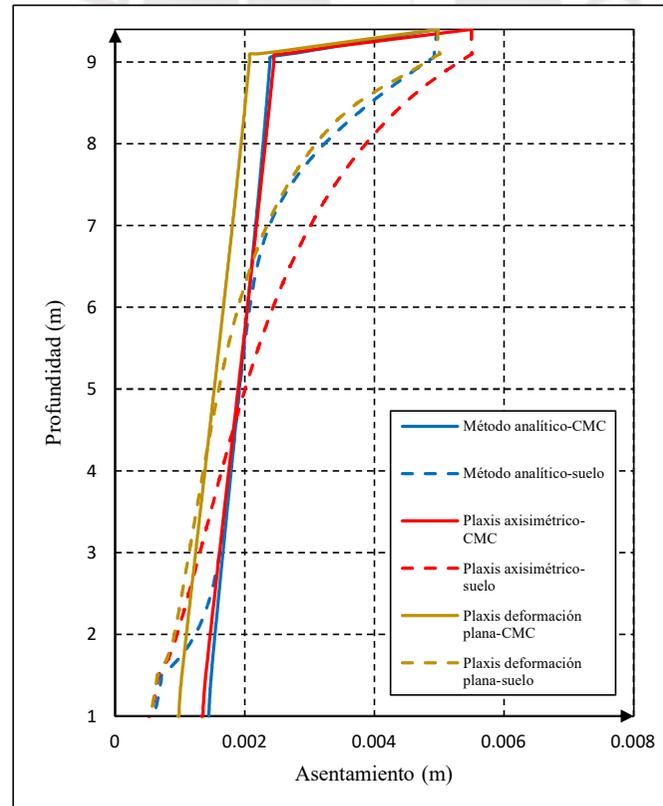
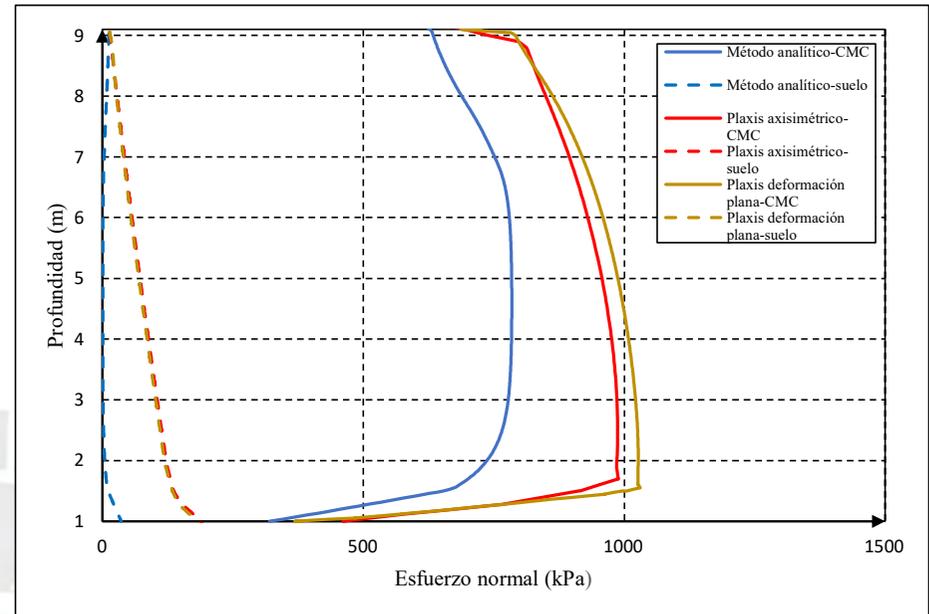
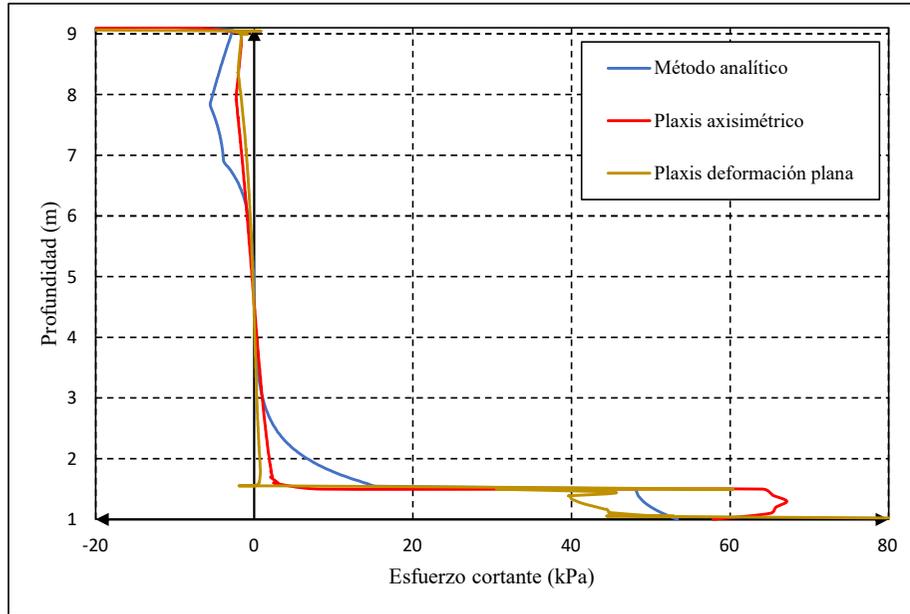
245

Company

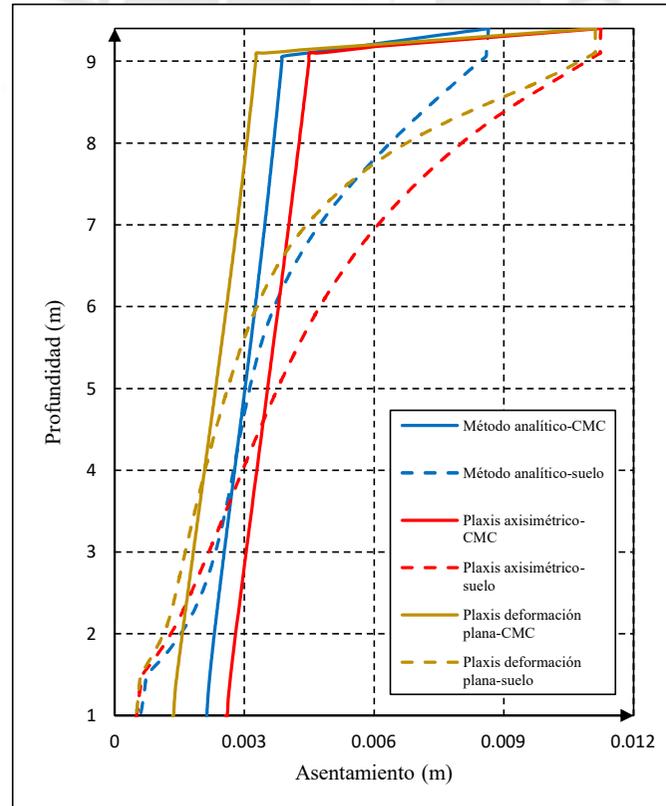
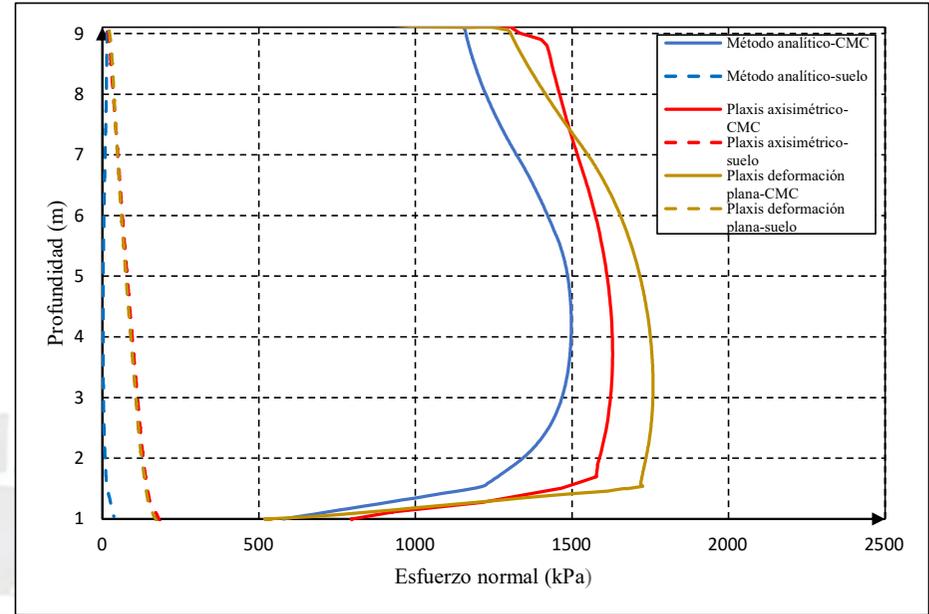
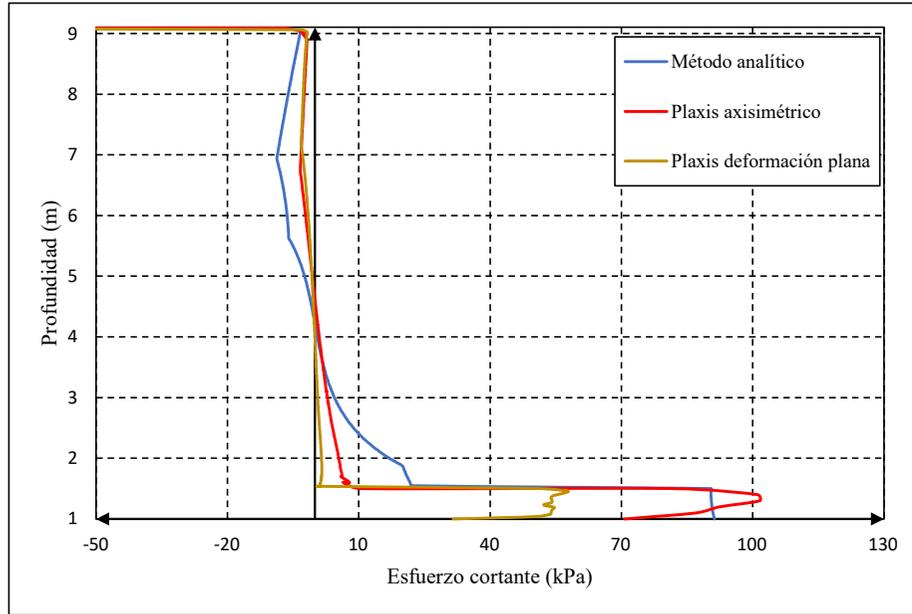
**ANEXO C: COMPARACIÓN DE
MÉTODO ANALÍTICO Y NUMÉRICO**



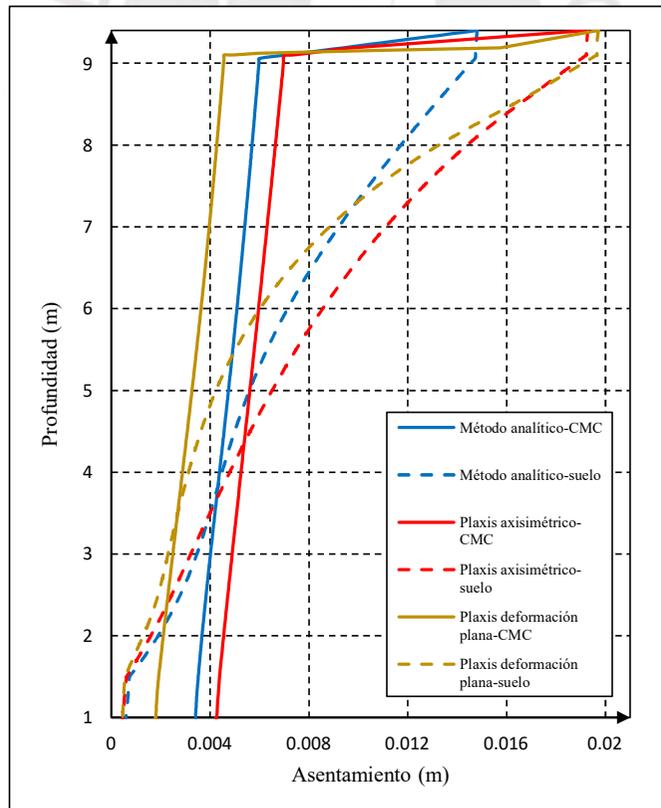
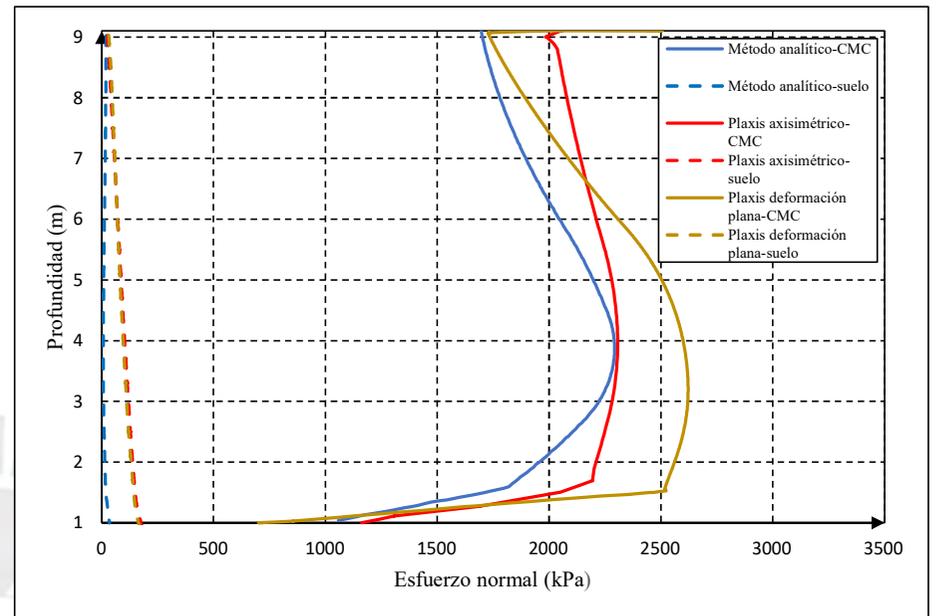
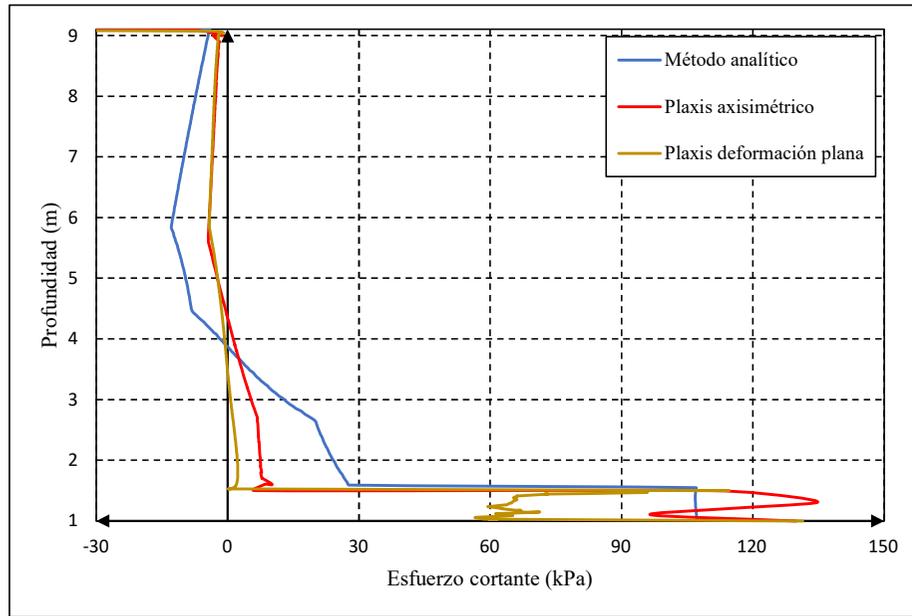
Caso $h_r = 0.30$ m, $b = 1.0$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



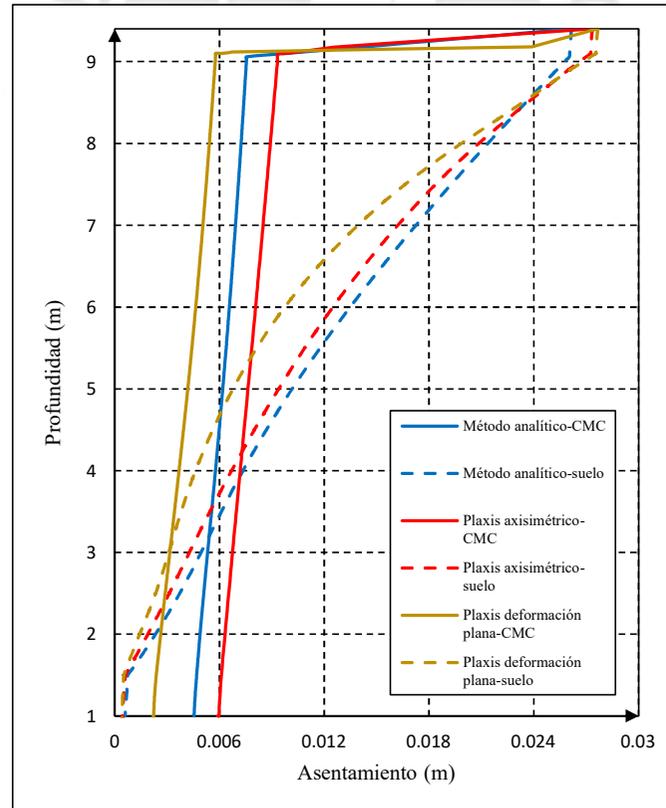
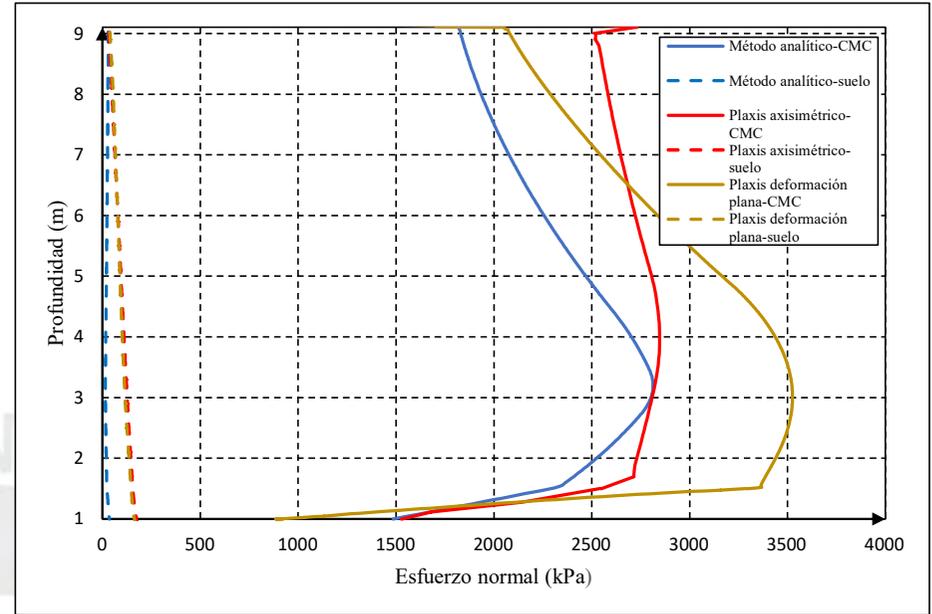
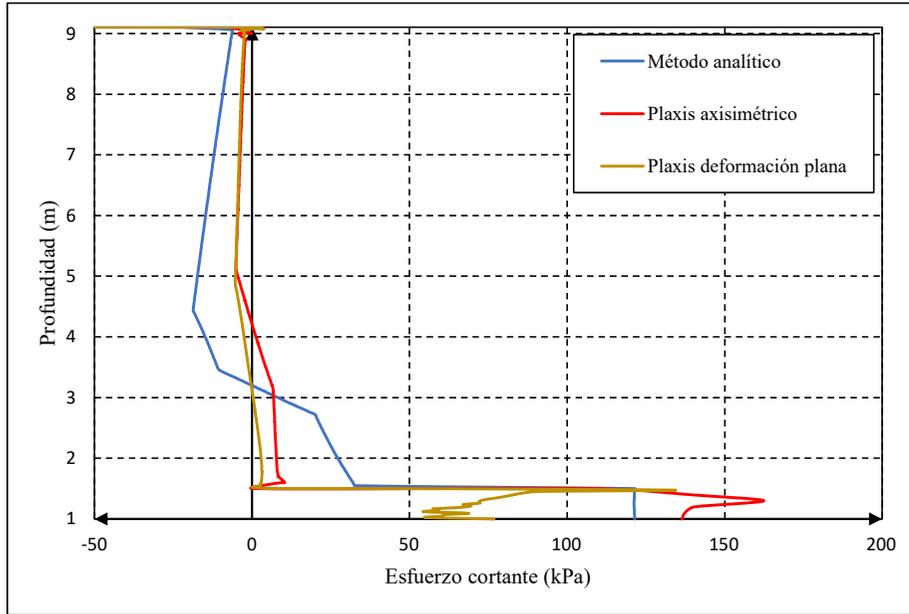
Caso $h_r = 0.30$ m, $b = 1.4$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



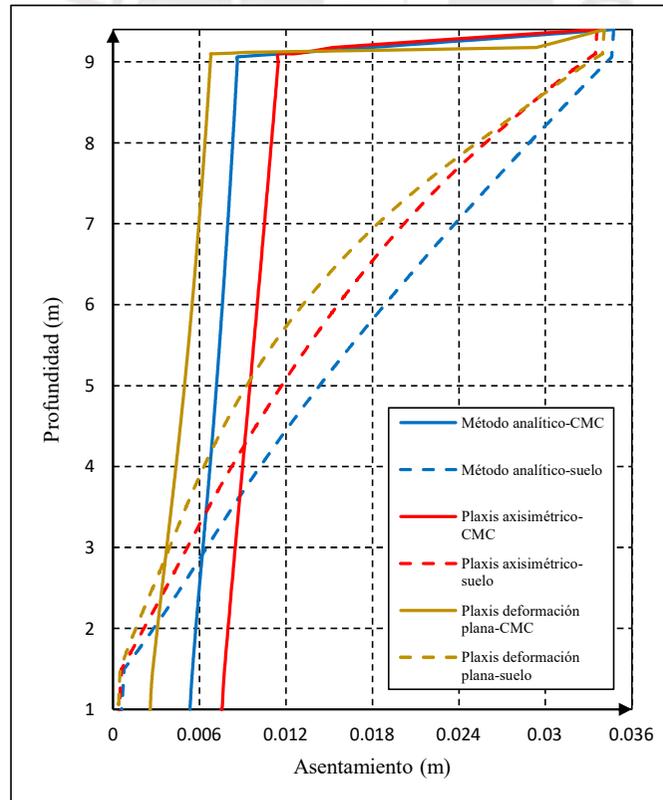
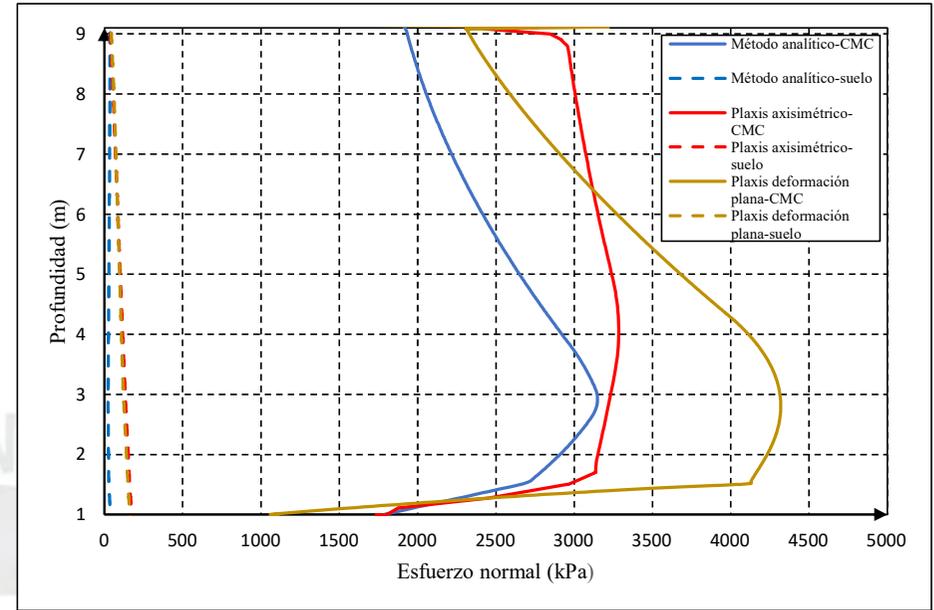
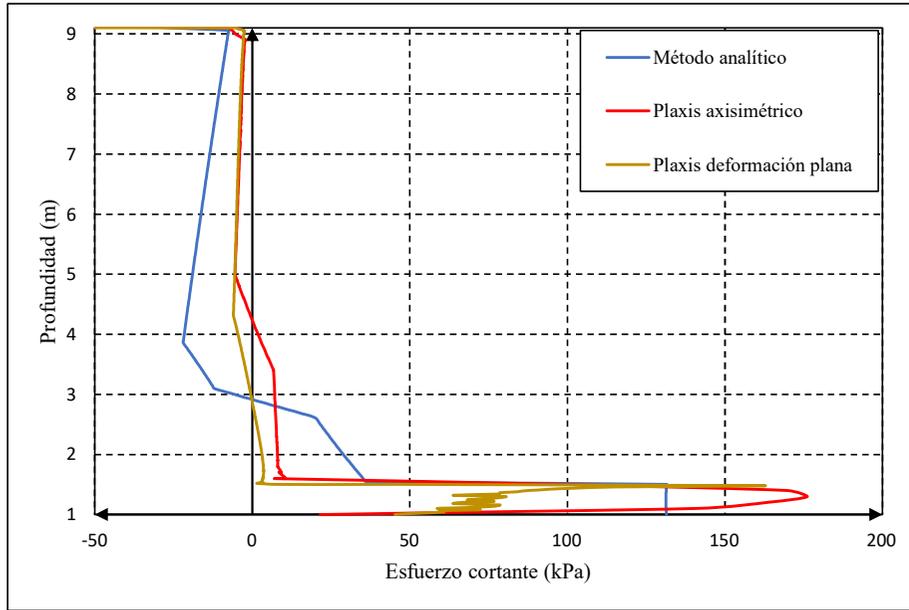
Caso $h_r = 0.30$ m, $b = 1.8$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



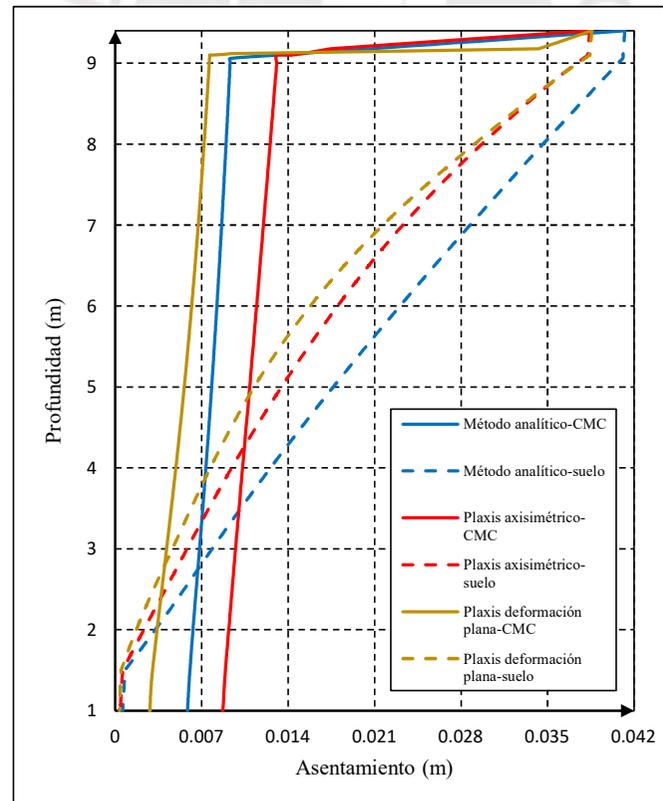
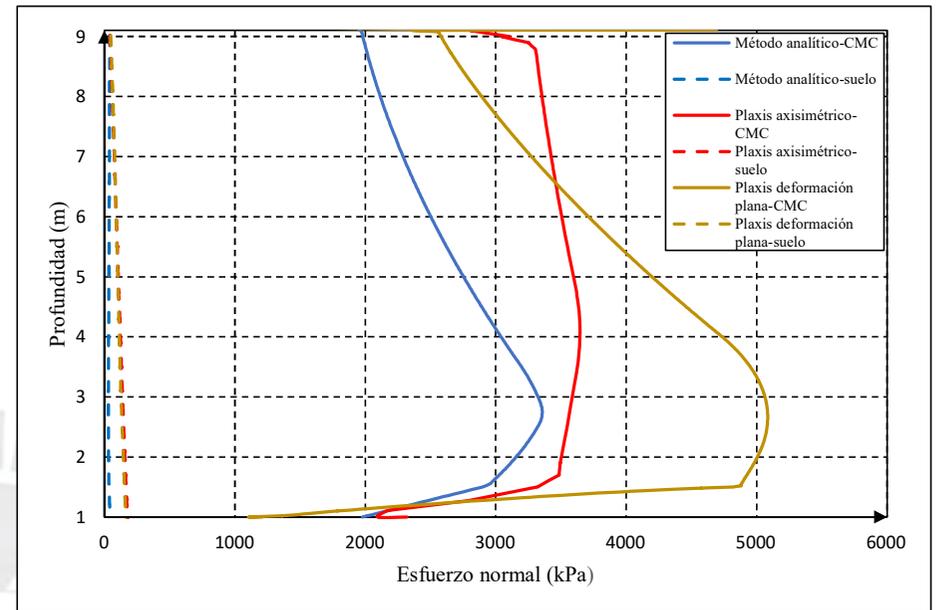
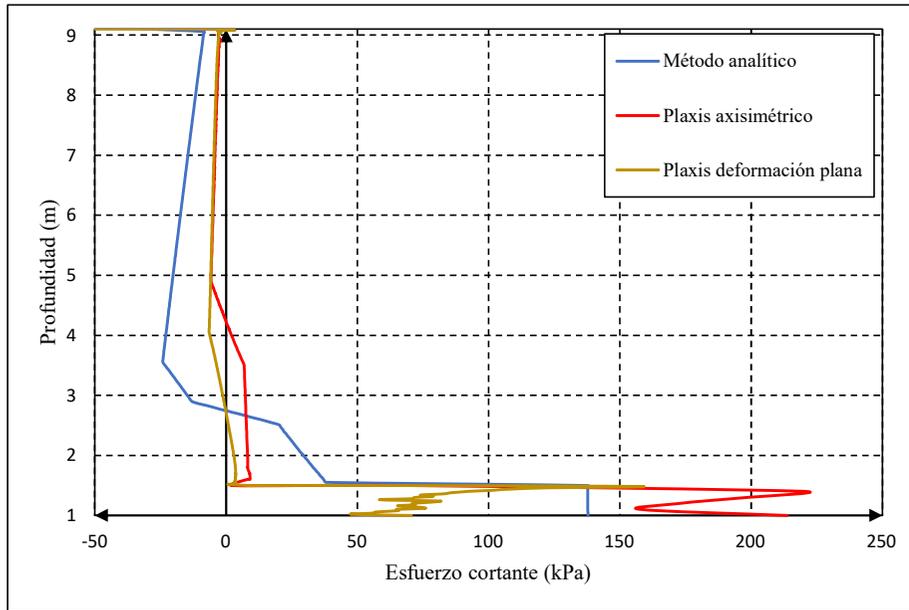
Caso $h_r = 0.30$ m, $b = 2.2$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



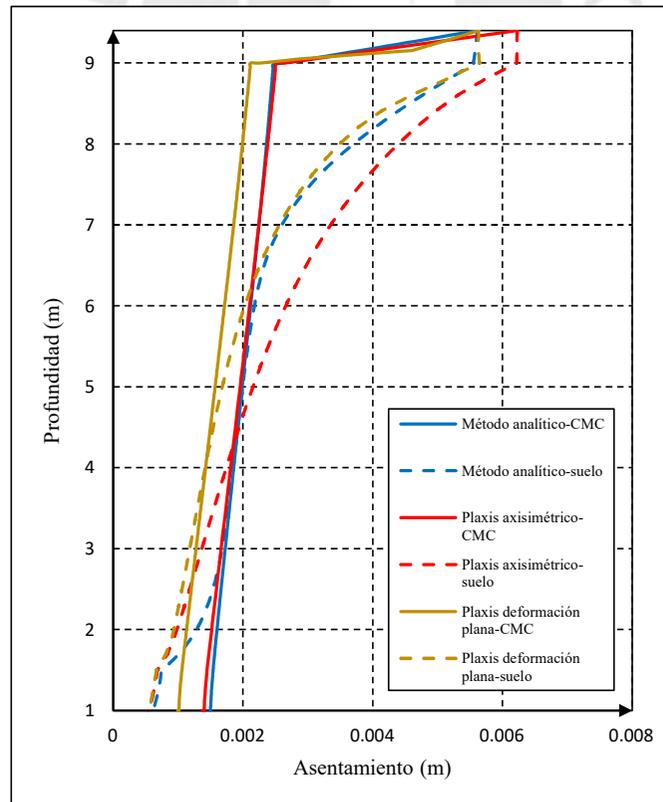
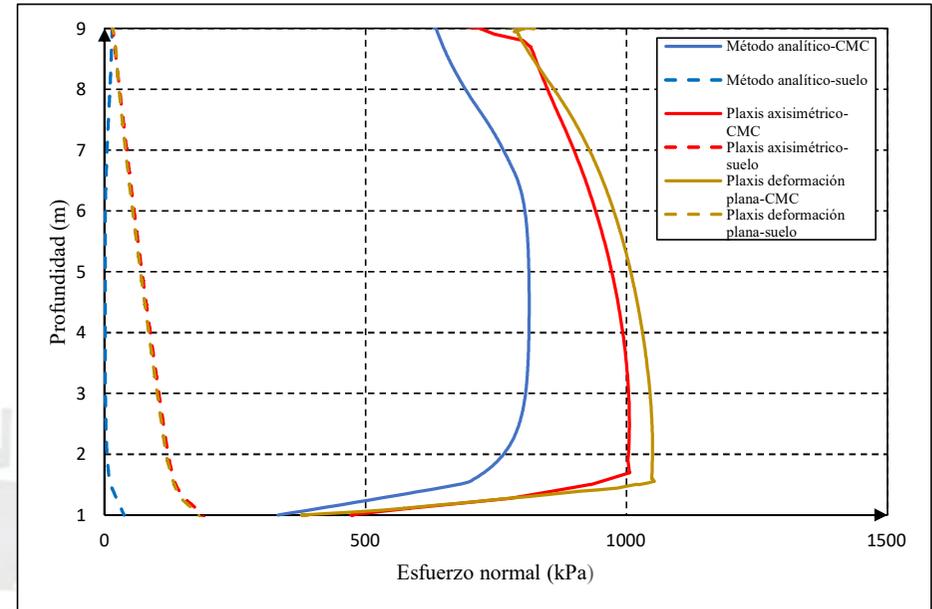
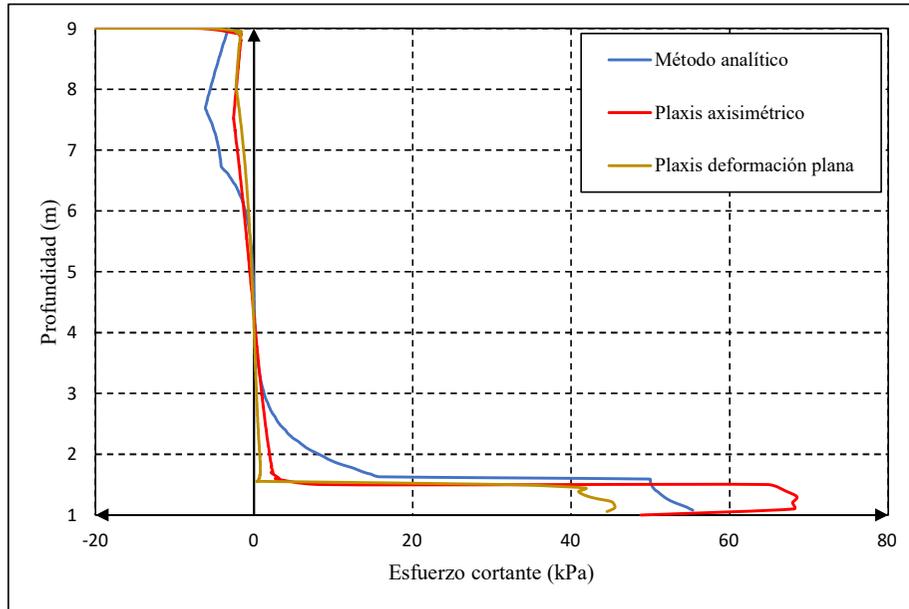
Caso $h_r = 0.30$ m, $b = 2.6$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



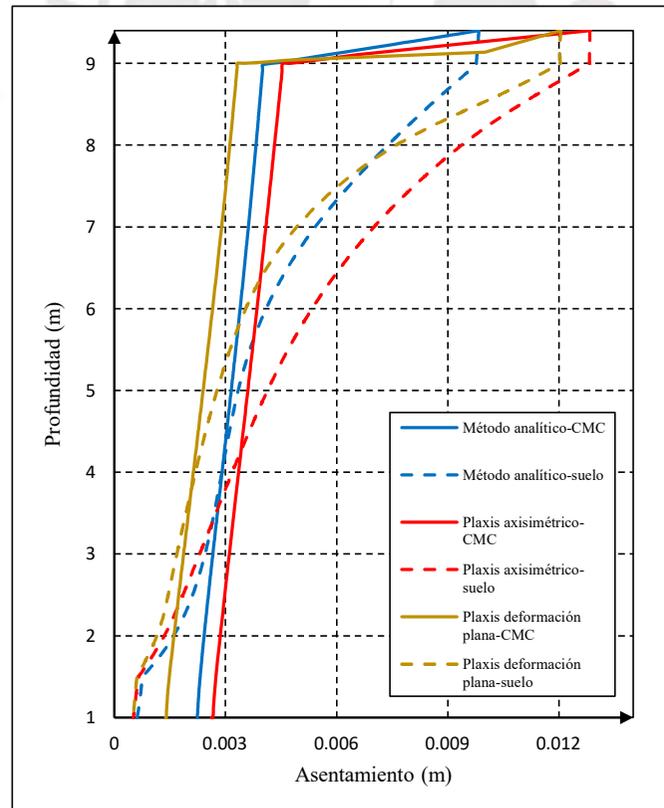
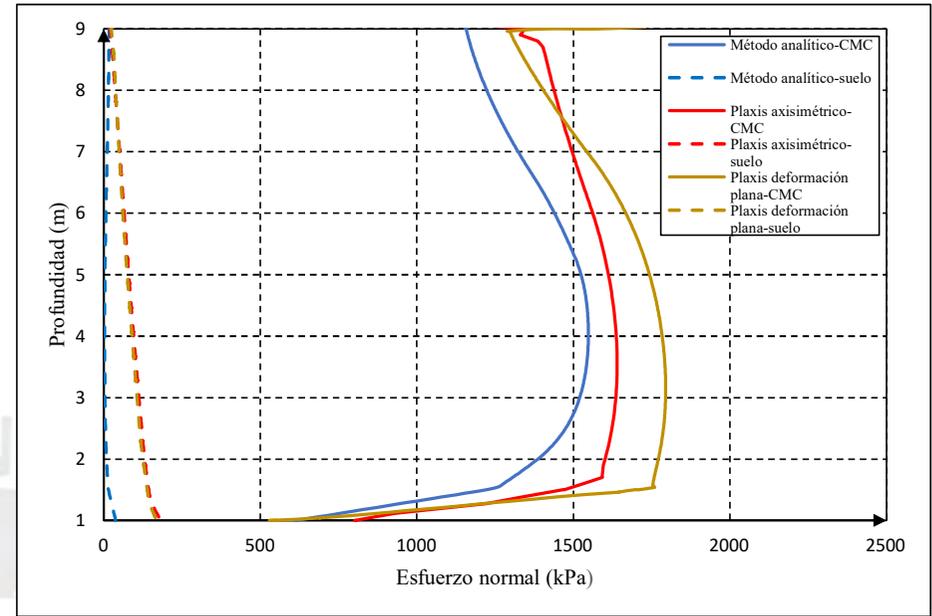
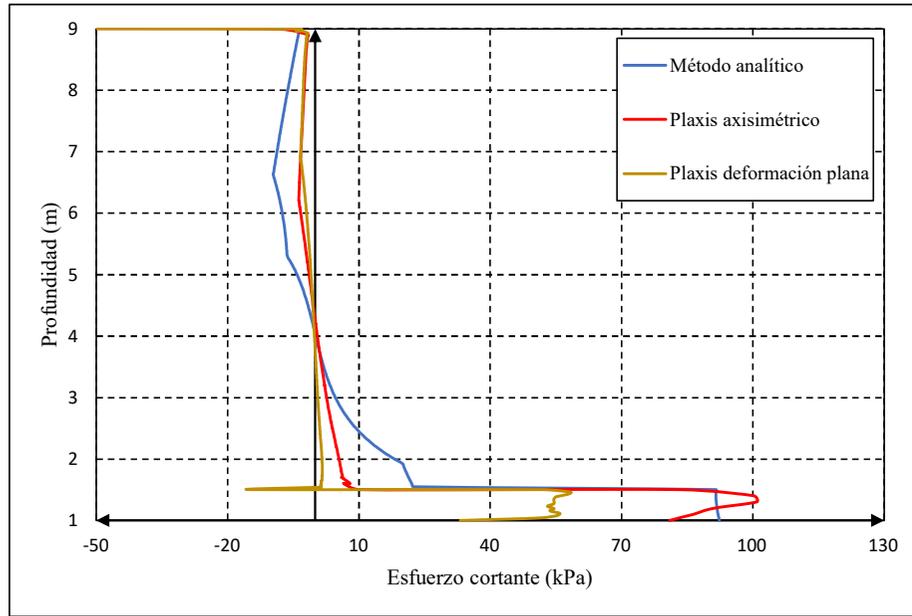
Caso $h_r = 0.30$ m, $b = 3.0$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



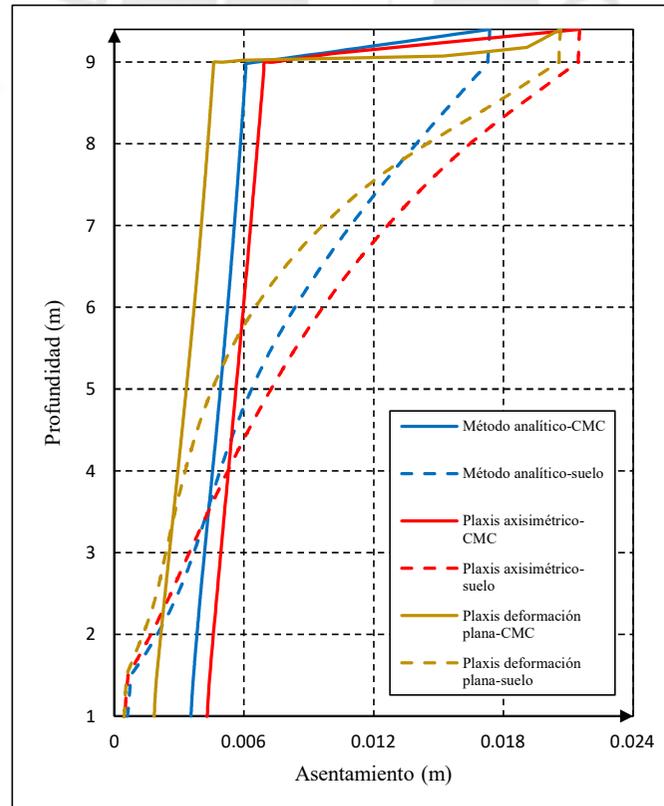
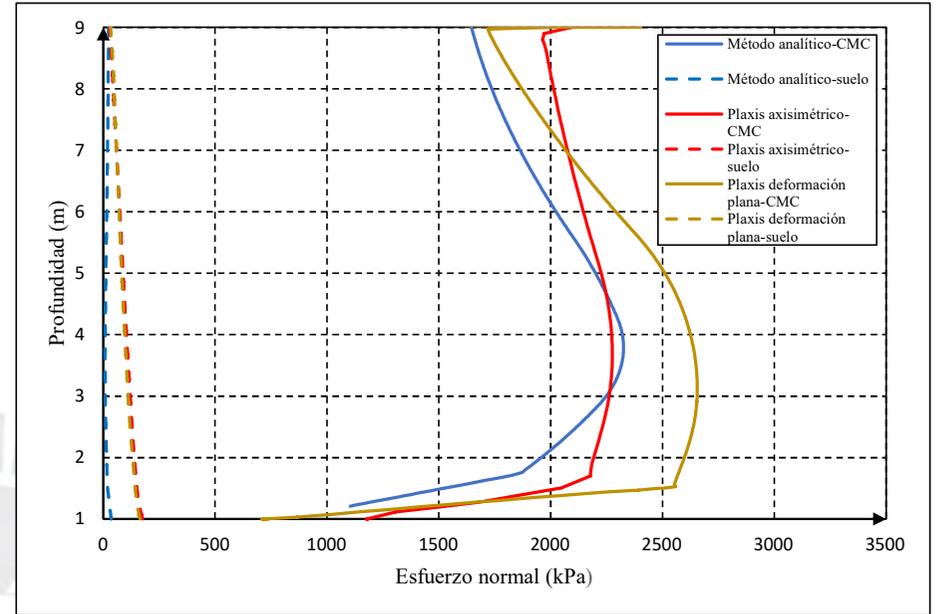
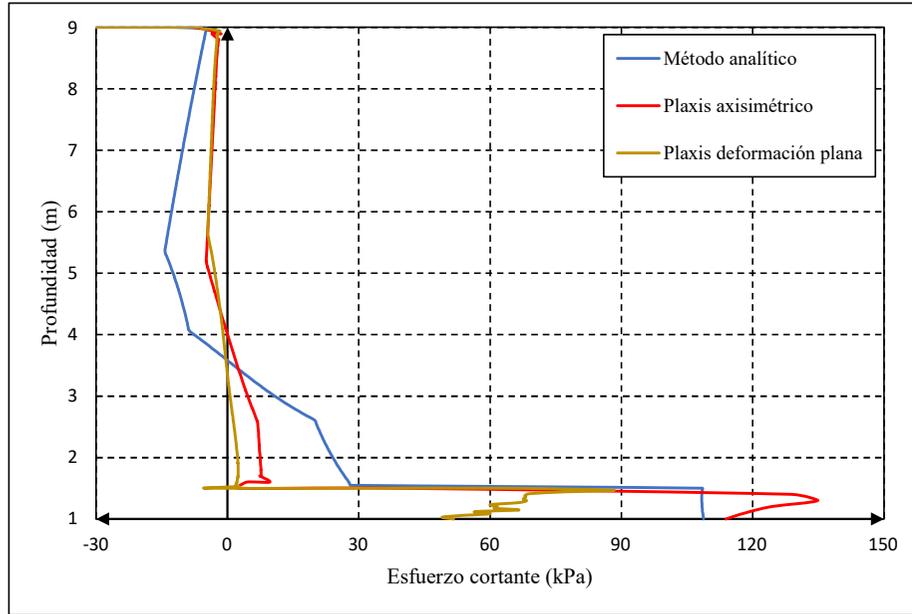
Caso $h_r = 0.40$ m, $b = 1.0$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



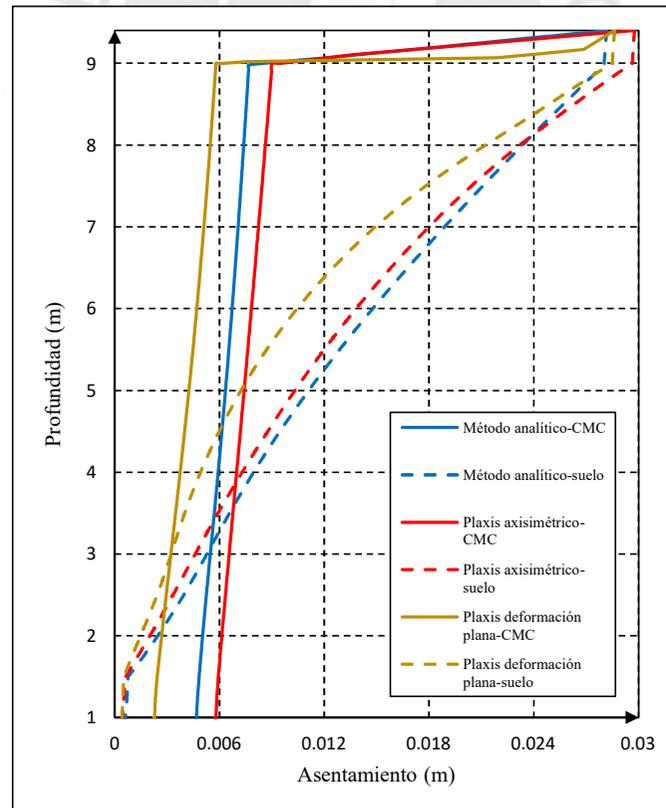
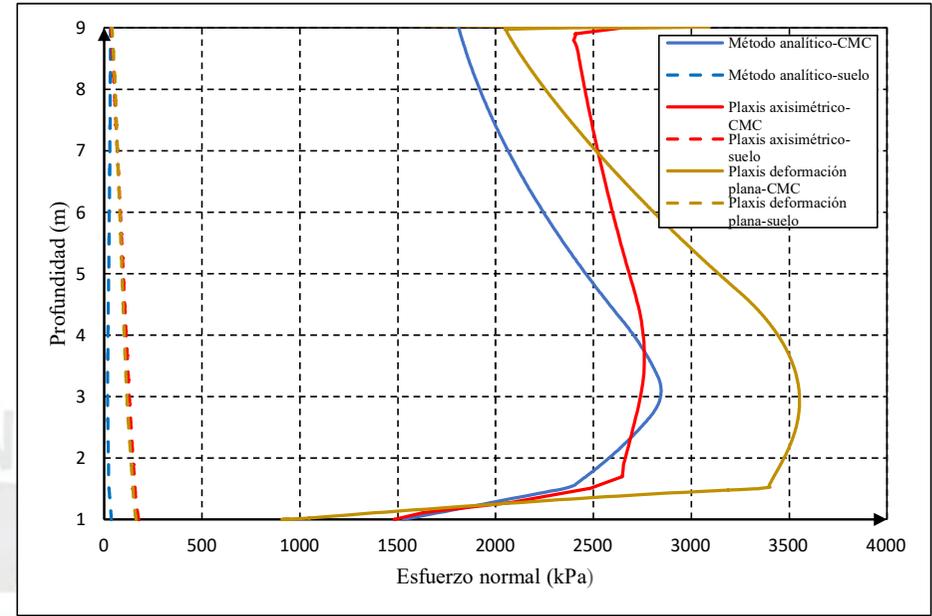
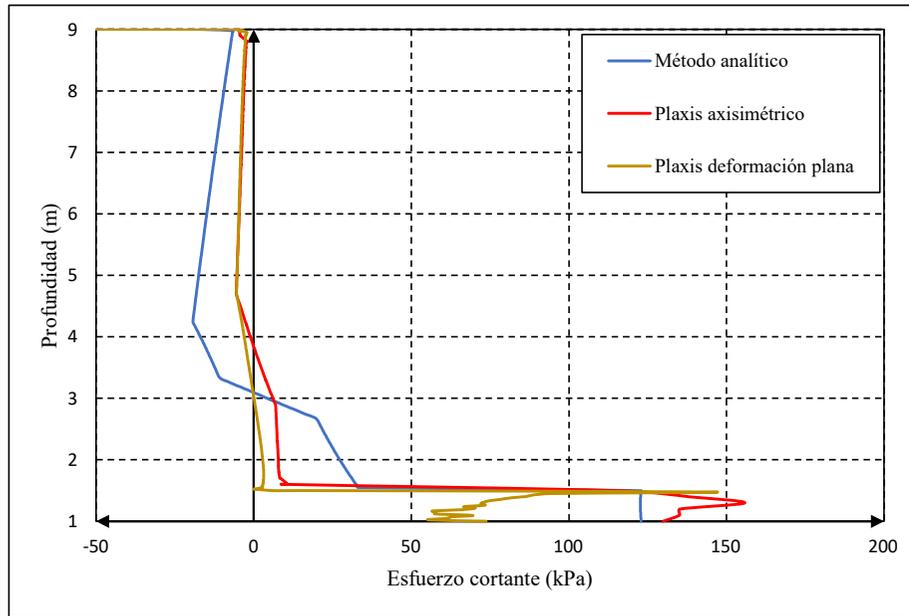
Caso $hr = 0.40$ m, $b = 1.4$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



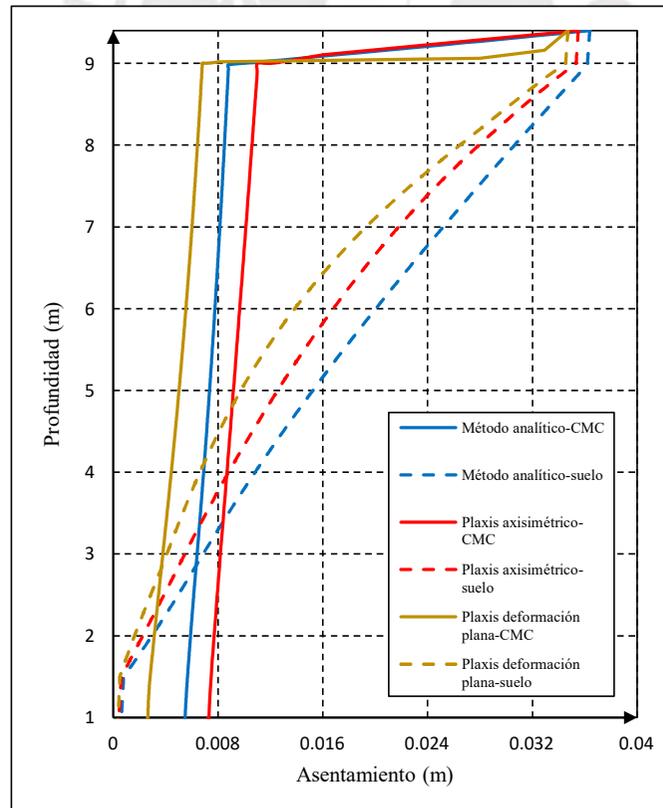
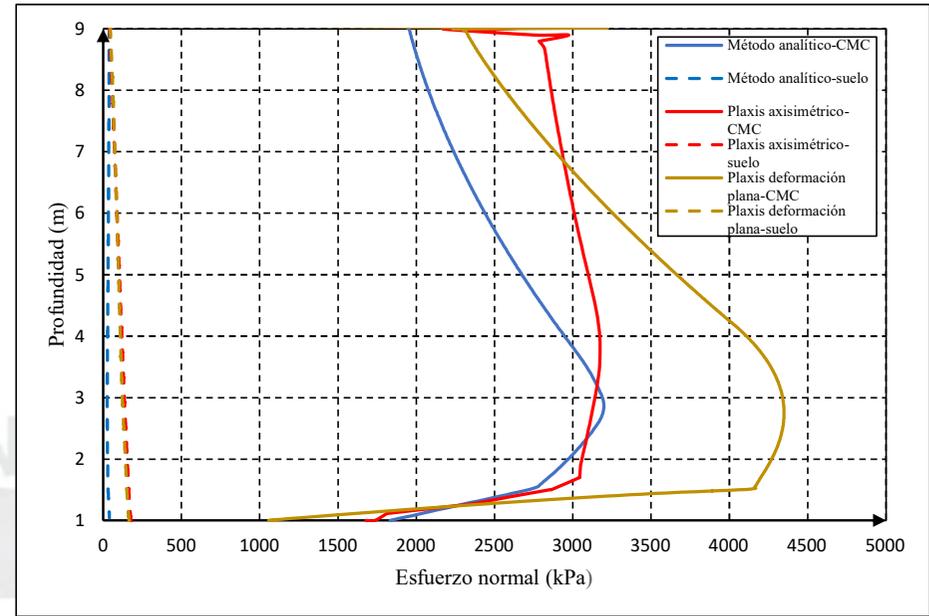
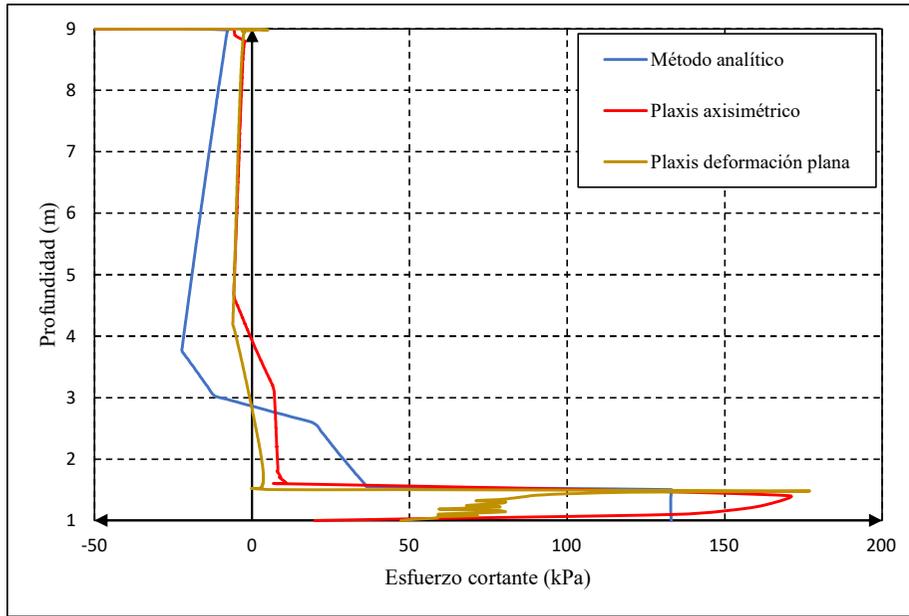
Caso $hr = 0.40$ m, $b = 1.8$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



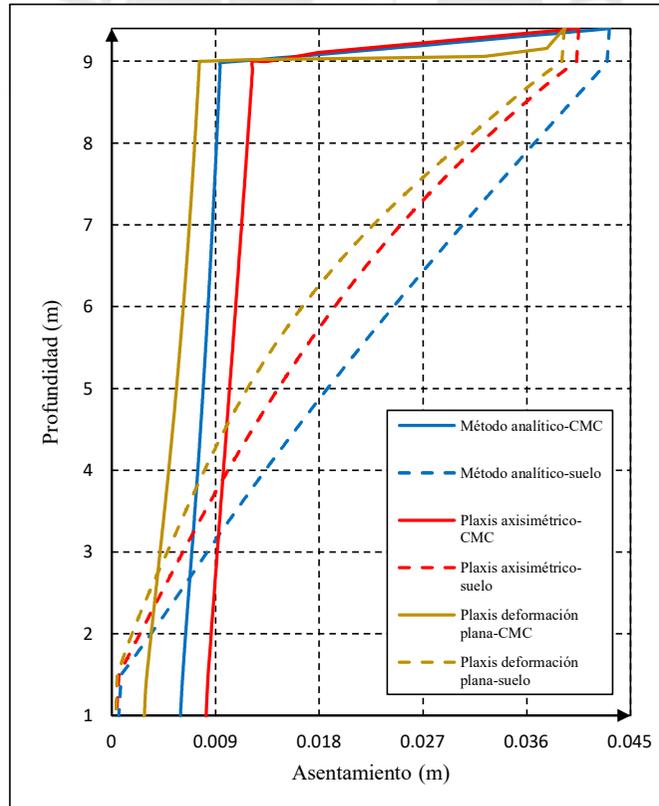
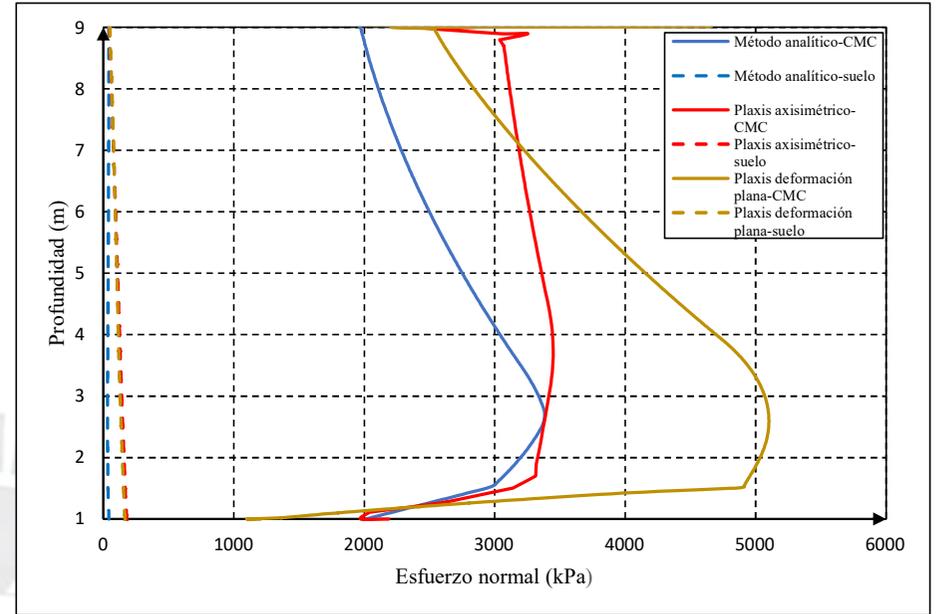
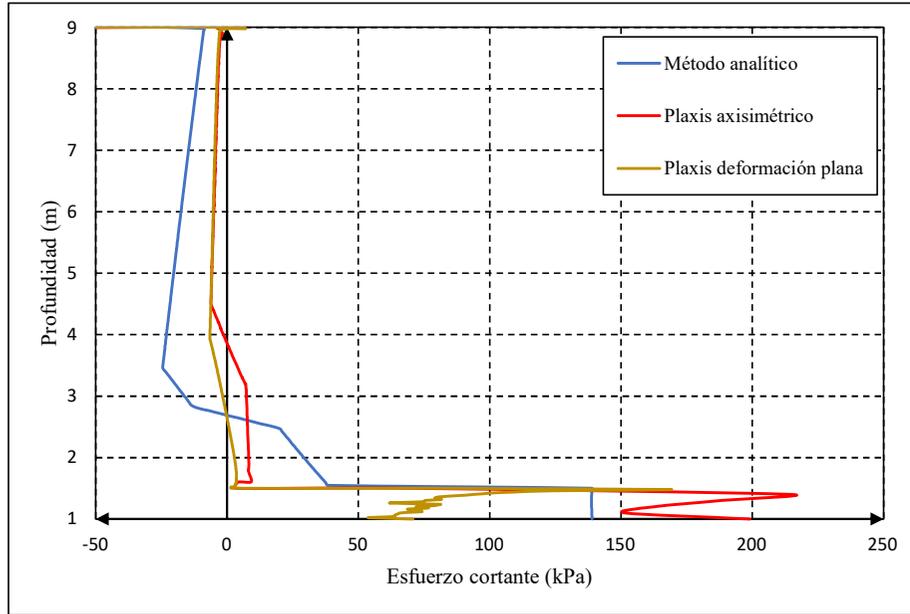
Caso $h_r = 0.40$ m, $b = 2.2$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



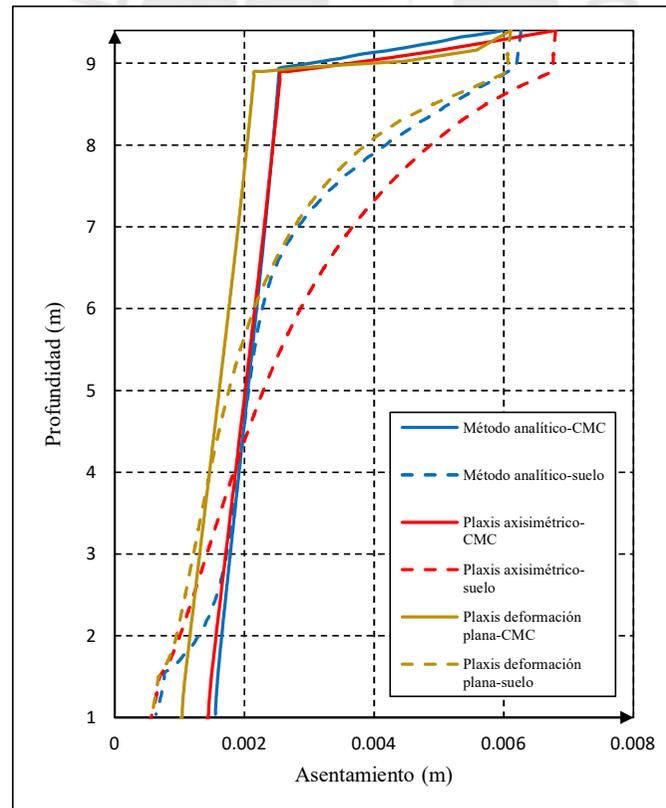
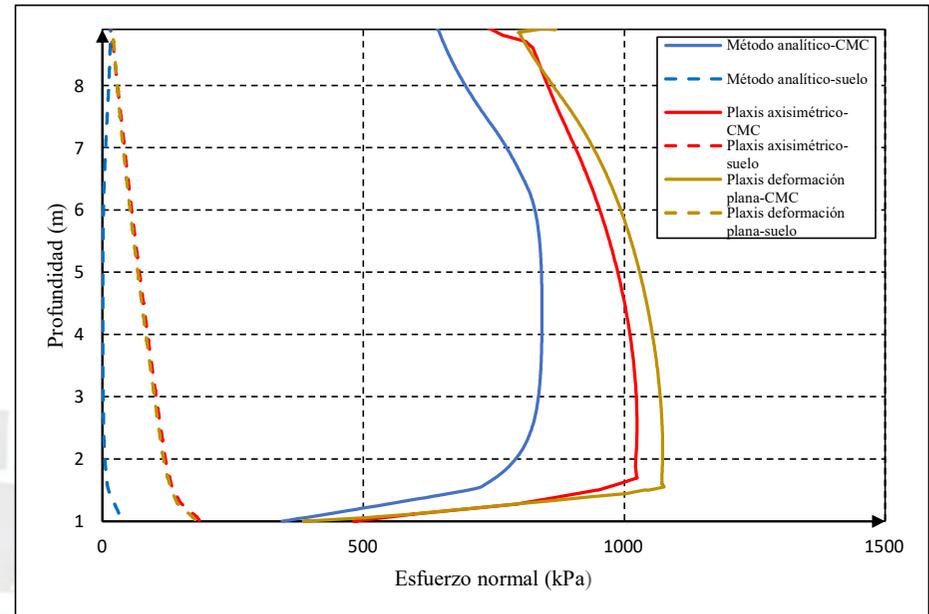
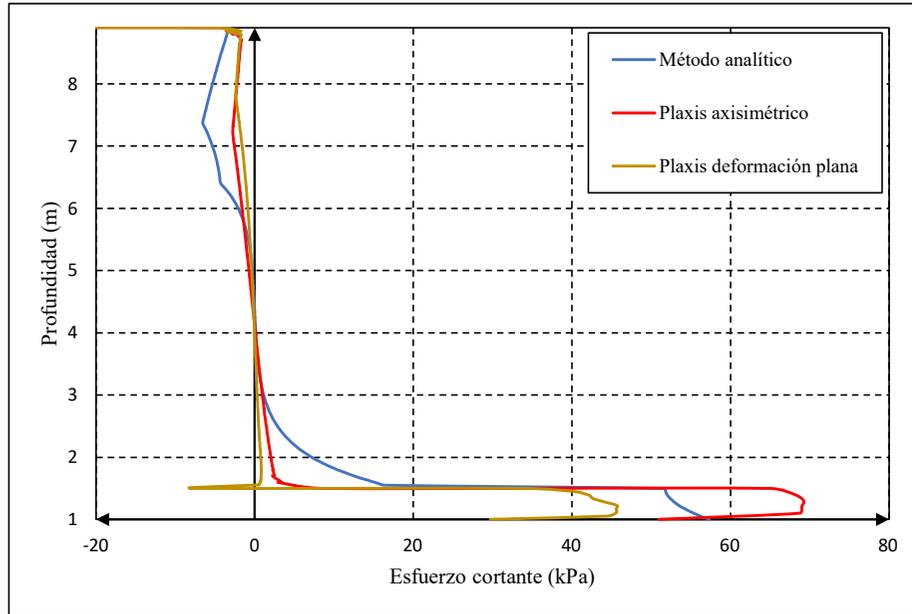
Caso $hr = 0.40$ m, $b = 2.6$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



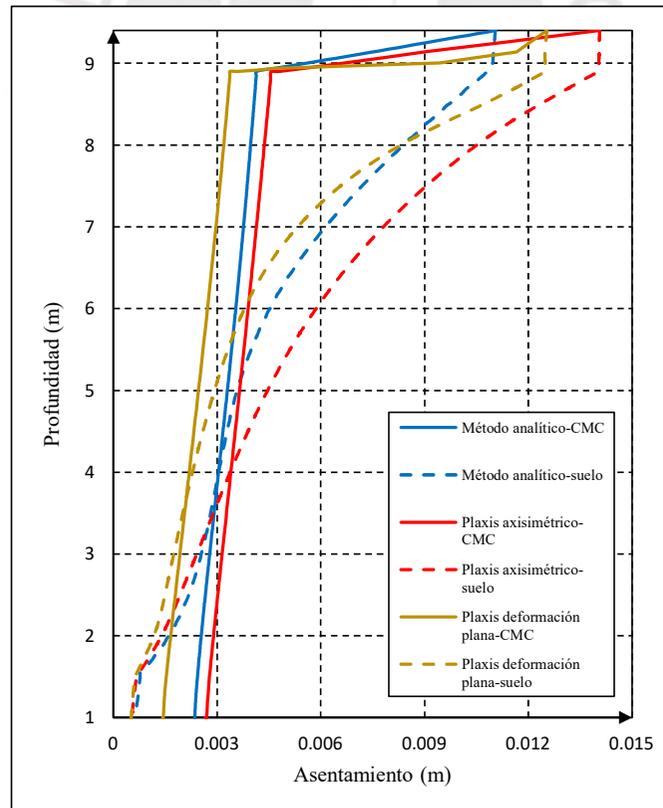
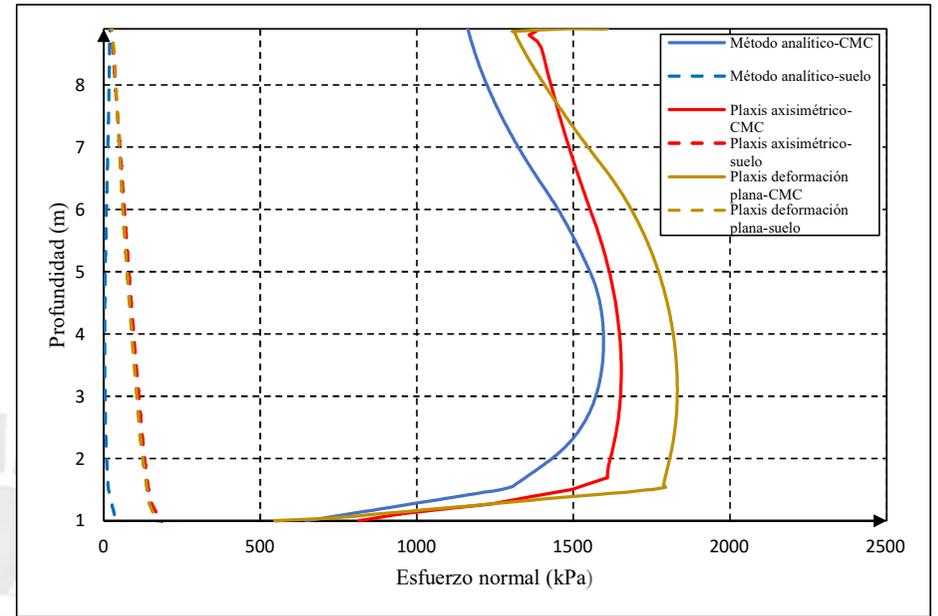
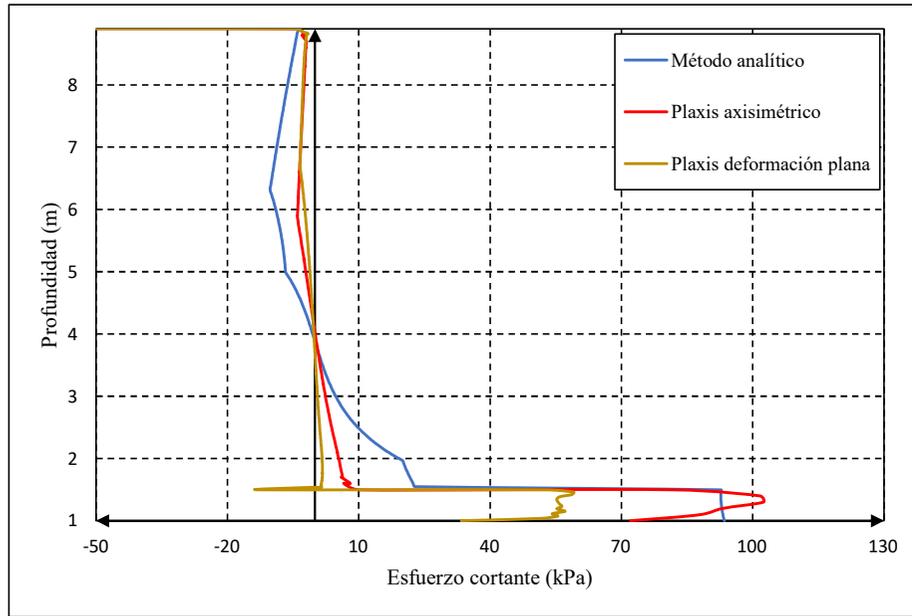
Caso $h_r = 0.40$ m, $b = 3.0$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



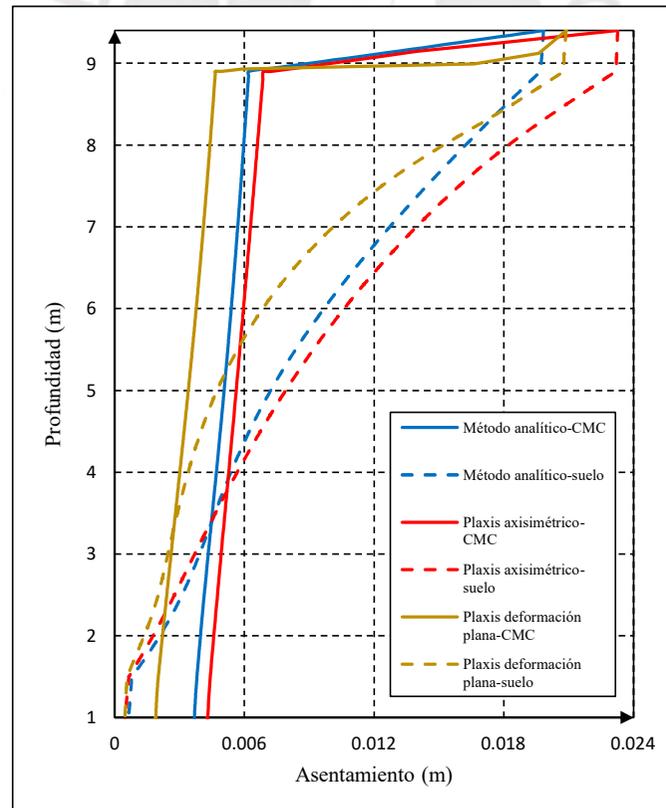
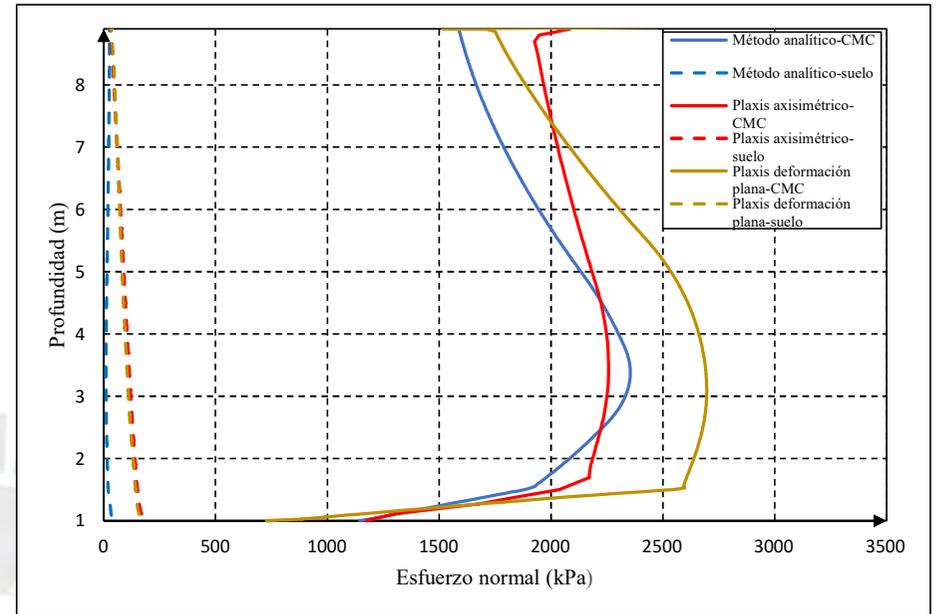
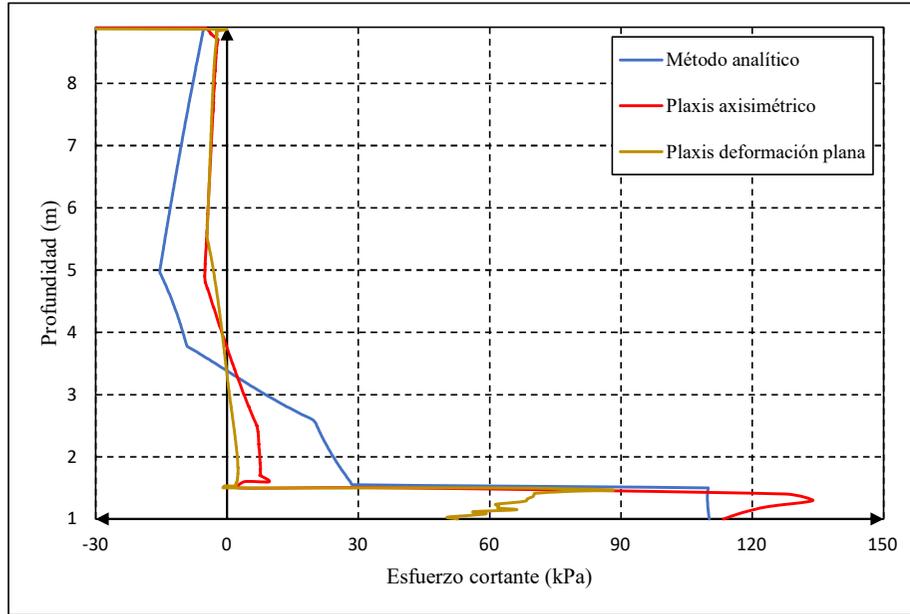
Caso $h_r = 0.50$ m, $b = 1.0$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



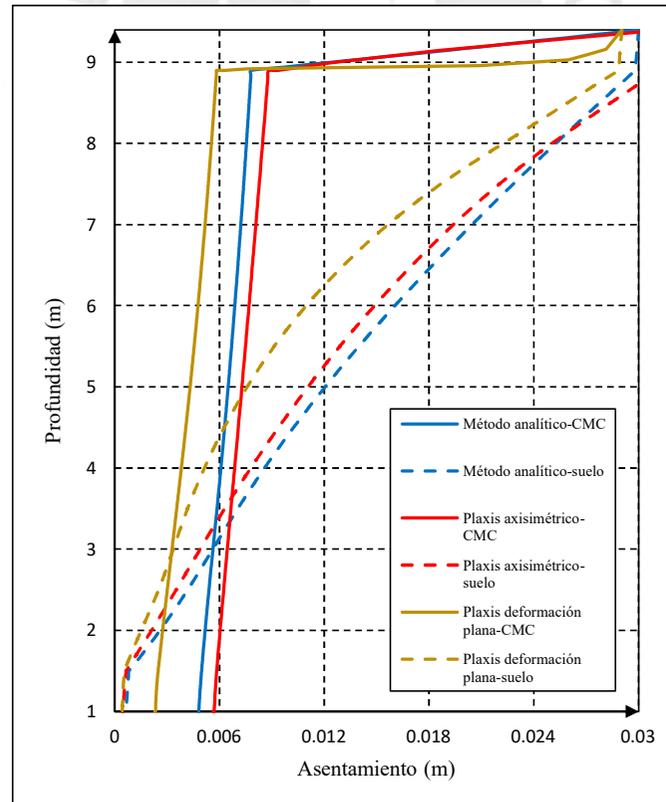
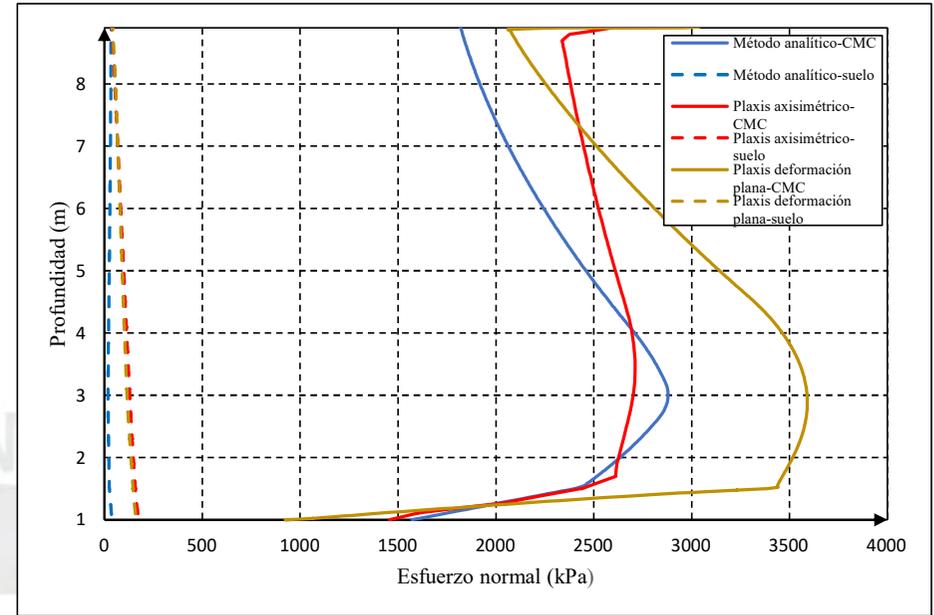
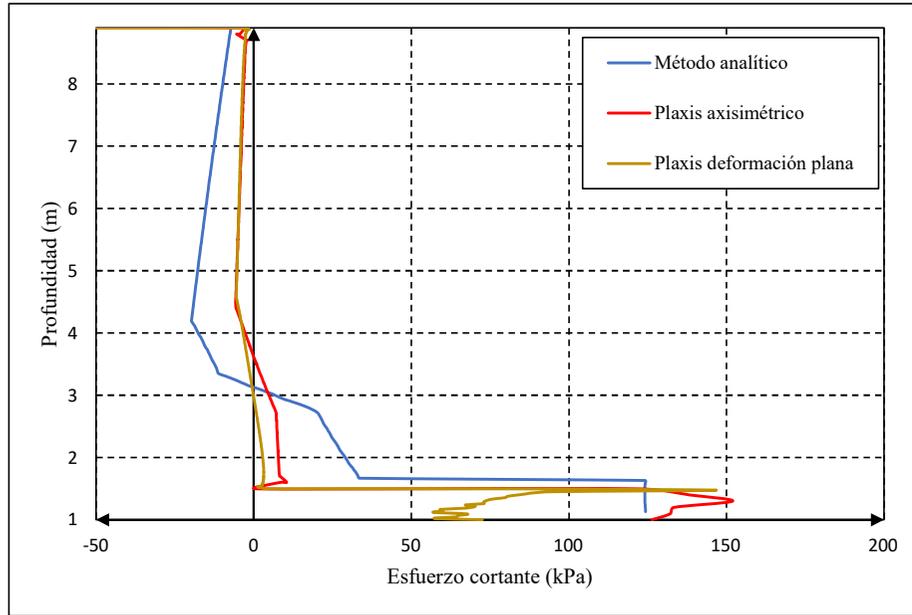
Caso $h_r = 0.50$ m, $b = 1.4$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



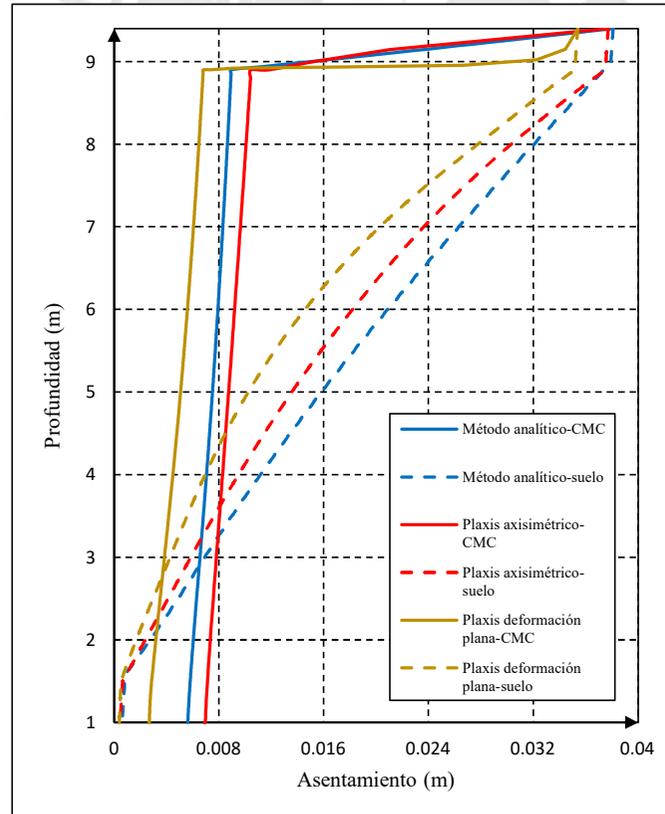
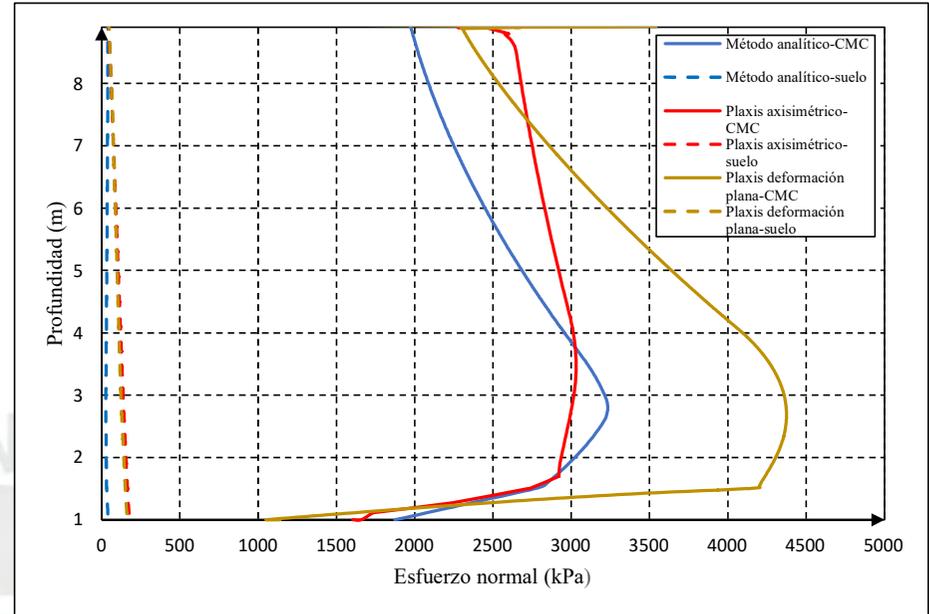
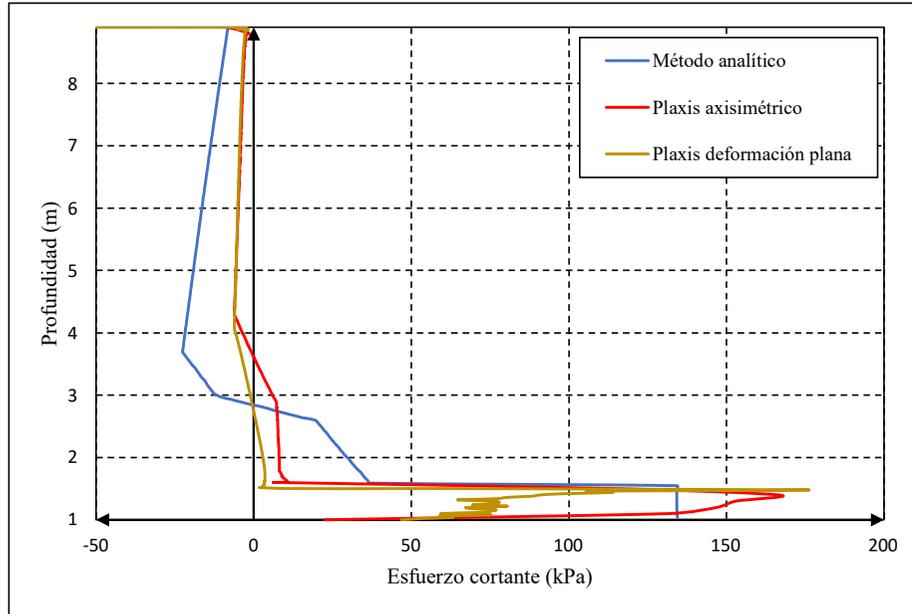
Caso $h_r = 0.50$ m, $b = 1.8$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



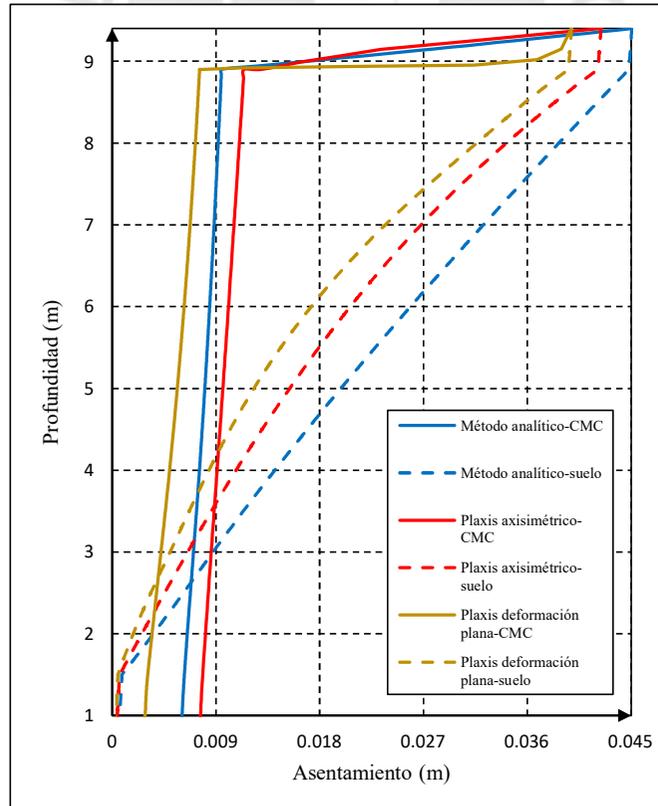
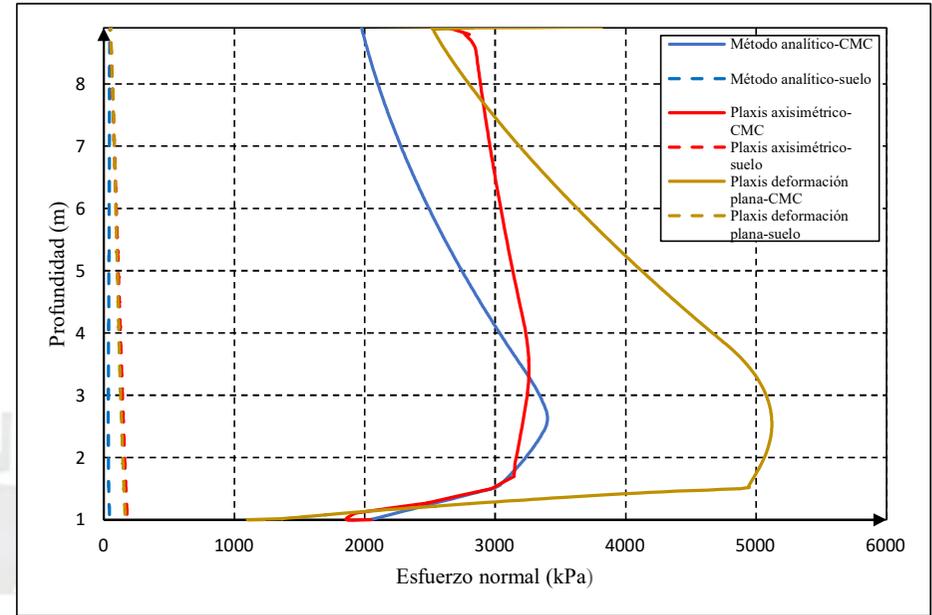
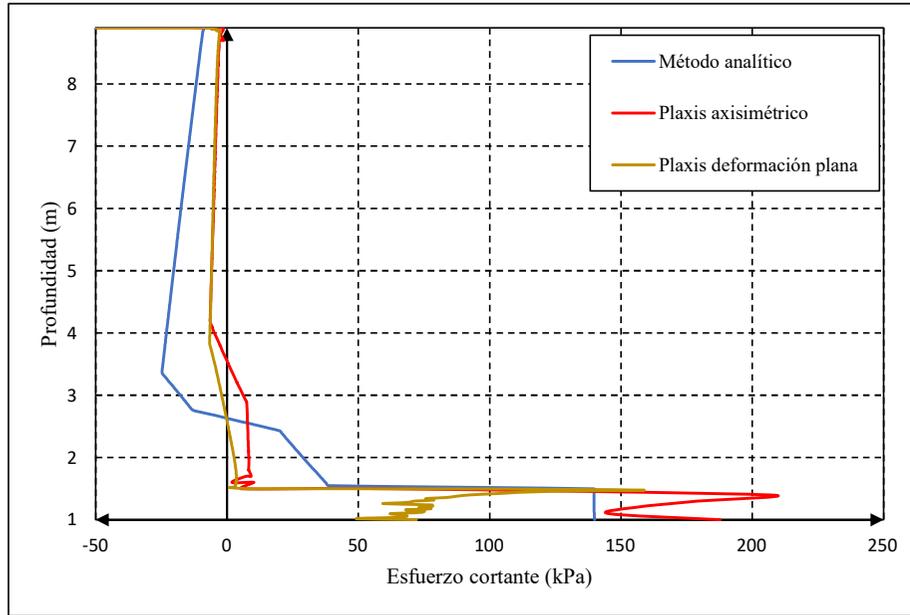
Caso $h_r = 0.50$ m, $b = 2.2$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



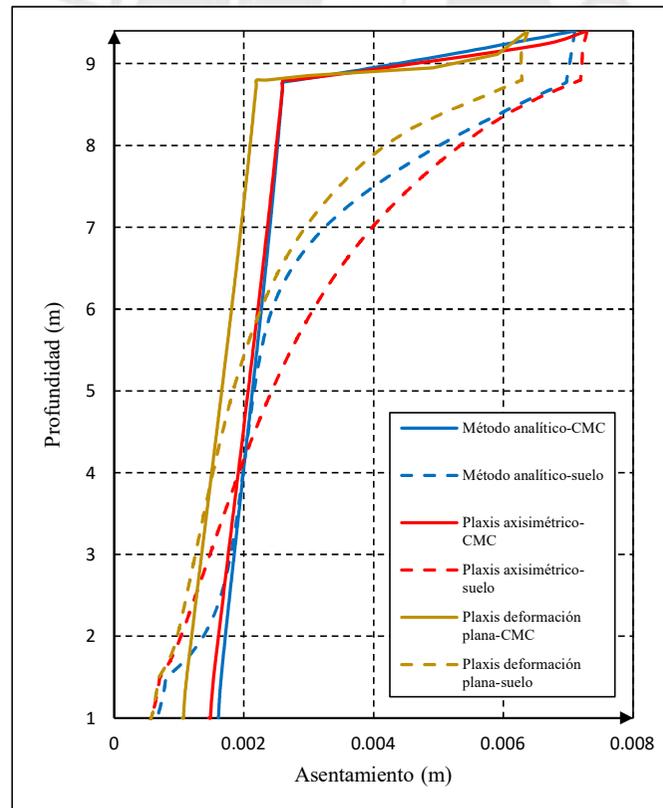
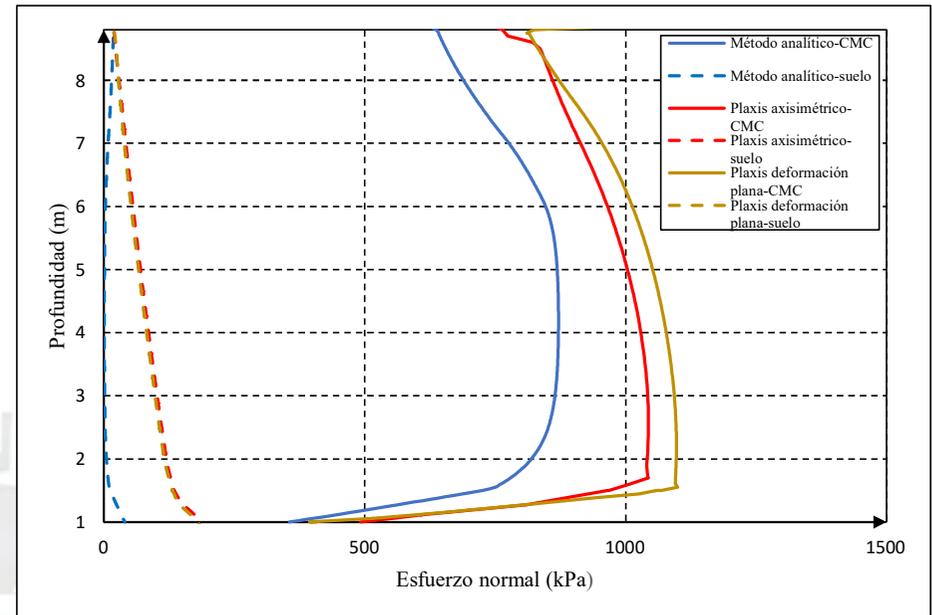
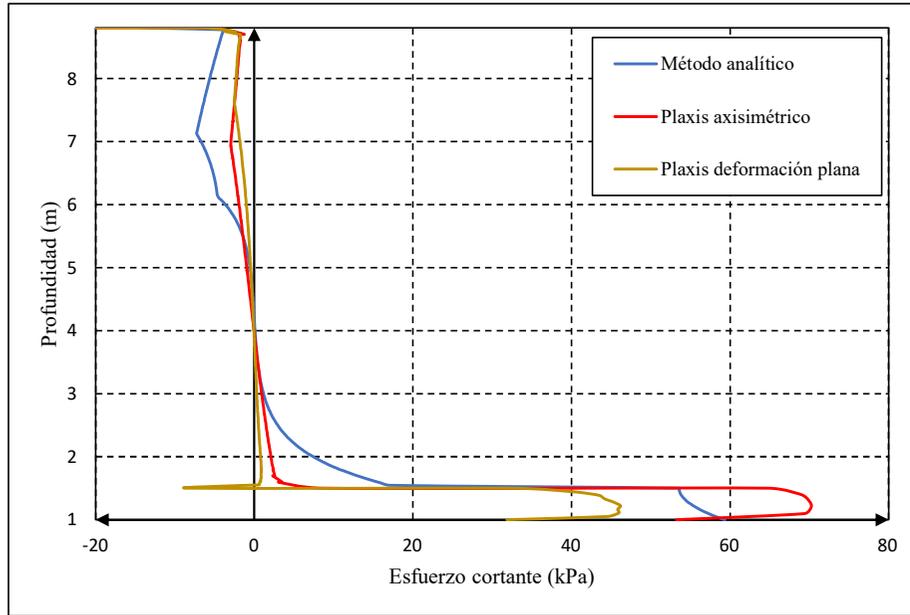
Caso $hr = 0.50$ m, $b = 2.6$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



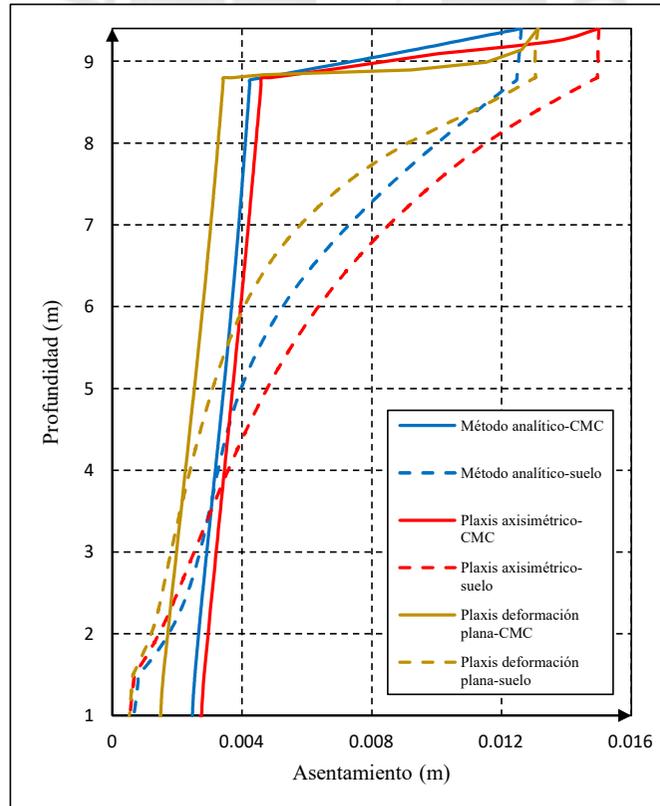
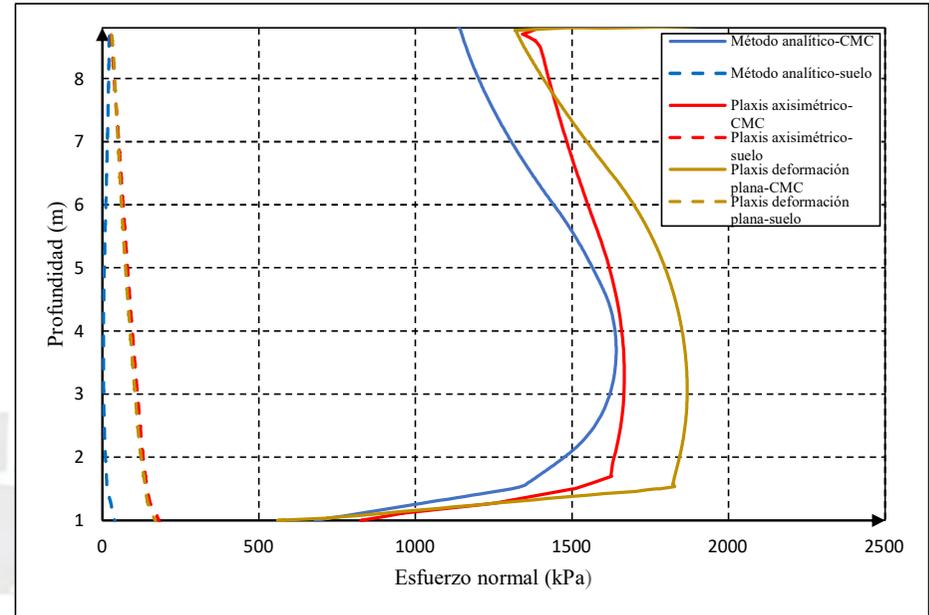
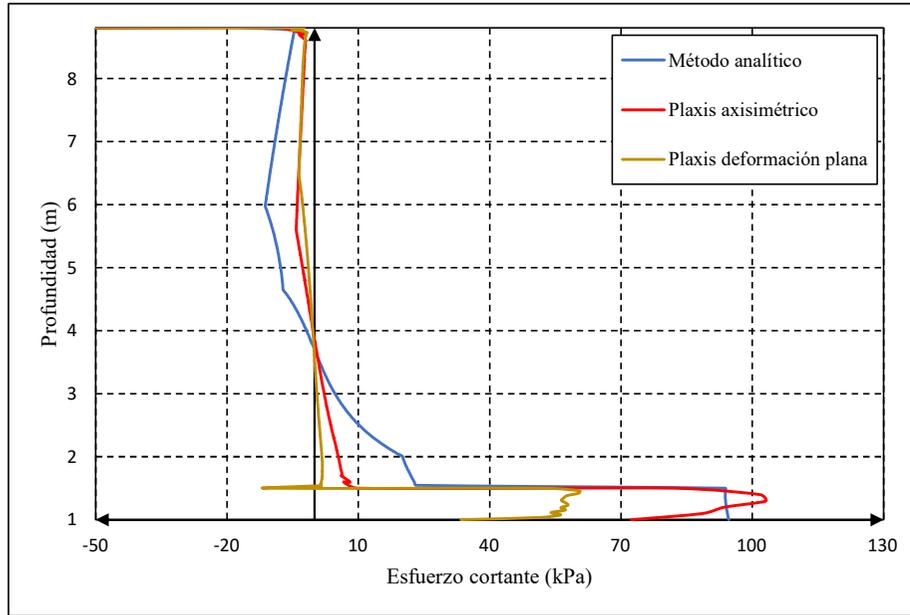
Caso $h_r = 0.50$ m, $b = 3.0$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



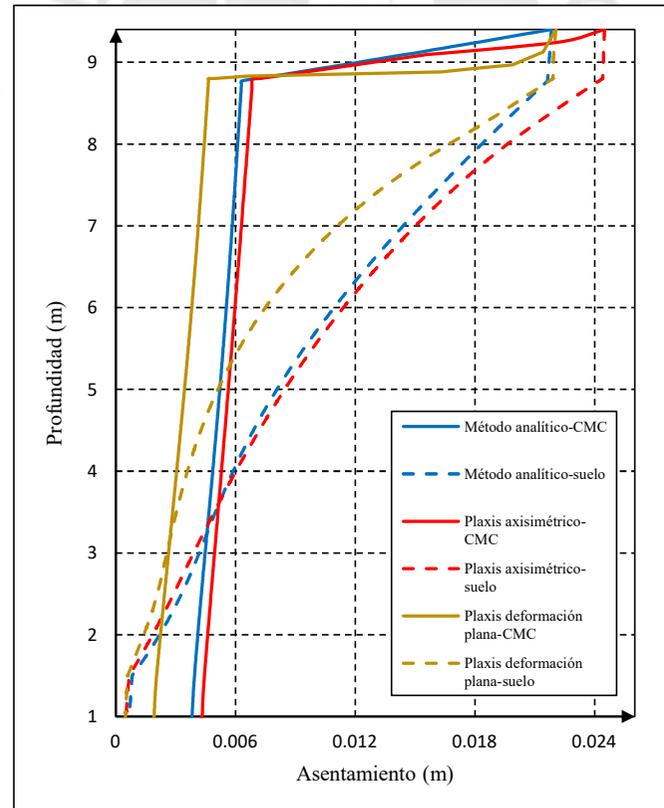
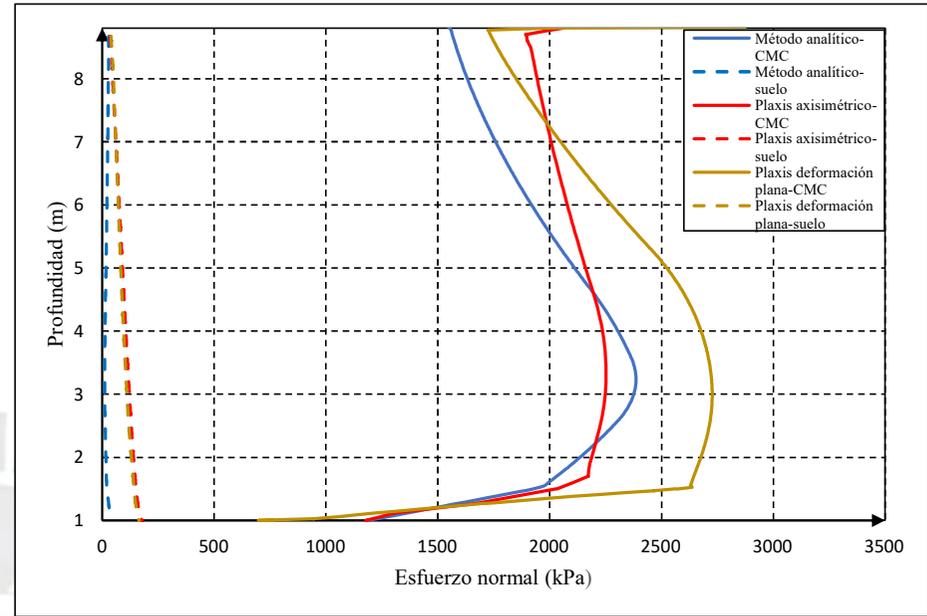
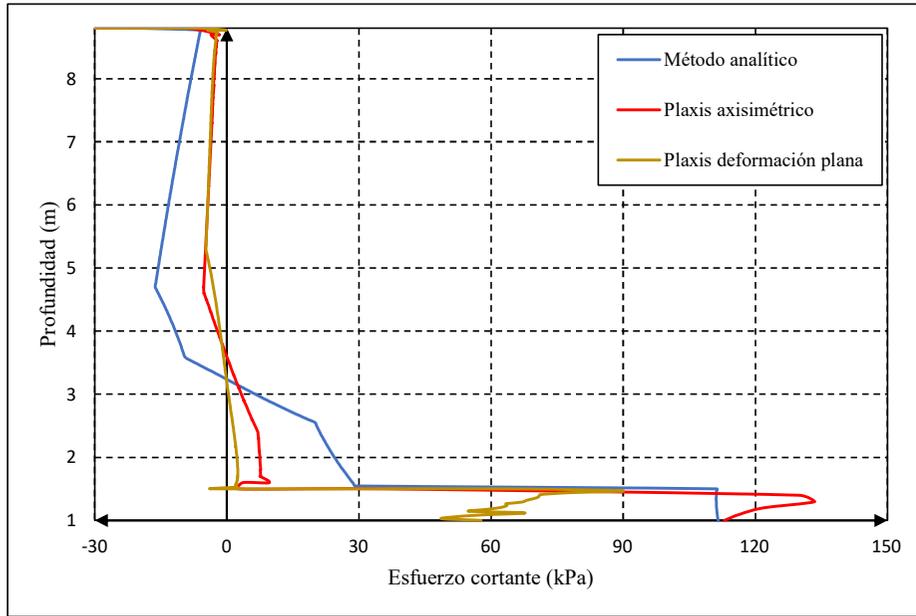
Caso $h_r = 0.60$ m, $b = 1.0$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



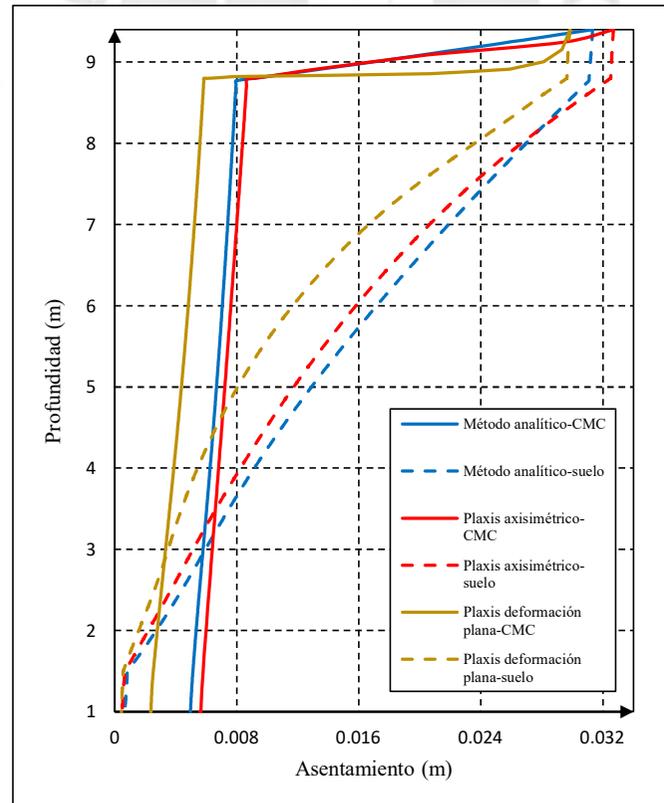
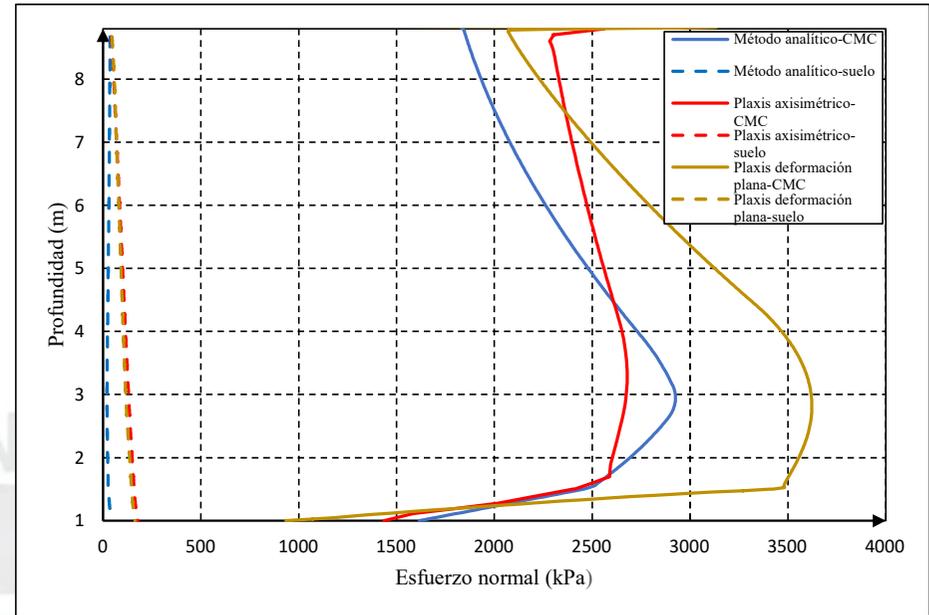
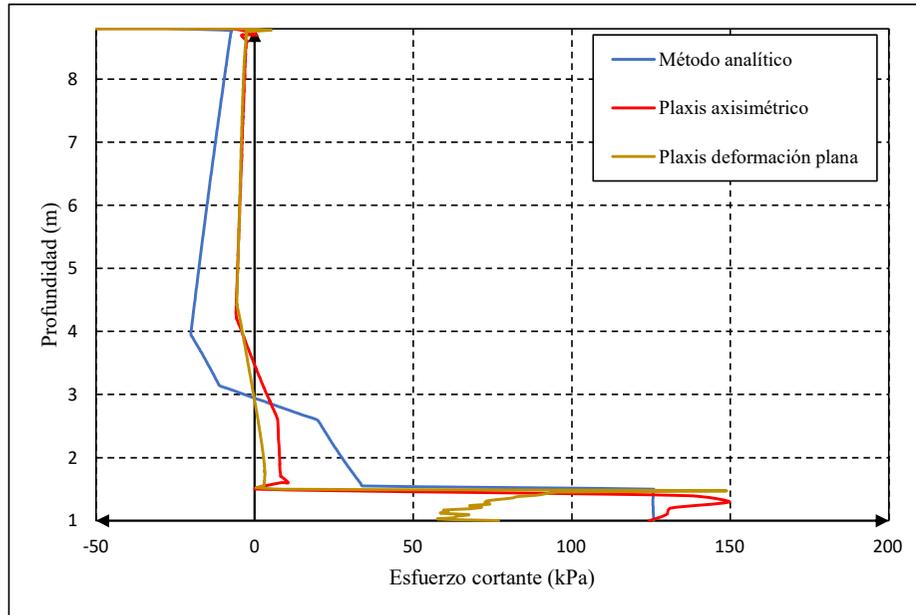
Caso $h_r = 0.60$ m, $b = 1.4$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



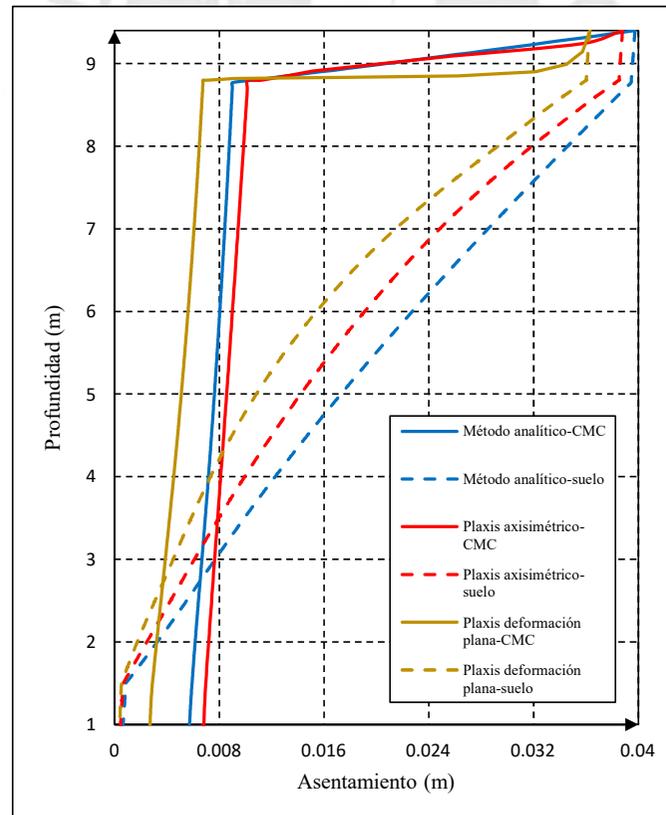
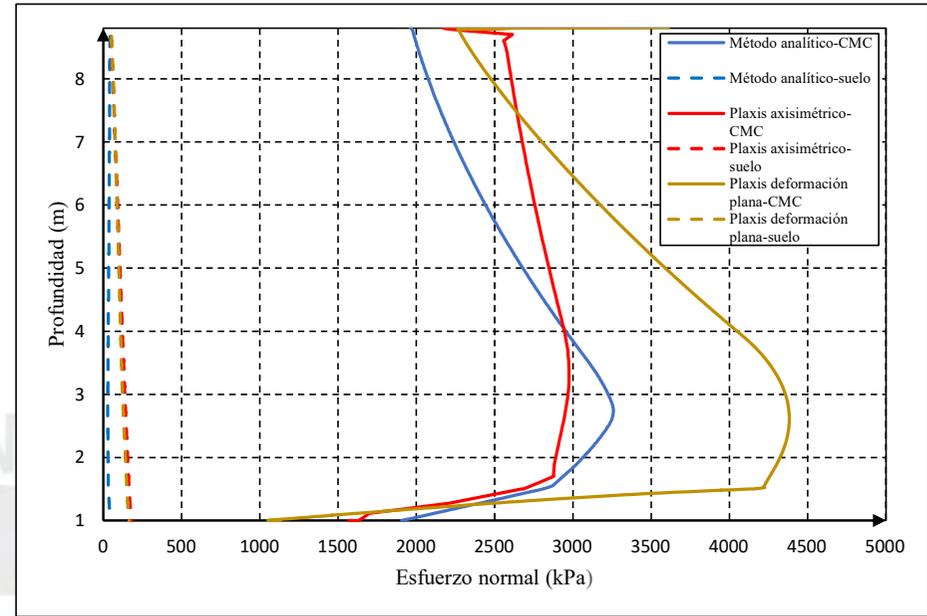
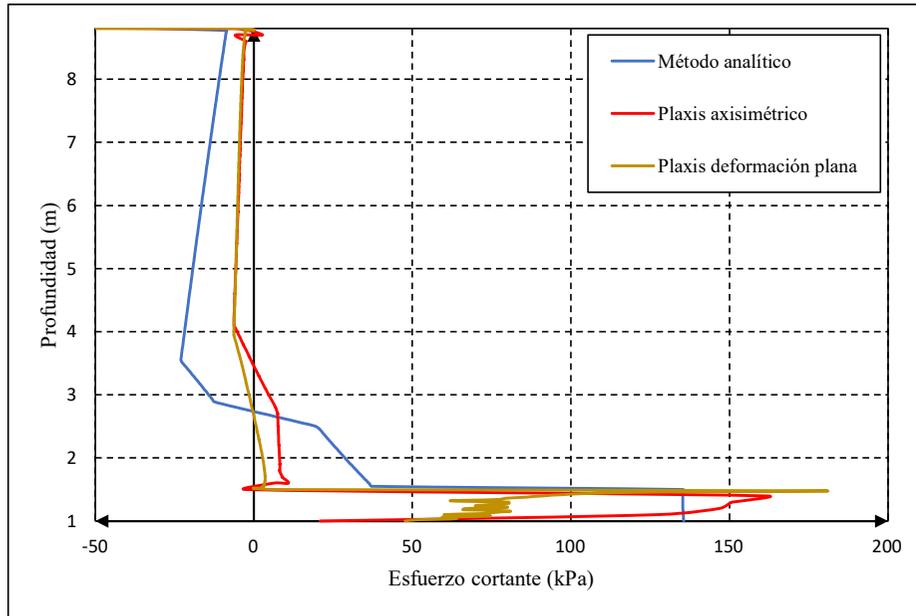
Caso $h_r = 0.60$ m, $b = 1.8$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



Caso $h_r = 0.60$ m, $b = 2.2$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



Caso $h_r = 0.60$ m, $b = 2.6$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico



Caso $h_r = 0.60$ m, $b = 3.0$ m: Comparación de resultados de métodos analítico y numérico

