

ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS FINOS UTILIZANDO COLUMNAS
DE GRAVA COMPACTADAS CON MATERIALES DE LA REGIÓN DEL CAUCA
MEDIANTE MODELADO POR ELEMENTOS FINITOS Y COMPARANDO CON EL
DISEÑO TEÓRICO.

LUIS MIGUEL NAVIA MONCAYO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PRPGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

POPAYÁN

2019

ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS FINOS UTILIZANDO COLUMNAS
DE GRAVA COMPACTADAS CON MATERIALES DE LA REGIÓN DEL CAUCA
MEDIANTE MODELADO POR ELEMENTOS FINITOS Y COMPARANDO CON EL
DISEÑO TEÓRICO.

PRESENTADO POR:
LUIS MIGUEL NAVIA MONCAYO
CODIGO:100416010523

TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR
POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR
Ph.D. LUCIO GERARDO CRUZ VELAZCO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PRPGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
POPAYÁN

2019

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, 11 de diciembre de 2019

RESUMEN

Hasta hace poco, cuando se contaba con un suelo blando y compresible en obra, es decir con baja capacidad portante de carga y asentamientos considerables, había soluciones típicas a las que se recurría, como retirar el suelo de “mala calidad” y reemplazarlo por un suelo mejor, aparentemente es una solución viable, pero puede acarrear grandes costos, estos aumentan si se debe realizar el abatimiento del nivel freático. Cuando por alguna razón se determine que no es factible la anterior opción, se opta por hincar pilotes de tal manera que descansen sobre un suelo más profundo y apto para soportar la cimentación, pero esta solución también puede resultar un poco costosa dependiendo de cada caso en particular además de poco amigable con el medio ambiente, otra elección es emplear losas de cimentación. Con base en esta problemática y teniendo en cuenta lo que implicaba la implementación de estas soluciones tradicionales, en los años 90 se puso en funcionamiento un sistema alternativo, el cual consiste en elaborar sistemas de columnas de agregado apisonado e implementarlos en el suelo nativo a mejorar, esto resulto ser muy eficiente en cimentaciones superficiales, preferiblemente estas columnas de grava no deben superar una altura de 10 m, ya que según, después de este valor ya se vuelve un proceso poco económico. Para la construcción de estos sistemas se emplean perforaciones y energía de impacto vertical, en primera instancia se realiza una perforación de acuerdo a las especificaciones de diseño, generalmente la profundidad de esta perforación puede estar entre 2 a 9 metros y el diámetro en un rango de 0.2 m a 1.5 m

El presente trabajo se realizó haciendo uso de un software basado en elementos finitos, de esta manera se pretendió simular el efecto que tiene la instalación de columnas de grava compactada en suelo con baja capacidad portante de carga y/o suelos finos, los cuales son muy comunes en la región del Cauca, más especialmente en la ciudad de Popayán y se compararon esos resultados obtenidos en el software con algunos lineamientos del diseño teórico.

Las propiedades supuestas de los agregados que se emplearon en la simulación fueron típicos de la región, utilizando valores tradicionales de las variables de interés implicadas en los diferentes cálculos y modelaciones, con lo cual se conseguirá obtener unos resultados más confiables y cercanos a lo esperado en la realidad local, además se variaron algunos otros parámetros importantes en la construcción de estas columnas de grava como la profundidad de las columnas y su diámetro para el caso 2D y 3D. también se eligió un patrón geométrico cuadrangular para la disposición en el terreno, lo cual implica una separación entre columnas constante que para el caso de estudio fue de 1 m únicamente para el análisis tridimensional, en el caso bidimensional, la separación entre columna se varió a 1.5D, 2D y 3D, siendo D el diámetro de estas y así se analizó la variación en la respuesta del sistema suelo-columnas en cuanto a los asentamientos elásticos para determinar los valores más óptimos al ejecutar una construcción real.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	3
1.3 OBJETIVO DEL PROYECTO.....	9
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	10
CAPÍTULO 2	11
MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 CIMENTACIONES CON COLUMNAS DE GRAVA APISONADA	11
2.1.1 INSTALACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA VÍA HÚMEDA	11
2.1.2 INSTALACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA VÍA SECA	15
2.1.3 SISTEMA MEJORADO SUELO-COLUMNAS.....	16
2.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL GRANULAR A SER USADO EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS FINOS.....	19
2.2 CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA PARA DISEÑAR COLUMNAS DE GRAVA APISONADAS.....	21
2.2.1 MECANISMOS DE FALLA DE LAS COLUMNAS DE GRAVA APISONADA	21
2.3 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS, CARGAS ADMISIBLES, ÁREAS Y SEPARACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA APISONADA.....	24
2.3.1 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS.....	25
2.3.2) CARGAS ADMISIBLES DE COLUMNAS DE GRAVAS APISONADAS	35
2.3.3 CARGA ADMISIBLE DE UN GRUPO DE COLUMNAS DE GRAVA APISONADA.....	39

2.3 MEJORAMIENTO DE SUELOS POTENCIALMENTE LICUABLES CON COLUMNAS DE GRAVA.....	42
2.4.4) MODELOS DE CARGA DISTRIBUIDA EN LA PARTE SUPERIOR DE LAS COLUMNAS DE GRAVA APISONADA.....	43
CAPÍTULO 3	45
METODOLOGÍA.....	45
3.1 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS PARA LA INVESTIGACIÓN.....	45
3.2 METODOLOGÍA MODELACIÓN EN 2D.....	46
3.3 METODOLOGÍA MODELACIÓN EN 3D.....	58
3.3.1 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS AL IMPLEMENTAR COLUMNAS DE GRAVA.....	63
3.3.3 METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS MEDIANTE DISEÑO TEÓRICO CON AYUDA DE ELEMENTOS FINITOS.....	66
CAPÍTULO 4	69
RESULTADOS DE MODELACIÓN ELÁSTICA - LINEAL DEL SISTEMA SUELO – COLUMNAS EN 2D	69
4.1 RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ASENTAMIENTO ELÁSTICO AL IMPLEMENTAR LAS COLUMNAS DE GRAVA.	69
4.2 RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE DEL SISTEMA SUELO-COLUMNAS.	75
4.3 RESULTADOS DE DIAGRAMAS DE CONTRONO DE ÍTERES EN 2D. .	80
CAPÍTULO 5	84
RESULTADOS DE MODELACIÓN ELÁSTICA - LINEAL DEL SISTEMA SUELO – COLUMNAS EN 3D	84
5.1) RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS AL IMPLEMENTAR COLUMNAS DE GRAVA.....	84
5.2 DIAGRAMAS DE CONTORNO DE INTERÉS OBTENIDOS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.....	91

5.3) RESULTADOS DEL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS MEDIANTE DISEÑO TEÓRICO CON AYUDA DEL SOFTWARE BASADO EN ELEMENTOS FINITOS.	98
CAPÍTULO 6	101
ANÁLISIS DE RESULTADOS	101
6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN 2D	101
6.1.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ASENTAMIENTO ELÁSTICO AL IMPLEMENTAR COLUMNAS DE GRAVA.....	101
6.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE DEL SISTEMA SUELO – COLUMNAS	105
6.1.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE DIAGRAMAS DE CONTORNO DE INTERÉS EN 2D	106
6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN 3D	107
6.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ASENTAMIENTOS.	107
5.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS DIAGRAMAS DE CONTORNO	115
5.2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ASENTAMIENTOS.	121
6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN 2D Y 3D.	123
CAPÍTULO 7	125
NORMALIZACIÓN DE GRÁFICAS PARA USO PARA DISEÑO	125
CAPÍTULO 8	130
CONCLUSIONES.....	130
Bibliografía	132

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Desplazamientos verticales y radiales en la columna en función de la profundidad expresada en veces el diámetro (D). (Hugues & Withers, 1974)</i>	4
<i>Figura 2 – Comparación en la reducción del tiempo de equilibrio (arriba), reducción del valor del asentamiento (abajo). (Hugues & Withers, 1974).</i>	5
<i>Figura 3 – Esfuerzo vertical permitido vs cohesión no drenada (Cu) y su respectiva comparación con el trabajo recientemente publicado de Thorburn en ese entonces. (Hugues & Withers, 1974)</i>	6
<i>Figura 4 – Distribución de un grupo de columnas en una cuadrícula cuadrada de 2.5m X 2.5m (Hugues & Withers, 1974)</i>	7
<i>Figura 5 – Resultados obtenidos de esfuerzo vs asentamiento de un grupo de columnas con un patrón cuadrado. (Hugues & Withers, 1974)</i>	8
<i>Figura 6- Vibrador para retirar el material nativo por vía húmeda (Mora & Carvajal, 2014)</i>	12
<i>Figura 7 – Perforadora mecánica para la excavación de los lugares a conformar las columnas de grava (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018).</i>	13
<i>Figura 8 – Vaciado de la primera capa granular (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018)</i>	13
<i>Figura 9 – Compactación de cada capa de material granular (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018)</i>	14
<i>Figura 10 – Columna de grava apisonada con los pre-esfuerzos inducidos en el suelo natural (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018)</i>	14
<i>Figura 11 – Vibrador utilizado en el método de vía seca (Vincent).</i>	15
<i>Figura 12 – Diagrama de Mohr-Coulumb que refleja la respuesta del suelo al implementarse las columnas de grava apisonada. (Black, Sivakumar, & Bell, 2011)</i>	16
<i>Figura 13 – Confinamiento lateral del suelo circundante a la columnas de grava apisonadas.</i>	17
<i>Figura 14 – Carga sobre el sistema suelo-columna (Vincent)</i>	18
<i>Figura 15 – Determinación de suelos en función de la granulometría y cantidad de finos para los cuales es adecuado compactarlos mediante vibre-flotación.</i>	20
<i>Figura 16 – Analogía de un resorte con la implementación de columnas de grava apisonada (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018)</i>	21
<i>Figura 17 – Falla por abultamiento de la columna de grava apisonada (Bachus & Barksdale, 1983)</i>	22
<i>Figura 18 – Falla por esfuerzo cortante en columna corta (Bachus & Barksdale, 1983)</i>	23
<i>Figura 19 – Falla por cortante en el extremo inferior de la columna de grava apisonada (Bachus & Barksdale, 1983).</i>	23
<i>Figura 20 – Nomenclatura usual al implementar columnas de grava apisonada</i>	24
<i>Figura 21 – Patrones geométricos de celdas unitarias según su distribución (Pollán, 2014)</i>	25
<i>Figura 22 – Razón de sustitución en función del tipo de celda unitaria (Pollán, 2014)</i>	26
<i>Figura 23 – Modelo base con el cual se calcula la ecuación de equilibrio del sistema (Elaboración propia)</i>	27

Figura 24 – Variación del Factor de concentración de carga en el suelo μS en función de la razón de sustitución αr (Pollán, 2014)	29
Figura 25 - Variación del Factor de concentración de carga en la columna μc en función de la razón de sustitución αr (Pollán, 2014)	29
Figura 26 – Gráfica con la cual es posible calcular el asentamiento del sistema suelo-columnas conocidos αr , n y el asentamiento del suelo sin mejorar (Bachus & Barksdale, 1983).	31
Figura 27 – (a) Nomenclatura usada para el cálculo de la razón de αr , (b) – Gráfica con la cual es posible calcular el asentamiento del sistema suelo-columnas conocidos αr , cu y el asentamiento del suelo sin mejorar (Bachus & Barksdale, 1983).	32
Figura 28 – Calculo del asentamiento del suelo tratado con columnas de grava en función del ángulo de fricción de las columnas de grava y conocido αr y el asentamiento del suelo sin tratar y (Bachus & Barksdale, 1983)	33
Figura 29 – Columnas de grava apisonada en un patrón de triángulo equilátero	34
Figura 30 – Abultamiento en columna de grava apisonada (Das, 2011)	35
Figura 31 – Propagación de las cargas verticales en función de la profundidad (Hugues & Withers, 1974).	36
Figura 32 – Esquemático de prueba de carga de una columna de arena a escala (Hugues & Withers, 1974)	37
Figura 33 – Falla de bloque triangular en grupo cuadrado de columnas (a) y un grupo de longitud infinita (b).	40
Figura 34 – Concentración de esfuerzos debido al cambio de rigidez	44
Figura 35 – Partes utilizadas en ABAQUS para el análisis en 2D	47
Figura 36 – Condiciones de frontera en los modelos	49
Figura 37 – Consideraciones de la deformación plana	50
Figura 38 – Modelos de referencia sin columnas de grava apisonadas	51
Figura 39 – Ilustración del modelo realizado en el software basado en elementos finitos	52
Figura 40 – Modelo 2D	53
Figura 41 – Representación del peso de cada parte mediante vectores.	54
Figura 42 – Ilustración de los resultados del vector desplazamiento en el software basado en elementos finitos en el modelo suelo-columnas 2D.	55
Figura 43 – Superficie (roja) en la cual se desean conocer los valores de desplazamiento en el eje y	55
Figura 44 – Gráfica de la variable desplazamiento en el eje y a lo largo de la superficie establecida.	56
Figura 45 – Obtención de valores tabulados de la variable de interés a través de la superficie establecida.	56
Figura 46 – Punto (color rojo) en el cual se midieron las deformaciones unitarias y los esfuerzos verticales	57
Figura 47 – Gráfica tipo esfuerzo vs deformación unitaria obtenida a partir de los datos exportados desde software basado en elementos finitos.	58
Figura 48 – Partes creadas en el software para el análisis 3D (Elaboración propia)	59

<i>Figura 49 – Semejanza entre modelos, uno con una zapata y otro con una presión equivalente (Elaboración propia).</i>	61
<i>Figura 50 – Visualización detallada de las columnas de grava implementas en el suelo nativo</i>	62
<i>Figura 51 - Punto de toma de datos de desplazamiento vertical</i>	64
<i>Figura 52 – Ejemplo de diagrama de contorno de la magnitud de la velocidad.</i>	65
<i>Figura 53 – Camino de nodos para conocer la respuesta de ciertas variables en función de la altura de la columna.</i>	66
<i>Figura 54 – Nodos con datos de esfuerzo sobre una columna de grava</i>	67
<i>Figura 55 – Caminos de nodos en una celda unitaria con los que se obtuvo el esfuerzos sobre el suelo.</i>	68
<i>Figura 56 – Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=16$ y $D=0.2m$.</i>	70
<i>Figura 57 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=16$ y $D=0.3m$</i>	70
<i>Figura 58 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=8$ y $D=0.2m$</i>	71
<i>Figura 59 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=8$ y $D=0.3m$</i>	71
<i>Figura 60 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=4$ y $D=0.2m$</i>	72
<i>Figura 61 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=4$ y $D=0.3m$</i>	72
<i>Figura 62 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=2$ y $D=0.2m$</i>	73
<i>Figura 63 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=2$ y $D=0.3m$</i>	73
<i>Figura 64 – Agrupación de resultados de todas las simulaciones con diámetro $D=0.2 m$ en función del módulo de elasticidad del suelo fino.</i>	74
<i>Figura 65 - Agrupación de resultados de todas las simulaciones con diámetro $D=0.3 m$ en función del módulo de elasticidad del suelo fino.</i>	75
<i>Figura 66 – Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=16$ y $D=0.2m$</i>	75
<i>Figura 67 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=16$ y $D=0.3m$</i>	76
<i>Figura 68 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=8$ y $D=0.2m$</i>	76

<i>Figura 69 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=8$ y $D=0.3m$</i>	77
<i>Figura 70 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=4$ y $D=0.2m$</i>	77
<i>Figura 71 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=4$ y $D=0.3m$</i>	78
<i>Figura 72 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=2$ y $D=0.2m$</i>	78
<i>Figura 73 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=2$ y $D=0.3m$</i>	79
<i>Figura 74 – Modulo de elasticidad equivalente en función del módulo de elasticidad del suelo para todos los modelos de diámetro $D=0.2m$</i>	79
<i>Figura 75 - Modulo de elasticidad equivalente en función del módulo de elasticidad del suelo para todos los modelos de diámetro $D=0.3m$</i>	80
<i>Figura 76 – Magnitud de la deformación unitaria en 2D</i>	80
<i>Figura 77 – Deformación unitaria en x en 2D</i>	81
<i>Figura 78 – Deformación unitaria en y en 2D</i>	81
<i>Figura 79 – Magnitud de desplazamientos en 2D</i>	82
<i>Figura 80 – Desplazamientos en x en 2D</i>	82
<i>Figura 81 – Desplazamientos en y en 2D</i>	82
<i>Figura 82 – Esfuerzos de Von Mises en 2D.</i>	83
<i>Figura 83 – Deformación debido a la carga superficial en el sistema suelo-columnas</i>	84
<i>Figura 84 – Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs diámetro de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa y rugosidad absoluta entre las superficies en interacción.</i>	86
<i>Figura 85 – Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs altura de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa y rugosidad absoluta entre las superficies en interacción.</i>	87
<i>Figura 86 – Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs diámetro de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E=100$ MPa y rugosidad absoluta entre las superficies en interacción.</i>	87
<i>Figura 87 – Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs altura de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E= 100$ MPa y rugosidad absoluta entre las superficies en interacción.</i>	88
<i>Figura 88 - Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs diámetro de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa y coeficiente de rugosidad entre las superficies en interacción de $\mu=0.5$</i>	89

Figura 89 - Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs altura de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa y coeficiente de rugosidad entre las superficies en interacción de $\mu=0.5$	90
Figura 90 – Porcentaje de desplazamiento vertical del suelo vs diámetro de columnas (m)	90
Figura 91 – Porcentaje del desplazamiento vertical del suelo vs altura de las columnas (m)	91
Figura 92 – Esfuerzos de Von Mises observados en la parte superior del sistema	92
Figura 93 – Esfuerzos de Von Mises en el sistema con ayuda de un corte utilizando un plano paralelo a YZ	92
Figura 94 - Diagrama de contorno del desplazamiento vertical (U1) a lo largo del eje X	93
Figura 95 – Diagrama de contorno del esfuerzo a lo largo del eje X (S11)	93
Figura 96 - Diagrama de contorno del desplazamiento vertical (U2) a lo largo del eje Y	94
Figura 97 - Diagrama de contorno del esfuerzo a lo largo del eje Y (S22)	94
Figura 98 – Diagrama de contorno del desplazamiento vertical (U3) a lo largo del eje Z	95
Figura 99 – Desplazamiento vertical (U3) vs profundidad para 3 modelos.	95
Figura 100 - Diagrama de contorno del esfuerzo vertical a lo largo del eje Z (S33)	96
Figura 101 – Diagrama de contorno de las zonas con mayor deformación unitaria (ϵ)	96
Figura 102 – Deformación unitaria en el suelo vs profundidad en las columnas	97
Figura 103 – Esfuerzos de Von Mises (Pa) vs Profundidad (m) para un suelo de $E=12.5$ MPa y rugosidad absoluta.	98
Figura 104 – Comparación diagrama de contorno del modelo con rugosidad absoluta (izquierda) y $\mu=0.5$ (derecha).	104
Figura 105 – Desplazamiento vertical entre columnas	105
Figura 106 – Comparación de la mejora en los asentamientos cuando varia la rugosidad entre superficies en contacto del modelo al ir aumentando el diámetro de las columnas de grava cuando Esuelo = 12.5 MPa .	108
Figura 107 - Comparación de la mejora en los asentamientos cuando varia la rugosidad entre superficies en contacto del modelo al ir aumentando la altura de las columnas de grava Esuelo = 12.5 MPa .	109
Figura 108 - Comparación de la variación en los asentamientos cuando cambia la rugosidad entre superficies en contacto del modelo al ir aumentando el diámetro de las columnas de grava Esuelo = 100 MPa .	110
Figura 109 - Comparación de la variación en los asentamientos cuando cambia la rugosidad entre superficies en contacto del modelo al ir aumentando la altura de las columnas de grava Esuelo = 100 MPa .	111
Figura 110 – Comparación de los diagramas de contorno de esfuerzos cuando se tiene rugosidad absoluta (arriba) y cuando $\mu=0.5$ (abajo)	112
Figura 111 - Comparación de los diagramas de contorno de desplazamientos cuando se tiene rugosidad absoluta (arriba) y cuando $\mu=0.5$ (abajo)	113

<i>Figura 112 – Comparación de la propagación de las deformaciones unitaria entre los modelos con rugosidad absoluta (izquierda) y $\mu=0.5$ (derecha)</i>	115
<i>Figura 113 – Comparación de la distribución de las carga entre las columnas de grava y el suelo natural.</i>	115
<i>Figura 114 – Comparación de desplazamientos a lo largo del eje X e Y</i>	116
<i>Figura 115 – Comparación de los esfuerzos a lo largo del eje X e Y.</i>	117
<i>Figura 116 – Diagrama de contorno de los desplazamientos (izquierda) y los esfuerzos (derecha) verticales.</i>	117
<i>Figura 117 – Comparación gráfica del comportamiento de los desplazamientos verticales a medida que se incrementa la profundidad de las columnas.</i>	118
<i>Figura 118 – Esfuerzos verticales vs profundidad de columnas</i>	119
<i>Figura 119 – Comparación gráfica del ensanchamiento de las columnas obtenida en el software basado en elementos finitos con lo que se esperaba teóricamente.</i>	120
<i>Figura 120 – Comparación numérica del ensanchamiento de las columnas obtenido en el software basado en elementos finitos con lo que se esperaba teóricamente.</i>	120
<i>Figura 121 – Ábaco 1, Porcentaje que se reduce el asentamiento elástico vs D/B para $E_c/E_s=16$</i>	125
<i>Figura 122 – Ábaco 2, Porcentaje que se reduce el asentamiento elástico vs H/B para $E_c/E_s=16$</i>	126
<i>Figura 123 – Ábaco 3, Porcentaje que se reduce el asentamiento elástico vs D/B para $E_c/E_s=2$</i>	126
<i>Figura 124 – Ábaco 4, porcentaje que se reduce el asentamiento elástico vs H/B para $E_c/E_s=2$</i>	127
<i>Figura 125 – Dimensionamiento de columnas para un porcentaje de reducción de los asentamientos elásticos de 50%.</i>	128

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1- Clasificación del material de relleno en función del número de adecuación (Das, 2011).....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2 – Propiedades de los materiales del análisis bidimensional.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 3 – Propiedades de las partes implicadas en el análisis tridimensional</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 4 – Simulaciones realizadas en el análisis tridimensional.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 5 – Casos elegidos para el cálculo teórico de la relación de asentamientos.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 6 – Porcentaje que se reduce el asentamiento elástico del suelo cuando $\mu=0.5$.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 7 – Resultados de desplazamiento vertical medido en metros en el punto de interés para un módulo de elasticidad del suelo de 12.5 MPa con rugosidad absoluta entre las superficies en contacto</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 8 – Resultados de desplazamiento vertical medido en metros en el punto de interés para un módulo de elasticidad del suelo de 100 MPa con rugosidad absoluta entre las superficies en contacto</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 9 – Desplazamientos verticales de referencia, obtenidos del modelo sin columnas</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 10 – Resultados de desplazamiento vertical medido en metros en el punto de interés para un módulo de elasticidad del suelo de 12.5 MPa con coeficiente de rugosidad entre las superficies en contacto de $\mu=0.5$</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 11 - – Resultados de desplazamiento vertical medido en metros en el punto de interés para un módulo de elasticidad del suelo de 100 MPa con coeficiente de rugosidad entre las superficies en contacto de $\mu=0.5$</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 12 – Calculo teórico de relación de asentamientos (μs) caso 1.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 13 – Calculo teórico de relación de asentamientos (μs) caso 2.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 14 - Calculo teórico de relación de asentamientos (μs) caso 3.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 15 - Calculo teórico de relación de asentamientos (μs) caso 4.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 16 - Calculo teórico de relación de asentamientos (μs) caso 5.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 17 - Calculo teórico de relación de asentamientos (μs) caso 6.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 18 – Comparación de resultados con $\mu=0.5$ y rugosidad absoluta en 2D.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 19 – Comparación de profundidad de ensanchamiento medida con ayuda del software basado en elementos finitos con la esperada teóricamente.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 20 – Comparación del valor de los asentamiento obtenido con el método teórico y medido con el software basado en elementos finitos.....</i>	<i>121</i>

INTRODUCCIÓN

La implementación de columnas de grava apisonada representa un gran beneficio en diferentes aspectos cuando se deben realizar cimentaciones en suelos arcillosos o cohesivos, por la zona en la que se encuentra la ciudad de Popayán, se presentan las condiciones y el escenario adecuado en el cual se puede utilizar este tipo de procedimiento para mejorar las propiedades mecánicas del suelo, por ello es ideal en primera instancia comprobar la teoría que respalda este tipo de procedimientos, además es necesario someter esa teoría a las condiciones que ofrece la región con el fin de destacar las ventajas del sistema y motivar a su uso. Por lo anterior, se decidió hacer uso de un software basado en elementos finitos (Helwany, 2007), con el que se realizaron en total 350 simulaciones, de las cuales 148 se realizaron en 2D y 202 en 3D, para ambos casos se utilizó un modelo constitutivo elástico lineal para los cuales se ingresaron valores únicamente de módulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (ν) y densidad.

En las simulaciones en 2D se implementaron solo 2 columnas de grava para mejorar el suelo, para cada modelo se varió el módulo de elasticidad del suelo entre valores de 12.5, 25, 50 y 100 MPa, dejando las demás propiedades de las otras partes constante, entre cada diferente modelo se iba aumentando la separación centro a centro entre columnas, además de incrementar el valor del diámetro de cada una y sus profundidades. Para el caso de las simulaciones 3D, se implementaron 4 columnas de grava con el fin de mejorar un suelo en forma de cubo con dimensiones de 10x10x10 m, para las columnas se empleó una distribución cuadrangular en el terreno, de tal manera que se dejó fija la separación entre ellas a un valor de $S=1\text{m}$, lo que si se varió en esta parte fue su diámetro y altura, en cuanto a el módulo de elasticidad del suelo se tomaron dos valores de 12.5 y 100 MPa.

En el análisis bidimensional, se sometió el sistema suelo-columnas a la carga de una zapata de $B=1\text{m}$ con una carga de 100 KN aplicada en la parte superior de esta y en la parte tridimensional se sometió el sistema a una presión de 100 KPa en un área de $2\text{ m} \times 2\text{ m}$.

La variable de interés a determinar en ambos casos de análisis (2D y 3D) fue el desplazamiento vertical una vez sometido el sistema a las cargas, y se compararon todos los casos con un desplazamiento patrón de un suelo sin mejorar con el ánimo de conocer el cambio del asentamiento elástico del sistema y determinar cuáles eran las variables más importantes a tener en cuenta al momento de diseñar estas columnas.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la ciudad de Popayán y sus alrededores es común encontrar suelos finos, por lo que generalmente de acuerdo al tipo de obra a realizar se debe emplear algún método que permita mejorar la capacidad de carga del suelo, comúnmente se emplean procedimientos típicos como lo son el retirar todo el suelo de baja capacidad portante de carga y reemplazarlo por un suelo adecuado para que soporte las cargas que le pueda transmitir la cimentación, otro método común es implementar pilotes de concreto ya sean prefabricados o colocados in situ de tal manera que sea posible que descansen sobre un suelo adecuado que permita la construcción de la obra, si por alguna razón no es posible emplear alguno de estos métodos y se tiene un suelo indeseable para la obra, entonces se opta por elaborar losas de cimentación, cualquiera que sea la elección anteriormente mencionada que se haga para mejorar la capacidad de carga del suelo, por lo general puede implicar grandes costos, incluso pueden traer otro tipo de consecuencias indeseables como un impacto ambiental negativo.

Una alternativa al refuerzo de cimentaciones relativamente nueva la cual se implementó por primera vez utilizando un método racional en los años 90, es la de elaborar columnas de grava apisonada que es muy optima ya que en varios casos

representa un bajo costo comparado con el beneficio que ofrece y comparado otros métodos.

1.2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

El diseño de las cimentaciones con columnas de grava apisonadas, se basó durante muchos años en la experiencia, según (Hugues & Withers, 1974) la primera evidencia de la implementación de este sistema para el mejoramiento de suelos finos tuvo lugar en Francia, en la ciudad de Bayona, en el año 1830, en donde se construyeron para la cimentación de una herrería, para este primer caso, se elaboraron columnas de 2 metros de longitud con un diámetro de 0.2 m. Para su construcción, se clavaban estacas con estas dimensiones mencionadas y luego se retiraban para rellenar los agujeros con caliza, cada columna de grava soportaba una carga de 10 KN. El ingeniero francés Moreau quien las construyó, sugirió que con este sistema se reduciría el asentamiento en un factor de 4, luego de esta construcción, este sistema quedo en el olvido hasta que se redescubrió en 1939 por Steuerman, como producto de la vibroflotación para compactar suelos granulares, aseguro que este sistema sería capaz de mejorar la capacidad de carga del suelo hasta el doble, sin embargo no fue sino hasta 1969 que se utilizaron técnicas de vibroflotación para construir estas columnas de grava compactadas con el ánimo de mejorar las propiedades mecánicas de suelos cohesivos. Todos los anteriores casos mencionados se ejecutaron basados en diseños netamente empíricos.

Posteriormente, en 1974 (Hugues & Withers, 1974) realizaron una serie de experimentos en laboratorio, de los que se obtuvo uno de los primeros documentos más completos en cuanto a investigación de este tema donde se obtuvieron resultados a favor del sistema, en estos experimentos sometieron una sola columna rodeada de un suelo arcilloso, la cual tenía una longitud de 15 cm y utilizaron sistemas variando los diámetros de la columna desde 1.25 cm a 3.8 cm, en estos experimentos se pudieron identificar algunos comportamientos importantes, como que las cargas verticales no se propagan mucho más allá de una profundidad

aproximada de 2 veces el diámetro, además de determinar que los mayores desplazamientos verticales en la columna, se encontraran hasta una profundidad de 2D, también se concluyó que el mayor desplazamiento radial se da en un rango de 2.5D a 3D aproximadamente, donde D es el diámetro de la columna, lo anterior se puede evidenciar en la figura 1.

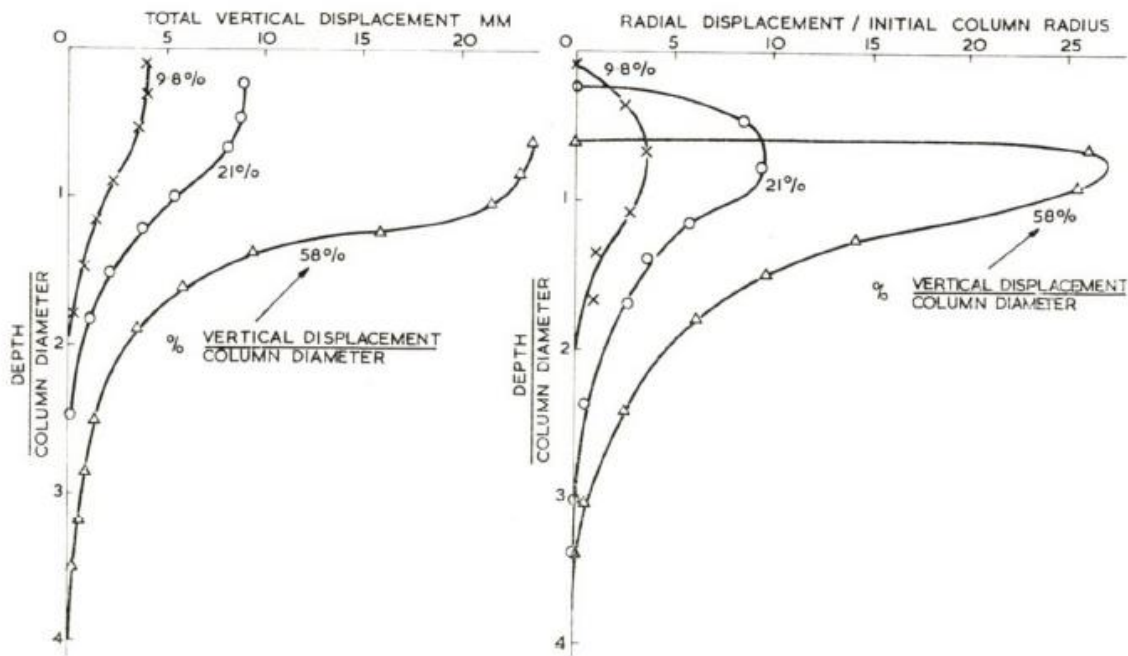


Figura 1 – Desplazamientos verticales y radiales en la columna en función de la profundidad expresada en veces el diámetro (D). (Hugues & Withers, 1974)

Las mediciones para llegar a dichas conclusiones se realizaron con la ayuda de la toma de radiografías de disparos de plomo colocadas dentro de las columnas y suelo arcilloso.

En este trabajo tan importante de investigación en este tema, también se estudió el comportamiento del sistema suelo-columna en cuanto a los asentamientos que se producían al aplicar cierta carga, el valor de esta carga para este caso de estudio fue de 160 KPa, el cual correspondía al valor de la última capacidad de carga de la arcilla dividida por un factor de seguridad de 3. Una vez sometido el sistema suelo-columna bajo la carga mencionada, se pudo notar de acuerdo a la figura 2 que el equilibrio en cuanto a los asentamientos se alcanza a los 380 minutos (punto H),

mientras que, si se somete a la misma carga el suelo sin columna, este alcanzara el equilibrio luego de 1480 minutos. Si se proyectan estos puntos hacia abajo, cortan a la gráfica donde se cuantifica dicho asentamiento como un porcentaje del diámetro de la cimentación, en esta parte, se puede observar cómo se reduce el valor del asentamiento del sistema suelo-columna en comparación con el suelo solo, según lo que los autores pudieron determinar, este valor de asentamiento se reduce aproximadamente por un factor de 6, esto se puede evidenciar en la gráfica mostrada a continuación en la figura 2.

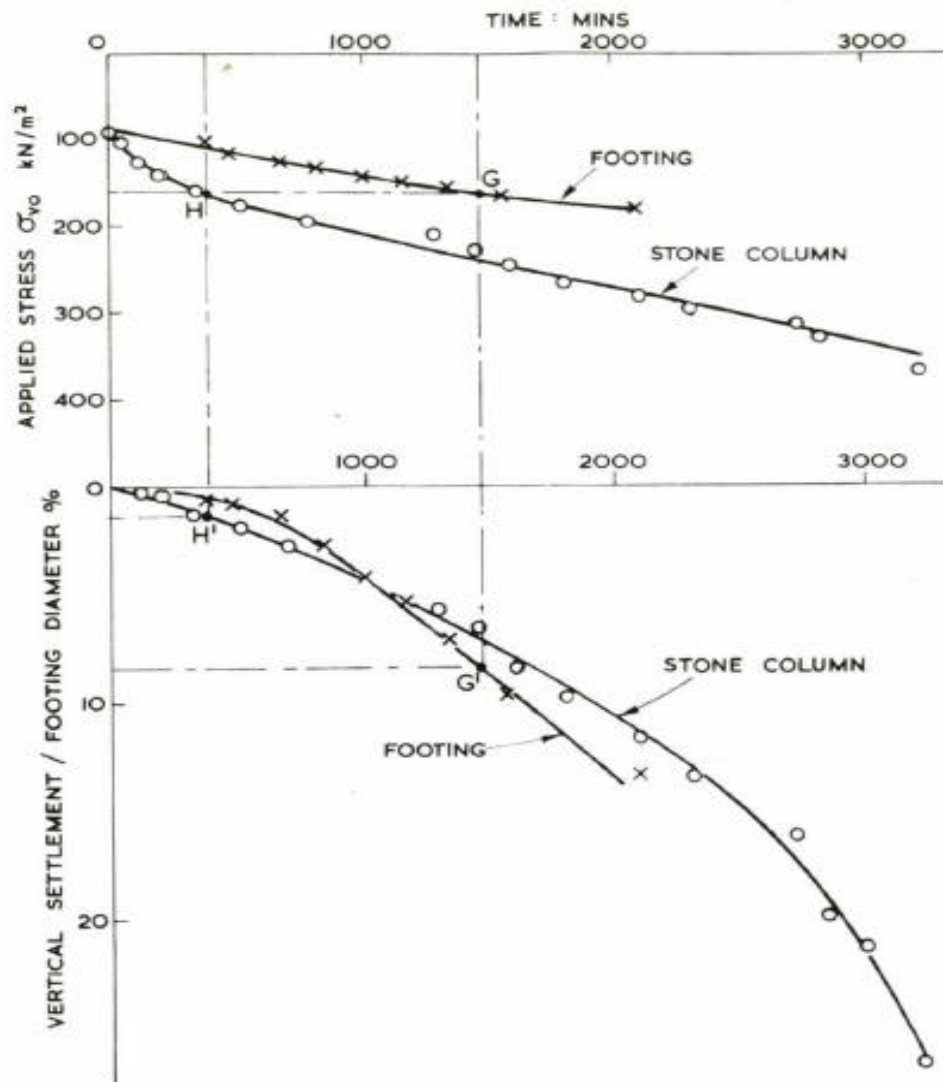


Figura 2 – Comparación en la reducción del tiempo de equilibrio (arriba), reducción del valor del asentamiento (abajo). (Hugues & Withers, 1974).

También se realizaron medidas para analizar el comportamiento en cuanto a la capacidad de carga del sistema suelo-columna en función de la cohesión no drenada (C_u), de lo que se pudo establecer la evidente mejoría según lo graficado en la figura 3, donde se observa que para un mismo valor de cohesión no drenada, el sistema con la columna implementada aumento su esfuerzo permitido alrededor de 6 veces, además, compararon sus resultados con los obtenidos por Thorburn ese mismo año (1974), donde este último obtuvo una mayor mejoría en comparación con (Hugues & Withers, 1974) debido a que en sus pruebas utilizo suelos cohesivos más rígidos donde se recomienda implementar columnas de grava más pequeñas, también se pueden comparar con los resultados obtenidos.

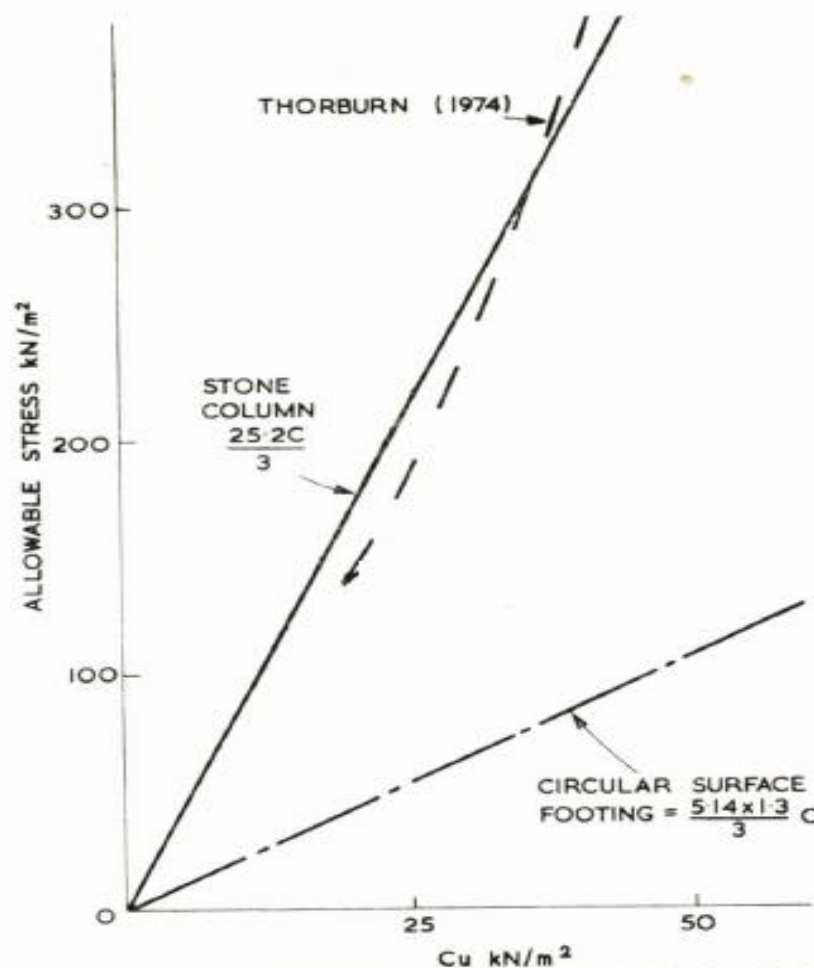


Figura 3 – Esfuerzo vertical permitido vs cohesión no drenada (C_u) y su respectiva comparación con el trabajo recientemente publicado de Thorburn en ese entonces. (Hugues & Withers, 1974)

En cuanto a grupos de columnas, (Hugues & Withers, 1974), realizaron una con un grupo de columnas, las cuales tenían una distribución geométrica cuadrada de lado 2.5m en un suelo arcilloso, para este caso se disponía de columnas de un diámetro de 1m, con una separación entre ellas centro a centro de 2.5m y una longitud de 4m, en la figura 4 se puede observar dichos valores.

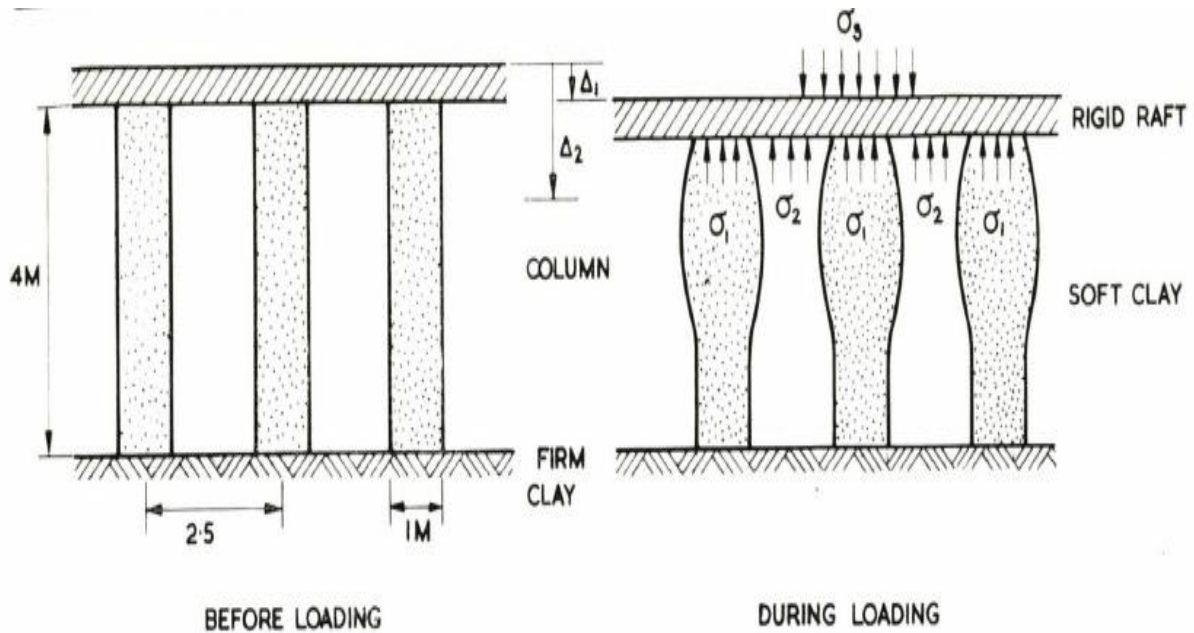


Figura 4 – Distribución de un grupo de columnas en una cuadrícula cuadrada de 2.5m X 2.5m (Hugues & Withers, 1974)

A partir del anterior montaje en laboratorio, se sometió el sistema a un esfuerzo vertical, de donde se pudieron obtener mediciones las cuales se pueden ver graficadas en la figura 5. Por ejemplo, cuando se aplicó un esfuerzo de 50 KPa sobre la placa rígida, este produce un desplazamiento $\Delta_1 = 0.18$ m (Punto A), si se proyecta este desplazamiento hacia la izquierda, se puede inferir que para poder producir este mismo desplazamiento en un grupo de columnas se requerirá un esfuerzo de 300 KPa (Punto B), mientras que si se tiene en cuenta un suelo sin columnas se necesitará un esfuerzo de 10 KPa (Punto C), también se observa que si se tiene un suelo sin tratar y se le aplica la misma carga inicial que a la placa rígida de $\sigma = 50$ KPa, este se desplazaría $\Delta_2 = 0.47$ m (Punto D).

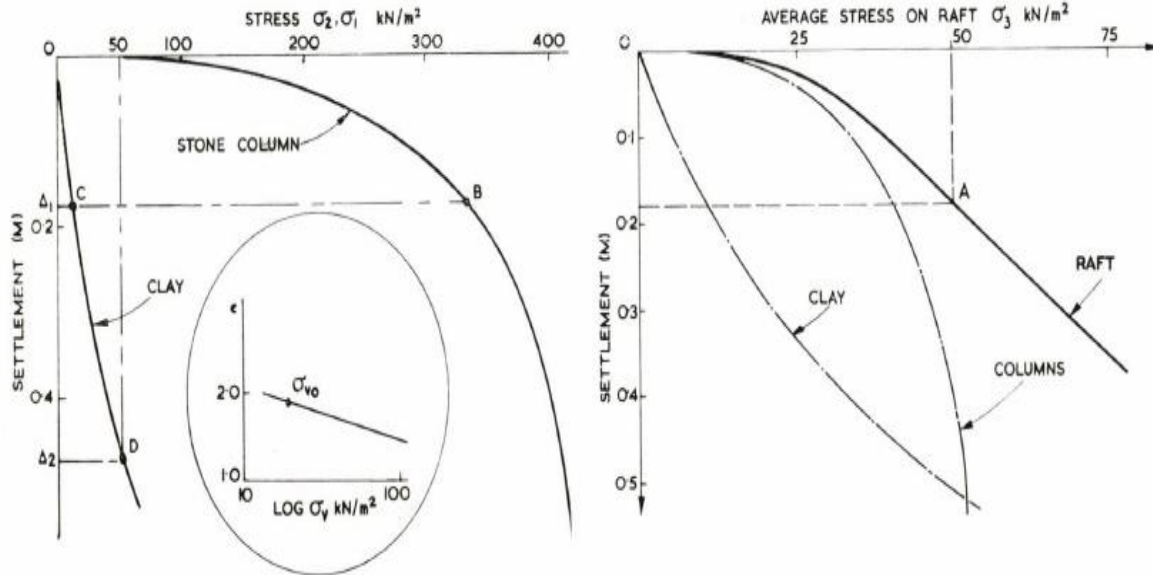


Figura 5 – Resultados obtenidos de esfuerzo vs asentamiento de un grupo de columnas con un patrón cuadrado. (Hugues & Withers, 1974)

Teniendo en cuenta los anteriores resultados, los autores mencionados concluyeron en primera instancia que la implementación de columnas de grava compactadas son una alternativa muy viable para el mejoramiento de suelos finos, pero deben usarse cuando se requiere un modesto aumento en la capacidad de carga, ya que su falla común será por ensanchamiento el cual está en función del confinamiento lateral que le pueda brindar el suelo fino, además no es un sistema adecuado para cargas grandes, ya que las columnas de grava no tienen la capacidad de transmitir sus cargas a estratos inferiores más resistentes.

Otro de los documentos importantes que ayudaron al desarrollo de esta técnica, fue el desarrollado por (Bachus & Barksdale, 1983), este trabajo que consta de dos volúmenes está apoyado en gran parte en el trabajo por (Hugues & Withers, 1974), se basó en la elaboración de experimentos en laboratorio además de simulaciones en software basado en elementos finitos, aquí se explica desde los conceptos básicos referentes a los sistemas suelo-columnas además de establecer un procedimiento detallado de diseño de estos sistemas ya que hasta ese entonces la implementación de esta técnica se fundamentaba en su mayor parte en un diseño

empírico. Este documento represento un gran avance, ya que recopiló toda la información teórica y práctica que se tenía hasta el momento en el volumen 1 y en base a diferentes autores estableció los procedimientos para calcular la capacidad de carga, asentamientos, tipos de fallas, etc. con el fin de emplearlo en el mejoramiento de suelos finos y la estabilidad de taludes a partir de emplear columnas de grava apisonada. En el volumen 2 se cuenta con una serie de ejemplos, donde se indica la manera adecuada de diseñar estos sistemas en diferentes aplicaciones, cabe resaltar que los resultados de toda sus investigaciones respaldan los encontrados por (Hugues & Withers, 1974).

A principios de la década de los 90's, diferentes compañías comenzaron a emplear estos sistemas de manera masiva, y desde que se empezaron a conocer, se han realizado diferentes casos de estudio, comprobando lo establecido por la teoría y la experiencia además de investigar posibles mejoras en el sistema, gran parte de estos trabajos se han realizado utilizando software basados en elementos finitos (Castro, 2017) como es el caso del presente documento.

1.3 OBJETIVO DEL PROYECTO

Determinar el impacto de mejoramiento con columnas de grava de suelos finos del Cauca mediante la técnica de modelación numérica por elementos finitos y comparar los resultados adquiridos en este método con el diseño obtenido a partir de la teoría.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar numéricamente varias configuraciones (parametrizar), espaciamientos y diámetros de columnas de grava para cuantificar su impacto en el mejoramiento de los suelos finos del departamento del Cauca.
- Comparar los resultados obtenidos teóricamente con los de modelación numérica con elementos finitos.

- Establecer los parámetros de diseño de las columnas de grava apisonadas (diámetro, profundidad, separación) que permitan obtener los mejores resultados a la hora de mejorar el suelo fino en el cual se están implementando.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El método de la elaboración de columnas de grava representa un gran beneficio cuando se deben realizar cimentaciones en suelos arcillosos o cohesivos, por la zona en la que se encuentra Popayán se presentan las condiciones y el escenario adecuado en el cual se puede implementar este tipo de procedimiento para mejorar las propiedades mecánicas del suelo, por ello es ideal en primera instancia comprobar la teoría que respalda este tipo de procedimientos, además es necesario someter esa teoría a las condiciones que ofrece la región donde van a ser implementados, como por ejemplo analizar específicamente el uso de los materiales con los que se cuenta y variar ciertos parámetros para poder conocer la respuesta del sistema y de esta manera plantear mejoras en este tipo de procedimiento las cuales permitan aumentar la eficiencia del método.

MARCO TEÓRICO

2.1 CIMENTACIONES CON COLUMNAS DE GRAVA APISONADA

En la actualidad una solución alternativa para mejorar las características de un suelo fino es implementar columnas de grava apisonada, la cual consiste en reemplazar parcialmente el suelo de “mala calidad” por un suelo que aporte un mejor desempeño bajo sometimiento de cargas, lo ideal es utilizar materiales granulares, que permitan densificar el suelo produciendo así una mejora en la capacidad portante de carga, reducción de asentamientos entre otras ventajas (Mora & Carvajal, 2014).

Las técnicas más usuales para elaborar estas columnas de grava apisonada son por medio de vía húmeda y vía seca las cuales se describen de manera más detallada a continuación.

2.1.1 INSTALACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA VÍA HÚMEDA

Es una técnica denominada vibroflotación la cual fue implementada por primera vez en los años 30 en Alemania, incluye un chorro de agua para ayudar a retirar el suelo nativo a ser reemplazado, se debe tener en cuenta que es recomendable utilizar este procedimiento cuando se tienen suelos a ser sustituidos con porcentajes de finos entre 10% a 15% ya que al utilizar agua a presión se genera erosión y arrastres de partículas en el suelo circundante al espacio donde quedarán las columnas de grava lo que puede producir pérdida de homogeneidad, además que se van a generar lodos que si no se retiran completamente puede producir disminución de las buenas propiedades que aporta la grava (Mora & Carvajal, 2014).

La utilización de esta técnica se puede resumir en los 5 pasos principales siguientes (Das, 2011):

- 1) Se activa el chorro de vibroflotación de tal manera que pueda penetrar el terreno.
 - 2) Este chorro de agua genera una condición fluida del terreno y de esta manera poder sumergir más fácilmente el equipo.
 - 3) Se retira la cantidad de suelo fino necesario y ese volumen retirado será el que ocupará la columna de suelo granular.
 - 4) Una vez formado el agujero al retirar el material de suelo fino, se vierte suelo granular paulatinamente.
 - 5) La unidad vibratoria se sube poco a poco en lo posible en incrementos de 30 cm y se vibra la capa que queda en un intervalo de tiempo de aproximadamente 30 segundos para poder compactar el suelo hasta obtener el peso específico deseado.
- A continuación, se explica de una manera más detallada y gráfica los pasos mencionados previamente, en la Figura 6 se pueden apreciar el equipo utilizado y la perforación realizada para retirar en material natural del terreno con ayuda del vibrador que incluye la salida de agua a presión y así empezar a generar el “molde” donde se agregara la grava posteriormente.



Figura 6- Vibrador para retirar el material nativo por vía húmeda (Mora & Carvajal, 2014)

Si el suelo no es propenso a presentar inestabilidad por medio de una perforación, se utilizan maquinas perforados como las que se muestran a continuación en la figura 7.

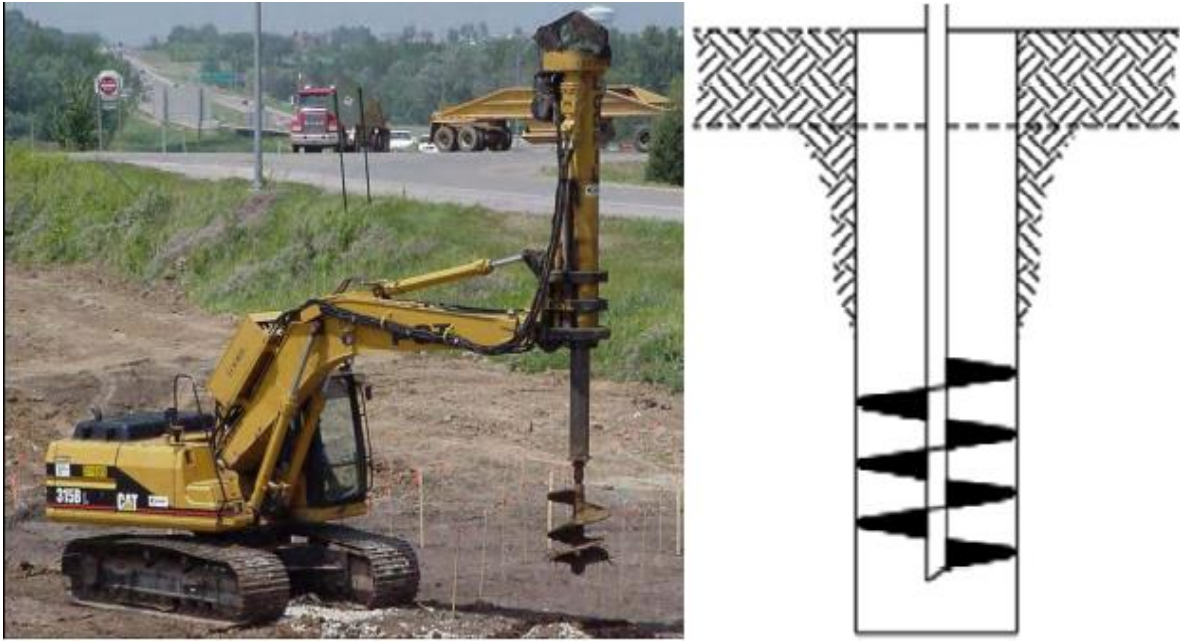


Figura 7 – Perforadora mecánica para la excavación de los lugares a conformar las columnas de grava (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018).

Una vez se haya hecho la preformación hasta la profundidad que tendrá la columna y se haya extraído todo el material a ser reemplazado, se empieza a agregar las capas de grava como se muestra en la figura 8.

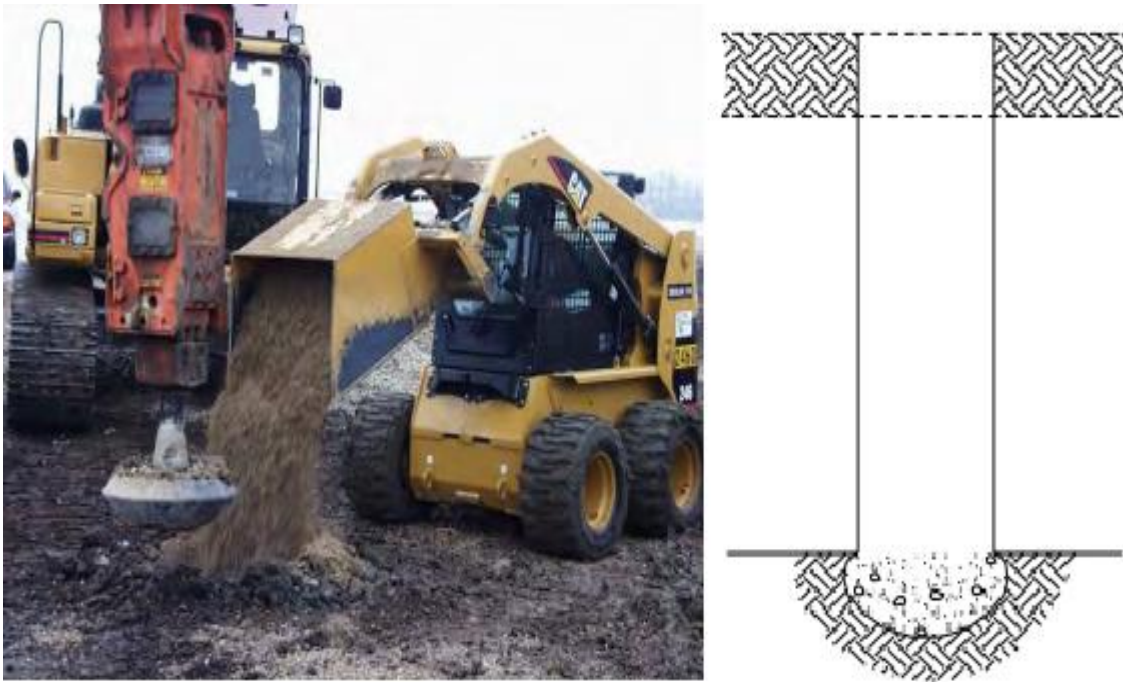


Figura 8 – Vaciado de la primera capa granular (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018)

Posteriormente se apisona esta primera capa con un martillo biselado, empleando energía vertical de impacto, lo que genera que se pre-esfuerce y se pre-deforme el agregado en el fondo hasta por lo menos una profundidad de 1 diámetro por debajo de la profundidad de perforación como aparece en la figura 9.

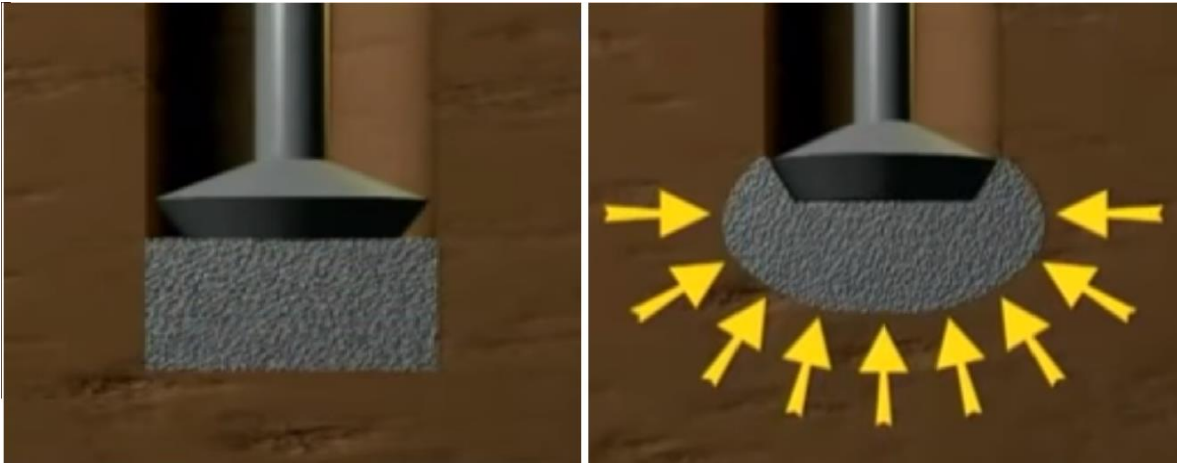


Figura 9 – Compactación de cada capa de material granular (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018)

Una vez estabilizada la primera capa en el fondo, se siguen agregando más capas de un espesor aproximado de 0.3 metros y se siguen apisonando de manera sucesiva hasta llegar a la parte superior, la frecuencia del apisonamiento generalmente oscila entre 600 a 800 golpes por minuto para obtener un resultado como el mostrado en la figura 10.

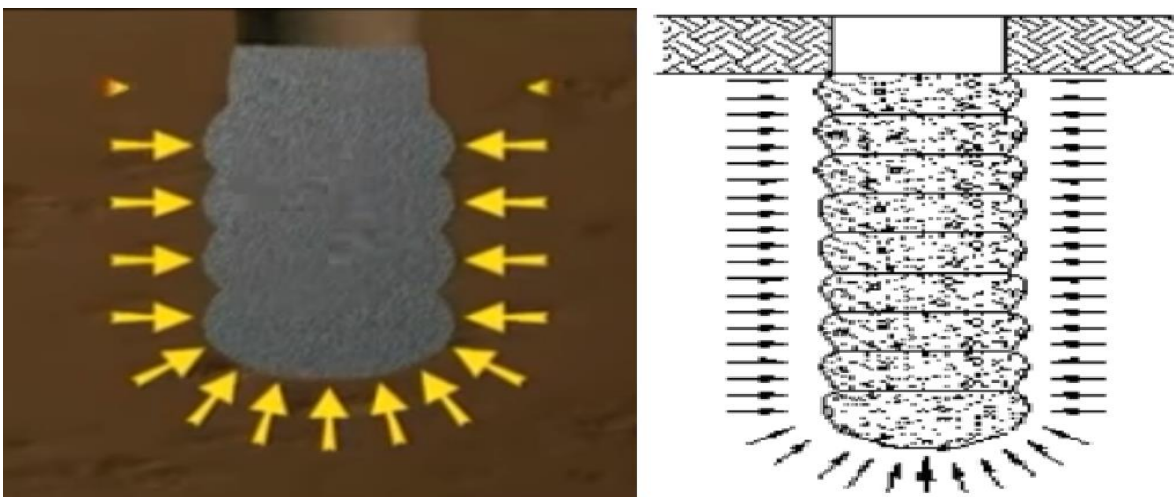


Figura 10 – Columna de grava apisonada con los pre-esfuerzos inducidos en el suelo natural (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018)

El resultado de este procedimiento es un elemento de mayor resistencia y rigidez ya que el martillo biselado no solo desplaza la grava en sentido vertical sino también lateralmente contra las paredes de la perforación realizada previamente, lo que genera que se aumenten los esfuerzos laterales y mejore la resistencia al esfuerzo cortante del suelo adyacente a la perforación, es decir, como consecuencia de la aplicación de este método aumenta la capacidad de carga del suelo y permite un mejorar el control del asentamiento de este (Osorio, 2015)

2.1.2 INSTALACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA VÍA SECA

Algunos suelos como arenas saturadas son propensos a presentar inestabilidad cuando son perforadas, además que no es conveniente usar agua como en la vía húmeda por las condiciones poco cohesivas, en este caso es conveniente utilizar un vibrador con aire comprimido, el cual va penetrando el suelo mediante hincado aplicando fuerzas de hasta 200 KN, en este procedimiento, el equipo cuenta con una cámara donde tiene almacenado el material granular que se usara para mejorar el suelo, este penetra paulatinamente hasta llegar al punto más bajo donde quedaran las columnas de grava apisonada, una vez ahí empieza a verter el material y a medida que va subiendo va compactando cada capa, en la figura 11 se puede apreciar más detalladamente este equipo (Bravo Decker, 2016)

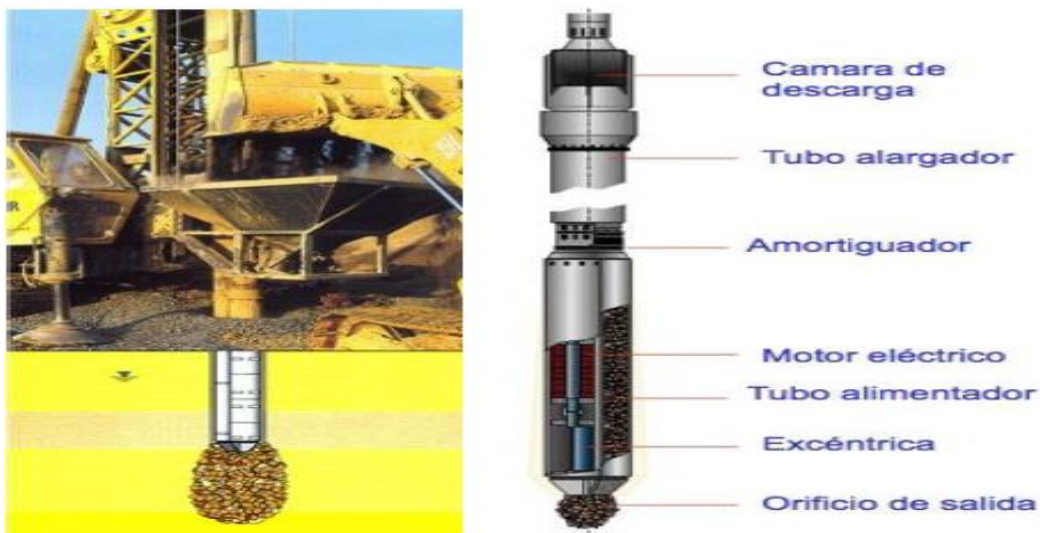


Figura 11 – Vibrador utilizado en el método de vía seca (Vincent).

2.1.3 SISTEMA MEJORADO SUELO-COLUMNAS

Una vez instaladas las columnas de grava apisonada si se tienen en cuenta los esfuerzos principales efectivos a los cuales estará sometido un elemento de suelo en contacto con el sistema de columnas de grava apisonada, se puede ver cómo cambia la representación de estos esfuerzos en el círculo de Mohr como se puede observar a continuación en la figura 12.

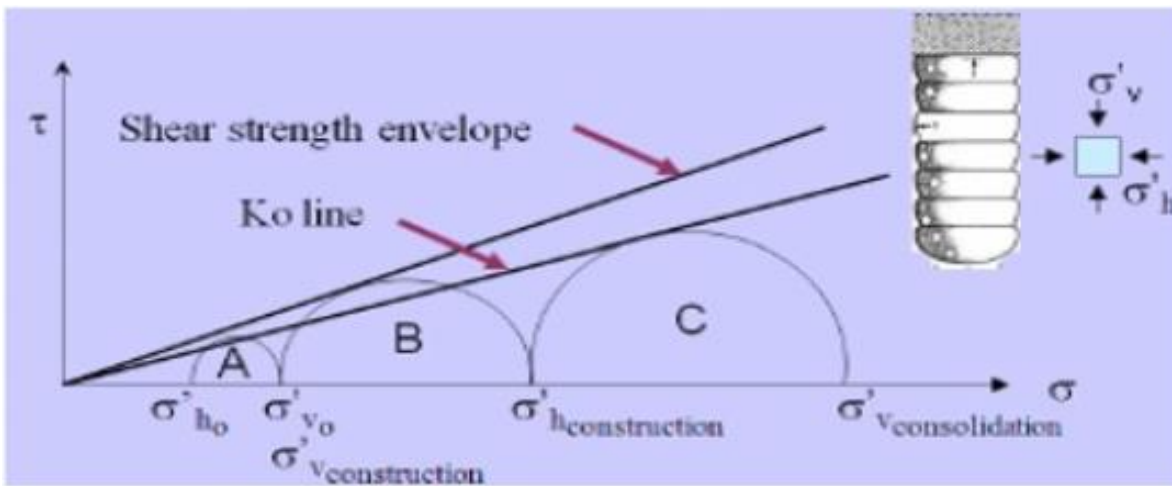


Figura 12 – Diagrama de Mohr-Coulomb que refleja la respuesta del suelo al implementarse las columnas de grava apisonada. (Black, Sivakumar, & Bell, 2011)

El círculo A representa los esfuerzos a los que estará sometido una porción de suelo debido únicamente a los efectos geostáticos, donde σ'_{vo} es el esfuerzo principal mayor el cual sería el vertical y σ'_{ho} el esfuerzo principal menor que sería el lateral, una vez se han realizado las columnas de grava apisonada, el esfuerzo principal mayor aumenta hasta un valor de $\sigma'_{hconstruction}$ generando así también un aumento del esfuerzo cortante, una vez se termine el proceso de construcción de la obra y el suelo quede sometido a las cargas previstas, el esfuerzo vertical aumentará, y ahora el esfuerzo principal llegará hasta un valor de $\sigma'_{vconsolidacion}$, de esta manera se evidencia el aumento del esfuerzo cortante del suelo (aumento de pendiente) adyacente a la columna de grava apisonada (Black, Sivakumar, & Bell, 2011). En la figura 13 se muestra el confinamiento lateral que el suelo le proporciona a las columnas de grava una vez construidas



Figura 13 – Confinamiento lateral del suelo circundante a la columnas de grava apisonadas.

Según la experiencia, generalmente al implementar esta técnica en el mejoramiento de suelos, es recomendable verificar que el volumen de las columnas de grava implementadas este en un rango de 10% a 35% del volumen del suelo nativo, además se deberá garantizar que las cargas para las cuales se vaya a diseñar estén en un rango de 200 KN a 500 KN por columna. Usualmente la mayor mejora del suelo pobre se refleja cerca de la superficie al aumentar su resistencia al esfuerzo cortante en un rango de 15 – 50 KPa, en cuanto a los asentamientos, si se presentan buenas condiciones en campo y su instalación se hace de manera adecuada, los asentamiento pueden reducir entre un 30% a 80% en comparación con el suelo sin mejorar (Minna & Castro, 2014).

Cuando estén colocadas las columnas, el sistema suelo-columna tendrá ahora una “rigidez equivalente” la cual será mayor a la que se tenía en el suelo sin mejorar, pero menor a las de las columnas solas, de tal manera que cuando se coloca una

carga uniformemente distribuida en la superficie se espera que las columnas asuman la mayor parte ya que están tendrán una mayor rigidez que el suelo circundante, el suelo también asumirá en menor proporción las magnitudes de estas cargas por lo que si antes no cumplía con las sollicitaciones de carga del diseño, lo más seguro es que una vez dispuestas las columnas, estas asuman una magnitud de carga la cual será menor a la admisible para ese suelo solo, de esta manera es como se mitigan los potenciales efectos negativos que puede sufrir el suelo pobre, en la figura 14 se puede evidenciar el diagrama de cómo se distribuyen las cargas en el sistema suelo-columna idealizando un desplazamiento lateral de cero en el contorno del suelo (Shirazi, Zarrin, & Komeil, 2015).

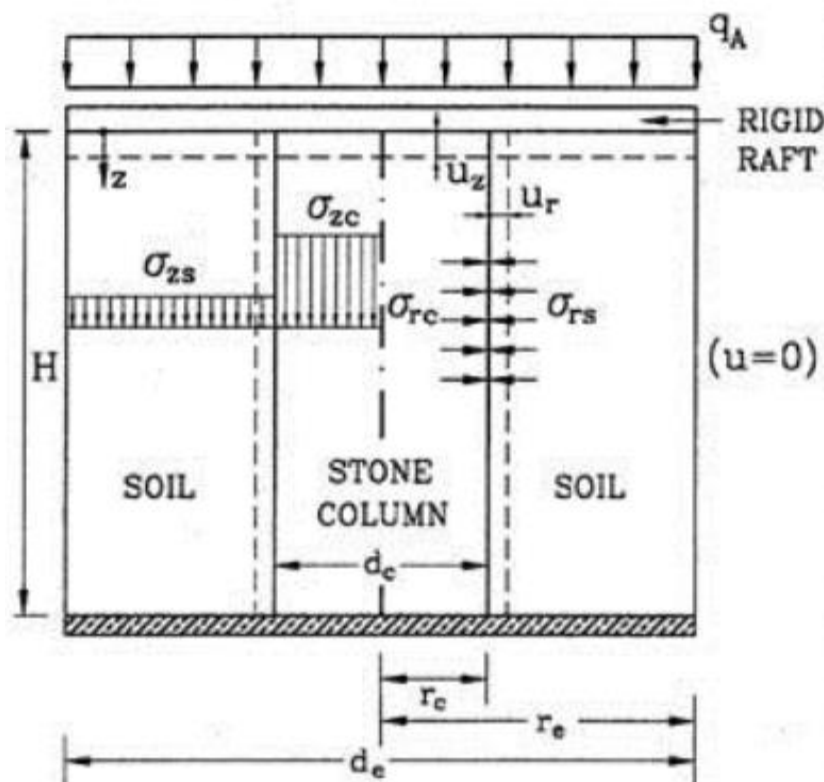


Figura 14 – Carga sobre el sistema suelo-columna (Vincent)

Siempre es necesario llevar un control del apisonamiento de las columnas de grava, ya que estas carecen de cohesión y se debe asegurar un confinamiento lateral que le proporciona el suelo circundante como se ve en la anterior figura, representando los esfuerzos que le produce la columna al suelo como σ_{zc} y la reacción del suelo

como σ_{zs} , este confinamiento lateral es indispensable ya que cuando las columnas asuman parte de la carga aplicada se van a deformar verticalmente y al mismo tiempo se van a empezar a ensanchar lateralmente y entre más pre-esforzado este el suelo debido a la compactación de las columnas de grava menores será los desplazamientos verticales y horizontales, por lo que la relación de Poisson del material granular será una variable importante a tener en cuenta.

Uno de los principales motivos de uso de este método es la reducción de costos en comparación a otros métodos, de tal manera que para garantizar la economía del proceso se deben realizar columnas de grava de una profundidad máxima de 10 metros (Valverde, 2013).

2.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL GRANULAR A SER USADO EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS FINOS.

Uno de los factores característicos a tener en cuenta es a la hora de seleccionar el material granular para elaborar las columnas de grava apisonada es el número de adecuación, el cual permite determinar en función de la granulometría del suelo si es adecuado para usarlo en el relleno, el número de adecuación (S_N) se calcula como se muestra a continuación (Das, 2011).

$$S_N = 1.7 * \sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}}$$

Donde:

D_{50}, D_{20}, D_{10} = Abertura en mm correspondiente al 50%, 20% y 10% de porcentaje pasa.

Una vez calculado este factor se puede determinar el alcance de su uso mediante la tabla 1 en donde se observa que entre más bajo sea el valor del número de adecuación es mejor el suelo para ser usado para relleno.

Tabla 1- Clasificación del material de relleno en función del número de adecuación (Das, 2011)

INTERVALO DE S_N	CLASIFICACION COMO RELLENO
0 – 10	Excelente
10 – 20	Bueno
20 – 30	Regular
30 – 50	Malo
> 50	Inadecuado

Se debe tener en cuenta que no todos los suelos son adecuados para ser apisonados mediante esta técnica de vibro-flotación, la densificación óptima dependerá de la granulometría (tamaño del grano) y de la cantidad de finos que tenga el suelo del material de relleno con el que se va a mejorar el suelo fino. De esta manera, en la figura 15 se muestra 3 zonas (Hernandez, 2009) las cuales están en función de la cantidad de finos que tenga el material y de su granulometría, por esto, se determina que los materiales de relleno que caigan dentro de la zona 2 serán los adecuados para ser compactados mediante vibro-flotación, entre más cantidad de finos tenga el suelo se requerirá una mayor cantidad de esfuerzo para alcanzar una densidad de compactación apropiada, por esto la zona 2 indica el límite inferior para la compactación adecuada. Los suelos que caigan dentro de la zona 3, implican grandes cantidades de grava, por lo que para compactarlos se requerirá que la sonda maneje una velocidad de penetración baja, esto puede convertirse a largo plazo en un procedimiento antieconómico (Das, 2011).

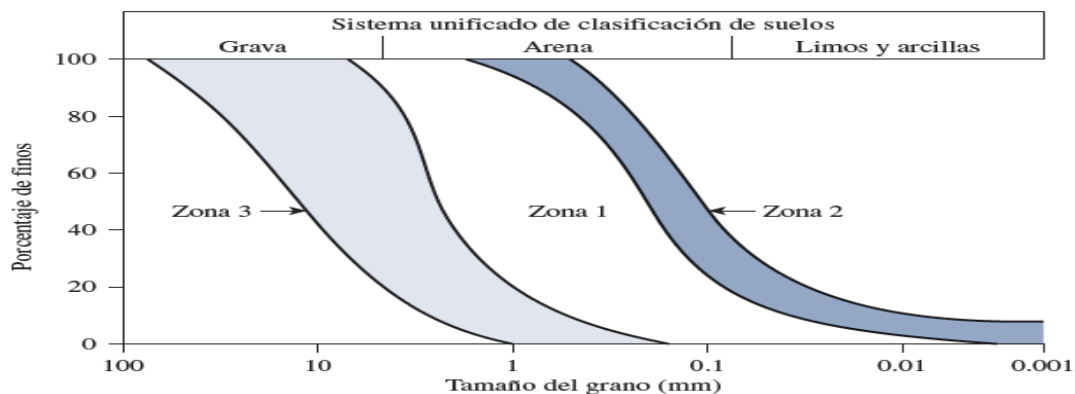


Figura 15 – Determinación de suelos en función de la granulometría y cantidad de finos para los cuales es adecuado compactarlos mediante vibro-flotación.

2.2 CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA PARA DISEÑAR COLUMNAS DE GRAVA APISONADAS.

Para el mejoramiento de suelos mediante el uso de columnas de grava compactada hay que tener en cuenta varias consideraciones, una de las más importantes es que las columnas no solo van a trabajar resistiendo las cargas axiales que aporta el proyecto, sino que también deben diseñarse para los esfuerzos laterales del suelo que se está optimizando. Para el cálculo del esfuerzo de diseño de un elemento de pilas de grava, se considera la analogía de resorte rígido y resortes flexibles. Esta analogía ayuda a comprender mejor la representación del sistema y supone a las pilas de grava como un “resorte rígido”, y al suelo blando circundante como “resortes flexibles”. Como se muestra en la siguiente figura 16

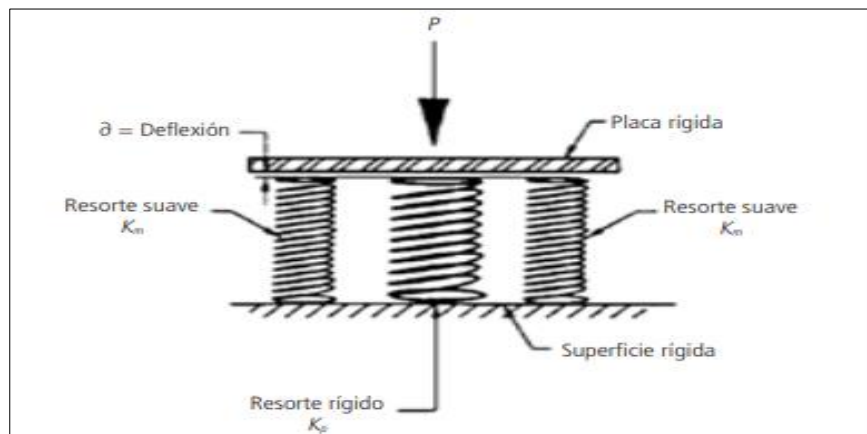


Figura 16 – Analogía de un resorte con la implementación de columnas de grava apisonada (Vera-Grunauer & De la fuente, 2018)

2.2.1 MECANISMOS DE FALLA DE LAS COLUMNAS DE GRAVA APISONADA

Cuando se construyen columnas de grava apisonadas, es posible que la punta inferior de estas descansen sobre un mejor estrato que el suelo circundante objetivo a mejorar o que queden flotantes, esto es posible por el gran aporte de confinamiento lateral por parte del suelo natural. Según la experiencia basada en ensayos de laboratorio con modelos a escala y modelaciones previas de este sistema suelo – columnas, se podrán presentar 3 fallas, la primera y más común es

que las columnas fallen por abultamiento como se ve en la figura 17, este abultamiento se genera usualmente hasta máximo una profundidad de 2 a 3 veces el diámetro de la columna.

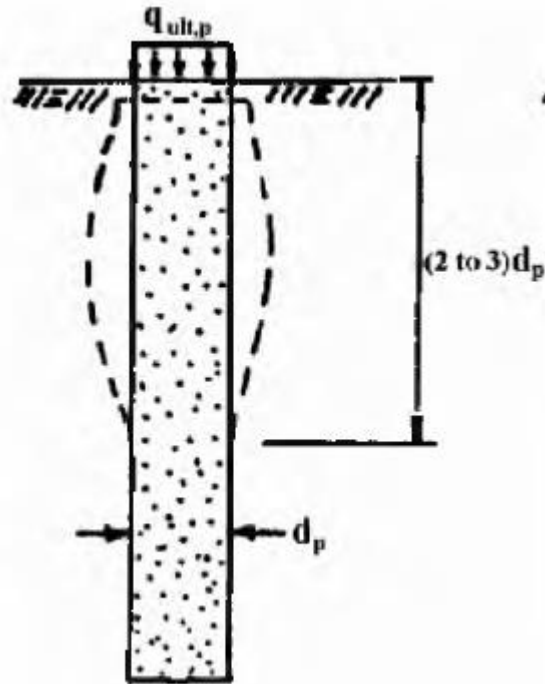


Figura 17 – Falla por abultamiento de la columna de grava apisonada (Bachus & Barksdale, 1983)

Cuando se construyen columnas las cuales tengan una profundidad menor que 2 a 3 veces el diámetro de la columna, entonces estas pueden presentar fallas debido a los esfuerzos cortantes provocados en el suelo por la aplicación de la carga, en este caso los planos de corte generados en el suelo natural también atravesarán a las columnas de grava apisonada y luego se va transmitiendo hasta la superficie a través del suelo adyacente, en este caso, esta falla se puede presentar ya sea que la punta inferior de la columna este descansando sobre otro estrato o flotantes, en la figura 18 se ilustra este tipo de falla.

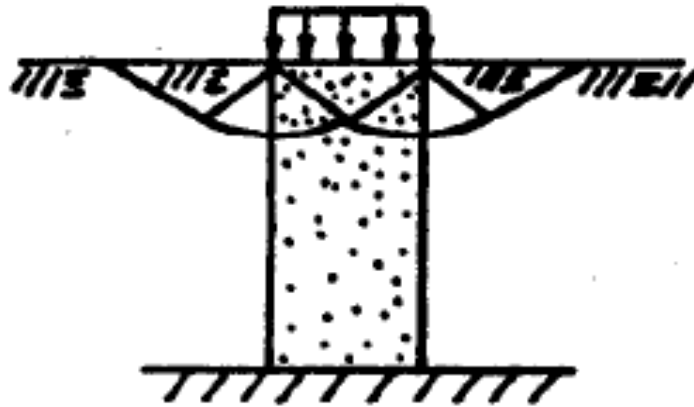


Figura 18 – Falla por esfuerzo cortante en columna corta (Bachus & Barksdale, 1983)

Por último, cuando se tienen columnas de grava apisonadas flotantes y que además sean cortas, es decir que su longitud sea menos que 2 a 3 veces el diámetro, estas pueden fallar por un esfuerzo cortante la punta inferior, se debe tener en cuenta que a lo largo de toda la longitud de esta columna de grava ($h < 2D - 3D$) en la interfaz columna-suelo circundante, se va a presentar un esfuerzo de fricción, además en la punta inferior también habrá un esfuerzo que le da un soporte por el extremo, pero cuando se le aplica una carga la cual sea mayor que los dos anteriores esfuerzos (fricción + extremo) se presenta esta falla antes de que pueda tener lugar un abultamiento, este caso se puede observar mejor en la figura 19.

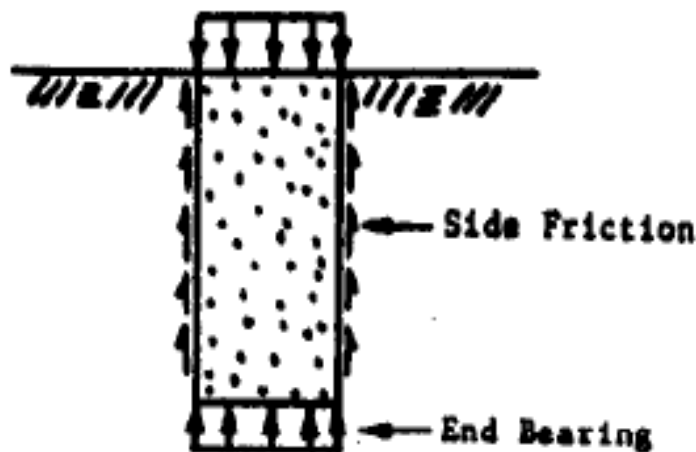


Figura 19 – Falla por cortante en el extremo inferior de la columna de grava apisonada (Bachus & Barksdale, 1983).

Una manera de calcular la carga admisible de este caso es empleando la siguiente ecuación (Bravo Decker, 2016).

$$q_{admisible} = \frac{f_s A_s + q_{tip} A_g}{F.S * A_g}$$

Donde:

f_s =Fricción unitaria promedio a lo largo de la pila

A_s = Área de la pila donde se desarrolla la fricción

A_g = Área de la sección transversal de la pila

q_{tip} = Esfuerzo resistido en la punta de la pila del agregado apisonado

F.S = Factor de seguridad.

2.3 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS, CARGAS ADMISIBLES, ÁREAS Y SEPARACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA APISONADA.

En primera instancia se definen los lineamientos o nomenclatura utilizada en el diseño de columnas de grava apisonada como se muestra a continuación.

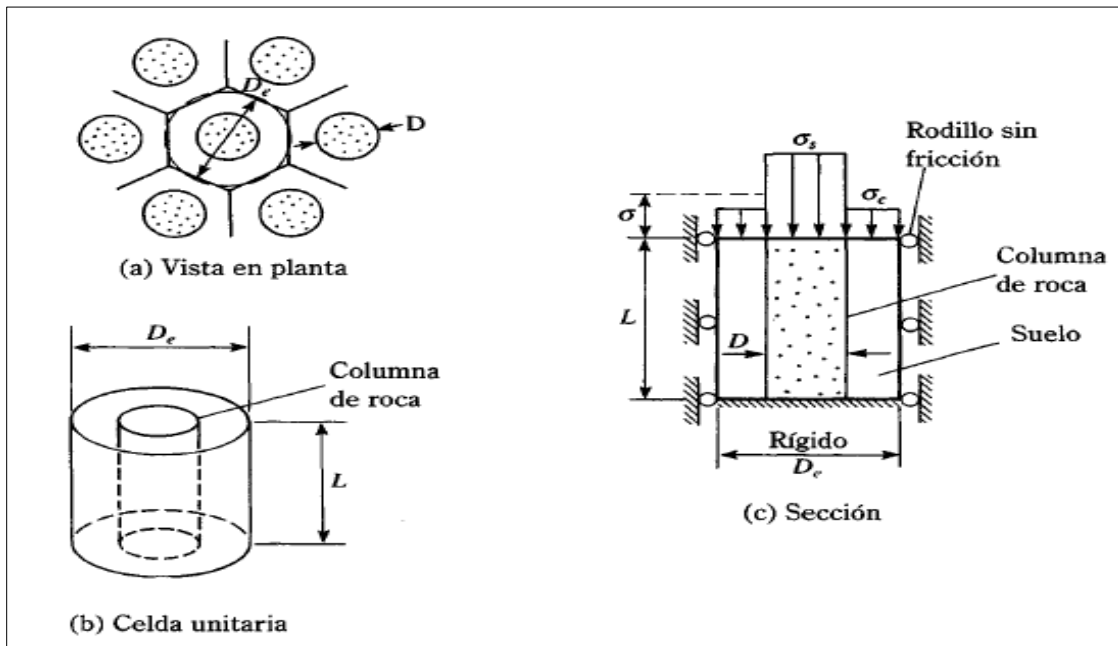


Figura 20 – Nomenclatura usual al implementar columnas de grava apisonada

2.3.1 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS

Uno de los métodos más empleados para calcular la reducción de asentamientos en el diseño de sistemas suelo-columnas es obtener resultados aproximados a partir de gráficas elaboradas en base a experimentación (Bachus & Barksdale, 1983), para poder hacer estas aproximaciones, en primera instancia es necesario identificar el tipo de patrón de celdas unitarias que se tiene, lo más común es emplear 3 casos donde se contenga una distribución de celdas con una geometría de malla triangular equilátera o de malla cuadrada o de malla hexagonal equilátera y de esta manera poder calcular el diámetro equivalente. En la figura 21 se puede apreciar los patrones geométricos mencionados con su respectivo diámetro equivalente.

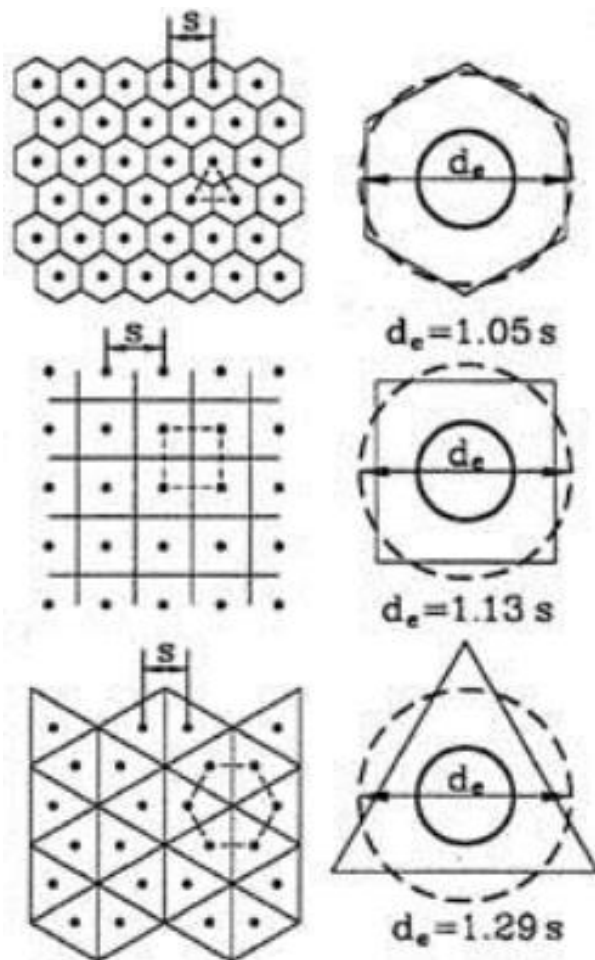


Figura 21 – Patrones geométricos de celdas unitarias según su distribución (Pollán, 2014)

Con base en lo anterior se tendrá que:

$$d_e = 1.05s \rightarrow \text{Malla triangular equilatera}$$

$$d_e = 1.13s \rightarrow \text{Malla triangular cuadrada}$$

$$d_e = 1.29s \rightarrow \text{Malla hexagonal equilatera}$$

Ahora con base en lo anterior se define la razón de sustitución o relación de área de reemplazo de columnas a_r como:

$$a_r = \frac{A_c}{A} = \left(\frac{d_c}{d_e}\right)^2$$

Donde:

A_c = Area de la sección transversal de la columna

A = Area de la celda unitaria de la columna

d_c = Diametro de la sección transversal de la columna

d_e = Diametro equivalente

Según diferentes patrones probados en laboratorio, se ha establecido que las configuraciones con celdas unitarias triangulares equiláteras proporcionan mayor razón de sustitución que al final se interpreta como una mayor área de suelo fino reemplazado por las columnas de grava como se puede analizar en la figura 22

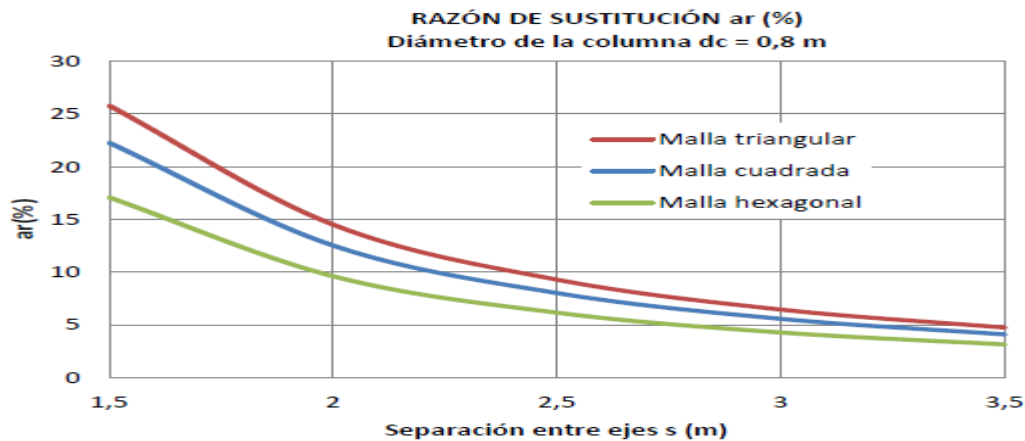


Figura 22 – Razón de sustitución en función del tipo de celda unitaria (Pollán, 2014)

En este punto es importante definir una variable n conocida como factor de concentración de esfuerzos (SCF), el cual es la relación entre los esfuerzos sobre la columna y los que se presentan sobre el suelo circundante como se define a continuación:

$$n = SCF = \frac{\sigma_c}{\sigma_s}$$

Donde:

$\sigma_c =$ Esfuerzos en la columna

$\sigma_s =$ Esfuerzos en el suelo circundante

A continuación, se presenta la figura 23 donde se muestran los esfuerzos sobre las columnas (σ_c) y sobre el suelo (σ_s), además con base en la cual se calcula una la ecuación de equilibrio ($\sum F_y = 0$) del sistema para una celda unitaria.

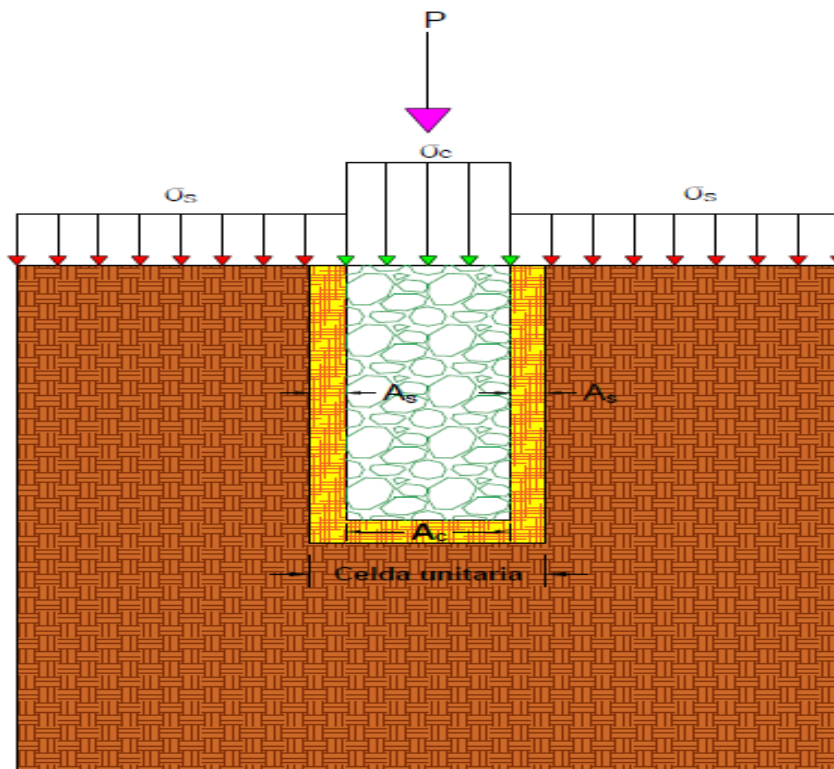


Figura 23 – Modelo base con el cual se calcula la ecuación de equilibrio del sistema (Elaboración propia)

Con base en la anterior figura se tiene que la ecuación de equilibrio es:

$$P - P_1 - P_2 = 0$$

$$P_1 = \sigma_{columna} * A_{columna} = \sigma_c * A_c$$

$$P_2 = \sigma_{suelo} * A_{suelo} = \sigma_s * A_s$$

Pero se tiene que:

$$\frac{A_{columna} + A_{suelo}}{A_{celda}} = \frac{A_c + A_s}{A} = 1 \quad ; \quad \frac{A_c}{A} + \frac{A_s}{A} = 1$$

$$a_r + \frac{A_s}{A} = 1 \quad ; \quad a_r + a_s = 1 \quad ; \quad a_s = 1 - a_r$$

Donde $a_s = \frac{A_s}{A}$ es la relación del área de remplazo del suelo, por lo anterior se tiene que:

$$P_1 = \sigma_c a_r \quad ; \quad P_2 = \sigma_s (1 - a_r)$$

Finalmente, la ecuación de equilibrio queda como:

$$P - \sigma_c a_r - \sigma_s (1 - a_r) = 0 \quad ; \quad P = \sigma_c a_r + \sigma_s (1 - a_r)$$

Donde P es la carga exterior aplicada como se observa en la figura 23.

Ahora con base en la anterior ecuación de equilibrio calculada y la relación $n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s}$ luego de una serie de reemplazos se obtienen las siguientes ecuaciones de interés.

$$\sigma_s = \frac{P}{1 + (n - 1) * a_r} = \mu_s P$$

$$\sigma_c = \frac{nP}{1 + (n - 1) * a_r} = \mu_c P$$

Donde:

μ_s = Factor que representa la distribución de carga en el suelo

μ_c = Factor que representa la distribución de carga en la columna

En las figuras 24 y 25 se muestra como varía el comportamiento de los factores de carga μ_s y μ_c en función de la razón de sustitución a_r .

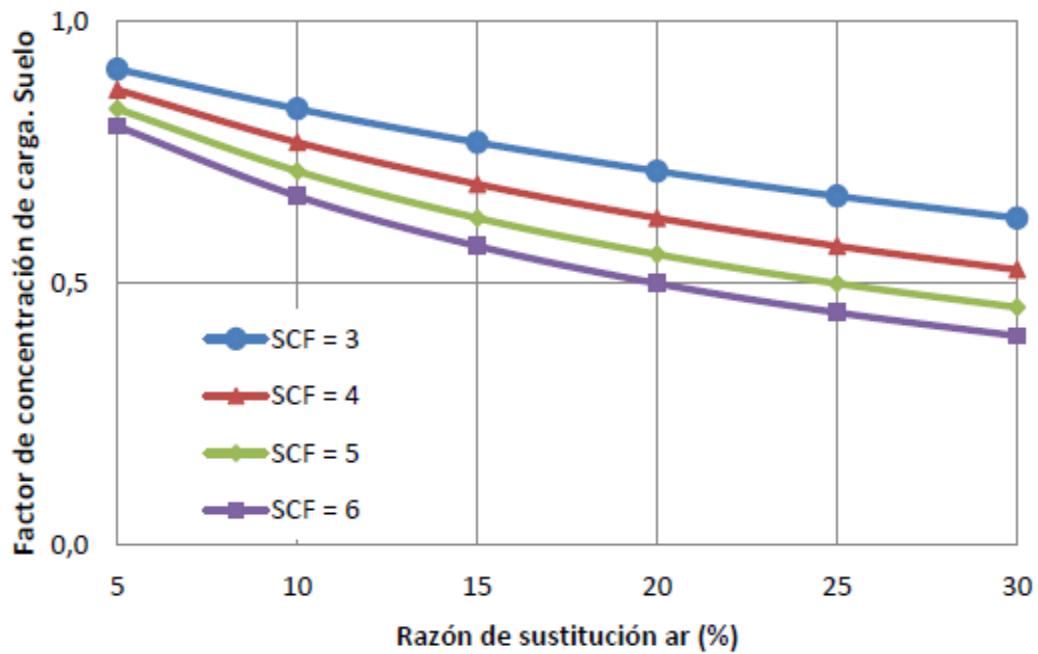


Figura 24 – Variación del Factor de concentración de carga en el suelo μ_s en función de la razón de sustitución a_r (Pollán, 2014)

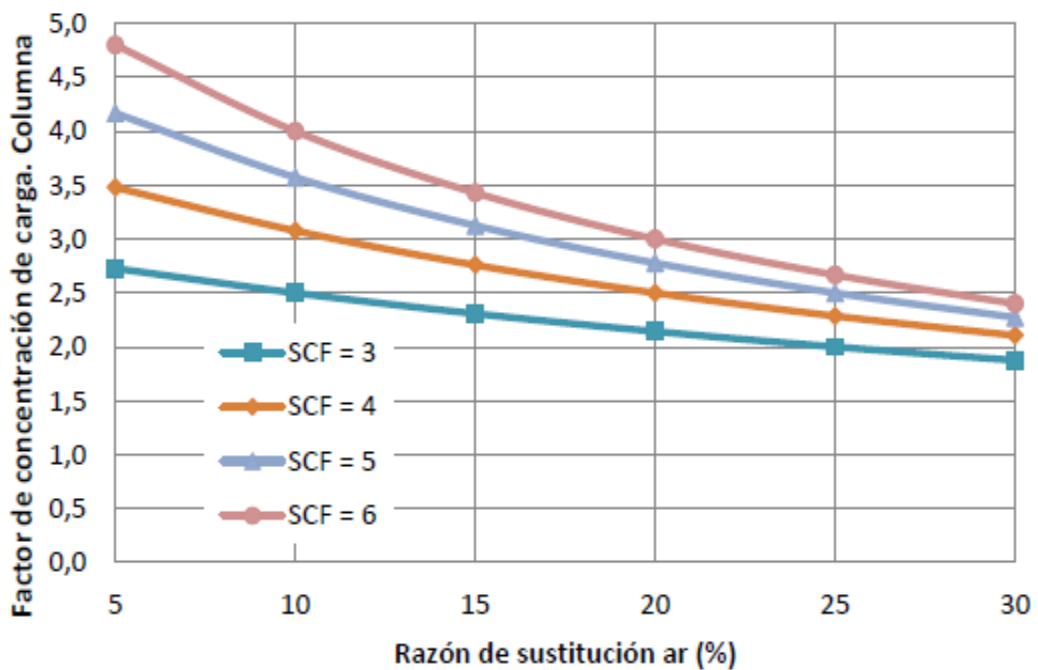


Figura 25 - Variación del Factor de concentración de carga en la columna μ_c en función de la razón de sustitución a_r (Pollán, 2014)

Al analizar las anteriores dos figuras (24 y 25), se puede observar cómo los valores del factor de concentración en el suelo son menores que los de los factores de concentración en las columnas de grava, esto era de esperarse ya que como se mencionó previamente, las columnas al tener un mayor módulo de elasticidad, tendrán mayor rigidez y por tanta asumirán la mayor parte de la carga.

Se debe tener en cuenta que las anteriores deducciones se utilizan únicamente cuando se tiene una columna bajo carga, pero la diferencia de cálculos no es muy significativa, ya que si se tiene un grupo de columnas de grava apisonadas sometidas a una carga que es transmitida por una zapata, no se emplea el concepto de celda unidad, sin embargo la razón de sustitución a_r que es una variable de interés para el diseño teórico se calcula como sigue (Pollán, 2014):

$$a_r = \frac{\sum A_c}{A_z}$$

Donde:

$\sum A_c$ = *Suma del area transversal de las columnas bajo la zapata*

A_z = *Area de contacto entre la zapata y el suelo*

Una vez se determine la razón de sustitución a_r y conociendo el factor de concentración de esfuerzos (SFC=n), es posible a partir de la figura 26 poder estimar la relación de asentamiento o el factor de mejora, según lo que se desee, a partir de cualquiera de esas dos relaciones (relación de asentamiento o factor de mejora) y conociendo en asentamiento del suelo sin ser tratado con columnas de grava apisonadas, es posible determinar el máximo valor del asentamiento del sistema suelo-columnas que se puede esperar al implementar la correspondiente razón de sustitución.

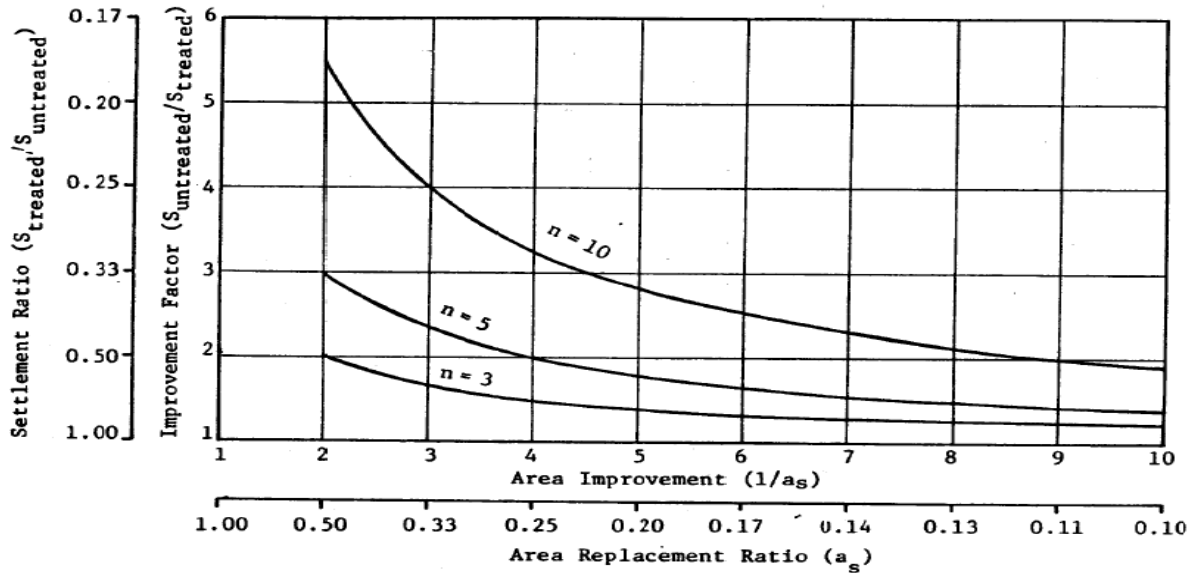


Figura 26 – Gráfica con la cual es posible calcular el asentamiento del sistema suelo-columnas conocidos a_r , n y el asentamiento del suelo sin mejorar (Bachus & Barksdale, 1983).

Las anteriores curvas se basan en la siguiente expresión matemática.

$$\frac{S_{tratado}}{S_{sin\ tratar}} = \frac{1}{1 + ((n - 1) * a_r)} = \mu_s$$

Donde:

$S_{tratado}$ = Asentamiento del suelo tratado con columnas de grava

$S_{sin\ tratar}$ = Asentamiento del suelo sin tratar

n = Factor de concentracion de esfuerzos (SCF)

a_r = Relacion de sustitucion

μ_s = Relacion de esfuerzos en el suelo

Si se cuenta con el valor de la cohesión no drenada del suelo natural, una forma alternativa de calcular el valor del asentamiento de manera análoga a la mencionada anteriormente es haciendo uso de la figura 27b la cual se muestra a continuación.

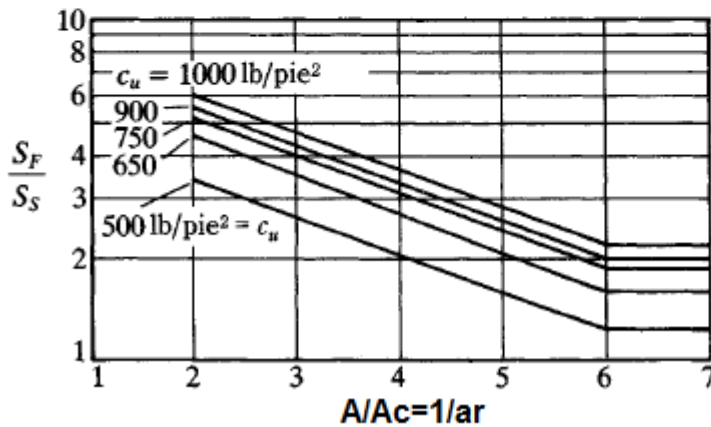
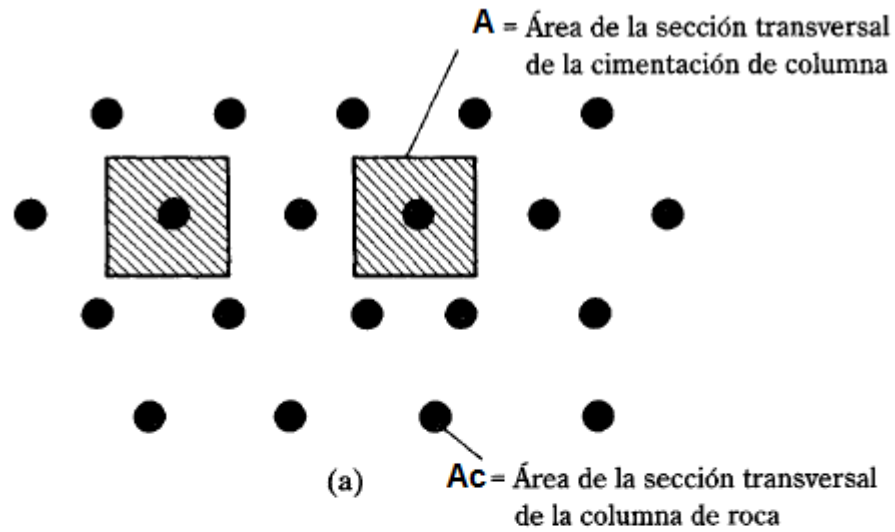


Figura 27 – (a) Nomenclatura usada para el cálculo de la razón de a_r , (b) – Gráfica con la cual es posible calcular el asentamiento del sistema suelo-columnas conocidos a_r , c_u y el asentamiento del suelo sin mejorar (Bachus & Barksdale, 1983).

Ahora se establecen la serie de pasos a seguir para calcular el valor del asentamiento del sistema suelo-columnas para tener una mayor claridad del uso de las gráficas.

- Determine el área de sección transversal A_c de la columna de roca.
- Determine el área de la celda unitaria A de la columna.
- Calcule la relación A/A_c

- d) Estime la resistencia cortante no drenada C_u del suelo a mejorar y el asentamiento probable S_f debido a la cimentación en el suelo sin mejorar
- e) Con los valores de A/A_c y C_u determine la relación S_f/S_s (S_s = asentamiento probable de la cimentación construida sobre columnas de roca) con ayuda de la parte (b) de la figura 27.
- f) Con los valores ya conocidos anteriormente se calcula el valor de S_s el cual indica el valor aproximado del máximo asentamiento que se puede esperar del suelo tratado con columnas de grava apisonada.

De manera análoga a las dos anteriores, se puede determinar el asentamiento del suelo tratado en función del ángulo de fricción de las columnas de grava apisonadas (Vincent) y conocido el valor del asentamiento del suelo sin implementar las columnas de grava con la ayuda de la figura 28.

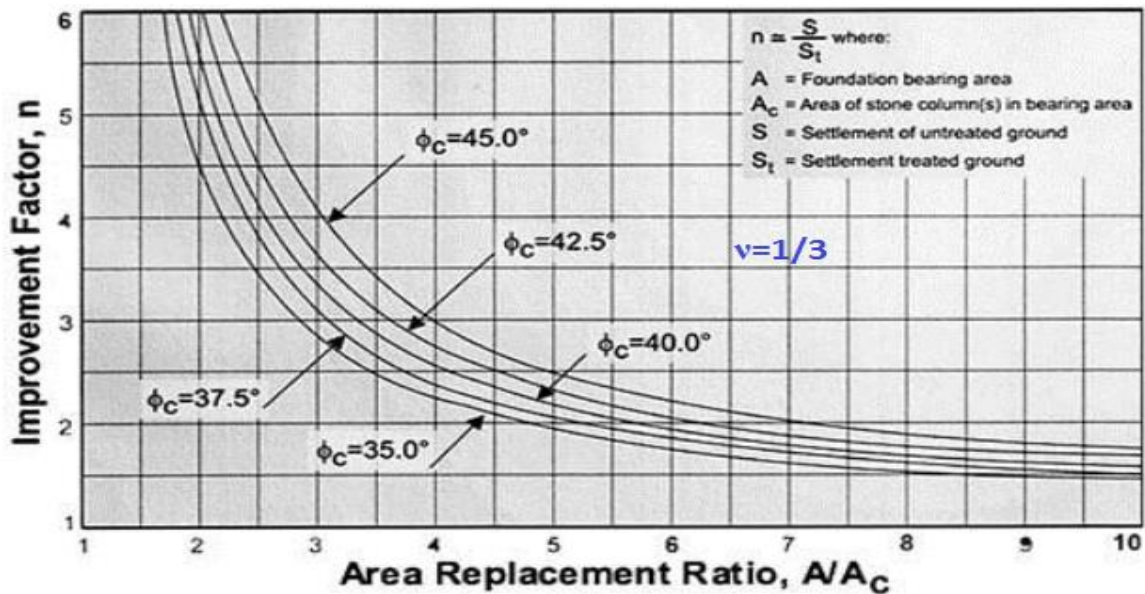


Figura 28 – Calculo del asentamiento del suelo tratado con columnas de grava en función del ángulo de fricción de las columnas de grava y conocido a_r y el asentamiento del suelo sin tratar y (Bachus & Barksdale, 1983)

Es importante tener en cuenta, que la figura 28 es útil cuando se tiene o se supone en coeficiente de Poisson $\nu = 1/3$

Se denomina factor de mejora (n) a la relación entre el asentamiento del suelo sin tratar y el asentamiento de suelo tratado.

$$n = \frac{S}{S_t}$$

Donde:

$S = S_F$ = Asentamiento aproximado del suelo sin tratar.

$S_t = S_s$ = Asentamiento aproximado del suelo tratado.

A: área total dentro de la celda unitaria

Si se tiene un patrón de triángulo equilátero en las celdas que forman las columnas de grava apisonada (Castro, 2017) cómo se observa en la figura 29, el cálculo de asentamiento varia como se muestra a continuación.

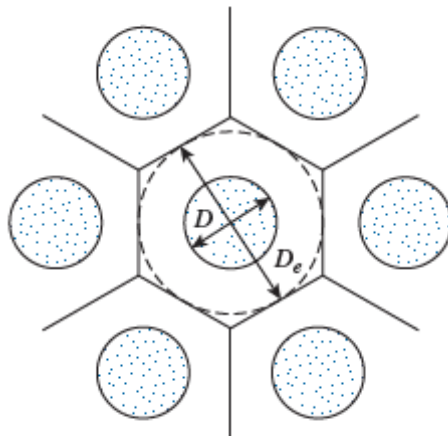


Figura 29 – Columnas de grava apisonada en un patrón de triángulo equilátero

Si se tiene este caso de celda triangular, entonces la relación entre las áreas de la columna de grava apisonada y el área de la celda será:

$$a_r = \frac{A_c}{A}$$

$$a_r = 0.907 \left(\frac{D}{S} \right)^2$$

Donde

D: diámetro de las columnas de roca

S: separación entre las columnas de roca

2.3.2) CARGAS ADMISIBLES DE COLUMNAS DE GRAVAS APISONADAS

Las columnas de grava pueden fallar en determinado momento al someter el sistema suelo-columnas a una carga en su parte superior, en caso de que la carga aplicada al sistema sea mayor que la carga admisible, lo más probable es que este falle por abultamiento como se muestra en la figura 30, este ensanchamiento como se mencionó previamente se puede presentar en una profundidad de 2 a 3 veces el diámetro aunque con base en varios experimentos más recientes se determinó que la mayoría de veces esto ocurrirá dentro de una longitud entre $2.5 D$ a $3 D$ (Das, 2011), siendo D el diámetro de la columna de grava como se muestra a continuación.

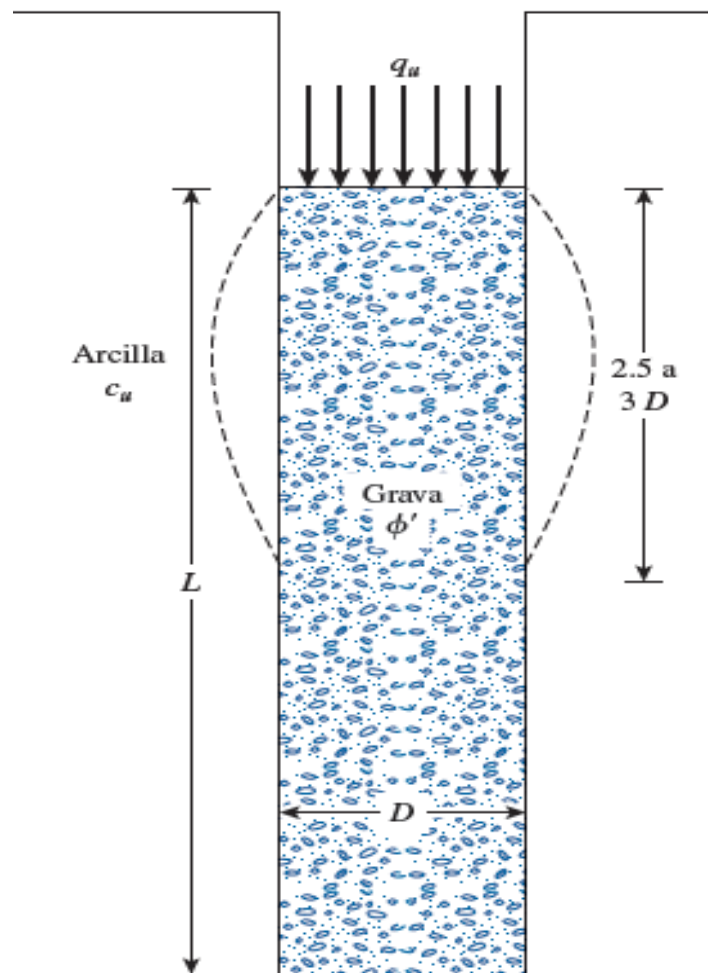


Figura 30 – Abultamiento en columna de grava apisonada (Das, 2011)

Según (Hugues & Withers, 1974), los esfuerzos verticales no logran propagarse mucho más allá de una profundidad igual a 2 veces el diámetro por lo que los esfuerzos en la arena adyacente a la punta inferior de la columna seguro no harán que falle el suelo natural por punzonamiento, esta deducción se basó en los experimentos que permitieron obtener las curvas mostradas en la figura 31.

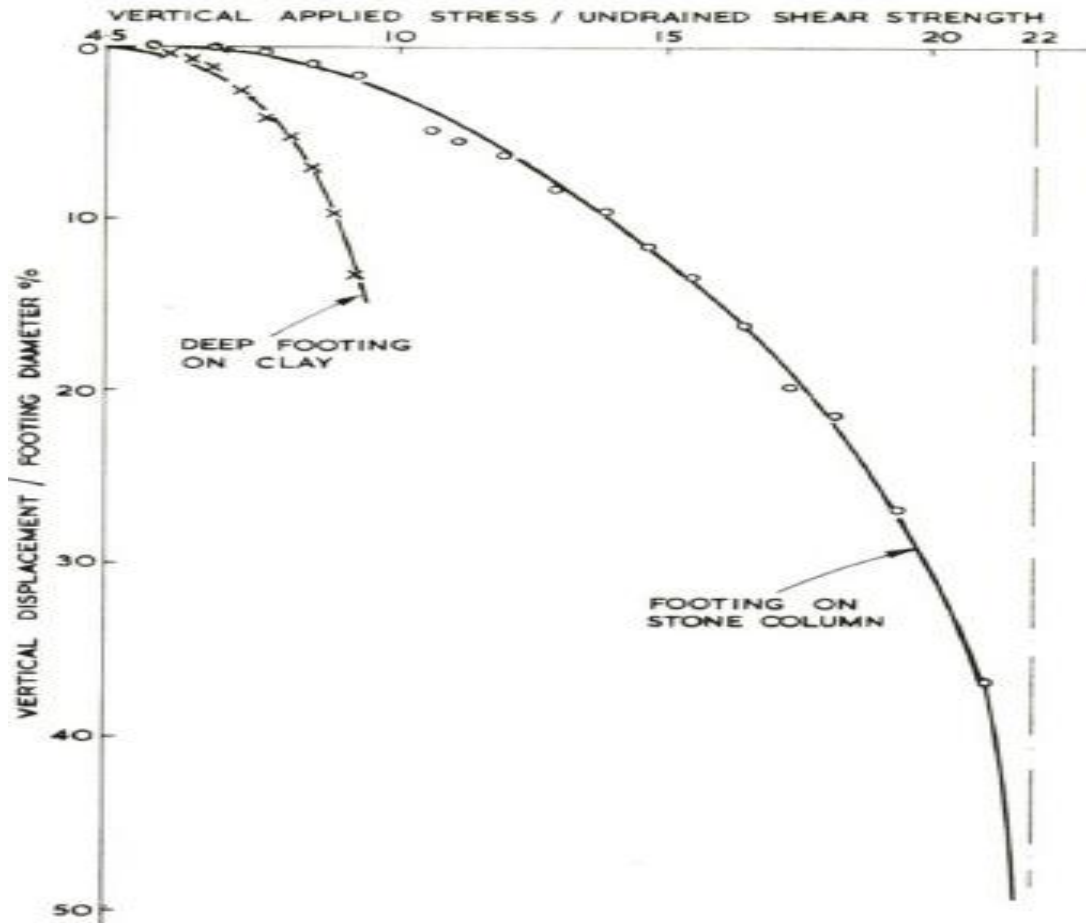


Figura 31 – Propagación de las cargas verticales en función de la profundidad (Hugues & Withers, 1974).

De tal manera que los esfuerzos que llegaran a la parte inferior de la columna serán pequeños, por lo tanto, la primera falla que se presentara en la columna al someterla a cargas mayores que las admisibles será al ensancharse la columna, de tal manera que el esfuerzo de confinamiento lateral σ_3 es tomado como la resistencia ultima (q_{ultima}) pasiva, pero como se busca dejar la carga ultima en términos de esfuerzos verticales y no laterales se tiene que:

$$K_p = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \quad ; \quad \sigma_1 = K_p * \sigma_3$$

Donde:

K_p = Coeficiente de presión de tierras pasivo

σ_1 = Esfuerzo vertical último del suelo adyacente al extremo de la columna

σ_3 = Esfuerzo horizontal último del suelo

Para poder obtener una deducción matemática del esfuerzo vertical que resistirá la columna, (Hugues & Withers, 1974) realizaron pruebas a escala midiendo valores de interés con la ayuda de radiogramas, como se pueden observar en la figura 32

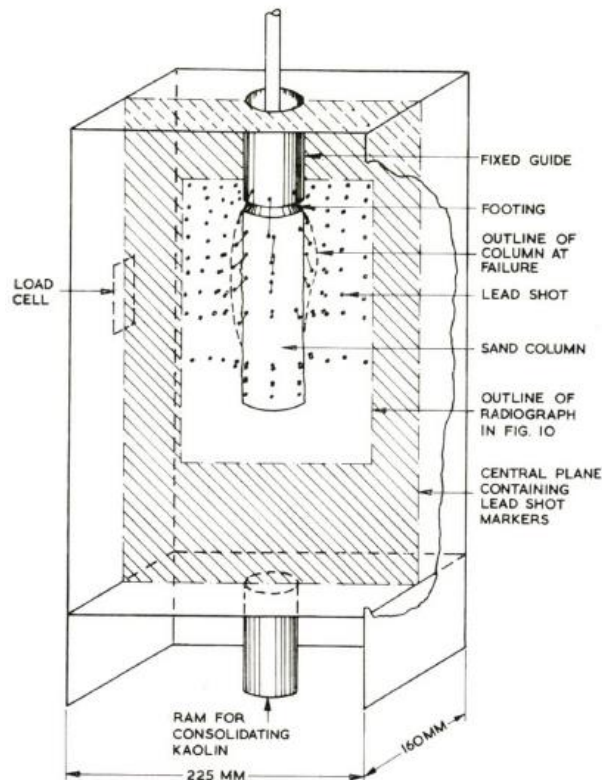


Figura 32 – Esquemático de prueba de carga de una columna de arena a escala (Hugues & Withers, 1974)

En estos experimentos se determinó el esfuerzo lateral de confinamiento último aportado por el suelo natural σ_3 con ayuda de la prueba del presurímetro, los autores consideraron en su aproximación elasto-plástica que se tenía una columna sin fricción con el suelo adyacente y que tenía longitud infinita de forma cilíndrica, con

lo anterior obtuvieron la siguiente expresión matemática para el cálculo de este esfuerzo σ_3 en condiciones no drenadas.

$$\sigma_3 = \sigma_{ro} + c \left(1 + \ln \frac{E_{suelo}}{2c(1 + \nu)} \right)$$

Donde:

σ_{ro} = Esfuerzo lateral inicial in-situ

c = Cohesion no drenada del suelo natural

E_{suelo} = Modulo de elasticidad del suelo natural

ν = Relacion de Poisson del suelo natural

Con el resultado anterior y con ayuda de la relación $\sigma_1 = K_p * \sigma_3$ se tiene que:

$$\sigma_1 = q_{admissible} = \frac{K_p * \left(\sigma_{ro} + c \left(1 + \ln \frac{E_{suelo}}{2c(1 + \nu)} \right) \right)}{F.S.}$$

Además, se sabe que:

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

Reemplazando algunas relaciones matemáticas y simplificando se tiene que la capacidad de carga de la pila de agregado o carga admisible antes de que falle se puede calcular mediante:

$$q_{admissible} = \frac{\tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)}{FS} (4c_u + \sigma'_r)$$

Donde

FS: Factor de seguridad (≈ 1.5 a 2)

C_u : resistencia cortante no drenada de la arcilla

σ'_r : esfuerzo radial efectivo medido por un presurimetro ($\approx 2 C_u$)

φ : Angulo de fricción del material de la columna de grava apisonada

$$q_{admisible} = \frac{\tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)}{FS} * (6c_u)$$

Si se requiere suponer que la columna de grava apisonada soporta toda la carga de la cimentación, entonces su carga admisible será:

$$q_{admisible} = \frac{\pi}{4} * D^2 \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) * (4C_u + \sigma'_r)$$

Las columnas de grava trabajan más efectivamente cuando se usan para estabilizar una gran área donde la resistencia cortante no drenada del subsuelo varía entre 10 -15 kN/m² que cuando se usan para mejorar la capacidad de carga de cimentaciones estructurales (Braja, 2001).

2.3.3 CARGA ADMISIBLE DE UN GRUPO DE COLUMNAS DE GRAVA APISONADA.

Para realizar la estimación de la capacidad de carga de un grupo de columnas, se supone que se tiene ya sea un grupo de columnas cuadradas o con un número infinito de estas a lo largo, además se consideró una zapata de concreto la cual es cargada rápidamente en donde la resistencia al cortante sin drenar se desarrolla en el suelo para el cual se presume un ángulo de fricción nulo como también la cohesión en las columnas de grava, bajo estas consideraciones, se tendrá bajo el suelo de la cimentación una falla de ruptura recta, la cual forma un bloque triangular (vista en perfil) como se observa en la figura 33 con sus respectivas vistas en planta (Bachus & Barksdale, 1983).

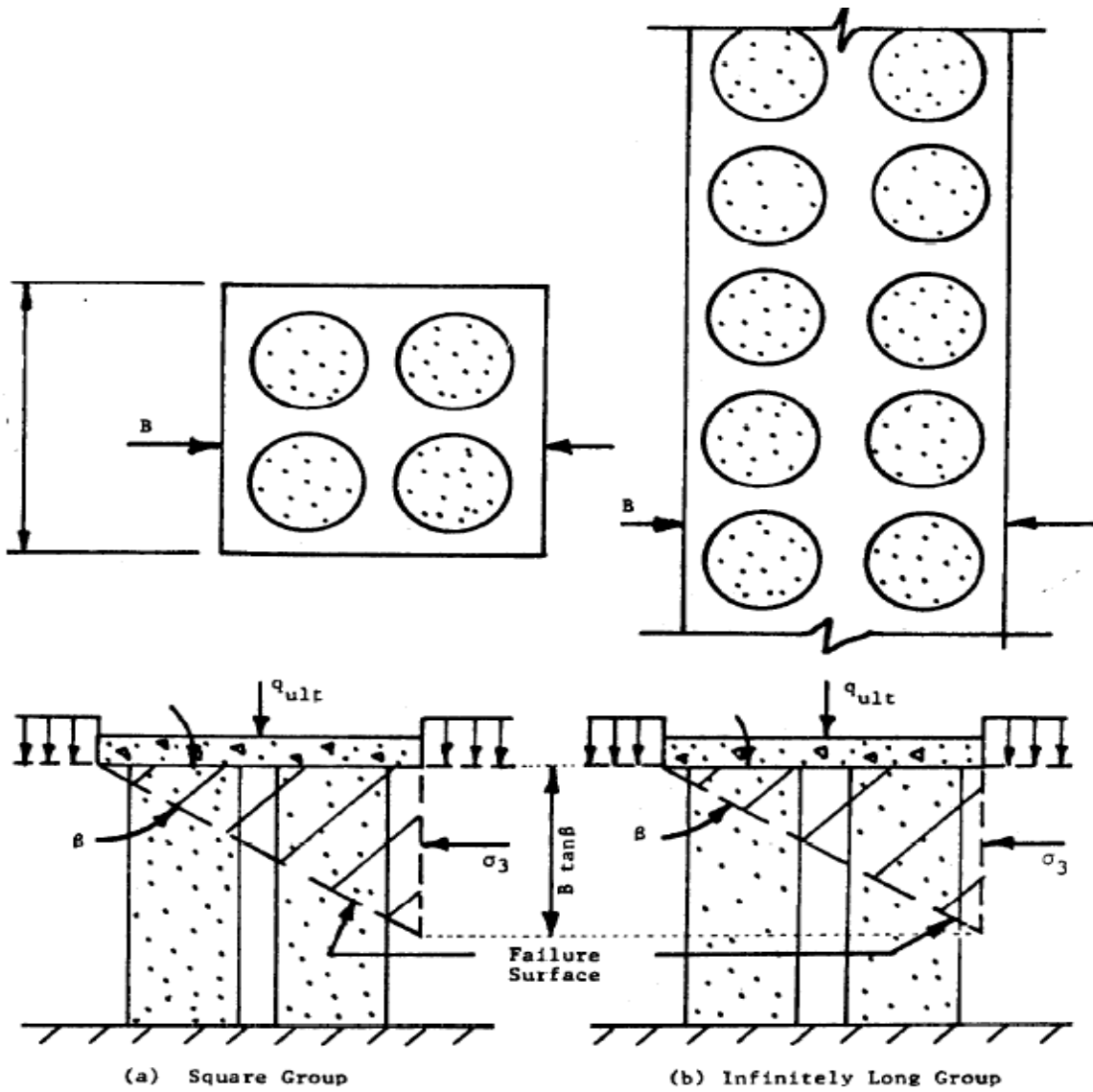


Figura 33 – Falla de bloque triangular en grupo cuadrado de columnas (a) y un grupo de longitud infinita (b).

Como se muestra en la anterior figura, la falla del bloque triangular dependerá de la resistencia promedio al esfuerzo cortante del sistema suelo-columnas, además de la resistencia lateral σ_3 o confinamiento lateral del suelo circundante a las columnas de grava y también de la resistencia promedio del sistema suelo-columnas del esfuerzo cortante a lo largo de la superficie de corte inclinada. Si se considera el

equilibrio un estado de equilibrio del bloque de falla, se deducen los siguientes parámetros de resistencia al corte.

$$\tan \phi_{avg} = \mu_c a_r \tan \phi_c$$

Donde:

ϕ_{avg} = Angulo de fricción interna promedio de la celda unitaria compuesta por suelo + columna de grava

μ_c = Factor que representa la distribución de carga en la columna

$a_r = \frac{A_c}{A}$ = Relación de área de reemplazo de las columnas de roca

ϕ_c = Angulo de fricción interna de las columnas de roca

La cohesión (c_{avg}) de la celda unidad compuesta por suelo y columna de grava, a partir también una condición de equilibrio será:

$$c_{avg} = c(1 - a_r)$$

Donde:

c = Cohesión del suelo nativo.

Se define también el ángulo como el ángulo β al cual va a fallar el sistema de la celda unitaria compuesto parte por suelo y parte por columna de grava

$$\beta = 45 + \frac{\phi_{avg}}{2}$$

El esfuerzo lateral σ_3 también se puede definir en función de la geometría del bloque de falla como sigue:

$$\sigma_3 = \frac{\gamma * B * \tan \beta}{2} + 2c$$

Teniendo en cuenta las anteriores variables definidas y con la ayuda de algunas formulaciones de la teoría de expansión de cavidades de Vesic (Das, 2011), se tiene que la capacidad de carga de un grupo de columnas de grava bajo una carga de una cimentación será:

$$q_{ult} = \sigma_3 \tan^2 \beta + 2c_{avg} \tan \beta$$

Reemplazando el valor de σ_3 se tiene finalmente que:

$$q_{ult} = \left(\frac{\gamma * B * \tan \beta}{2} + 2c \right) \tan^2 \beta + (2c_{avg} \tan \beta)$$

Se debe tener en cuenta que para obtener la anterior ecuación se supuso que el ángulo de fricción del suelo natural era nulo igual que la cohesión de las columnas de grava, además esta ecuación se utiliza en un rango de cohesión no drenada del suelo nativo mayores de 30 Kpa.

2.3 MEJORAMIENTO DE SUELOS POTENCIALMENTE LICUABLES CON COLUMNAS DE GRAVA

Este proceso se basa en optimizar los esfuerzos cortantes mediante el aumento de resistencia en el suelo matriz, en general se hace en base a los siguientes principios:

- Reducir la presión de poros en las pilas, ya que crea un efecto similar a un filtro que mantiene el soporte lateral necesario para la capacidad de carga de las pilas y que impide un mayor grado de infiltración del terreno en las pilas.
- Los elementos de pilas compactadas producen una densificación de la matriz de suelo.

- Transferencia del esfuerzo cortante cíclico hacia las inclusiones rígidas y aumento del esfuerzo confinante del suelo.

El cálculo de la licuación de suelo está dado por la siguiente expresión

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

Dónde:

FS: potencial de licuación del suelo

CRR: tasa de resistencia al esfuerzo cortante cíclico producto del sismo

CSR: demanda de esfuerzo cortante cíclico

Con el uso de las PGC la licuación del suelo se calcula con

$$FS_{MEJORADO} = \frac{K_m CCR}{K_s CSR}$$

K_m representa el aumento en la densificación del suelo y K_g reducción del esfuerzo cortante. (SMG, 2018)

2.4.4) MODELOS DE CARGA DISTRIBUIDA EN LA PARTE SUPERIOR DE LAS COLUMNAS DE GRAVA APISONADA.

Cuando se aplica un esfuerzo uniforme al sistema para inducir consolidación se presentan concentración de esfuerzos. El factor n, concentración de esfuerzos es

$$n' = \frac{\sigma'_s}{\sigma'_c}$$

Donde

σ_s : esfuerzo en la columna de grava

σ_c : esfuerzo en el suelo de la subrasante

las relaciones para σ'_s y σ'_c son respectivamente:

$$\sigma'_s = \sigma \left[\frac{n'}{1 + (n' - 1)a_s} \right] = \mu_s \sigma$$

$$\sigma'_c = \sigma \left[\frac{1}{1 + (n' - 1)a_s} \right] = \mu_c \sigma$$

Donde

σ : esfuerzo vertical promedio

μ_s y μ_c factores de concentración de esfuerzo

En la figura 34, se especifica mejora los valores calculados anteriormente.

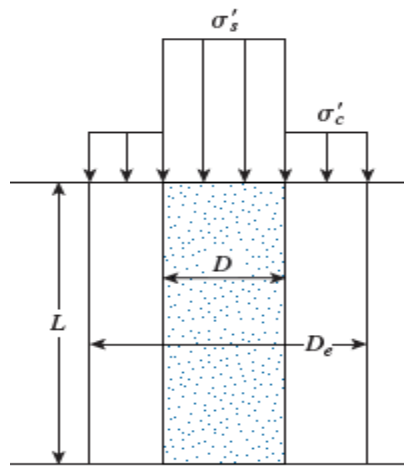


Figura 34 – Concentración de esfuerzos debido al cambio de rigidez

METODOLOGÍA

Como se planteó previamente, lo que se pretende realizar es realizar diferentes modelaciones de sistemas suelo-columnas en 2D y en 3D en el software basado en elementos finitos ABAQUS (versión estudiantil), de esta manera poder comparar los resultados obtenidos bidimensionalmente y tridimensionalmente y además compararlo con el diseño teórico a partir de los fundamentos establecidos en el marco teórico

3.1 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS PARA LA INVESTIGACIÓN.

La idea es poder simular la respuesta de los sistemas suelo-columnas utilizando propiedades de materiales de la región del Cauca, de esta manera se van a tomar valores típicos de los posibles suelos que se pueden encontrar, en primera instancia basados en la experiencia, pero es importante destacar que se va a hacer un énfasis en los suelos de la ciudad de Popayán, por eso, teniendo en cuenta lo establecido de acuerdo a (Guerrero & Cruz, 2018) en su libro de “Clasificación de suelos finos de Popayán”, se determinó que en esta región de interés se puede encontrar suelos con un módulo de elasticidad en un rango entre 12.5 MPa a 100 MPa y una relación promedio de Poisson $\nu_{suelo} = 0.35$ de , en cuanto a la grava que se va a emplear para la elaboración de las columnas, se fijaron unos valores promedio de $E_{grava} = 200 MPa$ y $\nu_{grava} = 0.4$. En el caso de las densidades tomadas, también se asumieron valores promedio de la región.

Se debe destacar que la parte fundamental al momento de emplear los resultados de las modelaciones en la realidad, es conocer la relación que existe entre el módulo de elasticidad del suelo a mejorar y la grava con las que se construirán las columnas, de esta manera, el análisis no solo se limita para los módulos de Young de suelo nativo y grava fijados mencionados anteriormente, sino que también se podrá

emplear en relaciones diferentes. En caso que se requiera un análisis para la región que implique una relación de módulos diferente, a las presentadas en el presente trabajo, será posible realizar una interpolación o extrapolación según lo amerite la ocasión, en el caso que ninguno de estas herramientas sea viable, se podrá tomar los modelos elaborados en el software basado en elementos finitos y únicamente cambiar los valores de las propiedades que se requieran para un caso en específico y así conocer la reacción del sistema, de igual manera, la tendencia de las respuestas de las simulaciones, se conservará.

3.2 METODOLOGÍA MODELACIÓN EN 2D

Como primera aproximación, se decidió modelar la situación a estudiar en dos dimensiones (2D), en primera instancia con el fin de irse familiarizando con el software y además comparar los resultados bidimensionales y tridimensionales para analizar qué tantas variaciones se presentaba, por eso se eligió realizar en total 148 simulaciones, en las cuales se cambiaron diferentes variables como el espesor de las columnas de grava, la separación centro a centro entre columnas, la profundidad de las columnas y las propiedades de los elementos que componían el modelo que eran las columnas de grava apisonada, el suelo natural, y una zapata de concreto con una carga puntual en la parte superior de esta. Cabe destacar que para estas simulaciones se utilizara un modelo constitutivo elástico lineal, de tal manera que las propiedades de los materiales a variar serán el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y su densidad.

Como ya se mencionó, al momento de elaborar el modelo bidimensional, se crearon 4 partes, la primera parte fue el suelo, este tendrá unas medidas de 10 m x 10 m el cual tiene características de suelo fino, la segunda fue una zapata aislada en concreto y por ultimo las dos columnas las cuales tienen una forma cilíndrica con un diámetro y una profundidad variable, en la figura 35 se pueden detallar mejor como quedaron elaboradas las partes.

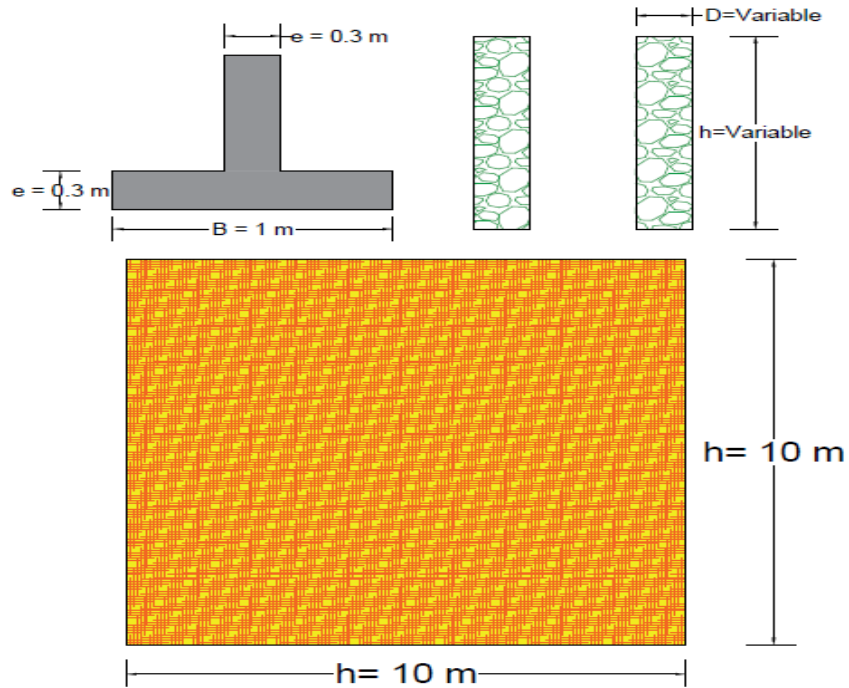


Figura 35 – Partes utilizadas en ABAQUS para el análisis en 2D

Se definió una zapata con un ancho $B=1\text{m}$ con el fin de poder normalizar los cálculos, es decir expresar el diámetro de las columnas y la profundidad como un porcentaje de la dimensión de B y de esta manera cuantificar el análisis con base a una dimensión de referencia.

Del total de 148 simulaciones a realizar, en 76 se va a variar el diámetro de las columnas cilíndricas, 38 simulaciones serán con un diámetro $D=0.2\text{ m}$ y 38 con $D=0.3\text{ m}$, también se va a variar la profundidad de las columnas, y se realizarán 24 simulaciones con $h=1\text{m}$, 24 con $h=2\text{m}$ y 24 con $h=3\text{m}$ y por último también se varía la separación de las columnas centro a centro, con lo que se tiene 24 simulaciones con separación $S=1.5D$, es decir que está en función del diámetro de la columna, 24 más con $S=2D$ y finalmente 24 más con $S=3D$. Las propiedades de los materiales a ingresar en el software se definen a continuación en la tabla 2.

Tabla 2 – Propiedades de los materiales del análisis bidimensional.

MODULO DE ELASTICIDAD (Mpa)			RELACION DE POISSON			DENSIDAD (Kg/m ³)		
Suelo	Columnas	Zapata	Suelo	Columnas	Zapata	Suelo	Columnas	Zapata
12.5	200	22000	0.35	0.4	0.2	1600	1650	2400
25	200	22000	0.35	0.4	0.2	1600	1650	2400
50	200	22000	0.35	0.4	0.2	1600	1650	2400
100	200	22000	0.35	0.4	0.2	1600	1650	2400

Teniendo en cuenta la tabla 2, se determina que por cada diámetro D de columnas, con una determinada separación S y una profundidad h se realizaran 4 simulaciones, ya que se va a ir modificando el módulo de elasticidad del suelo entre 12.5 MPa, 25 MPa, 50 MPa y 100 MPa.

Luego que se definen las propiedades en la pestaña “Property” de crean diferentes secciones en la misma pestaña, se seleccionan cada parte y se le asignan las propiedades correspondientes, posteriormente se ingresa a la pestaña “Assembly” y se establece el sistema en general, es decir la manera gráfica como va a interactuar cada parte. En la pestaña de “Steps” se crearon 2 pasos para cada modelación, un paso de características estáticas en general y otro de características dinámicas, ambos pasos se establecieron que se ejecutaran en un tiempo de 0.5 segundos, con incrementos de 0.1 segundos, el paso estático se hizo con el objetivo de definir los pesos propios de cada parte y en el dinámico se le aplica una carga de 100 KN en la parte superior de la zapata, el paso dinámico se eligió con el ánimo de evitar problemas de convergencia al momento de “correr” el modelo ya que en determinado caso se puede presentar que $\sum F \neq 0$.

Seguidamente se establecieron las interacciones superficiales que se supondrían para el modelo, para cada par de superficies en contacto se definió un comportamiento tangencial rugoso, con el cual se garantiza que no habrá un desplazamiento relativo entre superficies y un comportamiento normal “duro” con el que se asegura que una parte no podrá penetrar a otra, solo deformarla.

En la pestaña de cargas se definieron las condiciones de contorno, en las que se limitaron las superficies laterales para que solo se pudieran desplazar a lo largo del eje y en cuanto a la superficie inferior se restringió el movimiento a lo largo del eje x y del eje y, en la figura 36 se ilustran estas restricciones mencionadas

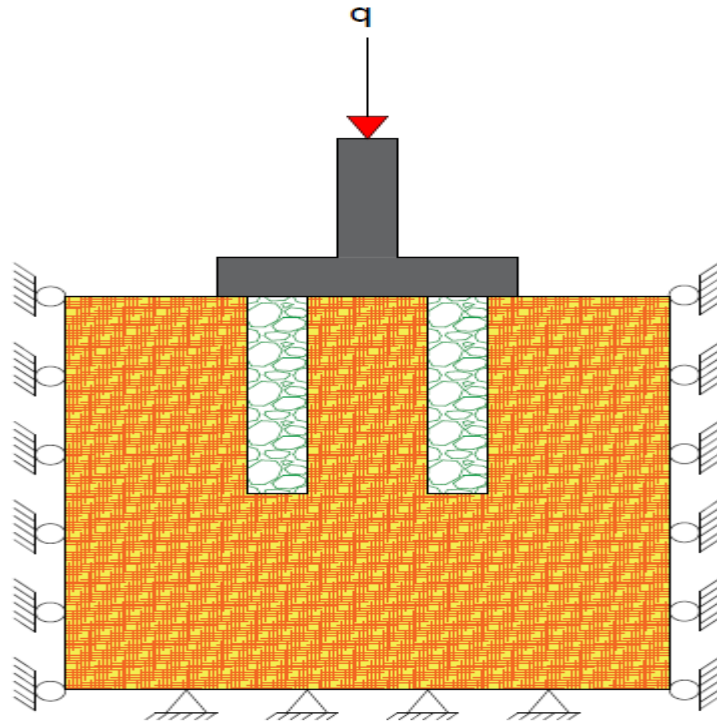


Figura 36 – Condiciones de frontera en los modelos

Finalmente se procede a mallar cada parte de manera independiente y por último se asignan en la pestaña “element type” la familia de elementos para definir las suposiciones que se tienen para analizar el modelo, en este caso se asignó la familia de “plain strain”, que corresponde a una suposición de deformación plana. Para poder establecer esta propiedad a los elementos se supone que todos los modelos fabricados tienen una dimensión muy larga, la cual será en este caso la que está a lo largo del eje z y que se tiene una sección transversal en el plano x-y uniforme y de dimensiones finitas, esta suposición implica que las deformaciones unitarias las cuales tengan alguna componente en el eje z sean igual a cero ($\epsilon_{33} = \epsilon_{13} = \epsilon_{23} =$

0). En la figura 37 se puede observar lo que realmente se está simulando en un espacio tridimensional al someterse el modelo a la suposición de deformación plana.

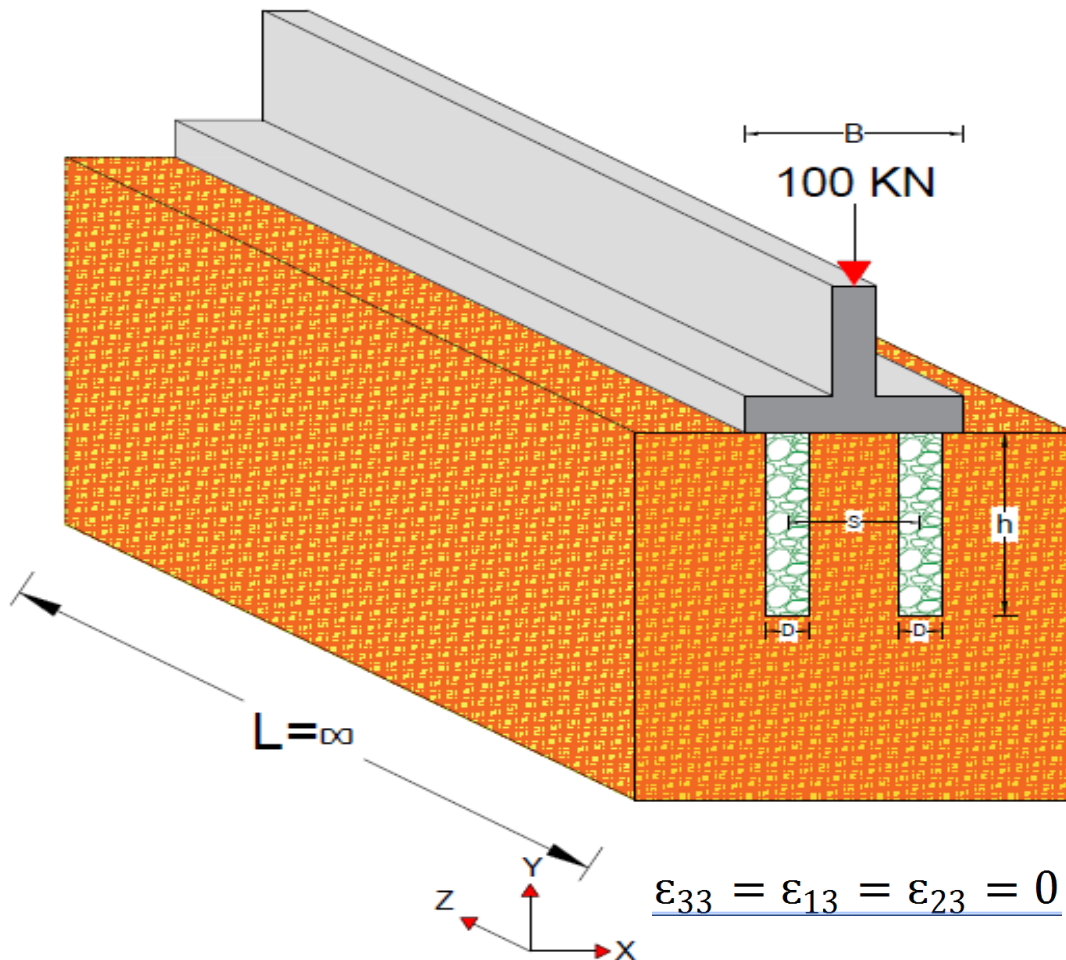


Figura 37 – Consideraciones de la deformación plana

Antes de montar todos los modelos los cuales incluían las columnas de grava, se elaboró el modelo base el cual era el suelo sin mejorar interactuando con la zapata mediante la carga de 100 KN aplicada en la parte superior de la zapata, es decir que se tenía el suelo nativo sin columnas de grava, con el fin de obtener unos resultados de referencia para poder posteriormente cuantificar que tanto mejoraban los desplazamientos verticales las columnas de grava, en la figura 38 se observa el modelo de suelo sin mejorar que se elaboró en el software basado en elementos finitos.

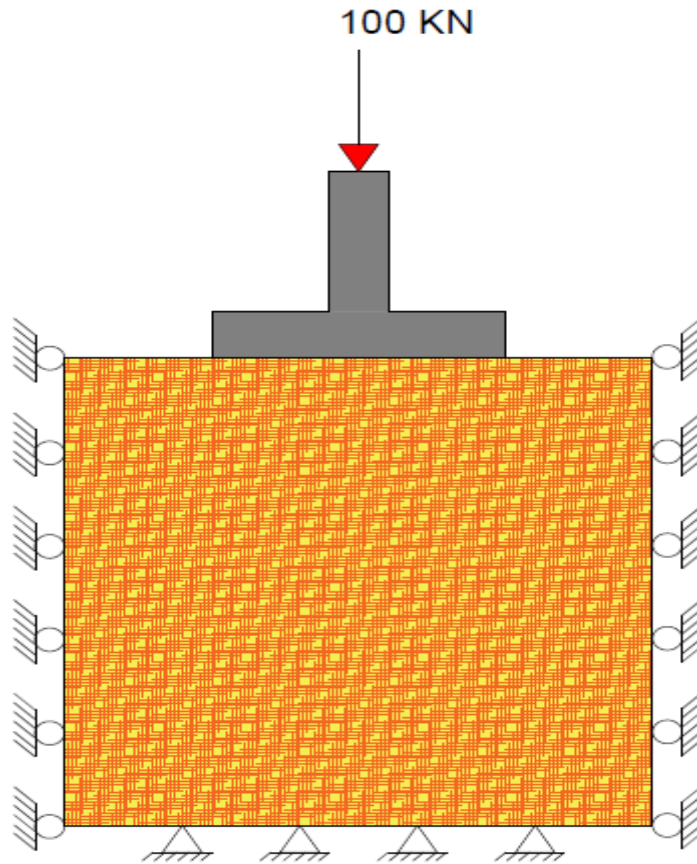


Figura 38 – Modelos de referencia sin columnas de grava apisonadas

Se debe tener en cuenta al momento de elaborar los modelos que los valores ingresados de las diferentes variables no tienen unidades, por lo que se debe prestar atención a esta parte y garantizar que las cantidades ingresadas correspondan a un mismo sistema de medida y de esta manera asegurar que sean congruentes.

En la figura 39 se puede observar una ilustración del modelo bidimensional general en el software basado en elementos finitos, donde se pueden identificar la nomenclatura que se utilizara de las variables a tener en cuenta para su respectivo análisis.

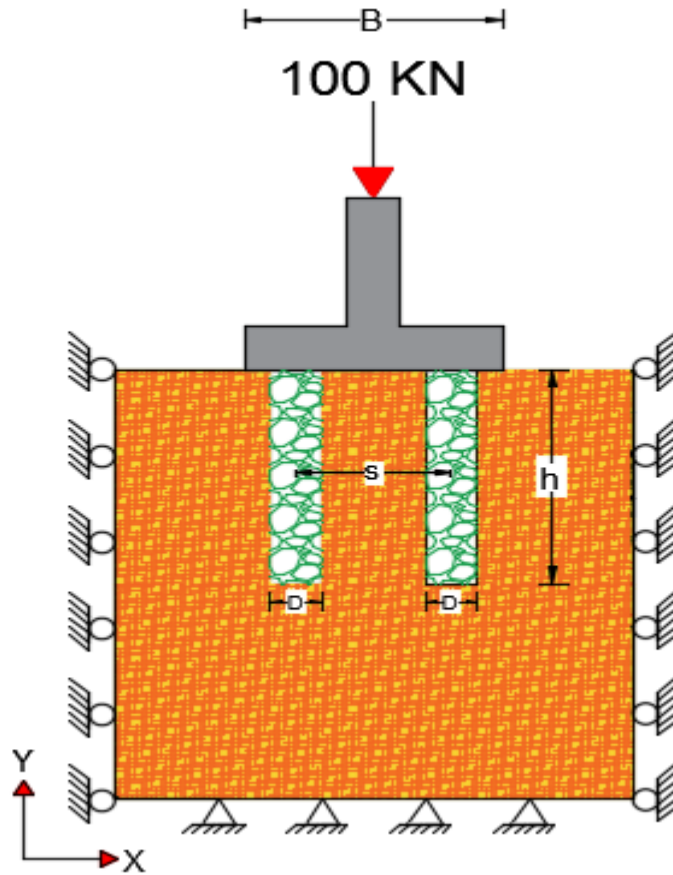


Figura 39 – Ilustración del modelo realizado en el software basado en elementos finitos

Donde:

$B = 1\text{ m}$ = Ancho de la zapata

D = Diámetro de las columnas de grava

S = Separación centro a centro entre columnas de grava

h = Profundidad de las columnas de grava

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se presenta en la figura 40 el modelo bidimensional una vez elaborado en el software basado en elementos finitos.

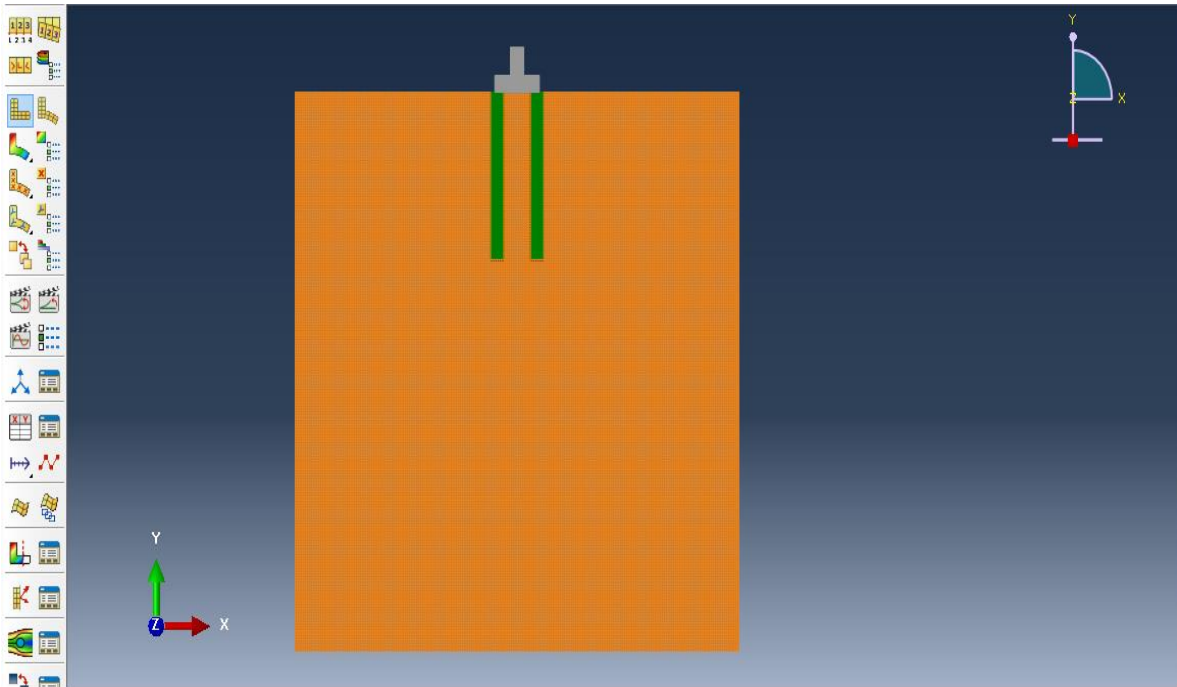


Figura 40 – Modelo 2D

Para estas modelaciones de 2D se tuvo en cuenta los pesos propios de cada parte del modelo, en la figura 41 se evidencia los vectores que representan las cantidades ingresadas del peso específico de cada parte y sus valores se muestran a continuación.

$$\gamma_{\text{Suelo}} = 15696 \frac{N}{m^3}$$

$$\gamma_{\text{Columnas de grava}} = 16186.5 \frac{N}{m^3}$$

$$\gamma_{\text{zapata}} = 23544 \frac{N}{m^3}$$

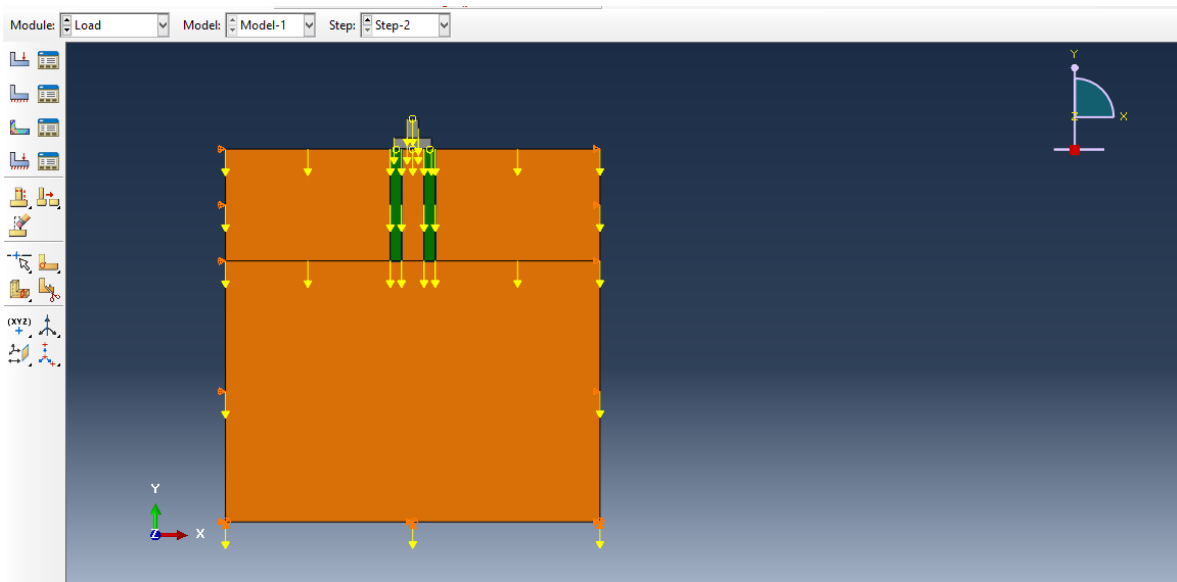


Figura 41 – Representación del peso de cada parte mediante vectores.

Una vez elaborada cada diferente configuración, se empieza a “correr” los diferentes modelos y en la pestaña de “visualization” se puede analizar los diferentes diagramas de contorno de cada variable que interesa estudiar, en los cuales se aprecian las zonas donde se presentan los mayores valores, como se presenta en la figura 42 en el diagrama de contorno de la magnitud del desplazamiento, donde a modo de ilustración se muestra los tipos de resultados que se pueden obtener en este software, se puede examinar los diferentes valores de los desplazamientos en una escala de colores, donde para este caso en específico, el color rojo indica la zona donde se presentaron los mayores desplazamientos y el color azul donde se presentaron los menores desplazamientos, como era de esperarse, en la zona más cercana a la zapata es donde se evidencian los mayores valores del vector desplazamiento el cual es el resultado de la suma de los vectores desplazamiento en x y en y.

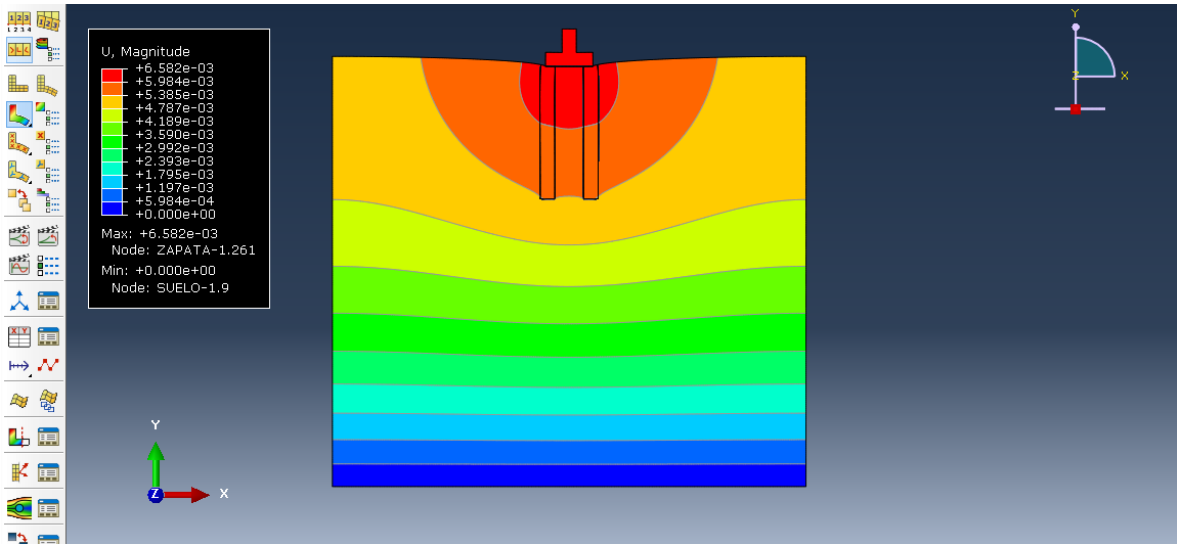


Figura 42 – Ilustración de los resultados del vector desplazamiento en el software basado en elementos finitos en el modelo suelo-columnas 2D.

Luego de visualizar los diagramas de contorno de a estudiar, se procede a establecer una superficie de interés que es la que se muestra en la figura 43 como una línea de color rojo en la parte superior del suelo, con ayuda de este camino de nodos, será posible determinar los valores de desplazamientos en el eje y a medida que se iba avanzando en el eje x.

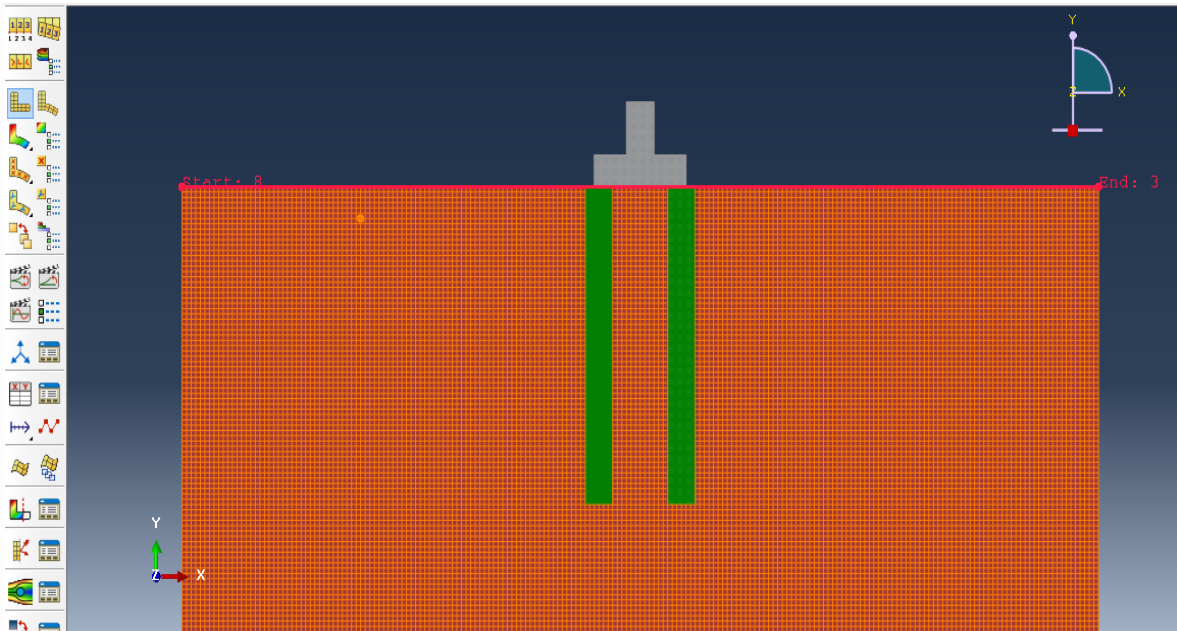


Figura 43 – Superficie (roja) en la cual se desean conocer los valores de desplazamiento en el eje y

Luego de establecer esta superficie, se procede a elegir la variable de la cual se quieren conocer sus valores y posteriormente se elige dibujar dichos valores para obtener gráficas similares a la que se muestra en la figura 44.

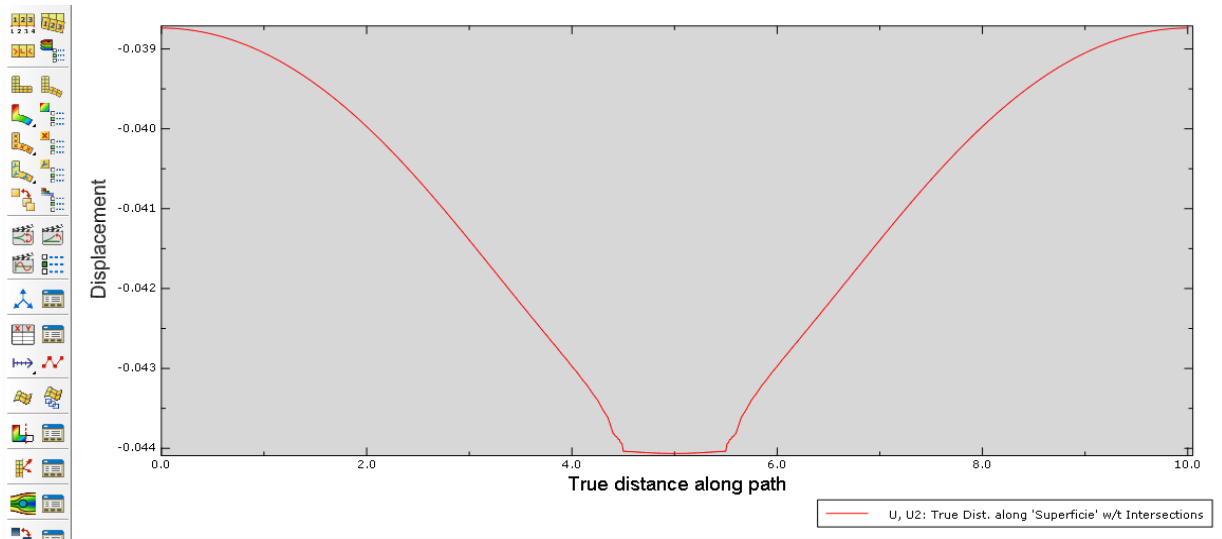


Figura 44 – Gráfica de la variable desplazamiento en el eje y a lo largo de la superficie establecida.

Luego de haber graficado la variable de interés tomada a modo de ejemplo en este caso (desplazamiento en el eje y) es posible obtener los valores exactos tabulados, los cuales se llevan posteriormente a Excel para poder hacer un análisis más detallado, en la figura 45 se muestran los valores que se exportan a Excel.

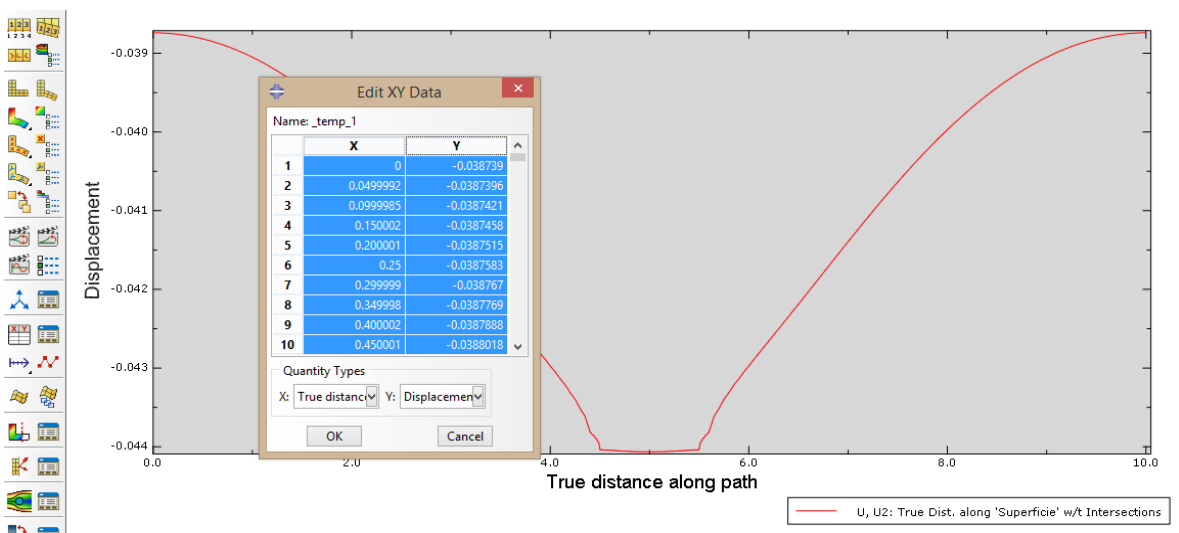


Figura 45 – Obtención de valores tabulados de la variable de interés a través de la superficie establecida.

Cuando ya se tienen los valores de desplazamiento vertical a lo largo del eje x de todas las 76 simulaciones elaboradas, se procede a realizar las gráficas de las variables de interés de una manera organizada con el fin de poder resumir de forma entendible lo obtenido.

Luego de haber realizado las anteriores 76 simulaciones, se procedió a ejecutar 72 más para un total de 148, con el fin de establecer un módulo de elasticidad equivalente para cada sistema suelo-columnas, esto se hizo extrayendo los valores de las deformaciones que unitarias y los esfuerzos verticales que se presentan en el punto central (color rojo) a través del tiempo en que se estableció el contacto entre la zapata y la superficie del sistema suelo-columnas, el cual se puede observar en la figura 46.

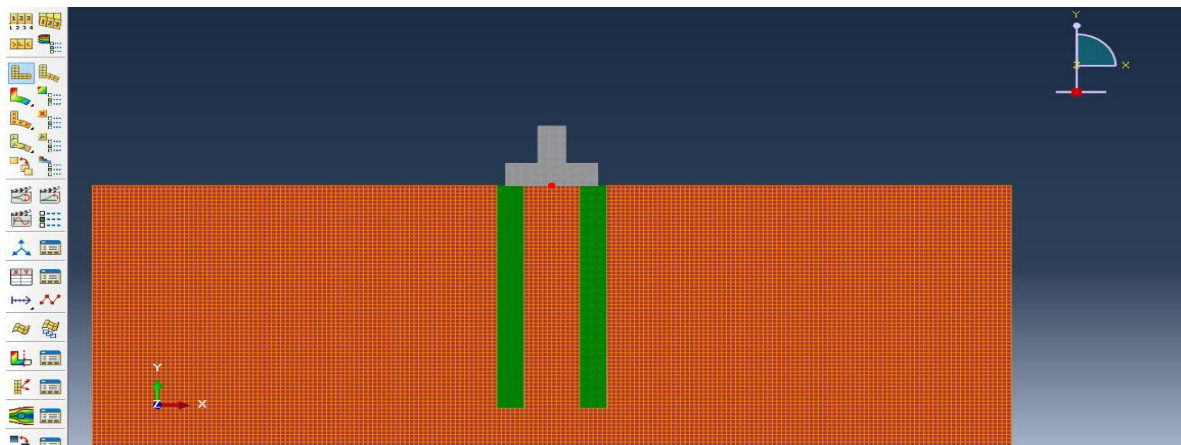


Figura 46 – Punto (color rojo) en el cual se midieron las deformaciones unitarias y los esfuerzos verticales

Al graficar los valores exportados (deformaciones unitarias y esfuerzos verticales) desde el software basado en elementos finitos a Excel, se obtendrán a partir de las simulaciones, gráficas similares a la que se presenta en la figura 47, esta será la tendencia de todas las curvas teniendo en cuenta que el modelo constitutivo utilizado es elástico lineal.

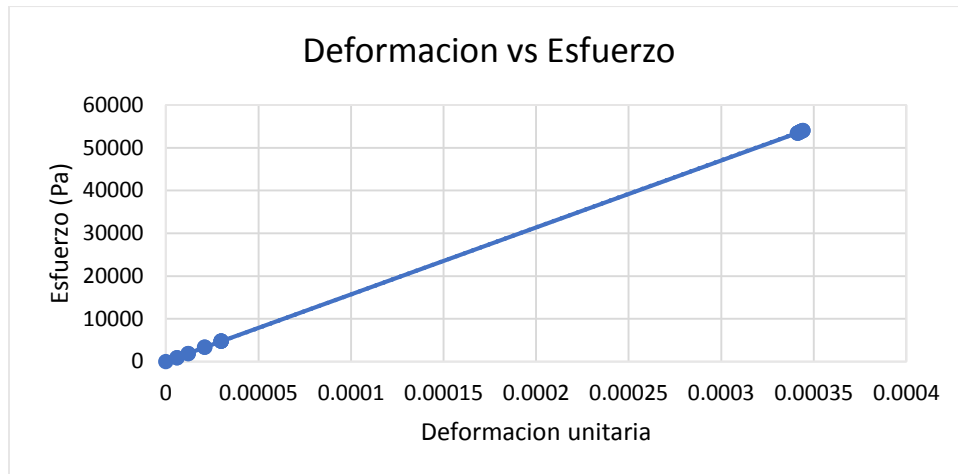


Figura 47 – Gráfica tipo esfuerzo vs deformación unitaria obtenida a partir de los datos exportados desde software basado en elementos finitos.

3.3 METODOLOGÍA MODELACIÓN EN 3D

Para las modelaciones en el análisis tridimensional fue suficiente con crear 2 partes en software basado en elementos finitos, las cuales fueron un cubo que representara el suelo natural con unas dimensiones de 10mx10mx10m, el cual tendrá 4 perforaciones en las que se van a variar el diámetro y profundidad de acuerdo a los diferentes modelos que se realicen, también se tiene una columna de grava la cual se replicara 3 veces en el programa al momento de ensamblar el modelo, esto para simular que bajo la cimentación se contara con 4 columnas de grava para intentar mejorar las características del suelo, para cargar el sistema suelo-columnas, se supuso que se tenía una zapata cuadrada con $B=L=2m$ la cual se reemplazó con una presión equivalente de 100 KPa, las partes que involucran los modelos tridimensionales con sus respectivas características ya mencionadas se muestran a continuación en la figura 48

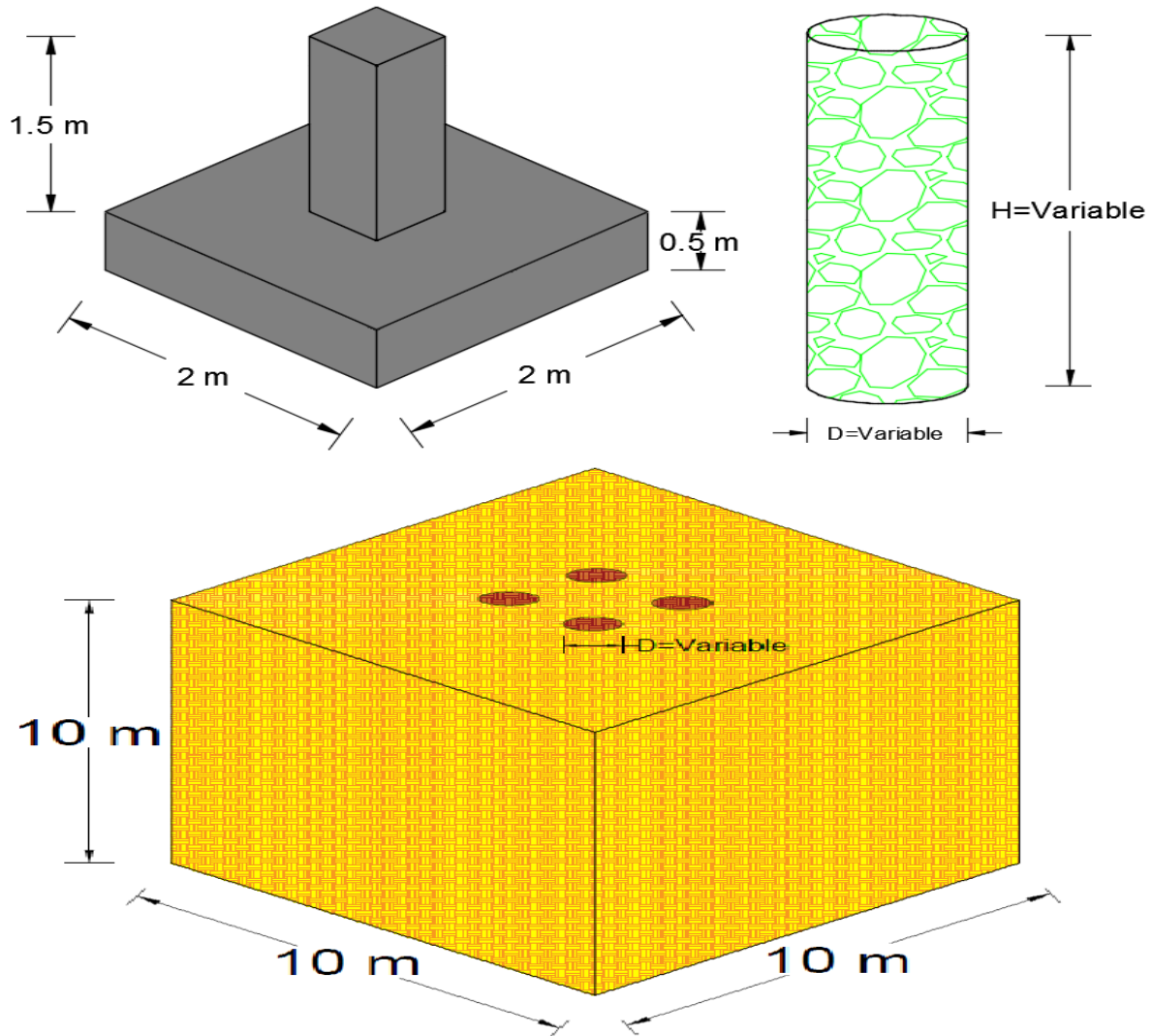


Figura 48 – Partes creadas en el software para el análisis 3D (Elaboración propia)

Luego de haber creado las partes se procede a definir las propiedades de las partes que están involucradas en el modelo, en esta simulación tridimensional, solo se tuvieron en cuenta dos diferentes módulos de elasticidad del suelo, uno de 12.5 MPa y otro de 100 MPa, ya que los resultados al variar el módulo de elasticidad del suelo siguen un patrón lineal, de tal manera que con estos valores extremos será posible interpolar cualquier valor de interés de la respuesta del sistema en el caso que se requiera. En cuanto a las columnas las propiedades se mantuvieron constantes, en las diferentes simulaciones, en la tabla 3 se describen estas propiedades mencionadas.

Tabla 3 – Propiedades de las partes implicadas en el análisis tridimensional

MODULO DE ELASTICIDAD (MPa)		RELACION DE POISSON		DENSIDAD (Kg/m³)	
Suelo	Columnas	Suelo	Columnas	Suelo	Columnas
12.5	200	0.35	0.4	1600	1650
100	200	0.35	0.4	1600	1650

Luego de ensamblar el sistema, definir condiciones de frontera, mallar el modelo, implementar la presión sobre la superficie de interés en un área de 2mx2m en representación de la zapata, se procedió a establecer las características de interacción entre las superficies que hay en el modelo las cuales son el contorno de las columnas de grava interactuando con el suelo circundante a ellas y la parte inferior de la columnas también interactuando con el suelo adyacente, para la interacción entre estas áreas se definió un comportamiento rugoso, de tal manera que se garantiza una adherencia completa y no se permitirá un desplazamiento relativo de una superficie con respecto a la otra, adicionalmente se definió un comportamiento normal, el cual garantiza que una parte no va a poder penetrar a otra, solo deformarla como es lo que se espera según la teoría y finalmente se fijó una restricción entre superficies en contacto, por medio de la cual no se va a permitir la separación de las superficies en contacto luego de aplicar las cargas, ya que se espera que se deformen las superficies juntas y no solo una de las dos, teniendo en cuenta lo anterior se obtuvo el siguiente modelo en el software basado en elementos finitos listo para ejecutar teniendo en cuenta la equivalencia de la zapata con una sola carga como se muestra en la figura 49.

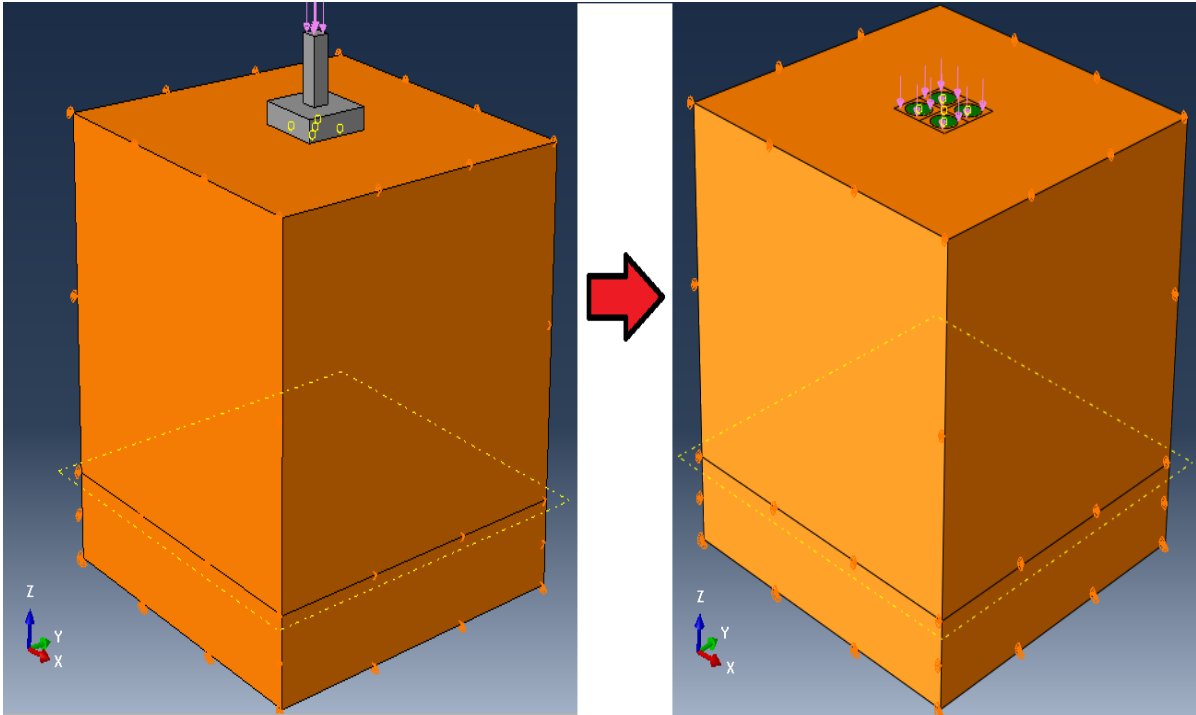


Figura 49 – Semejanza entre modelos, uno con una zapata y otro con una presión equivalente (Elaboración propia).

Cabe destacar que todos los modelos simulados, siguen el patrón de la parte derecha de la figura 49, además es importante resaltar que la aplicaciones de las cargas serán a lo largo del eje z, de tal manera que las condiciones de contorno laterales son desplazamientos en x e y igual a cero ($U_x = U_y = 0$) y en la base del suelo se restringió cualquier desplazamiento ($U_x = U_y = U_z = 0$).

En la figura 50 se puede observar de manera detallada como quedan las columnas de grava ensambladas en las perforaciones realizadas en el suelo utilizando una herramienta traslucida (izquierda) y un corte por toda la mitad del modelo con ayuda de un plano paralelo a YZ (derecha).

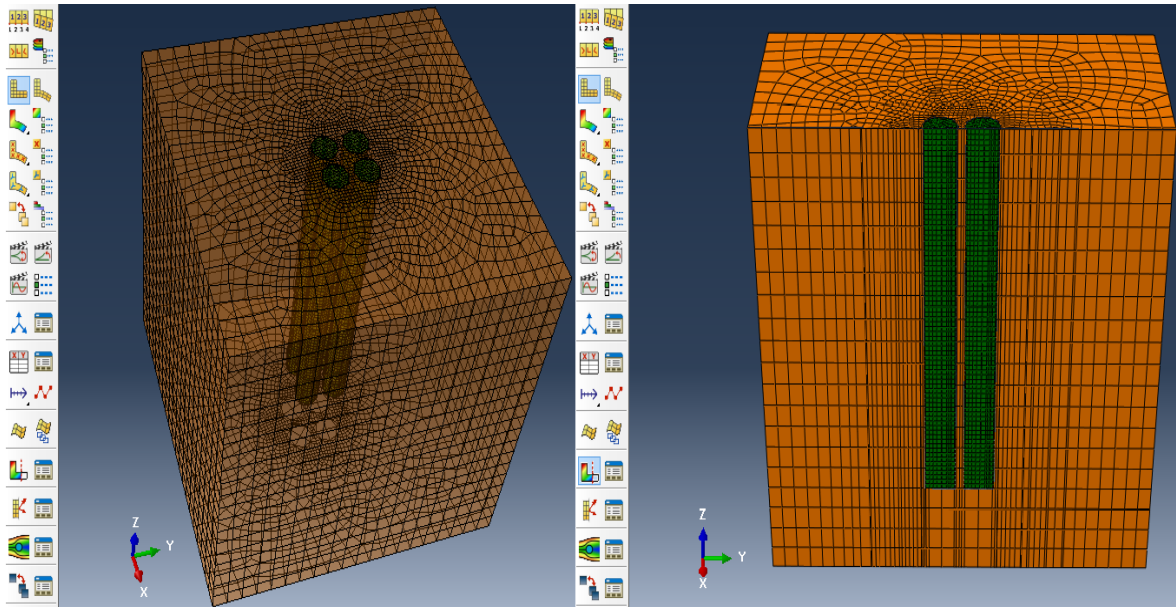


Figura 50 – Visualización detallada de las columnas de grava implementas en el suelo nativo

Una vez se definió el modelo con el cual se van a realizar todas las simulaciones, se procede a establecer la cantidad de modelaciones a realizar, para esto se van a ejecutar 50 modelos con rugosidad absoluta entre las superficies en interacción, 25 con un módulo de elasticidad de 12.5 MPa y 25 con 100 MPa, adicionalmente se van a realizar otras 50 bajo las mismas anteriores condiciones, pero con un coeficiente de rugosidad de 0.5, en ambos casos (con rugosidad absoluta y $\mu=0.5$) el arreglo de columnas tendrá un patrón cuadrado con una separación de ellas centro a centro de $S=1\text{m}$. Para cada uno de los modelos se va a ir variando el diámetro de las columnas y la altura que tendrá cada una con el fin de analizar la respuesta del sistema suelo-columnas y cuantificar la mejora en los desplazamientos verticales en el punto central, en la tabla 4 se resumen todas las simulaciones ejecutadas.

Tabla 4 – Simulaciones realizadas en el análisis tridimensional

MODULO DE ELASTICIDAD DEL SUELO E=12.5					MODULO DE ELASTICIDAD DEL SUELO E=100				
MPa					MPa				
D=0.3 - H=2	D=0.3 - H=3	D=0.3 - H=4	D=0.3 - H=6	D=0.3 - H=8	D=0.3 - H=2	D=0.3 - H=3	D=0.3 - H=4	D=0.3 - H=6	D=0.3 - H=8
D=0.4 - H=2	D=0.4 - H=3	D=0.4 - H=4	D=0.4 - H=6	D=0.4 - H=8	D=0.4 - H=2	D=0.4 - H=3	D=0.4 - H=4	D=0.4 - H=6	D=0.4 - H=8
D=0.6 - H=2	D=0.6 - H=3	D=0.6 - H=4	D=0.6 - H=6	D=0.6 - H=8	D=0.6 - H=2	D=0.6 - H=3	D=0.6 - H=4	D=0.6 - H=6	D=0.6 - H=8
D=0.8 - H=2	D=0.8 - H=3	D=0.8 - H=4	D=0.8 - H=6	D=0.8 - H=8	D=0.8 - H=2	D=0.8 - H=3	D=0.8 - H=4	D=0.8 - H=6	D=0.8 - H=8
D=1 - H=2	D=1 - H=3	D=1 - H=4	D=1 - H=6	D=1 - H=8	D=1 - H=2	D=1 - H=3	D=1 - H=4	D=1 - H=6	D=1 - H=8

Si se tiene por ejemplo el caso de “D=0.8 – H=2” indica que en esas simulaciones se tiene un sistemas con unas columnas de grava de diámetro 0.8 m y una altura de 2 m, se debe tener en cuenta que todas los 50 trabajo de la tabla 4 se realizaron tanto en el análisis con rugosidad completa como para el que se tiene un coeficiente de rugosidad de 0.5 entre superficies en contacto, para un total de 200 modelaciones tridimensionales ya que cada modelo se ejecutó con un módulo de elasticidad del suelo de E=12.5 MPa y con E=100 MPa.

3.3.1 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS AL IMPLEMENTAR COLUMNAS DE GRAVA.

Los resultados del desplazamiento vertical (U_3) obtenidos en las 200 modelaciones mencionadas en la tabla 4 se van a comparar con el desplazamiento vertical (U_3) de un suelo de las mismas dimensiones pero sin implementar las columnas de grava, que será el valor patrón, con estos resultados se va a calcular y graficar cual es el porcentaje que mejora el suelo al implementar las 4 columnas para las diferentes simulaciones, mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Porcentaje que mejora el suelo} = 100 - \left(\frac{U_{\text{modelo con columnas}}}{U_{\text{modelo sin columnas}}} * 100 \right)$$

Dicho desplazamiento vertical se tomará en el punto central que tienen los sistemas suelo-columnas y suelo solo como respuesta al someterlos a una presión de 100 KPa uniformemente distribuida en un área de 2mX2m. En la figura 51 se presenta el punto donde se van a tomar todos estos valores de desplazamiento, que es el que se consideró el punto más crítico, se muestra como el nodo central del sistema que aparece marcado con color rojo.

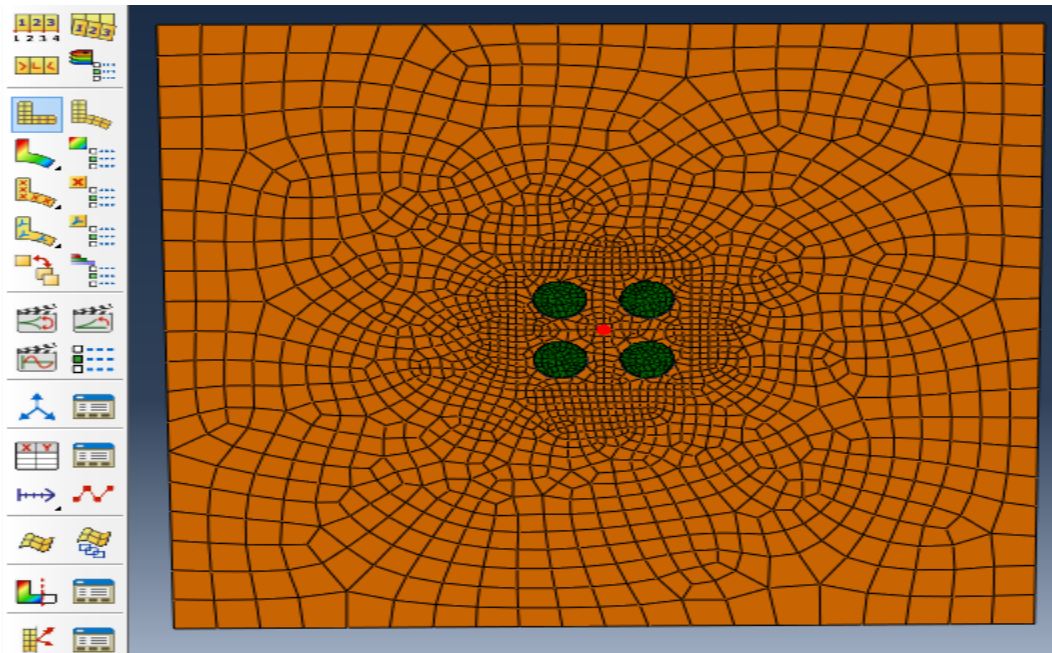


Figura 51 - Punto de toma de datos de desplazamiento vertical

3.3.2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DIAGRAMAS DE CONTORNO OBTENIDOS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.

Con el fin de comprobar ciertos criterios de diseño planteados en la teoría, se analizarán algunos diagramas de contorno, los cuales son gráficas que permiten determinar la respuesta de diferentes variables que se estén estudiando del modelo mediante la variación de colores, de tal manera que se pueda identificar las zonas donde se presentan las mayores magnitudes de las variables de interés, como se muestra a manera de ejemplo en la figura 52, donde se presenta el diagrama de

contorno del vector velocidad, a partir del cual se observan las zonas que tienden a desplazarse más rápido al aplicar las cargas.

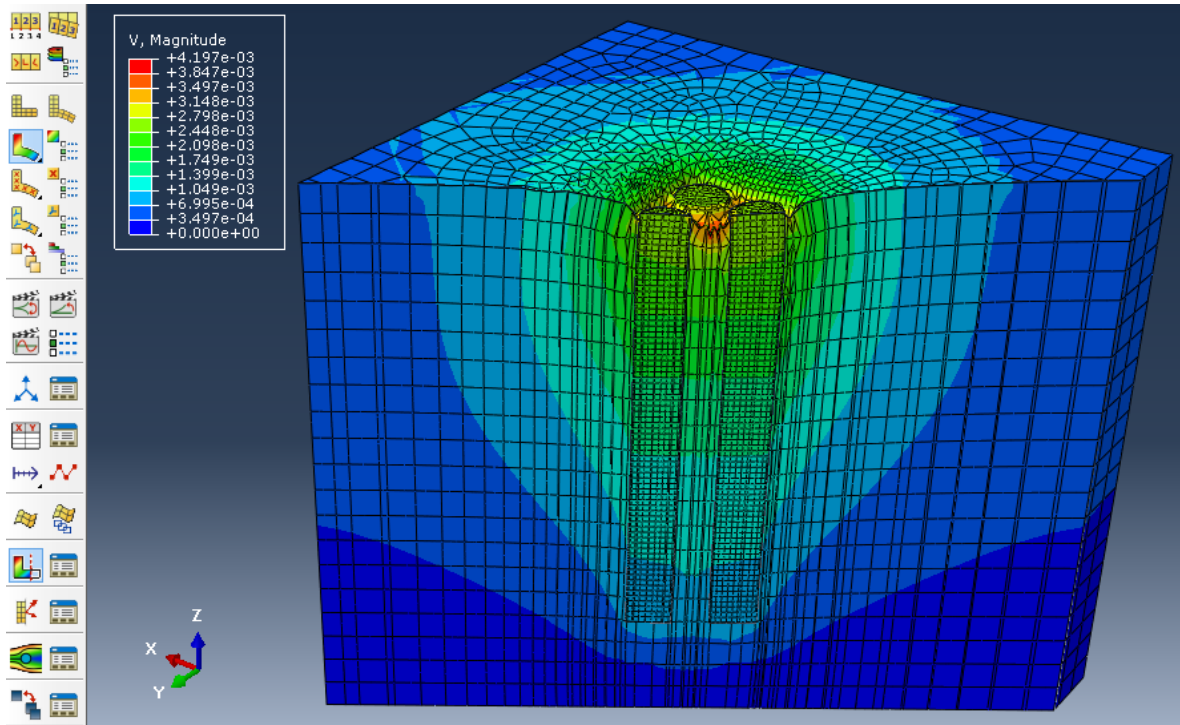


Figura 52 – Ejemplo de diagrama de contorno de la magnitud de la velocidad.

La anterior figura fue posible obtenerla haciendo uso de un corte, con el objetivo de poder observar las zonas de interés que eran las columnas.

En esta parte de la ejecución de los modelos, también se crearán “caminos de nodos” los cuales permiten conocer el cambio de una variable de interés a medida que se avanza, en la figura 53 se muestra un “camino” definido, con el cual será posible calcular ciertos valores como la variación de los esfuerzos o desplazamientos en función de la altura de la columna y luego se graficaron para hacer los respectivos análisis.

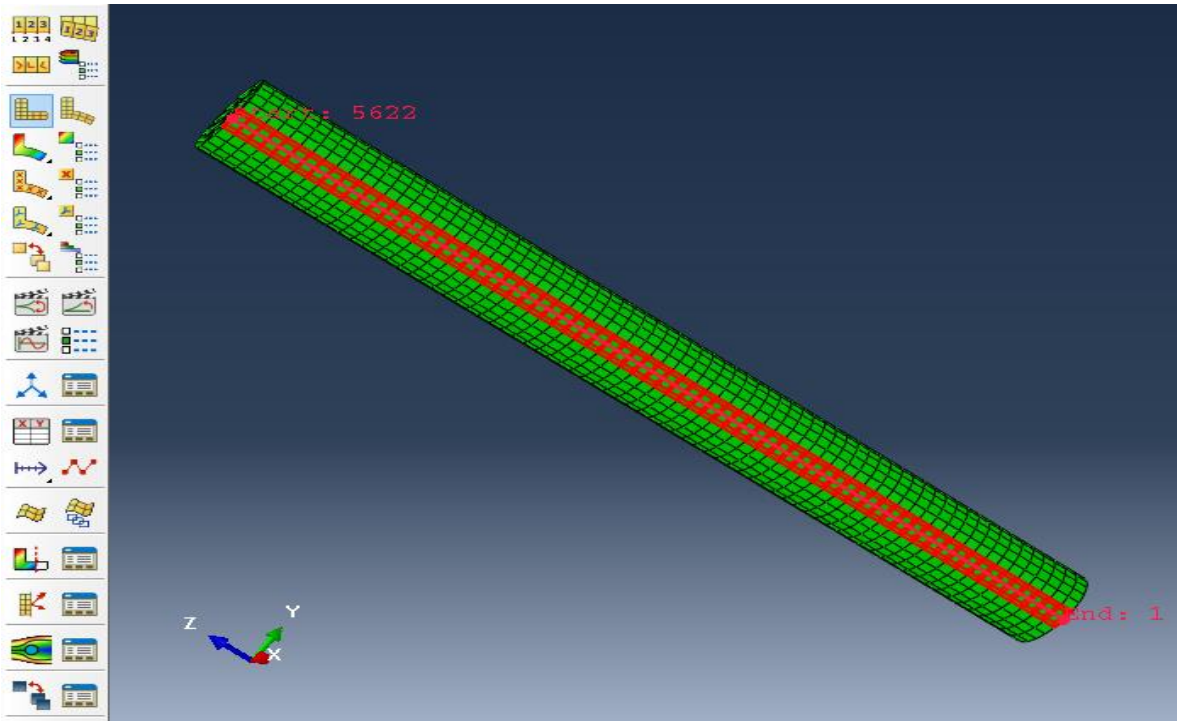


Figura 53 – Camino de nodos para conocer la respuesta de ciertas variables en función de la altura de la columna.

3.3.3 METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS MEDIANTE DISEÑO TEÓRICO CON AYUDA DE ELEMENTOS FINITOS.

Para calcular la relación teórica entre los asentamientos entre un suelo tratado con columnas de grava y uno sin tratar, es posible hacer uso de la figura 26, descrita en el capítulo 2. Las curvas ahí mostradas obedecen a la siguiente función.

$$\frac{S_{tratado}}{S_{sin\ tratar}} = \frac{1}{1 + ((n - 1) * a_r)} = \mu_s$$

Donde:

$S_{tratado}$ = Asentamiento del suelo tratado con columnas de grava

$S_{sin\ tratar}$ = Asentamiento del suelo sin tratar

n = Factor de concentracion de esfuerzos (SCF)

a_r = Relacion de sustitucion

μ_s = Relacion de esfuerzos en el suelo

Para hacer este análisis, se van a tomar solo 6 casos específicos, donde a partir de medidas obtenidas en las simulaciones y algunos datos conocidos de cada modelo a estudiar, se van a calcular las respectivas relaciones de esfuerzos en el suelo de cada caso.

Cabe recordar que el factor de concentración de esfuerzos (n) es la relación entre los esfuerzos sobre la columna (σ_c) y los esfuerzos sobre el suelo (σ_s), de tal manera que lo que se hizo para medir esos esfuerzos sobre la columna en el modelo basado en elementos finitos, fue tomar una sola columna y promediar los esfuerzos que se midieron sobre la superficie de esta, en la figura 54 se puede observar los puntos de donde se obtuvieron medidas es esfuerzos los cuales fueron promediados para obtener σ_c

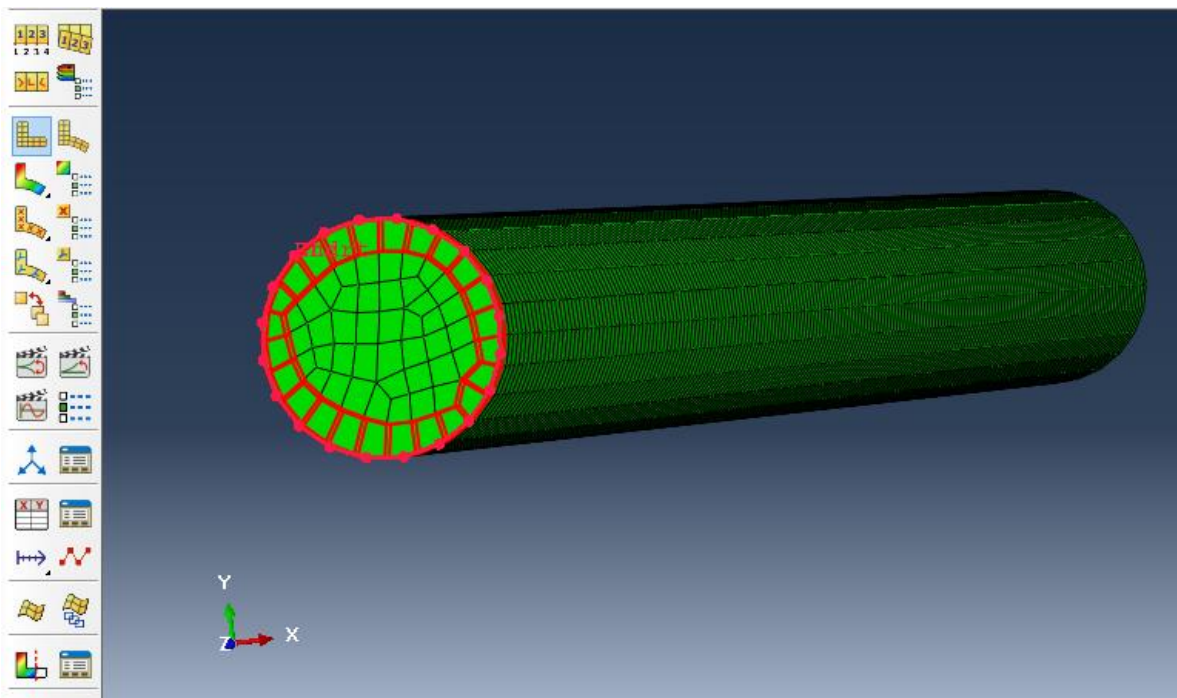


Figura 54 – Nodos con datos de esfuerzo sobre una columna de grava

Para poder calcular los esfuerzos promedio sobre el suelo (σ_s), lo que se hizo fue tomar datos de dos caminos de nodos que atravesaban la celda unitaria para posteriormente promediar estos valores y asumir el valor de interés, en la figura 55 se puede observar los caminos de nodos que se tuvieron en cuenta.

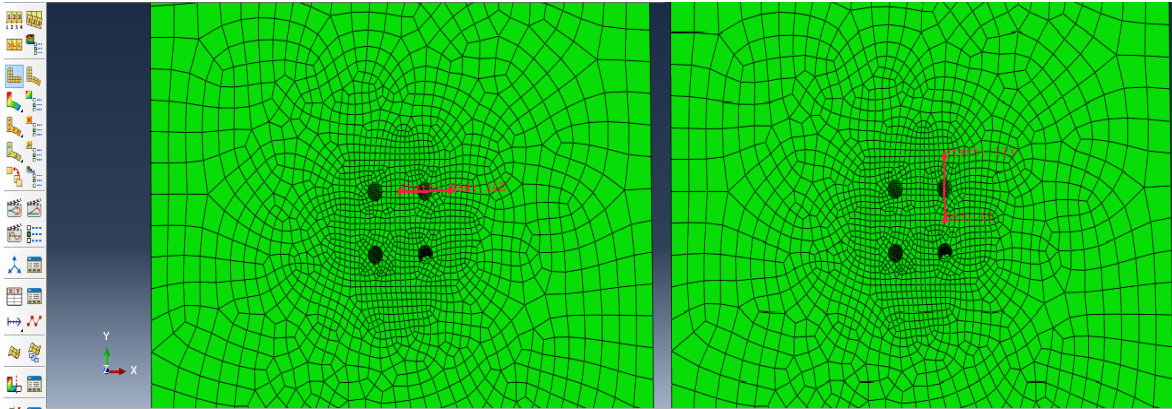


Figura 55 – Caminos de nodos en una celda unitaria con los que se obtuvo el esfuerzos sobre el suelo.

La relación de sustitución (a_r) como se mencionó en el capítulo 2, simplemente se calcula dividiendo el área de la sección transversal de la columna entre el área de la celda unitaria, finalmente se reemplazan estos valores en la anterior ecuación y ya se tienen los valores teóricos con los que se van a comparar los obtenidos en las simulaciones para cada caso. En la tabla 5 se muestran los 6 modelos elegidos al azar a los cuales se les hará el respectivo calculo teórico.

Tabla 5 – Casos elegidos para el cálculo teórico de la relación de asentamientos.

Caso	Diámetro columnas (m)	Altura columnas (m)	Módulo de elasticidad del suelo (MPa)	Rugosidad entre superficies en contacto
1	0.8	8	12.5	Absoluta
2	0.3	8	100	Absoluta
3	0.6	8	12.5	Absoluta
4	0.8	6	12.5	Absoluta
5	0.8	6	12.5	0.5
6	1	4	100	0.5

RESULTADOS DE MODELACIÓN ELÁSTICA - LINEAL DEL SISTEMA SUELO – COLUMNAS EN 2D

4.1 RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ASENTAMIENTO ELÁSTICO AL IMPLEMENTAR LAS COLUMNAS DE GRAVA.

A continuación, se presentan en las gráficas desde la 56 a la 63 las figuras obtenidas al graficar el porcentaje que se reduce el desplazamiento vertical del suelo vs. la separación centro a centro entre columnas de grava, en cada figura se tienen 3 curvas, que resultan de calcular los diferentes valores en que se reducen el asentamiento elástico para una misma altura de columnas y variando la separación entre ellas.

Donde:

En las gráficas se encontrarán las siguientes variables:

E_c =Modulo de elasticidad de las columnas

E_s =Modulo de elasticidad del suelo

D =Diámetro de las columnas

h =Altura de las columnas

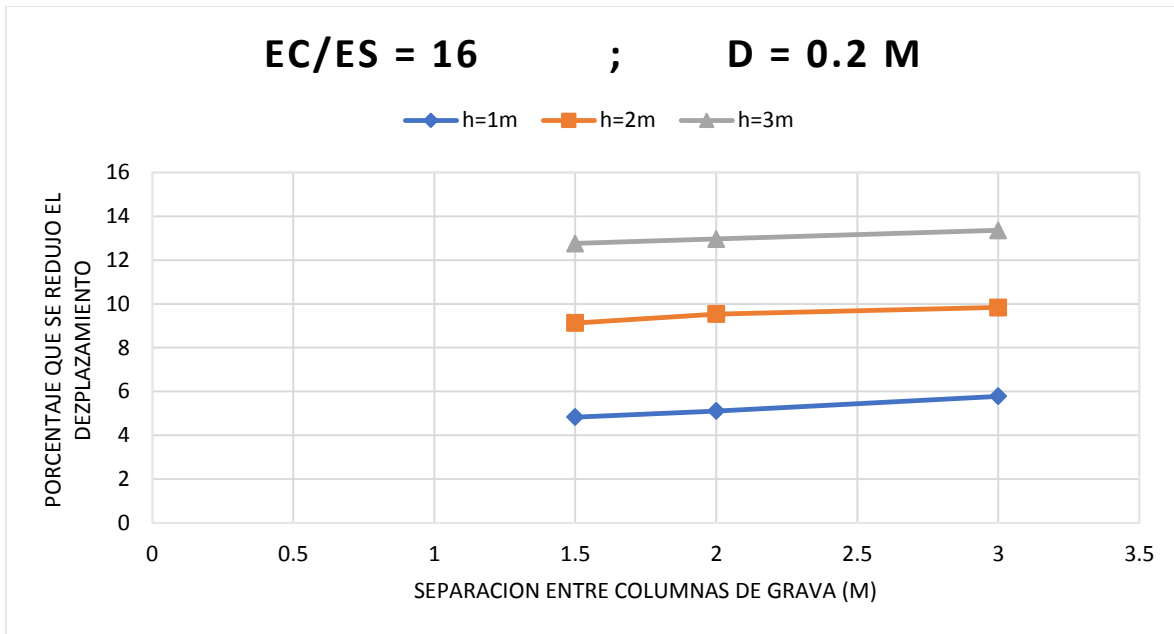


Figura 56 – Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=16$ y $D=0.2m$.

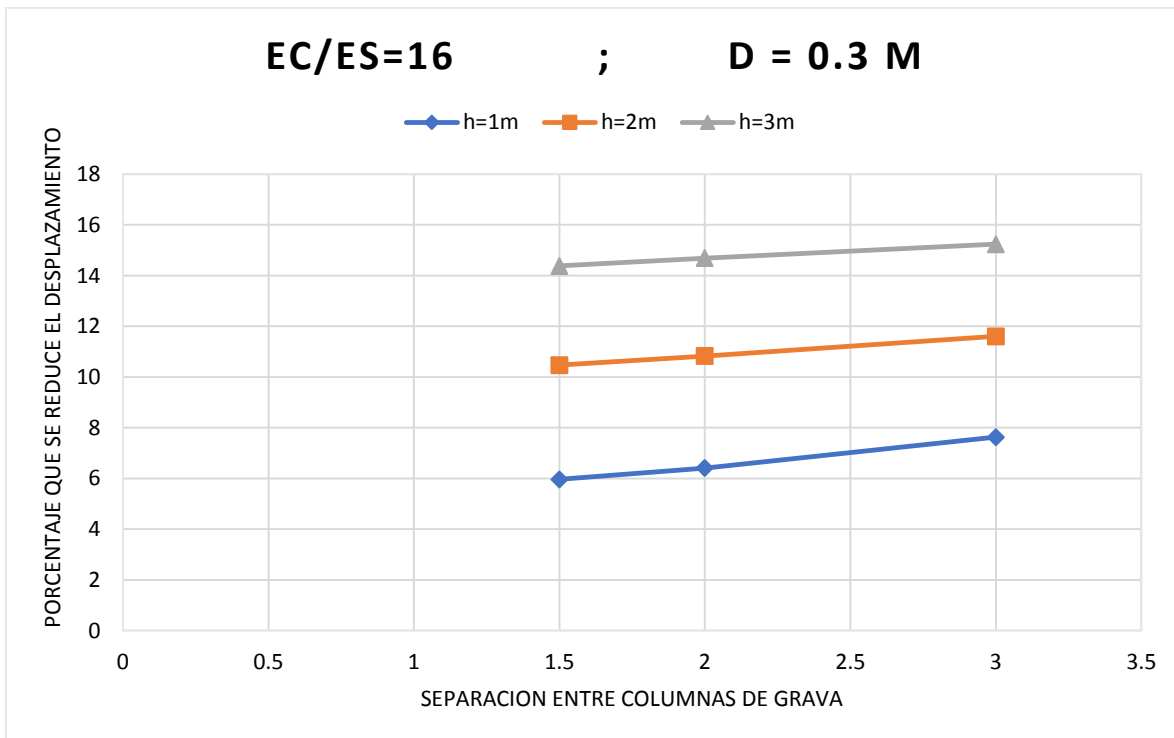


Figura 57 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=16$ y $D=0.3m$

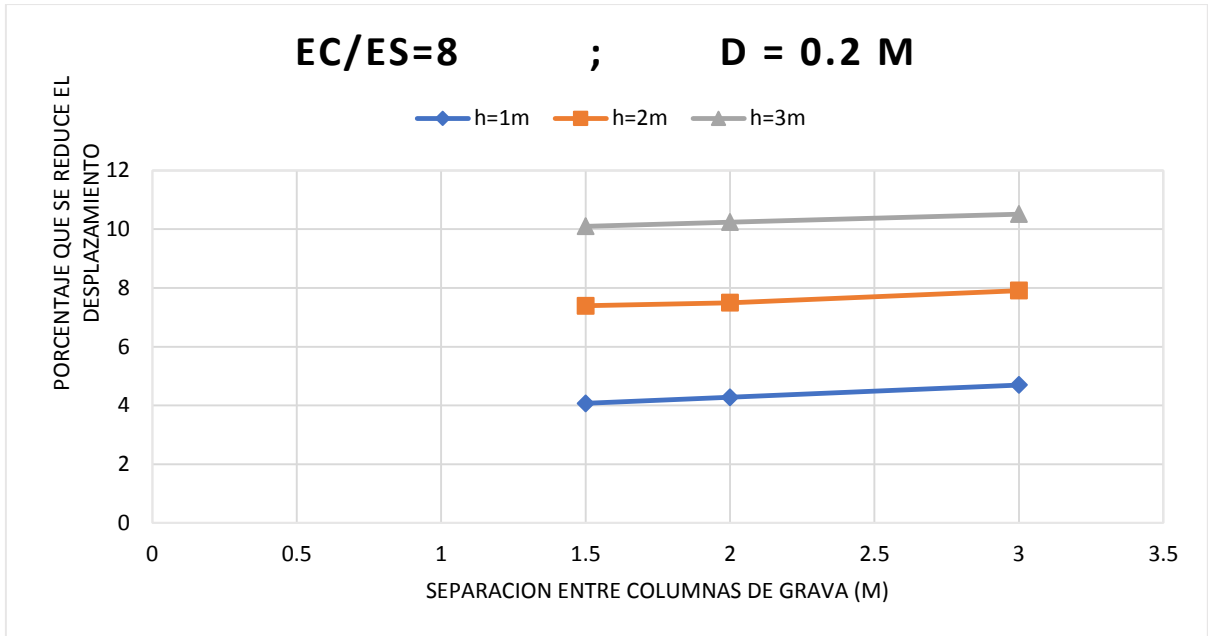


Figura 58 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=8$ y $D=0.2m$

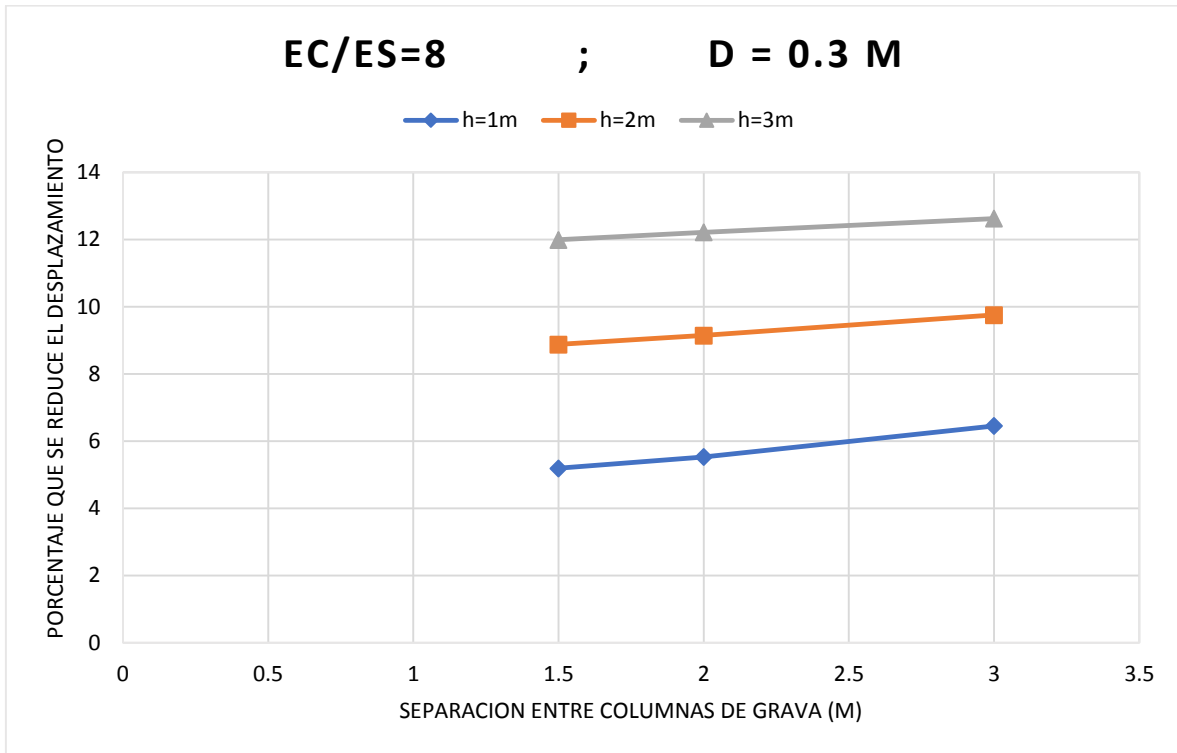


Figura 59 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=8$ y $D=0.3m$

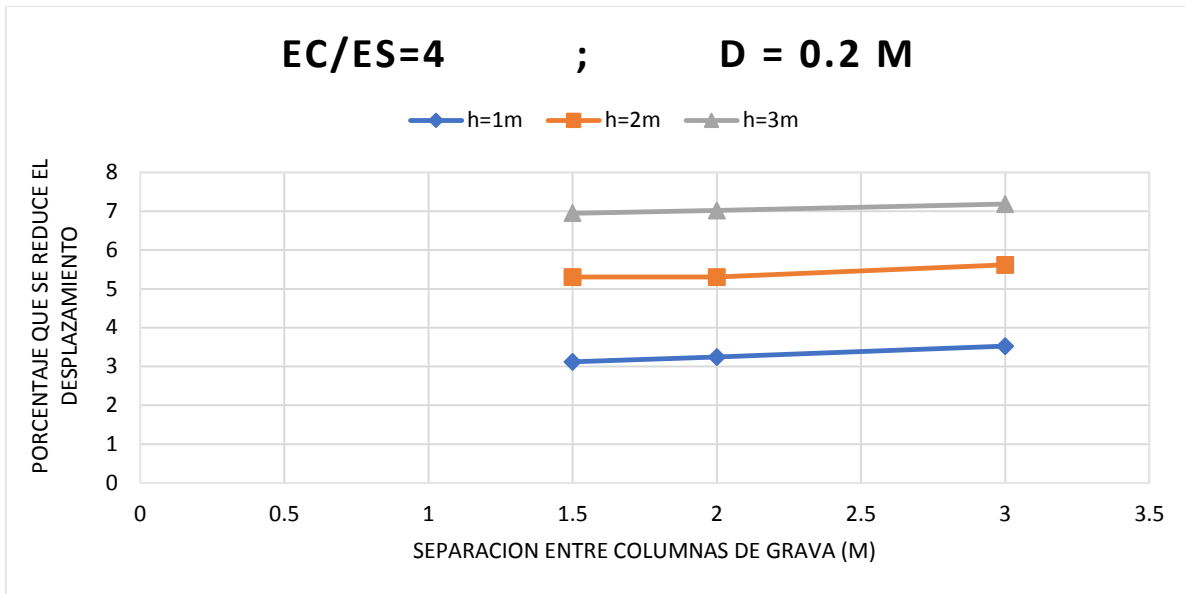


Figura 60 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=4$ y $D=0.2m$

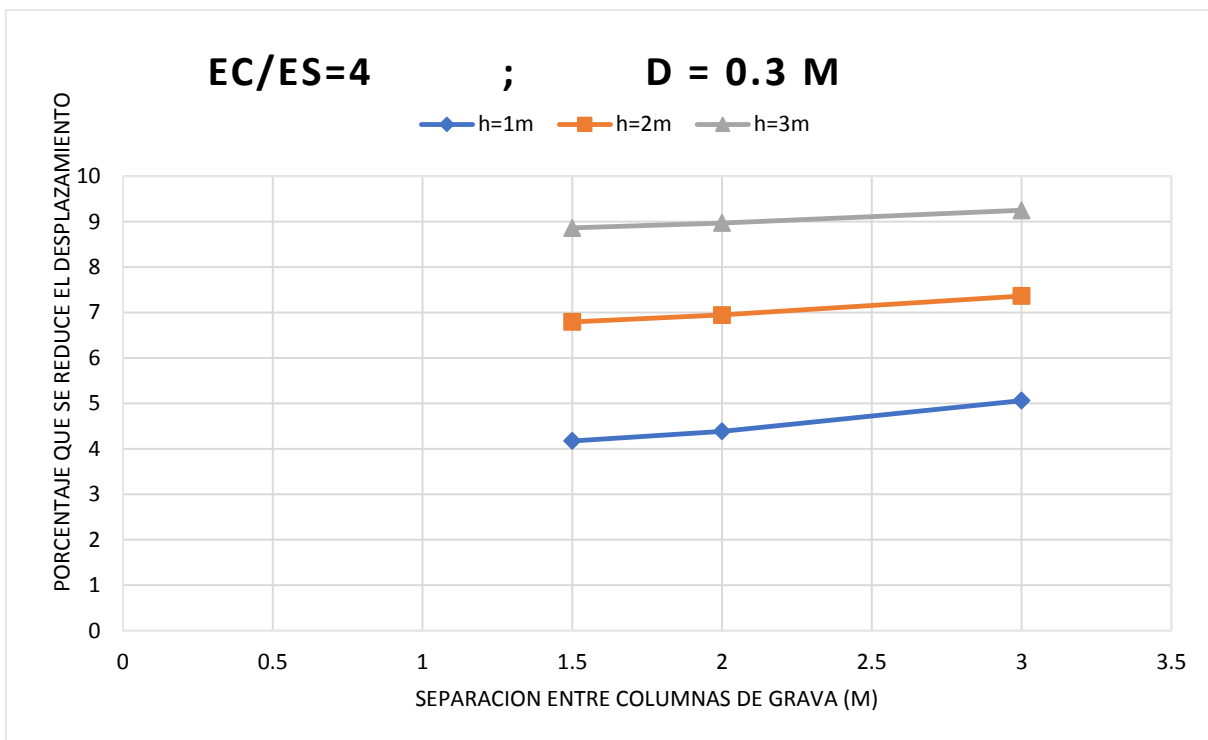


Figura 61 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=4$ y $D=0.3m$

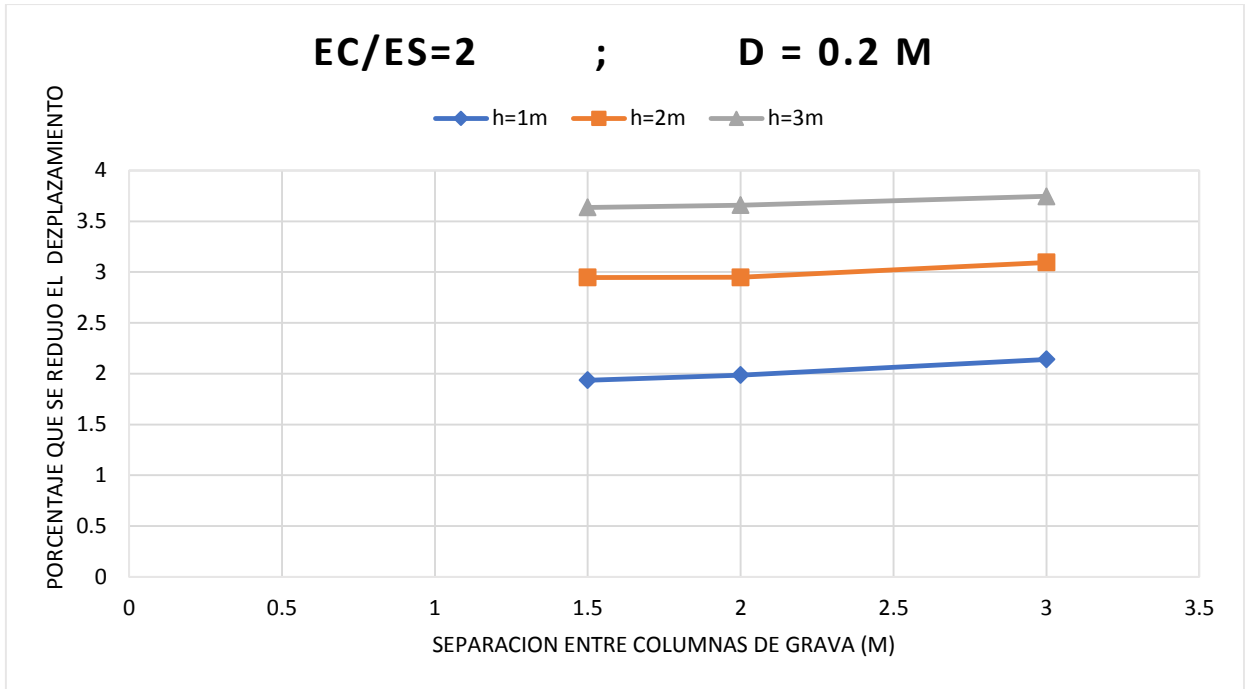


Figura 62 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=2$ y $D=0.2m$

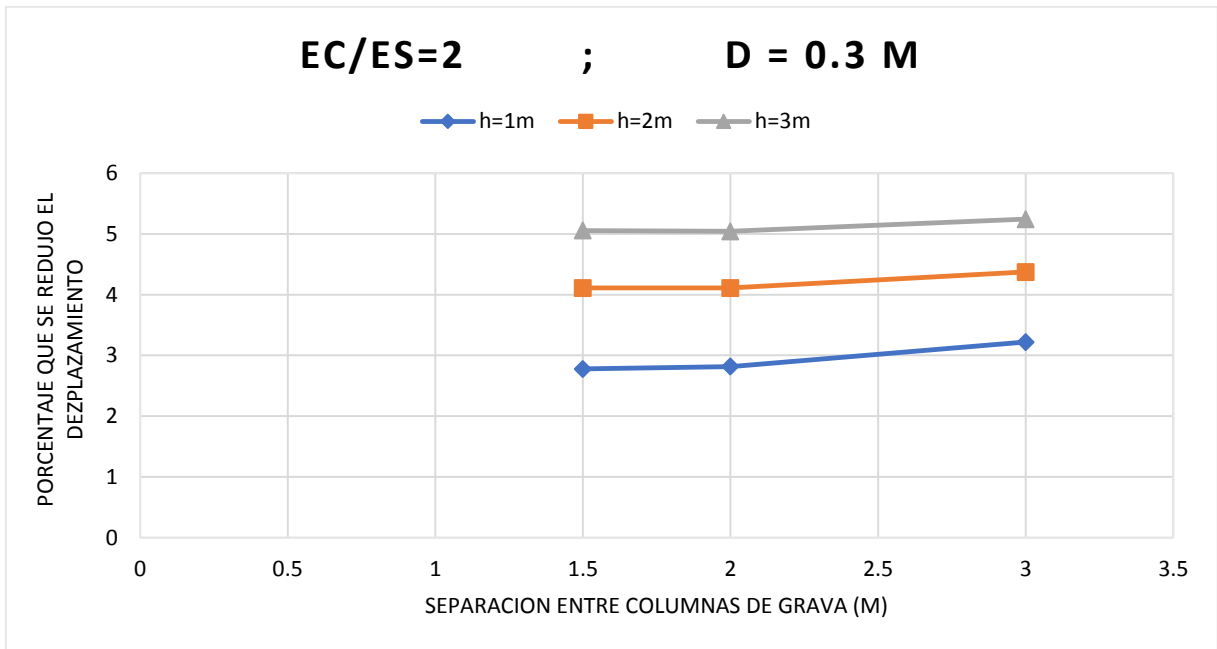


Figura 63 - Porcentaje en que se reduce el desplazamiento en función de las separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=2$ y $D=0.3m$

Posteriormente, se eligieron cuatro casos al azar para los cuales se utilizó un coeficiente de rugosidad entre superficies en contacto de $\mu=0.5$, con el objetivo de determinar que tanto variaba el mejoramiento del asentamiento elástico, teniendo en cuenta esto, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 6.

Tabla 6 – Porcentaje que se reduce el asentamiento elástico del suelo cuando $\mu=0.5$

Caso	Diámetro de columnas (m)	Separación entre columnas centro a centro (m)	Altura de columnas	Módulo de elasticidad del suelo (MPa)	Porcentaje que mejora el suelo
1	0.3	3d	3	25	12.12
2	0.2	3d	2	50	4.83
3	0.3	1.5d	1	12.5	5.28
4	0.2	2d	3	100	3.17

En las siguientes figuras 64 y 65, se expresaron los mismos anteriores resultados agrupando los valores para un mismo diámetro en función del módulo de elasticidad como se muestra a continuación

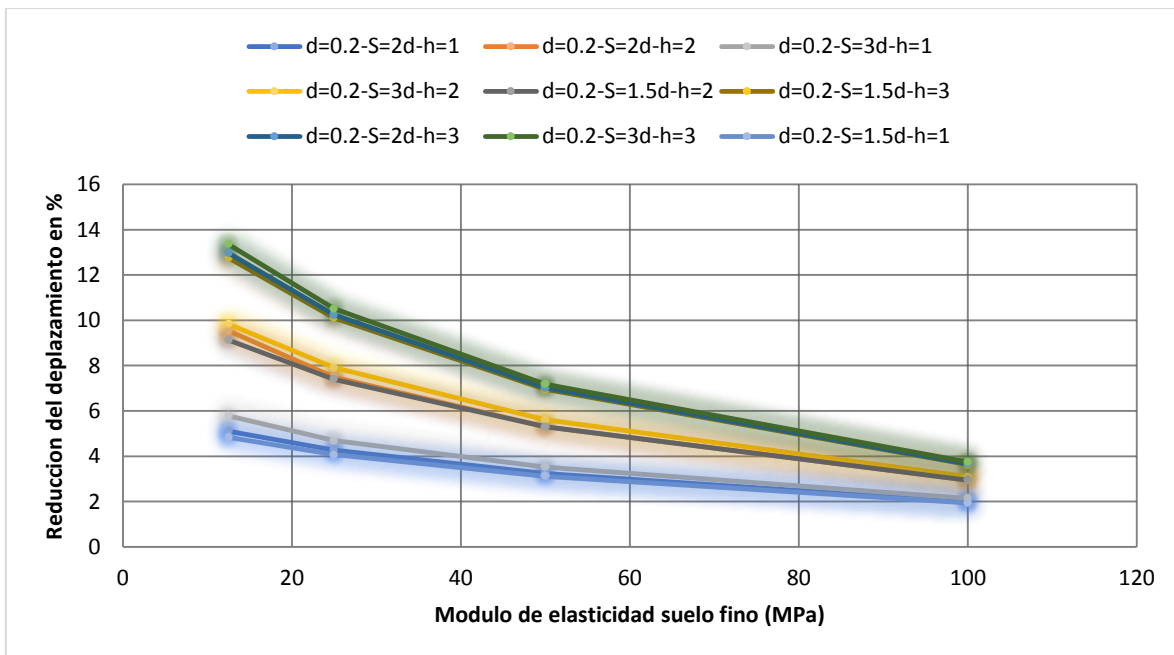


Figura 64 – Agrupación de resultados de todas las simulaciones con diámetro $D=0.2$ m en función del módulo de elasticidad del suelo fino.

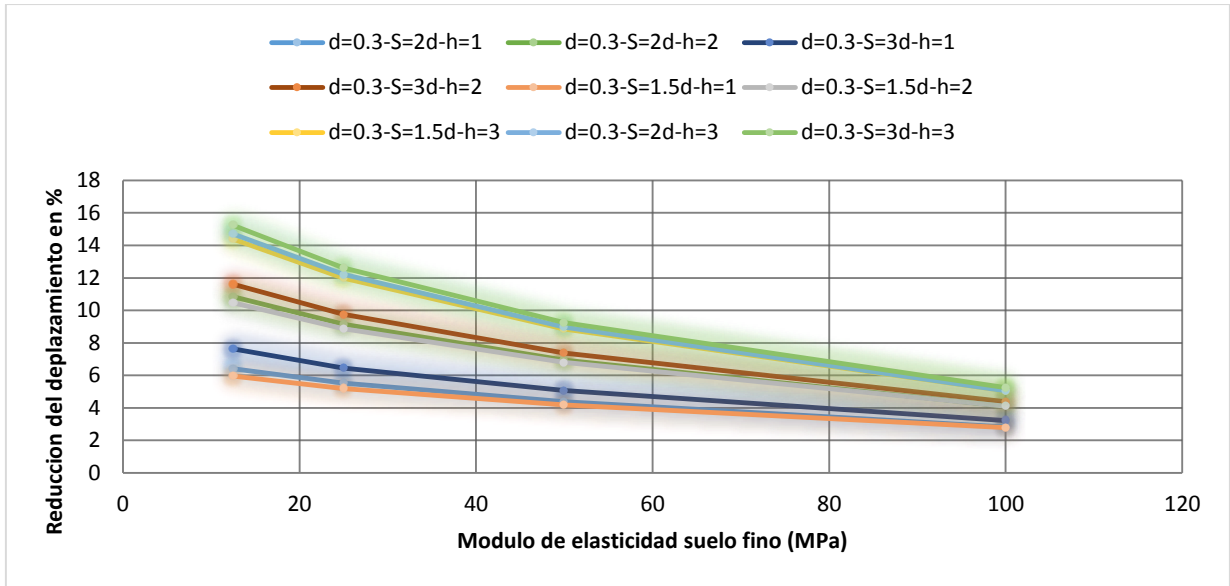


Figura 65 - Agrupación de resultados de todas las simulaciones con diámetro $D=0.3$ m en función del módulo de elasticidad del suelo fino.

4.2 RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE DEL SISTEMA SUELO-COLUMNAS.

En las siguientes figuras desde la 66 hasta la 73 se resumen los resultados obtenidos del módulo de elasticidad equivalente de todos los sistemas suelo-columnas simulados.

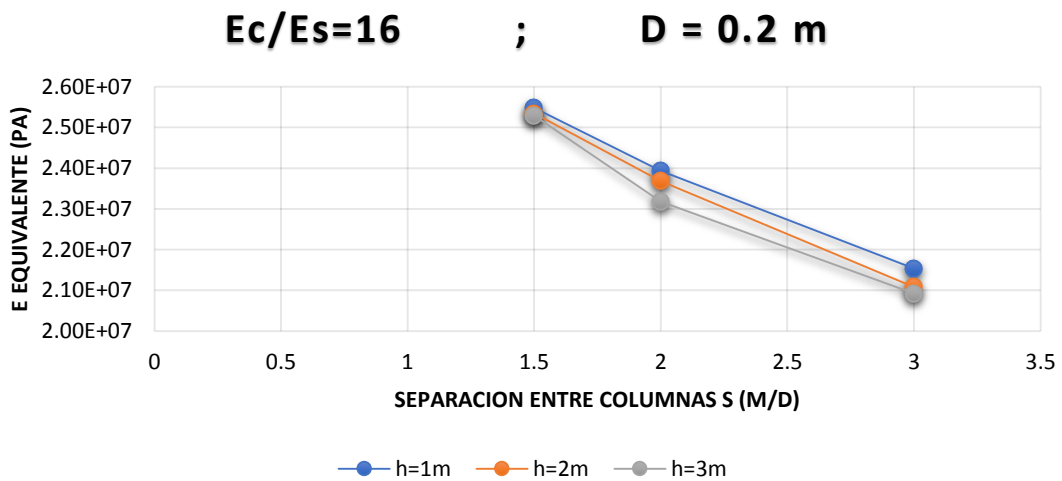


Figura 66 – Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=16$ y $D=0.2$ m

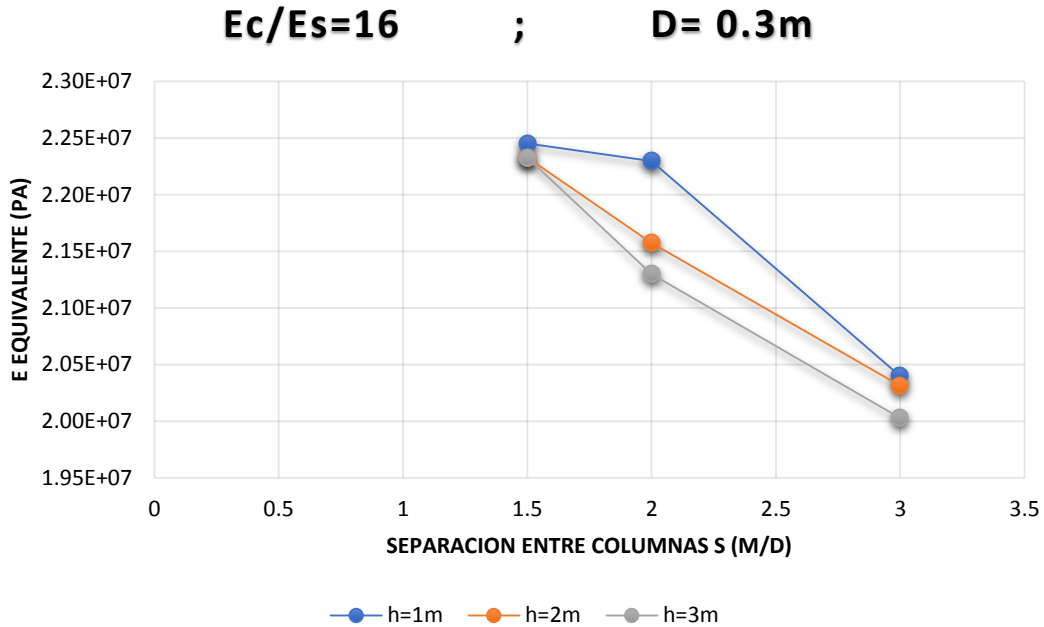


Figura 67 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=16$ y $D=0.3m$

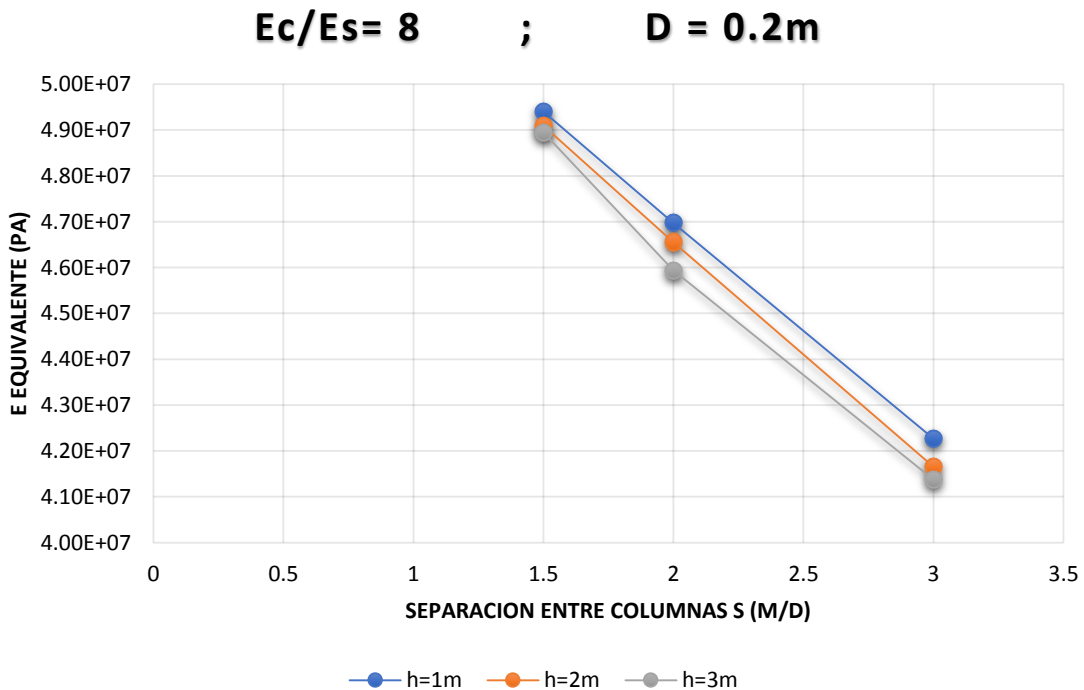


Figura 68 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=8$ y $D=0.2m$

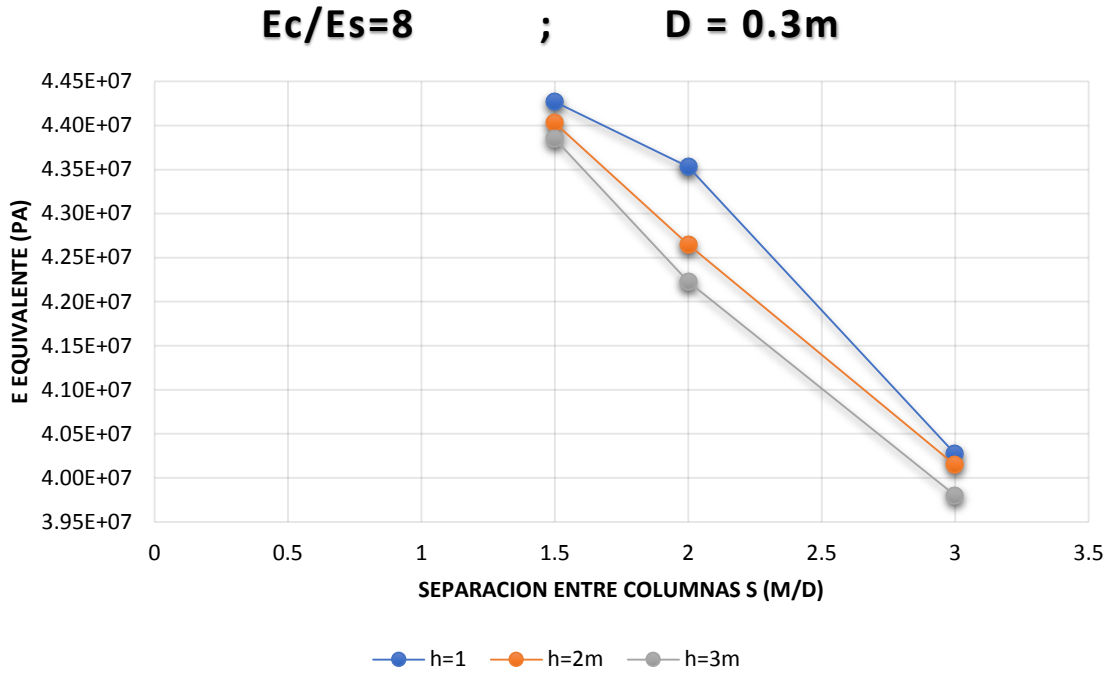


Figura 69 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=8$ y $D=0.3\text{m}$

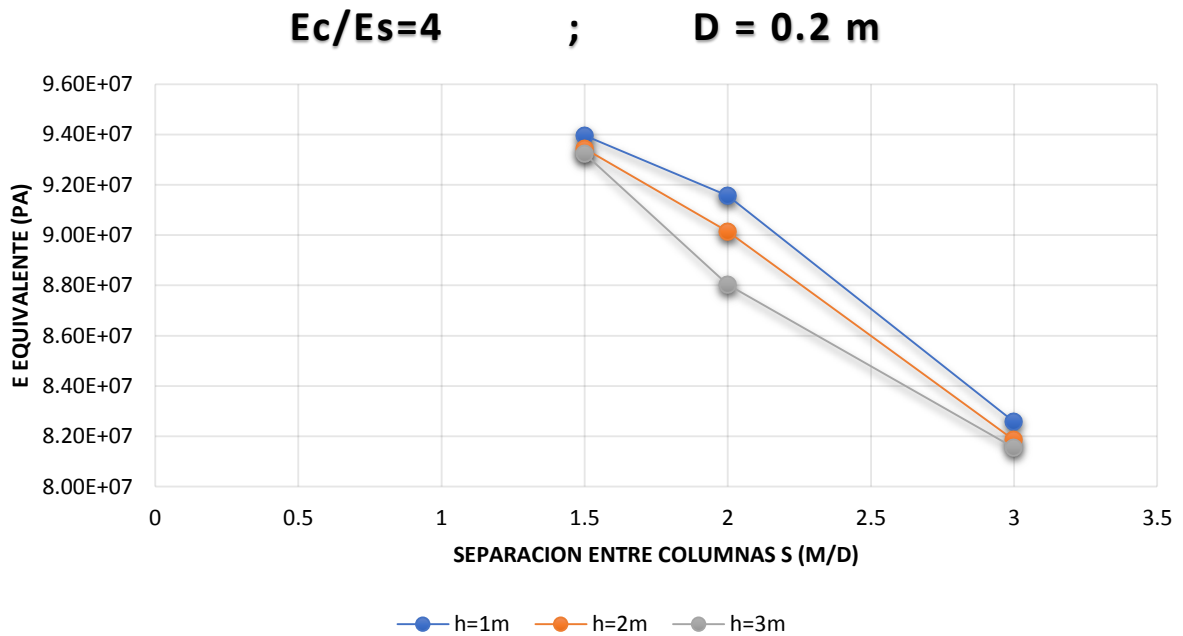


Figura 70 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=4$ y $D=0.2\text{m}$

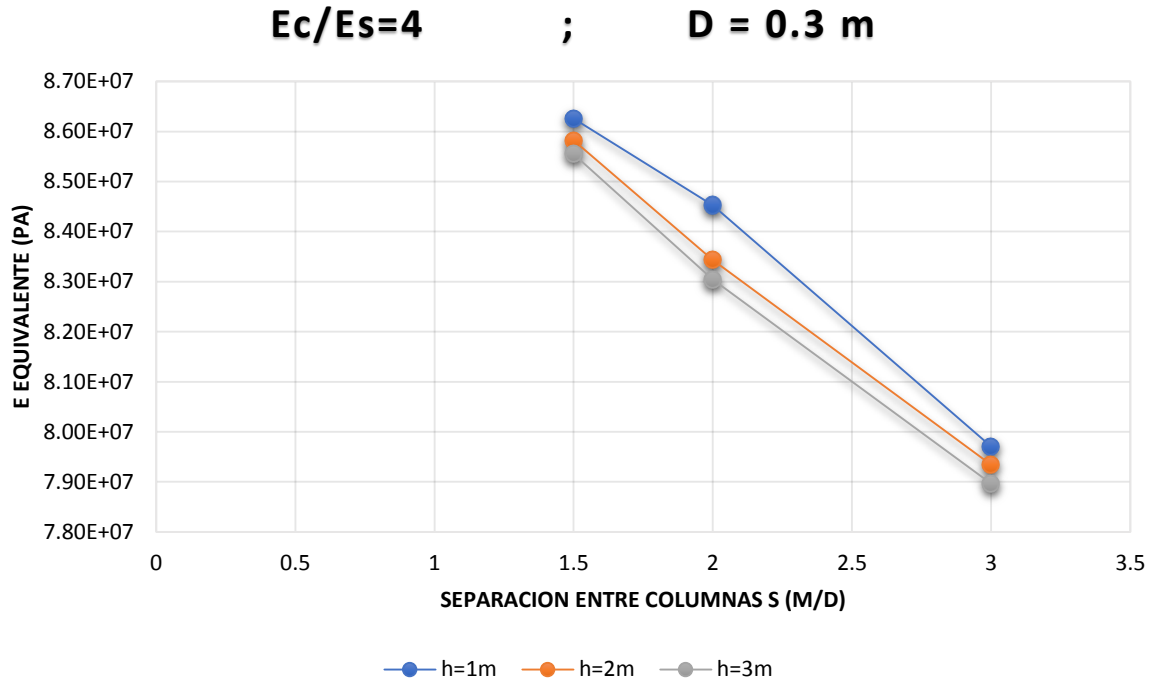


Figura 71 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=4$ y $D=0.3\text{m}$

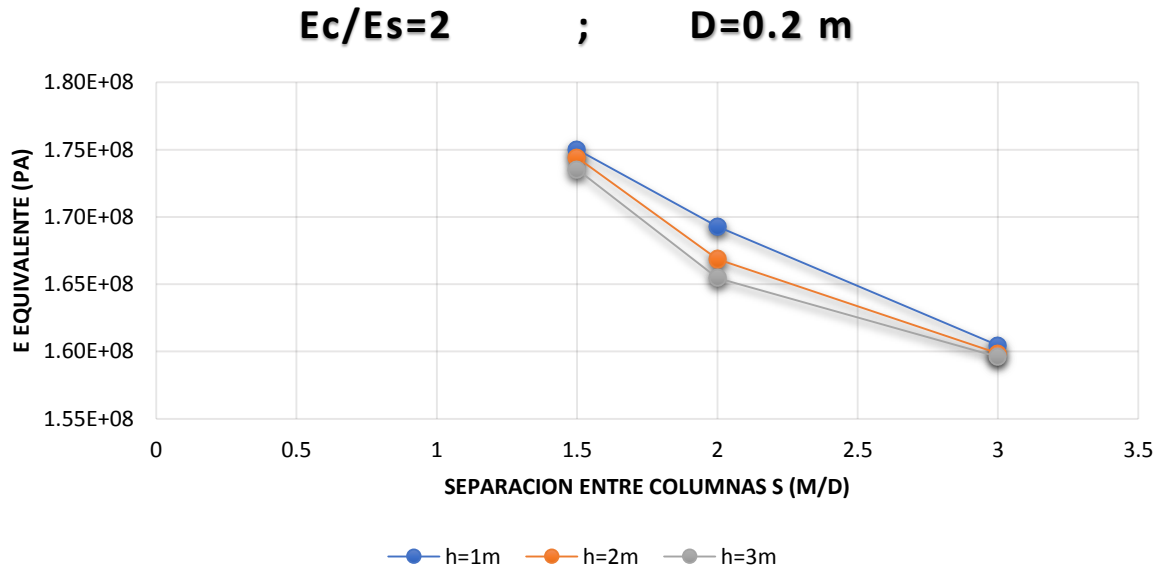


Figura 72 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=2$ y $D=0.2\text{m}$

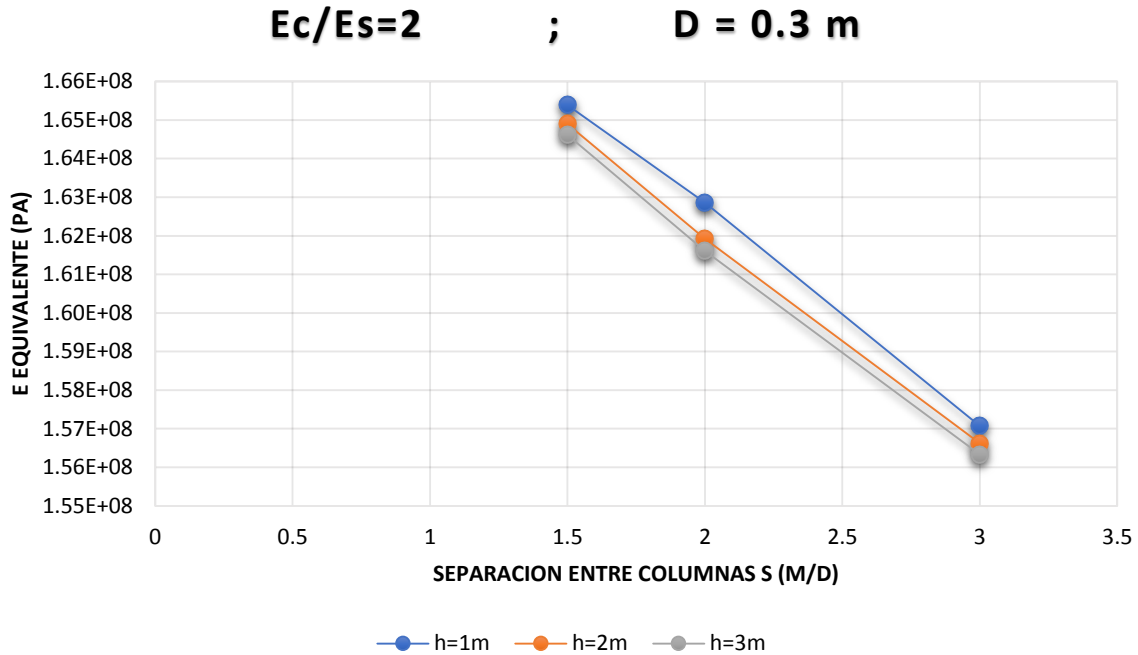


Figura 73 - Modulo de elasticidad equivalente en función de la separación centro a centro de las columnas de grava cuando $E_c/E_s=2$ y $D=0.3\text{m}$

Los anteriores resultados obtenidos se expresan en las figuras 74 y 75 agrupados por modelos de igual diámetro, y relacionando el módulo de elasticidad equivalente en función del módulo de elasticidad del suelo natural.

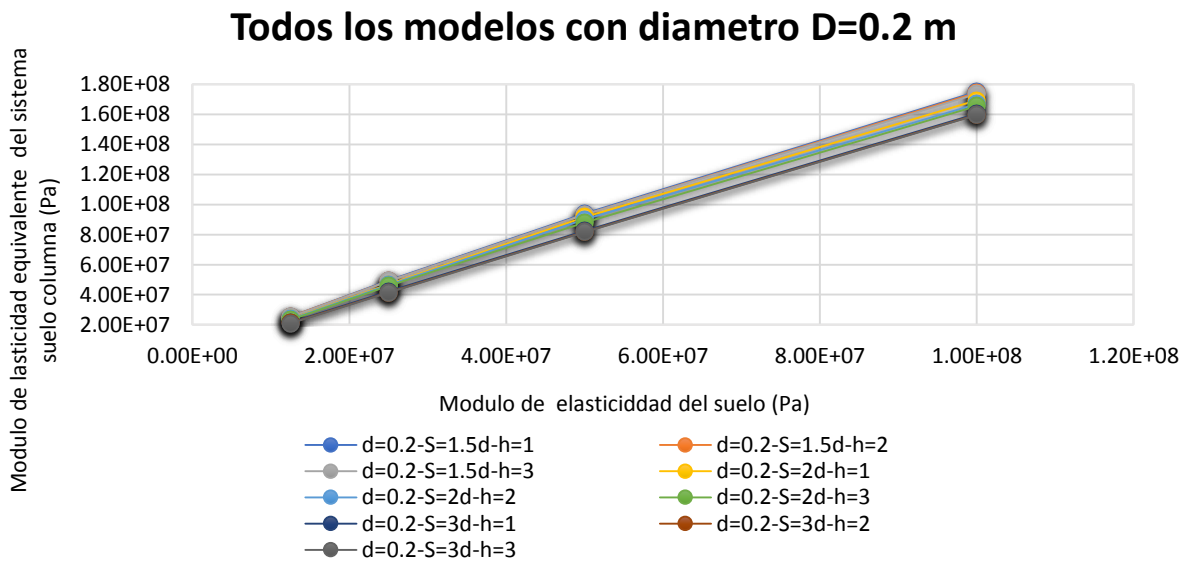


Figura 74 – Modulo de elasticidad equivalente en función del módulo de elasticidad del suelo para todos los modelos de diámetro $D=0.2\text{m}$

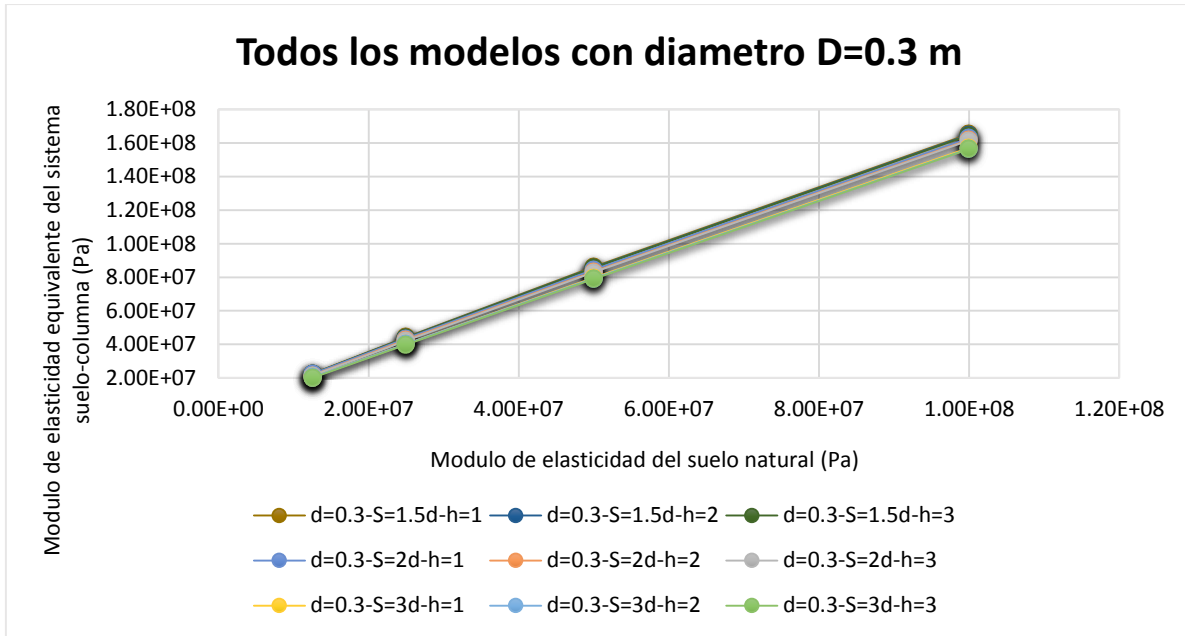


Figura 75 - Modulo de elasticidad equivalente en función del módulo de elasticidad del suelo para todos los modelos de diámetro $D=0.3m$

4.3 RESULTADOS DE DIAGRAMAS DE CONTRONO DE ÍNTERES EN 2D.

Por último, se presentan algunos diagramas de contorno de interés, en las figuras desde la 76 a la 82, los cuales son de gran utilidad para conocer mejor el comportamiento del sistema bidimensional.

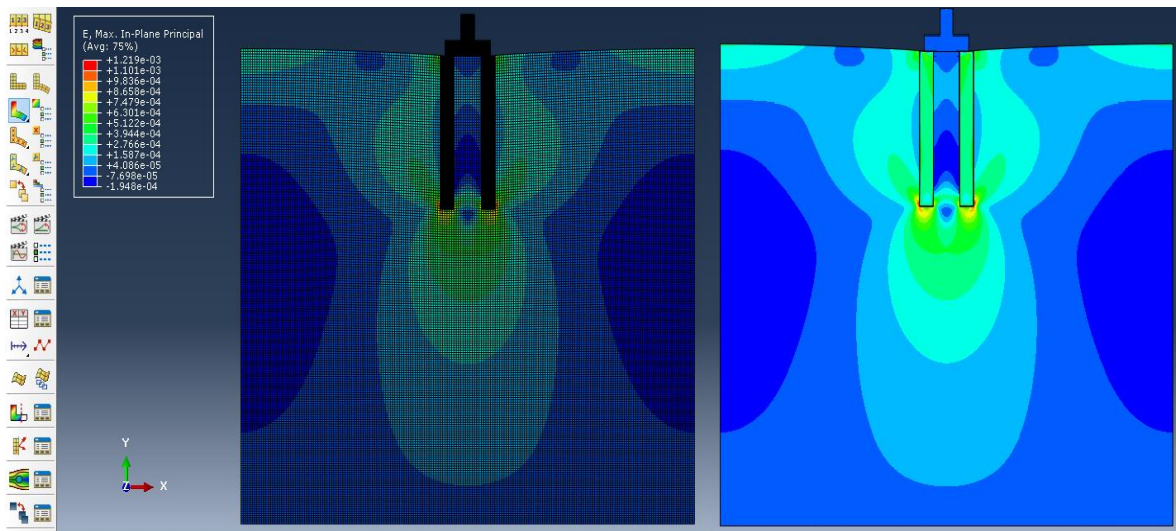


Figura 76 – Magnitud de la deformación unitaria en 2D

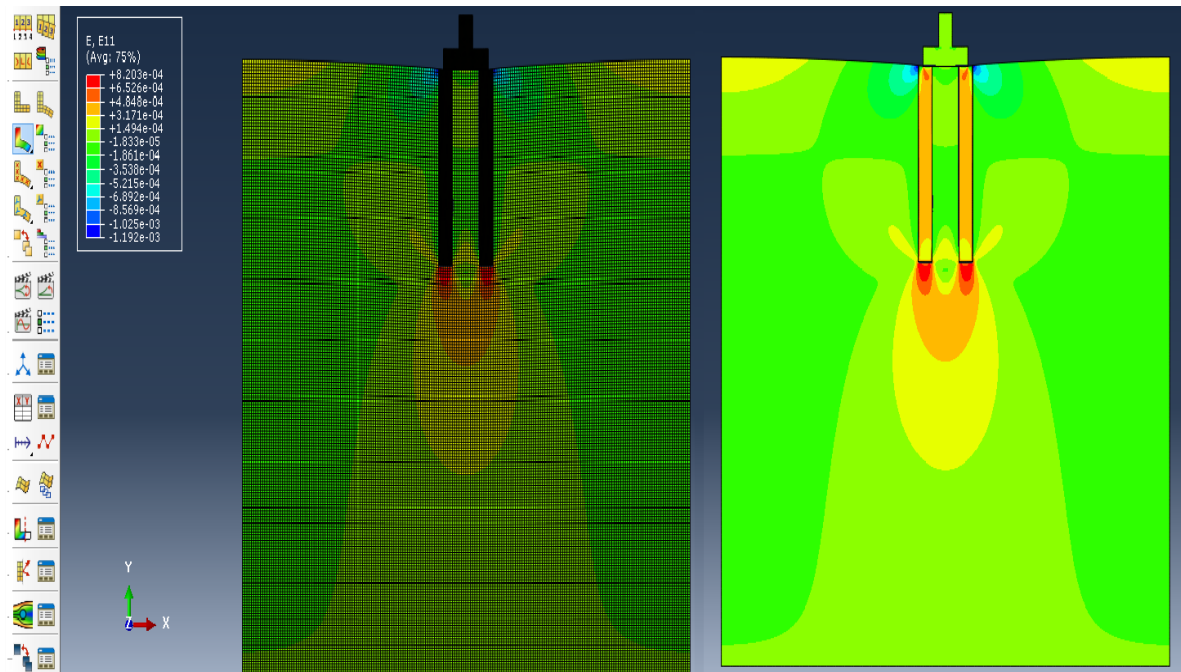


Figura 77 – Deformación unitaria en x en 2D

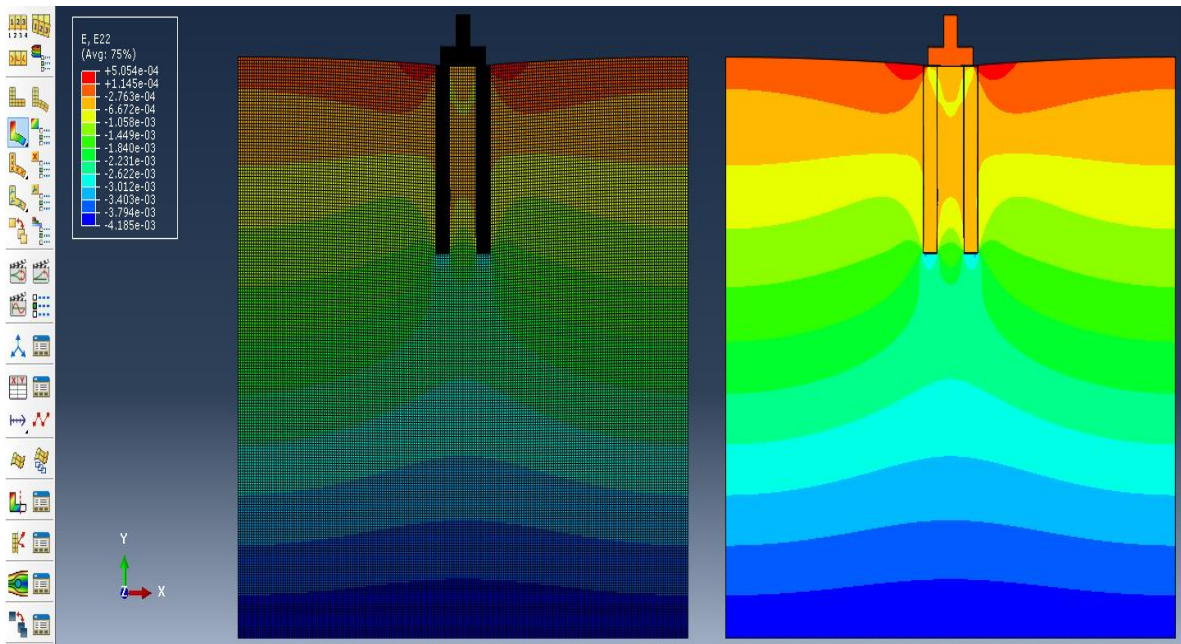


Figura 78 – Deformación unitaria en y en 2D

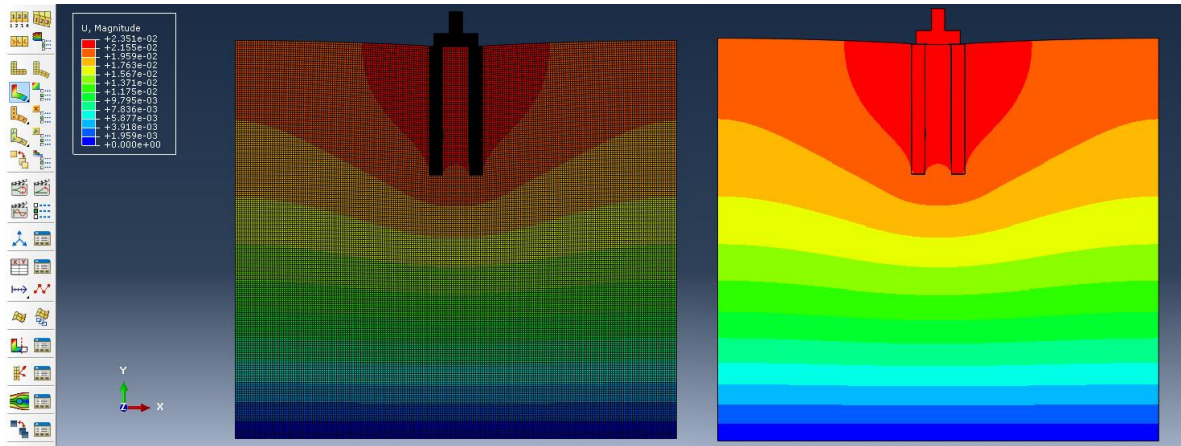


Figura 79 – Magnitud de desplazamientos en 2D

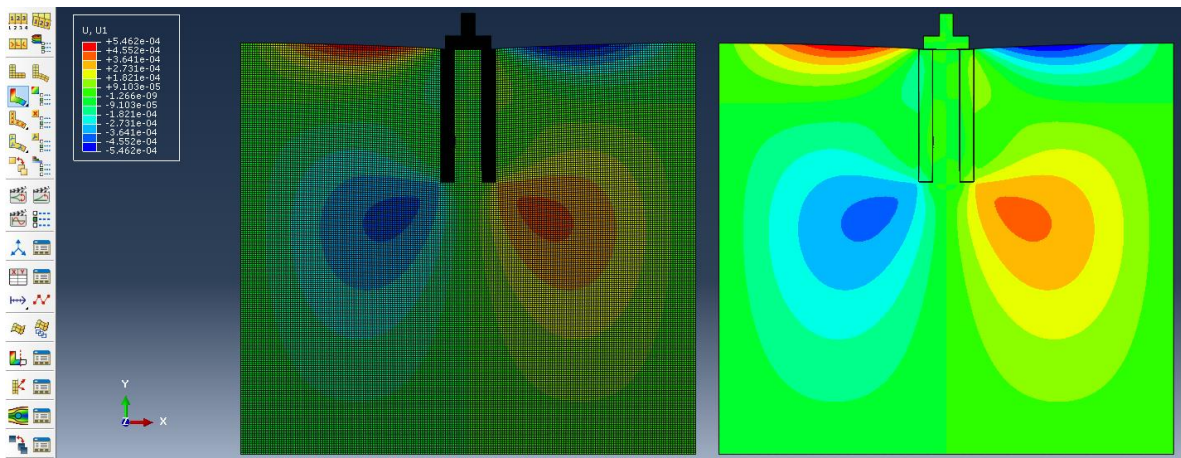


Figura 80 – Desplazamientos en x en 2D

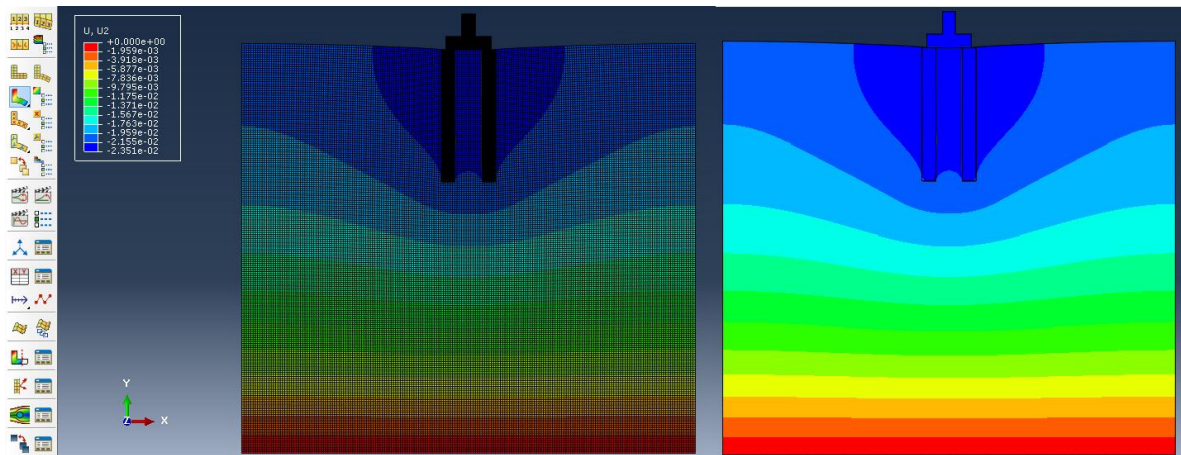


Figura 81 – Desplazamientos en y en 2D

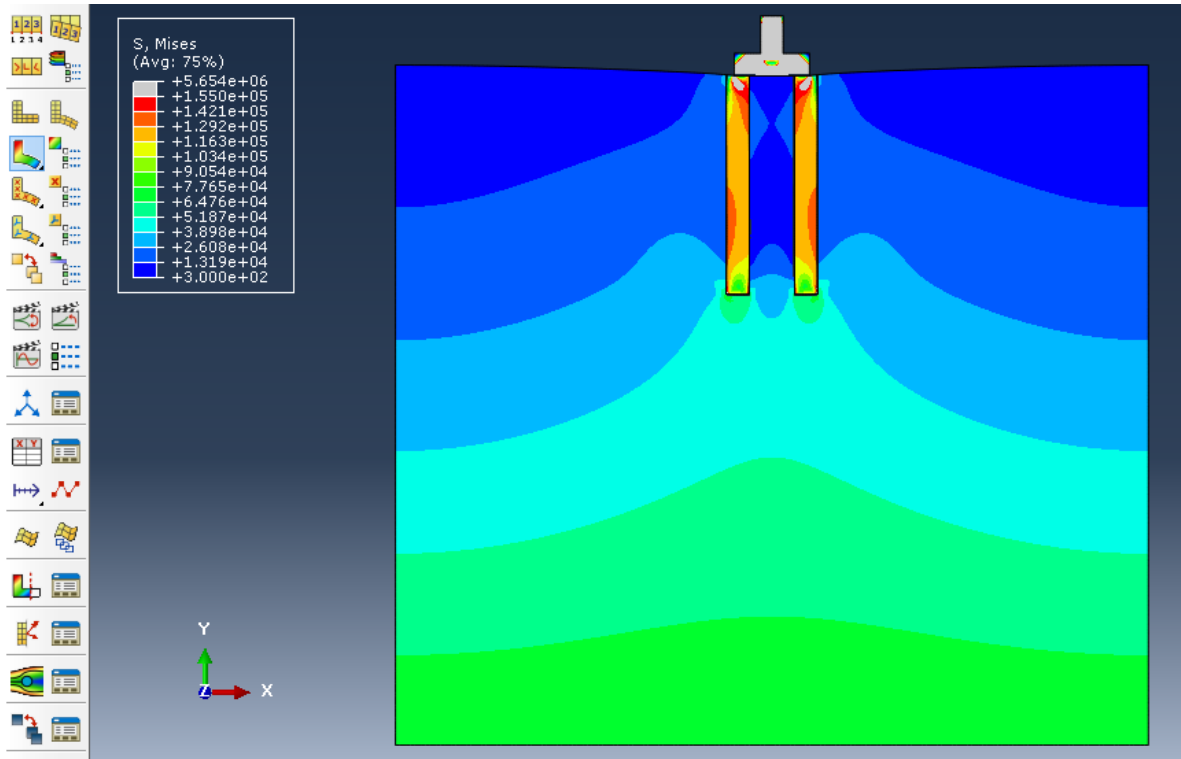


Figura 82 – Esfuerzos de Von Mises en 2D.

RESULTADOS DE MODELACIÓN ELÁSTICA - LINEAL DEL SISTEMA SUELO – COLUMNAS EN 3D

5.1) RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS AL IMPLEMENTAR COLUMNAS DE GRAVA.

En la figura 83 se observa la deformación que presenta el sistema una vez aplicadas las cargas, la cual como era de esperarse es más pronunciada en el área que representa la zapata cuadrada de 2m X 2m, cabe aclarar que la deformación mostrada a continuación no es tan grande como se muestra en la figura, es decir que no esta escalada.

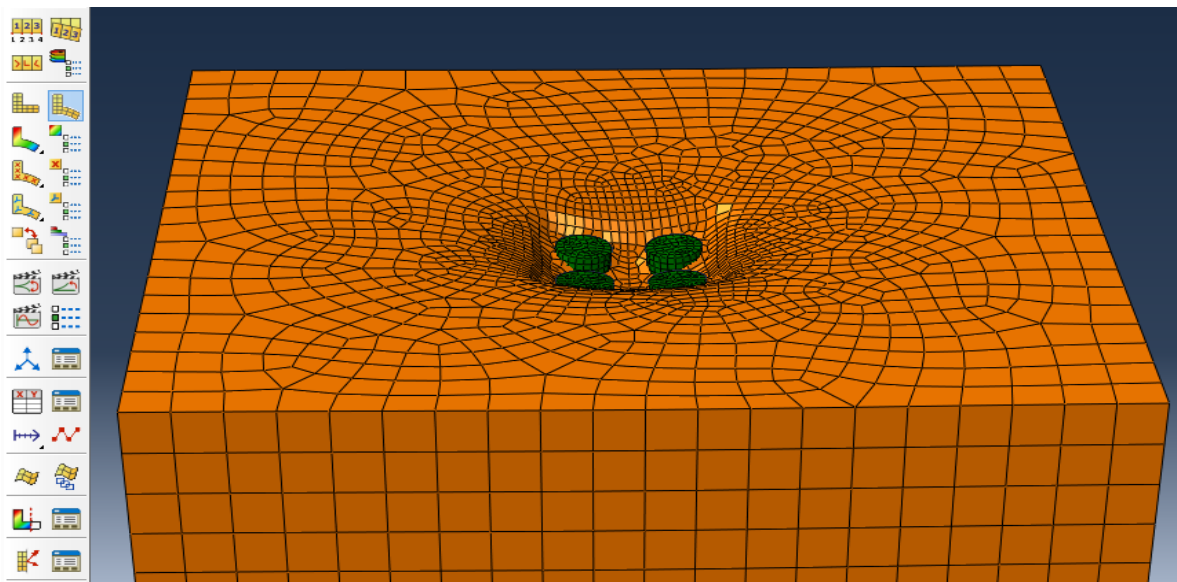


Figura 83 – Deformación debido a la carga superficial en el sistema suelo-columnas

En cada una de las 200 simulaciones se tienen 4 columnas espaciadas a una distancia constante de $S=1\text{m}$, lo que se ve reflejado en el patrón de distribución cuadrado así que las únicas variables que se cambiaron fueron el diámetro de la columna y su profundidad. En este análisis tridimensional, para cada uno de los

modelos se ejecutaron 2 simulaciones, una con un módulo de elasticidad de 12.5 MPa y otro con un módulo de elasticidad de 100 MPa además de fijar un comportamiento rugoso entre superficies que se encuentren interactuando en el modelo, lo que significa una adherencia completa entre superficies en contacto. En las tablas 7 y 8 se muestran los valores que se obtuvieron de desplazamiento verticales medidos en metros en el punto de interés

Tabla 7 – Resultados de desplazamiento vertical medido en metros en el punto de interés para un módulo de elasticidad del suelo de 12.5 MPa con rugosidad absoluta entre las superficies en contacto

MODULO DE ELASTICIDAD DEL SUELO E = 12.5 MPa					
Diámetro columnas (m)	Altura columnas (H) [m]				
	2	3	4	6	8
0.3	1.259E-02	1.225E-02	1.205E-02	1.191E-02	1.186E-02
0.4	1.197E-02	1.138E-02	1.109E-02	1.083E-02	1.073E-02
0.6	1.070E-02	9.844E-03	9.389E-03	8.933E-03	8.715E-03
0.8	9.474E-03	8.527E-03	7.987E-03	7.386E-03	7.054E-03
1	8.488E-03	7.544E-03	6.964E-03	6.284E-03	5.868E-03

Tabla 8 – Resultados de desplazamiento vertical medido en metros en el punto de interés para un módulo de elasticidad del suelo de 100 MPa con rugosidad absoluta entre las superficies en contacto

MODULO DE ELASTICIDAD DEL SUELO E=100 MPa					
Diámetro columnas (m)	Altura columnas [m]				
	2	3	4	6	8
0.3	1.750E-03	1.742E-03	1.739E-03	1.739E-03	1.738E-03
0.4	1.710E-03	1.700E-03	1.701E-03	1.697E-03	1.697E-03
0.6	1.650E-03	1.633E-03	1.627E-03	1.623E-03	1.621E-03
0.8	1.576E-03	1.548E-03	1.538E-03	1.530E-03	1.527E-03
1	1.489E-03	1.452E-03	1.437E-03	1.426E-03	1.422E-03

Cada uno de los anteriores resultados de las tablas 5 y 6, se va a comparar con el respectivo valor de desplazamiento en el mismo punto, pero obtenido de una medición de un suelo sin mejorar según corresponda de acuerdo al valor del módulo de elasticidad del suelo, dichos resultados se muestran en la tabla 7 los cuales tienen unas unidades de metros (m)

Tabla 9 – Desplazamientos verticales de referencia, obtenidos del modelo sin columnas

DESPLAZAMIENTO VERTICAL (m)	
MODULO DE ELASTICIDAD (MPa)	SIN COLUMNAS
12.5	1.426E-02
100	1.782E-03

Con base en los resultados de la tabla 5 y comparando cada dato con el valor de desplazamiento de la primera fila de la tabla 7, se obtuvieron 2 gráficas de interés, la primera es la figura 84, donde se puede observar la mejoraría del desplazamiento vertical cuando se implementan las columnas de grava, en este caso se determinó que la mayor reducción en cuanto al asentamiento elástico fue de 58.8%, la cual se dio cuando se tenían las columnas con el mayor diámetro simulado que fue de D=1m y las mayores profundidades con un valor de H=8m

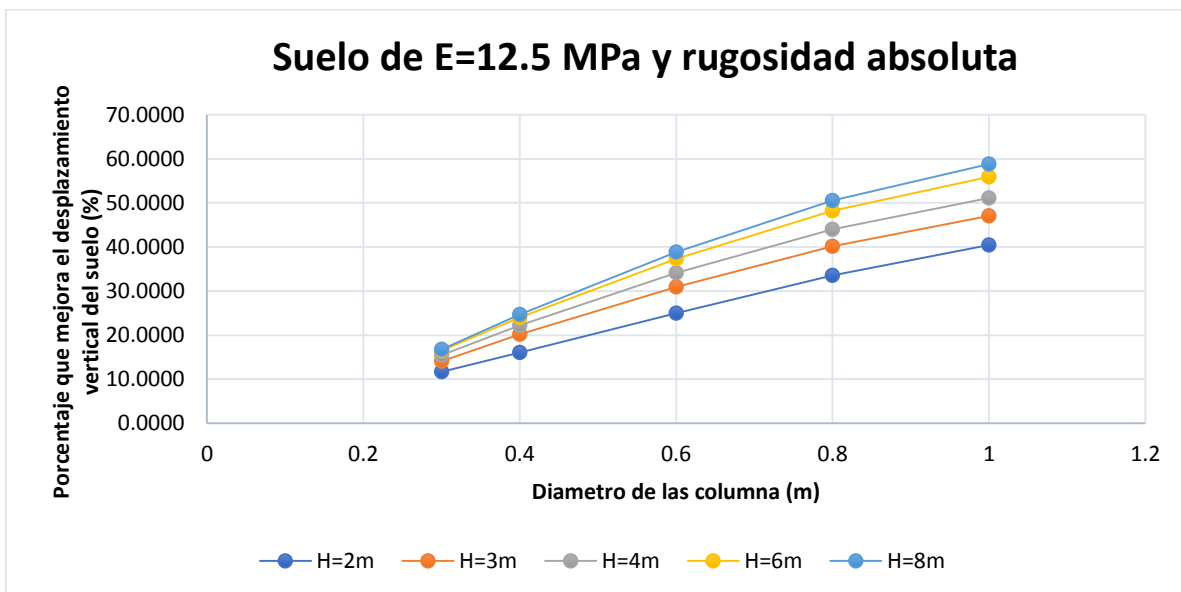


Figura 84 – Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs diámetro de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de E=12.5 MPa y rugosidad absoluta entre las superficies en interacción.

En la figura 85, se graficó el porcentaje que se reduce el desplazamiento vertical vs la altura de las columnas, cada una de las curvas en esta figura, representa un mismo diámetro, aquí se puede observar que si se deja fijo el valor del diámetro y se va aumentando la altura de las columnas no representa una mejora tan

significativa como el que se puede observar en la figura 84 al ir incrementando el diámetro de las columnas.

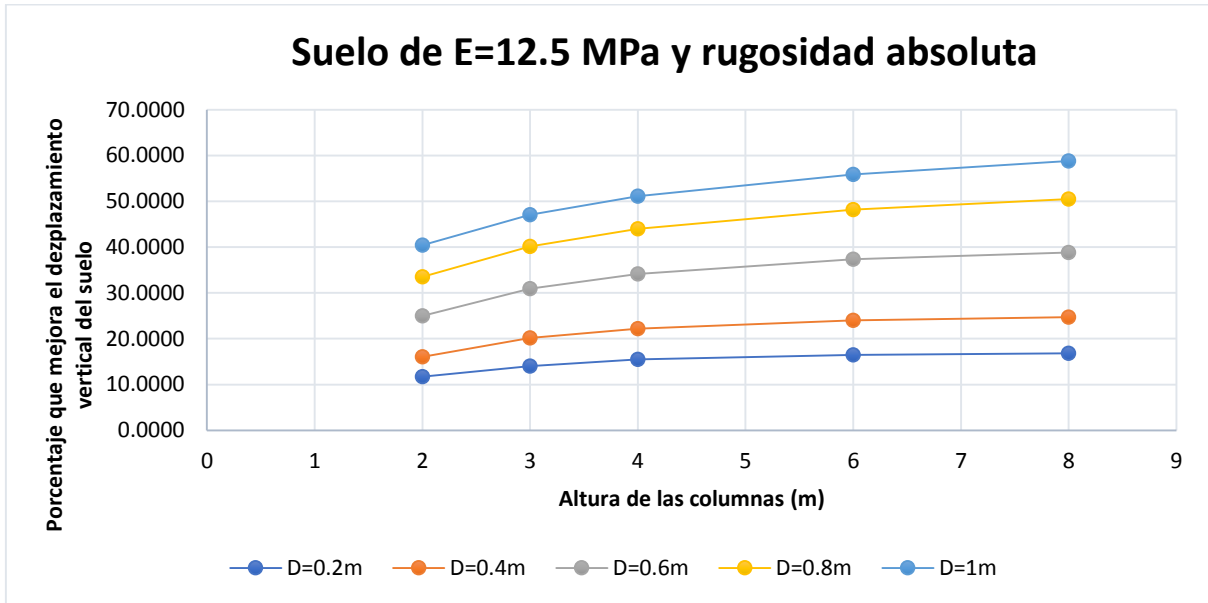


Figura 85 – Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs altura de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa y rugosidad absoluta entre las superficies en interacción.

De manera análoga, se realizaron las figuras 86 y 87, donde se hicieron las mismas gráficas, solo que ahora con un suelo de módulo de elasticidad de $E=100$ MPa.

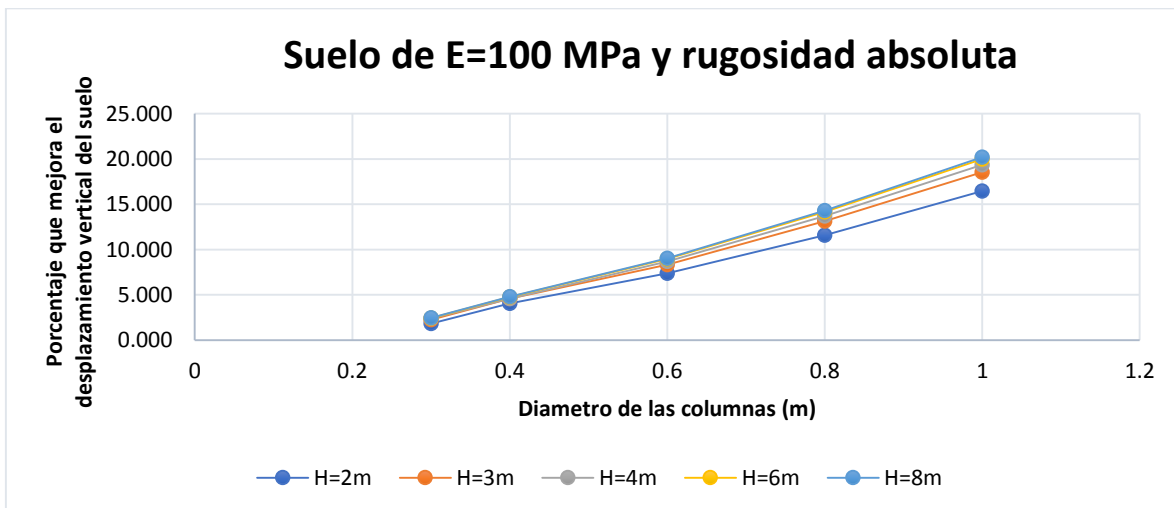


Figura 86 – Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs diámetro de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E=100$ MPa y rugosidad absoluta entre las superficies en interacción.

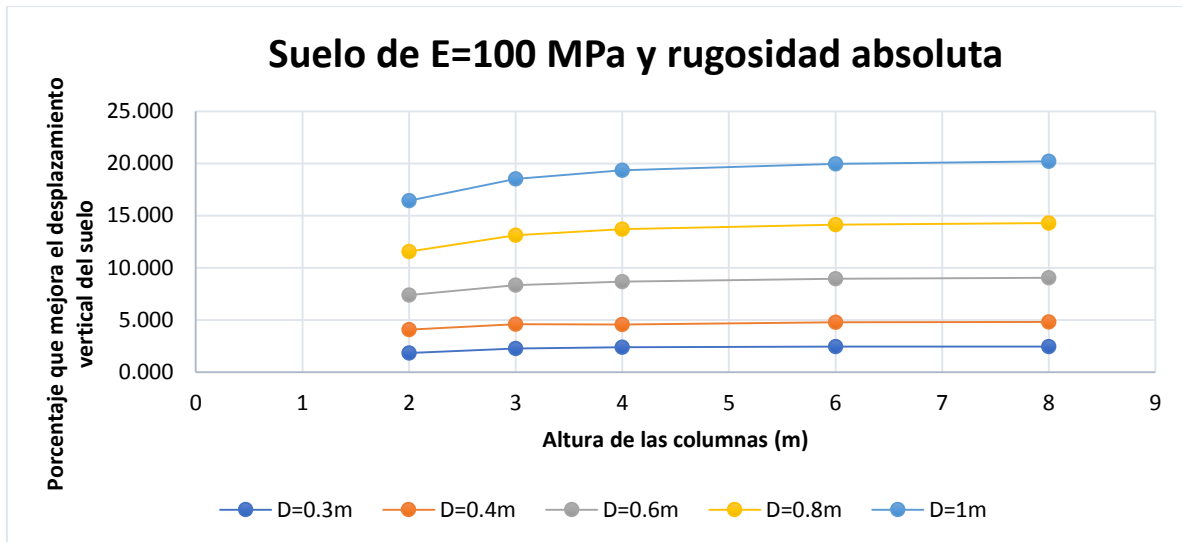


Figura 87 – Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs altura de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E= 100$ MPa y rugosidad absoluta entre las superficies en interacción.

De acuerdo a las gráficas 86 y 87 se puede observar que el mayor porcentaje de mejora fue de 20.2% el cual corresponde a las columnas de diámetro $D=1$ m y altura $H=8$ m.

Ahora, utilizando un procedimiento semejante, se realizaron las mismas anteriores simulaciones, calculando desplazamientos verticales en el punto de interés, pero ahora con un coeficiente de rugosidad entre superficies de $\mu=0.5$. En la tabla 7 y 8 se presentan los valores obtenidos en estas otras 100 modelaciones.

Tabla 10 – Resultados de desplazamiento vertical medido en metros en el punto de interés para un módulo de elasticidad del suelo de 12.5 MPa con coeficiente de rugosidad entre las superficies en contacto de $\mu=0.5$

MODULO DE ELASTICIDAD DE 12.5 MPa					
Diámetro de columnas (m)	Altura de columnas (m)				
	2	3	4	6	8
0.3	1.336E-02	1.322E-02	1.308E-02	1.301E-02	1.299E-02
0.4	1.314E-02	1.307E-02	1.260E-02	1.244E-02	1.237E-02
0.6	1.243E-02	1.195E-02	1.141E-02	1.140E-02	1.123E-02
0.8	1.153E-02	1.102E-02	1.071E-02	1.034E-02	1.020E-02
1	1.035E-02	9.987E-03	9.685E-03	9.290E-03	8.850E-03

Tabla 11 -- Resultados de desplazamiento vertical medido en metros en el punto de interés para un módulo de elasticidad del suelo de 100 MPa con coeficiente de rugosidad entre las superficies en contacto de $\mu=0.5$

MODULO DE ELASTICIDAD DE 100 Mpa					
Diámetro de columnas (m)	Altura de columnas (m)				
	2	3	4	6	8
0.3	1.771E-03	1.790E-03	1.792E-03	1.796E-03	1.797E-03
0.4	1.779E-03	1.773E-03	1.782E-03	1.787E-03	1.789E-03
0.6	1.795E-03	1.794E-03	1.819E-03	1.816E-03	1.824E-03
0.8	1.819E-03	1.822E-03	1.837E-03	1.869E-03	1.908E-03
1	1.853E-03	1.906E-03	1.948E-03	2.015E-03	2.050E-03

Con base en las dos anteriores tablas (10 y 11), se realizaron cuatro gráficas de interés, en las figuras 88 y 89 se puede observar que el suelo desmejoro en comparación con las figuras 84 y 85 respectivamente, ya que el mayor valor de reducción del asentamiento fue de 37.92%, sin embargo, se puede notar nuevamente que es más significativo aumentar el diámetro de las columnas que su altura ya que así se obtienen mayores reducciones del asentamiento. Por otro parte, en la figura 90 y 91 se puede observar que el asentamiento en el suelo en vez de disminuir, aumento, es decir que se empeoro el sistema suelo-columnas bajo las condiciones de un coeficiente de rugosidad de 0.5, el valor más alto que se presento fue un desmejoramiento de -15%, el cual fue para un diámetro de $D=0.8$ m y una altura de $H=8$ m, a continuación, se muestran las figuras mencionadas.

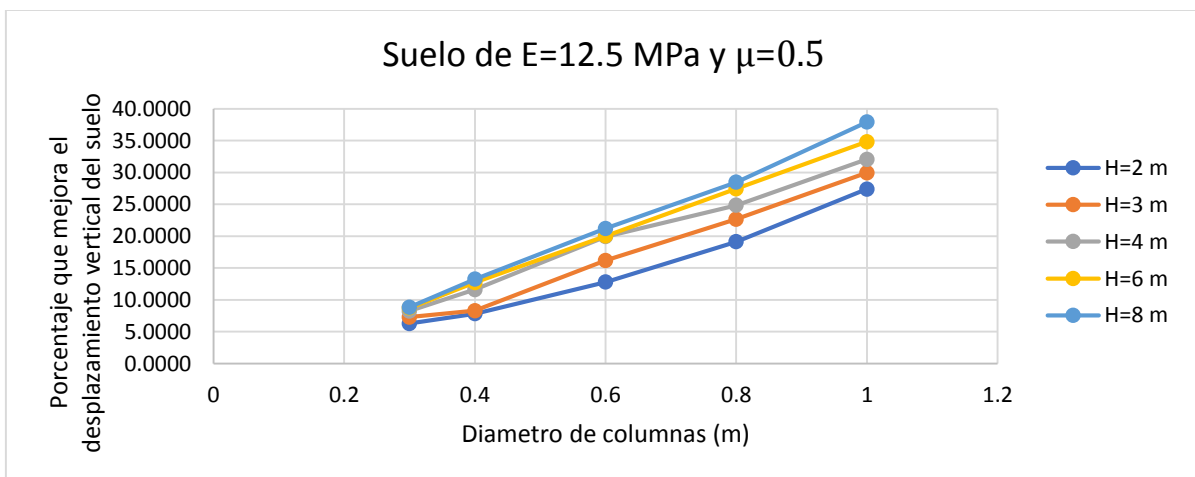


Figura 88 - Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs diámetro de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa y coeficiente de rugosidad entre las superficies en interacción de $\mu=0.5$

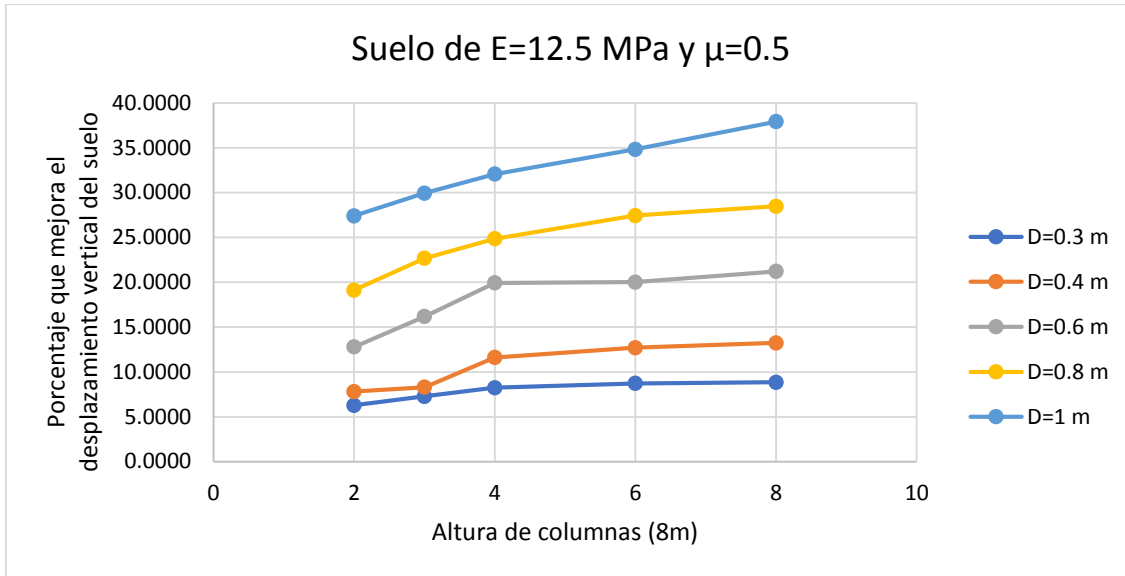


Figura 89 - Porcentaje de reducción del desplazamiento vertical vs altura de las columnas para un suelo de módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa y coeficiente de rugosidad entre las superficies en interacción de $\mu=0.5$

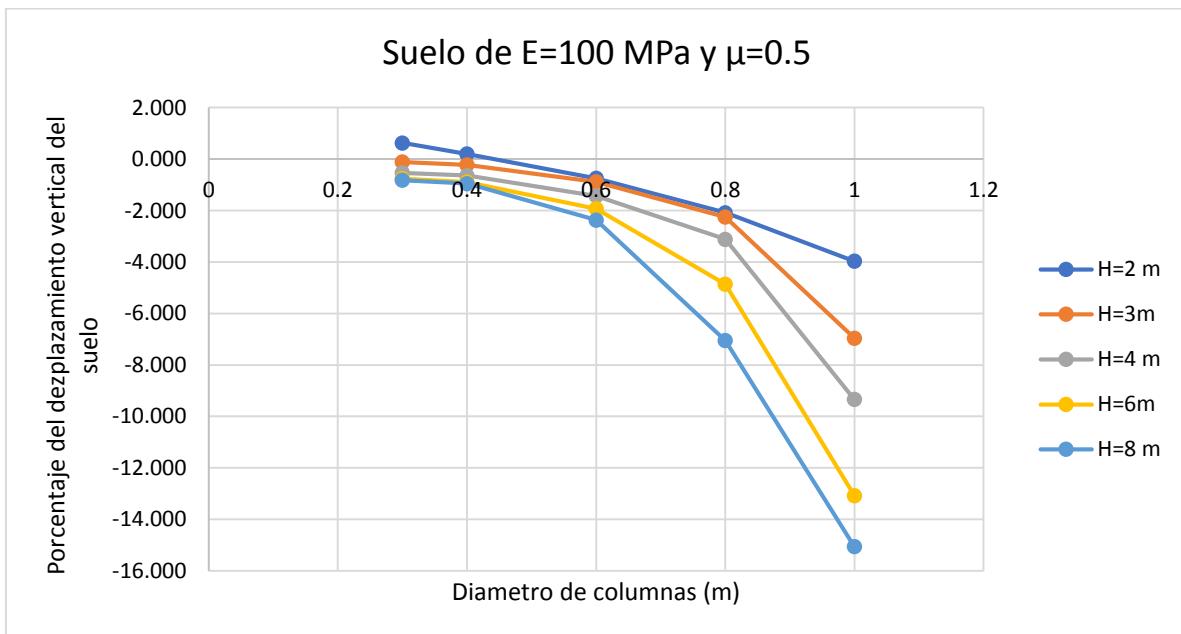


Figura 90 – Porcentaje de desplazamiento vertical del suelo vs diámetro de columnas (m)

Para obtener la figura 91, se dejaron constantes los valores del diámetro y se fue variando la altura, con lo que se obtuvo la gráfica que se muestra a continuación.

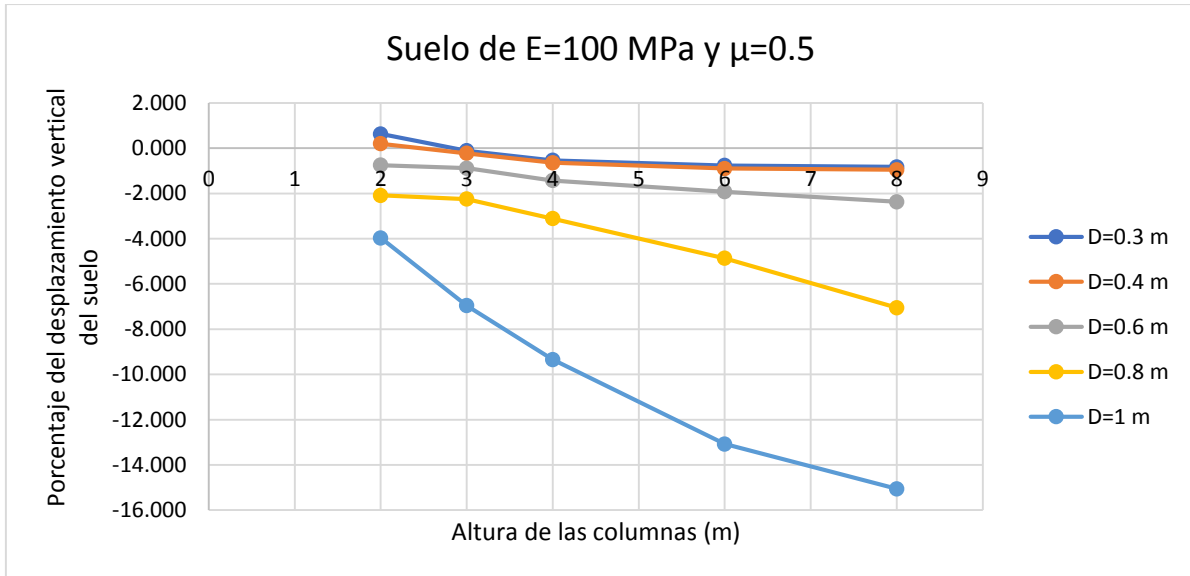


Figura 91 – Porcentaje del desplazamiento vertical del suelo vs altura de las columnas (m)

5.2 DIAGRAMAS DE CONTORNO DE INTERÉS OBTENIDOS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.

A continuación, se presentan algunos diagramas de contorno de interés de uno de los 200 resultados que se obtuvieron, que será el de un diámetro de 0.8m con una altura de columna de 8 m para un suelo de módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa, donde se va a poder verificar parte de los resultados que se han obtenido en diferentes estudios de manera experimental.

Se puede evidenciar en la figura 92 como las columnas asumen la mayor parte de la carga que se está aplicando como era de esperarse por el alto valor de su rigidez en comparación con el del suelo.

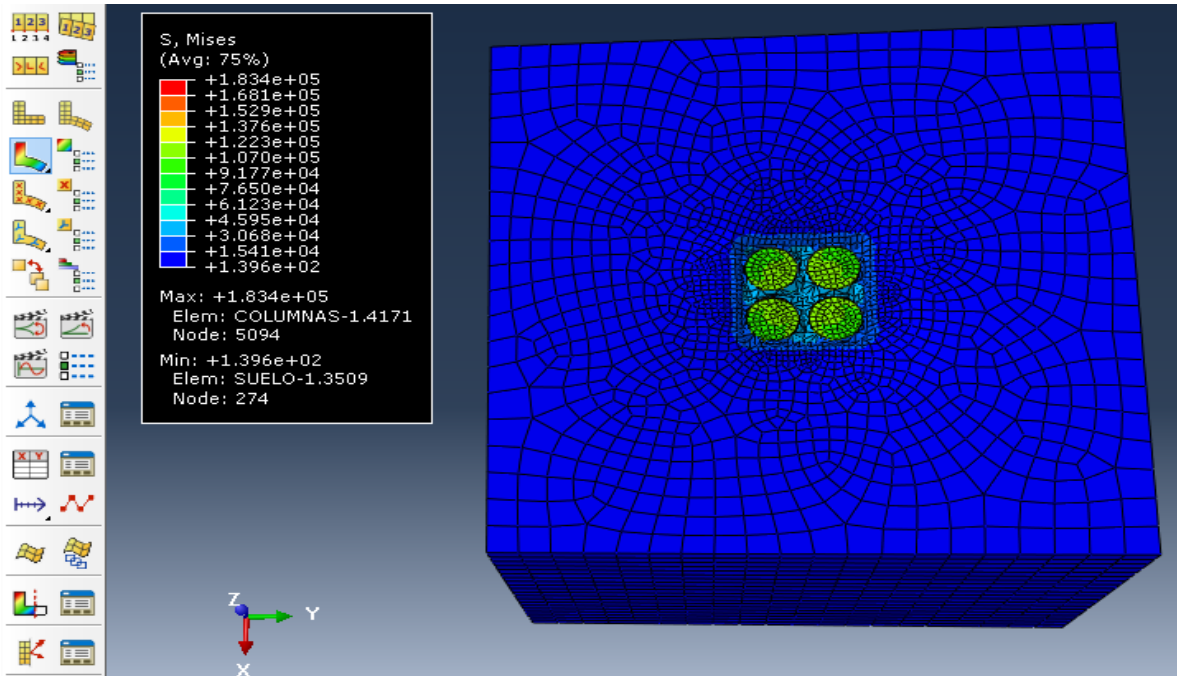


Figura 92 – Esfuerzos de Von Mises observados en la parte superior del sistema

En la figura 93, se observan más detalladamente los esfuerzos de Von Mises en el sistema, para esto se hizo un corte con ayuda de un plano paralelo a YZ por toda la mitad de un par de columnas, aquí se observa que los mayores esfuerzos están cerca de la superficie así que es donde se presenta la mayor disipación de energía.

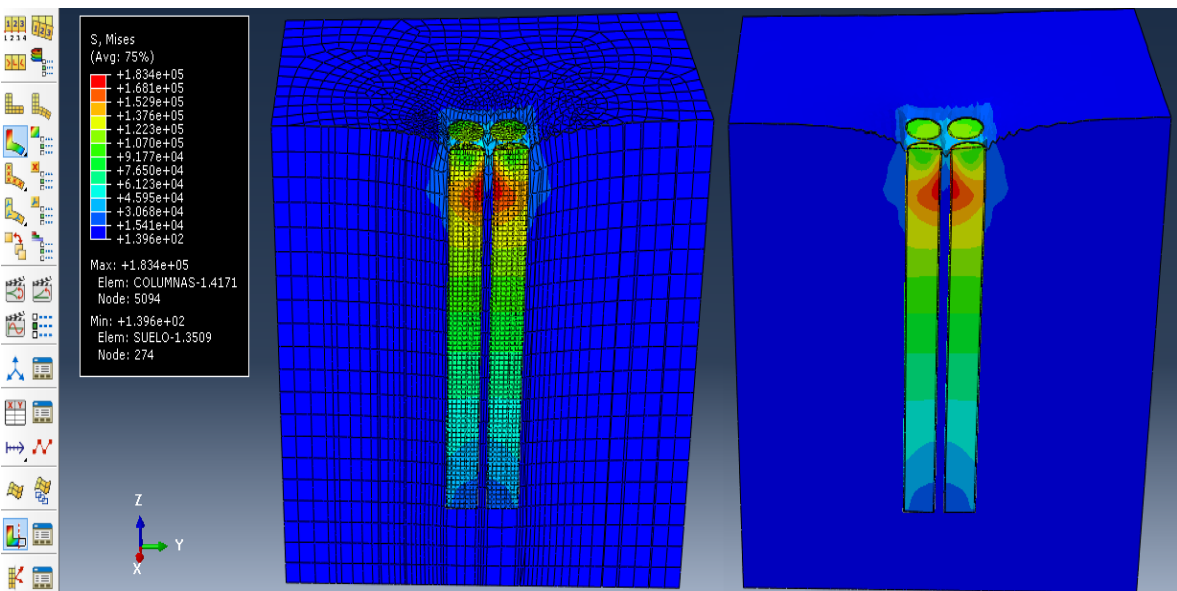


Figura 93 – Esfuerzos de Von Mises en el sistema con ayuda de un corte utilizando un plano paralelo a YZ

En las figuras 94 y 95 se presentan los diagramas de contorno del desplazamiento vertical (U_1) y de esfuerzos (S_{11}) ambos a lo largo de la dirección del eje X.

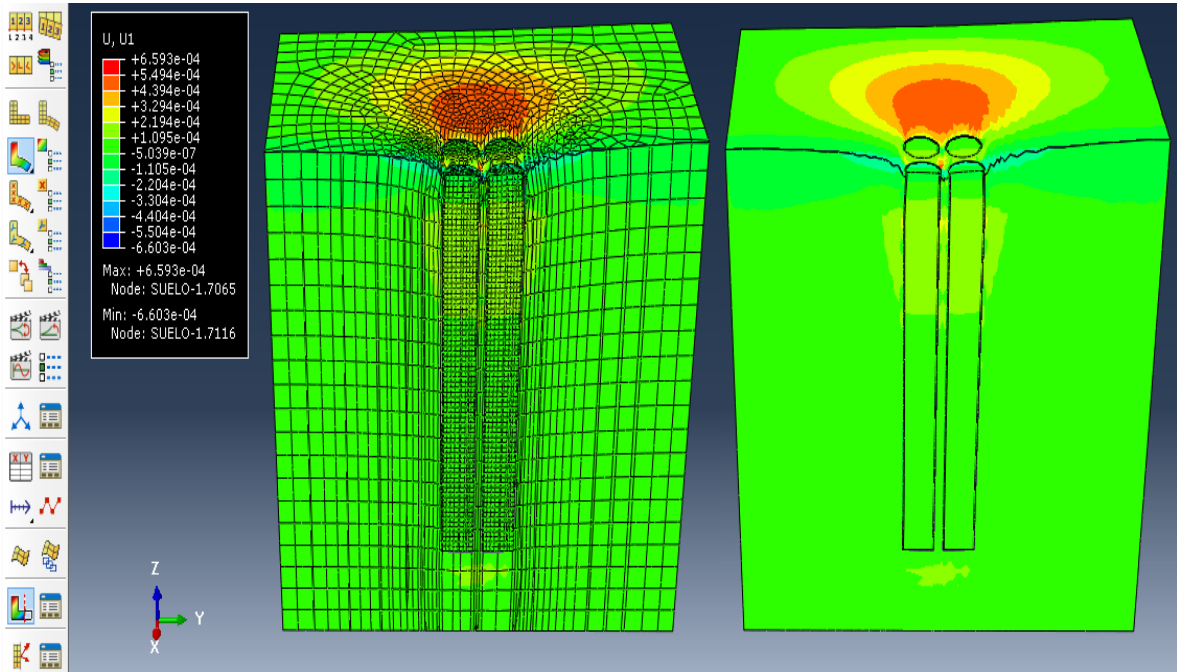


Figura 94 - Diagrama de contorno del desplazamiento vertical (U_1) a lo largo del eje X

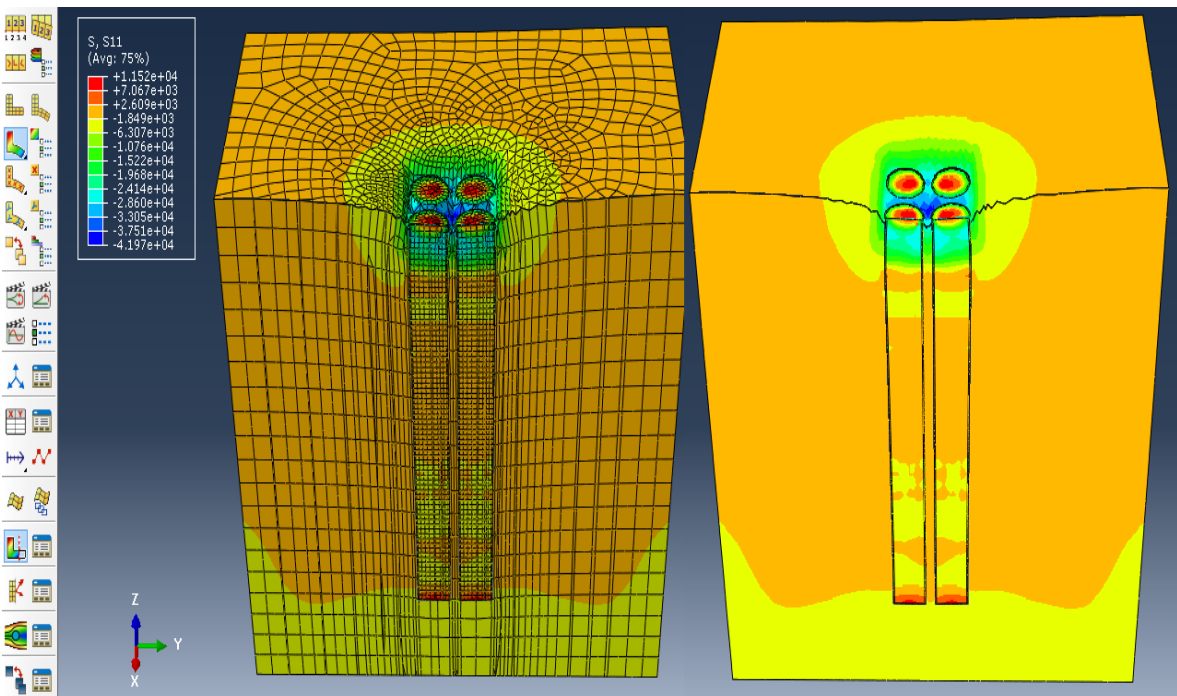


Figura 95 – Diagrama de contorno del esfuerzo a lo largo del eje X (S_{11})

En las figuras 96 y 97 se presentan los diagramas de contorno del desplazamiento vertical (U_2) y de esfuerzos (S_{22}) ambos a lo largo de la dirección del eje Y.

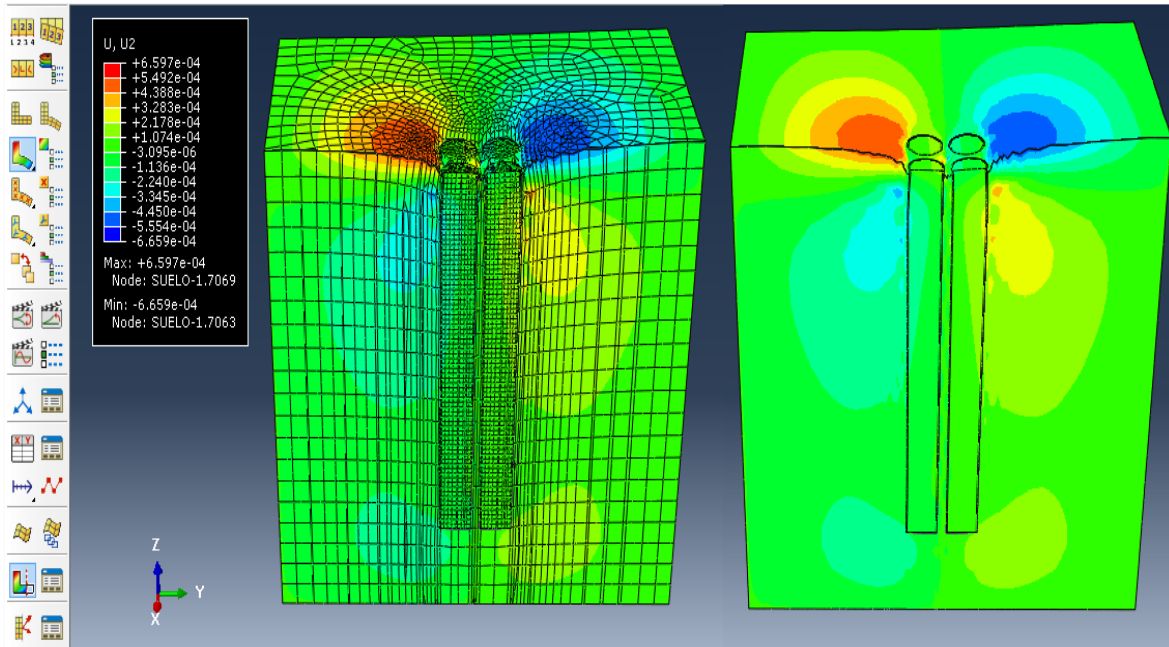


Figura 96 - Diagrama de contorno del desplazamiento vertical (U_2) a lo largo del eje Y

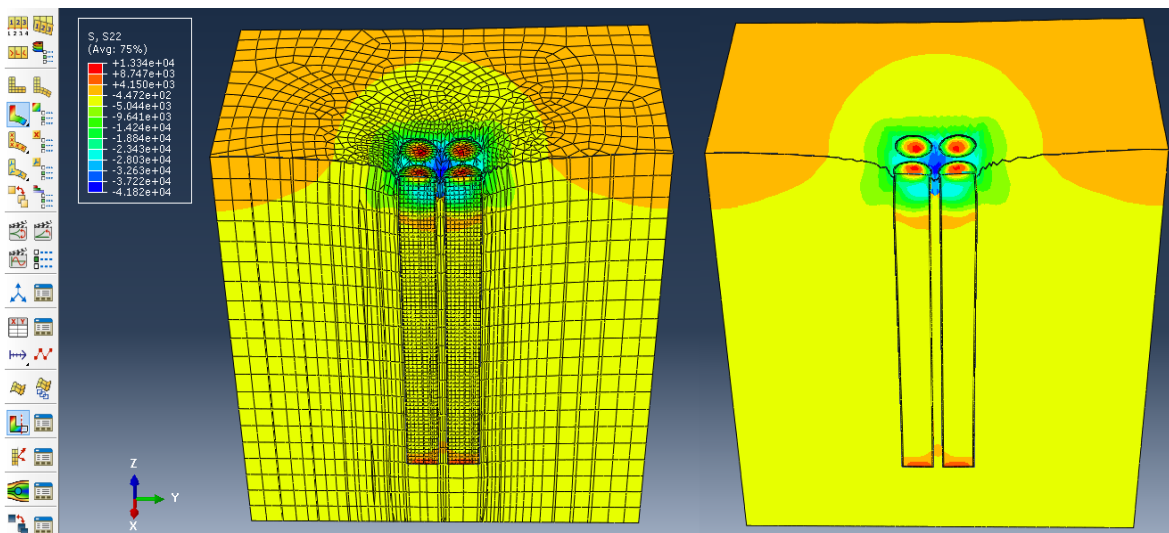


Figura 97 - Diagrama de contorno del esfuerzo a lo largo del eje Y (S_{22})

En las figuras 98 y 100 se presentan los diagramas de contorno del desplazamiento vertical (U_3) y de esfuerzos (S_{33}) ambos a lo largo de la dirección del eje Z.

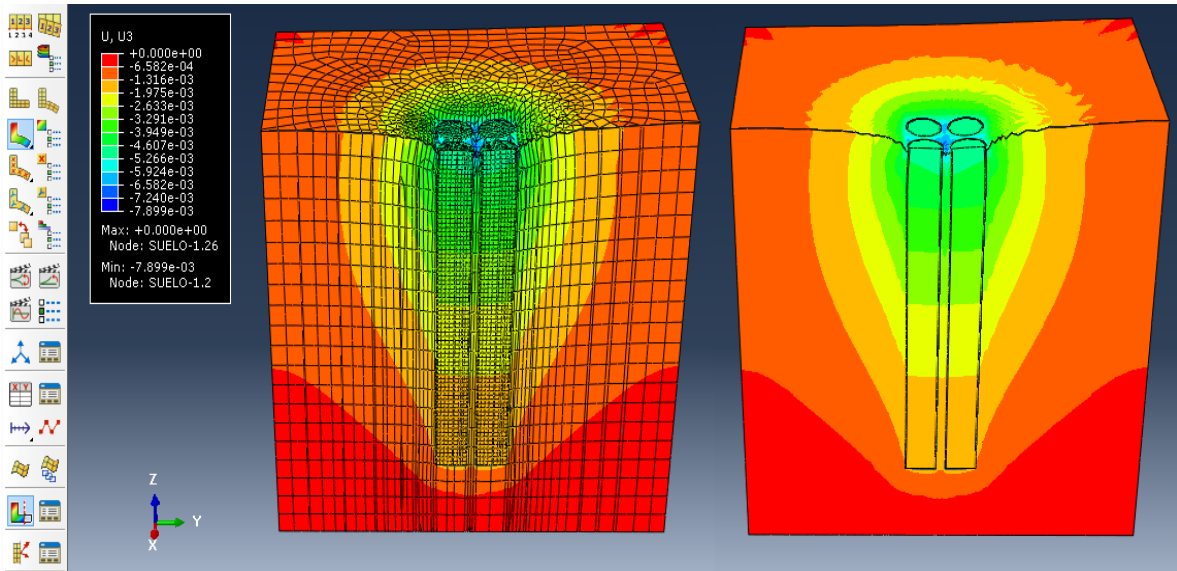


Figura 98 – Diagrama de contorno del desplazamiento vertical (U_3) a lo largo del eje Z

Con el objetivo de examinar más detalladamente el comportamiento de los desplazamientos verticales, se graficó el comportamiento de esta variable en función de la profundidad, para 3 casos específicos, los cuales se presentan en la figura 99.

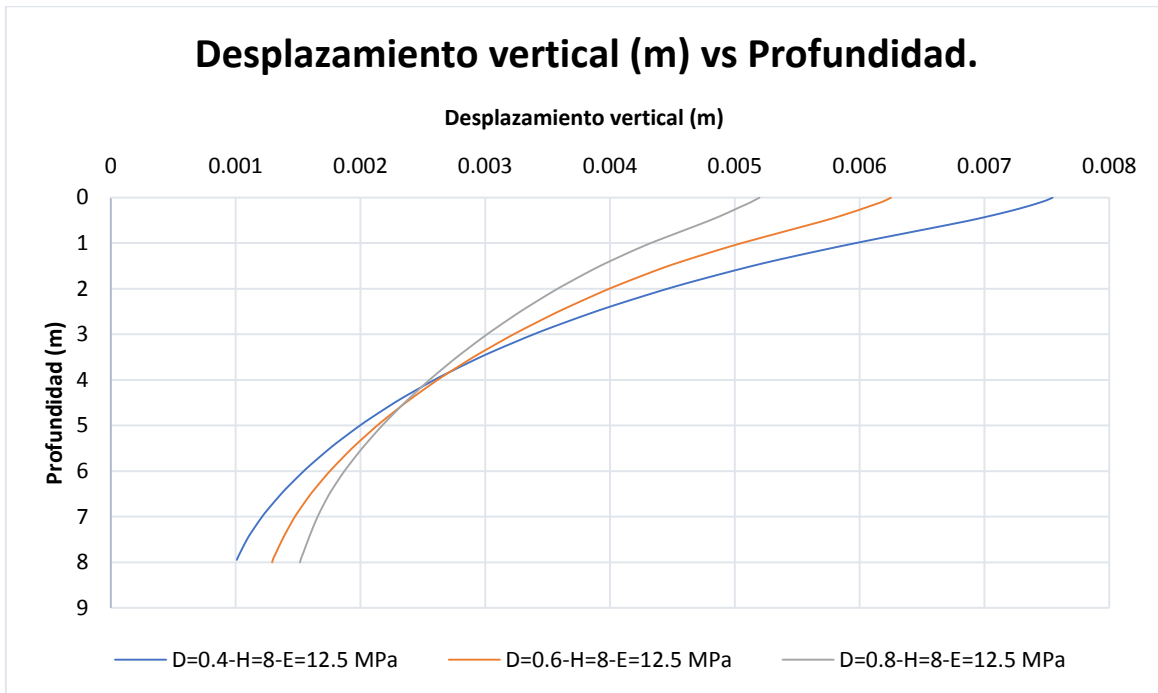


Figura 99 – Desplazamiento vertical (U_3) vs profundidad para 3 modelos.

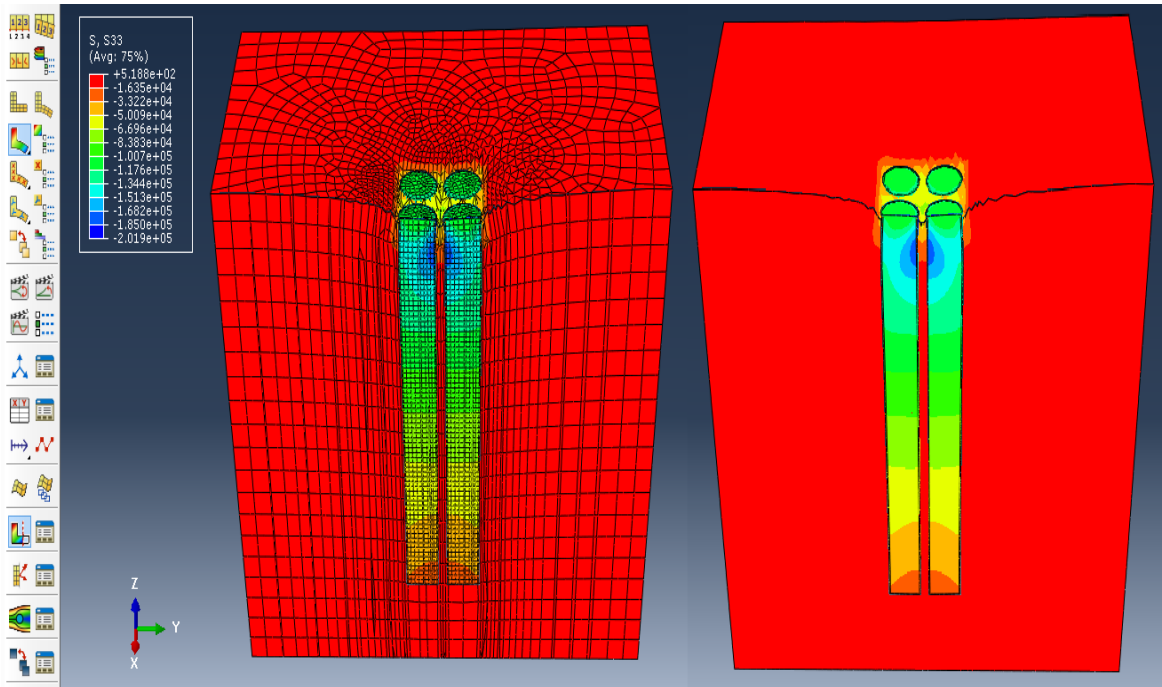


Figura 100 - Diagrama de contorno del esfuerzo vertical a lo largo del eje Z (S_{33})

Por último, se tiene en la figura 101, el diagrama de contorno de las zonas donde se obtuvo la mayor deformación unitaria.

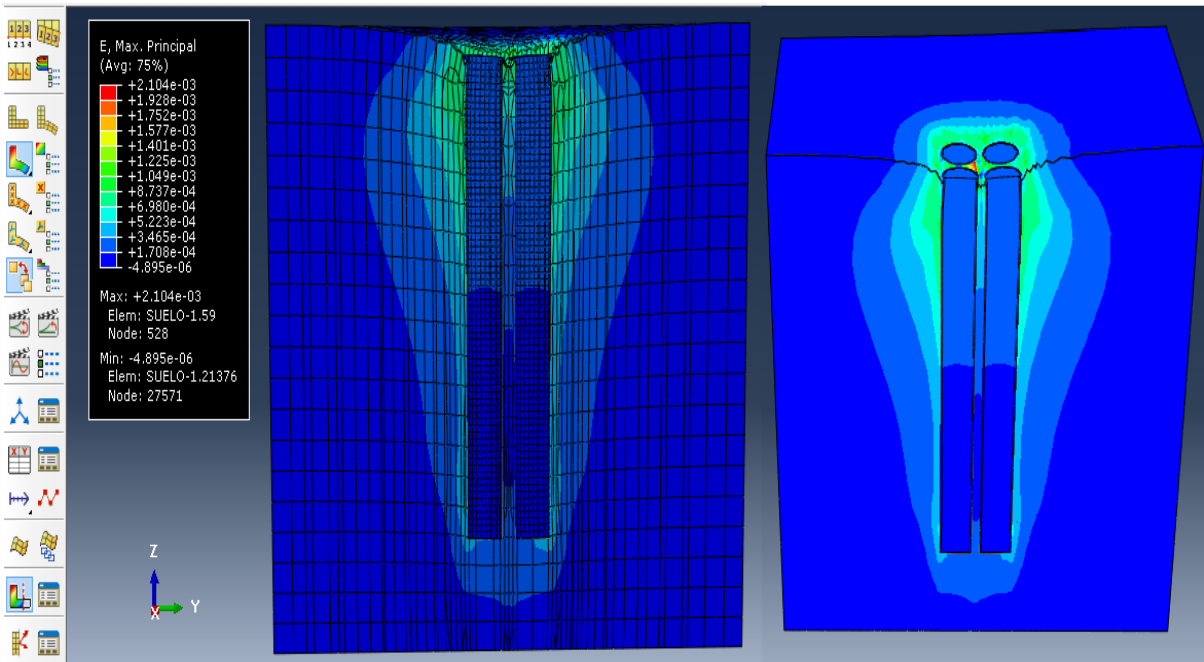


Figura 101 – Diagrama de contorno de las zonas con mayor deformación unitaria (ϵ)

En la figura 102 se puede observar que la zona donde se presenta mayor deformación unitaria está cerca de la superficie, que representa la zona donde las columnas tienen mayor ensanchamiento. Para cuantificar a que profundidad se genera la expansión de las columnas, se obtuvieron datos de la deformación unitaria en función de la profundidad, donde se puede determinar específicamente hasta donde llega el ensanchamiento de las columnas.

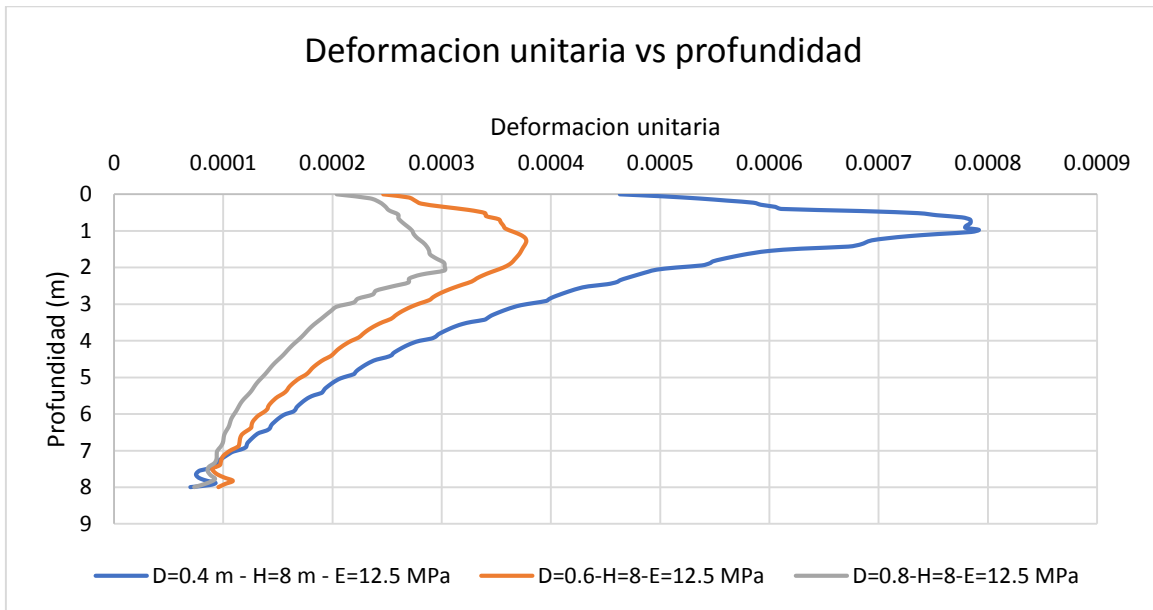


Figura 102 – Deformación unitaria en el suelo vs profundidad en las columnas

Con el objetivo de identificar el rango en cuanto a profundidad al cual se presentaban los mayores esfuerzos que implican el ensanchamiento de la columna, se realizó una gráfica donde se evidencia la variación de los esfuerzos de Von Mises a medida que se va aumentando la profundidad. En la figura 103, se muestran los datos tomados de 3 modelos diferentes, con lo cual se obtuvo lo siguiente.

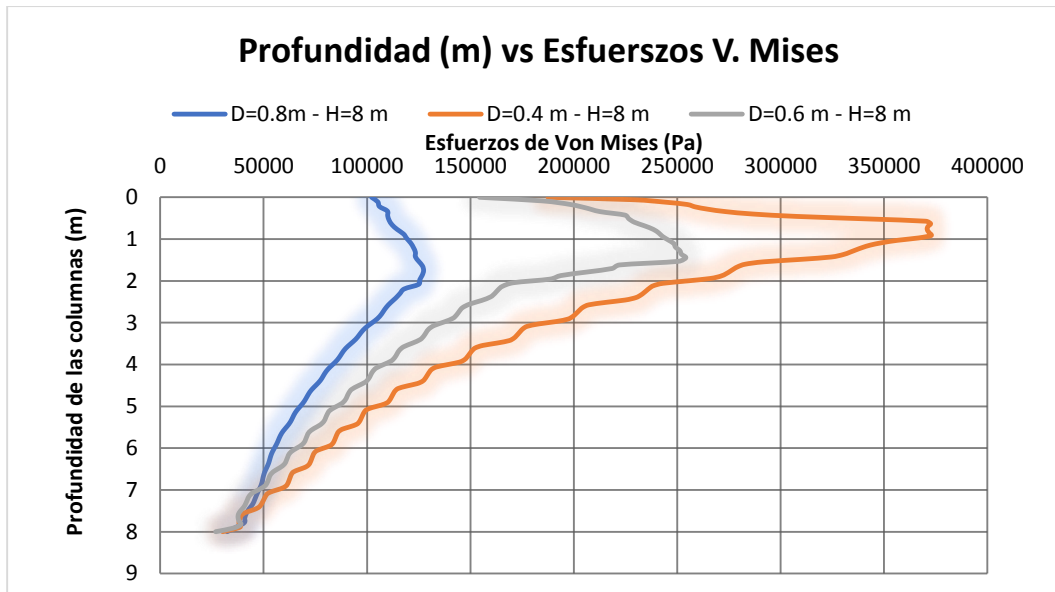


Figura 103 – Esfuerzos de Von Mises (Pa) vs Profundidad (m) para un suelo de $E=12.5$ MPa y rugosidad absoluta.

5.3) RESULTADOS DEL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS MEDIANTE DISEÑO TEÓRICO CON AYUDA DEL SOFTWARE BASADO EN ELEMENTOS FINITOS.

A continuación, en las tablas 12 - 17 se van a mostrar los resultados obtenidos para 6 casos específicos, en donde para cada caso se calculó la relación de asentamientos del suelo tratado con suelo sin tratar, en el siguiente capítulo se hará el análisis respectivo de estos resultados.

Tabla 12 – Calculo teórico de relación de asentamientos (μ_s) caso 1

Módulo de elasticidad del suelo (MPa)	12.5
Rugosidad entre superficies en contacto	Absoluta
Diámetro de columnas (m)	0.8
Altura de columnas (m)	8
Esfuerzo promedio columnas (σ_c) [Pa]	115995.983
Esfuerzo promedio suelo (σ_s) [Pa]	34116.466
Factor de concentración de esfuerzos (n) aproximado	3.4
Área columnas (m^2)	2.011
Área celdas unitarias (m^2)	4
Razón de sustitución (α_r)	0.50275
Relación de asentamientos $\left(\frac{S_{tratado}}{S_{sin\ tratar}} = \mu_s\right)$	45%

Tabla 13 – Calculo teórico de relación de asentamientos (μ_s) caso 2

Módulo de elasticidad del suelo (MPa)	100
Rugosidad entre superficies en contacto	Absoluta
Diámetro de columnas (m)	0.3
Altura de columnas (m)	8
Esfuerzo promedio columnas (σ_c) [Pa]	68178.1016
Esfuerzo promedio suelo (σ_s) [Pa]	41043.4045
Factor de concentración de esfuerzos (n) aproximado	1.66112199
Área columnas (m^2)	0.283
Área celdas unitarias (m^2)	4
Razón de sustitución (a_r)	0.07075
Relación de asentamientos ($\frac{S_{tratado}}{S_{sintratar}} = \mu_s$)	96%

Tabla 14 - Calculo teórico de relación de asentamientos (μ_s) caso 3

Módulo de elasticidad del suelo (MPa)	12.5
Rugosidad entre superficies en contacto	Absoluta
Diámetro de columnas (m)	0.6
Altura de columnas (m)	8
Esfuerzo promedio columnas (σ_c) [Pa]	160511.6486
Esfuerzo promedio suelo (σ_s) [Pa]	46974.075
Factor de concentración de esfuerzos (n) aproximado	3.42
Área columnas (m^2)	1.13
Área celdas unitarias (m^2)	4
Razón de sustitución (a_r)	0.2825
Relación de asentamientos ($\frac{S_{tratado}}{S_{sintratar}} = \mu_s$)	60%

Tabla 15 - Calculo teórico de relación de asentamientos (μ_s) caso 4

Módulo de elasticidad del suelo (MPa)	12.5
Rugosidad entre superficies en contacto	Absoluta
Diámetro de columnas (m)	0.8
Altura de columnas (m)	6
Esfuerzo promedio columnas (σ_c) [Pa]	114540.86
Esfuerzo promedio suelo (σ_s) [Pa]	39844.02143
Factor de concentración de esfuerzos (n) aproximado	2.875
Área columnas (m^2)	2.011
Área celdas unitarias (m^2)	4
Razón de sustitución (a_r)	0.503
Relación de asentamientos ($\frac{S_{tratado}}{S_{sintratar}} = \mu_s$)	51.5%

Tabla 16 - Calculo teórico de relación de asentamientos (μ_s) caso 5

Módulo de elasticidad del suelo (MPa)	12.5
Rugosidad entre superficies en contacto	0.5
Diámetro de columnas (m)	0.8
Altura de columnas (m)	6
Esfuerzo promedio columnas (σ_c) [Pa]	64119.53443
Esfuerzo promedio suelo (σ_s) [Pa]	35900.51875
Factor de concentración de esfuerzos (n) aproximado	1.786
Área columnas (m^2)	2.011
Área celdas unitarias (m^2)	4
Razón de sustitución (a_r)	0.503
Relación de asentamientos ($\frac{S_{tratado}}{S_{sintratar}} = \mu_s$)	71.7%

Tabla 17 - Calculo teórico de relación de asentamientos (μ_s) caso 6

Módulo de elasticidad del suelo (MPa)	100
Rugosidad entre superficies en contacto	0.5
Diámetro de columnas (m)	1
Altura de columnas (m)	4
Esfuerzo promedio columnas (σ_c) [Pa]	42452.43
Esfuerzo promedio suelo (σ_s) [Pa]	32875.076
Factor de concentración de esfuerzos (n) aproximado	1.29
Área columnas (m^2)	3.1416
Área celdas unitarias (m^2)	4
Razón de sustitución (a_r)	0.786
Relación de asentamientos ($\frac{S_{tratado}}{S_{sintratar}} = \mu_s$)	81%

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN 2D

6.1.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ASENTAMIENTO ELÁSTICO AL IMPLEMENTAR COLUMNAS DE GRAVA.

Primeramente, se analizarán los resultados obtenidos de las 76 primeras modelaciones, las cuales implicaron ir cambiando variables como módulo de elasticidad solo de suelo natural, diámetro de columnas de grava apisonada, separación entre columnas y profundidad de estas, teniendo en cuenta que previamente se había realizados las 4 simulaciones respectivas para un modelo en el cual se tenía el suelo solo con la zapata y sin las columnas y los resultados respectivamente serán la referencia para poder identificar que mejoras se pudieron obtener al implementa las columnas de grava.

En el capítulo 4, en las figuras desde la 56 a la 63, se tienen gráficas las cuales relacionan el porcentaje en que mejora el desplazamiento en función de la separación centro a centro entre columnas y en cada gráfica se elaboraron 3 curvas para las diferentes alturas de columnas de $h=1\text{m}$, $h=2\text{m}$ y $h=3\text{m}$, en estas, se puede observar que la reducción del desplazamiento vertical dentro un mismo diámetro y una misma profundidad no es muy significativa, sin embargo es evidente que entre más separadas estén las columnas, el porcentaje de reducción del asentamiento elástico (desplazamiento vertical) aumenta, es decir mejora más el suelo natural.

También se puede determinar que, al implementar columnas de mayor diámetro, el mejoramiento del suelo es mayor como era de esperarse, ya que se está reemplazando mayor cantidad de suelo de “mala calidad” por uno que presenta

mejores características mecánicas, sin embargo, esta no es la variable fundamental a que se debe modificar para reducir significativamente el desplazamiento vertical según el análisis bidimensional.

Cuando se analiza las variaciones de los resultados dentro de un mismo modelo, pero con profundidades diferentes, se establece que, dentro de un mismo diámetro, casi que se duplica el mejoramiento del sistema suelo-columnas como se evidencia en las figuras 64 y 65, además como era de esperarse se puede observar que el suelo entre menor módulo de elasticidad tenga el mejoramiento al implementar las columnas de grava en cuando a la reducción de desplazamientos va a ser mejor, esto sucede porque para el menor módulo de elasticidad tenido en cuenta, las columnas presentan un módulo de Young 16 veces mayor que el del suelo mientras que cuando el mayor módulo de elasticidad del suelo es solo la mitad del valor de las columnas su mejoría no es tan notoria.

De esta manera se establece que de todos los modelos planteados el que presento la mayor mejoría al implementar las columnas de grava en cuanto al desplazamiento vertical, fue el que tenía unas columnas de grava de diámetro $D=0.3\text{m}$, una separación entre columnas centro a centro de $S=3D$ y una profundidad de columnas de $3B=3\text{ m}$, de tal manera que teniendo en cuenta las suposiciones que se tuvieron en el análisis bidimensional elástico lineal, la variable que controlaría el diseño será la altura de las columnas, aunque es importante recordar que no es viable construir columnas de más de 10 metros de profundidad por factores económicos.

El hecho de asumir para la elaboración de las simulaciones establecidas las condiciones de plano de deformaciones, bajo las cuales se supone que la longitud de los modelos a los largo del eje Z es infinita como se explicó en el capítulo 4, resulta ser muy relevante en los resultados obtenidos, por eso se obtuvo que a mayor profundidad y mayor espaciamiento entre columnas se redujo más el desplazamiento vertical ya que con estas características se tendrá un mayor bloque de suelo confinado entre las columnas, las cuales estarán actuado como unas

pantallas de grava fijas de longitud infinita (a lo largo del eje Z), lo que resulta contrario a lo planteado en la teoría, más adelante se hará la respectiva comparación con el análisis 3D.

Por otra parte, se eligieron 4 modelos al azar, los cuales se ejecutaron con un coeficiente de rugosidad entre superficies en contacto de $\mu=0.5$, la comparación de cada uno de estos resultados con su homólogo de rugosidad completa se muestra en la tabla 18.

Tabla 18 – Comparación de resultados con $\mu=0.5$ y rugosidad absoluta en 2D

Caso	Diámetro de columnas (m)	Separación entre columnas centro a centro (m)	Altura de columnas (m)	Módulo de elasticidad del suelo (MPa)	Porcentaje que mejora el suelo con $\mu=0.5$	Porcentaje que mejora el suelo con rugosidad absoluta
1	0.3	3d	3	25	12.12	12.62
2	0.2	3d	2	50	4.83	5.62
3	0.3	1.5d	1	12.5	5.28	5.96
4	0.2	2d	3	100	3.17	3.66

Como era de esperarse, se presenta una mayor reducción en los asentamientos elásticos cuando se tiene rugosidad absoluta ya que al intentar desplazarse las columnas verticalmente hay menos adherencia con el suelo circundante y estas tienden a bajar más, sin embargo, el cambio no es muy significativo, esto sucede en parte porque el plano 2D (X-Y) que se muestra en los modelos, representan la parte delantera de este, es decir un extremo, cual implica que la columnas no tiene suelo adyacente hacia atrás o adelante que les brinde una resistencia al rozamiento lo que involucra además que no hay un adecuado confinamiento lateral ya sea con rugosidad absoluta o con un coeficiente de rugosidad μ por eso esta variable no es tan determinante.

Como se mencionó previamente, las columnas bidimensionalmente están actuando como pantallas de grava de longitud infinita las cuales están transmitiendo carga al

suelo por la parte inferior como lo hace un pilote y no se presenta ensanchamiento de estas como se espera según la teoría.

En la figura 104 se muestra un comparativo entre los diagramas de contorno de la magnitud de deformación unitaria cuando hay rugosidad absoluta entre superficies en contacto (izquierda) y cuando se tiene $\mu=0.5$ (derecha), se eligió este diagrama de contorno para comparar ya que era en el que más se presentaban variaciones a la vista, los demás eran similares.

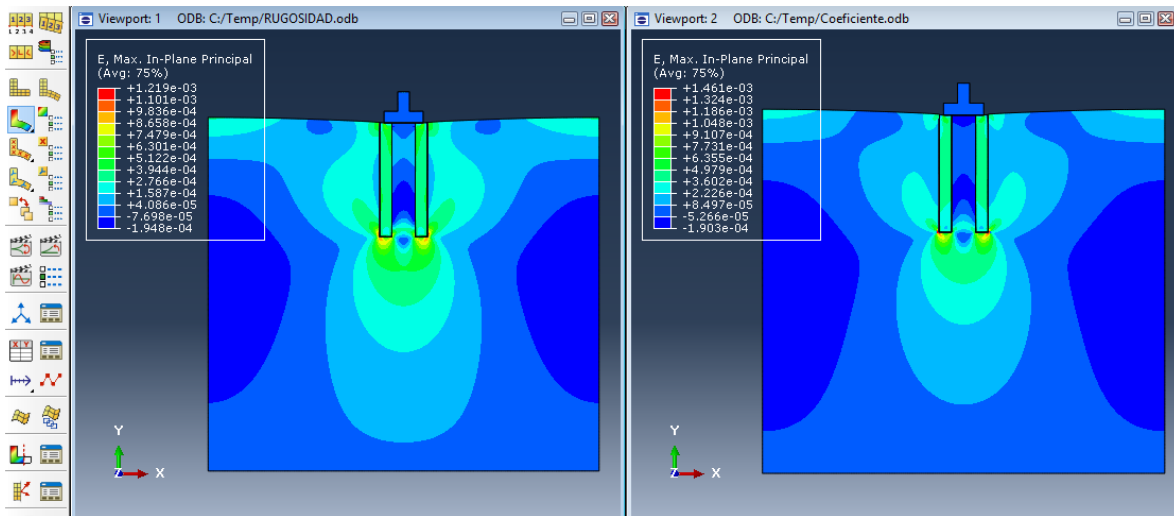


Figura 104 – Comparación diagrama de contorno del modelo con rugosidad absoluta (izquierda) y $\mu=0.5$ (derecha).

Se puede notar en la anterior figura, que cuando hay una rugosidad con un $\mu=0.5$, se presentan mayores deformaciones unitaria en la parte interior de las columnas, ya que, por esta situación, estas se desplazaran más al igual que su suelo adyacente, además se puede observar que cuando hay rugosidad absoluta, los esfuerzos en la parte lateral de las columnas se traspasan de manera adecuada al suelo, lo que implica desplazamientos mayores al igual que deformaciones unitarias ya que en la interfaz suelo-columnas hay una interacción entre superficies ideal, mientras que con el coeficiente de rugosidad no sucede esto.

6.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE DEL SISTEMA SUELO – COLUMNAS

De las gráficas obtenidas al establecer el módulo de elasticidad equivalente de cada sistema, se pudo determinar en primera instancia que este valor se va reduciendo entre más separadas estén las columnas centro a centro para un mismo módulo de elasticidad del suelo, esto sucede ya que, a mayor separación de las columnas, será menos rígido el sistema por lo que es más fácil producir un desplazamiento vertical en el punto central, como se muestra en la figura 105.

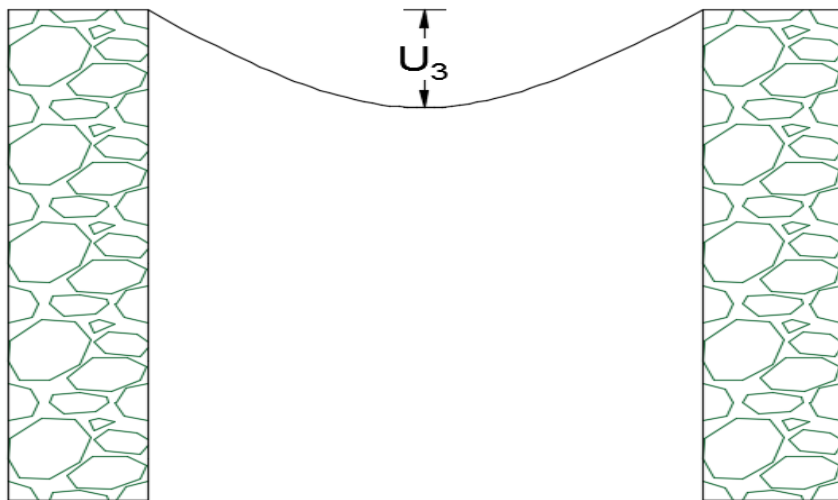


Figura 105 – Desplazamiento vertical entre columnas

También se puede notar que, a mayor diámetro de columnas, el sistema presenta un módulo de elasticidad equivalente menor, esto ocurre por razones similares al anterior caso, teniendo en cuenta que la rigidez de una de las columnas depende de la siguiente ecuación.

$$K = \frac{EI}{L}$$

Donde:

K=Rigidez

E=Modulo de elasticidad

I=Inercia de la columna

L=Longitud

En este caso la sección transversal de la columna es una circunferencia, de tal manera que su inercia se calcula mediante:

$$I_{circulo} = \frac{\pi r^4}{4}$$

Como la inercia es directamente proporcional a la rigidez de la columna, implica que entre más grande sea el diámetro mayor rigidez tendrá, de tal manera que las columnas no tenderán a desplazarse verticalmente con el suelo, si no que harán que el sistema se desplace un poco menos. Es decir, que a menor rigidez se tenga de las columnas, mayor será el módulo de elasticidad equivalente, por eso al observar las gráficas, asimismo se puede deducir que entre mayor longitud tengan (altura) menor será el módulo de elasticidad equivalente, ya que esta dimensión es inversamente proporcional a la rigidez de estas, lo que significa un menor módulo de elasticidad equivalente.

6.1.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE DIAGRAMAS DE CONTORNO DE INTERÉS EN 2D

Al analizar la figura 76, que representa el diagrama de contorno de la magnitud de la deformación unitaria, se puede notar que los mayores valores están alrededor de la columna y en la parte inferior de estas, en la parte lateral se presenta esto debido a la presión del suelo exterior, lo que hace que se pandeen por eso en las columnas también se presentan grandes valores y en su parte inferior porque están transmitiendo las cargas como si fueran pilotes, lo mencionado se puede corroborar al observar la figura 77 y 78 que indican el comportamiento de la deformación unitaria horizontal y vertical respectivamente.

En cuanto a los diagramas de contorno de los desplazamientos, los cuales se muestran en las figuras 79, 80 y 81, se nota que los mayores desplazamientos laterales se presentan cerca a la parte superior, al ser movido parte del suelo por la aplicación de la carga de la zapata y también en la parte inferior de las columnas, ya que, al transmitir las cargas, las columnas se abren paso, desplazando vertical y

lateralmente el suelo adyacente. Los esfuerzos verticales vana decreciendo paulatinamente a medida que aumenta la profundidad de las columnas.

Por último, en el diagrama de contorno de la figura 82 se aprecian los esfuerzos de Von Mises, donde se muestra que los mayores valores se presentan en las columnas como era de esperarse ya que estas tienen una rigidez mayor que el suelo adyacente lo que hace que asuman una mayor proporción de las cargas.

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN 3D

6.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ASENTAMIENTOS.

En primera instancia, se va a analizar las figuras desde la 84 a la 87, en la figura 84 y 86 se pueden observar cómo va disminuyendo el asentamiento en el suelo a medida que se va aumentando el diámetro de las columnas para un suelo con módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa y $E=100$ MPa respectivamente, al aumentar esta variable se verifica que se presenta la mayor reducción de los asentamientos, para la figura 84 se obtuvo una mejora del 58.83% y para la figura 86 fue del 20.2%, en esta última se obtuvo una menor mejora ya que el módulo de elasticidad del suelo era el doble de las columnas, es decir que se tenía un suelo nativo más rígido en donde las columnas no presentaban un mayor efecto, mientras que en la figura 84 el módulo de elasticidad de las columnas era 16 veces más grande que el del suelo, por lo que es más evidente esta reducción en los asentamientos.

Ahora, si se analizan las figuras obtenidas en el anterior capítulo, en donde para un mismo diámetro de columnas se va aumentando su altura, se puede determinar que lo importante al construir estos sistemas es que tenga un mayor diámetro en comparación con su altura, es decir que la razón de sustitución del sistema a_r definida en el marco teórico, sea mayor, lo que va a implicar una mayor área de reemplazo de columnas de grava por suelo nativo, por eso según la teoría de diseño

teórico al momento de calcular la mejora de los asentamientos de un sistema suelo-columnas, estos van a depender siempre del valor de a_r .

Posteriormente se realizaron las mismas anteriores 4 gráficas mencionadas, pero ahora utilizando un coeficiente de rugosidad entre superficies en interacción de $\mu=0.5$, al observar estos los resultados, es evidente que se reduce de manera significativa la mejora en cuanto al asentamiento del sistema suelo-columnas, incluso en algunos casos se presentar desmejoras de esta variable. En la figura 106 y 107, se compara de manera paralela los resultados obtenidos en cuanto a la disminución del asentamiento en un suelo de módulo de elasticidad de $E=12.5$ MPa con diferencia de las rugosidades entre superficies en interacción.

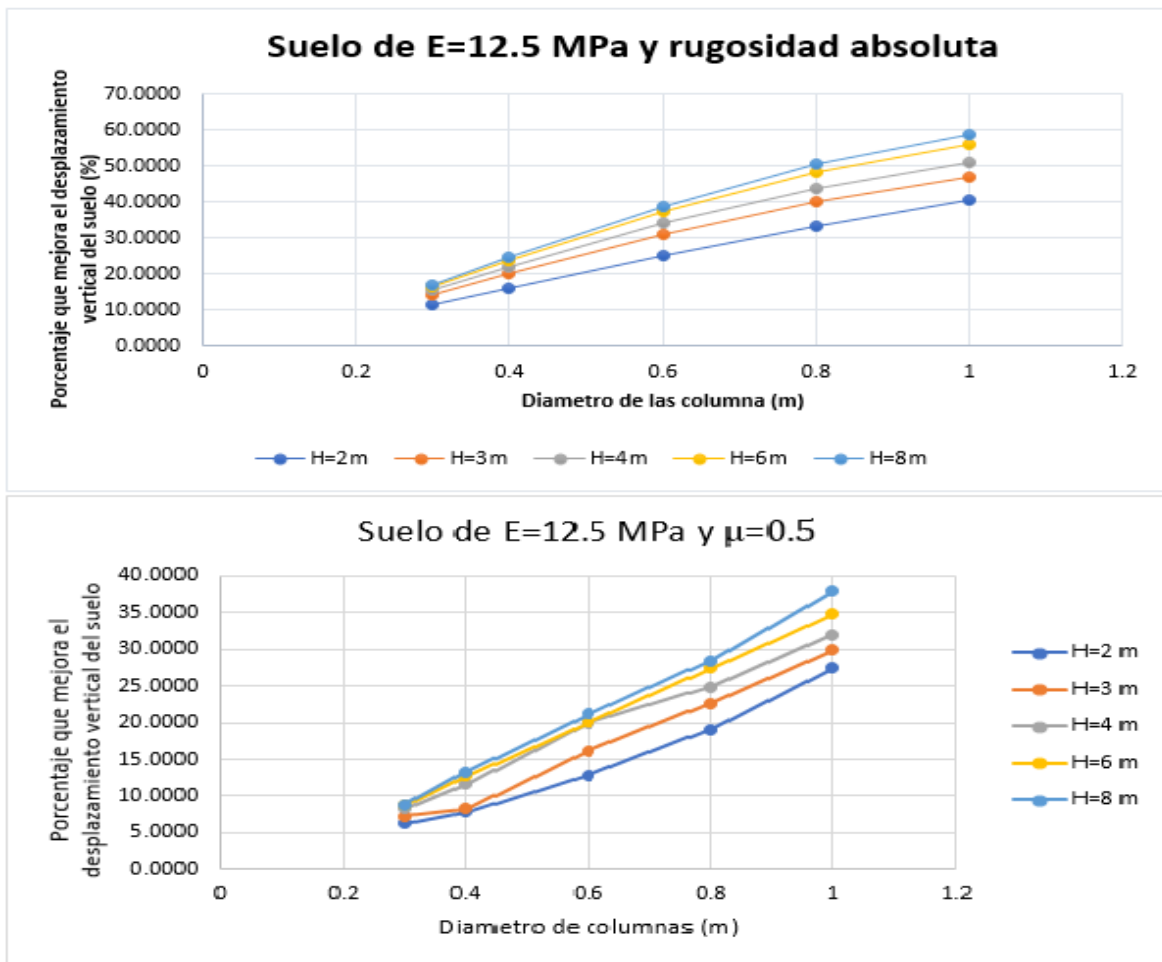


Figura 106 – Comparación de la mejora en los asentamientos cuando varía la rugosidad entre superficies en contacto del modelo al ir aumentando el diámetro de las columnas de grava cuando $E_{suelo} = 12.5$ MPa.

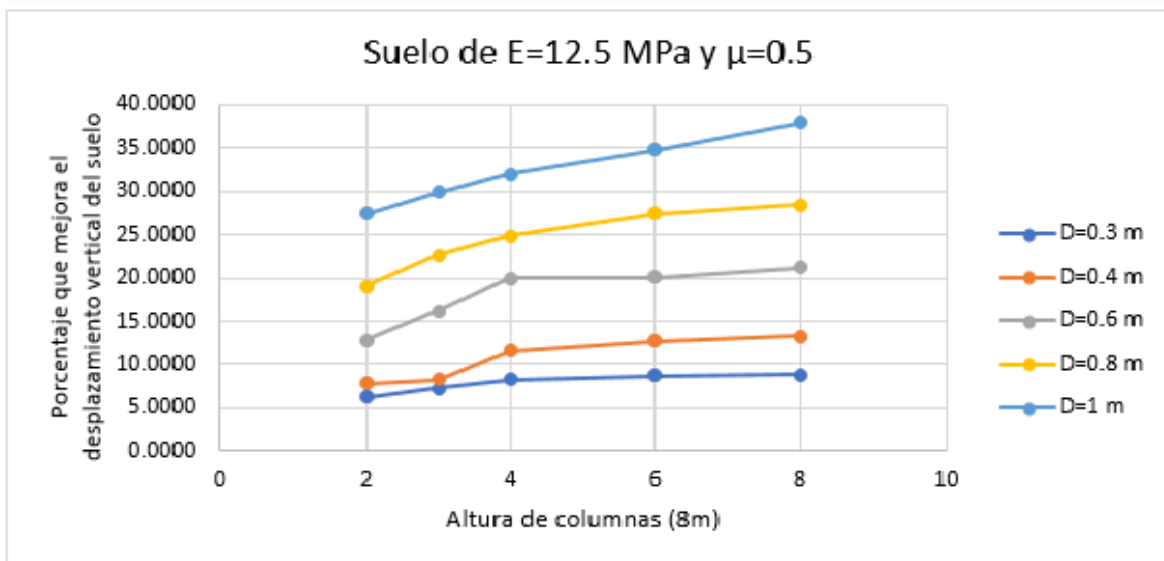
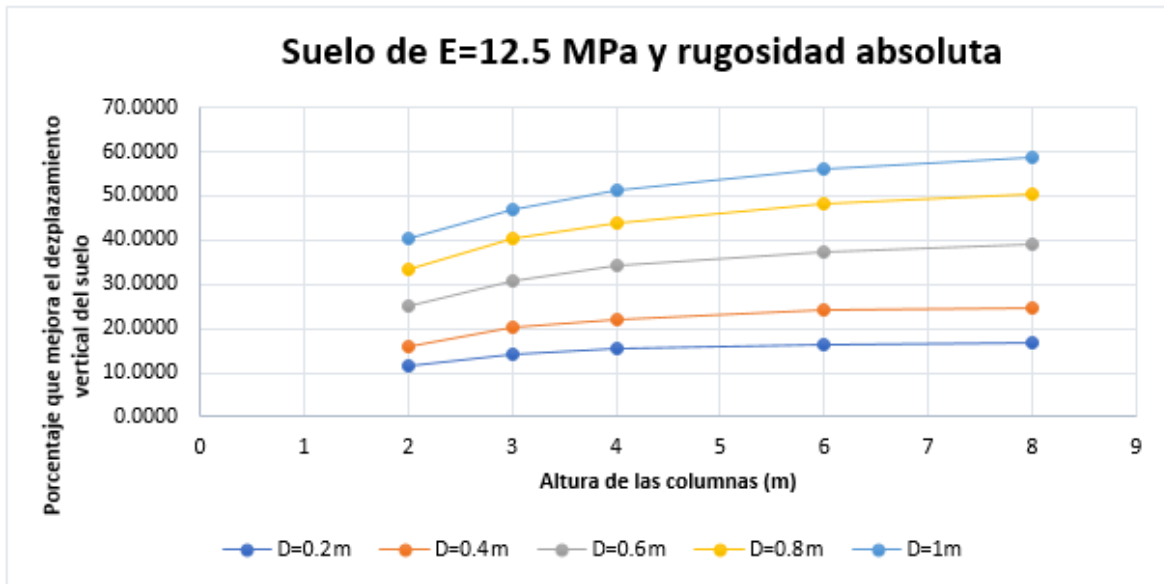


Figura 107 - Comparación de la mejora en los asentamientos cuando varía la rugosidad entre superficies en contacto del modelo al ir aumentando la altura de las columnas de grava $E_{suelo} = 12.5$ MPa.

De las anteriores dos figuras comparativas lo primero que se puede notar es que, aunque todas 4 gráficas tienen curvas crecientes, la variable más importante a tener en cuenta es el diámetro de las columnas por encima de su altura ya que va a garantizar mayor reducción de los desplazamientos verticales. Al comparar los valores de asentamientos, las gráficas que tienen rugosidad absoluta entre superficies, presentan un poco más del 20% de mejora lo cual puede resultar muy significativo al momento de diseñar estos sistemas. Por lo anterior se infiere que es

importante garantizar un alto confinamiento lateral durante la construcción de las columnas de grava, al momento de apisonar las capas, ya que esto va a permitir aumentar el coeficiente de rozamiento que hay en la interfaz suelo-columnas, lo que va a generar un mejor comportamiento del sistema.

Se debe recordar que, al momento de aplicar las cargas requeridas sobre estos sistemas, las columnas tienden a deformarse verticalmente y a ensancharse disipando la mayor energía para finalmente transmitir unas cargas admisibles al suelo, así que es recomendable dejar un rango en el que se pueda deformar el sistema después de ser compactado, por lo que no es adecuado compactar en excesos estas columnas.

Ahora se va a hacer una comparación similar, pero entre las gráficas que tiene un suelo de módulo de elasticidad $E=100$ MPa, que se puede observar en las figuras 108 y 109.

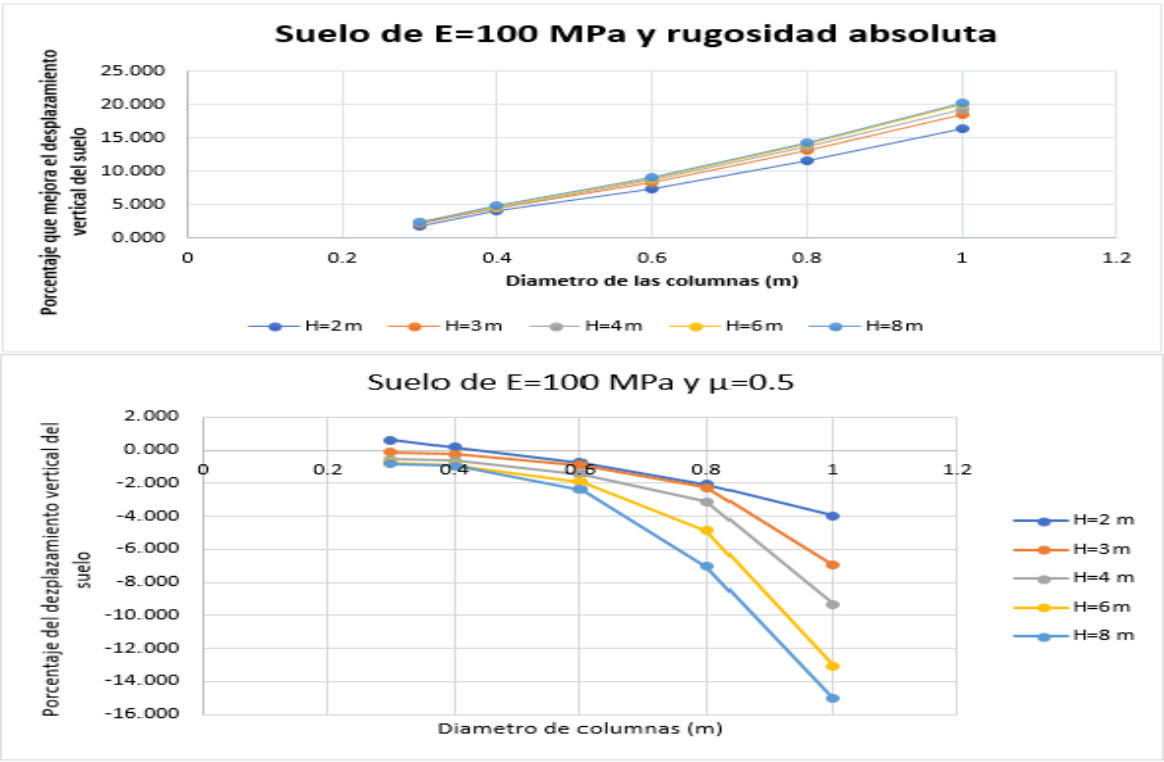


Figura 108 - Comparación de la variación en los asentamientos cuando cambia la rugosidad entre superficies en contacto del modelo al ir aumentando el diámetro de las columnas de grava $E_{suelo} = 100$ MPa.

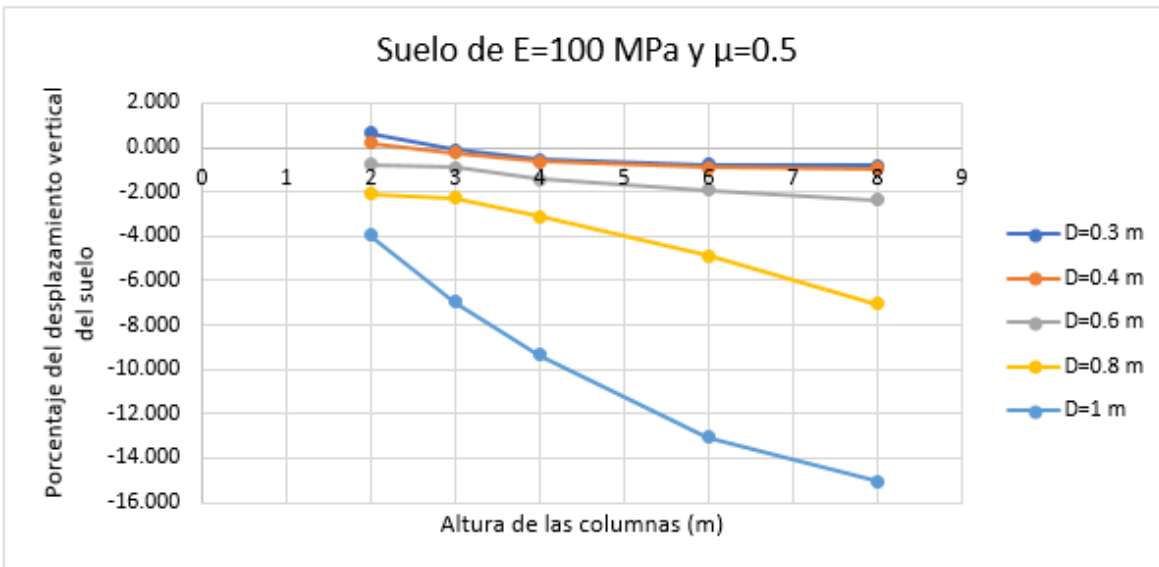
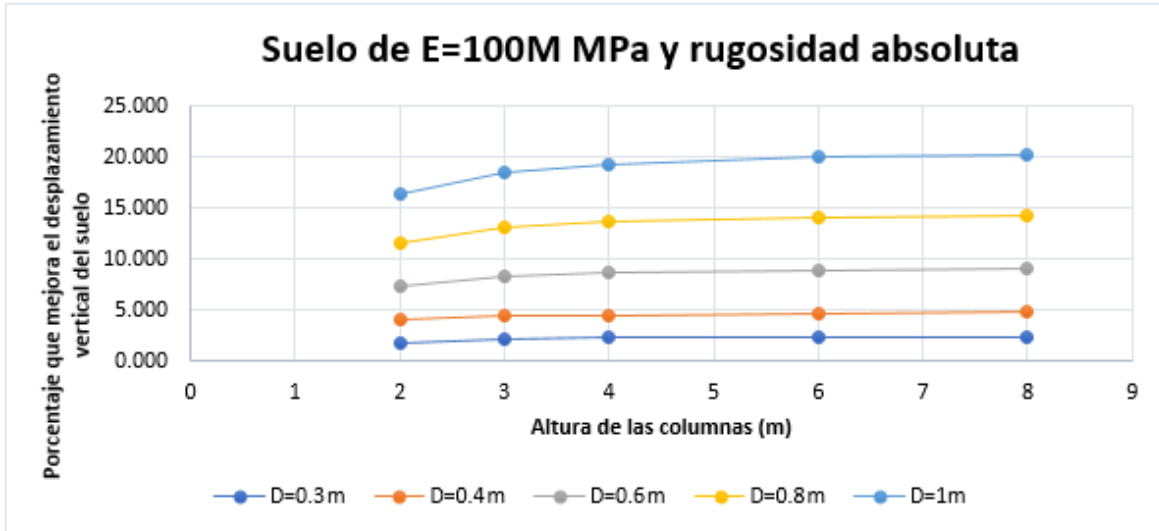


Figura 109 - Comparación de la variación en los asentamientos cuando cambia la rugosidad entre superficies en contacto del modelo al ir aumentando la altura de las columnas de grava $E_{suelo} = 100 \text{ MPa}$.

Al analizar las dos anteriores figuras, es evidente que cuando se tiene un suelo de módulo de elasticidad de $E=100 \text{ MPa}$ que corresponde a la mitad del de las columnas con un coeficiente de fricción entre superficies de $\mu=0.5$, el sistema suelo columna empeora en vez de mejorar. Para analizar mejor este hecho, se van a comparar dos diagramas de contorno obtenidos en el software basado en elementos finitos, en donde se observa el cómo comportamiento del modelo al variar la fricción entre superficies, para esto se tomó como referencia el trabajo con diámetro de

columnas D=1 m y altura H=4 m, en las figuras 110 y 111 se muestra la comparación del comportamiento de los esfuerzos y los desplazamientos para las dos rugosidades de interés.

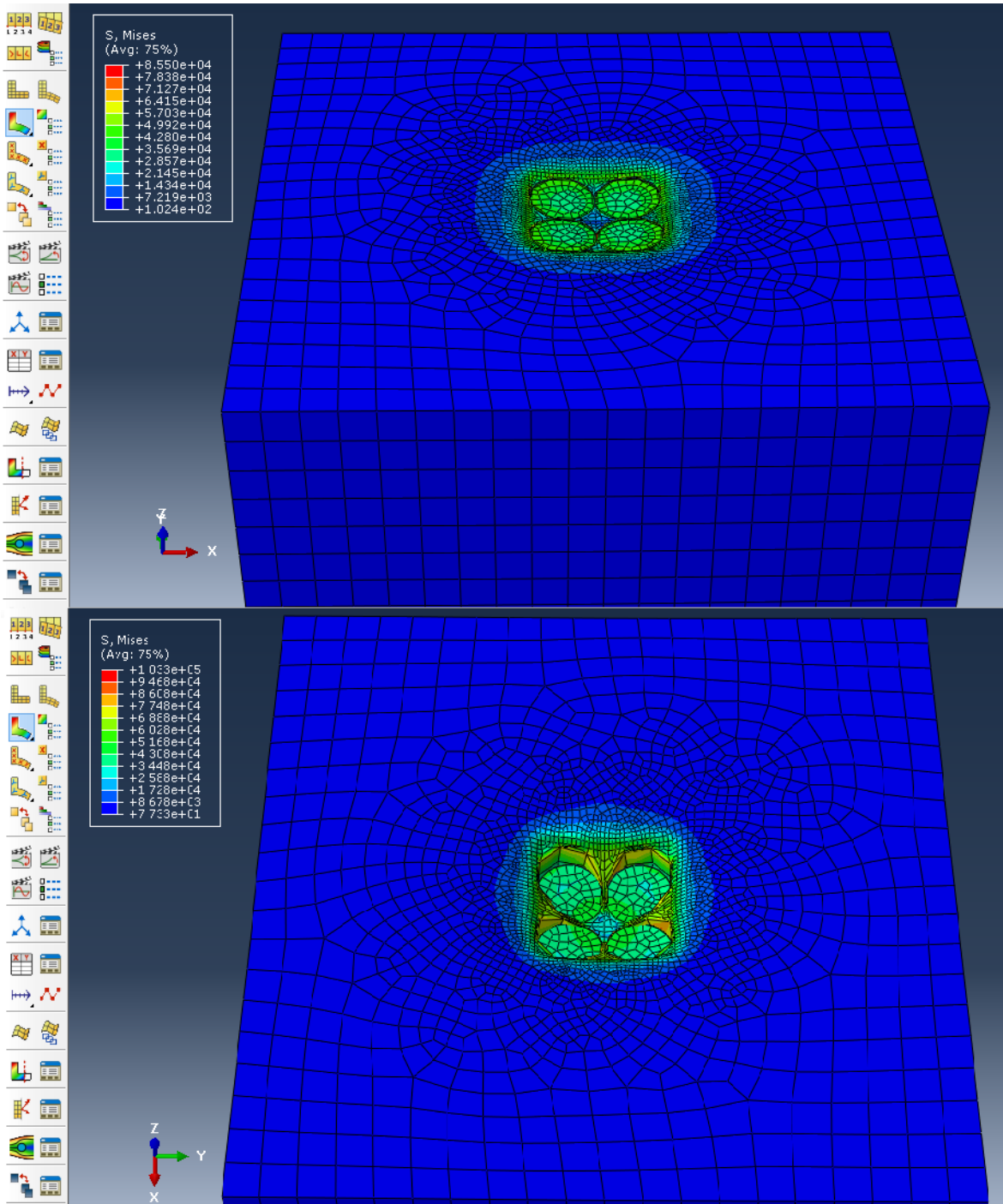


Figura 110 – Comparación de los diagramas de contorno de esfuerzos cuando se tiene rugosidad absoluta (arriba) y cuando $\mu=0.5$ (abajo)

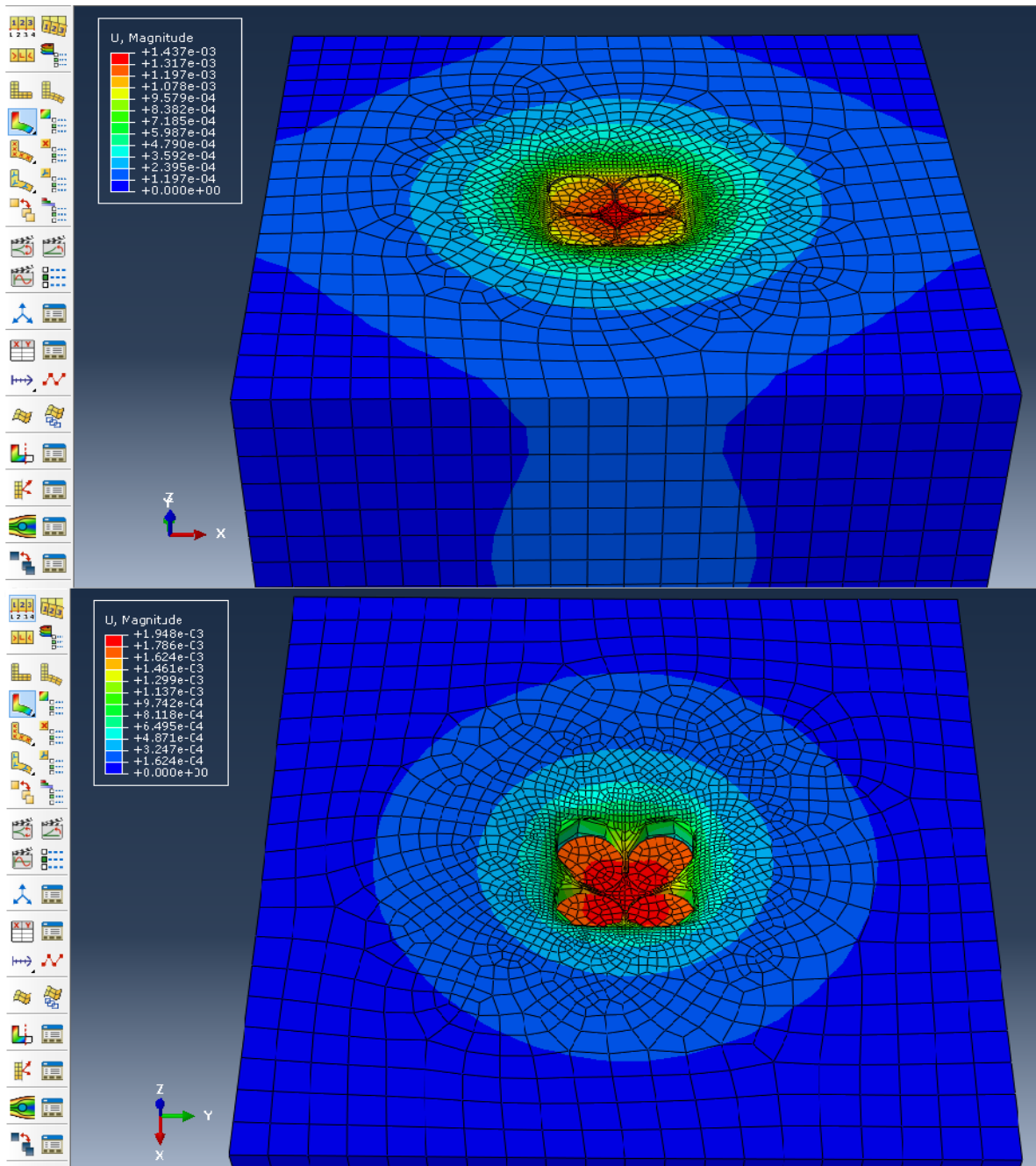


Figura 111 - Comparación de los diagramas de contorno de desplazamientos cuando se tiene rugosidad absoluta (arriba) y cuando $\mu=0.5$ (abajo)

De la figura 110, se puede destacar que, aunque los dos sistemas están sometidos a las mismas condiciones (a excepción de la fricción) cuando se tiene rugosidad absoluta de $\mu=0.5$, el suelo que está confinado entre las columnas (parte central) asume una gran carga, prácticamente igual a la de las columnas, mientras que

cuando se tiene rugosidad absoluta, las mayores cargas siempre las estarán mitigando las columnas. Es lógico que suceda esto, ya que al empezar a aplicar las cargas sobre el sistema, las columnas no tendrán un gran confinamiento lateral, ni una gran fuerza de rozamiento, por lo que es relativamente sencillo bajo las condiciones que se tiene vencer la fuerza de fricción e iniciar un desplazamiento vertical de estas, justo después que se empiecen a desplazar, el suelo entre las columnas quedara expuesto y vulnerable lo que produce que empiece a carga directamente las solicitaciones sin estas haber sido mitigadas un poco por las columnas y de esta manera se genera lo mostrado en la figura.

En el caso de los desplazamientos, se puede notar la evidente diferencia cuando cambian las condiciones de fricción, generando así un mayor desplazamiento cuando $\mu=0.5$, en primera instancia esto sucede porque los desplazamientos son directamente proporcionales a los esfuerzos, de tal manera que era de esperarse que estos se presentaran en el suelo entre las columnas, pero aparte de esto, se debe tener en cuenta que las columnas se empiezan a arquear ligeramente hacia el suelo del centro, cerca de la superficie, ya que como no tienen un adecuado confinamiento lateral con el suelo alrededor de la zapata, estas no pueden transmitir de manera eficiente los esfuerzos hacia ese suelo por fuera del sistema, además se debe tener en cuenta que el módulo de elasticidad de las columnas es el doble del suelo, lo que produce un sistema más rígido que será vulnerable bajo el área de aplicación de la carga bajo este carácter de la fricción.

De acuerdo a la ley de Hooke, los esfuerzos son proporcionales a la deformación unitaria, así que en la figura 112 se muestra la comparación de la deformación unitaria de los dos modelos de interés, donde se evidencia con la ayuda de un corte en los modelos, como en el modelo que se tiene una rugosidad absoluta, las cargas se transmiten al suelo de manera adecuada, mientras que si se tiene $\mu=0.5$ esas cargas no se propagan muy lejos.

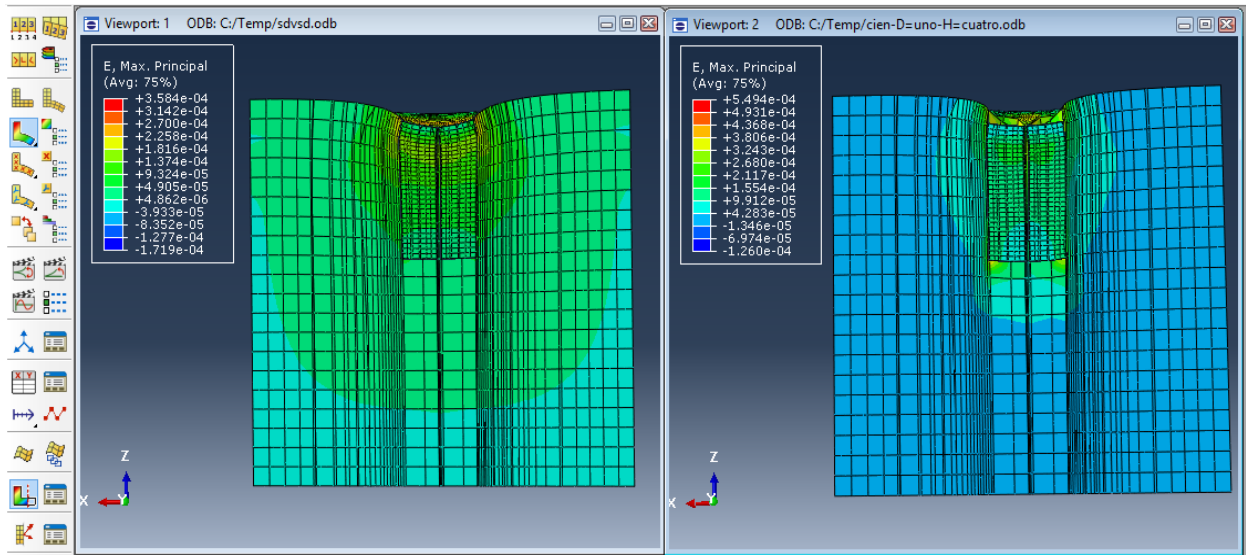


Figura 112 – Comparación de la propagación de las deformaciones unitaria entre los modelos con rugosidad absoluta (izquierda) y $\mu=0.5$ (derecha)

5.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS DIAGRAMAS DE CONTORNO

En la figura 113, se puede observar como las columnas asumen la mayor parte de la carga aplicada, esto era lo que se esperaba teóricamente, ya que las columnas al tener mayor rigidez, van a cargar mayor la mayor parte como muestra en la figura 33 descrita en el marco teórico en el capítulo 2, en la siguiente figura se muestra la comparación de lo obtenido en el software basado en elementos finitos con lo que se esperaba teóricamente.

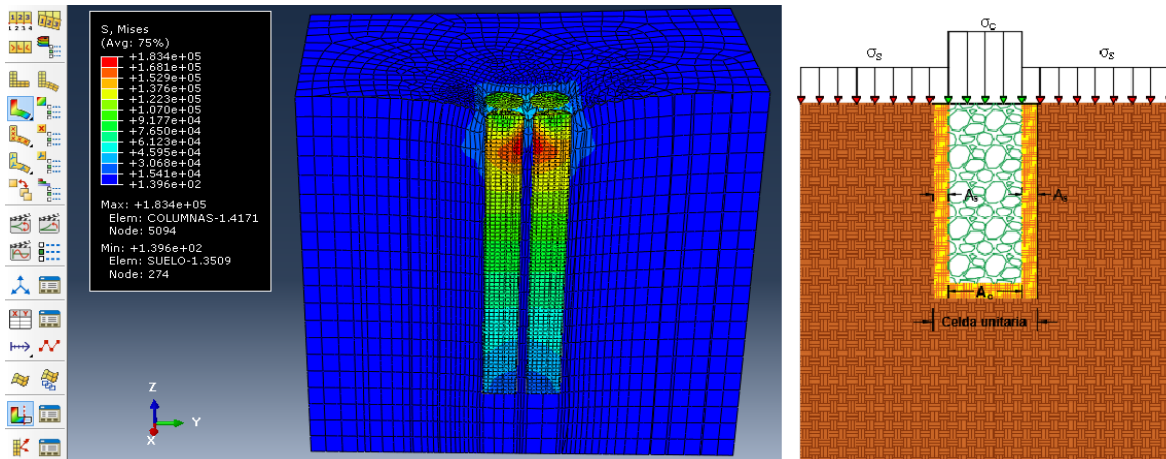


Figura 113 – Comparación de la distribución de las carga entre las columnas de grava y el suelo natural.

En las figuras 114 y 115 se presenta la comparación de los desplazamientos y esfuerzos en X e Y respectivamente, ya que tienen un comportamiento similar, en la figura 103 se muestran el comportamiento de los desplazamientos laterales al aplicar la carga, como era de esperarse, en ambos casos este desplazamiento presenta sus mayores valores alrededor del área de 2m X 2m que es donde se supone que se aplica la carga de la zapata, además se nota en la parte derecha de la figura, unos desplazamientos laterales alrededor de las columnas, cerca de la superficie a lo largo del eje y, esto se debe al ensanchamiento que sufren según la teoría a una profundidad entre 2D a 3D (D=diámetro de las columnas), que se va a analizar detalladamente más adelante.

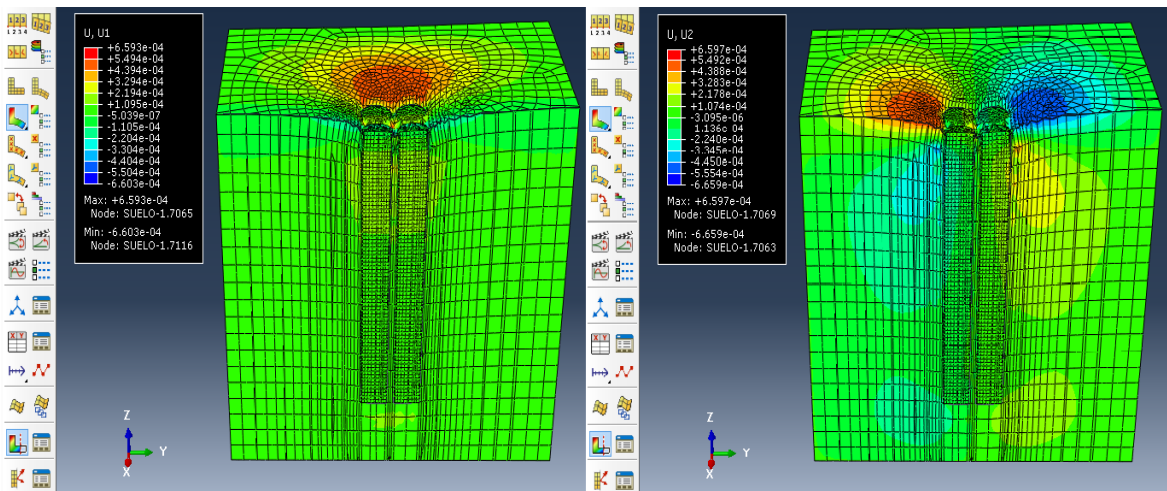


Figura 114 – Comparación de desplazamientos a lo largo del eje X e Y

En cuanto a los esfuerzos en X e Y, se tiene un comportamiento semejante, y presentar sus mayores valores en ambos casos en la zona donde se aplica la carga, bajo la superficie, se nota que los esfuerzo en X se van reduciendo en las columnas a medida que aumenta la profundidad, aunque se puede notar que el suelo de la parte inferior del modelo sufre unos esfuerzos a los largo de este eje, esto se debe a que se dejó fijo la cara inferior del sistema cuando se definieron las condiciones de contorno, de tal manera que las reacciones producen una compresión que origina estos valores. En cuanto a los esfuerzos en Y, se destaca que no tienen un incremento significativo bajo la superficie y se propagan de manera uniforme por

tener un medio isotrópico, aunque en las columnas se pudo medir que se van reduciendo a medida que se aumenta la profundidad.

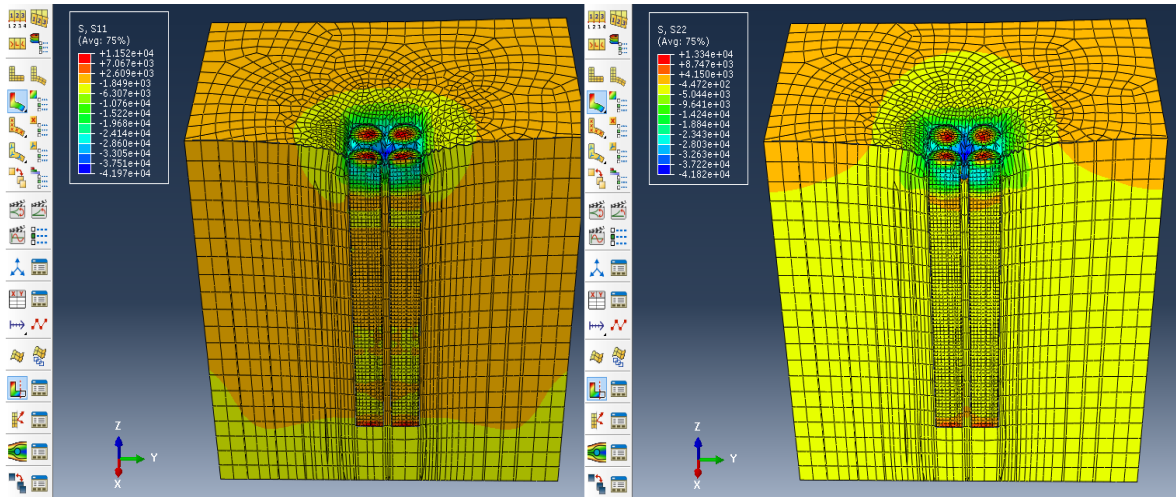


Figura 115 – Comparación de los esfuerzos a lo largo del eje X e Y.

Por último, se analizará el comportamiento de los desplazamientos y esfuerzos verticales, en la figura 116 se muestran los diagramas de contorno referentes a estas dos variables.

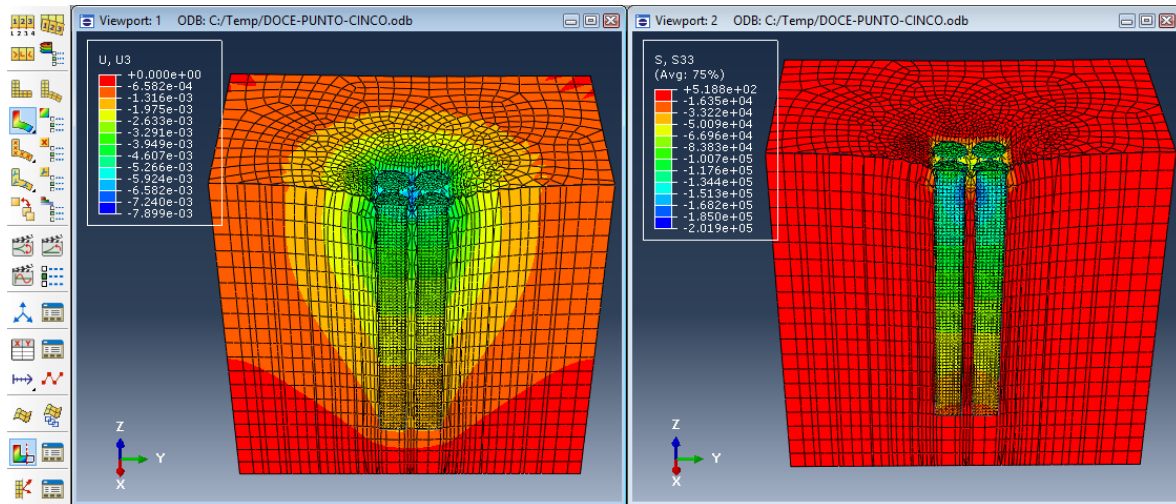


Figura 116 – Diagrama de contorno de los desplazamientos (izquierda) y los esfuerzos (derecha) verticales.

Se puede observar que los desplazamientos verticales son grandes cerca de la superficie, pero a medida que se va aumentando la profundidad de las columnas se

van reduciendo, en la figura 116 se puede ver la comparación entre la figura 98 (izquierda) y la figura 1 (derecha), donde se comprueba la tendencia de las curvas que se esperaba obtener de acuerdo a la teoría y lo que se obtuvo para 3 modelos en el software basado en elementos finitos.

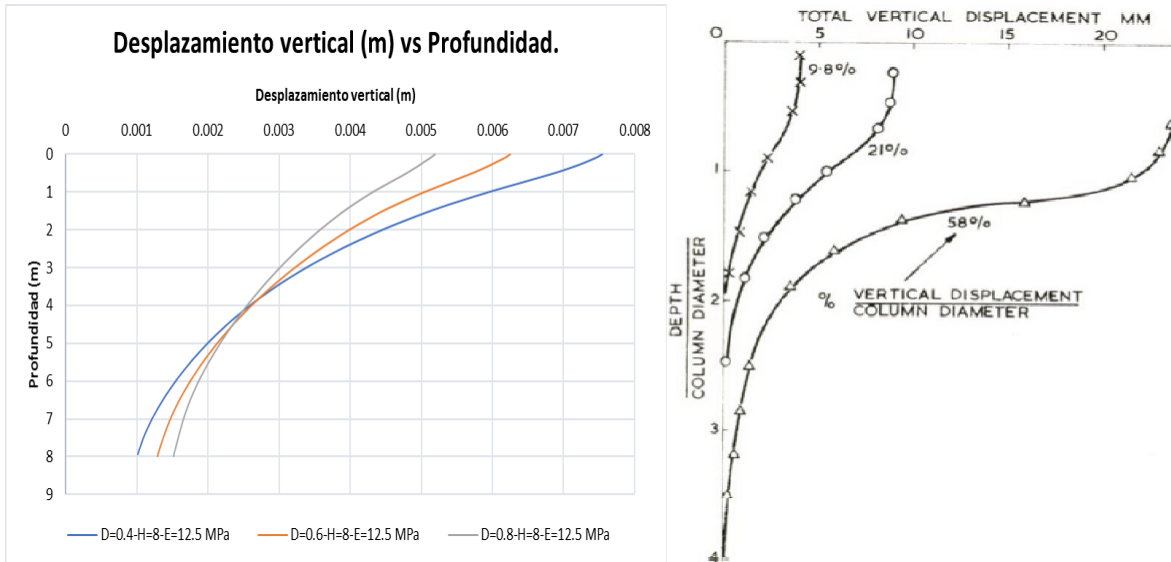


Figura 117 – Comparación gráfica del comportamiento de los desplazamientos verticales a medida que se incrementa la profundidad de las columnas.

Aunque las dos anteriores gráficas no comparan las mismas variables, se puede comprobar lo que se esperaba obtener teóricamente y es que en ambas el desplazamiento vertical en las columnas de grava tiene un comportamiento asintótico a medida que aumenta la profundidad de estas, es decir que se va reduciendo paulatinamente hasta tender a estabilizarse en cierto valor.

En cuanto a los esfuerzos verticales (S_{33}), se realizaron 3 curvas para los mismos modelos comparados, estos resultados se presentan en la figura 118.

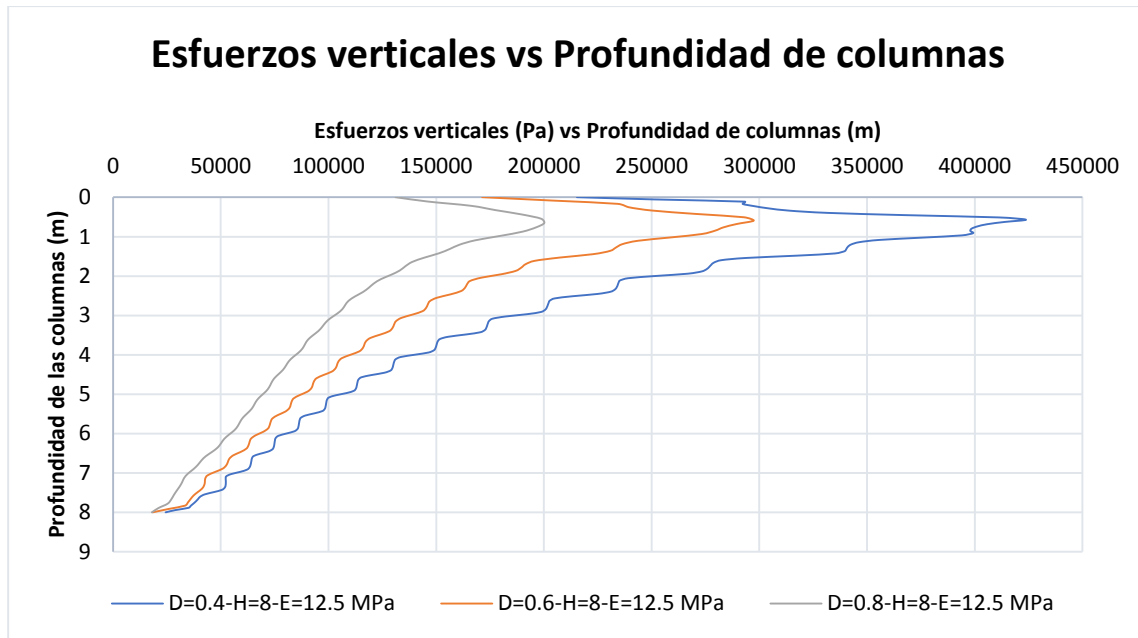


Figura 118 – Esfuerzos verticales vs profundidad de columnas

Según la teoría, estos esfuerzos verticales (S_{33}) no se propagan mucho más allá de una profundidad de $2D$ (D =diámetro de las columnas), aunque en la figura 106 si se muestra que los mayores esfuerzos se presentan dentro de esta profundidad, se observa que no se desaparecen completamente, solo se van reduciendo de manera pronunciada, esto es una de las razones por las que la profundidad de las columnas al momento de diseñarlas no es tan determinante, ya que cada vez que se tiene mayor altura de estas, los esfuerzos que llegan hasta su parte inferior no serán tan significativos como para permitir que estos sistemas fallen por punzonamiento.

Por otro lado, uno de los criterios importantes a tener en cuenta al momento de diseñar estos sistemas, es que las columnas pueden fallar por ensanchamiento dentro de una profundidad entre $2.5D$ a $3D$ donde D es el diámetro de las columnas, esta expansión si pudo notar al obtener en el diagrama de contorno de la magnitud de la deformación unitaria, donde se puede examinar que las columnas obedecen a este comportamiento como plantea en el marco teórico, en la figura 119 se observa la comparación entre lo obtenido mediante el software basado en elementos finitos y lo que se esperaba obtener según la teoría.

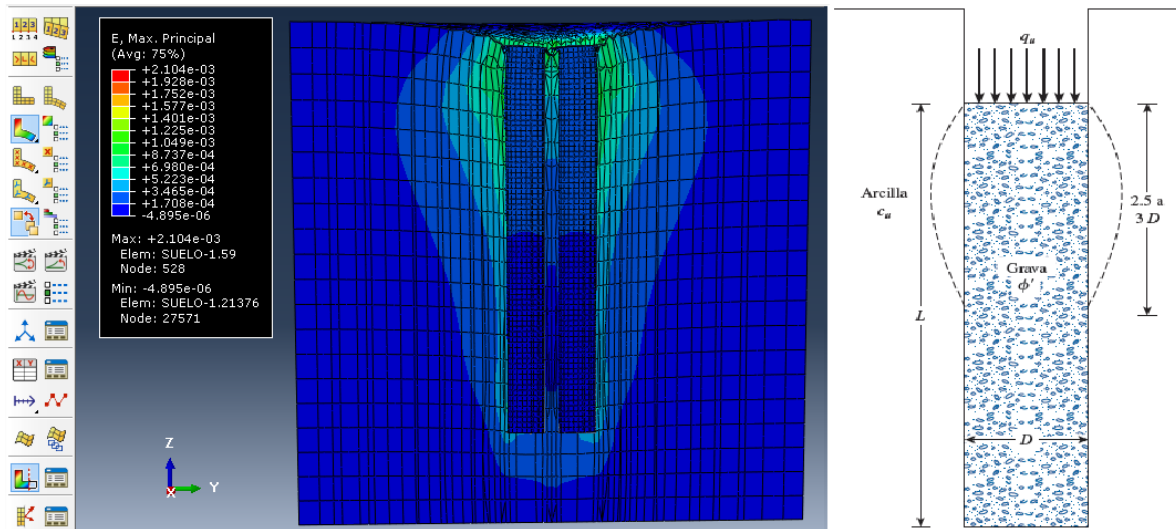


Figura 119 – Comparación gráfica del ensanchamiento de las columnas obtenida en el software basado en elementos finitos con lo que se esperaba teóricamente.

Teniendo en cuenta que los desplazamientos radiales de las columnas son proporcionales a las deformaciones unitarias de estas, se compara la figura 102 (izquierda) con la figura 1 (derecha), donde se puede observar el mismo comportamiento esperado, esto se puede ver en la figura 120 a continuación.

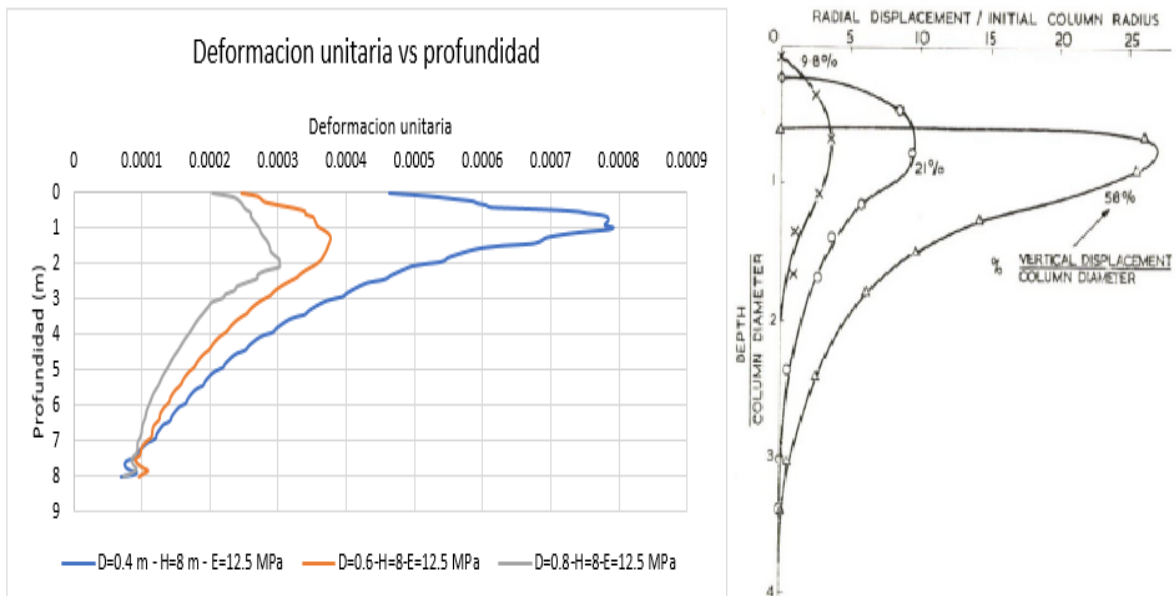


Figura 120 – Comparación numérica del ensanchamiento de las columnas obtenido en el software basado en elementos finitos con lo que se esperaba teóricamente.

Al estudiar detalladamente las curvas obtenidas en la figura 102, se pudo determinar las profundidades de ensanchamiento obtenidas y comparadas con el rango en el que se esperaba que estuvieran, estos resultados se pueden ver en la tabla 19 que se muestra a continuación.

Tabla 19 – Comparación de profundidad de ensanchamiento medida con ayuda del software basado en elementos finitos con la esperada teóricamente.

MODELO	PROFUNDIDAD DE MAYOR ENSANCHAMIENTO MEDIDA EN ABAQUS	RANGO DE PROFUNDIDAD DE ENSANCHAMIENTO ESPERADA
D=0.4-H=8- E=12.5 MPa	1.02857 m	1 m - 1.2 m
D=0.6-H=8- E=12.5 MPa	1.61702 m	1.5 m - 1.8 m
D=0.8-H=8- E=12.5 MPa	2.08219 m	2 m - 2.4 m

5.2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ASENTAMIENTOS.

En la tabla 20 se muestra la comparación de los 6 casos calculados de manera teórica, con lo que se obtuvo midiendo directamente en el software basado en elementos finitos.

Tabla 20 – Comparación del valor de los asentamiento obtenido con el método teórico y medido con el software basado en elementos finitos.

Modelo	$\left(\frac{S_{tratado}}{S_{sin\ tratar}}\right)_{TEORICO}$	$\left(\frac{S_{tratado}}{S_{sin\ tratar}}\right)_{ABAQUS}$
D=0.8 m - H=8 m - E=12.5 MPa - Rugosidad absoluta	45%	49%
D=0.3 m - H=8 m - E=100 MPa - Rugosidad absoluta	96%	97.50%
D=0.6 m - H=8 m - E=12.5 MPa - Rugosidad absoluta	60%	61.10%
D=0.8 m - H=6 m - E=12.5 MPa - Rugosidad absoluta	51.5%	51.81%
D=0.8 m - H=6 m - E=12.5 MPa - $\mu=0.5$	71.70%	72%
D=1 m - H=4 m - E=100 MPa - $\mu=0.5$	81%	109%

Analizando la anterior tabla, se puede observar que, para los 4 primeros casos se tiene una buena aproximación en cuanto a la relación de asentamientos del suelo tratado y sin tratar, aunque todos los valores medidos en software basado en

elementos finitos dieron superiores a los esperados teóricamente, la diferencia no resulta ser significativa, así que el modelado numérico es una buena alternativa para diseñar estos sistemas o por lo menos tener una idea aproximada de lo que se puede esperar en cuanto a los desplazamientos verticales del sistema suelo-columnas.

Es importante destacar que la ecuación con la que se calculó el valor teórico de la relación de asentamiento $\left(\frac{S_{tratado}}{S_{sin\ tratar}}\right)$ descrita en el numeral 5.3, solo depende de que tanta área se remplace de suelo por columnas (a_r) y del factor de concentración de esfuerzos (n), es decir que en ningún momento se tiene en cuenta la fricción entre las superficies en contacto. En el caso de cálculo 5, a pesar de que se tenía un sistema con coeficiente de fricción $\mu=0.5$, se obtuvo un resultado muy similar en el software basado en elementos finitos con el esperado teóricamente, aunque las columnas asumen en este caso menor carga que si se tuviera con rugosidad completa, es suficiente para mitigar un poco los esfuerzos que producen los asentamientos ya que para este caso las columnas tienen un módulo de elasticidad 16 veces mayor que el del suelo, generando así una relación de esfuerzos en el suelo (μ_c) menor a uno, lo que implica aun una mejora del suelo nativo.

En el último caso, se tiene un desmejoramiento del suelo nativo el cual se explicó más detalladamente en el numeral 6.2.1, de tal manera que se va a tener una relación de esfuerzos en el suelo (μ_c) mayor a uno, esto sucede porque el módulo de elasticidad del suelo es solo la mitad que el de las columnas, sumado que no se tiene una suficiente fuerza de fricción entre superficies ($\mu=0.5$) lo que produce que la carga que asumen las columnas sea ligeramente superior al del suelo, lo cual no será suficiente para producir una mejora. La teoría del cálculo de la relación de asentamientos se basa en mitigar estos desplazamientos verticales ($\mu_c \leq 1$), lo cual origina que el modelo matemático no se ajuste al modelo practico simulado en este caso.

6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN 2D Y 3D.

De acuerdo a lo obtenido en los numerales 6.2 y 6.3, se puede deducir que no hay consistencia en sus resultados, ya que al modelar los sistemas suelo-columnas en 2D se llega a la conclusión que la variable más relevante en el diseño de columnas es su altura ya que entre más grande sea, la reducción en los asentamientos verticales será mayor, al aumentar el diámetro se presentan mejoras, pero no son tan significativas mientras que en el caso 3D ocurre totalmente lo contrario, se llega a la conclusión que la mejor manera de mejorar el suelo es implementando columnas de grava con el mayor diámetro que permita la celda unitaria y que la altura de estas no genera una reducción tan significativa de los asentamientos elásticos, ya que los esfuerzos y desplazamientos decrecen sus valores de manera considerable luego de una profundidad aproximada de $2D$. En cuanto a la separación entre columnas que determina el patrón geométrico que estas van a seguir en el terreno, en 2D se obtuvo que a mayor separación (S), mejor será la respuesta del sistema suelo-columnas, mientras que en 3D si se tiene una menor separación mejor es la respuesta y es lo que se debería esperar, ya que una menor espaciamiento entre columnas implica que el suelo a tratar este más densificado de estas, lo que representará una mayor área de reemplazo de suelo fino por columnas (a_r).

Por lo anterior, se llega a la conclusión de que este problema en específico no es posible asumirlo como un modelo 2D, ya que las dimensiones de la sección transversal no son muy pequeñas en comparación con la longitud a lo largo del eje Z , esta consideración podría aceptarse por ejemplo en el caso de estudio de pavimentos o de muros de contención. Al modelar los sistemas suelo-columnas de manera bidimensional, se admitía que las columnas tendrían una longitud infinita (a lo largo del eje Z) lo que hacía que actuaran como unas pantallas con propiedades mecánicas de gravas, de tal manera que entre más separadas se posicionaran y más altura tuvieran, serían capaces de confinar un mayor bloque de suelo, que era

el que se le daba al final unas características de mayor rigidez, además también implicaba que se tuviera una zapata aplicando una carga infinita, sin embargo el modelado en 2D fue indispensable para tener el primer acercamiento con el software por eso se empleó este análisis. En ambos casos (2D y 3D) si se obtuvo que entre menor sea el módulo de elasticidad del suelo en comparación con el de las columnas, se obtuvo mayor reducción en el asentamiento elástico.

NORMALIZACIÓN DE GRÁFICAS PARA USO PARA DISEÑO

Luego de obtener unos resultados muy similares a lo que se esperaba al comparar con la teoría, se decidió a partir de los resultados en 3D realizar unos ábacos con el objetivo de poder hacer un pre-dimensionamiento en el caso hipotético que se quiera implementar este sistema, de tal manera que se pueda conocer una aproximación de primera mano que ayude a dar una idea de lo que implicaría una implementación de este sistema, por eso, lo que se hizo fue tomar algunas graficas obtenidas en este capítulo 5 y se normalizaron, como se muestran a continuación en las figuras:

Donde:

E_c = Modulo de elasticidad de la grava a utilizar en la elaboración de las columnas

E_s =Modulo de elasticidad del suelo a mejorar

D =Diámetro de las columnas de grava

H =Altura de las columnas de grava

B =Ancho de la zapata sobre las columnas de grava.

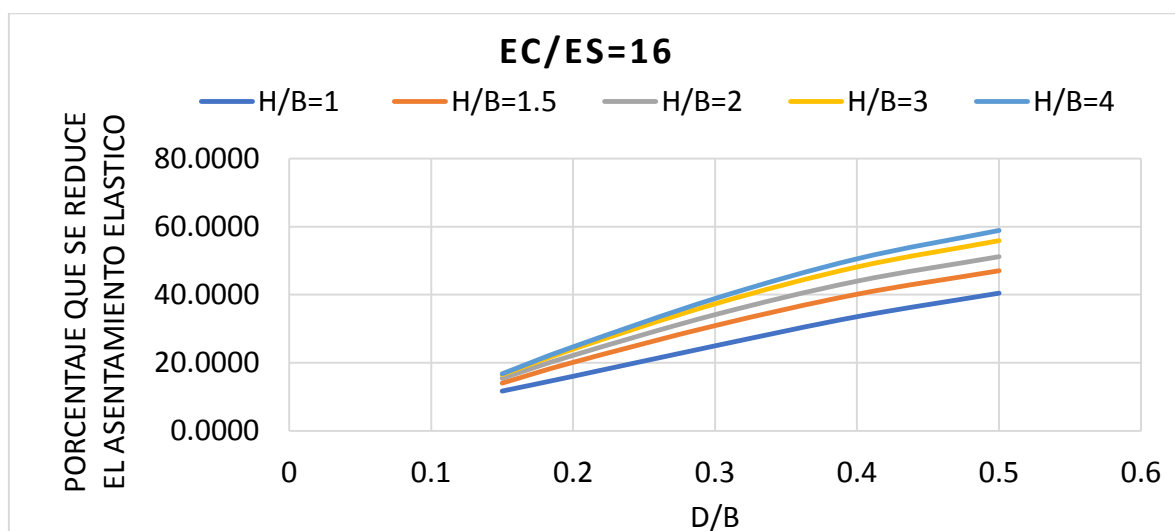


Figura 121 – Ábaco 1, Porcentaje que se reduce el asentamiento elástico vs D/B para $E_c/E_s=16$

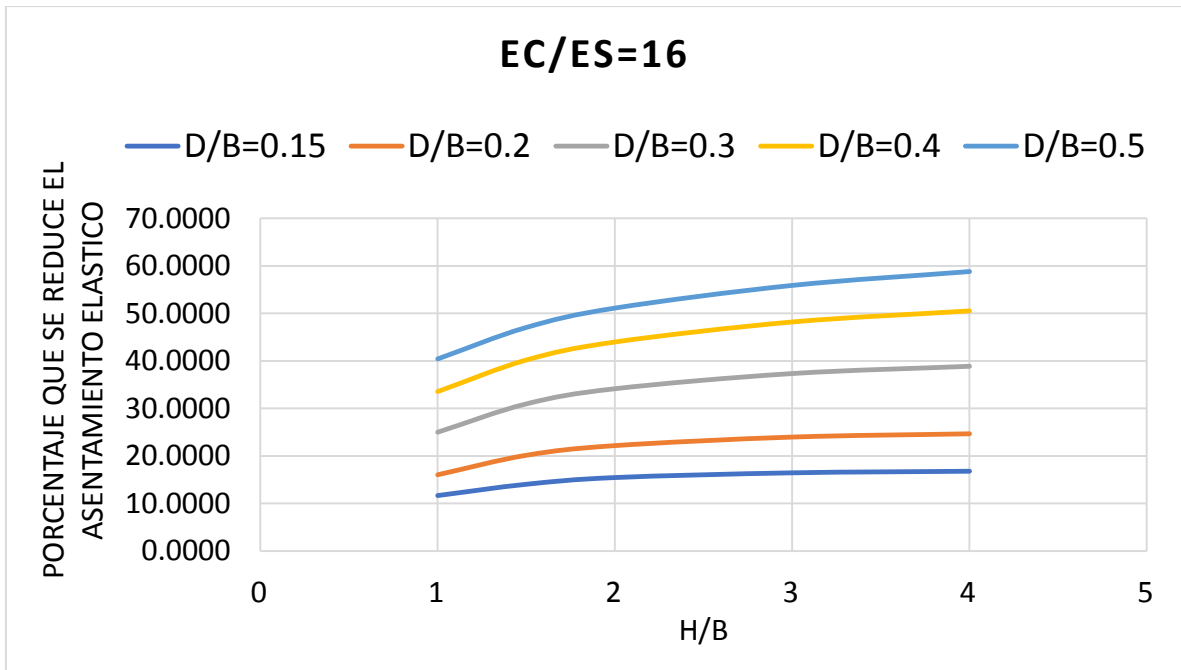


Figura 122 – Ábaco 2, Porcentaje que se reduce el asentamiento elástico vs H/B para $E_c/E_s=16$

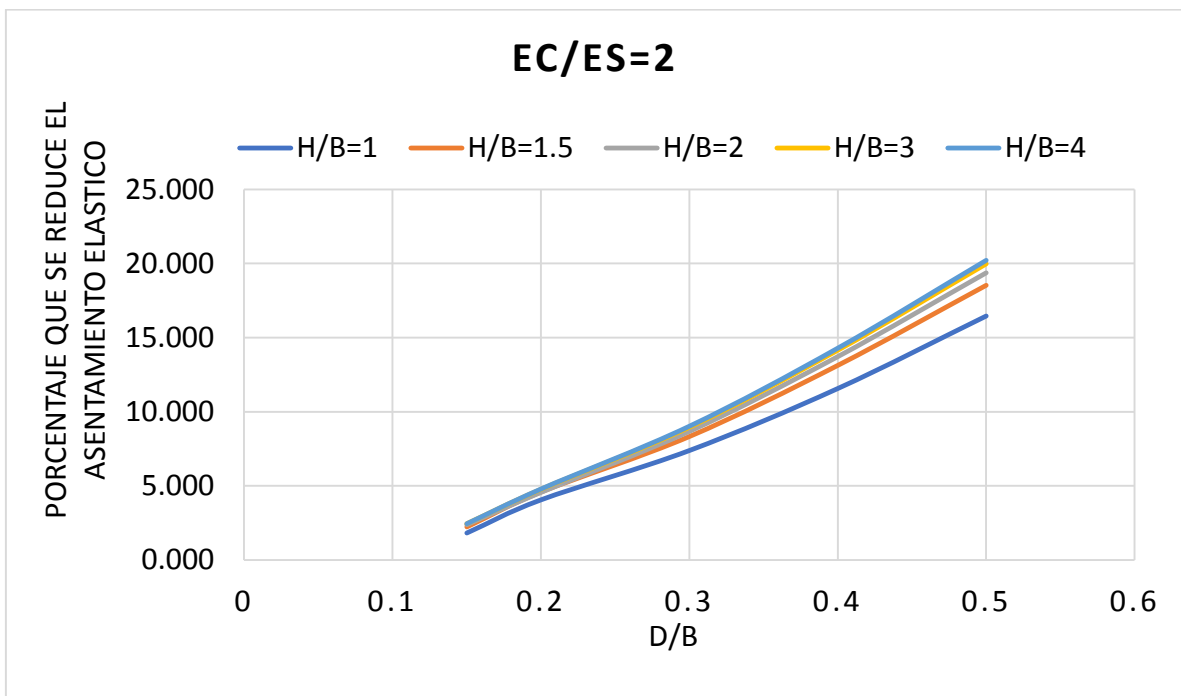


Figura 123 – Ábaco 3, Porcentaje que se reduce el asentamiento elástico vs D/B para $E_c/E_s=2$

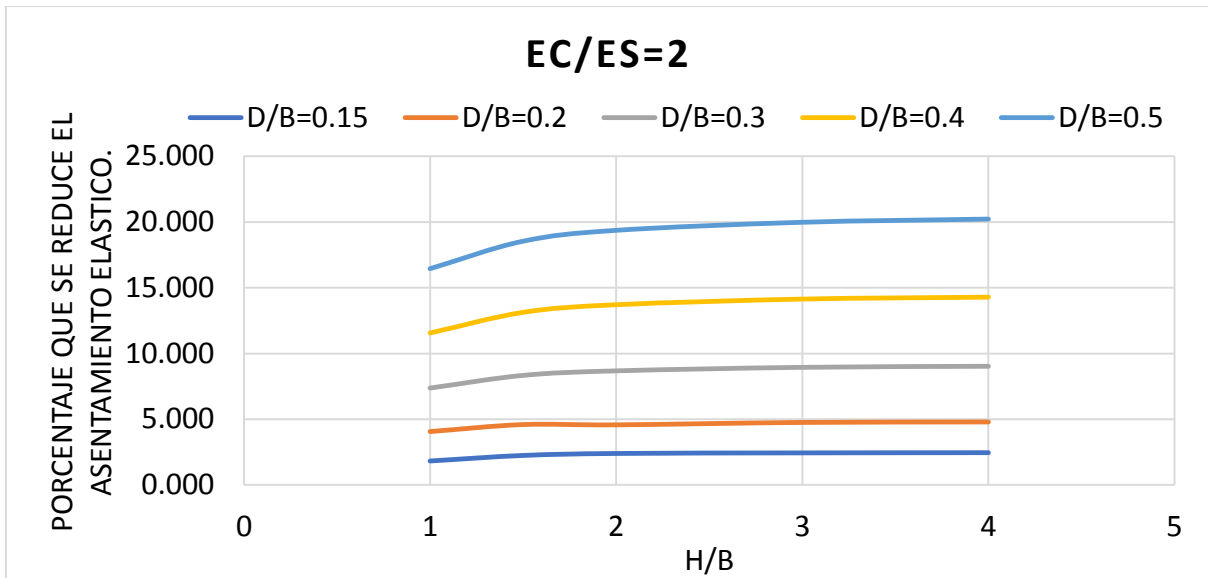


Figura 124 – Ábaco 4, porcentaje que se reduce el asentamiento elástico vs H/B para $E_c/E_s=2$

Los anteriores ábacos serían útiles cuando se tiene una zapata cuadrada de ancho B y se desee implementar un arreglo de columnas de grava las cuales tengan una disposición en el terreno de celda unitaria cuadrada, donde la relación del módulo de elasticidad de las columnas con respecto al del suelo este en un rango de 2 a 16, si se desea conocer un valor intermedio será posible realizar una interpolación lineal.

Para comprender mejor el uso de estos ábacos, se realizará un ejemplo práctico el cual se muestra a continuación.

Suponiendo que se conoce el módulo de elasticidad del suelo a mejorar y que su valor sea de $E_{suelo} = 18.75 MPa$ y en la región se tenga una grava para elaborar las columnas de un módulo de elasticidad de $E_{columnas} = 300 MPa$, además del diseño de la cimentación se decidió implementar zapatas cuadradas de un ancho $B=L=3.5m$ y el ingeniero encargado requiero disminuir los asentamientos elásticos en un 50%, de tal manera que se tiene.

$$\frac{E_{columnas}}{E_{suelo}} = \frac{E_c}{E_s} = \frac{300 \text{ MPa}}{50 \text{ MPa}} \quad ; \quad \frac{E_c}{E_s} = 16$$

Al saberse que se requiere mejorar el asentamiento un 50% se puede hacer uso del ábaco 1 o 2, en este caso se utilizara el 1, por lo que se tiene.

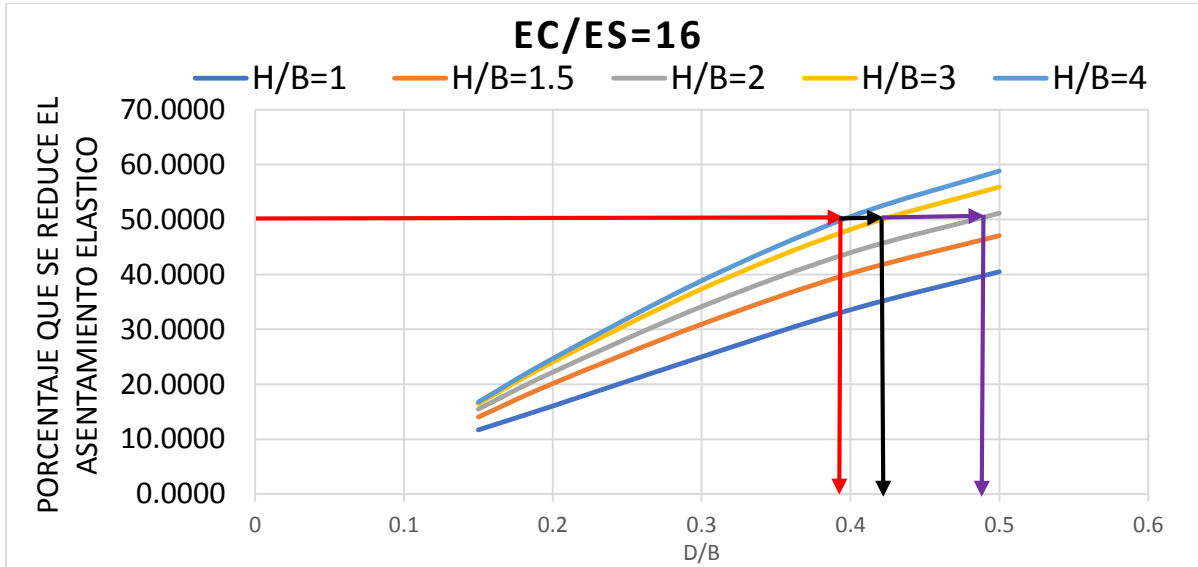


Figura 125 – Dimensionamiento de columnas para un porcentaje de reducción de los asentamientos elásticos de 50%.

A partir de la anterior figura se observa que será posible obtener 3 diseños que cumplirán las condiciones planteadas inicialmente, de tal manera que se tiene:

- Línea roja.

Si se decide dimensionar las columnas de grava teniendo en cuenta esta línea se tiene:

$$\frac{H}{B} = 4 \quad ; \quad H = 4 * 3.5 \quad ; \quad H = 14 \text{ metros}$$

$$\frac{D}{B} = 0.39 \quad ; \quad D = 0.39 * 3.5 \quad ; \quad D = 1.37 \text{ m}$$

- Línea negra.

Si se decide dimensionar las columnas de grava teniendo en cuenta esta línea se tiene:

$$\frac{H}{B} = 3 \quad ; \quad H = 3 * 3.5 \quad ; \quad H = 10.5 \text{ metros}$$

$$\frac{D}{B} = 0.43 \quad ; \quad D = 0.43 * 3.5 \quad ; \quad D = 1.51 \text{ m}$$

- Línea morada.

Si se decide dimensionar las columnas de grava teniendo en cuenta esta línea se tiene:

$$\frac{H}{B} = 2 \quad ; \quad H = 2 * 3.5 \quad ; \quad H = 7 \text{ metros}$$

$$\frac{D}{B} = 0.49 \quad ; \quad D = 0.49 * 3.5 \quad ; \quad D = 1.72 \text{ m}$$

De acuerdo a los anteriores 3 dimensionamientos, lo ideal sería elegir el diseño realizado con la ayuda de la línea morada, ya que las columnas tienen una altura menor a 10 m, lo cual según la experiencia es apropiado desde el punto de vista económico, además a esta altura la columna no tendrá problemas de fallas por columnas cortas, también es importante tener en cuenta que los esfuerzos y los desplazamientos verticales no se propagan mucho más allá de una profundidad de $2D$, en este caso será de $2D=2*1.72=3.44$ m, de tal manera que no es necesario de ninguna manera para este diseño en específico tener una altura de columnas mayor a 7m.

CONCLUSIONES.

- La variable más importante a tener en cuenta al momento de diseñar estos sistemas, es el diámetro de las columnas, ya que, a mayor área de reemplazo de suelo por columnas de grava, se van a obtener mayor reducción en los asentamientos, por esto es que la mayoría de los criterios de diseño dependen de la razón de sustitución (a_r).
- Los esfuerzos verticales (S_{33}) presentan sus mayores valores a profundidad menor de 2D, después de este valor, se van reduciendo de manera significativa, algo similar ocurre con los desplazamientos verticales, donde a medida que aumenta la profundidad de las columnas se van mitigando cada vez más de tal manera que presenta un comportamiento asintótico a medida que incrementa la altura de las columnas, por lo que se corrobora que la altura de las columnas no es una variable muy importante a tener en cuenta al momento del diseño.
- Se comprobó que la profundidad a la que se genera el ensanchamiento de las columnas esta entre 2.5D a 3D que corresponde a lo planteado en la teoría.
- Al comparar los resultados de la relación de los desplazamientos verticales $\left(\frac{S_{tratado}}{S_{sin\ tratar}}\right)$ obtenidos a partir de la ecuación matemática descrita en la teoría de diseño con los adquiridos en el software basado en elementos finitos, se observa que son muy similares, ya que se está modelando un sistema elástico, y la relación que se calcula corresponde a los asentamientos elásticos, por lo que los métodos numéricos con este software representan una buena aproximación para el diseño de estos sistemas o por lo menos proporciona una buena idea de los que se puede esperar.
- En el momento de la construcción de las columnas de grava, se debe garantizar una adecuada compactación de las capas, ya que esto garantiza el confinamiento lateral que le pueda brindar el suelo, lo que va a permitir mejorar la interface suelo-columna con el fin de tener un comportamiento de

rugosidad casi absoluta que es el caso que presenta las mayores mejoras de los sistemas.

- Al momento de elegir los materiales para constituir las columnas de grava, se debe tener en cuenta que entre más grande sea el módulo de elasticidad de estas comparado con el del suelo, se van a obtener mayores reducciones en los asentamientos elásticos.
- El modelado bidimensional (2D) no permite comprobar lo descrito en la teoría como el análisis tridimensional (3D) ya que al suponer que la longitud a lo largo del eje Z es infinita, se tiene un modelo diferente que no corresponde al de unas columnas discretas en un suelo nativo, si a un par de pantallas de grava.

Bibliografía

- Bachus, R. C., & Barksdale, R. D. (1983). *Desing and construction of stone columns Vol. 1*. Atalanta.
- Black, J. A., Sivakumar, V., & Bell, A. (2011). The settlement performance of stone column foundations.
- Bravo Decker, J. (2016). *Mejoramiento masivo de subsuelos mediante pilas de agregado apisonado (RAP) en suelos tipo F segun la norma ecuatoriana de la construccion de 2015*. Guayaquil.
- Castro, J. (11 de Julio de 2017). Modeling stone columns. Santander, España.
- Das, B. M. (2011). *Fundamentos de ingenieria de cimentaciones*. CENGAGE Learning.
- Guerrero, C., & Cruz, L. (2018). *Clasificación de suelos finos de Popayán*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Helwany, S. (2007). *Applied soil mechanics with ABAQUS´ applications*. Bicentennial.
- Hernandez, A. I. (Marzo de 2009). Analisis experimental en modelo reducido de la consolidacion radial y la deformacion de un suelo blando mejorado con columnas de grava. Santander, España.
- Hugues, J. M., & Withers, N. J. (1974). Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns.
- Minna, K., & Castro, J. (19 de Mayo de 2014). Numerical simulations of stone columns installation.
- Mora, C., & Carvajal, E. (2014). *Columnas de grava mediante vibro-sustitucion*. Madrid.
- Osorio, N. C. (2015). Estudio de la mejora de terreno mediante columnas suelo-cemento tipo mixpile. Malaga, España.
- Pollán, J. A. (Enero de 2014). *Diseño basado en tecnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava*. Madrid.
- Shirazi, R., Zarrin, O., & Komeil, V. (2015). The role of vibro-stone column for enhancing the soft soil properties.
- Valverde, H. (2013). *Pilas de grava compactada, un caso práctico*.

Vera-Grunauer, X., & De la fuente, H. (2018). Uso de pilas de grava compactada para mejorar suelos blandos o licuables y diferencia con las columnas de grava vibrada. *Geotecnia*(248), 33-39.

Vincent, J. M. (s.f.). *Fundaciones superficiales con columnas de grava*. Buenos Aires.