

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE DIFERENTES CONFIGURACIONES
GEOMÉTRICAS DE LA PLACA EN UN SISTEMA PLACA-PILOTE EN UN SUELO
ARCILLOSO.

ANA MARÍA RODRÍGUEZ VÁSQUEZ
Código: 507107

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2021

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE DIFERENTES CONFIGURACIONES
GEOMÉTRICAS DE LA PLACA EN UN SISTEMA PLACA-PILOTE EN UN SUELO
ARCILLOSO.

ANA MARÍA RODRÍGUEZ VÁSQUEZ
Código: 507107

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil

Director:
ING. JUAN CARLOS RUGE CARDENAS

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2021



Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de Aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

BOGOTÁ D.C. 18 DE MAYO DE 2021

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a mi familia y a todos lo que participaron en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, el ingeniero Juan Carlos Ruge, por guiarme en este proceso de entender y aplicar la geotecnia en problemas reales.

A mi asesor de propuesta de grado el ingeniero Brayan Arévalo quien me adentro en la investigación de la geotecnia y quien me brindó las bases para crear este Trabajo de Grado.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2.1. ANTECEDENTES.....	16
2.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN.....	22
2.3. JUSTIFICACIÓN.....	25
3. OBJETIVOS	26
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	26
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
4. ALCANCES Y LIMITACIONES	27
5. MARCOS DE REFERENCIA.....	28
5.1. MARCO TEÓRICO	28
5.2. MARCO CONCEPTUAL.....	31
5.3. MARCO LEGAL.....	36
6. ESTADO DEL ARTE	38
7. CARACTERIZACIÓN DEL TIPO DE SUELO.....	42
7.1. GEOLOGÍA.....	42
7.2. PERFIL ESTRATIGRÁFICO.....	43
7.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS.....	45
8. PARÁMETROS	47
8.1. VARIABLES Y CONSTANTES ENTRE MODELOS	47
8.2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS	49
8.3. DATOS ESTRUCTURALES	53
8.4. CARGAS.....	54
9. MODELACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS	57
10. METODOLOGÍA	64
10.1. MODELO 1	64
10.2. MODELO 2.....	67

10.3.	MODELO 3.....	71
10.4.	MODELO 4.....	74
10.5.	MODELO 5.....	79
10.6.	MODELO 6.....	83
10.7.	ESFUERZOS TOTALES	86
11.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	89
11.1.	CURVAS CARGA VS DEFORMACIÓN	89
11.2.	EFEECTO DE BLOQUE EN GRUPO DE PILOTES	91
11.3.	RESUMEN.....	92
12.	CONCLUSIONES	95
13.	RECOMENDACIONES	96
14.	BIBLIOGRAFÍA	97

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Autores con metodologías en cimentaciones superficiales basadas en diferentes configuraciones geométricas.....	24
Tabla 2. Normativa requerida.....	37
Tabla 3. Estado del Arte	38
Tabla 4. Perfil Estratigráfico del Suelo	44
Tabla 5. Parámetros Físico-mecánicos del suelo	45
Tabla 6. Relación de separación en modelos	48
Tabla 7. Descripciones variables en modelos.....	48
Tabla 8. Parámetros de Plasticidad	50
Tabla 9. Parámetros de Resistencia	51
Tabla 10. Parámetros de Compresibilidad.....	52
Tabla 11. Parámetros de Elasticidad	53
Tabla 12. Parámetros del pilote	54
Tabla 13. Parámetros de las placas.....	54
Tabla 14. Valores de carga vs deformación pilote individual	55
Tabla 15. Cargas aplicadas a los modelos	57
Tabla 16. Resultados deformaciones Modelo 1	64
Tabla 17. Resultados deformaciones Modelo 2	67
Tabla 18. Resultados deformaciones Modelo 3.....	71
Tabla 19. Resultados deformaciones Modelo 4.....	74
Tabla 20. Resultados deformaciones Modelo 5.....	79
Tabla 21. Resultados deformaciones Modelo 6.....	83
Tabla 22. Relación Área - Esfuerzo - Carga efectiva	87
Tabla 23. Resumen de desplazamientos elásticos y por consolidación	93

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Carga vs Deformación pilote individual	57
Gráfica 2. Carga vs Deformación Modelo 1	65
Gráfica 3. Incremento de la deformación por carga Modelo 1	67
Gráfica 4. Carga vs Deformación Modelo 2	68
Gráfica 5. Incremento de la deformación por carga Modelo 2	70
Gráfica 6. Carga vs Deformación Modelo 3	72
Gráfica 7. Incremento de la deformación por carga Modelo 3	74
Gráfica 8. Carga vs Deformación Modelo 4	75
Gráfica 9. Incremento de la deformación por carga Modelo 4	78
Gráfica 10. Carga vs Deformación Modelo 5	80
Gráfica 11. Incremento de la deformación por carga Modelo 5	82
Gráfica 12. Carga vs Deformación Modelo 6	84
Gráfica 13. Incremento de la deformación por carga Modelo 6	86
Gráfica 14. Esfuerzo vs Área placa.....	87
Gráfica 15. Carga vs Área placa	88
Gráfica 16. Resumen desplazamientos a 30 cm.....	89
Gráfica 17. Resumen desplazamientos carga máxima.....	90
Gráfica 18. Resumen desplazamiento total vs Carga	93

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cuadro resumen de metodologías pioneras	20
Figura 2 - Elemento irregular en cimentaciones superficiales.....	23
Figura 3. Factor de forma de asentamiento versus parámetro de forma de cimentación.....	23
Figura 4. Curva Carga - Asentamiento	28
Figura 5. Curva esfuerzo-deformación en Placa-Pilotes.....	30
Figura 6. Curva carga-asentamiento de un pilote	31
Figura 7. Distribución de presiones bajo losas	32
Figura 8. Losas de fundación combinadas con pilotes	34
Figura 9. Localización General del predio.....	42
Figura 10. Localización geológica.....	43
Figura 11. Esquema variables y constantes en modelos.....	47
Figura 12. Penetración Estándar N de campo	51
Figura 13. Software PLAXIS 2D: Modelo pilote único.....	56
Figura 14. Software PLAXIS 2D: Creación de nuevo proyecto	58
Figura 15. Software PLAXIS 2D: Esquema suelo típico	59
Figura 16. Software PLAXIS 2D: Ventana parámetros de suelo.....	60
Figura 17. Software PLAXIS 2D: Asignación nivel freático	60
Figura 18. Software PLAXIS 2D: Elementos estructurales	61
Figura 19. Software PLAXIS 2D: Asignación materiales al suelo	62
Figura 20. Software PLAXIS 2D: Condiciones iniciales	62
Figura 21. Software PLAXIS 2D: Modulo Cálculos	63
Figura 22. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 1	66
Figura 23. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 1	66
Figura 24. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 2	69
Figura 25. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 2.....	70
Figura 26. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 3	73
Figura 27. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 3	73
Figura 28. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 4	76

Figura 29. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 4	77
Figura 30. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 5	81
Figura 31. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 5	81
Figura 32. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 6	85
Figura 33. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 6	85
Figura 34. Esfuerzos totales Modelo 1 y 6	91
Figura 35. Desplazamientos totales Modelo 1 y 6	92

GLOSARIO

AGUA FREÁTICA: Es la que puede moverse en la zona de saturación de una masa de suelo o roca por efecto de la atracción gravitacional.

ARCILLAS: Fracción de suelo con las partículas de tamaño inferior a 0,002 mm y en las que se puede determinar un límite plástico y un límite líquido.

ARENA: Fracción de suelo cuyas partículas tienen un tamaño comprendido entre 0,06 mm y 2 mm. La composición depende en gran parte de su procedencia, en la costa su principal componente suele ser la sílice, la arena más fina hallada en el mar suele tener como componente principal la caliza molida, en otros lugares su composición incluye hierro, feldespato y en casos aislados yeso.

ASENTAMIENTO: Son hundimientos que se generan en el suelo por la aplicación de cargas ya sean puntuales o distribuidas. Estos pueden ser diferenciales, donde la magnitud varía de un punto a otro de la estructura.

BULBO DE PRESIÓN: Es el lugar geométrico del espacio de suelo en donde se generan mayores cargas verticales por efecto de la aplicación de cargas.

CIMENTACIÓN: Son elementos estructurales encargados de transmitir cargas de una edificación al suelo, estos deben distribuir dichas cargas de manera que no se supere la capacidad máxima de esfuerzo de un suelo.

COHESIÓN: Es una propiedad del suelo donde las partículas de este se mantienen unidas por fuerzas internas, estas generan una resistencia al corte cuando la presión normal efectiva es 0.

CONSISTENCIA: Es la resistencia del suelo a ser deformado, se rige por las fuerzas físicas de adhesión y cohesión, las cuales dependen del contenido de humedad del material, por ello se debe expresar en términos de seca, húmeda y saturada.

CONSOLIDACIÓN: Es un proceso de reducción de volumen de los suelos finos cohesivos (arcillas y limos plásticos). Se realizan ensayos para determinar parámetros usados para predecir la velocidad y la magnitud del asentamiento de estructuras fundadas sobre arcillas.

DEFORMACIÓN: Es el cambio de tamaño o forma que sufre un cuerpo.

ELASTICIDAD: Es la propiedad de los materiales que se deforman proporcionalmente a los esfuerzos a que son sometidos y recuperan su forma y dimensiones originales cuando cesa la aplicación de tales esfuerzos.

ESTADOS LIMITE: Son parámetros que reflejan un cumplimiento o incumplimiento de condiciones estructurales en función de la tensión.

ESTUDIO GEOTECNICO: Es una herramienta en el ámbito civil que se usa para reconocer detalles geotécnicos y geológicos de un área específica donde se quiere realizar una estructura, esto con el fin de determinar las mejores recomendaciones y criterios asociados a la cimentación.

GRADIENTE HIDRAULICO: Es la diferencia de la altura total de energía respecto a la distancia recorrida por el agua a lo largo de una línea de corriente.

MUESTRA: Son porciones representativas de un suelo, son importantes a la hora de determinar el tipo y las características de dicho suelo, estas son analizadas en laboratorio y expuestas a pruebas.

NIVEL FREÁTICO: Altura en la que se encuentra el agua en una perforación, generalmente se encuentra debajo del nivel superior del suelo.

PERFORACIÓN: Constituye un método en el que el objetivo principal es establecer una columna litológica para generar un muestreo.

PERMEABILIDAD: Es la capacidad del suelo para permitir el flujo de un fluido a través de sí mismo.

PESO ESPECÍFICO SATURADO: Corresponde a una muestra de suelo húmeda, con todos sus poros llenos de agua.

PESO ESPECÍFICO SECO: Es el peso de las partículas sólidas, dividido por el volumen total de la muestra.

POROSIDAD: Se denomina porosidad (n), al cociente entre el volumen que ocupan los poros, y el volumen total del suelo (suma de poros y partículas sólidas).

PROFUNDIDAD CIMENTACIÓN: Es la profundidad hasta la cual se llevan los elementos estructurales que transmiten el peso de la estructura al suelo de la cimentación

RESISTENCIA AL CORTE: Es el máximo valor del esfuerzo cortante que el suelo puede soportar, se pueden clasificar entre resistencia no-drenada y resistencia drenada.

ROCA: Son agregados de uno o más minerales sólidos, con propiedades físicas y químicas definidas, que se agrupan de forma natural.

SUBPRESIÓN: Fuerza ascendente producida por el agua sobre una estructura, elemento de contención o de cimentación sumergido.

SUELO GRANULAR: Son suelos conformados en su mayoría por arena y grava.

1. INTRODUCCIÓN

Las obras civiles ocupan un alto porcentaje del uso del suelo, y este debe proporcionar una capacidad portante adecuada para evitar asentamientos excesivos y con ello daños en las estructuras. Bogotá descansa sobre un depósito lacustre de suelos blandos arcillosos propensos a sufrir grandes asentamientos donde el sistema Placa-Pilote se ha convertido en el principal sistema de cimentación de edificios.

El sistema Placa-Pilote ha sido estudiado a lo largo de la historia de las cimentaciones, los autores más característicos han sido Butterfield and Banerjee quienes en 1971 por primera vez formularon teorías sobre cómo ayudaban los pilotes en una losa de cimentación superficial, Randolph (1983) estudio la capacidad de rigidez de los pilotes y de la placa en conjunto, obtuvo muchas respuestas en cuanto a consolidación y desplazamientos. Con base en estos estudios cada vez más autores fueron incrementando variables en los sistemas para llegar a entender cómo funcionaba un sistema de dos elementos y cómo actuaba cada uno de ellos en el aporte de rigidez.

Es conocido en la ingeniería civil, que la geometría de la losa de cimentación juega un rol importante en la capacidad de carga y asentamientos elásticos esperados. Por lo tanto, puede haber modificaciones en la distribución de carga del sistema, obtenidas mediante los métodos analíticos comúnmente usados en la ingeniería práctica, como el método de Poulos y Davis, que presentan un análisis basado en el número de pilotes y su separación, la dimensión de los pilotes y la placa, la relación de Poisson y el módulo de elasticidad. Así mismo es imperante reconocer ciertos fenómenos del suelo en la interacción con los pilotes que pueden ser de gran valía a la hora de analizar ciertos aspectos paramétricos en el diseño de un sistema compuesto de cimentación como el del actual estudio.

Este trabajo investigativo busca a través de modelaciones y análisis numéricos, con ayuda del método de elementos finitos dar a conocer una comparativa entre 6 geometrías, las cuales tendrán algunas variables y otras constantes que permitirán asociarlas a fenómenos y reacciones del suelo, para ello se usa un suelo arcilloso homogéneo igual para todos los modelos. Este análisis y comparativa se realizará con el software PLAXIS 2D el cual permite un análisis a través de deformaciones planas, con estos resultados se analizarán los diferentes estados del suelo en cada uno de los modelos y poder concluir como pueden llegar a afectar los anchos de placa y la separación entre los pilotes.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. ANTECEDENTES

Las cimentaciones han jugado un papel importante a lo largo de la historia, desde la antigüedad el hombre intuía una cimentación básica que no contaba con la calidad del suelo como parámetro de diseño, simplemente se basaba en estructuras superficiales. Después llegaron métodos combinados de cimentación y con ello metodologías que incluían las propiedades del suelo y de los materiales como parte fundamental del estudio.

El sistema Placa-Pilote se crearon como una alternativa de cimentación, con la placa superficial se lograba distribuir equitativamente las fuerzas de la estructura y con los pilotes actuando por fricción y resistencia de punta, se podía aumentar la capacidad de carga asumiendo asentamientos mayores, pero con resistencias mayores en métodos independientes.

Los autores Kishida y Meyerhof ¹ (1965) plantearon por primera vez un método matemático basados en ensayos hechos en campo evidenciando dos fallas en el sistema Placa-Pilote, los pilotes con separaciones inferiores a 3 veces su diámetro se calculan como un solo bloque y este genera la fricción por punta sumándole la resistencia de la losa adyacente a los pilotes, y el segundo caso: “Para pilotes muy espaciados la capacidad de carga del grupo de pilote es la suma de la capacidad de carga del cabezal y la capacidad de carga del grupo de pilotes teniendo en cuenta la sobrecarga provocada por el cabezal al nivel de la punta de los pilotes”².

A partir de 1972 los métodos empíricos de evaluación del sistema Placa-Pilote fueron saliendo a flote de manera constante, los pioneros fueron Poulos & Davis quienes desarrollaron un método de análisis basado en la representación de una curva carga-asentamiento en un sistema de Placa-Pilote, basándose en un suelo de comportamiento elástico. En 1983 Randolph desarrolla un sistema de

¹ H. KISHIDA, “ULTIMATE BEARING CAPACITY OF PILES DRIVEN INTO LOOSE SAND,” *SOILS Found.*, vol. 7, no. 3, pp. 20–29, 1967, doi: 10.3208/sandf1960.7.3_20.

² R. Lorenzo, R. P. da Cunha, E. H. Zubeldia, and W. Cobelo, “Aplicación de la teoría de seguridad al diseño geotécnico de losas sobre pilotes,” *Rev. Ing. Construcción*, vol. 28, pp. 251–265, 2013, [Online]. Available: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732013000300003&nrm=iso.

ecuaciones para obtener los valores de rigidez, con ello buscó la capacidad porcentual en la que cada elemento podía contribuir a la rigidez del sistema, pero de manera independiente.

Long Phung Duc ³ (1993) presentó una ecuación donde permite considerar de manera independiente la resistencia por fricción del pilote, y la resistencia punta. En el 2000 Hemsley se basó en la metodología de Randolph para estimar la carga soportada por el sistema, este método utiliza un modelo hiperbólico que predice un comportamiento más realista en comparación a la curva de carga-asentamiento.

Al igual que Hemsley, Poulos (2002) se basó en el método de Randolph para generar una metodología en la que se determinaba que la carga era transmitida a través de los pilotes de manera diferencial. Para 2011 Roy, Bikash y Sahu ⁴ usaron la curva carga-asentamiento planteada en 1972 para evaluar el comportamiento de suelos blandos propensos a consolidación.

En 1994, un método numérico planteado por Poulos registró resultados razonables, generando un análisis en base a la teoría plástica e incluyó factores hasta el momento despreciados como la presión límite bajo la losa y la capacidad de carga última en pilotes, teniendo en cuenta variables como longitud, diámetro, y cantidad en el grupo de pilotes. Para 1998, más variables fueron apareciendo para evaluar como soportaba la cimentación las cargas, Katzenbach, Arslan, Moormann, & Reul ⁵ generaron simulaciones en donde se variaba la cantidad de pilotes y la longitud en un rango establecido, creando unos estándares para el prediseño dependiendo de las exigencias de la estructura, del mismo modo Chow desarrollo métodos numéricos con las mismas variables, pero condicionándolas a cargas horizontales y verticales.

Para 2006 ⁶ basados en metodologías anteriores añadieron que para la capacidad de carga ultima se debe tomar el menos de estos valores: “La capacidad de carga

³ P. D. LONG, “Footings with settlement-reducing piles in non-cohesive soil.,” Linköping, 1993. doi: diva2:1299972.

⁴Roy, S., Chattopadhyay, B. C., & Sahu, R. B. Piled-Raft foundation behavior on consolidating soft soil. In *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Kochi, India* (pp. 879-882).2011.

⁵R. Katzenbach, U. Arslan, C. Moormann, Piled raft foundation: interaction between piles and raft. *Darmstadt Geotechnics*, 4(2), 279-296.1998

⁶ A. M. Luca de Sanctis, “Bearing Capacity of Piled Rafts on Soft Clay Soils,” *Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 132, no. 12, 2006.

última de los pilotes para un fallo en bloque más la capacidad de carga de la losa por fuera de los pilotes y que la suma de la capacidad de carga última de la losa y la del grupo de pilotes como sistema.”⁷. Pero no fue sino hasta 2012 que un grupo de ingenieros que se llegaron a incluir variables como la geometría de la placa en la evaluación de resistencia, lo hicieron a través de un software en 2D, allí concluyeron que factores como la separación, la ubicación y la longitud eran decisivos a la hora de los asentamientos totales y diferenciales ⁸.

Los softwares actuales han permitido innumerables estudios sobre comportamientos del sistema Placa-Pilote, los modelos toman datos de suelos prestablecidos y a partir de modelos con diferencias entre sí para realizar comparativas se realizan simulaciones, como es el caso de Volkan Kalpakci y Yener Ozkan⁹, quienes basaron la cimentación en un suelo de arcillas sobre consolidado a partir de 100 diferentes modelos de análisis numéricos bidimensionales y tridimensionales, los resultados arrojaron una aproximación al diseño en situaciones parecidas a las del estudio, allí se hace énfasis en la aproximación real, los modelos de autores anteriores significaban un acercamiento al sistema pero no siempre se podía contar con datos concretos.

Así mismo Oh y Lin ¹⁰ realizaron una simulación del comportamiento de estructuras apoyadas en suelos de arcillas blandas y arenosos, gracias a ello se concluyó que cuando la estructura se apoyaba en suelos granulares, los asentamientos dependían del espaciamiento entre los pilotes mientras que el espesor de la placa no actuaba de manera directa en evitar dicho asentamiento.

Con el pasar del tiempo y el uso de métodos numéricos y tecnologías computacionales, los análisis comprenden cada vez más los comportamientos del

⁷ R. Lorenzo, R. P. da Cunha, E. H. Zubeldia, and W. Cobelo, “Aplicación de la teoría de seguridad al diseño geotécnico de losas sobre pilotes,” *Rev. Ing. Construcción*, vol. 28, pp. 251–265, 2013, [Online]. Available: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732013000300003&nrm=iso.

⁸ R. S. Bisht and B. Singh, “STUDY ON BEHAVIOUR OF PILED RAFT FOUNDATION BY NUMERICAL MODELLING,” *SAITM Res. Symp. Eng. Adv.*, 2012.

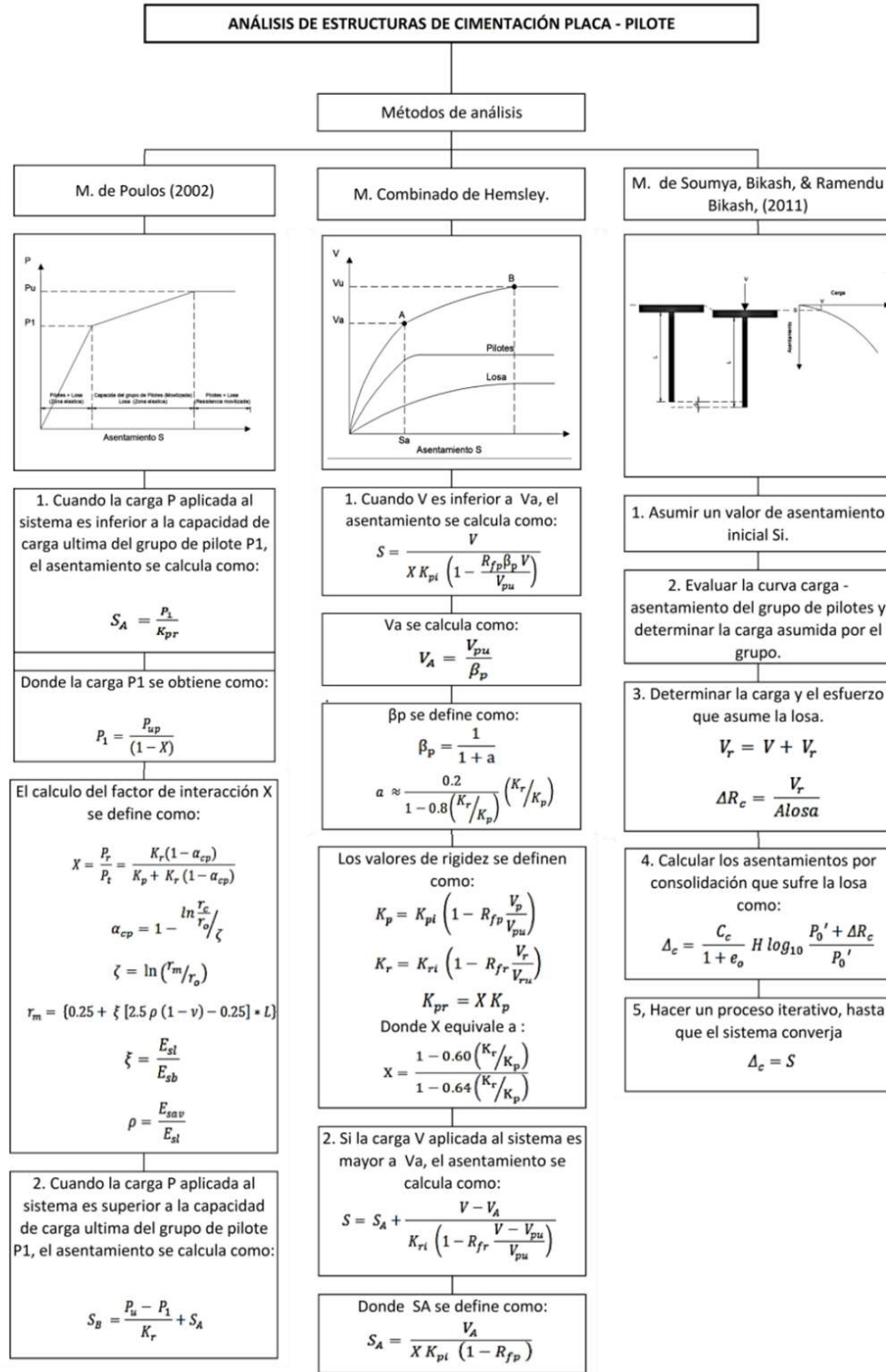
⁹ M. Y. KALPAKCI, Volkan; ÖZKAN, “A simplified approach to the settlement estimation of piled rafts,” *Acta Geotech. Slov.*, vol. 9, pp. 77–85, 2012

¹⁰ E. Oh, D. Lin, Q.-M. Bui, M. Huang, C. Surarak, and A. Balasubramaniam, “Numerical Analysis of Piled Raft Foundation in Sandy and Clayey Soils,” 2009.

suelo, aproximándose cada vez más a la realidad, sin embargo, es claro que existen factores impredecibles en la naturaleza y siempre se está sujeto a variables externas.

En la Figura 1 se muestra un resumen de 3 autores sobre cimentaciones combinadas y las metodologías empíricas que usaron, se tomó como referencia que los resultados arrojados por el estudio y cálculos incluyeran el proceso de consolidación como uno de los resultados finales; cabe resaltar que el método de Randolph no se expone porque Hemsley reúne en su metodología una combinación junto con la de Davis y Poulos, este último realizó una modificación a su curva de asentamiento generando un método diferente al planteado inicialmente.

Figura 1. Cuadro resumen de metodologías pioneras



Fuente: Pulido Rincón 2019

Si se habla de manera global, los pioneros de estos métodos fueron Randolph, Poulos & Davis y Butterfield y Banerjee, ellos basaban sus análisis en estándares geométricos y en números de pilotes con longitudes preestablecidas; el método de Randolph (1983) por ejemplo está basado en factores de interacción promedio, donde el radio de cada pilote es igual, similar a la longitud de los mismo.

En la actualidad diversos métodos tomaron como base los análisis anteriores y sacaron metodologías con variables diferentes, uno de ellos es el Método de Poulos (2002), quien a través de la representación de la curva carga-asentamiento determina tres factores esenciales, la rigidez de la losa, la rigidez de los pilotes y el factor de interacción Placa-Pilotes.

El método de Roy, Bikash y Ramendu (2011), genera el análisis a partir del tiempo por consolidación, se basa en que la estructura es rígida y el esfuerzo entre los pilotes y el suelo trabaja en la zona elástica, se determina además la capacidad de carga asumida por el pilote con la curva carga-asentamiento de un pilote muestra.

Actualmente diversos estudios se han interesado en este tipo de cimentación; un artículo de la revista *Structural Engineering and Mechanics*,¹¹ realizó un estudio experimental donde analizan el comportamiento del sistema Placa-Pilote basados en diferentes configuraciones en la geometría de los pilotes, en diferentes tipos de suelos. Se concluyó que el número de pilotes juega un papel importante en los asentamientos de la estructura, cuando se usaron 4 pilotes la contribución de resistencia no era significativa, a partir de 6 los pilotes reducían significativamente los asentamientos.

¹¹ F. Mohammed, Y. Mustafa, and A.-T. Sarmad, "Effect of pile group geometry on bearing capacity of piled raft foundations," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 54, no. 5, pp. 829–853, 2014.

2.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN

Las cimentaciones suponen un reto importante a la hora de predecir el comportamiento del suelo, innumerables metodologías han sido planteadas abarcando variables cada vez más amplias, y en terrenos mucho más específicos, pero un gran interrogante surge cuando consideramos la geometría de la placa.

Como se expresa en el artículo de aplicación de la teoría de seguridad al diseño geotécnico de losas sobre pilotes, “los cálculos para cualquier tipo de cimentación deben analizar la capacidad portante (estado último) y los asentamientos previsibles (estado de servicio), los métodos tradicionales toman el asentamiento como un parámetro esencial en la efectividad de la cimentación, así mismo se hace énfasis en que para aplicar los métodos se limitan a que las condiciones in situ sean aproximadas a las de las modelaciones”¹².

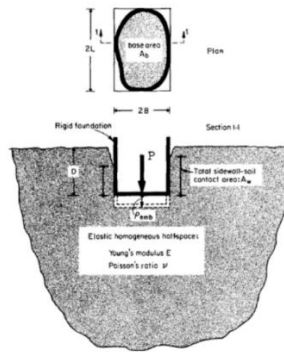
En cimentaciones superficiales, algunos autores como Gazetas lo contemplan, logra relacionar algunos tipos de geometrías en la placa con los asentamientos basados en la teoría elástica, surgen entonces varias teorías de comportamiento basadas en el área de apoyo cargada uniformemente, frente al suelo, cara a ellas se evalúan diferentes comportamientos en el tipo de contacto generando modelos, métodos y análisis creados a partir de la evaluación de formas diferentes a las convencionales.¹³

En la Figura 2 se ilustra una placa con forma irregular, allí a través de una forma rectangular aproximada al tamaño de la cimentación se pueden predecir las r las cargas y los asentamientos futuros, y así compararlo con una estructura rectangular de ancho y base iguales a los citados. Para figuras con parámetros constantes, se creó una curva (Ver Figura 3) en donde se relacionan diferentes configuraciones de forma con un factor de asentamiento.

¹² R. Lorenzo, R. P. da Cunha, E. H. Zubeldia, and W. Cobelo, “Aplicación de la teoría de seguridad al diseño geotécnico de losas sobre pilotes,” *Rev. Ing. Construcción*, vol. 28, pp. 251–265, 2013

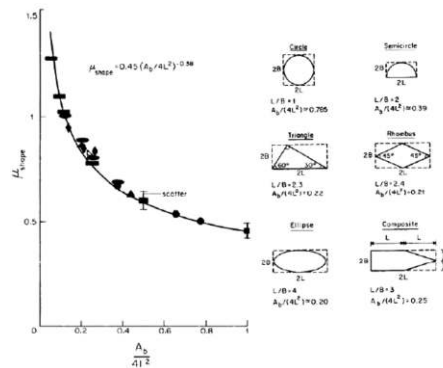
¹³ G. Gazetas, J. L. Tassoulas, R. Dobry, and M. J. O’rourke, “Elastic settlement of arbitrarily shaped foundations embedded in half-space,” *Geotechnique*, vol. 35, no. 3, pp. 339–346, 1985.

Figura 2 - Elemento irregular en cimentaciones superficiales



Fuente: Gazetas 1985

Figura 3. Factor de forma de asentamiento versus parámetro de forma de cimentación



Fuente: Gazetas 1985

En cimentaciones circulares expuestas por David Carrier y John Christian (1973)¹⁴ se utilizaron metodologías que incluían elementos finitos para resolver el asentamiento y las fuerzas que se ejercían en una zapata rígida apoyada sobre un suelo no homogéneo y elástico haciéndolo a través del módulo de Young (E), con el cual se consideró el cambio del E con respecto a la profundidad.

Así mismo, otros autores se basaron en estructuras diferentes a las convencionales (ver Tabla 1) para generar estudios de asentamientos y elasticidad a través de metodologías empíricas.

¹⁴ W. D. Carrier and J. T. Christian, "Rigid circular plate resting on a non-homogeneous elastic half-space," *Géotechnique*, vol. 23, no. 1, pp. 67–84, 1973.

Tabla 1. Autores con metodologías en cimentaciones superficiales basadas en diferentes configuraciones geométricas

MÓDULO DE POISSON	FIGURA	REFERENCIA
0.25	Circulo	Kaldjian ¹⁵
0.25	Circulo (presión aplicada uniformemente)	J Burland ¹⁶
0.49		Carrier y Christiant ¹⁷
0.33	Cuadrado	Domínguez y Roesset ¹⁸
0.33	Circulo (contacto parcial con la pared lateral)	Kausel y Tassoulas ¹⁹
0.40	Circulo	Gazetas ²⁰
0.33	Rectángulo L/B=4	
0.33	Rectángulo L/B=6	
0.49		
0.25	Banda	
0.33		
0.49		

Fuente: Gazetas 1985

Finalmente, después del análisis de teorías y metodologías ligadas no solo a la forma y estructura de la placa, sino también a la distribución de pilotes, se propone realizar una comparativa entre 6 modelos bidimensionales, allí el ancho varía entre cada modelo y la separación entre pilotes se maneja de acuerdo con el espacio que se tiene disponible en cada una de las geometrías de placa.

¹⁵ J. Kaldjian, "Discussion of 'Design Procedures for Dynamically Loaded Foundations,'" *Soil Mech. Found. Div.*, vol. 95, no. 1, p. 364, 1969.

¹⁶ J. Burland and J. Lord, "Proceedings of the Conference on In Situ Investigations in Soils and Rocks.," pp. 61–62, 1970.

¹⁷ W. D. Carrier and J. T. Christiant, "Rigid circular plate resting on a non-homogeneous elastic half-space," *Géotechnique*, vol. 23, no. 1, pp. 67–84, 1973.

¹⁸ J. Dominguez and J. ~M. Roesset, "Dynamic stiffness of rectangular foundations." p. 16152, 1978.

¹⁹ E. Kausel and J. L. Tassoulas, "Transmitting boundaries: A closed-form comparison," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 71, no. 1, pp. 143–159, Feb. 1981.

²⁰ G. Gazetas, J. L. Tassoulas, R. Dobry, and M. J. O'rourke, "Elastic settlement of arbitrarily shaped foundations embedded in half-space," *Geotechnique*, vol. 35, no. 3, pp. 339–346, 1985

2.3. JUSTIFICACIÓN

El estudio de los sistemas Placa-Pilote implican múltiples métodos para su diseño, la afectación de cada uno de los elementos en el funcionamiento de la estructura es aún tema de investigación; en el presente trabajo se escogen variables y constantes para dicho sistema con el fin de conocer la afectación de la geometría de la placa y sus medidas en la capacidad portante y en la deformación y esfuerzos que se descargan en el suelo.

A través de modelaciones en el software PLAXIS 2D se evaluarán 6 diferentes geometrías, que además de variar en su ancho también tendrán separaciones diferentes en sus pilotes, pero que conservarán el mismo número de pilotes entre cada uno de ellos.

Los métodos de elementos finitos nos ayudan en su mayoría a aproximarnos a una realidad con base en datos previos, para la presente investigación los datos fueron tomados de un suelo en su mayoría arcilloso, usando esta misma estratigrafía para cada uno de los modelos, con ello se podrá realizar una comparativa mayor y más aproximada a la realidad.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar paramétricamente la irregularidad geométrica de la placa en el sistema Placa-Pilote en un suelo arcilloso homogéneo

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer la influencia en distribución de cargas debido a la irregularidad de la placa en el sistema Placa-Pilote, para una misma cantidad de pilotes.
- Proponer factores de influencia geométrica debido a la geometría, para una misma cantidad de pilotes.
- Evaluar los asentamientos producidos por geometrías regulares de diferentes relaciones del sistema Placa-Pilote, para una misma relación de pilotes en el software PLAXIS.

4. ALCANCES Y LIMITACIONES

Se presentan algunas limitaciones concernientes al tipo de modelación, similitud entre modelos y tipo de investigación:

- Debido a que se analiza un modelo bidimensional, este se limitará a analizar el ancho de la placa y el largo se manejará por unidad de área.
- Para los 6 modelos se mantendrán datos variables como la separación de pilotes y el ancho (B) de la placa, y datos constantes como la profundidad y diámetro del pilote, el espesor de la placa y el largo (L).
- Para todos los modelos se manejará el mismo tipo de suelo.
- Se realizará un diagnóstico de cargas inicial a través de la modelación de un pilote individual, esto para tener en cuenta la capacidad ultima de resistencia y poder generar rangos de cargas.
- Las cargas que se aplicarán están ligadas al área de la placa, por lo cual además de cargas aplicadas también se evaluarán los esfuerzos en cada uno de los modelos.

Como alcance se hace claridad, que se usan parámetros de suelo con información secundaria tomada de un estudio geotécnico de dominio público que será debidamente citado y referenciado, estos datos no reflejan una comparación hecha en campo, son modelos netamente teóricos.

5. MARCOS DE REFERENCIA

Para el desarrollo del actual proyecto se describen a continuación el marco teórico, el marco legal y el estado del arte

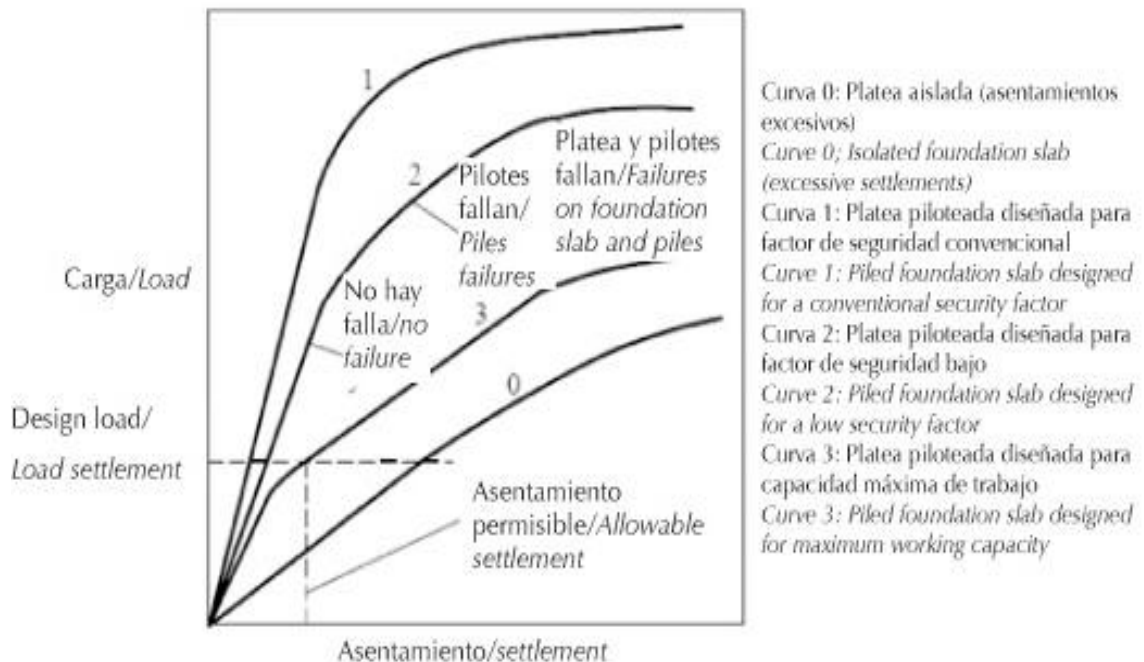
5.1. MARCO TEÓRICO

5.1.1. MÉTODOS DE POULOS

La metodología de Poulos (2001), representó por medio de una curva de carga-asentamiento el comportamiento de un pilote individual, de un grupo de pilotes y de la losa como se muestra en la Figura 4.

Las interacciones entre el grupo de pilotes y los pilotes con placa producen una disminución en la rigidez de los pilotes en relación con su comportamiento carga-asentamiento, y por otra parte aumentan su carga portante límite.

Figura 4. Curva Carga - Asentamiento



Fuente: Poulos 2001

Este método trabaja con la capacidad de carga última de la cimentación, y se basa en dos conceptos teóricos: “La suma de la capacidad de carga de la placa más la capacidad de carga de todos los pilotes” y “La suma de la capacidad de carga del bloque que conforman los pilotes y la placa. Más la porción restante de la placa.”.

Para la metodología de Poulos, se siguen tres pasos, primero se determina la rigidez individual del pilote y después se examina en un contexto de grupo, para cuantificar la capacidad de asentamientos del conjunto.

Segundo, se establece la rigidez de la losa, para ello se usa el método de interacción suelo-estructura, y como tercer paso se evalúa el factor de interacción Placa-Pilote, usando la ecuación (1) donde:

- P_r : carga llevada por la losa
- P_t : carga total aplicada
- K_r : Rigidez de la losa
- K_p : Rigidez del grupo de pilotes
- α_{cp} : Coeficiente de interacción

Allí intervienen parámetros ya preestablecidos en el paso uno y dos.

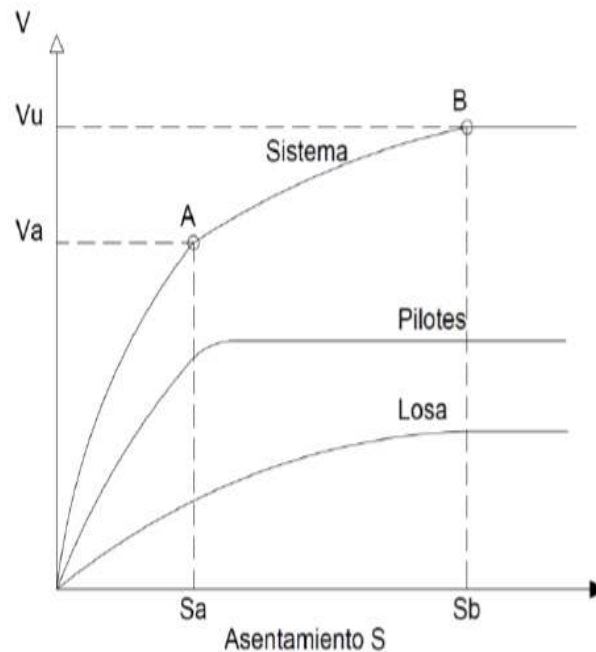
$$x = \frac{P_r}{P_t} = \frac{K_r(1 - \alpha_{cp})}{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})} \quad (1)$$

5.1.2. MÉTODO DE HEMSLEY

Para el método combinado de Hemsley (2000), se combinan los métodos de Randolph y Poulos & Davis, es usado en el cálculo de asentamientos inmediatos y finales del sistema para suelos arcillosos.

Hemsley (2000) plantea el comportamiento de los elementos que componen el sistema individualmente y después por grupo, al igual que en el método de Poulos, este plantea que una vez los pilotes alcanzan la resistencia última (ver Figura 5) en el punto A, las cargas faltantes son soportadas por la placa.

Figura 5. Curva esfuerzo-deformación en Placa-Pilotes



Fuente: Pulido Rincón 2019.

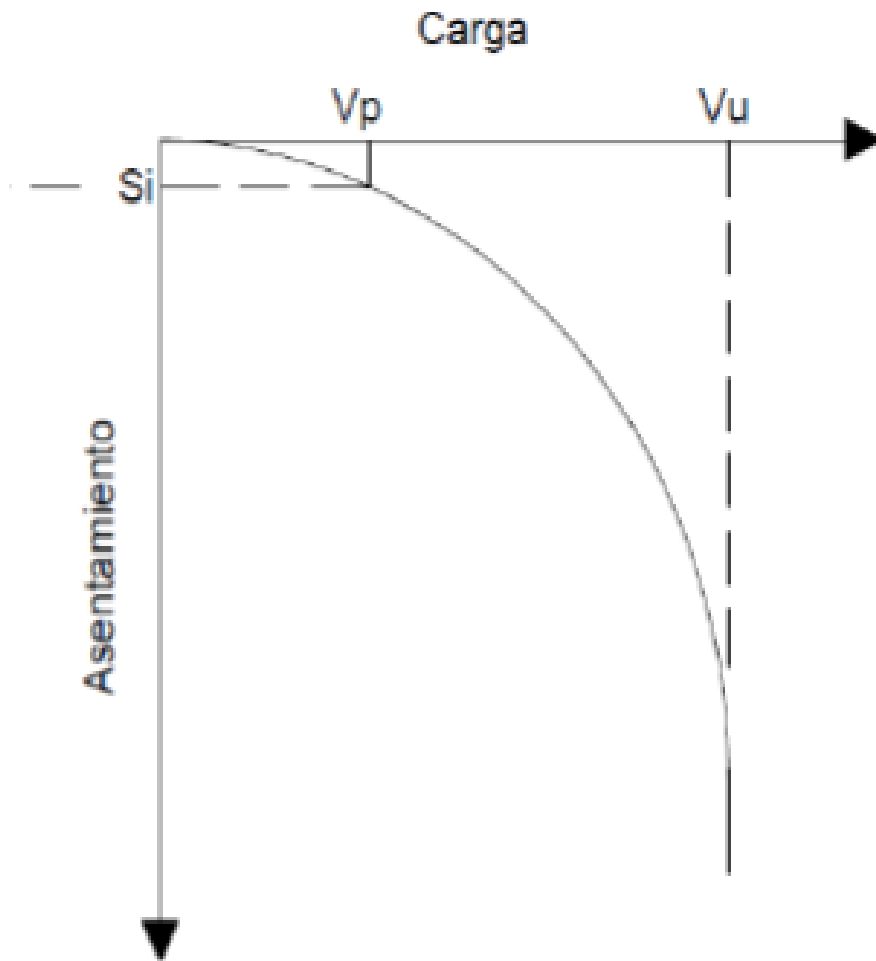
5.1.3. MÉTODO DE ROY, BIKASH Y RAMENDU

“En 2011 desarrollaron una metodología para el análisis de estructuras de cimentación Placa-Pilote, involucrando en el análisis el comportamiento en el tiempo por consolidación. Este método asume como hipótesis de diseño que la estructura se comporta de manera rígida y que el proceso de interacción entre los pilotes y el suelo se restringe a la zona elástica.”²¹.

Como se indica en la Figura 6, este método compara el esfuerzo frente a la deformación, allí se tiene en cuenta una constante base como criterio de falla, y con ello poder comparar los asentamientos permisibles y últimos, el S es la diferencia de profundidades ocasionada por el asentamiento en un pilote.

²¹ O.D. Pulido Rincón., “Evaluación del comportamiento del sistema de fundación placa – pilotes en suelos blandos con consolidación a partir de métodos analíticos.” Universidad Nacional de Colombia, 2019.

Figura 6. Curva carga-asentamiento de un pilote



Fuente: Pulido Rincón 2019.

5.2. MARCO CONCEPTUAL

5.2.1. CIMENTACIONES

Las cimentaciones reciben las cargas que se transmiten a través de la estructura y buscan descargarse en el suelo, es su labor distribuirlas de manera adecuada para que no se generen asentamientos diferenciales, ni superen la presión admisible del suelo, deben actuar contra efectos cortantes y esfuerzos de flexión siempre actuando según el terreno lo permita. Para el presente trabajo se explorarán dos clases de cimentación, una será superficial, y la otra profunda:

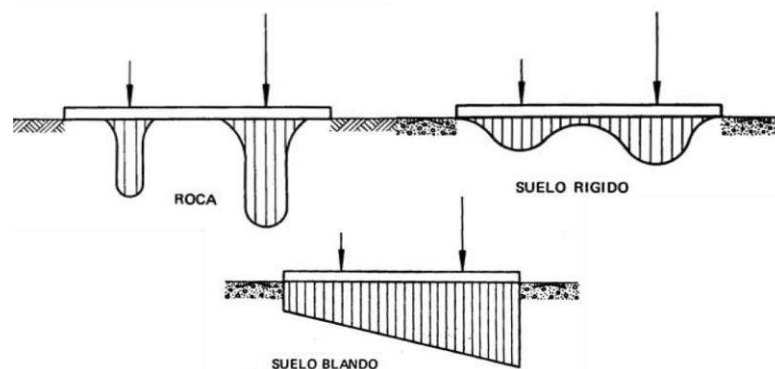
Cimentación Superficial (Losas): Las losas son plataformas hechas en su mayoría de hormigón, distribuyen las cargas uniformemente a través de toda el área de la cimentación y dependen en su mayoría del tipo de suelo en el cual se ubican.

En una cimentación sobre placa los esfuerzos son distribuidos de tal manera que los puntos débiles y con más carga se contrarresten con los puntos que no se están exigiendo a su máxima capacidad, esto genera asentamientos que si bien no son totalmente uniformes si tienen características definidas en comparación a cimentaciones por zapatas o vigas.

El suelo a su vez puede generar un asiento diferencial,²² en suelos en arena donde la cimentación sea menor a 2.5 metros por debajo del terreno natural, las partes exteriores del área de la losa se asentarán más que en la parte central, esto se debe a las variaciones en la compresibilidad del subsuelo, aun siendo así, los asentamientos no serán significativos si los comparamos con los demás tipos de estructuras de cimentación superficial.

Es claro además que cuando se habla de placas estas están ligadas a un apoyo simple, continuo y a una carga uniformemente distribuida transmitida al suelo, sin embargo, las presiones de contacto cambian de un tipo de suelo a otro, así pues, en una losa apoyada en un suelo rocoso la distribución de presiones se localizará en áreas muy pequeñas, en suelos arcillosos compactados y parcialmente rígidos el comportamiento es diferente, las áreas de presión son más amplias (ver Figura 7) mientras que en los suelos blandos donde la presión es totalmente plana.

Figura 7. Distribución de presiones bajo losas



Fuente: Jiménez Salas, Justo Alpañes 1981

²² Jiménez Salas, J.A., Justo Alpañes, J.L. de, and Serrano González, Alcibiades A., 'Geotecnia y Cimientos', Madrid, Rueda, 1981.

Pilotaje: Los pilotes son un tipo de cimentación profunda, que actúan con cargas puntuales sobre el terreno, estos son hincados hasta encontrar una capa portante que resiste la carga necesaria; son usados en estructuras que generan fuerzas a tracción, en terrenos con arcillas expansivas, terrenos de baja calidad entre otros.

Los pilotes actúan de acuerdo con el tipo de terreno y a su disposición frente a los demás pilotes, ya sean en grupo o aislados, en suelos cohesivos como las arcillas compactas los pilotes actúan por fricción, mientras que en las arenas se actúa por resistencia en la punta.

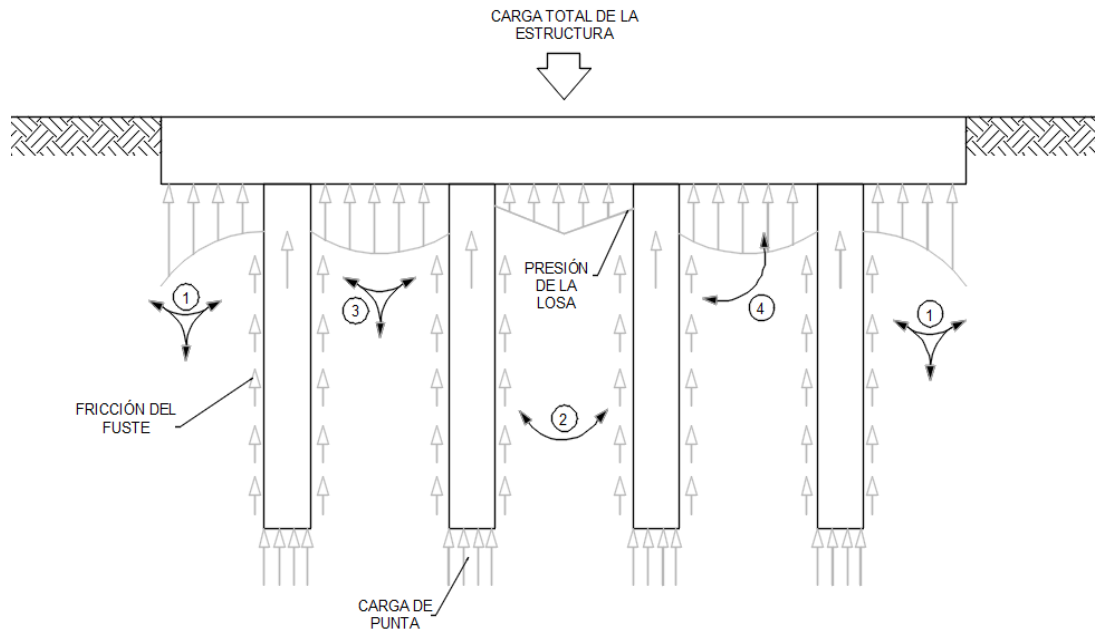
En suelos arcillosos puntualmente existen varias consideraciones, en casos de grupos de pilotes estas interacciones producen un remoldeo y una reducción de capacidad portante alta, es por ello por lo que los pilotes suelen sufrir alteraciones en las presiones intersticiales.

Sistema Placa-Pilote: Este sistema de cimentaciones combinadas ha sido acogido por su gran funcionalidad, ya sea porque la estructura exige que se soporten cargas importantes, o por las condiciones complejas del terreno, la losa distribuye de manera uniforme las cargas y evita asentamientos, y los pilotes transmiten estas cargas de manera lateral por fricción al terreno y de manera puntual por el cabezal hacia un estrato más portante.

Uno de los mayores desafíos de este sistema es la relación Placa-Pilote, ya que los esfuerzos no se generan de maneras iguales en todos los pilotes, es por ello que su diseño y análisis requieren análisis numéricos que evalúen el comportamiento individual y grupal de todos los pilotes, además se deben considerar algunas variables como lo expresa la Figura 8, la interacción entre pilotes (2), la interacción Pilote terreno (1), la interacción Losa terreno (3) y la interacción losa pilote (4).

Aunque representa una de las modalidades de cimentación más efectivas, se deben tener en cuenta variables como la cantidad y diámetros de los pilotes, la geometría de la placa, los asentamientos diferenciales según cargas de la estructura, la longitud y espaciamientos entre pilotes, e incluso los estratos del suelo en el que se intervendrá.

Figura 8. Losas de fundación combinadas con pilotes



Fuente: Adaptado de Katzenbach, Arslan & Moormann 2000

5.2.2. MECÁNICA DE SUELOS

Estudio Geotécnico: “Debe realizarse una exploración del subsuelo en el lugar en que se va a construir la edificación, complementada con una consideración de sus alrededores para detectar, de ser el caso, movimientos de suelo. El ingeniero geotecnista debe elaborar un informe en el cual relacione la exploración y los resultados obtenidos en el laboratorio, se den las recomendaciones que debe seguir el ingeniero estructural en el diseño de la cimentación y obras de contención, la definición de los efectos sísmicos locales, los procedimientos constructivos que debe emplear el constructor, y los aspectos especiales a ser tenidos en cuenta por el supervisor técnico. En el reporte se deben indicar los asentamientos esperados, su variabilidad en el tiempo y las medidas que deben tomarse para no afectar adversamente las construcciones vecinas. El reporte debe ir firmado, o rotulado, por un ingeniero civil facultado para este fin de acuerdo con la Ley 400 de 1997.”²³

²³ AIS, Asociación colombiana de ingeniería sísmica -, ‘Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10’, Scielo, 2010.

Cohesión: Es la propiedad del suelo que permite que las partículas que lo componen tengan una atracción entre sí, esta es originada por fuerzas moleculares y depende en gran medida del contenido de agua que contenga, lo que causa que la humedad sea la que determina que tan plástico pueda llegar a ser dicho suelo. Para el caso de los suelos arcillosos la cohesión suele estar entre 0,25 kg/cm² y 1,5 kg/cm², esto le proporciona estabilidad y disminuye la probabilidad de derrumbes.

Ángulo de Fricción: Es una propiedad de los materiales granulares, al estar relacionada con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un conjunto de dicho material. En un material granular cualquiera, el ángulo de reposo está determinado por la fricción, la cohesión y la forma de las partículas, pero en un material sin cohesión y donde las partículas son muy pequeñas en relación con el tamaño del conjunto el ángulo de reposo coincide con el ángulo de rozamiento interno.

Arcillas: Son suelos formados por partículas de tamaños inferiores a los Limos (0.002 mm), creadas por transformaciones químicas, están formadas en su mayoría por minerales silicatados constituidos de cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos unidas por enlaces covalentes débiles, generando espacios que pueden ser llenados por partículas de agua haciendo que su capacidad de retención sea elevada, lo que hace que sea un tipo de terreno difícil.

La resistencia de suelos arcillosos depende del contenido del mineral predominante, la resistencia al corte disminuye conforme aumenta el contenido de arcilla, la capacidad de absorción de agua en los bordes laminares y zonas interlaminares genera cambios de volúmenes.

Existen dos grupos, las normalmente consolidadas caracterizadas por su proceso de formación, en el cual se va aumentando la presión por el peso de los estratos superiores, lo que genera un proceso de consolidación más acelerado, y están las arcillas sobre consolidadas, las cuales han sido sometidas a grandes presiones pero que en el momento de los estudios actuales presentan una menor presión a la que estuvieron antes.

Asentamiento en arcillas: “Se dice que las arcillas son normalmente consolidadas cuando nunca han estado sometidas a una presión mayor que corresponde a la que soportan por el efecto de las capas de suelo sobre las mismas. Si sobre este tipo de arcillas se coloca una estructura, es posible que sufra un fuerte asentamiento debido a la carga que se le agrega y debido a la expulsión del agua contenida en sus poros, como este tipo de suelos presenta un coeficiente de permeabilidad muy

bajo, el asentamiento ocurre muy lentamente. Si la arcilla tiene una alta resistencia al corte y baja compresibilidad, el asentamiento puede ser muy pequeño.”²⁴

Factor de seguridad: La capacidad de carga ultima neta se define como la presión ultima por unidad de área de la cimentación que es soportada por el suelo en exceso de la presión causada por el suelo que la rodea en el nivel de la cimentación ²⁵

5.2.3. ELEMENTOS FINITOS

Los elementos finitos están ligados a la solución de problemas en el comportamiento geotécnico y de estructuras, para ello se utilizan métodos numéricos que evalúan el ambiente físico a través de ecuaciones diferenciales, a partir de datos de comportamientos físicos asignados a cada uno de los elementos de tamaño finito, en este caso de deformación plana por ser un modelo en 2D.

Al momento de la integración parcial de los elementos se obtienen ecuaciones globales que ayudan a determinar los desplazamientos nodales, allí se calculan los esfuerzos tensoriales, generando las deformaciones unitarias que son el resultado de los tensores.

Las deformaciones planas se usan en modelos de 2D, son necesarias cuando la dirección Z es muy grande o cuando este parámetro se quiere mantener relativo.

No se generan deformaciones en la dirección Z, ni deformaciones angulares XZ ni YZ, para poder modelar un elemento en dos dimensiones es necesario definir una sección y aplicar las cargas contenidas en esa sección.

5.3. MARCO LEGAL

Las estructuras civiles son regidas actualmente por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), promulgado por el Decreto 926 del 19 de marzo de 2010, posteriormente modificado por el Decreto 2525 del 13 de julio de 2010, el Decreto 092 del 17 de enero de 2011, el Decreto 340 del 13 de febrero de 2012 y el Decreto 945 del 5 de junio de 2017. En la Tabla 2, se relacionan los títulos de la norma y de la LEY 400, además de una breve descripción del alcance.

²⁴ C. Villalaz, *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Limusa, 1980.

²⁵ B. Das, and A. Sawicki, “Fundamentals of Geotechnical Engineering,” *Appl. Mech. Rev.*, 2001

Tabla 2. Normativa requerida

NORMATIVA	TITULO	ALCANCE
NSR-10	TÍTULO A – Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente	Se tendrá en cuenta los procedimientos de diseño sismo-resistentes de edificaciones, zonificación de amenaza sísmica, efectos de interacción suelo-estructura entre otros.
	TÍTULO B – Cargas	Se definirán requisitos de seguridad, funcionamiento, integridad estructural, evaluación de cargas muertas, vivas empujes de tierra y presión hidrostática entre otras.
	TÍTULO C – Concreto estructural	Donde se definirá todo lo concerniente a los requisitos mínimos que se deben cumplir en el diseño y construcción de estructuras en concreto.
	TÍTULO H –Estudios geotécnicos	Se establecerán los requisitos de estudios geotécnicos aplicables para el proyecto, así mismo se abarcarán todas las estructuras que el terreno exija.
LEY 400 DE 1997	TITULO I	Establece criterios y requisitos mínimos para el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones nuevas

Fuente: Propia con información del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10

6. ESTADO DEL ARTE

Actualmente, los estudios comparativos, que busca de entender el comportamiento del sistema Placa-Pilote, se han hecho cada vez más frecuentes, en la Tabla 3 se relacionan algunos estudios de referencia:

Tabla 3. Estado del Arte

TITULO	TIPO DE INVESTIGACIÓN	AUTORES	ALCANCE	RESUMEN
Interacción Suelo Pilote En Cimentaciones Placa – Pilote En la Ciudad de Bogotá	Trabajo de Grado	Daniel Alfonso Manuel Murcia (2016)	Nacional	Comparación de 5 tipologías de cimentación, pilotes, placa y Placa-Pilotes en dos materiales concreto y madera, en suelos arcillosos de la ciudad de Bogotá.
Evaluación del comportamiento del sistema de fundación placa – pilotes en suelos blandos con consolidación a partir de métodos analíticos.	Tesis de Maestría	Oscar David Pulido Rincón (2019)	Nacional	Evaluación del comportamiento de sistemas combinados de cimentación Placa-Pilotes en suelos blandos susceptibles a presentar consolidación a partir de comparativas de métodos analíticos y modelos físicos en centrifuga.
Construcción de la estructura placa – pilote a escala 1:30 para un suelo limo – arenoso ubicado en la sabana de Bogotá	Trabajo de Grado	Sergio Alejandro Gómez Sosa Angélica Yineth Romero Lizarazo (2020)	Nacional	Este proyecto tiene como finalidad la construcción de la parte estructural de un modelo físico de una cimentación placa – pilote en yeso a escala 1:30 para un suelo limo – arenoso.

Tabla 3. Estado del Arte (continuación)

TITULO	TIPO DE INVESTIGACIÓN	AUTORES	ALCANCE	RESUMEN
Effect of Pile Group Geometry on Bearing Capacity of Piled Raft Foundations	Artículo de Investigación	Mohammed Yousif Fattah, Mustafa A. Yousif, Sarmad Al-Tameemi (2015)	Internacional	Se realiza un prototipo a pequeña escala para analizar el comportamiento del sistema Placa-Pilote en diferentes suelos arenosos, se encuentra que cuando el número de pilotes dentro del grupo es menor a 4, no hay una contribución evidente de la balsa a la capacidad de carga. Se analizan así un grupo de pilotes mayor teniendo una mayor resistencia de falla.
Comportamiento de sistema Placa-Pilote en arcillas	Artículo de investigación	Víctor Astaiza, Bernardo Caicedo y Julieth Monroy	Nacional	Existe incertidumbre sobre el verdadero comportamiento de cada uno de los elementos que componen el sistema Placa-Pilote, por tanto, se propone la modelación en centrifuga de este sistema, donde se verificará el comportamiento del suelo y de los elementos que conforman la estructura de fundación al realizar modelos instrumentados donde se efectuarán cambios en la distribución y cantidad de pilotes para analizar las variaciones en el comportamiento de todo el sistema de cimentación.

Tabla 3. Estado del Arte (continuación)

TITULO	TIPO DE INVESTIGACIÓN	AUTORES	ALCANCE	RESUMEN
<p>Evaluación de asentamientos en el tiempo de sistemas Placa-Pilote apoyados sobre depósitos arcillosos de Bogotá D.C. utilizando un modelo 3D de elementos finitos</p>	<p>Artículo de investigación</p>	<p>Juan Sebastián Mozón, Alejandro Varela. (2018)</p>	<p>Nacional</p>	<p>Este estudio se relaciona con los análisis de sistemas de cimentación Placa-Pilote apoyados sobre un perfil estratigráfico típico de arcillas en Bogotá D.C. Basados en estos parámetros geotécnicos, un análisis de FEM en 3D fue realizado para el estudio de un sistema Placa-Pilote. 54 combinaciones geométricas entre longitud, diámetro, separación entre centros de elementos verticales y espesor de placa, fueron establecidas para la determinación de asentamientos totales teniendo en cuenta el proceso de construcción (300 días) y posterior hasta 20 años para un edificio sin sótanos de 15 pisos.</p>
<p>Optimum design of piled raft in soft clay—a model study</p>	<p>Artículo de Revista</p>	<p>Luca de Sanctis, Alessandro Mandolini (2009)</p>	<p>Internacional</p>	<p>Se realizaron modelos de laboratorio con prototipos de sistema Placa-Pilote, analizando los asentamientos diferenciales entre pilotes puestos en grupo y pilotes aislados, y entre el área total de la placa.</p>

Tabla 3. Estado del Arte (continuación)

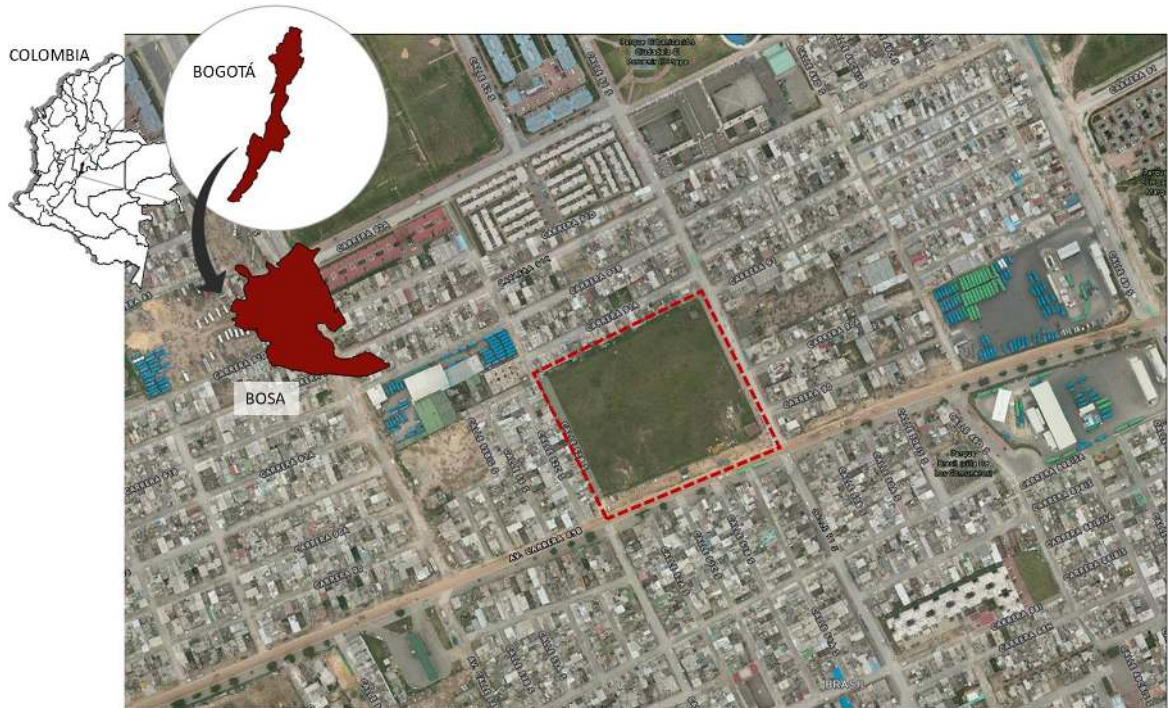
TITULO	TIPO DE INVESTIGACIÓN	AUTORES	ALCANCE	RESUMEN
The settlement behavior of piled raft in clay soils	Artículo de Revista	Jaeyeon Cho, Jin-HyungLee, Sangseom Jeong, Jaehwan Lee. (2012)	Internacional	Se realiza un análisis del comportamiento de un sistema Placa-Pilote en un suelo arcilloso mediante un análisis numérico, haciendo hincapié en cuantificar la reducción de los asentamientos medios y diferenciales en suelos blandos y rígidos, se realizó un análisis tridimensional no lineal de elementos finitos con un modelo de interfaz de deslizamiento pilote-suelo para diferentes posiciones de pilotes, número de pilotes, longitudes de pilotes debajo de la placa y diferentes tipos de carga.

Fuente: Elaboración Propia

7. CARACTERIZACIÓN DEL TIPO DE SUELO

Para el actual trabajo se usó un estudio geotécnico y de suelos contratado por la POLICIA NACIONAL DE COLOMBIA para la construcción del HOSPITAL DEL SUR, ubicado en la Calle 51 sur No. 90-07 en la localidad de Bosa, en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Figura 9. Localización General del predio



Fuente: Elaboración propia con información de mapas.bogota.gov.co/

Según el estudio geotécnico, la zona de análisis cuenta con un área aproximada de 17331.28 m², cuenta con una topografía plana y pendientes entre el 0 y <1%.

7.1. GEOLOGÍA

El suelo Bogotano, es un suelo reciente de edad cuaternaria y se caracteriza por poseer una humedad media y densidad blanda. En la Figura 10 a través de las convenciones litológicas se observa un amplio sector de arcillas arenosas al sur de la ciudad; en el informe se describe: “Se logró establecer que la zona se encuentra en la Provincia Litosférica Continental Meso proterozoica Grenviliense (PLCMG) donde afloran básicamente los grupos de suelos: (Q1-1) constituida por Arcillas,

7.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS.

En la Tabla 5 se describen las características geotécnicas de cada uno de los parámetros físico-mecánicos.

Tabla 5. Parámetros Físico-mecánicos del suelo

Parámetros Físicos mecánicos	Propiedades geotécnicas
Límites de consistencia (Límites de Atterberg)	El suelo está constituido por sedimentos fluviales de grano fino, conformado por arcillas limosas y arenas arcillosas, el límite líquido es constante hasta cierta profundidad, variando en rangos entre 58% a 88% para el límite líquido y entre 27% a 37% para el límite plástico.
Correlación entre el índice de Plasticidad (IP) y el límite Líquido (LL)	Los valores para el índice de plasticidad se encuentran entre 31% y 53%, esto refleja que la plasticidad es alta, para el índice de liquidez los valores oscilan entre -0.43 hasta 2.20, de acuerdo con ello, se puede analizar que el suelo está normalmente consolidado y su comportamiento será el de las arcillas en estado natural.
Humedad natural	La composición del suelo es arcillosa y el contenido de humedad varía ampliamente entre estratos localizándose entre el 9% al 155%, siendo mayor a más profundidad.
Materia Orgánica	Como se menciona anteriormente, este tipo de suelo fue expuesto a depósitos aluviales, lo cual propicio junto con las condiciones paleo climáticas un aumento en la materia orgánica en estratos inferiores, este se encuentra entre el 2% y el 20%, en el estrato entre los 15 y 34 metros.
Nivel de aguas freáticas	<ul style="list-style-type: none"> • Sondeo 1 – Mín. 4.60 m Máx. 4.60 m • Sondeo 2 – Mín. 5.50 m Máx. 5.50 m • Sondeo 3 – Mín. 4.20 m Máx. 4.20 m De acuerdo con estos sondeos el nivel freático promedio es de 4.10 m.
Características Granulométricas	La caracterización arroja un contenido amplio de suelos gruesos y suelos finos, la cual presenta fracciones de: <ul style="list-style-type: none"> • Gravas: 1% y 20% • Arenas: 1% y 80% • Finos: 1% y 99% “En general se puede apreciar que el contenido de finos es predominante en el estrato donde se proyecta la cimentación de la estructura, lo que permite establecer que en el área de influencia o de cimentación del proyecto predominan materiales finos granulares de composición

Tabla 5. Parámetros Físico-mecánicos del suelo (continuación)

Parámetros Físicos mecánicos	Propiedades geotécnicas
	arcillosa, es decir, que su comportamiento se encuentra gobernado por la fracción fino granular.”
Peso Unitario	<p>Los valores de peso unitario tienen un comportamiento similar al de la humedad natural, se encuentra un valor promedio en el estrato de cimentación de $\gamma=1.70 \text{ Ton/m}^3$, se pueden presentar valores un poco más altos en los depósitos arcillosos.</p> <p>La saturación del suelo se encuentra en el 65%.</p>
Resistencia a la Compresión.	<p>Según los resultados de los ensayos en campo se tiene que la resistencia al corte no drenado (C_u) se encuentra entre $0,199 \text{ kg/cm}^2$ a $1,717 \text{ kg/cm}^2$, se observa que por estos datos el suelo de la muestra es normalmente consolidado.</p> <p>Para el módulo elástico de Young se encuentra que está aproximadamente entre 5 a 10 MPa para los materiales arcillosos y entre 10.5 a 24 MPa para los materiales con contenido granular.</p>
Resistencia a la penetración estándar (SPT)	<ul style="list-style-type: none"> • Materiales Fino granulares: 5 y 15 golpes/pie • Materiales Granulares: 22 y 36 golpes/pie <p>Entre los 3 metros y 12 metros de profundidad el valor de N está por encima de 13 golpes/pie</p>

Fuente: Adaptado de Estudio Geotécnico “Hospital del Sur”

8. PARÁMETROS

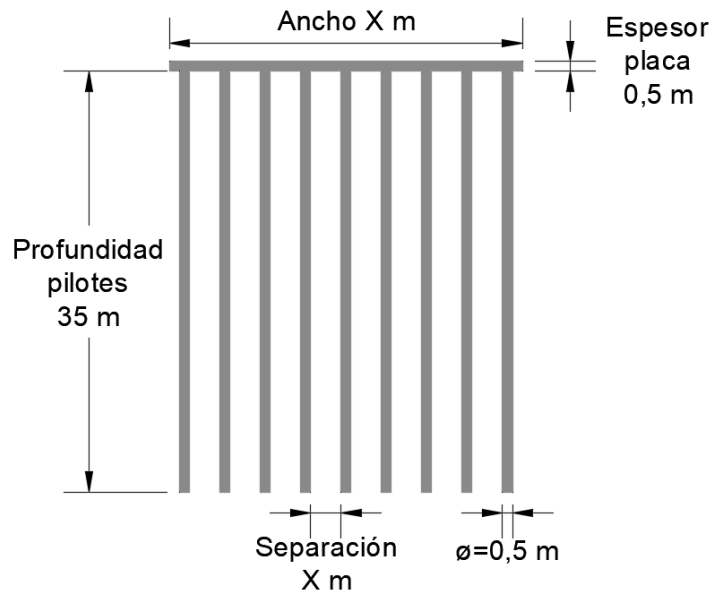
Cuando se hablan de sistemas Placa-Pilotes aún son muchas las incógnitas que se tienen respecto a la resistencia tanto de la estructura como del suelo, en esta investigación se trata de aclarar cómo afecta la separación y el área de la placa en los asentamientos del suelo.

Para dicha comparativa se han destinado 6 modelos con geometrías y separación de pilotes diferentes.

8.1. VARIABLES Y CONSTANTES ENTRE MODELOS

Para cada uno de los 6 modelos que se evaluarán se mantienen datos constantes como: La profundidad de los pilotes será de 35 metros, el espesor de la placa será de 0.5 metros, el diámetro de los pilotes se mantendrá en 0.5 metros, el número de pilotes será de 9 unidades y las características del suelo serán las mismas para todos. En la Figura 11 se expresa gráficamente.

Figura 11. Esquema variables y constantes en modelos



Fuente: Elaboración propia

Tratándose de un modelo en 2D una de las variables será el ancho de la placa mientras que la longitud se mantendrá en una unidad, la segunda variable será la separación, está dada por relaciones con el diámetro como se muestra en la Tabla 6, estas dos variables se mantienen coherentes geoméricamente en cada modelo.

Tabla 6. Relación de separación en modelos

Separación $X * \phi$			
Modelo	x	ϕ	Separación (m)
1	2.5	0.5	1.25
2	3	0.5	1.5
3	3.5	0.5	1.75
4	4	0.5	2
5	5	0.5	2.5
6	6	0.5	3

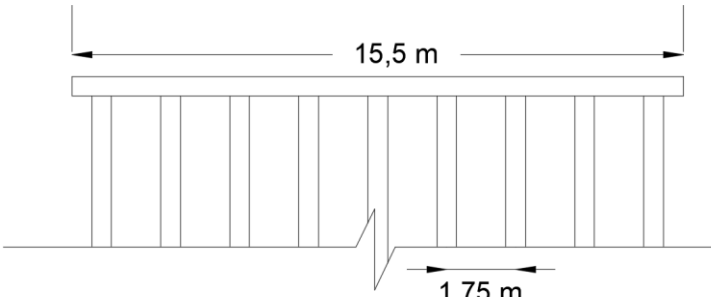
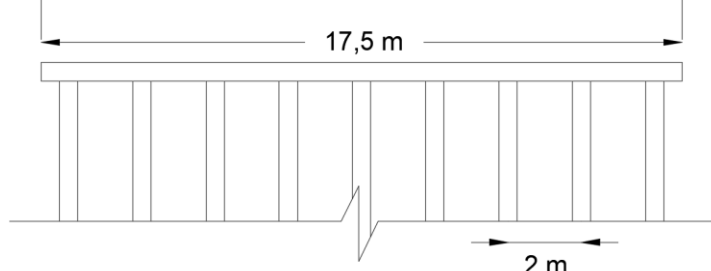
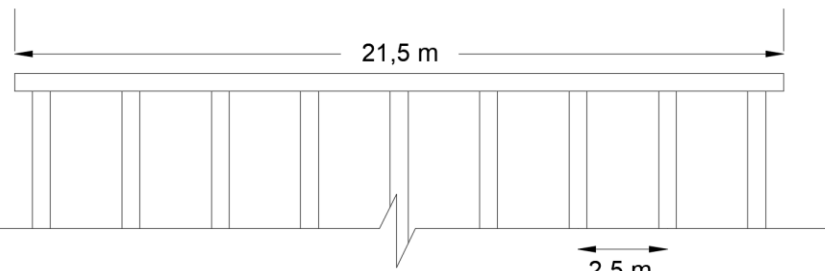
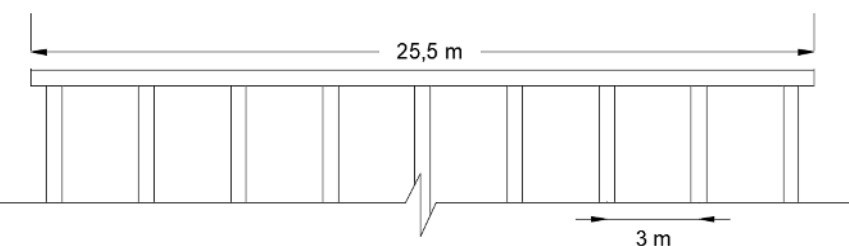
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 7 se describe las medidas de las variables de cada modelo, con estas se buscó una relación en donde la separación de pilotes fuera variando respecto al ancho de la placa y así mantener una uniformidad.

Tabla 7. Descripciones variables en modelos

ID	Esquema
<p>Modelo 1 Ancho 11,5 m Separación 1,25 m</p>	
<p>Modelo 2 Ancho 13,5 m Separación 1,5 m</p>	

Tabla 7. Descripciones variables en modelos (continuación)

ID	Esquema
<p>Modelo 3 Ancho 15,5 m Separación 1,75 m</p>	
<p>Modelo 4 Ancho 17,5 m Separación 2,0 m</p>	
<p>Modelo 5 Ancho 21,5 m Separación 2,5 m</p>	
<p>Modelo 6 Ancho 25,5 m Separación 3,0 m</p>	

Fuente: Elaboración Propia

8.2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

8.2.1. PARÁMETROS DE PLASTICIDAD

La plasticidad es propia de los suelos finos tales como los arcillosos y los limosos, esta afecta la resistencia al corte ya que depende directamente de la consistencia y su humedad.

Para este tipo de suelo se encuentra que el límite líquido tiene un comportamiento uniforme, el índice plástico como se muestra en la Tabla 8 supera el 50%, según los criterios de plasticidad, cualquier suelo que supere el 30% se considera de plasticidad alta. En la Tabla 8 se encuentran los parámetros por estrato.

Tabla 8. Parámetros de Plasticidad

Perfil	Material	Prof. (m)	γ_s (kN/m ³)	γ_T	Finos (%)	LL	LP	IP	W
Estrato 1	CH	6,5	13,89	16,677	98	30	80	50	20
Estrato 2	SC-SM	15,5	15,52	18,63	20	NP	NL	NP	20
Estrato 3	CH-MH	34,5	7,13	15,69	98	35	90	55	120
Estrato 4	SC-SM	40	10,35	18,63	25	NP	NL	NP	80
Estrato 5	CH-MH	>40	7,13	15,69	98	35	90	55	120
CH= Arcillas inorgánicas de alta plasticidad SC= Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla SM= Arenas limosas, mezclas de arena y limo MH= Limos inorgánicos, arenas finas o limos W= Humedad				γ_s = Peso unitario seco γ_T = Peso unitario total LL= Limite Líquido LP= Limite Plástico IP= Índice de Plasticidad					

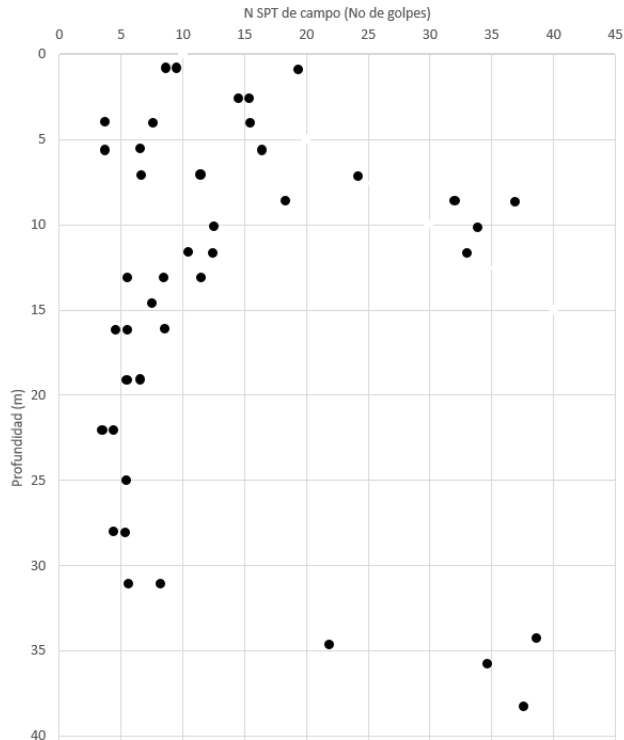
Fuente: Elaboración Propia

El comportamiento del suelo es netamente plástico, se comportará como un suelo normalmente consolidado, ya que nunca ha estado sometido a presiones mayores y se encuentra en estado natural, este tipo de suelos suelen estar propensos a tener un comportamiento mecánico de malo a aceptable, si son sometidos a un corte o remoldeo pueden generar un colapso de la estructura, por lo cual se recomienda que los cimientos sean profundos como los plateados en el actual trabajo de investigación.

8.2.2. PARÁMETROS DE RESISTENCIA

La resistencia es la capacidad que ofrece el suelo, en un área unitaria de soportar una falla o deslizamiento, esta está constituida por la resistencia por fricción y la resistencia cohesiva (partículas del suelo). Para medir dicho parámetro se usa el ensayo SPT, se realiza al interior de los sondeos y e incluyen diversas correlaciones frente a la profundidad, en la Figura 12 se observa el resultado de dicho estudio, en general los valores de N se encuentran superiores a 13 golpes/pie. En la Figura 12 se encuentra la correlación de datos en profundidad vs número de golpes.

Figura 12. Penetración Estándar N de campo



Fuente: Adaptado de Estudio Geotécnico y de suelos proyecto "Hospital del Sur"

Tabla 9. Parámetros de Resistencia

Perfil	Material	Profundidad (m)	N	C (kPa)	Phi (°)
Estrato 1	CH	6,5	13	36,358	15
Estrato 2	SC-SM	15,5	23	136,122	22
Estrato 3	CH-MH	34,5	13	212,856	15
Estrato 4	SC.SM	40	23	1168,16	22
Estrato 5	CH-MH	>40	13	212,856	15
CH= Arcillas inorgánicas de alta plasticidad SC= Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla SM= Arenas limosas, mezclas de arena y limo MH= Limos inorgánicos, arenas finas o limos			N= # golpes pie ensayo SPT C= Cohesión		

Fuente: Elaboración Propia

8.2.3. PARÁMETROS DE COMPRESIBILIDAD

En suelos arcillosos la propiedad de compresibilidad tiene mayores impactos que en otros tipos de suelo, la carga aplicada genera una disminución de volumen bajo la placa, para la muestra analizada el límite líquido que está en un promedio de 30-35% se considera que tiene una compresibilidad entre baja y media, los resultados

de índice de compresibilidad e índice de hinchamiento fueron resultados que se obtienen en el estudio de suelos a partir de resultados en campo y correlaciones.

Tabla 10. Parámetros de Compresibilidad

Perfil	Material	Profundidad (m)	σ_p' (kPa)	K (m/día)	eo	Cc	Cs
Estrato 1	CH	6,5	36,36	2,00E-07	2	0,168	0,034
Estrato 2	SC-SM	15,5	136,25	2,00E-04	1	0,293	0,059
Estrato 3	CH-MH	34,5	213	2,00E-07	2	0,533	0,107
Estrato 4	SC-SM	40	1169,13	2,00E-04	1	0,15	0,03
Estrato 5	CH-MH	>40	213	2,00E-07	2	0,533	0,107
CH= Arcillas inorgánicas de alta plasticidad SC= Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla SM= Arenas limosas, mezclas de arena y limo MH= Limos inorgánicos, arenas finas o limos				eo= Relación de vacíos inicial cc= Índice de compresión cs= Índice de re-compresión K= Permeabilidad σ_p' = Esfuerzo de pre-consolidación			

Fuente: Elaboración Propia

Tal como se relaciona en la Tabla 1 se establecen los esfuerzos de pre-consolidación, estos son los esfuerzos máximos a los que el suelo ha sido sometido a lo largo de su compactación, "La arcilla de origen lacustre de la ciudad de Bogotá (Colombia), es un material que ha sido sometido a procesos de sedimentación en los últimos 3 millones de años (ma) y a procesos de pérdida de humedad en capas superficiales en los últimos 100 años. Este material ha sufrido todos los procesos anteriormente descritos. El esfuerzo de pre-consolidación está íntimamente ligado con el valor del coeficiente lateral de presión de tierras en reposo (K_0), cuyo valor determina los esfuerzos laterales en obras enterradas. En la arcilla de Bogotá, existe aún ausencia de datos acerca de los valores del K_0 , especialmente en estratos superficiales sobre los cuales se apoyan vías pavimentadas, cimentaciones y otras estructuras."²⁸

8.2.4. PARÁMETROS DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad determina la firmeza de una muestra de suelo, este varía según la consolidación propia de este, ya que resistirá mayores esfuerzos si sus propiedades presentan una consistencia firme.

²⁸ Pineda Jaimes, Jorge Arturo, and DilanEduardo Arias Montañez, *Esfuerzos de Preconsolidación y Su Importancia En La Determinación Del Coeficiente Lateral de Presión de Tierras En Reposo (K_0) En Suelos Arcillosos Sedimentarios.*, 2014

Tabla 11. Parámetros de Elasticidad

Perfil	Material	Profundidad (m)	E (MPa)	E (kPa)	U	Vs	Vp	K0
Estrato 1	CH	6,5	8	8000	0,35	248,72	517,8	0,74
Estrato 2	SC-SM	15,5	11,2	11200	0,3	302,63	566,2	0,63
Estrato 3	CH-MH	34,5	6,72	6720	0,35	248,72	517,8	0,74
Estrato 4	SC.SM	40	14,4	14400	0,3	302,63	566,2	0,63
Estrato 5	CH-MH	>40	6,72	6720	0,35	248,72	517,8	0,74
CH= Arcillas inorgánicas de alta plasticidad SC= Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla SM= Arenas limosas, mezclas de arena y limo MH= Limos inorgánicos, arenas finas o limos			E= Modulo de Young U= Relación de Poisson Vs= Velocidad de onda de corte Vp= Velocidad de onda compresión Ko= Coeficiente presión de tierras reposo					

Fuente: Elaboración Propia

El coeficiente presión en reposo (K₀), está dado por el empuje que genera el suelo y varia en forma proporcional a la profundidad, esta fuerza afecta pilotes y demás elementos que contienen la presión de tierras.

8.3. DATOS ESTRUCTURALES

Como se menciona en capítulos anteriores, la cantidad de pilotes será constante en cada uno de los modelos y esta será de 9 unidades, se tendrá en cuenta que son pilotes prefabricados de concreto reforzado, y deben tener las siguientes especificaciones:

“Debe colocarse refuerzo longitudinal con una cuantía mínima de 0.01 en toda la longitud del pilote. Deben colocarse estribos, o una espiral equivalente, con un diámetro de barra mínimo N° 2 (1/4”) o 6M (6 mm) con una separación máxima de 100 mm en los 600 mm superiores del pilote y 16 diámetros de barra longitudinal en el resto del pilote. Debe verificarse que el refuerzo mínimo anterior sea suficiente para garantizar la integridad del pilote durante el proceso de hincado, y aumentarlo en caso de que se requiera una mayor cantidad. La resistencia mínima a la compresión del concreto antes de iniciar el hincado debe ser $f'c=21$ MPa. En estructuras con capacidad especial de disipación de energía (DES) debe colocarse una espiral con una cuantía mínima $\rho_s \geq 0.006$, en vez de los estribos indicados anteriormente.”²⁹

²⁹ REPÚBLICA DE COLOMBIA, 2012. *NSR-10, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente*. 2012. S.l.: s.n.

La resistencia del concreto a usar será de $f'c=28$ MPa, y los demás datos solicitados en el software están expresados en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros del pilote

Diámetro (m)	0,5
Área (m2)	0,1963
Inercia (m4)	0,003068
Módulo de Elasticidad (kPa)	2,49E+07
EA	4,88E+06
EI	7,63E+04
Peso Unitario (kN/m3)	24
Peso (kN/m/m)	4,71238898

Fuente: Elaboración Propia

La losa será sometida a carga distribuida, esta a su vez transmitirá cargas al suelo de manera distribuida y cada pilote recibirá una carga axial que soportara por fricción y por resistencia de punta a un estrato inferior, el peso unitario y el módulo de elasticidad como se observa en la Tabla 13 se mantendrán constantes.

Tabla 13. Parámetros de las placas

Modelo	Espesor (m)	Ancho (m)	Peso Unitario (KN/m3)	Módulo de Elasticidad (kPa)
1	0,5	11.5	24	2,49E+07
2	0,5	13.5	24	2,49E+07
3	0,5	15.5	24	2,49E+07
4	0,5	17.5	24	2,49E+07
5	0,5	21.5	24	2,49E+07
6	0,5	25.5	24	2,49E+07

Fuente: Elaboración Propia

8.4. CARGAS

Para la evaluación de asentamiento y consolidaciones, es necesario aplicarle al sistema de cimentación una carga que tenga la capacidad de deformar y fallar los modelos planteados, para ello se determinó cual es la resistencia de un pilote que trabaja de manera individual.

Se destinaron 14 tipos de cargas, incrementadas de manera ascendente, allí se evaluaron a través de metodología numérica, usando el software PLAXIS 2D, los desplazamientos elásticos y los desplazamientos por consolidación, como se muestra en la Tabla 14.

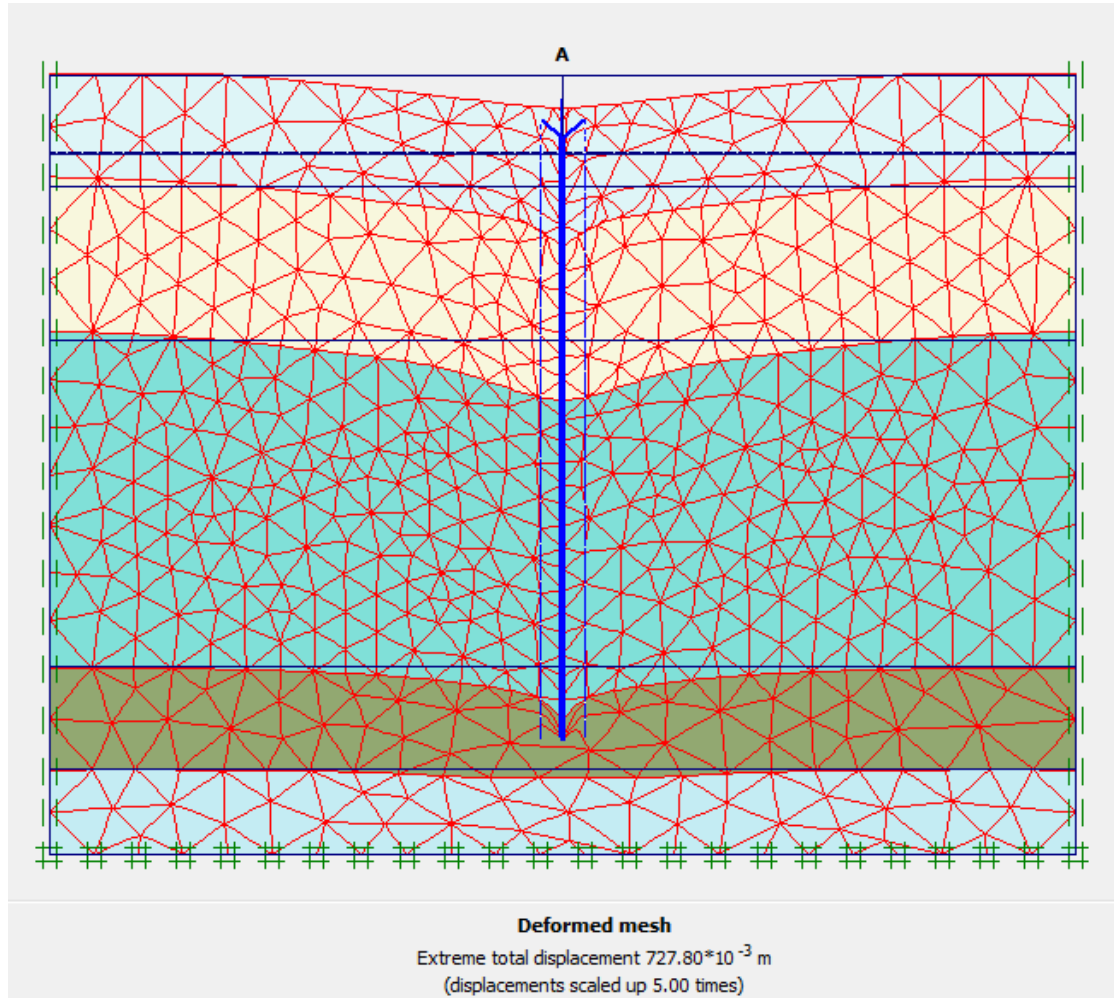
Tabla 14. Valores de carga vs deformación pilote individual

CARGA kN/M	DE (mm)	DC (mm)	DNC (mm)	$\frac{DC1 - DC2}{C1 - C2}$ (mm/kN/m)
100	3,13	4,95	1,82	0
300	5,59	8,47	2,88	0,01760
500	8,09	12,22	4,13	0,01875
700	10,66	16,31	5,65	0,02045
1000	14,46	20,76	6,3	0,01483
1500	23,27	32,68	9,41	0,02384
2000	33,52	46,6	13,08	0,02784
2500	44,97	61,24	16,27	0,02928
3000	57,46	76,67	19,21	0,03086
4000	85,39	110,14	24,75	0,03347
6000	158,27	197,65	39,38	0,04376
8000	266,57	320,74	54,17	0,06155
10000	395,93	462,78	66,85	0,07102
13000	627,38	727,80	100	0,08667
DE: Desplazamiento Elástico DC: Desplazamiento por consolidación DNC: Desplazamiento neto por consolidación $\frac{DC1-DC2}{C1-C2}$: Incremento del desplazamiento por incremento de carga				

Fuente: Elaboración Propia

Como se muestra en la Figura 13 los datos de carga expuestos en la Tabla 14 fueron ingresados en el software PLAXIS 2D, el pilote fue sometido a una carga puntual de 13.000 kN/m, carga con la cual se logra una deformación de 70 cm, excediendo el límite de desplazamiento permitido.

Figura 13. Software PLAXIS 2D: Modelo pilote único

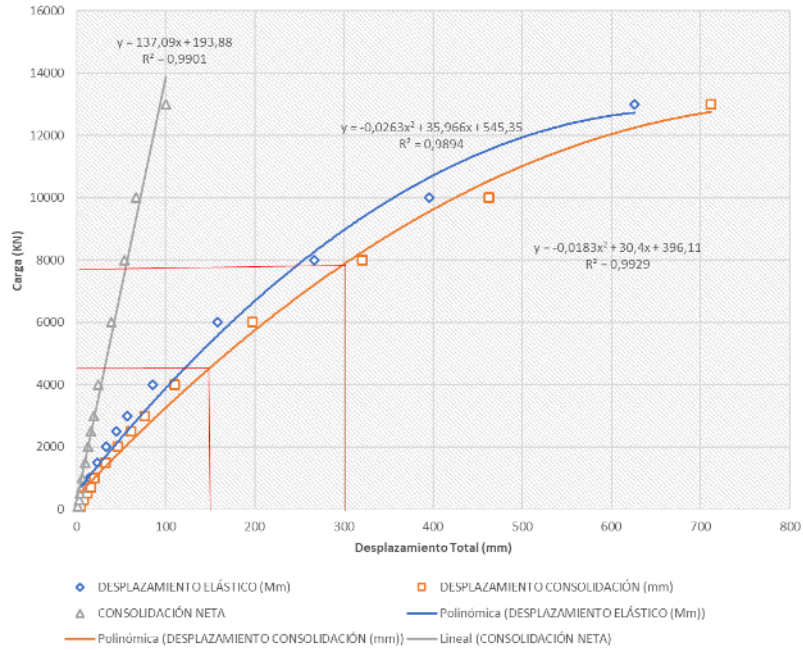


Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

En la Gráfica 1 se expresan las curvas resultantes de los datos de carga frente al desplazamiento, según se expresa en la NSR-10, en el título H, “Los asentamientos totales calculados a 20 años se deben limitar a los siguientes valores: a) Para construcciones aisladas 30 cm, siempre y cuando no se afecten la funcionalidad de conducciones de servicios y acceso a la construcción, b) Para construcciones entre medianeros 15 cm, siempre y cuando no se afecten las construcciones e instalaciones vecinas.”³⁰

³⁰ REPÚBLICA DE COLOMBIA, 2012. *NSR-10, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente*. 2012. S.l.: s.n.

Gráfica 1. Carga vs Deformación pilote individual



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, después de la evaluación de cargas en un modelo de pilote único, se seleccionan 6 cargas características (Tabla 15) las cuales serán aplicadas en cada modelo según la resistencia de cada uno, se aclara que la carga por pilote debe ser multiplicada por la cantidad de pilotes para lograr la carga total distribuida a aplicar.

Tabla 15. Cargas aplicadas a los modelos

CARGA	CARGA (kN/m) x PILOTE	CARGA TOTAL (kN/m)
1	100	900
2	500	4500
3	1000	9000
4	2000	18000
5	3000	27000
6	4000	36000

Fuente: Elaboración propia

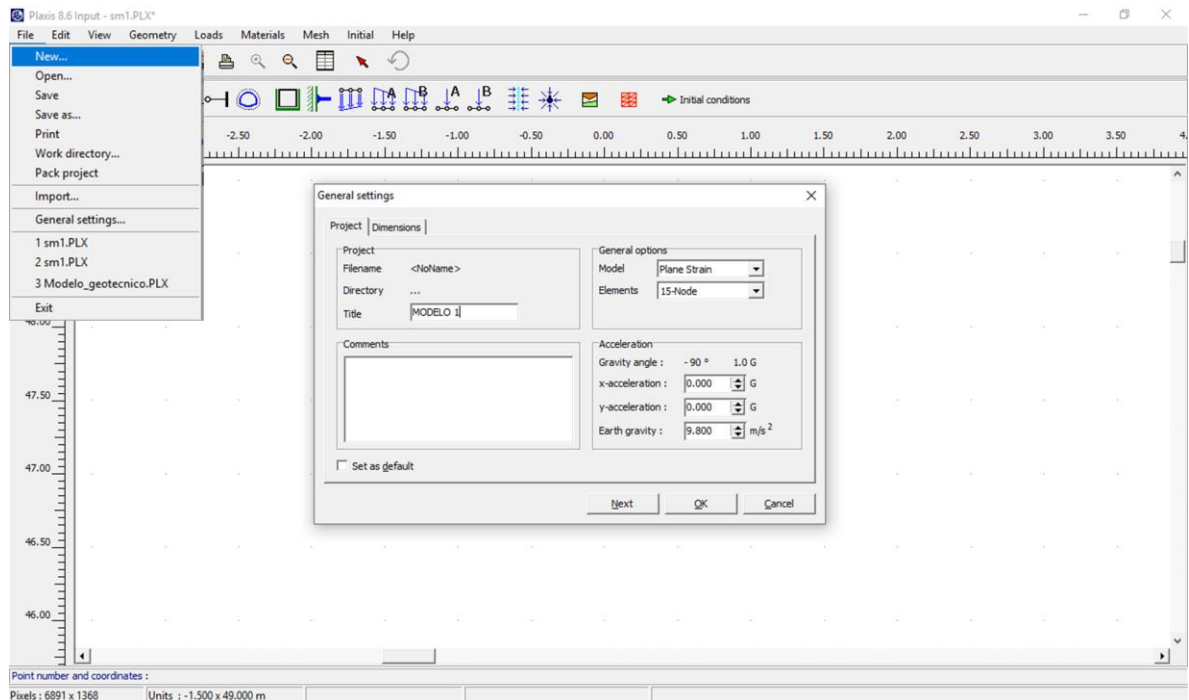
9. MODELACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS

En el capítulo de parámetros, se definieron los criterios estructurales para cada uno de los 6 modelos de cimentación, al igual que la exposición de los datos principales del estudio de suelos que se emplearon para la conformación del suelo típico arcilloso usado indistintamente en cada uno de ellos.

El programa escogido para esta modelación numérica es el software Plaxis 2D en su versión 8.6, este brinda un análisis de elementos finitos en dos dimensiones que deja ver características de deformación y estabilidad geotécnica, este está conformado por 4 módulos: Input, Calculations, Output y Curves.

Para dar inicio al proyecto, se configura la base en donde serán analizados los 6 modelos, en la Figura 14 se muestra la configuración primaria que el programa pide para la inserción de parámetros iniciales, estos son puestos de manera general, creando la grilla según se requiera, además de datos de gravedad y unidades métricas.

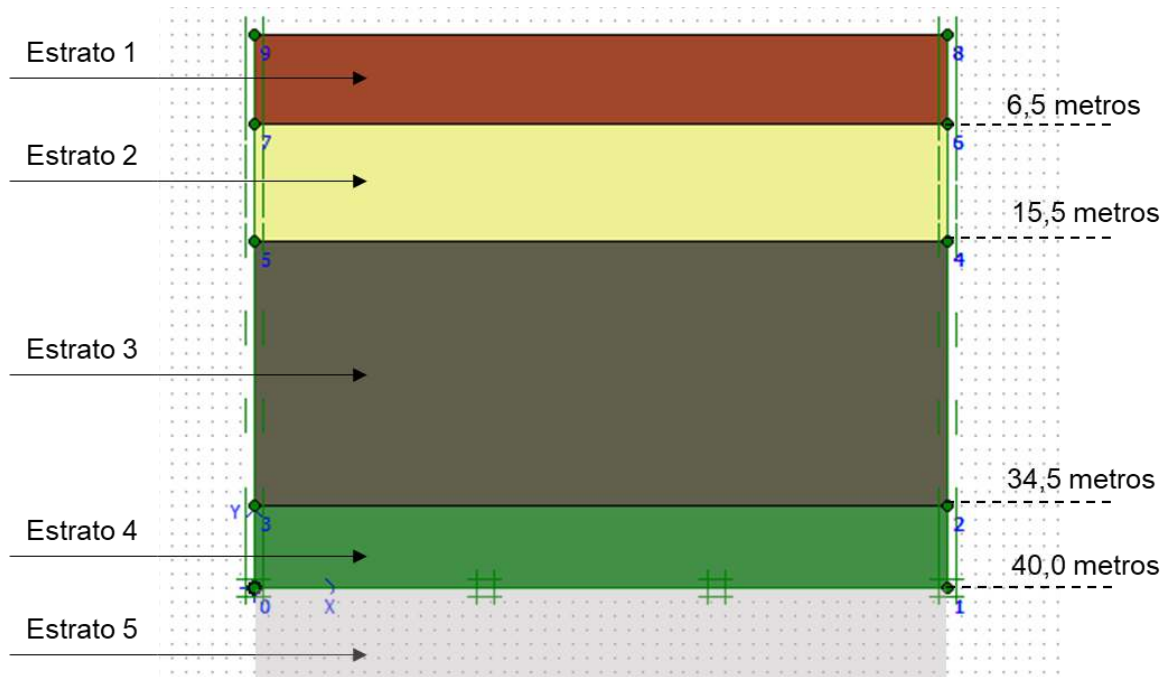
Figura 14. Software PLAXIS 2D: Creación de nuevo proyecto



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

El siguiente paso es la definición de la estratigrafía del suelo, allí se hace el esquema de cada uno de los estratos tal como se muestra en la Figura 15, según el estudio geotécnico estos varían desde el primer estrato, conformado por una capa promedio de 2.50 metros de relleno con residuos de construcción y basuras, después cambia entre arenas de grano medio a fino, arcillas limosas, arcillas de color gris verdoso, concluyendo que en 40 metros de exploración la composición en su mayoría es de arcillas.

Figura 15. Software PLAXIS 2D: Esquema suelo típico



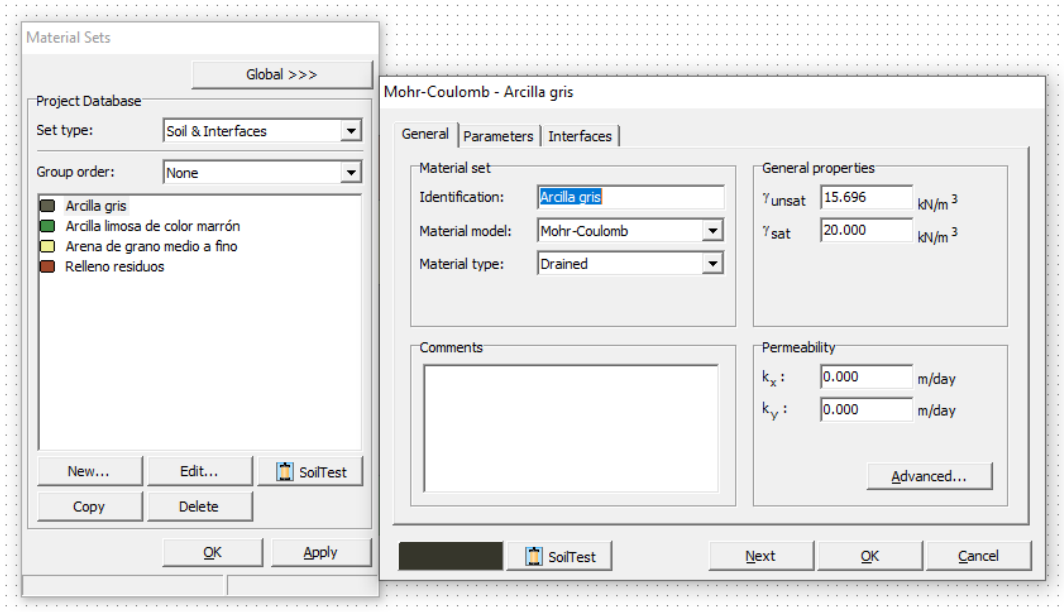
Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Cada estrato tiene una configuración para los materiales y sus características físicas, como se expone en el capítulo de parámetros geotécnicos.

Es necesario para la base de datos del software introducir datos geotécnicos propios de cada uno de los estratos y sus parámetros, tal como se muestra en la Figura 16, allí se encuentra la ventana que se debe introducir con los datos de cada estrato, teniendo en cuenta propiedades de saturación, permeabilidad, fuerza, rigidez entre otras.

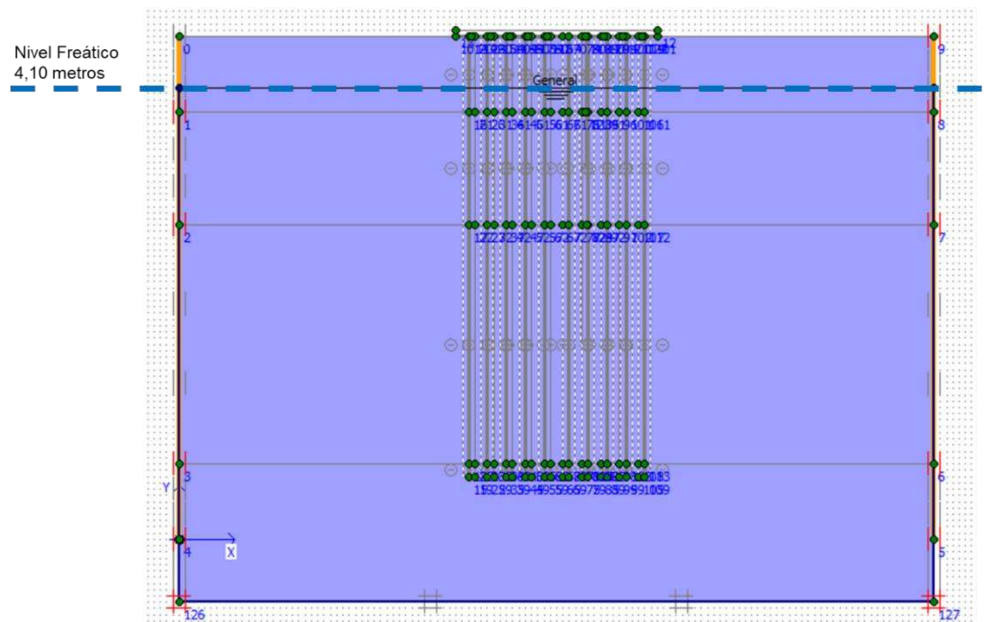
Para la localización del nivel freático se dibuja en coordenadas a través de las condiciones iniciales del programa, este fue establecido en 4.10 metros en promedio, tal como se muestra en la Figura 17.

Figura 16. Software PLAXIS 2D: Ventana parámetros de suelo



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Figura 17. Software PLAXIS 2D: Asignación nivel freático

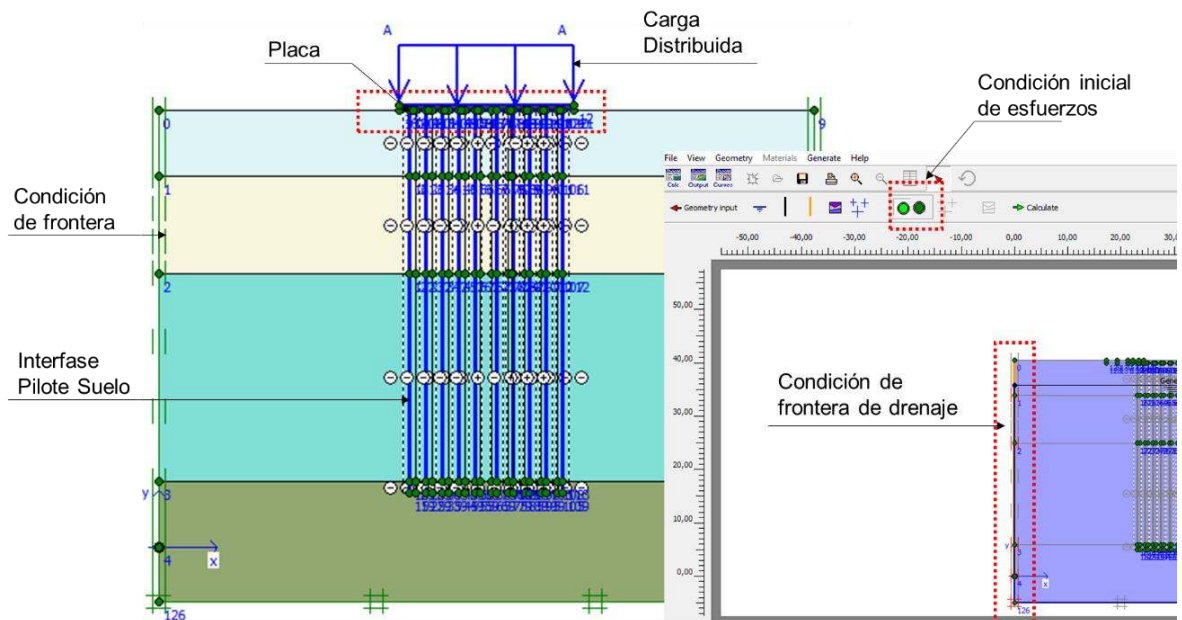


Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Una vez creada la geometría del suelo, se lleva a cabo el montaje de la estructura de cimentación Placa-Pilote y la carga, tal como se muestra en la Figura 18, además se debe asignar la condición de frontera la cual actúa como un valor predeterminado que se fija en el sistema y ayuda que los cálculos tengan una solución, esto hace

que se genere una restricción a las deformaciones de los extremos suponiendo que tienen libertad de movimiento en una o más direcciones.

Figura 18. Software PLAXIS 2D: Elementos estructurales



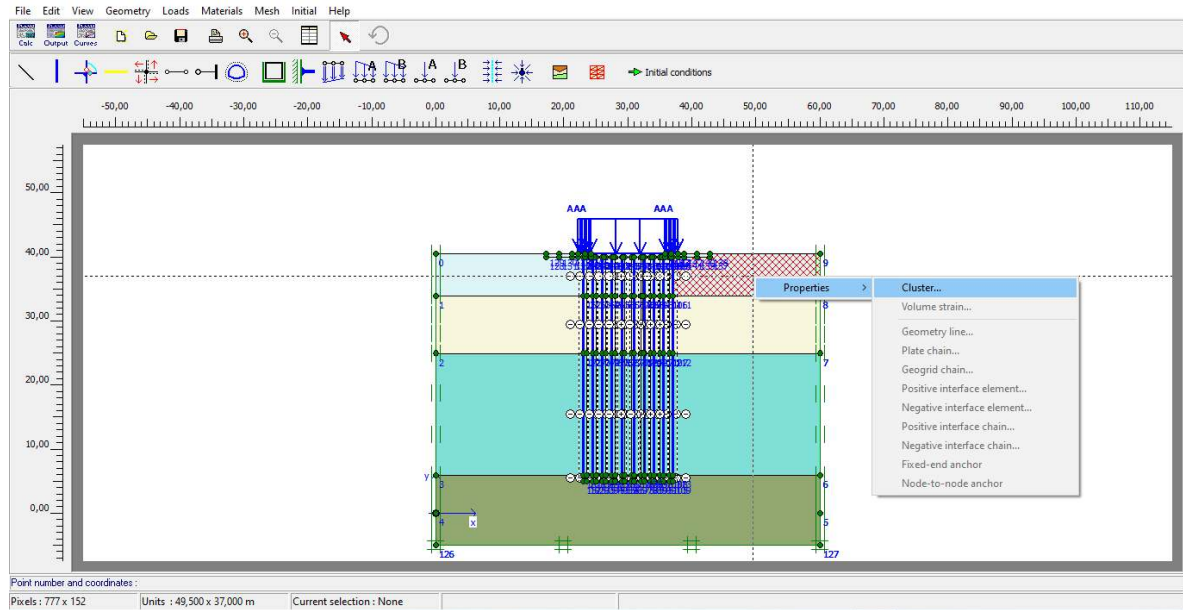
Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

La creación de la estructura se dibuja teniendo en cuenta los valores geométricos ya determinados para cada modelo, para ambos elementos se asigna propiedades mecánicas bajo conocimiento que estos están hechos en concreto reforzado, además se asigna una carga distribuida en la placa, esta carga como se explica en el capítulo 8.4 será modificada en cada modelo hasta llegar a la deformación máxima permisibles y la falla del sistema.

Para que el software pueda conocer los esfuerzos y deformaciones causados por la carga, se debe implementar una malla de nodos, la cual evalúa en cada uno de esos nodos como resiste el suelo según las propiedades iniciales a dicha estructura.

Una vez se tiene la geometría y los materiales, estos son asignados a través del asistente para propiedades del suelo, como se muestra en la Figura 19.

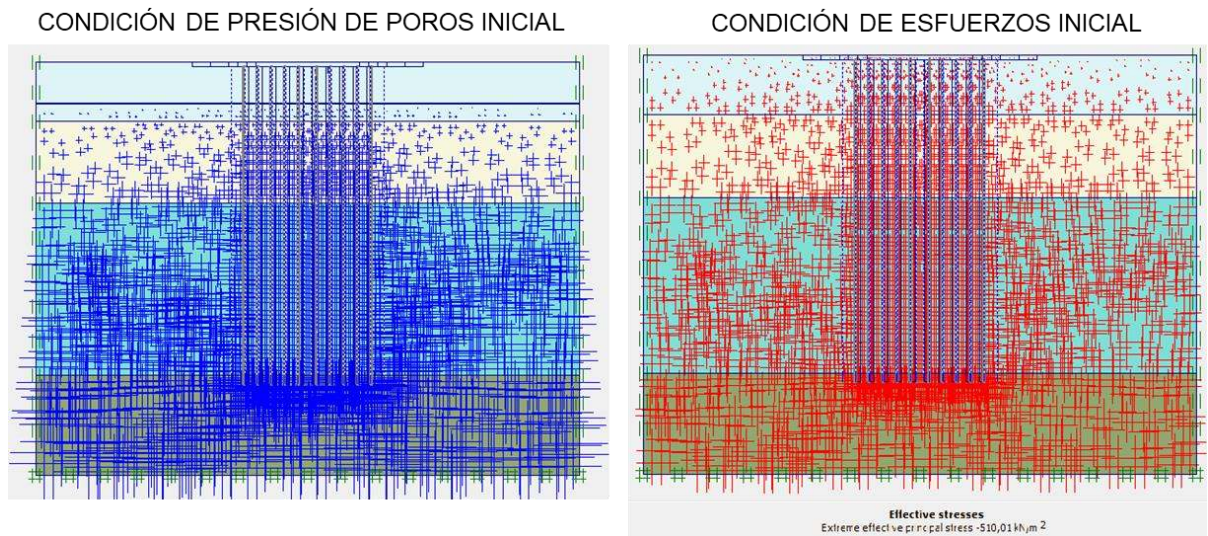
Figura 19. Software PLAXIS 2D: Asignación materiales al suelo



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

En la Figura 20 del lado izquierdo se muestra el esquema que arroja el software para la presión de poros, calculada de acuerdo con el nivel de saturación del suelo y el nivel freático, datos que se ingresan al modelo de manera inicial, del lado derecho se encuentra la condición de esfuerzos efectivos que calcula el software de acuerdo a las propiedades mecánicas asociados al suelo.

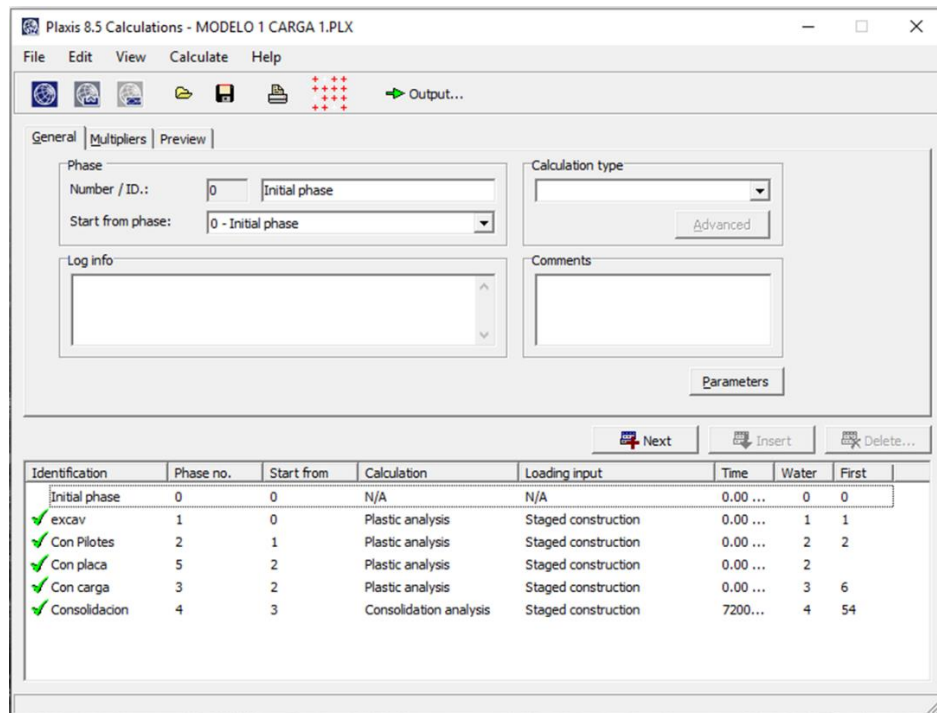
Figura 20. Software PLAXIS 2D: Condiciones iniciales



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

En el módulo de cálculos (Figura 21) se deben ingresar las fases del modelo, primero se tiene en cuenta una excavación previa para los pilotes, en la segunda y tercer fase se plantean los elementos que hacen parte de la cimentación y los cuales interactuarán con el suelo, los pilotes y la placa, en la cuarta fase se establece la carga distribuida y en la última fase se calculará la consolidación, a partir de estos parámetros el software mostrará las condiciones del sistema y arrojará los datos que se expondrán en cada uno de los modelos en el capítulo de Resultados y Análisis.

Figura 21. Software PLAXIS 2D: Modulo Cálculos



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Una vez configurados los parámetros del suelo (nivel freático, propiedades mecánicas, humedad, saturación, etc.), la geometría y parámetros de la estructura (medidas, resistencia, etc.) y las cargas, el software a través de método de elementos finitos nos arroja graficas que son importantes en la determinación del comportamiento del suelo, entre ellas la malla de deformación, el esquema de deformaciones totales a través de flechas, sombras y contornos, graficas de esfuerzos cortantes y efectivos, puntos plásticos entre otros.

En el capítulo de resultados y análisis, se mostrarán las gráficas que sean necesarias para la generación de la comparativa entre los 6 modelos.

10.METODOLOGÍA

Una vez se obtiene un modelo para suelo que se mantendrá constante, se procede a generar cada uno de los modelos a comparar, a continuación, se grafican y explican datos relevantes de cada uno:

10.1. MODELO 1

Para el modelo 1 se dispone de un ancho de placa de 11,5 m, se distribuye a lo largo de esta placa 9 pilotes con separación de 1,25 m, se aplica sobre esta estructura 4 tipos de carga como se expresa en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados deformaciones Modelo 1

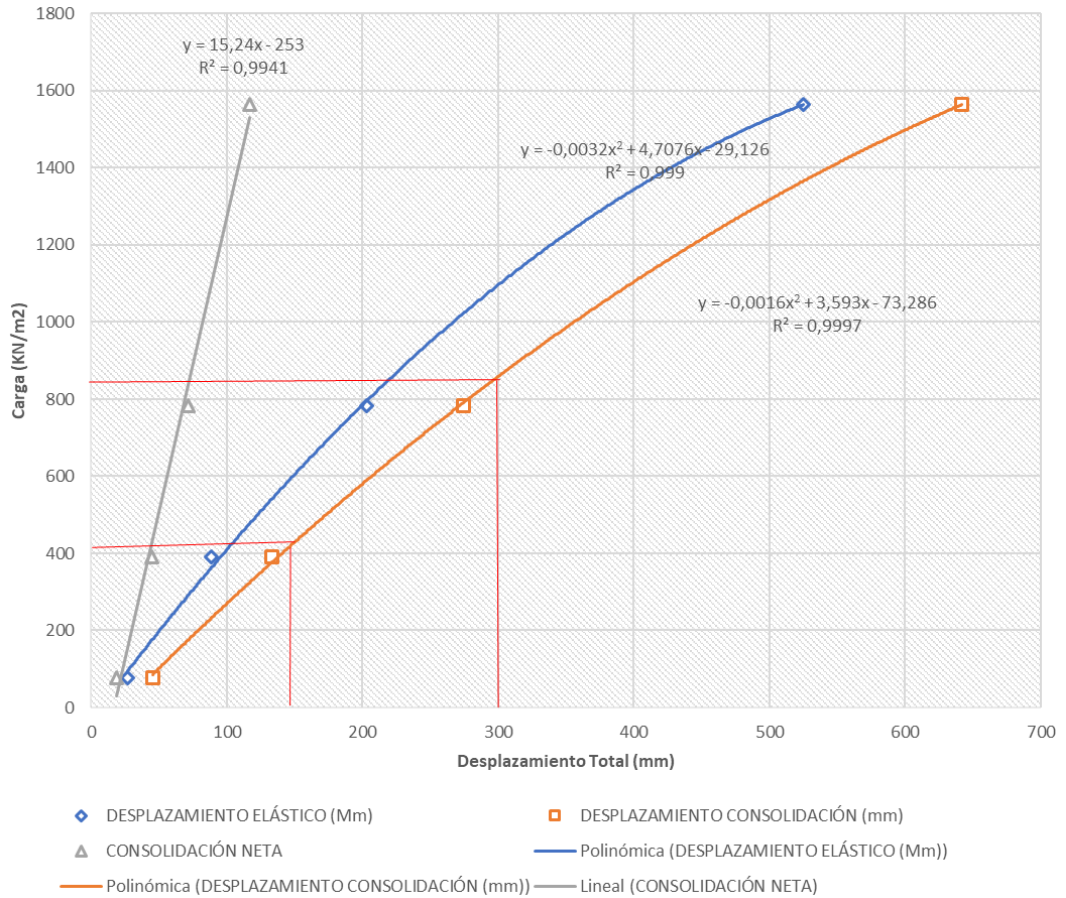
	CARGA kN/m x PILOTE	CARGA kN/m	CARGA kN/m²	DE (mm)	DC (mm)	DNC (mm)	ID (mm/kN/m²)
1	100	900	78	26,78	45,28	18,5	
2	500	4500	391	88,5	133,18	44,68	0,28079
3	1000	9000	783	203,32	274,44	71,12	0,36100
4	2000	18000	1565	525,07	642,05	116,98	0,46972
DE: Desplazamiento Elástico DC: Desplazamiento por consolidación DNC: Desplazamiento neto por consolidación ID: Incremento del desplazamiento por incremento de carga							

Fuente: Elaboración propia

Tratándose de una construcción aislada, se estipula según la NSR-10 que la deformación máxima permitida es 30 cm, cuando se realiza la modelación se obtiene que esta deformación exigida se encuentra entre los 9.000 kN/m y los 18.000 kN/m.

Como se muestra en la Grafica 2, la línea de intersección para la deformación máxima permisible proyecta un esfuerzo de 837 kN/m².

Gráfica 2. Carga vs Deformación Modelo 1

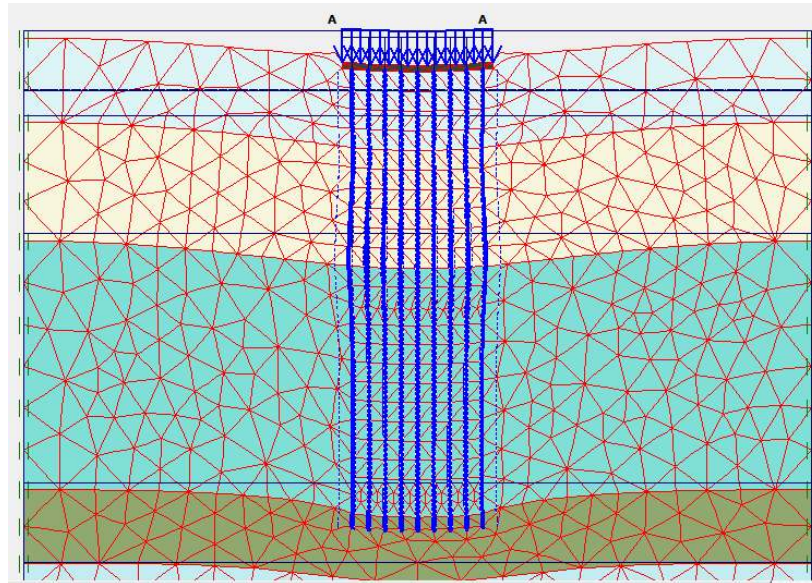


Fuente: Elaboración propia

Una vez establecidas las cargas en el software, esta muestra a través de una malla los cambios producidos por la cimentación en el suelo, tal como se presenta en la Figura 22 la interacción entre el suelo y la cimentación logra generar un asentamiento puntual.

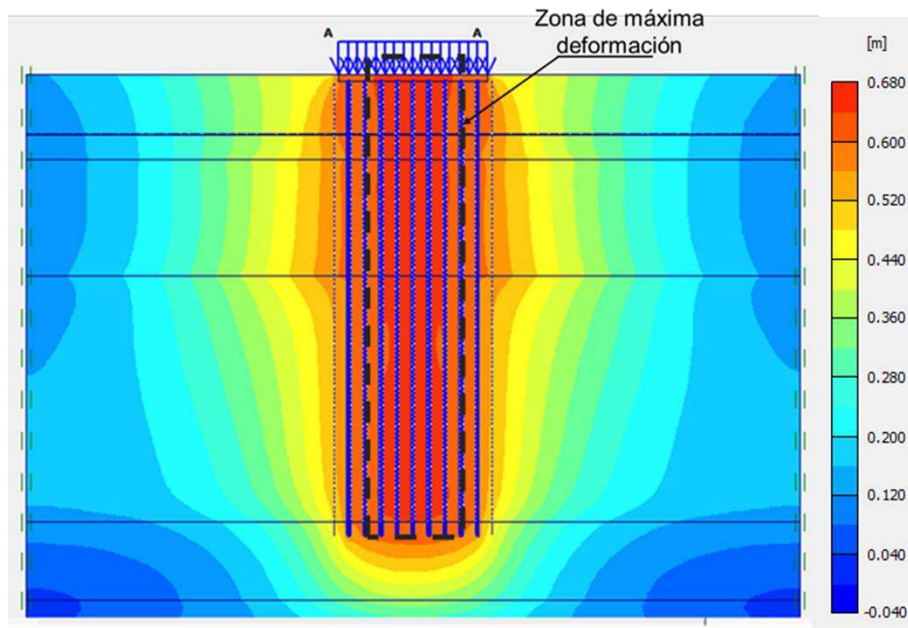
Así mismo en la Figura 23, a través de convenciones de color, se muestra la afectación de la cimentación en el suelo, se detecta una sobreexposición a la carga en la parte central del sistema, creando una columna de deformaciones máximas en los 6 metros centrales.

Figura 22. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 1



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

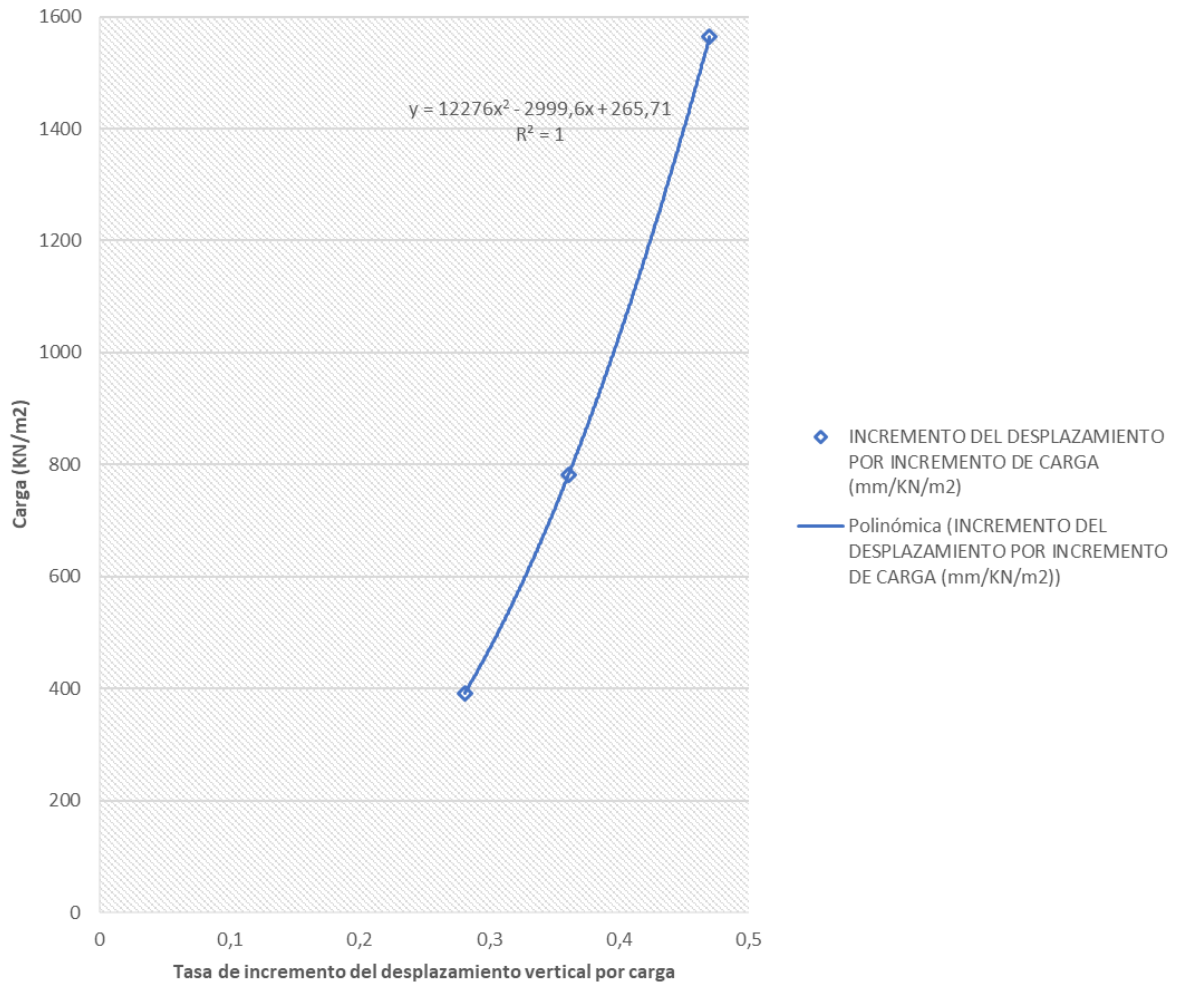
Figura 23. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 1



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Con los datos obtenidos en cada una de las exposiciones de carga para el modelo 1 se calcula el incremento del desplazamiento por el incremento de carga haciendo una relación, como se expresa en la Gráfica 3, el sistema de cimentación falla cercano a los 1565 kN/m², se deforma de manera lineal.

Gráfica 3. Incremento de la deformación por carga Modelo 1



Fuente: Elaboración propia

10.2. MODELO 2

Para el modelo 2 se tiene un ancho de placa de 13,5 m, a lo largo de esta se ubican 9 pilotes con una separación de 1,5 m, se aplican diferentes cargas hasta que llega a su estado limite, como se expresa en la Tabla 17, la cimentación fue expuesta a 4 tipos de carga.

Tabla 17. Resultados deformaciones Modelo 2

	CARGA kN/m x PILOTE	CARGA kN/m	CARGA kN/m²	DE (mm)	DC (mm)	DNC (mm)	ID (mm/kN/m²)
1	100	900	67	25,94	46,64	20,7	
2	500	4500	333	83,43	127,22	43,79	0,30218

Tabla 17. Resultados deformaciones Modelo 2 (continuación)

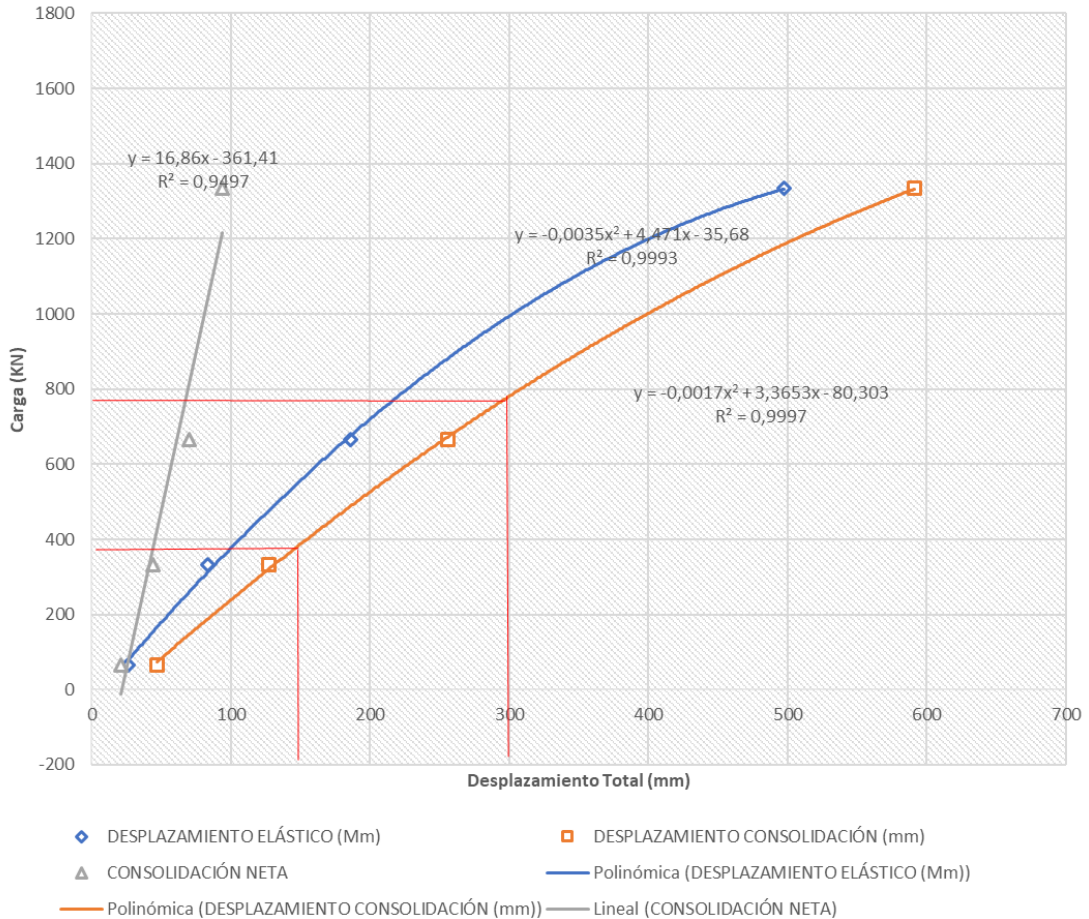
	CARGA kN/m x PILOTE	CARGA kN/m	CARGA kN/m²	DE (mm)	DC (mm)	DNC (mm)	ID (mm/kN/m²)
3	1000	9000	667	186,01	256,04	70,03	0,38646
4	2000	18000	1333	497,74	591,31	93,57	0,50291

DE: Desplazamiento Elástico
 DC: Desplazamiento por consolidación
 DNC: Desplazamiento neto por consolidación
 ID: Incremento del desplazamiento por incremento de carga

Fuente: Elaboración propia

Según la información arrojada por el software, para obtener la deformación máxima permisible de 30 m, es necesario aplicar una carga entre 9.000 kN/m y 18.000 kN/m, tal como se muestra en la Gráfica 4, la curva polinómica intercepta el desplazamiento requerido de 300 mm, en un esfuerzo de 754 kN/m².

Gráfica 4. Carga vs Deformación Modelo 2

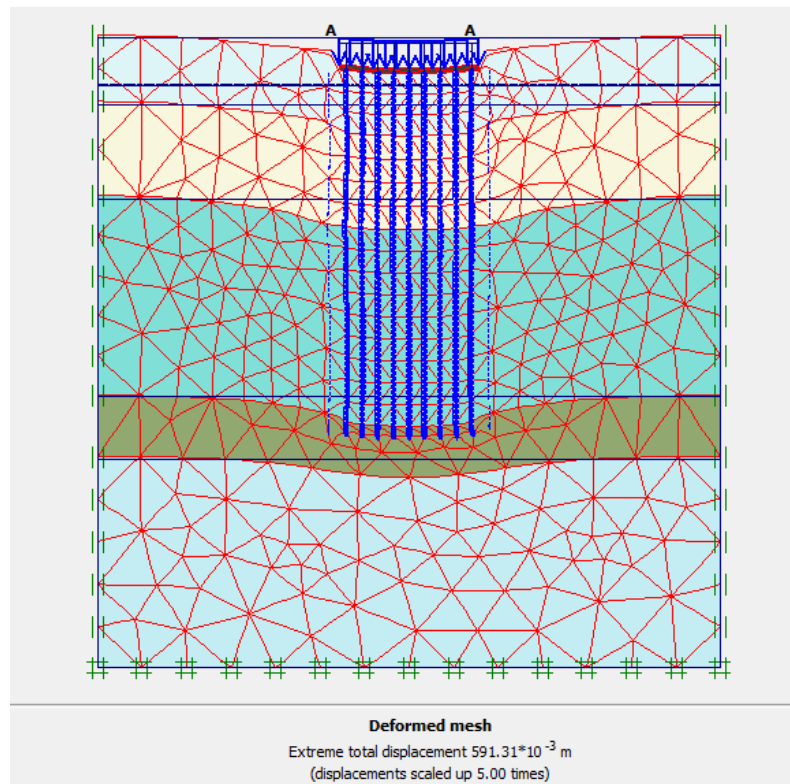


Fuente: Elaboración propia

Una vez generada la geometría de la placa, se evalúan diferentes cargas, se tiene que la deformación máxima que tiene el sistema antes de su falla es de 59.131 cm, como se muestra en la Figura 24 la malla evidencia el comportamiento de deformación.

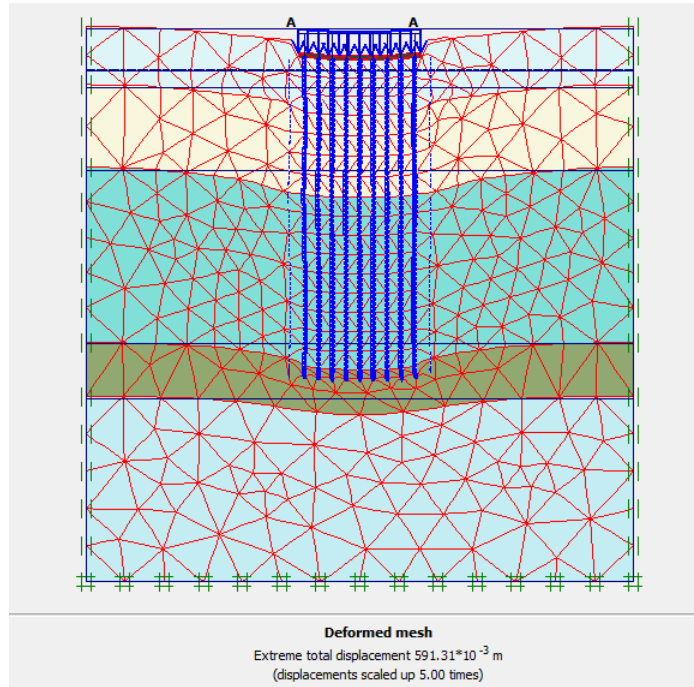
Los desplazamientos totales siguen reflejando un comportamiento de grupo por la cercanía entre los pilotes, estos actúan como bloque y causan desplazamientos laterales mayores, en la Figura 25 se grafica a través de mapa de sombras como el desplazamiento abarca toda la zona de la placa generando deformaciones entre el rango de 48 a 60 cm

Figura 24. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 2



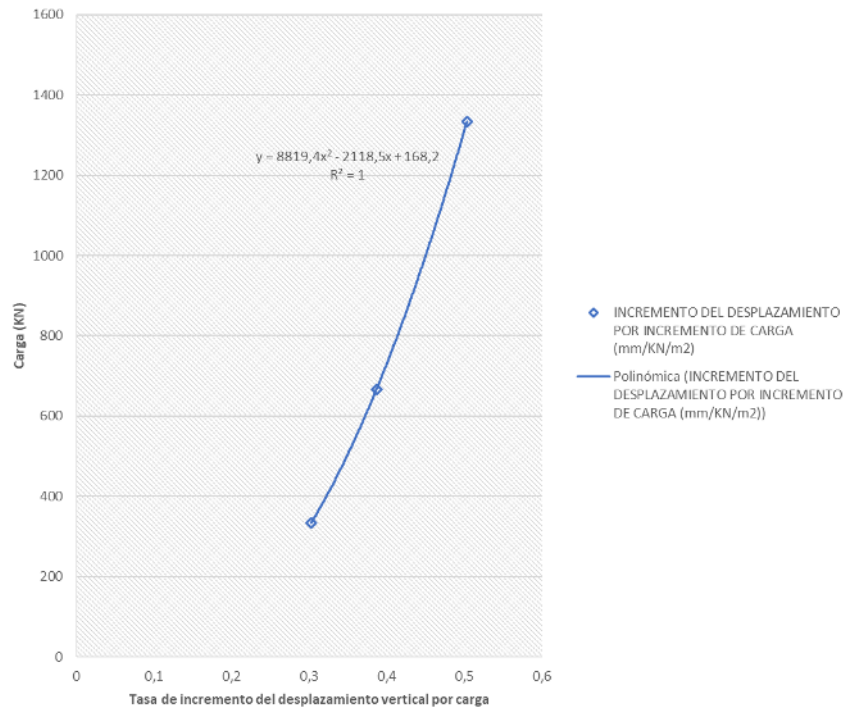
Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Figura 25. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 2



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Gráfica 5. Incremento de la deformación por carga Modelo 2



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede observar el incremento de las tres últimas cargas que se aplicaron, se obtiene que la falla está cercana a carga de 1.800 kN/m.

10.3. MODELO 3

Para el modelo 3 se tiene un ancho de placa de 15,5 m, a lo largo de esta se ubican 9 pilotes con una separación de 1,75 m, se aplican diferentes cargas hasta que llega a su estado limite, como se expresa en la Tabla 18, la cimentación fue expuesta a 5 tipos de carga, una más que los modelos anteriores ya que no falló en la aplicación del tipo de carga 4.

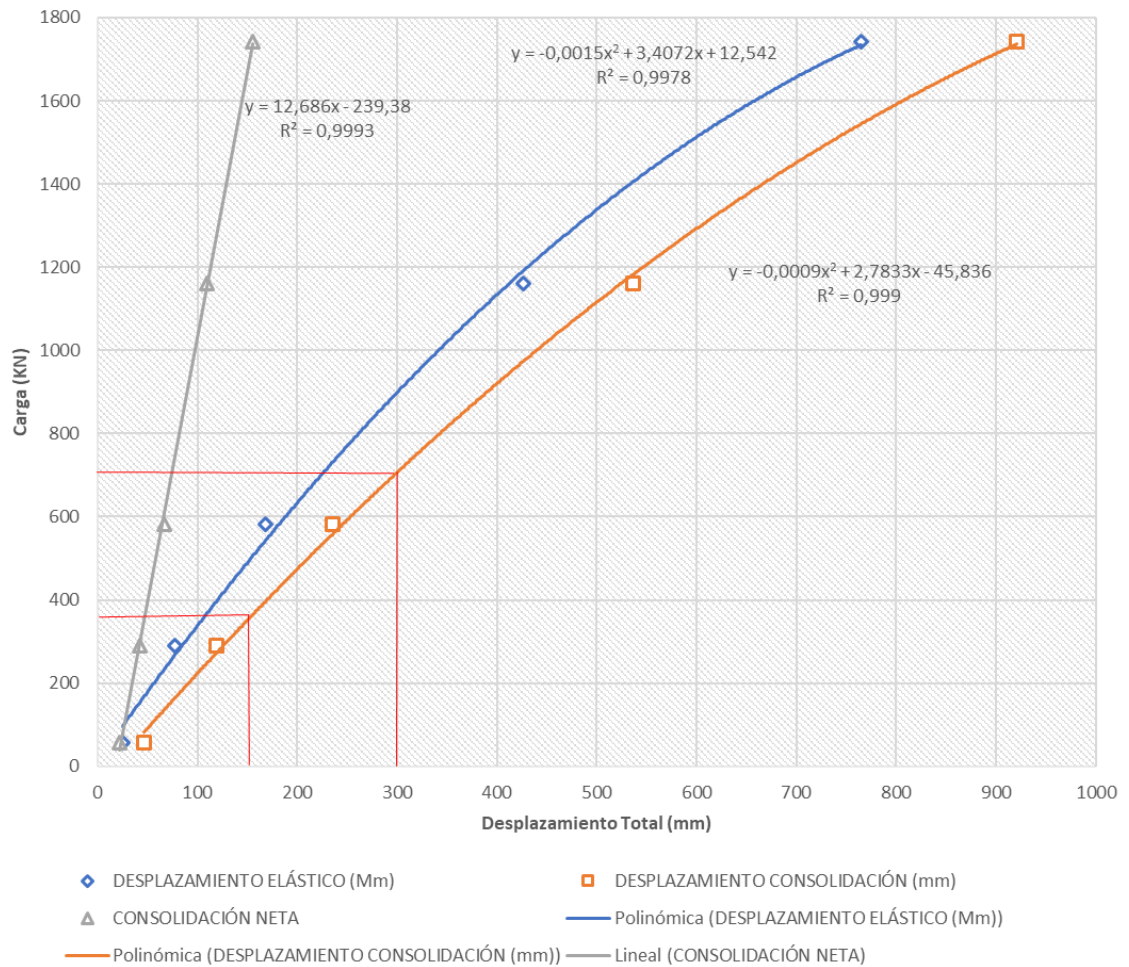
Tabla 18. Resultados deformaciones Modelo 3

	CARGA kN/m x PILOTE	CARGA kN/m	CARGA kN/m²	DE (mm)	DC (mm)	DNC (mm)	ID (mm/kN/m²)
1	100	900	58	24,64	46,64	22	
2	500	4500	290	77,49	119,45	41,96	0,31349
3	1000	9000	581	168,5	235,39	66,89	0,39935
4	2000	18000	1161	426,47	536,24	109,77	0,51813
5	3000	27000	1742	765,42	921,24	155,82	0,66306
DE: Desplazamiento Elástico DC: Desplazamiento por consolidación DNC: Desplazamiento neto por consolidación ID: Incremento del desplazamiento por incremento de carga							

Fuente: Elaboración propia

Según la información arrojada por el software, para obtener la deformación máxima permisible de 30 mm, es necesario aplicar una carga entre 9.000 kN/m y 18.000 kN/m, tal como se muestra en la Grafica 6, la curva polinómica intercepta el desplazamiento requerido de 300 mm, en un esfuerzo de 705 kN/m².

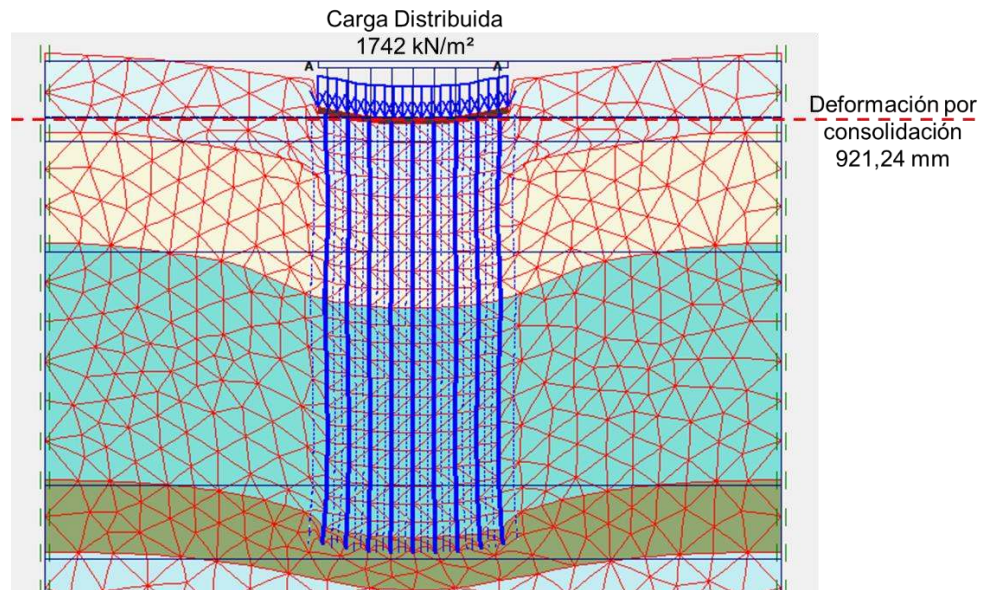
Gráfica 6. Carga vs Deformación Modelo 3



Fuente: Elaboración propia

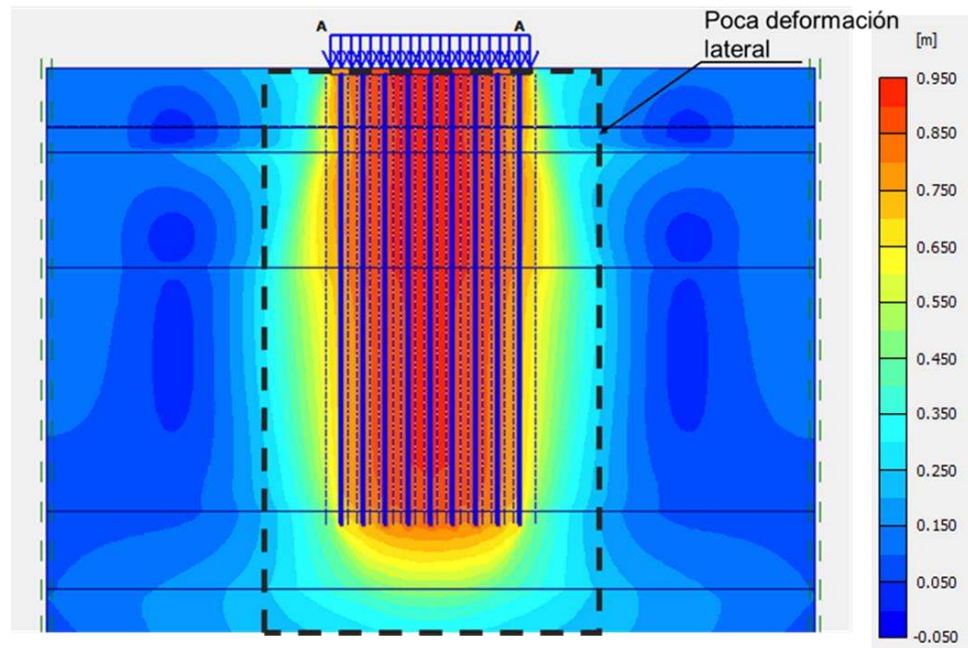
Al aplicar una carga adicional diferente a los dos modelos anteriores, se tiene que el modelo falla cuando se deforma en 90 cm, la carga máxima aplicada es 1742 kN/m², como se muestra en la Figura 26, la malla establece una deformación amplia, mientras que en la Figura 27 se muestra un esquema que no general deformaciones horizontales amplias en comparación con los modelos anteriores.

Figura 26. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 3



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

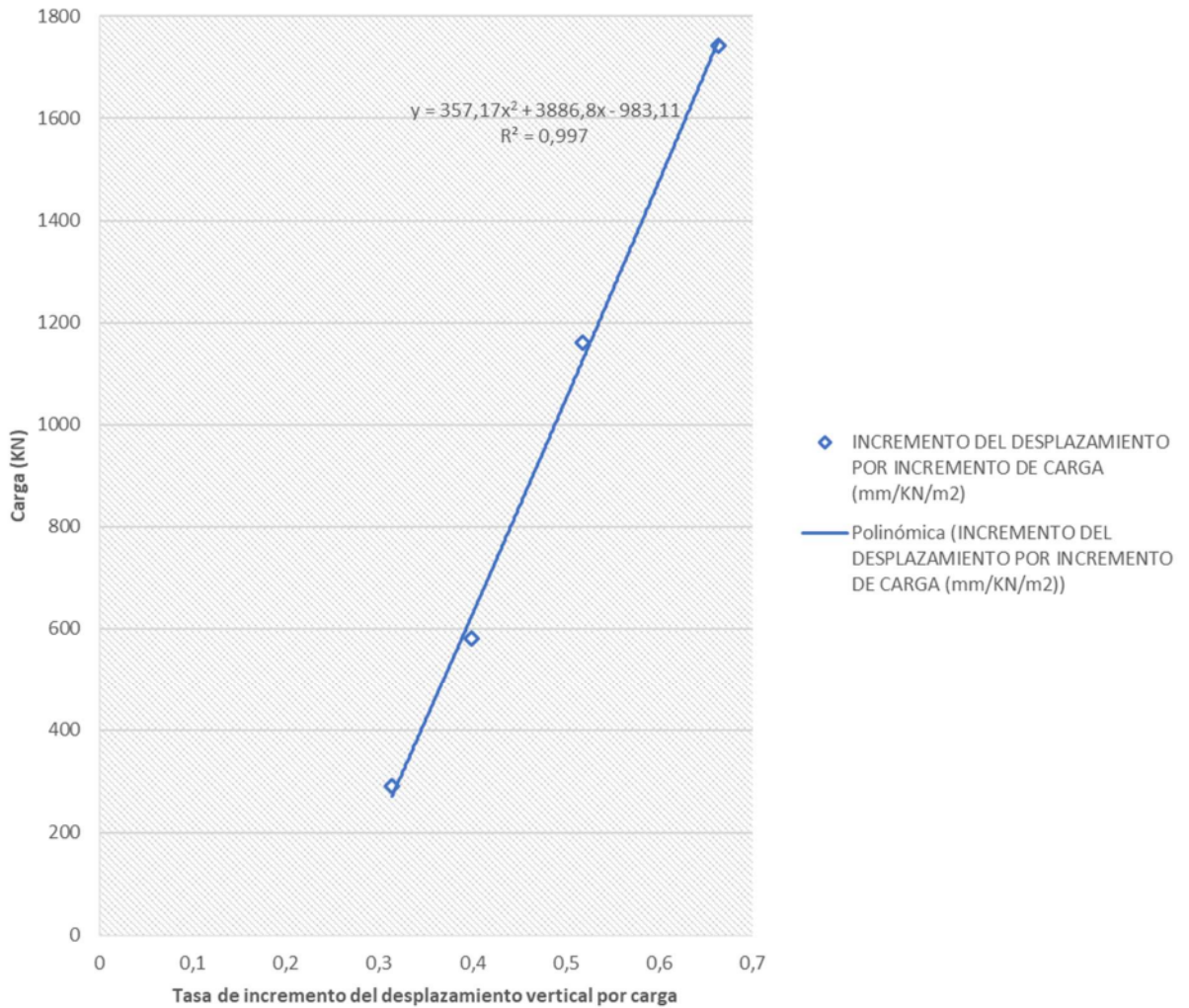
Figura 27. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 3



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Con los datos obtenidos en cada una de las exposiciones de carga para el modelo 3 se calcula el incremento del desplazamiento por el incremento de carga haciendo una relación, como se expresa en la Gráfica 7, el sistema de cimentación falla cercano a los 1543 kN/m², se deforma de manera lineal.

Gráfica 7. Incremento de la deformación por carga Modelo 3



Fuente: Elaboración propia

10.4. MODELO 4

Para el modelo 4 se tiene un ancho de placa de 17,5 m, a lo largo de esta se ubican 9 pilotes con una separación de 2 m, se aplican diferentes cargas hasta que llega a su estado limite, como se expresa en la Tabla 19, la cimentación fue expuesta a 5 tipos de carga.

Tabla 19. Resultados deformaciones Modelo 4

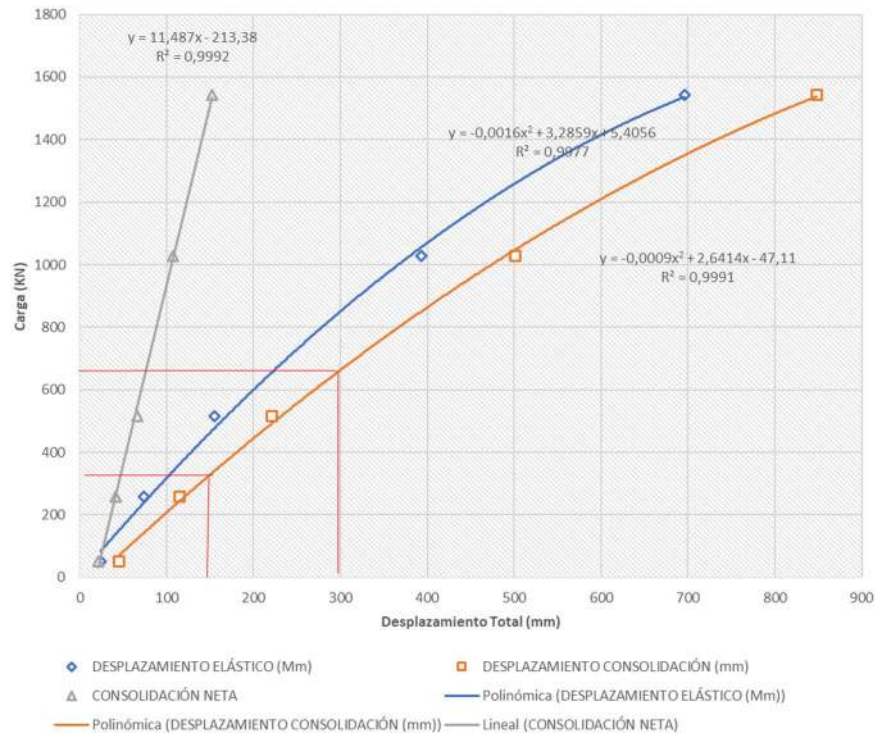
	CARGA kN/m x PILOTE	CARGA kN/m	CARGA kN/m ²	DE (mm)	DC (mm)	DNC (mm)	ID (mm/kN/m ²)
1	100	900	51	24,09	45,38	21,29	
2	500	4500	257	73,98	115,32	41,34	0,33999
3	1000	9000	514	155,51	221,23	65,72	0,41187
4	2000	18000	1029	393,18	500,93	107,75	0,54386
5	3000	27000	1543	695,94	848,21	152,27	0,67527

DE: Desplazamiento Elástico
 DC: Desplazamiento por consolidación
 DNC: Desplazamiento neto por consolidación
 ID: Incremento del desplazamiento por incremento de carga

Fuente: Elaboración propia

Según la información arrojada por el software, para obtener la deformación máxima permisible de 30 m, es necesario aplicar una carga entre 9.000 kN/m y 18.000 kN/m, tal como se muestra en la Grafica 8, la curva polinómica intercepta el desplazamiento requerido de 300 mm, en un esfuerzo de 660 kN/m².

Gráfica 8. Carga vs Deformación Modelo 4

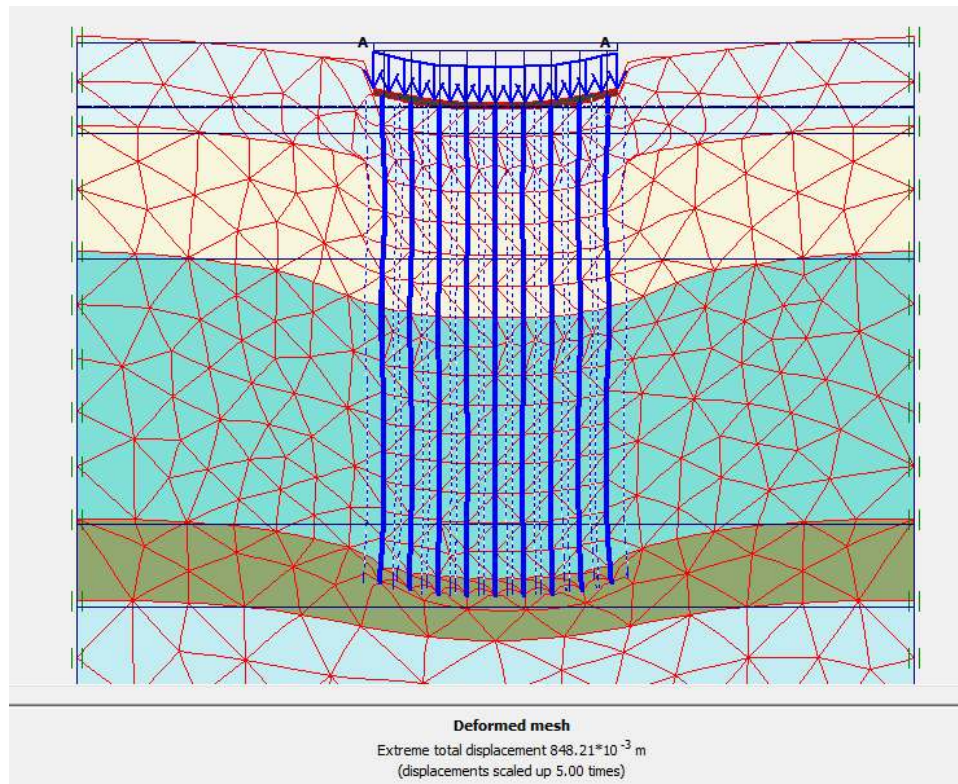


Fuente: Elaboración propia

Una vez modelado el sistema, y al aplicarse una carga de 1543 kN/m² se obtiene una deformación máxima de 84 cm, al continuar con esfuerzos mayores a este la placa fallará, como se puede observar en la Figura 28 la malla de nodos capta una deformación amplia tanto en placa como en pilotes, inclusive la placa llega a deformarse tanto que llega al nivel freático.

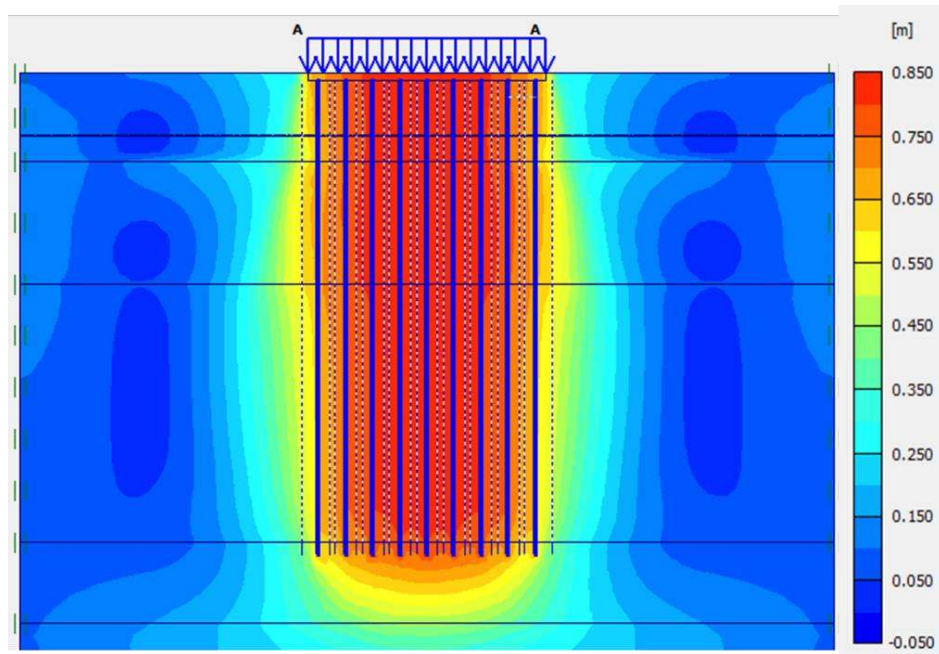
Una vez generadas las cargas, el esquema de sombras nos muestra una disminución de cargas laterales con respecto a los modelos donde el efecto de grupo se hace más evidente, inmediatamente se separa el sistema de cimentación del suelo los desplazamientos se reducen entre 25 y 30 cm, tal como se muestra en la Figura 29.

Figura 28. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 4



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Figura 29. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 4

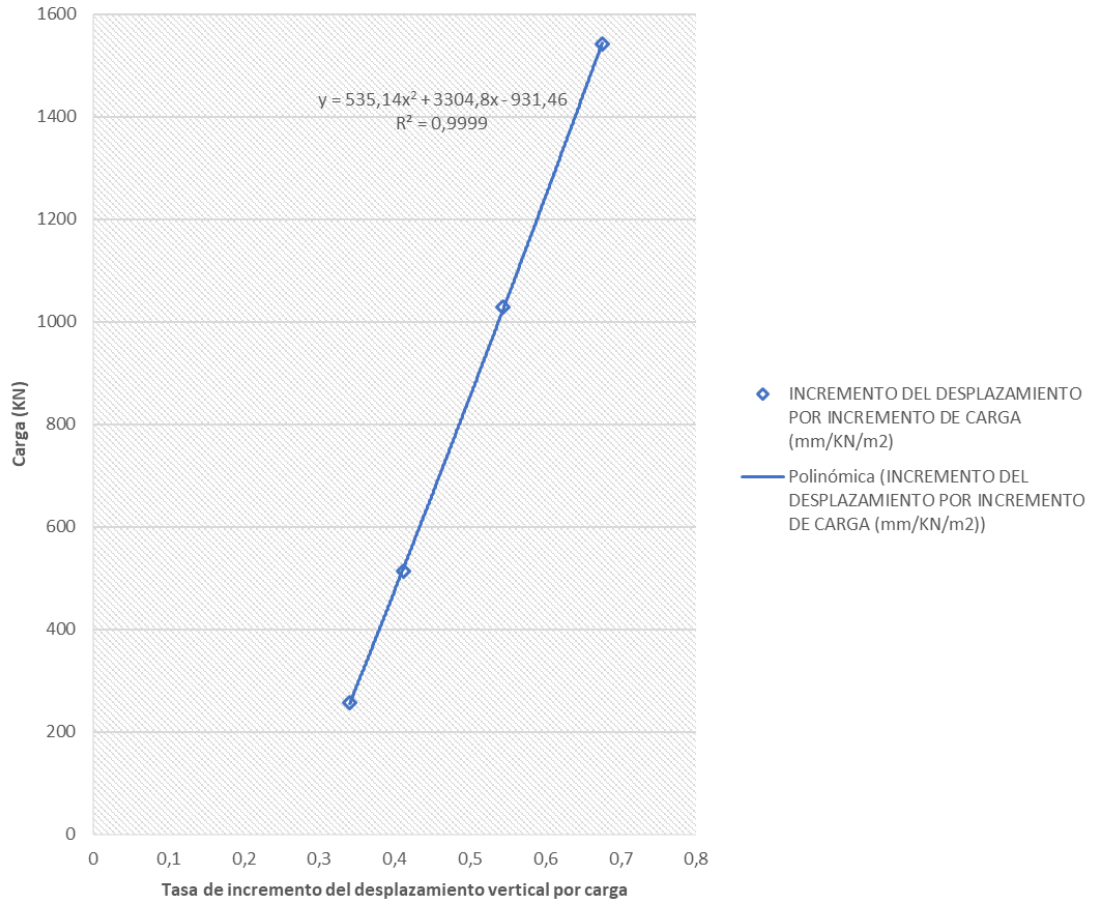


Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Cuando se grafican las 4 cargas se puede ver un aumento lineal entre cada carga, es notable como entre la carga 4 y 5 la tasa de incremento se hace mayor, lo que indica que los desplazamientos aumentan y se vuelven críticos en esta última modelación.

Se puede inferir que el ultimo desplazamiento evaluado sucede un poco antes que el sistema falle por completo, con un esfuerzo de 1543 kN/m^2 se vuelve totalmente inservible la cimentación.

Gráfica 9. Incremento de la deformación por carga Modelo 4



Fuente: Elaboración propia

10.5. MODELO 5

Para el modelo 5 se tiene un ancho de placa de 21.5 m, a lo largo de esta se ubican 9 pilotes con una separación de 2.5 m, se aplican diferentes cargas hasta que llega a su estado limite, como se expresa en la Tabla 20, la cimentación fue expuesta a 5 tipos de carga.

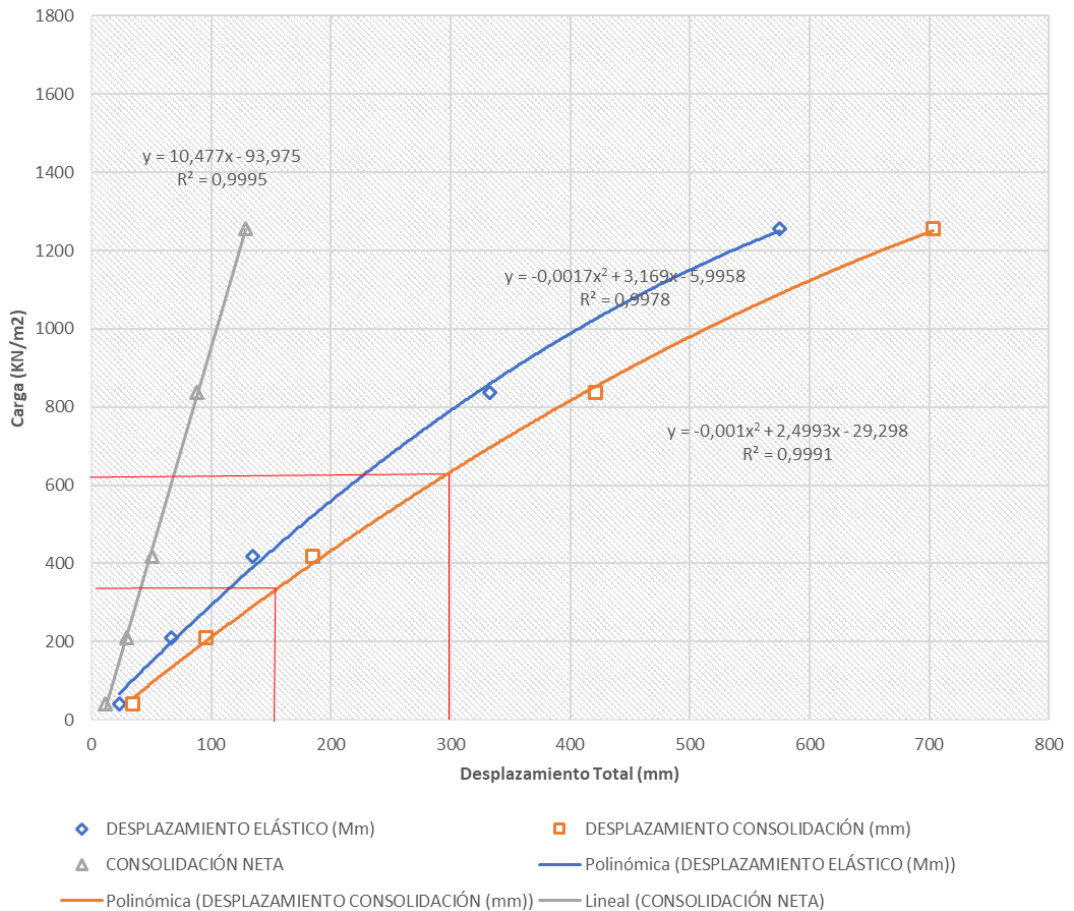
Tabla 20. Resultados deformaciones Modelo 5

	CARGA kN/m x PILOTE	CARGA kN/m	CARGA kN/m²	DE (mm)	DC (mm)	DNC (mm)	ID (mm/kN/m²)
1	100	900	42	23,1	34,83	11,73	
2	500	4500	209	66,51	95,85	29,34	0,36443
3	1000	9000	419	134,61	185,12	50,51	0,42651
4	2000	18000	837	333,21	421,63	88,42	0,56500
5	3000	27000	1256	575,01	703,56	128,55	0,67350
DE: Desplazamiento Elástico DC: Desplazamiento por consolidación DNC: Desplazamiento neto por consolidación ID: Incremento del desplazamiento por incremento de carga							

Fuente: Elaboración propia

Según la información arrojada por el software, para obtener la deformación máxima permisible de 30 mm, es necesario aplicar una carga entre 9.000 kN/m y 18.000 kN/m, tal como se muestra en la Grafica 10, la curva polinómica intercepta el desplazamiento requerido de 300 mm, en un esfuerzo de 622 kN/m².

Gráfica 10. Carga vs Deformación Modelo 5

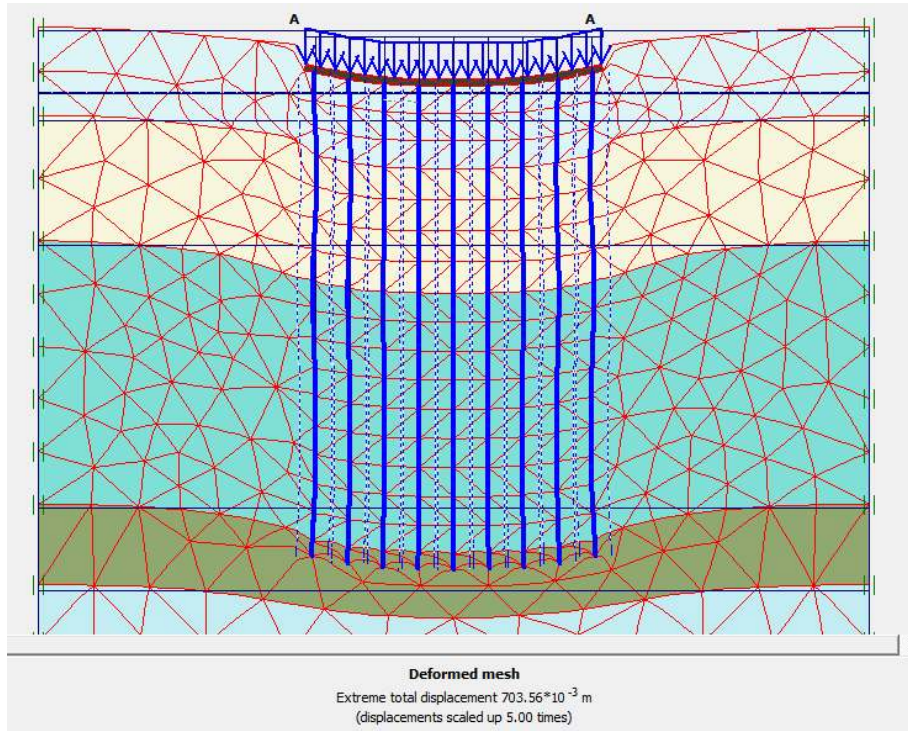


Fuente: Elaboración propia

En este modelo la deformación de la placa es menor que en el anterior, como se observa en la Figura 30, esta no alcanza a llegar al nivel freático pero su deformación alcanza los 70 cm, esta se alcanza al aplicar un esfuerzo de 1256 kN/m², el equivalente a una carga de 27000 kN/m.

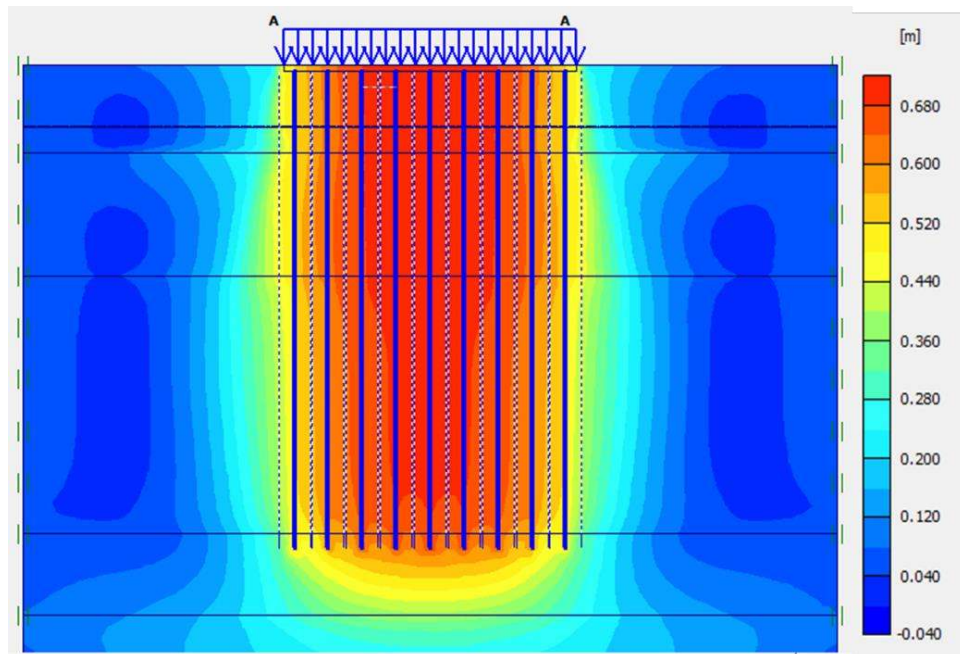
Tal y como el modelo anterior la presión lateral que genera todo el sistema hace q las cargas y esfuerzos laterales sean mucho menores, en la Figura 31 se puede observar como a partir de 2 metros laterales aproximadamente los esfuerzos disminuyen entre 0.12 y 0.20 m.

Figura 30. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 5



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

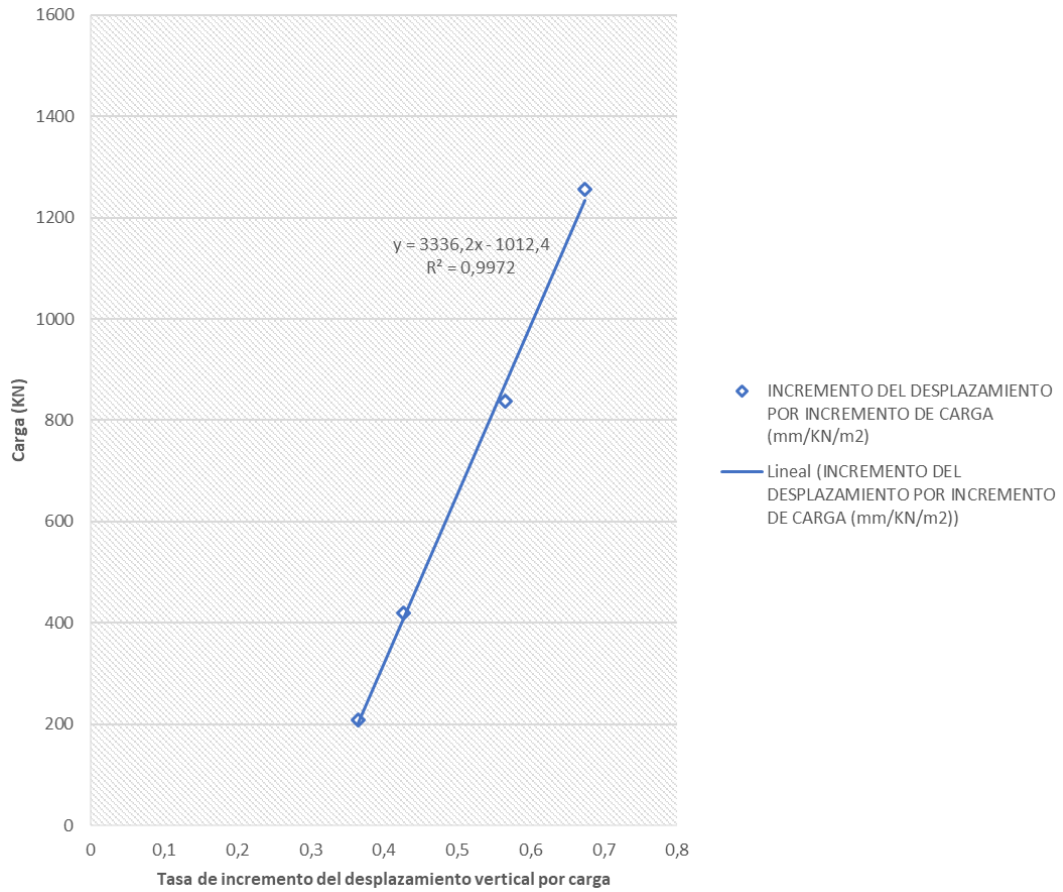
Figura 31. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 5



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Este sistema de 21.5 m de ancho deja ver como la capacidad de esfuerzo es menor frente a modelaciones de menor tamaño, aunque soportó los 5 tipos de carga el mayor esfuerzo que tuvo fue 1256 kN/m², tal como se ve en la Gráfica 11 el incremento tiende a ser lineal manteniendo la tasa de incremento constante en los 3 ultimo tipos de carga.

Gráfica 11. Incremento de la deformación por carga Modelo 5



Fuente: Elaboración propia

10.6. MODELO 6

Para el modelo 6 se tiene un ancho de placa de 25.5 m, a lo largo de esta se ubican 9 pilotes con una separación de 3 m, se aplican diferentes cargas hasta que llega a su estado limite, como se expresa en la Tabla 21, la cimentación fue expuesta a 6 tipos de carga.

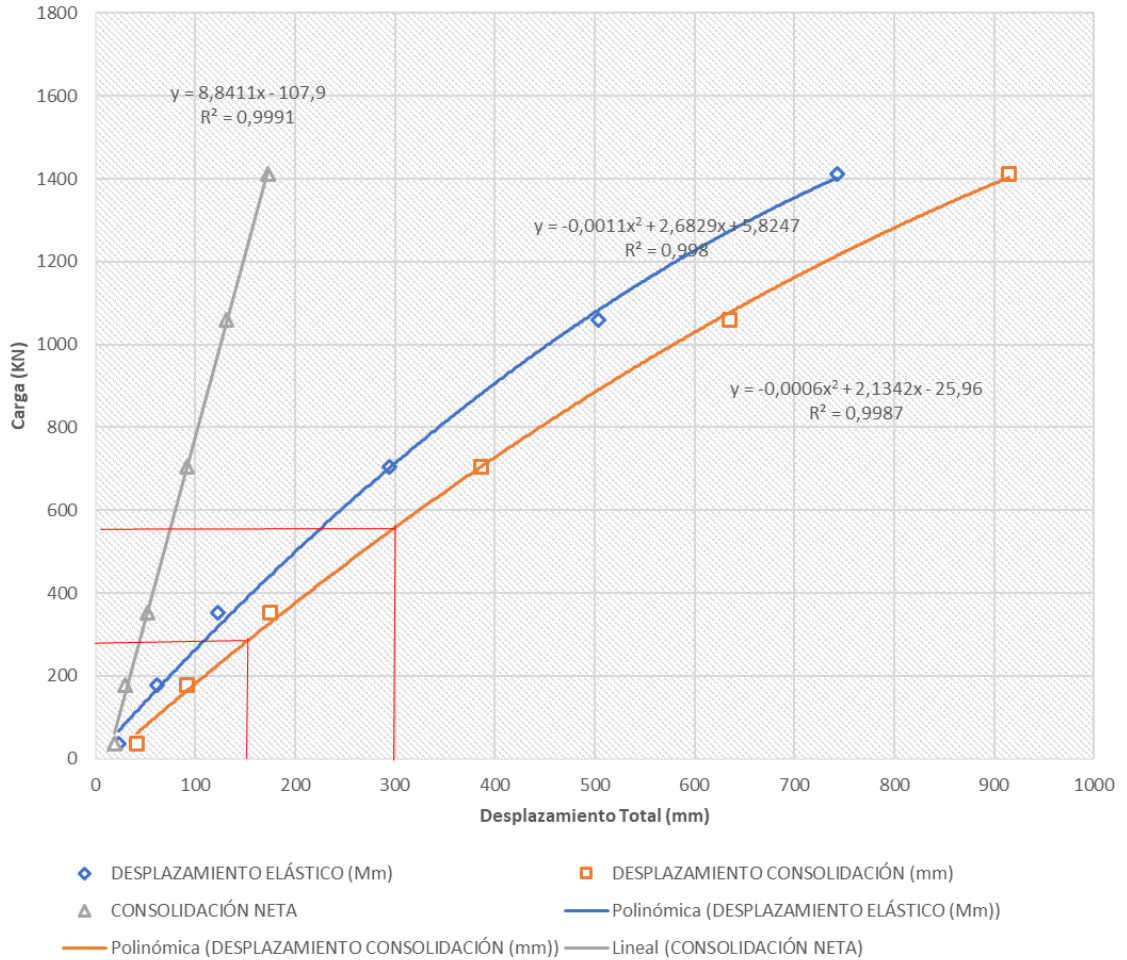
Tabla 21. Resultados deformaciones Modelo 6

	CARGA kN/m x PILOTE	CARGA kN/m	CARGA kN/m²	DE (mm)	DC (mm)	DNC (mm)	ID (mm/kN/m²)
1	100	900	35	22,77	41,88	19,11	
2	500	4500	176	62,21	91,83	29,62	0,35381
3	1000	9000	353	122,82	174,5	51,68	0,46846
4	2000	18000	706	294,38	386,45	92,07	0,60053
5	3000	27000	1059	503,79	634,99	131,2	0,70420
6	4000	36000	1412	742,61	915,31	172,7	0,79424
DE: Desplazamiento Elástico DC: Desplazamiento por consolidación DNC: Desplazamiento neto por consolidación ID: Incremento del desplazamiento por incremento de carga							

Fuente: Elaboración propia

Según la información arrojada por el software, para obtener la deformación máxima permisible de 30 m, es necesario aplicar una carga entre 9.000 kN/m y 18.000 kN/m, tal como se muestra en la Gráfica 12, la curva polinómica intercepta el desplazamiento requerido de 300 mm, en un esfuerzo de 562 kN/m².

Gráfica 12. Carga vs Deformación Modelo 6

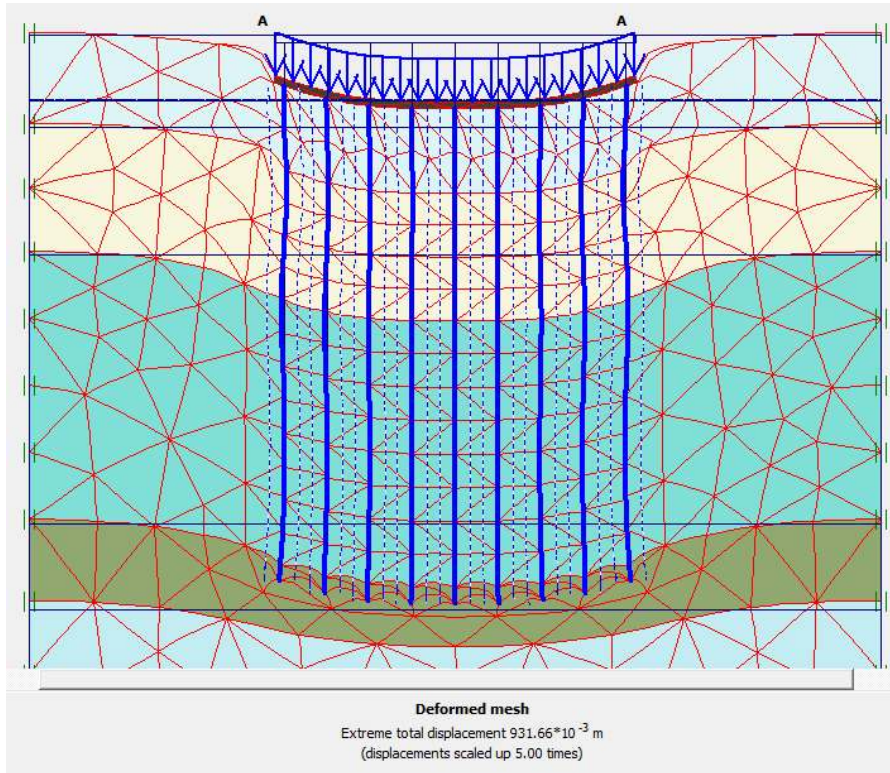


Fuente: Elaboración propia

El modelo 6 fue expuesto a un tipo carga más que todos los anteriores, por su mayor tamaño y la separación de pilotes se asumía que el efecto de grupo ya no estaría presente, es evidente que al someterse a una carga de 36000 kN/m² la falla del sistema iba a ser generosa, llegando a deformarse 91 cm.

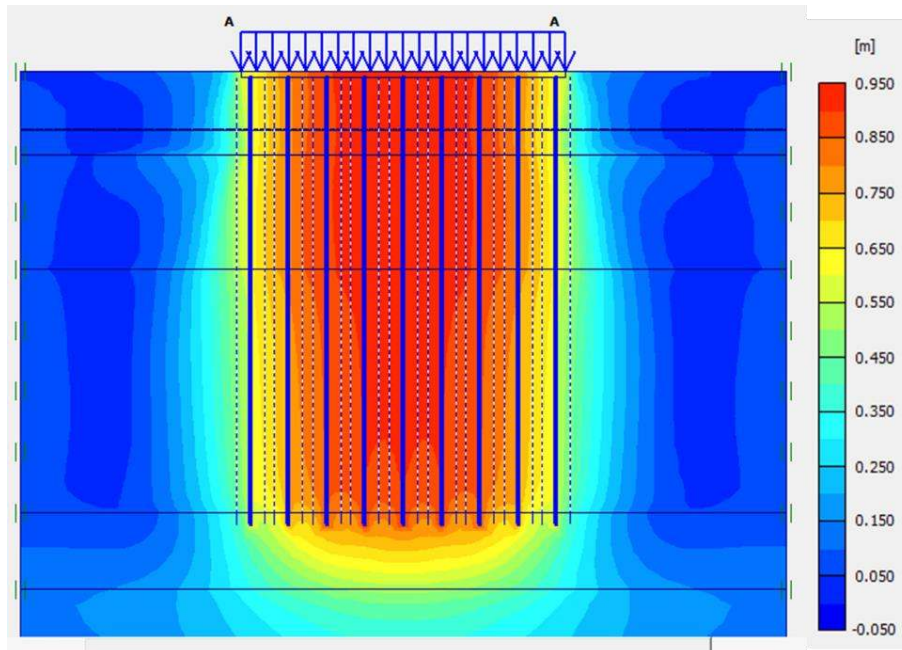
Algo evidente que se venía descubriendo desde el modelo 1 era la gran disminución de los efectos laterales que provocaba un sistema de Placa-Pilote donde la separación era notablemente mayor.

Figura 32. Software PLAXIS 2D: Malla de interacción cimentación suelo Modelo 6



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

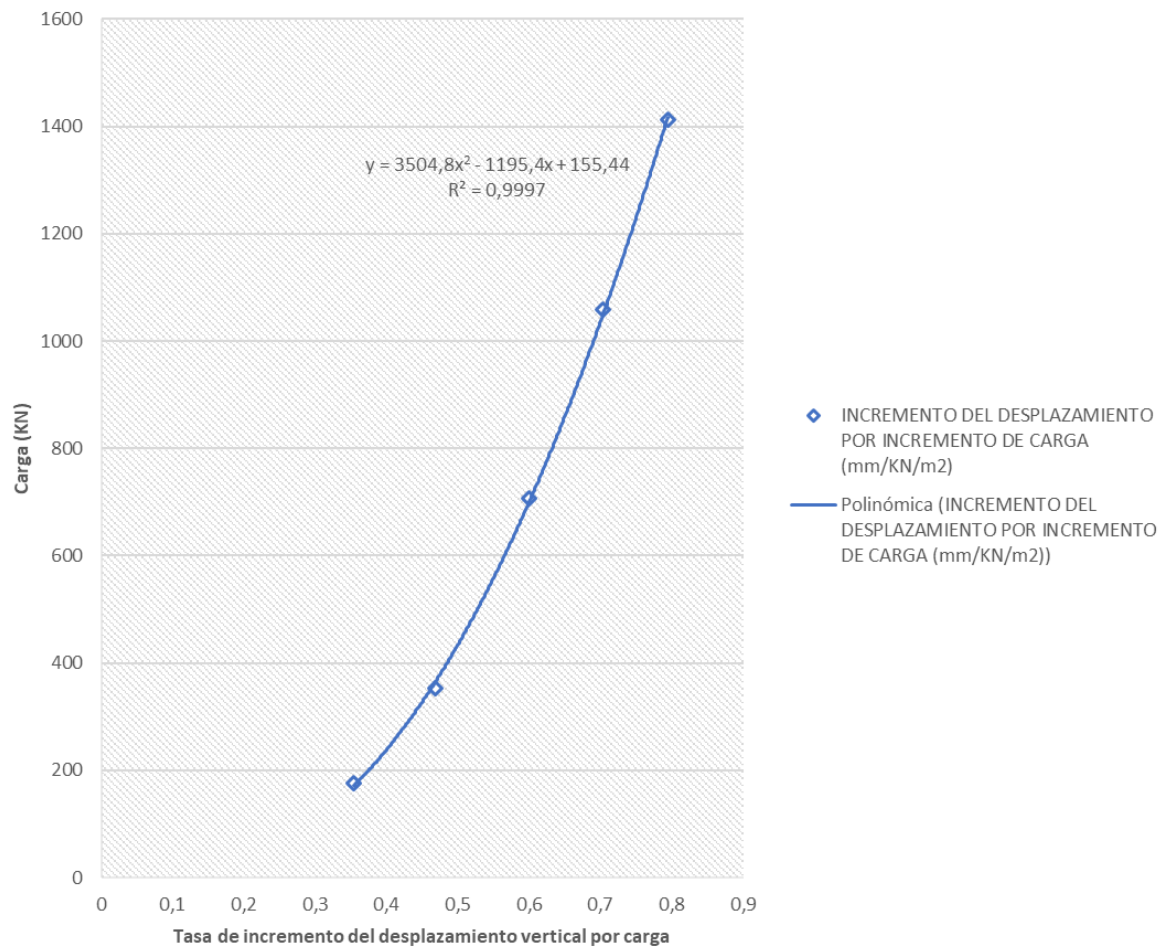
Figura 33. Software PLAXIS 2D: Esquema de sombras desplazamientos totales Modelo 6



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

La carga a la que fue sometida este último modelo generó un esfuerzo menor, ocasionado por un área mucho mayor, al momento de encontrar la carga última se evidenció un desplazamiento amplio y una tasa de incremento muy amplia con relación a los modelos anteriores.

Gráfica 13. Incremento de la deformación por carga Modelo 6



Fuente: Elaboración propia

10.7. ESFUERZOS TOTALES

Para determinar la cantidad de carga que cada uno de los modelos puede soportar, se realiza una relación entre el esfuerzo al que es sometida la placa hasta que se deforma 30 cm, tal como se muestra en la Tabla 22, el esfuerzo se reduce con respecto al área de la placa, todo lo contrario, pasa con la carga efectiva, se obtiene así que a mayor área la placa soportará más carga y su esfuerzo será menor

Tabla 22. Relación Área - Esfuerzo - Carga efectiva

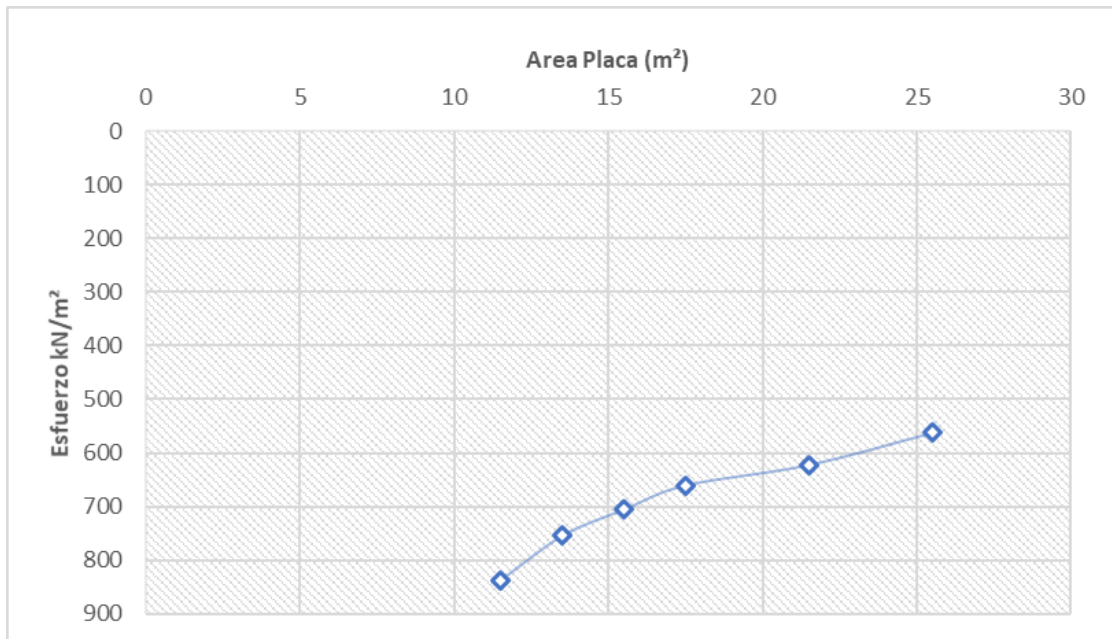
Área Placa (m ²)	Esfuerzo (kN/m ²)	Carga efectiva (kN/m)
11.5	837	9625.5
13.5	754	10179
15.5	705	10927.5
17.5	660	11550
21.5	622	13373
25.5	562	14331

Fuente: Elaboración propia

Para el presente estudio se obtiene una relación entre la carga y el esfuerzo ligada al área, como se aprecia en la Gráfica 14 el área de la placa influye en la capacidad de absorber las cargas y transmitirlas a los pilotes y al suelo, en el caso del modelo 6 donde la placa tiene 25.5 m² de área la carga efectiva que se aplica está distribuida en toda el área lo que ocasiona que, a diferencia de placas con menor ancho, esta tenga que repartir menos kN en toda su extensión de área.

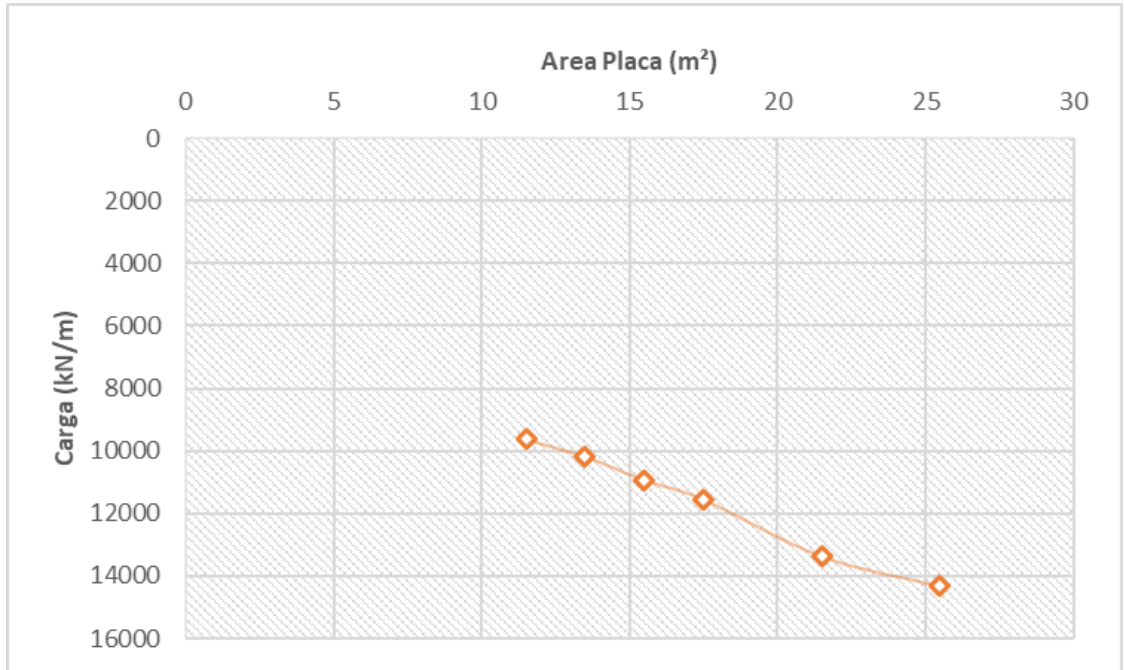
La carga efectiva que es necesaria para alcanzar deformaciones permisibles de 30 cm va siendo mayores con respecto al área de la placa, tal como se representa en la Gráfica 15, a mayor área la estructura soportara más cargas.

Gráfica 14. Esfuerzo vs Área placa



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 15. Carga vs Área placa



Fuente: Elaboración propia

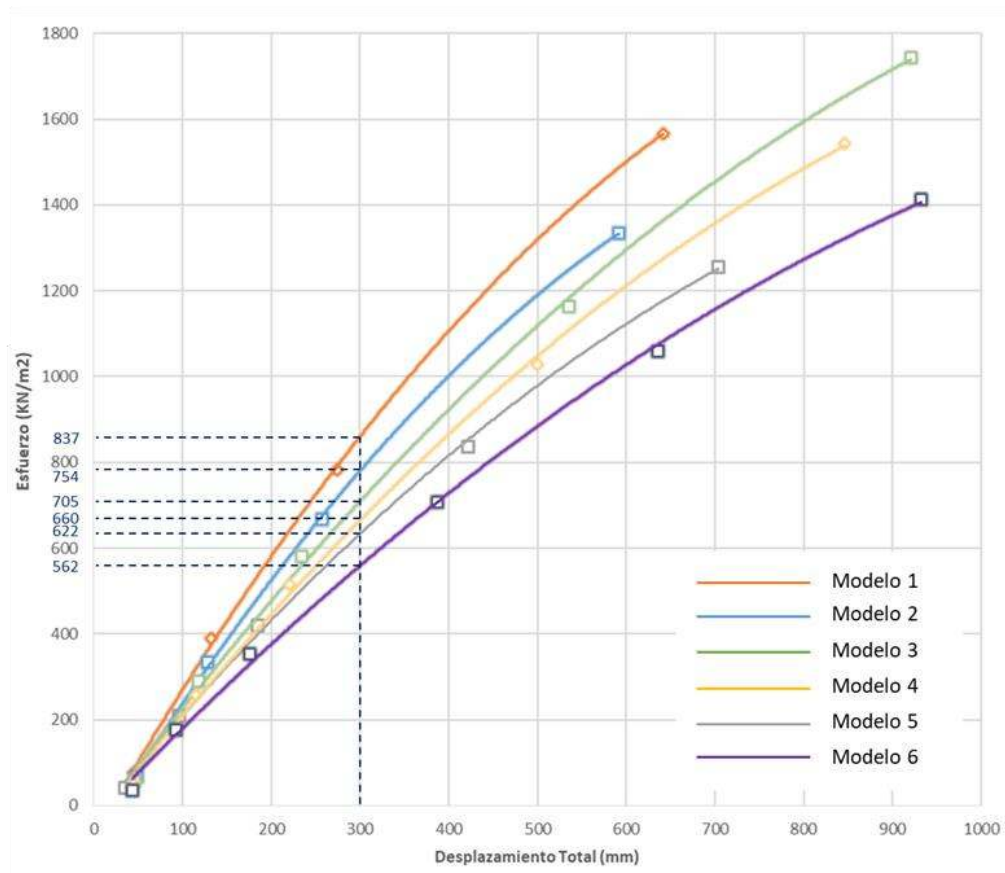
11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez se finaliza la modelación de cada uno de los 6 sistemas de cimentación se llevan a cabo comparaciones expuestas a continuación:

11.1. CURVAS CARGA VS DEFORMACIÓN

Tal como se explica en el capítulo de cargas, para este trabajo investigativo se toman 30 cm de asentamiento límite, tal como lo expone la NSR-10, aunque también se evaluarán asentamientos máximos para determinar en qué momento la placa fallará.

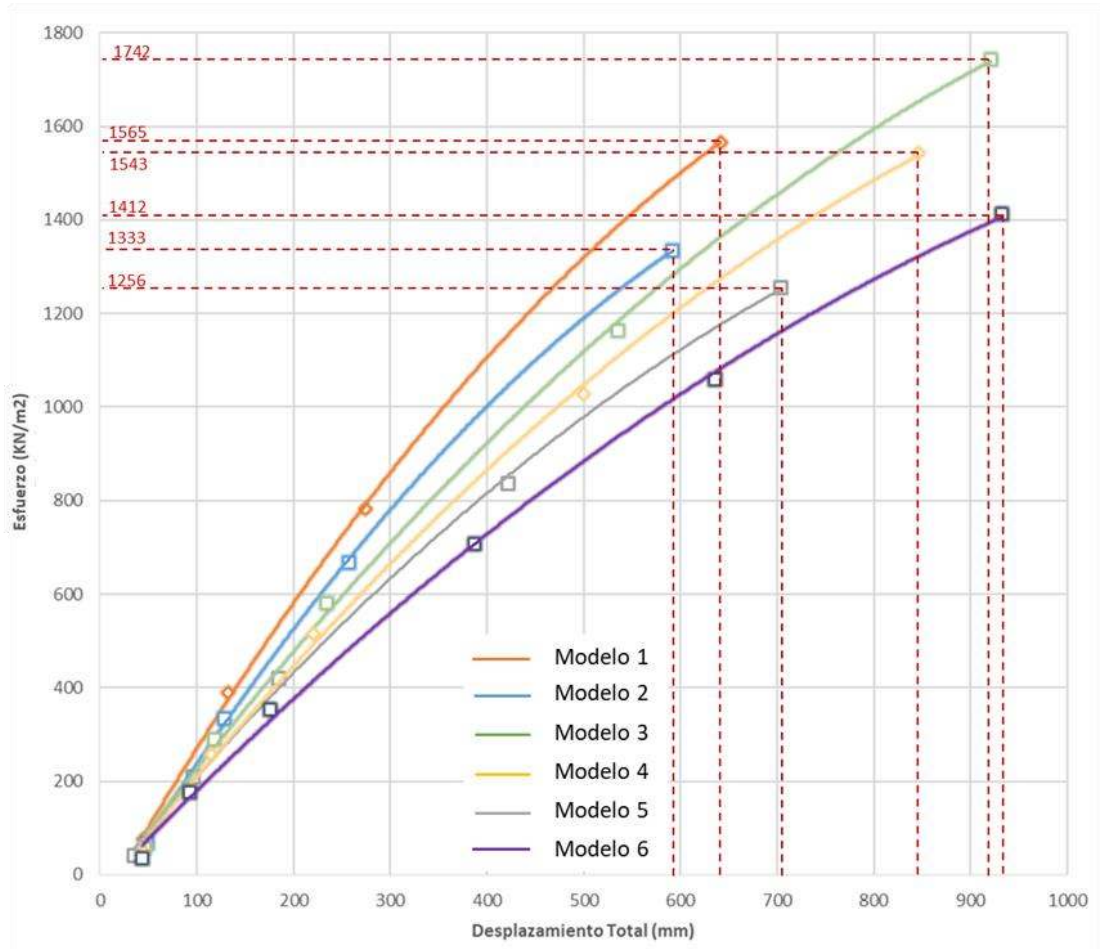
Gráfica 16. Resumen desplazamientos a 30 cm



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 16 se expresa los desplazamientos totales de cada uno de los modelos, se puede concluir que la capacidad portante del elemento no aumenta con el área, aunque como se expresa en la Gráfica 17 las placas con mayor tamaño tienden a resistir mayor carga, los esfuerzos que se generan son menores.

Gráfica 17. Resumen desplazamientos carga máxima



Fuente: Elaboración propia

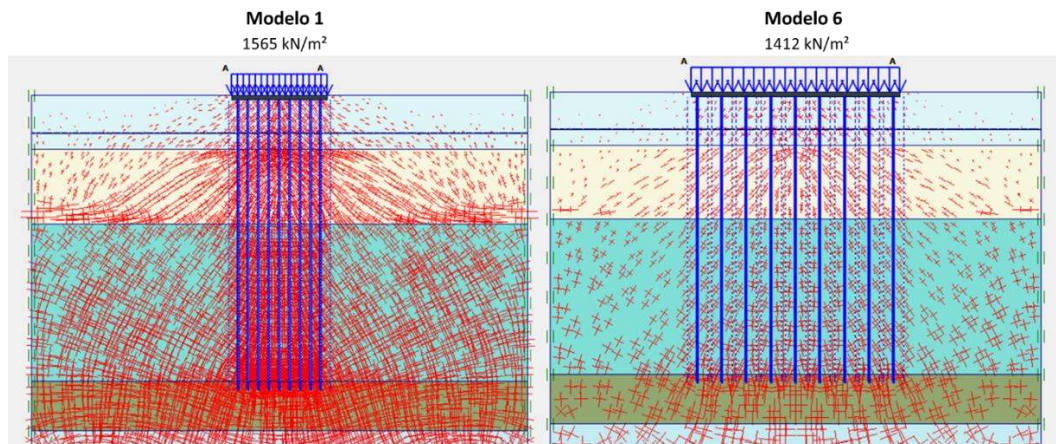
11.2. EFECTO DE BLOQUE EN GRUPO DE PILOTES

El uso de pilotes en un sistema viene acompañado de una necesidad de lograr una capacidad portante adecuada, si a esto se le suma que la placa genera una distribución de cargas para equilibrar estos esfuerzos a cada uno de los pilotes, se tiene que el número de estos es un factor importante.

La separación de pilotes genera fenómenos de interacción que no se pueden prever simplemente con calcular un pilote individual y después sumar resistencias, este tiene varias variables que estimar, estos efectos dependen en gran parte de la capacidad del suelo y de la geometría de dichos pilotes.

Cuando comparamos los modelos extremos del grupo, el de ancho menor y el de ancho mayor a través de los esfuerzos totales arrojados por el software es evidente como un bloque de pilotes ubicados muy cerca llegan a generar presiones mayores y deformaciones externas amplias. Figura 34 se hace evidente como en cimentaciones con pilotes de separación 2.5 veces el diámetro los esfuerzos totales son mayores, a diferencia del modelo 6 donde la separación entre pilotes es de 6 veces el diámetro, allí el bulbo de presiones no alcanza a generar mayor fenómeno por lo cual los esfuerzos totales no son tan significativos.

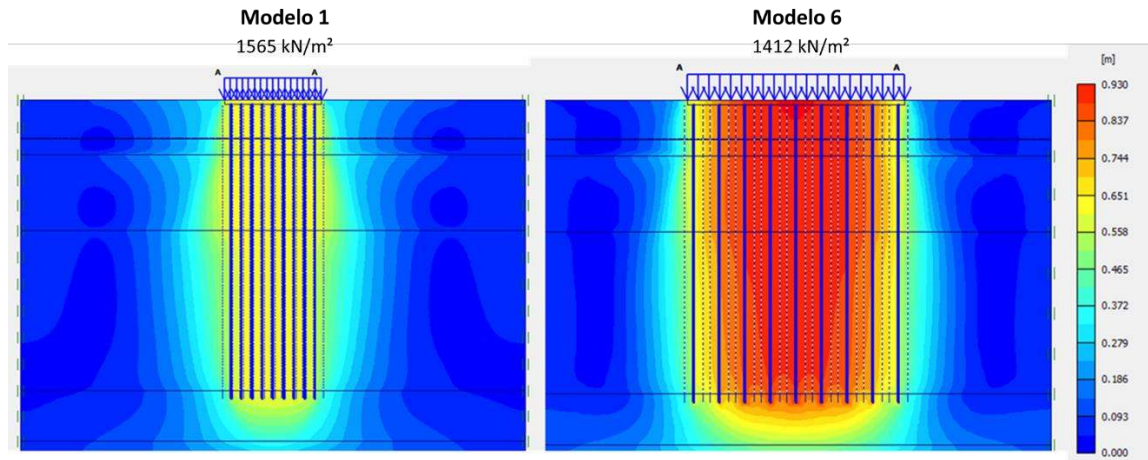
Figura 34. Esfuerzos totales Modelo 1 y 6



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

La eficiencia de los pilotes está ligada a la estructuración bajo la placa, cuando los pilotes presentan una separación muy inferior, este grupo se reduce a actuar como una zapata profunda, por lo cual se espera que el espaciamiento mínimo para considerar efectos de grupo muy bajos sea de 3 veces el diámetro.

Figura 35. Desplazamientos totales Modelo 1 y 6



Fuente: Elaboración propia con Software PLAXIS 2D V8.6

Cuando se realiza una comparativa entre los modelos extremos, a la misma escala por valores de desplazamientos es evidente que los desplazamientos a esfuerzos casi iguales son ampliamente diferentes, aunque el esfuerzo de 1412 kN/m² se alcanza con una carga de 36000 kN/m para el modelo 6, dichos esfuerzos son muy parecidos a los del Modelo 1, cuando la carga aplicada es 18000 kN/m.

Sin embargo, como se aprecia en la Figura 35 las cargas laterales son muy parecidas, aunque la carga llega a ser muy diferente, el efecto de grupo de los pilotes genera un mayor impacto en las presiones laterales.

11.3. RESUMEN

En la Tabla 23 se encuentra un compilado de modelos vs carga, allí se muestran los datos arrojados por el software en cuando a desplazamiento elástico y desplazamiento por consolidación.

Los modelos a mayor ancho resisten mayores cargas, lo que produce que los esfuerzos sean mayores en los modelos con menor tamaño ya que en menos área deben resistir una carga mayor.

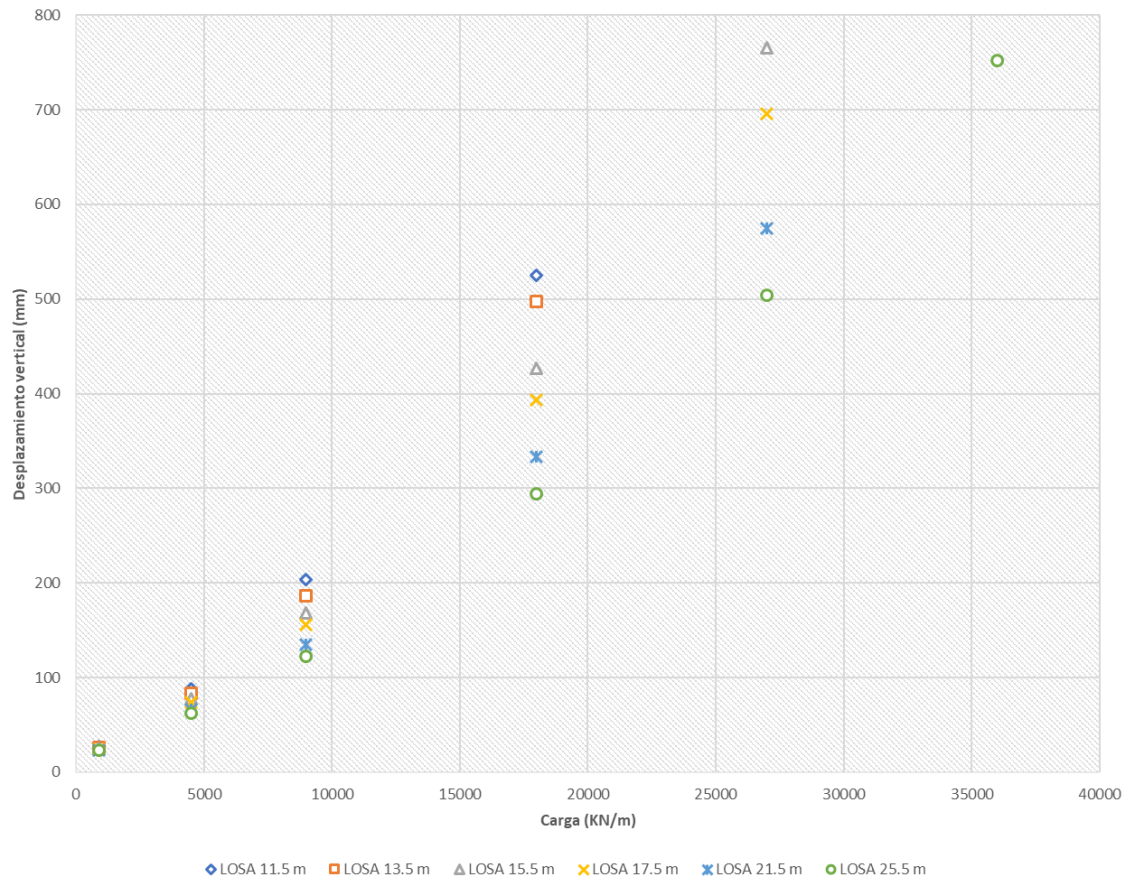
Tabla 23. Resumen de desplazamientos elásticos y por consolidación

	CARGA TOTAL KN/M	900	4500	9000	18000	27000	36000
Modelo 1	DE (mm)	26,78	88,5	203,32	525,07		
	DC (mm)	45,28	133,18	274,44	642,05		
Modelo 2	DE (mm)	25,94	83,43	186,01	497,74		
	DC (mm)	46,64	127,22	256,04	591,31		
Modelo 3	DE (mm)	24,64	77,49	168,5	426,47	765,42	
	DC (mm)	46,64	119,45	235,39	536,24	921,24	
Modelo 4	DE (mm)	24,09	73,98	155,51	393,18	695,94	
	DC (mm)	45,38	115,32	221,23	500,93	848,21	
Modelo 5	DE (mm)	23,1	66,51	134,61	333,21	575,01	
	DC (mm)	34,83	95,85	185,12	421,63	703,56	
Modelo 6	DE (mm)	22,77	62,21	122,82	294,38	503,79	751,59
	DC (mm)	41,88	91,83	174,5	386,45	634,99	931,66
DE= Desplazamiento elástico DC= Desplazamiento consolidación							

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 18 se muestra el comportamiento de cada uno de los modelos, es concluyente el hecho que a mayor tamaño la placa puede soportar mayores cargas, pero además cada modelo resiste diferentes cargas propuestas, teniendo así que el Modelo 1 solo alcanza una carga máxima de 18.000 kN/m, mientras que el modelo 6 alcanza a resistir hasta el doble de carga del modelo 1.

Gráfica 18. Resumen desplazamiento total vs Carga



Fuente: Elaboración propia

12. CONCLUSIONES

- Escoger un software de elementos finitos que permita generar modelos múltiples tiene utilidades invaluable para determinar de manera ágil el comportamiento de esfuerzo y deformación de la comparativa planteada en la actual investigación
- Los resultados obtenidos después de la modelación permitieron hacer una comparación objetiva entre carga vs deformación de acuerdo con las diferencias entre sistemas relacionadas con geometría de la placa y separación de pilotes.
- El esfuerzo por capacidad portante neto no incrementa con el aumento de la losa, pero la capacidad de carga total si incrementa.
- Teniendo en cuenta los 6 modelos planteados en esta investigación se obtiene que a mayor área de placa independientemente del número de pilotes el esfuerzo será menor
- Los sistemas de cimentación Placa-Pilote son alternativas con alta capacidad portante, como se puede observar en cada uno de los modelos las cargas admisibles antes de una falla son considerablemente amplias, esto se debe a la combinación de tipos de esfuerzos de cada uno de los elementos que lo conforman.
- En suelos arcillosos donde la distancia ente pilotes es mínima, la capacidad resistente por fricción se ve muy reducida, esto debido al remoldeo de la arcilla.
- Las diferencias entre desplazamientos por consolidación no son significativas respecto la diferencia de anchos de la placa.

13.RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer modelaciones en tres dimensiones para profundizar el efecto de la losa limitante en profundidad y así evaluar los desplazamientos de manera más real, ya que las deformaciones planas que maneja el programa PLAXIS 2D se limitan a un ancho, pero no a una longitud.
- En proyectos de impacto alto, con dimensiones de losas muy grandes y pilotes de gran profundidad se recomienda hacer un análisis del efecto de grupo teniendo en cuenta el tipo de suelo, ya que como se explica en este trabajo, la capacidad de resistencia de un pilote individual puede llegar a alcanzar casi 6 veces más resistencia que cuando este mismo pilote es puesto en un grupo y su separación es menor a 3 veces su diámetro.
- En suelos cohesivos, al tener separación entre pilotes entre 2 y 4 veces el diámetro se recomienda hacer modelaciones numéricas en lugar de usar parámetros de la norma.
- Para futuras investigaciones del comportamiento de sistema Placa-Pilote se recomienda tener un enfoque en la influencia de cada uno de los elementos que componen la cimentación, como actúa la placa y cómo actúan los pilotes.

14. BIBLIOGRAFÍA

AIS, Asociación colombiana de ingeniería sísmica - 2010. "Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10." Scielo.

Bisht, Rajendra, and Baleshwar Singh. 2012. "STUDY ON BEHAVIOUR OF PILED RAFT FOUNDATION BY NUMERICAL MODELLING."

Burland J. 1970. "Proceedings of the Conference on In Situ Investigations in Soil and Rocks." In BGS, 61- 62.

Butterfield, R, and P K Banerjee. 1971. "The Problem of Pile Group–Pile Cap Interaction." *Géotechnique* 21(2): 135–42.
<https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.2.135>.

Carrier, W David, and John T Christian. 1973. "Rigid Circular Plate Resting on a Non-Homogeneous Elastic Half-Space." *Géotechnique* 23(1): 67–84.
<https://doi.org/10.1680/geot.1973.23.1.67>.

Dominguez, J, and J.~M. Roesset. 1978. "Dynamic Stiffness of Rectangular Foundations.": 16152.

Fattah, Mohammed Y., Mustafa A. Yousif, and Sarmad M.K. Al-Tameemi. 2015. "Effect of Pile Group Geometry on Bearing Capacity of Piled Raft Foundations." *Structural Engineering and Mechanics* 54(5): 829–53.

Gazetas, G., J. L. Tassoulas, R. Dobry, and M. J. O’rourke. 1985. "Elastic Settlement of Arbitrarily Shaped Foundations Embedded in Half-Space." *Geotechnique* 35(3): 339–46.

Jiménez Salas, J.A., J.L. de Justo Alpañes, and Alcibiades A. Serrano González. 1981. "Geotecnia y Cimientos." Madrid, Rueda.

John, H D St, M F Randolph, R P McAnoy, and K A Gallagher. "6 Design of Piles for Tethered Platforms." In *DESIGN IN OFFSHORE STRUCTURES*, 61–72.
<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/dios.01954.0009>.

Kaldjian, MJ. 1969. "DISCUSSION OF DESIGN PROCEDURES FOR DYNAMICALLY LOADED FOUNDATIONS." *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div* 95: PP 364-366.

- Kalpakcı, V, and Mehmet Özkan. 2012. "A Simplified Approach to the Settlement Estimation of Piled Rafts." *Acta Geotechnica Slovenica* 9: 77–85.
- Katzenbach, R., U. Arslan, C. Moormann, and O. Reul. 1998. "Piled Raft Foundation - Interaction between Piles and Raft." Darmstadt Geotechnics.
- Kausel, Eduardo, and John L Tassoulas. 1981. "Transmitting Boundaries: A Closed-Form Comparison." *Bulletin of the Seismological Society of America* 71(1): 143–59.
- KISHIDA, Hideaki. 1967. "ULTIMATE BEARING CAPACITY OF PILES DRIVEN INTO LOOSE SAND." *SOILS AND FOUNDATIONS* 7(3): 20–29.
- Long, Phung Duc. 1993. "No Title." Swedish Geotechnical Institute (0348–0755): 202. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Aswedgeo%3Adiva-207>.
- Lorenzo, Raydel, Renato P da Cunha, Elizabeth H Zubeldia, and Willian Cobelo. 2013. "Aplicación de La Teoría de Seguridad Al Diseño Geotécnico de Losas Sobre Pilotes." *Revista ingeniería de construcción* 28(3): 251–65.
- Luca, de Sanctis, and Mandolini Alessandro. 2006. "Bearing Capacity of Piled Rafts on Soft Clay Soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(12): 1600–1610. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:12\(1600\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:12(1600)).
- Oh, Erwin et al. 2009. "Numerical Analysis of Piled Raft Foundation in Sandy and Clayey Soils."
- Oscar David Pulido Rincón. 2019. "Evaluación Del Comportamiento Del Sistema de Fundación Placa-Pilotes En Suelos Blandos Con Consolidación a Partir de Métodos Analíticos." Universidad Nacional de Colombia.
- Poulos, H G, and E H Davis. 1980. *PILE FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN*. Wiley (John) & Sons, Limited.
- Roy, S, and R B Sahu. 2011. "PILED-RAFT FOUNDATION ON CONSOLIDATING SOFT SOIL."
- Villalaz, Carlos creso. 2004. *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. MEXICO: Limusa.