

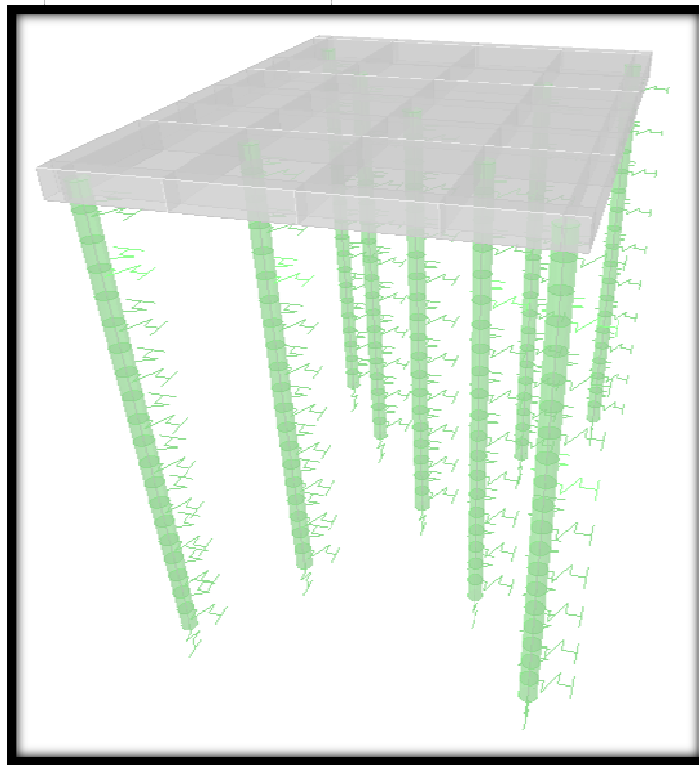
2010

*EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO
ESTRUCTURAL DE LA CIMENTACION
TIPO PLACA - PILOTES*

AUTORES

DIEGO A JIMENEZ R

JOAN M MERCADO C



UNIVERSIDAD

INDUSTRIAL

DE SANTANDER

FACULTAD

DE INGENIERIAS

FISICOMECANICAS

ESCUELA DE

INGENIERIA CIVIL

2010

EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA
CIMENTACION TIPO PLACA - PILOTES

DIEGO ANDRES JIMENEZ ROA
JOAN MANUEL MERCADO CAFIEL

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil

Director
RICARDO CRUZ
Ingeniero Civil Phd

Codirector
WILFREDO DEL TORO
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

2010

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Este trabajo es para Dios quien no me desampara ni un solo segundo, a mi madre MIRYAM ROA DE JIMENEZ quien con su amor apoyo ternura y picardía llena mis días de una alegría y amor incomparables, mami todo lo que soy te lo debo a ti, a mi padre ABEL JIMENEZ JIMENEZ quien con su rectitud, honradez , sabiduría y amor indescriptible ha guiado los pasos que hoy me tienen cruzando la meta que hace años me había trazado, papi gracias por hacer de mi un hombre igual a ti, estoy muy orgulloso de ser tu hijo , mi hermano ABEL MAURICIO JIMENEZ ROA , al cual llevo presente en todos mis triunfos ya que él seguirá mi camino como profesional , hermanito usted sabe que mi gran anhelo es verlo feliz y por eso siempre voy a luchar, muy especialmente a la mujer que ha robado mi corazón desde el primer día LEIDY VIVIANA REYES SOLANO , preciosa millones de gracias por apoyarme en todos los sentidos , mi amiga , mi compañera , mi confidente , mi amada mi todo , ya eres mi familia y todos mis triunfos te pertenecen . A toda la familia JIMENEZ , a toda la familia ROA especialmente mi tia MARIA ROA quien fue mi mama en BUCARAMANGA, a mis compañeros y amigos.

Diego Andrés Jiménez Roa

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Agradezco primeramente a Dios por ser mi mejor amigo, mi fortaleza, darme todo lo que tengo y no dejarme caer nunca.

El es el amigo que está en silencio con nosotros, en un momento de angustia o incertidumbre, que puede compartir nuestro pesar y desconsuelo. . . Y enfrentar con nosotros la realidad de nuestra impotencia, ése es el amigo que realmente nos quiere.

Y así son muchas las personas que debería nombrar en estas líneas, pero me quedaré con las más trascendentales... con aquellas que no han bajado la guardia y siempre me han apoyado, tanto a lo largo del desarrollo de esta Tesis como a lo largo de mi vida.

Primero, debo dar gracias a mi madre. A aquella incansable mujer que desde que era pequeño me ha guiado y acompañado en los momentos en que más le he necesitado. Por su apoyo, por su incondicionalidad de madre y principalmente por su amor que no espera nada a cambio. Mamá, todo mi trabajo va dedicado a ti.

Mi padre, a su manera, siempre ha jugado un rol importante en mi vida. Gracias a ti también papá, por ser el proveedor durante los años en que he vivido bajo tu techo; gracias por los consejos que siempre me diste y por preocuparte del desarrollo de esta Tesis.

Mis hermanos y no puedo sino darle las gracias por el tiempo, por entender las veces en que no pude estar con ellos, pero sobre todo por el inmenso amor que siento de su parte. Katherine y Jair, o Jair y Katherine para que ninguno se sienta primero, todos los días le doy gracias a Dios por haberlos traído a mi vida. Gracias infinitas por siempre estar presentes. Gracias por ser mi apoyo, mí puesta a tierra.

No puedo dejar de nombrar a la mujer que llegó a alegrarme la vida y que ha sido mi pilar en esta última etapa. Gracias Carolina Umaña por ser mi

compañera, mi amiga, mi confidente....Y sobre todo futura madre de mi primer bebe. Gracias por aguantar las noches de desvelo y trabajo, en donde siempre me acompañaste y peleaste codo a codo conmigo. Gracias por el apoyo constante y los consejos que siempre tuviste en los momentos difíciles. Gracias mi querida Carolina por estar conmigo... Tú abriste nuevamente mi alma y dejaste salir lo mejor de mí.

A mis abuelitas Cristina y Bernarda (q.p.d), la cual sé, que desde el cielo me ves y estas orgullosa de mí.

Así mismo a mi madrina Consuelo Mercado de quien siempre he recibido su confianza, apoyo, experiencia y compañía, gracias por tus oraciones.

A mis suegros: Nubia Villamizar y Guillermo Umaña, porque gracias a ellos sé lo que es la amistad verdadera, valor importante en mi vida, gracias por estar conmigo estos últimos meses de mi carrera, por aconsejarme, regañarme, compartir risas y llantos en todo este tiempo y sobre todo por acogerme en su familia como un hijo mas, y es así como me siento un hijo mas (Joan Manuel Mercado Cafiel Umaña Villamizar).

Doy gracias también a mi amigo incondicional, Leonardo Salas. Mi hermano postizo que siempre ha estado a mi lado, siendo mi cable a tierra, mi confidente y el mejor amigo que alguien jamás podría tener. Gracias por estar siempre... por no rendirte de esta amistad, por no dar el brazo a torcer y ser un tipo muy sólido.

Es inmedible el aprecio que siento por mi profesor director de proyecto, Ricardo cruz. Él siempre ha confiado en mis ideas, en mi trabajo y por sobre todo ha puesto en mí la mentalidad de que se puede ser cada vez mejor en lo que uno hace. Gracias por el ejemplo, la confianza y el apoyo que me ha brindado desde el primer día en que comenzamos a trabajar juntos en este proyecto.

A otro baluarte en esta etapa que igualmente aprecio mucho, también director de este proyecto, quien ha sido una pieza clave, compartiendo su experiencia y

sabiduría para así tener buenas herramientas, necesarias para que esta investigación lograra su objetivo.

Joan Manuel Mercado Cafiel

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	3
1.1 ITERACIÓN ENTRE SUELO Y SISTEMA DE CIMENTACIÓN	3
1.1.1 Análisis de interacción suelo-estructura para mejoramiento de suelos.	3
1.1.2 Modelos de interacción suelo-estructura.	5
1.2 TEORÍAS DEL MODELAMIENTO DE SUELOS	7
1.2.1 Coeficiente de Balasto. Método del balasto, de Winkler o de viga sobre apoyos elásticos:	7
1.3 CIMENTACIÓN SUPERFICIAL, PROFUNDA Y MIXTA	16
1.3.1 Cimentaciones Superficiales.	19
1.3.2 Cimentaciones Profundas.	22
1.3.3 Cimentaciones mixtas o Fundaciones de Cimentación Tipo Losa Pilote (CTLP).	25
1.4 GEOTECNIA	31
1.4.1 Relaciones peso – volumen.	32
1.4.2 Calculo de asentamientos por consolidación.	37
1.4.3 Prueba de compresión simple.	39
1.5 SOFTWARE MODELOS	40
2. ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN	45
2.1 DEFINICIÓN DE MODELOS (CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS)	45
2.1.1 Aspectos Geométricos Generales.	45

2.1.2 Geometría de los sistemas de cimentación.	50
2.2 MATERIALES	55
2.3 ANÁLISIS MODAL	56
2.4 CONTROL DE DERIVAS	56
2.5 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL TERRENO	56
2.6 HIPÓTESIS DE CARGA	60
2.6.1 Cargas Muertas.	61
2.6.2 Cargas Vivas.	61
2.6.3 Cargas de Sismo.	62
3. MODELAMIENTO ESTRUCTURAL	69
3.1 MODELAMIENTO PARA LOSA	69
3.2 MODELAMIENTO PARA PILOTES	81
3.3 MODELAMIENTO PARA LOSA - PILOTE	95
4. ANÁLISIS DE RESULTADO	108
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
BIBLIOGRAFÍA	128

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1: Valores de K30 propuestos por Terzaghi	14
Tabla 1.2: Valores de K30 propuestos por diferentes autores	14
Tabla 1.3: Factores de reducción ξ_i para rigideces de pilotes de una CTLP, en comparación con el caso de un pilote individual (calculadas para $s = 0,03 D$ según Katzenbach et al.)	30
Tabla 1.4 Tamaño del grano	32
Tabla 1.5 Índice de poros (e) para los tipos de suelo	35
Tabla 1.6 Humedad en los diferentes tipos de suelo	36
Tabla 1.7 Peso específico en los diferentes tipos de suelo	37
Tabla 2.1 Perfil 2.1	57
Tabla 2.2 Perfil 2.2	57
Tabla 2.3 Perfil 2.3	57
Tabla 2.4 Perfil 2.4	58
Tabla 2.5 Perfil 2.5	58
Tabla 2.6 Perfil 2.6	58
Tabla 2.7 Perfil 2.7	59
Tabla 2.8 Perfil 2.8	59
Tabla 2.9 Perfil 2.9	59
Tabla 2.10 Perfil 2.10	60
Tabla 2.11. Fuerza Interna Resultante del Análisis Estructural del Edificio por carga Muerta	63
Tabla 2.12. Fuerza Interna Resultante del Análisis Estructural del Edificio por carga Viva	64

Tabla 2.13. Fuerza Interna Resultante del Análisis Estructural del Edificio por carga Sismo en X	65
Tabla 2.14. Fuerza Interna Resultante del Análisis Estructural del Edificio por carga Sismo en Y	66
Tabla 2.15. Tabla de análisis modal	67
Tabla 2.16. Tablas control de derivas	68
Tabla 3.1. Tabla de rigidez para Losa	74
Tabla 3.2. Rigidez de resortes P 2.2	100
Tabla 4.1. Desplazamiento vertical	108
Tabla 4.2. Porcentaje de reducción en desplazamiento vertical (losa, pilote y losa-pilote)	111
Tabla 4.3. Porcentaje de reducción en desplazamiento vertical (pilote vs losa-pilote)	112
Tabla 4.4. Comparacion de rigidez entre sistemas de cimentacion	115
Tabla 4.5. Fuerza vs desplazamiento para tipos de cimentacion en estrato de arena y arcilla	122
Tabla 4.6. Fuerza vs desplazamiento para tipos de cimentacion en arena	123
Tabla 4.7. Fuerza vs desplazamiento para tipos de cimentacion en arcilla	124

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1 Análisis de estructura y cimentación	5
Figura. 1.2 Modelo péndulo invertido sin peso [2]	6
Figura.1.3 Modelo base de fundación de una estructura [2]	7
Figura 1.4. Modelo de resortes elásticos	8
Figura 1.5. Ley de flectores para viga [4]	9
Figura. 1.6 Modelo de viga flotante [5]	10
Figura 1.7 Modelo de comportamiento frente a las cargas [6]	11
Figura 1.8. Ensayo de placa de carga [7]	12
Figura 1.9. Tabla para calculo de modulo de balasto interactiva a partir de K_{30} [7]	13
Figura 1.10 Relación entre la composición del suelo y la tensión admisible del terreno [11]	16
Figura 1.11. Diferentes tipos de cimentaciones superficiales	18
Figura 1.12. Zapatas rígidas y flexibles	18
Figura 1.13. Pilotes prefabricados e in situ	19
Figura 1.14. Tipos de Cimentaciones	20
Figura 1.15. Placa de cimentación. [14]	22
Figura. 1.16 Cimentación losa-pilote [16]	26
Figura.1.17 Ejemplo de los asentamientos para tipos de cimentaciones. [16]	26
Figura 1.18 Representación de muestra de suelo en un recipiente sellado	33
Figura 1.19 relación de volumen total y de peso total	34
Figura 1.20. Calculo de asentamiento Unidimensional [21]	37

Figura 1.21. Prueba de compresión simple [22]	39
Figura 2.1 planta de entre piso típico	47
Figura 2.2 a) corte del pórtico en dirección Y	48
Figura 2.2 b) corte del pórtico en dirección X	49
Figura 2.3 Detalles de la placa típica de entrepiso	50
Figura 2.4 Dimensiones de la losa	51
Figura 2.5. Vista 3d de la superestructura con la cimentación superficial	51
Figura 2.6. Encepado mas pilote, para columnas B-2 y C-2 (mas cargadas)	52
Figura 2.7. Encepado mas pilote para columnas B-1, C-1, B-3, C-3, A-2, D-2, A-1, D-1, A-3 y D-3	53
Figura 2.8. Distribución de los encepados+ pilotes para el edificio.	53
Figura 2.9. Vista de la superestructura con la cimentacion profunda	54
Figura 2.10 Distribucion de los pilotes sobre la placa para cimentacion combinada	54
Figura 2.11 Vista de la superestructura para la cimentación combinada	55
Figura 3.1 Definición de sección de placa	69
Figura 3.2 introducciones de las características del elemento	70
Figura 3.3. Dibujo del área del elemento losac	70
Figura 3.4. Elemento losac	71
Figura 3.5. Exportación del modelo a SAFE	71
Figura 3.6. Exportación elemento LOSAC	72
Figura 3.7. Apertura programa SAFE versión 8.0	72
Figura 3.8. Importación del archivo	73
Figura 3.9. Elemento LOSAC exportado a SAFE	73
Figura 3.10. Modelo empleado	74

Figura 3.11. Definición suelo soporte	75
Figura 3.12. Introducción modulo de balasto de cada perfil	75
Figura 3.13. Venta para asignar el suelo soporte	76
Figura 3.14. Puntos donde se asignaran cargas	76
Figura 3.15. Cargas del modelo	77
Figura 3.16. Corrida del modelo	77
Figura 3.17. Análisis completado	78
Figura 3.18. Menú para tabla de resultados	78
Figura 3.19. Tabla de resultados	79
Figura 3.20. Deformacion elastica	79
Figura 3.21. Cortante maximo	80
Figura 3.22. Momento maximo	80
Figura 3.23. Apertura programa Ansys CivilFEM	81
Figura 3.24. Herramienta para guardar los datos del programa	81
Figura 3.25. Correr el programa	82
Figura 3.26. Código y unidades del modelamiento	83
Figura 3.27. Selección del tipo de elemento	83
Figura 3.28. Tipos de elemento	84
Figura 3.29. Materiales de Elementos estructurales	84
Figura 3.30. Ventana para la Definición de cada material	85
Figura 3.31. Activación del modulo de geotecnia	85
Figura 3.32. Definición del terreno	86
Figura 3.33. Definición de cada tipo de terreno	87
Figura 3.34. Tipo de encepado	89
Figura 3.35. Forma de los encepados poligonales	90

Figura 3.36. Forma de los encepados rectangulares	90
Figura 3.37. Cargas	91
Figura 3.38. Armadura	91
Figura 3.39. Diseño de terreno	92
Figura 3.40. Configuración del terreno	92
Figura 3.41. Solución	93
Figura 3.42. Parámetros de los pilotes	94
Figura 3.43. Lista de resultados	94
Figura 3.44. Modelo representativo Losa - pilotes	95
Figura 3.45. Apertura del programa	96
Figura 3.46. Ventana grillas de referencia	96
Figura 3.47. Ventana para editar las grillas	97
Figura 3.48. Comando Define	97
Figura 3.49. Definición elemento PILOTE	98
Figura 3.50. Definición elemento LOSA	98
Figura 3.51. Dibujo de área elemento LOSA	99
Figura 3.52. Geometría del modelo	100
Figura 3.53. División de elementos PILOTE	101
Figura 3.54. Asignación de resortes a los Pilotes	101
Figura 3.55. Asignación de resortes a la Losa	102
Figura 3.56. Modelo representativo LOSA – PILOTES	102
Figura 3.57. Definición de cargas	103
Figura 3.58. Asignación de cargas	103
Figura 3.59. Ventana Para datos de carga	104
Figura 3.60. Cargas	104

Figura 3.61. Corrida del programa	105
Figura 3.62. Ventana de cálculo del programa	105
Figura 3.63. Tabla de resultados	106
Figura 3.64. Ventana para tablas de resultados	106
Figura 3.65. Tabla de resultados	107
Figura 4.1, Desplazamiento vertical	110
Figura 4.2. Diagrama fuerza vs desplazamiento para cada perfil de suelo cimentación con pilotes (carga muerta)	113
Figura 4.3. Diagrama fuerza vs desplazamiento para cada perfil de suelo cimentación con pilotes (carga viva)	113
Figura 4.4. Diagrama fuerza vs desplazamiento para cada perfil de suelo cimentación con losa-pilotes (carga muerta)	114
Figura 4.5. Diagrama fuerza vs desplazamiento para cada perfil de suelo cimentación con losa-pilotes (carga viva)	114
Figura 4.7. Diagramas de fuerza axial para cada perfil (carga muerta)	116
Figura 4.8. Diagramas de fuerza axial para cada perfil (carga viva)	117
Figura 4.9. Diagramas de cortante para cada perfil (sismo en X)	118
Figura 4.10. Diagramas de cortante para cada perfil (sismo en Y)	119
Figura 4.11. Diagramas de momento para cada perfil (sismo en X)	120
Figura 4.12. Diagramas de momento para cada perfil (sismo en Y)	121
Figura 4.13. Diagrama de fuerza vs desplazamiento en los sistemas de cimentación para el perfil 2.1	122
Figura 4.14. Diagrama de fuerza vs desplazamiento en los sistemas de cimentación para P2.2	123
Figura 4.15. Diagrama de fuerza vs desplazamiento en los sistemas de cimentación para P2.3	124

RESUMEN

TITULO: EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA CIMENTACION TIPO PLACA - PILOTES*

**Autores: DIEGO ANDRES JIMENEZ ROA
JOAN MANUEL MERCADO CAFIEL****

DESCRIPCIÓN

Este proyecto evaluara el comportamiento estructural de una cimentación tipo placa-pilotes; para esto se definirá un modelo representativo de el tipo de cimentación para un caso específico de solicitación de carga estática y dinámica, el modelo se estudiara por medio del programa de elementos finitos Ansys que nos da de manera precisa los estados de deformación de la cimentación; con los resultados obtenidos se observara el comportamiento geotécnico de la zona en la cual está fundada la estructura para identificar que problemas puede tener a largo y mediano plazo esta cimentación. Y por último se hará una comparación entre el sistema de cimentación tipo placa – pilote, una cimentación de solo pilotes y una de solo placa, para las mismas condiciones estructurales y geotécnicas .

Se discuten los criterios usualmente empleados para estimar la cantidad apropiada de pilotes que complementen el trabajo de la placa. Se describen los criterios y la metodología empleados en el estudio de la interacción placa–pilote – suelo para encontrar racionalmente, por aproximaciones sucesivas, la capacidad utilizada de los pilotes, la repartición de la carga del edificio entre la placa y los pilotes, el factor de seguridad de la cimentación, y los asentamientos resultantes que, a su vez, expliquen y sean compatibles con las transferencias de carga encontradas, tanto para pilotes como para placa y para placa-pilote.

Finalmente, se presenta el modelamiento y evaluación simplificada de las cargas que tendrá la mejor opción de las cimentaciones estudiadas y así valorar las reacciones, momentos y desplazamientos, en la cimentación, para su diseño estructural.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánica. Escuela de Ingeniería Civil, Directores:
Ingeniero civil. Phd Ricardo Cruz e Ingeniero civil Wilfredo del Toro

SUMMARY

TITLE: EVALUATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF FOUNDATIONS TYPE PLATE - PILES*

**AUTHORS: DIEGO ANDRES JIMENEZ ROA
JOAN MANUEL MERCADO CAFIEL****

DESCRIPTION

This project to assess the structural behavior of a foundation type placa-pilotes; for this will define a representative of the Foundation for a case type model specific static and dynamic load order model study by means of the ANSYS finite element program that gives us accurately States of deformation of the Foundation; geotechnical behavior of the zone in which is be observed with results founded the structure to identify problems can have long and medium term this Foundation. And finally make a comparison between the Foundation type plate - pile, a foundation of just piles and one only Board, to the same structural and geotechnical conditions.

Discusses the criteria usually used to estimate the proper amount of piles that complement the work of the Board. Describes the criteria and methodology employed in the study of the interaction plate-pile-soil to rationally, by successive approximations, the capacity used the pile, the distribution of the burden of the building between the Board and the stilts, find the safety factor of the Foundation, and the resulting settlements which, in turn, explain and compatible with found to piles for Board and to plate - pile load transfers.

Finally, it is the modeling and simplified assessment of workloads to be the best option studied foundations and thus assess reactions, moments and displacements, the Foundation for its structural design.

* Degree work

** Faculty of engineering physical mechanics. School of civil engineering, directors:
Civil engineer. PhD Ricardo Cruz and civil engineer Wifredo Del Toro

INTRODUCCIÓN

Para modelar el conjunto suelo - estructura de cimentación se necesita conocer las cargas transmitidas de la superestructura al suelo; es por esto que en este proyecto se realizará el análisis de la superestructura y posteriormente el modelamiento de la cimentación.

Se describen las características del edificio y las del suelo.

Se presentan los criterios empleados en el planteamiento de las diferentes alternativas estudiadas de sistemas de cimentación y se comentan las ventajas y desventajas relativas de todas las soluciones analizadas

Se presentan en forma simplificada los esquemas de cargas y reacciones tenidas en cuenta para el cálculo estructural de la solución adoptada de cimentación.

Finalmente, se presentan conclusiones generales y particulares sobre los comportamientos de la interacción suelo cimentación; se formulan recomendaciones para avanzar en el entendimiento del funcionamiento de soluciones de cimentación placa – pilotes y en la optimización de su aplicación.

Los objetivos de este proyecto son:

Objetivo General:

Evaluar el comportamiento estructural de la cimentación tipo placa – pilotes mediante el uso de programas de elementos finitos.

Objetivos Específicos:

- Definir el modelo representativo del sistema estructural placa – pilotes
- Evaluar el comportamiento geotécnico en la zona de fundación al estar en contacto con la estructura.

- Comparar el comportamiento de la cimentación tipo placa – pilote con el de una cimentación de solo pilotes y una cimentación de solo placa

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 ITERACIÓN ENTRE SUELO Y SISTEMA DE CIMENTACIÓN

La presencia de una edificación sobre un terreno permite que exista una relación mutua de influencia entre los comportamientos de la estructura (cimentación) y el suelo.

A la interacción suelo – estructura se le denomina flexibilidad de la base de fundación, debido a que el suelo modifica las condiciones de apoyo consideradas fijas inicialmente y el sistema de amortiguamiento de la edificación, a demás el suelo en ningún caso produce empotramiento perfecto ni grado de libertad total en la cimentación.

La interacción suelo – estructura influye en la determinación de los modos de vibración libre así como la redistribución de los esfuerzos en el sistema de cimentación y la edificación.

Es de vital interés para una buena interpretación de la respuesta de la subestructura un análisis detallado de la interacción entre la cimentación y el suelo ya que por medio de este se pueden resolver los problemas de estabilidad y asentamiento de la superestructura, así como el diseño de una cimentación optima para resistir las solicitaciones existentes a través del tiempo.

1.1.1 Análisis de interacción suelo-estructura para mejoramiento de suelos. La interacción dinámica suelo – estructura el cual es un fenómeno modificado de la respuesta natural de un sistema estructural debido que el suelo de algún modo altera no sólo las situaciones de apoyo que se suponen inicialmente fijas, sino también el amortiguamiento total de la construcción.

Este problema primordialmente consiste en determinar cómo se ven afectadas las propiedades dinámicas del sistema analizado, teniendo en cuenta que el suelo no produce ni empotramiento perfecto ni libertad total en la cimentación, la interacción suelo – estructura es un concepto que busca mostrar que la

presencia de una estructura sobre el suelo hace que exista una influencia bilateral en el comportamiento del suelo y la estructura.

Dependiendo de las características de la estructura y del movimiento del terreno bajo consideración, la interacción suelo – estructura puede aumentar o disminuir o no tener ningún efecto sobre la magnitud de las fuerzas máximas inducidas en la estructura misma.

En algunos casos el efecto de la interacción del suelo con la estructura, respecto a la respuesta dinámica, puede ser despreciable. Tal situación, es por ejemplo, la de una estructura alta y flexible con poca masa, donde la influencia de los modos superiores, (que son por lo general afectados significativamente por la interacción suelo – estructura) en la respuesta sísmica es muy pequeña. En este problema, es aceptable excitar la base de la edificación con el movimiento sísmico del diseño. Para poder calcular estos casos y aquellos donde es imposible estimar la importancia de la interacción, antes de hacer un análisis, se requiere un modelo (discreto) simple, que puede ser aproximado del suelo. El uso de dichos modelos produce pérdidas de precisión, pero facilitan la comprensión y entendimiento del problema.

Por otra parte el terreno, al recibir cargas que son transmitidas por la cimentación, tiende a deformarse en una o varias de sus capas, esto depende de sus propiedades, las cuales pueden variar con el tiempo, debido a los siguientes factores: la variación de volúmenes de vacíos debido a la compactación del terreno, el desplazamiento y deformación de las partículas al acumularse, pues producen asentamientos en la superficie de contacto entre la cimentación y el terreno.

Los cimientos juegan un papel importante dentro de la edificación ya que estos transmiten las cargas producidas por la estructura al suelo; de tal manera que el suelo tenga la capacidad suficiente para soportarlas sin sufrir deformaciones excesivas.

Los materiales existentes en los suelos naturales se clasifican en:

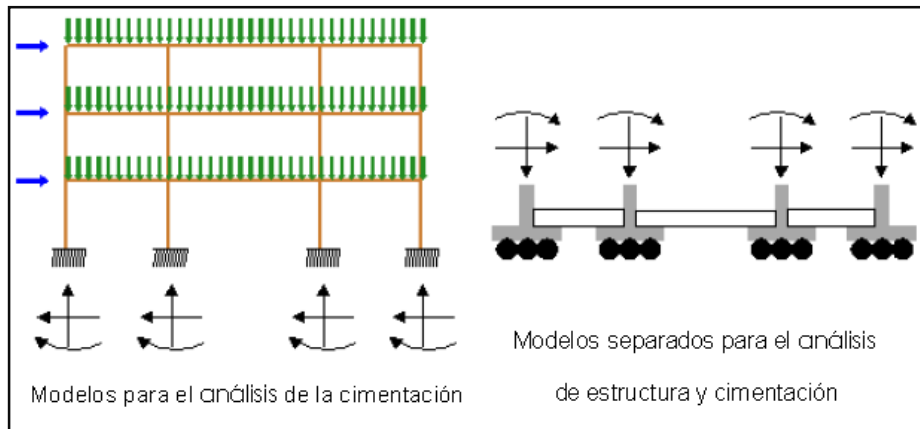
- ❖ Arenas y gravas
- ❖ Limos
- ❖ Arcillas

❖ Materia orgánica

Para este proyecto se estudiara el comportamiento de suelos compuestos principalmente por arcilla y arena ,ya que la mayoría de las edificaciones de nuestra región se encuentran cimentadas sobre estratos donde predominan estos materiales.

Para el análisis del conjunto cimentación - suelo se harán dos modelamientos, el primero será analizar la superestructura para obtener las fuerzas que se transmiten a dicho sistema (cimentación – suelo), y el segundo modelamiento hace referencia al comportamiento de la subestructura sometida a las cargas impuestas por la superestructura [1], como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 1.1 Análisis de estructura y cimentación



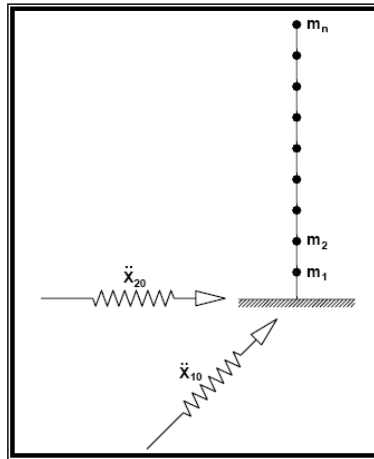
1.1.2 Modelos de interacción suelo-estructura. Es imposible resolver los diversos problemas de la ingeniería sísmica sin tomar apoyo en los modelos físicos aproximados de las estructuras, en los cuales se plantea la elección del tipo de modelo de interacción y el modelo estructural.

El uso tradicional del péndulo invertido sin peso, con masas puntuales a nivel de entrepisos y empotrado en la base (suelo), es un modelo aproximado del

comportamiento entre la cimentación de una estructura y el suelo (Fig. 1.2).

Pero este modelo no es de gran precisión debido a que no se tienen en cuenta los efectos dinámicos del trabajo real de la estructura.

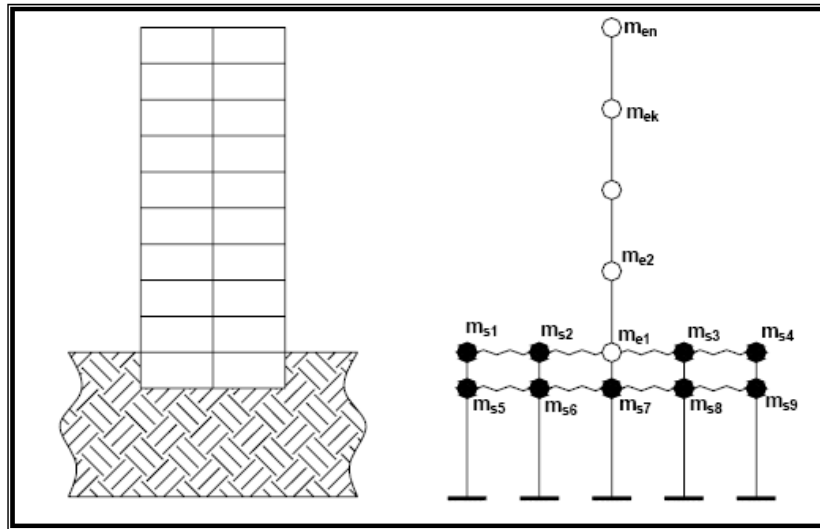
Figura. 1.2 Modelo péndulo invertido sin peso [2]



Otro método muy utilizado es el de Elementos Finitos, en donde la edificación se modela como una placa deformable, dividida en elementos, en los cuales se concentran las masas puntuales (problema lineal geométrico). La base de fundación se modela en forma análoga a una platea y ambas estructuras se unen elásticamente (Figura.1.3), siendo sometidas a las solicitaciones de carga.

Los desplazamientos del sistema se determinan en base a los desplazamientos dinámicos del suelo mientras que las vibraciones de la placa, con la que se modeló la superestructura tiene la forma de planos paralelos en el plano vertical.

Figura.1.3 Modelo base de fundación de una estructura [2]



1.2 TEORÍAS DEL MODELAMIENTO DE SUELOS

Los principales modelos de suelos se dividen en tres grupos; modelos basados en la teoría ELASTOPLASTICA, modelos apoyados en el COEFICIENTE DE BALASTO y los modelos MIXTOS. [3]. Siendo el coeficiente de balasto el modelo más práctico para la teoría que manejan los programas a seguir en este proyecto, donde sus teoría están basadas en elementos finitos por medio de resortes.

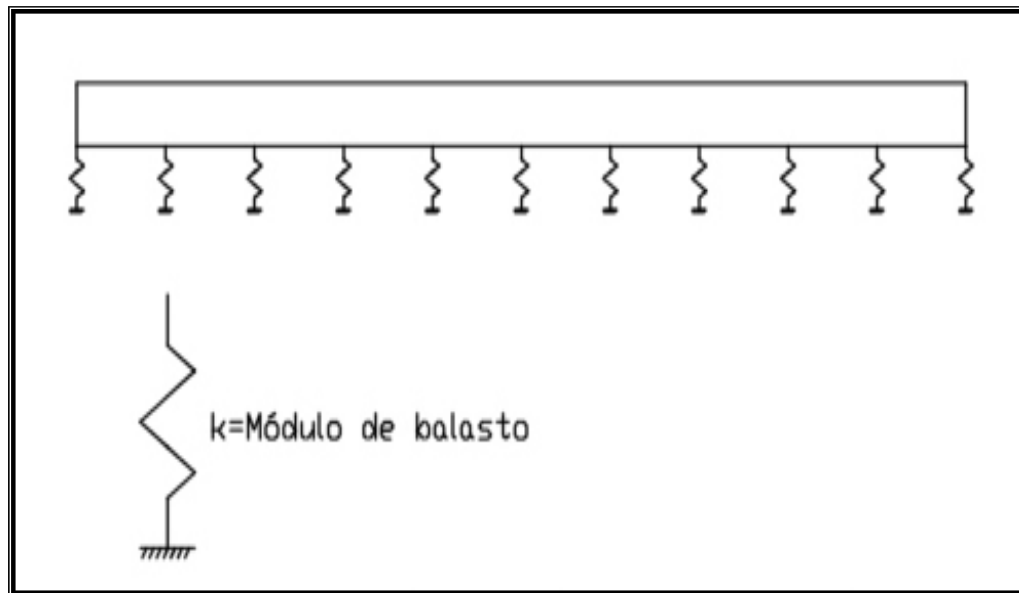
1.2.1 Coeficiente de Balasto. Método del balasto, de Winkler o de viga sobre apoyos elásticos:

El método supone el suelo equivalente a un número infinito de resortes elásticos, muelles o bielas biarticuladas figura 1.4, cuya rigidez, denominada *módulo o coeficiente de balasto* (K_s), corresponde al cociente entre la presión de contacto (q) y el desplazamiento, en los casos de cimentaciones y asentamiento (δ):

$$k_s = \frac{q}{\delta}$$

(1.1)

Figura 1.4. Modelo de resortes elásticos

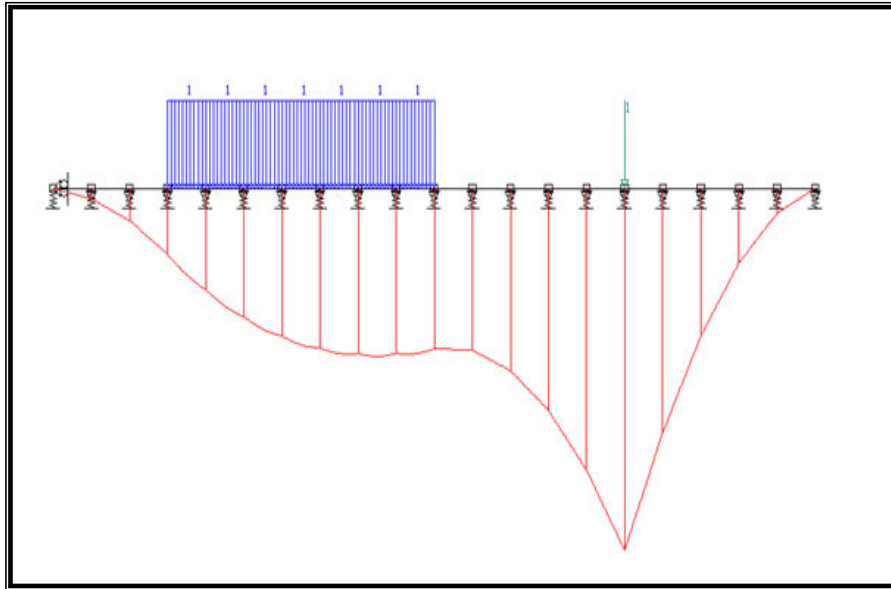


A este modelo de interacción se le conoce generalmente como modelo de Winkler debido al nombre de su creador, y tiene múltiples aplicaciones, no sólo en el campo de las cimentaciones, sino en cualquier problema que pudiese adaptarse a esta teoría, véase el ejemplo tomado de J. Hahn [4] en el que mediante la teoría del balasto se calcula la carga P capaz de soportar una espiga de acero anclada en una masa de hormigón.

La aplicación de la teoría del módulo de balasto ha ganado aceptación en los últimos tiempos, dado que permite una fácil asimilación de la interacción suelo-estructura por los métodos matriciales de cálculo. De hecho, con un programa de cálculo matricial genérico se puede realizar una aproximación del método tan precisa a los casos de vigas o losas sobre fundación elástica. Para ello basta simplemente con dividir las barras de la viga o del emparrillado, si se trata del análisis de una losa, en otras más pequeñas e incluir en los nudos bielast (muelles) con la rigidez correspondiente al balasto

(ver, por ejemplo, la figura 1.4 donde se obtuvo mediante esta aproximación una ley de flectores para la viga).

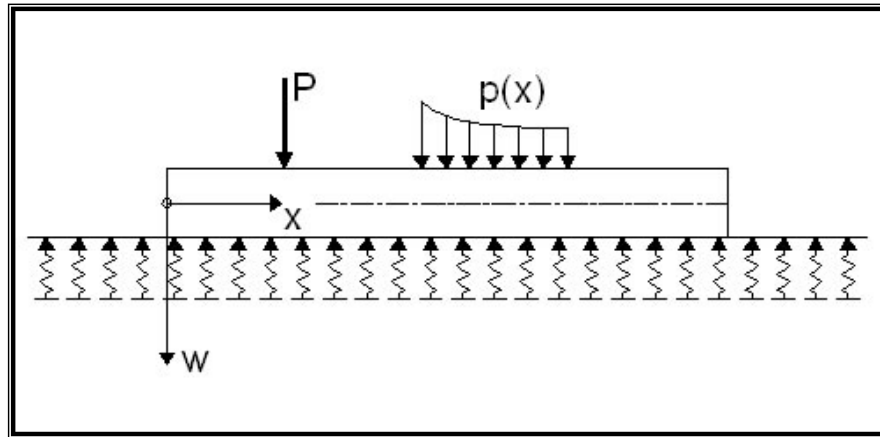
Figura 1.5. Ley de flectores para viga [4]



En la práctica habitual del cálculo de cimentaciones se ve cómo aplicar la teoría de Winkler al cálculo de elementos, tales como vigas flotantes o de cimentación y losas de cimentación que trabajan sobre un corte horizontal de terreno, pero también para elementos tales como pantallas para excavaciones o tablestacas que trabajan sobre un corte vertical. Se habla, por tanto, de *módulo de balasto vertical* y de *módulo de balasto horizontal*, si bien el concepto es el mismo.

La ecuación diferencial que gobierna el comportamiento de la clásica solución de viga flotante (Figura. 1.6) o viga sobre fundación elástica y que, por tanto, es el resultado de suponer la viga discretizada en infinitas barras de longitud diferencial con nudos en sus extremos:

Figura. 1.6 Modelo de viga flotante [5]



$$p - k \cdot w(x) = (E.I) \frac{d^4 w}{dx^4} \quad (1.2)$$

Siendo:

$w(x)$: el asiento de la viga [m].

x : coordenada [m].

k : el módulo de balasto [kN/m^3]

p : la carga por unidad de longitud [kN/m]

E : el módulo de elasticidad de la losa [kN/m^2]

I : la inercia de la viga respecto al eje que pasa por su centro de gravedad [m^4]

En el caso de la losa la ecuación tiene una forma parecida:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} + \frac{(k \cdot w - p) 12(1 - \nu^2)}{(E \cdot t^3)} = 0, \quad (1.3)$$

Siendo:

$w(x, y)$: el asiento de la losa [m]

x, y : las coordenadas [m].

k : el módulo de balasto [kN/m^3]

q : la carga por unidad de área [kN/m^2]

ν : el coeficiente de Poisson [-]

E: el módulo de elasticidad de la losa [kN/m²]

t: el espesor de la losa [m]

Objeciones y mejoras al método:

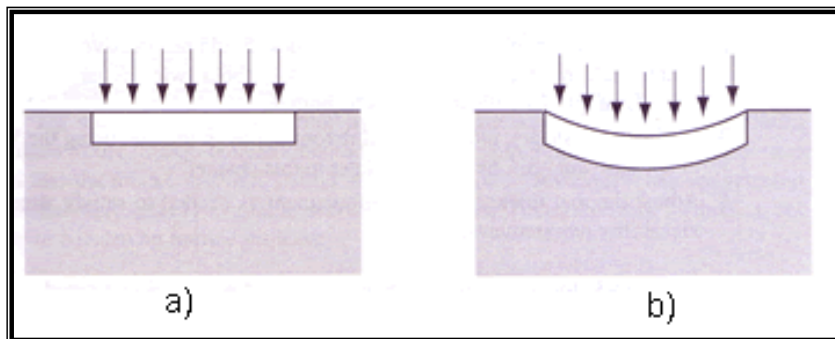
En general, el método de Winkler se puede aplicar al cálculo de cimentaciones rígidas y flexibles, sin embargo existen varias objeciones al modelo:

El valor del módulo de balasto no es función exclusiva del terreno: sino que depende también de las características geométricas de la cimentación e incluso de la estructura que ésta sostiene, lo cual hace compleja la extrapolación de los resultados de los ensayos, pensemos por ejemplo en el de placa de carga, a las cimentaciones reales.

- La precisión del modelo dependerá de la rigidez relativa del conjunto estructura-cimentación respecto a la del suelo [5].

- Supone que cada punto del suelo se comporta independientemente de las cargas existentes en sus alrededores, lo cual no ocurre en la realidad (ver figura 1.7 a) comportamiento según el método de Winkler, figura 1.7 b) una aproximación más cercana a la realidad en terrenos reales, el suelo en los bordes también se deforma).

Figura 1.7 Modelo de comportamiento frente a las cargas [6]



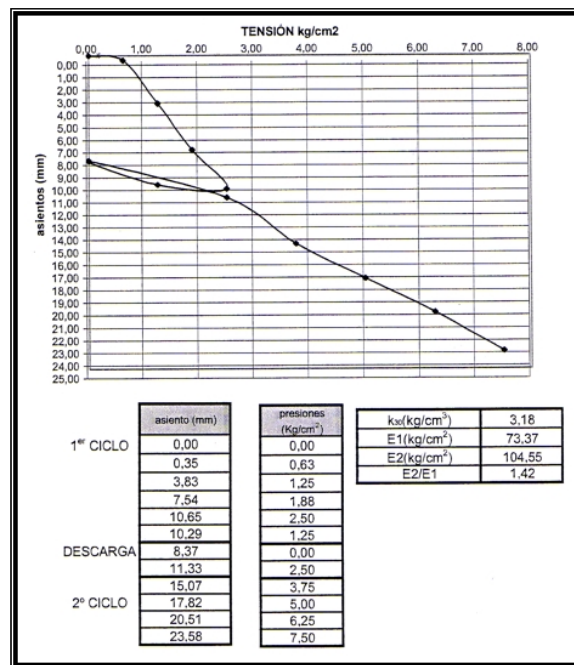
Obtención del módulo de balasto:

El módulo de balasto vertical para una zapata o una losa se puede definir de tres maneras:

A partir de ensayo de Placa de Carga realizado sobre el terreno, siendo habitual que dicha placa sea cuadrada de 30x30 cm (1 pie x 1 pie), o bien circular de diámetros 30, 60 y 76,2 cm. Así el coeficiente que aparece referenciado en el estudio geotécnico viene generalmente representado por una k letra adoptada en la bibliografía para el módulo y el correspondiente subíndice que identifica a la placa con que se realizó el ensayo [5] - k_{30} , k_{60} , etc.

En la figura 1.8 se puede observar un ejemplo de ensayo de placa de carga y el resultado de módulo de balasto k_{30} .

Figura 1.8. Ensayo de placa de carga [7]



A menor tamaño de placa menor bulbo de presiones y con ello menor profundidad de los estratos estudiados. En el caso de losas la profundidad de influencia de la placa es mucho menor que la de la losa real (bulbo de

presiones en función del ancho de la cimentación), lo que puede inducir a errores debido a la reducción de rigidez de estratos inferiores pero activos. En el caso de rocas las pruebas realizadas con una placa grande estarán más afectadas por la fisuración que las hechas con placa pequeña.

En el caso de tener una mezcla de suelos, una solución puede ser el hacer una interpolación a partir de los valores anteriores ($k_{s, \text{cuadrada cohesivo}}$ y $k_{s, \text{cuadrada arenoso}}$) y la proporción existente de dichos suelos. No deja de ser una aproximación algo burda, ya que es difícil conocer con exactitud dicha proporción así como que el reparto sea homogéneo.

Ejemplo: Para un suelo con una composición en una proporción estimada del 70% de arcillas y del 30% de arenas tendríamos:

$$k_{s, \text{cuadrado}} = 0,70 k_{s, \text{cuadrado cohesivo}} + 0,30 k_{s, \text{cuadrado arenoso}}$$

En el caso de trabajar en cm, basta con cambiar el coeficiente 0,30 por 30 para que sean válidas las fórmulas.

Se incluye aquí un formulario Web que realiza los cálculos anteriores:

Figura 1.9. Tabla para calculo de modulo de balasto interactiva a partir de K_{30} [7]

Formulario Web Balasto

MÓDULO DE BALASTO de una losa a partir del coeficiente de balasto de una placa de 30 x30 cm. (Según Terzagui).

- Por favor, utilice como símbolo decimal la coma ",."

Unidades: kp y cm
 Unidades: kN y m

Tipo de terreno: Cohesivo

Lado mayor de la losa (cm):

Lado menor de la losa (cm):

k_{30} de la losa (kp/cm³):

(kp/cm³)

Para este cálculo práctico del modulo de balasto se presenta a continuación los valores estimados del módulo de balasto para placa de Carga de 30x30 (k_{30}) [8], recordamos que lo correcto sería obtener estos datos a partir del terreno en cuestión:

Tabla 1.1: Valores de K30 propuestos por Terzaghi

VALORES DE K30 PROPUESTOS POR TERZAGHI	
Suelo	k_{30} (kp/cm ³)
Arena seca o húmeda:	
-Suelta	0,64-1,92 (1,3)*
-Media	1,92-9,60 (4,0)
-Compacta	9,60-32 (16,0)
Arena sumergida:	
-Suelta	(0,8)
-Media	(2,50)
-Compacta	(10,0)
Arcilla:	
$q_u=1-2$ kp/cm ²	1,6-3,2 (2,5)
$q_u=2-4$ kp/cm ²	3,2-6,4 (5,0)
$q_u>4$ kp/cm ²	>6,4 (10)
*Entre paréntesis los valores medios propuestos	

Tabla 1.2: Valores de K30 propuestos por diferentes autores

VALORES DE K30 PROPUESTOS POR DIVERSOS AUTORES	
Suelo	k_{30} (kp/cm ³)

Arena fina de playa	1,0-1,5
Arena floja, seca o húmeda	1,0-3,0
Arena media, seca o húmeda	3,0-9,0
Arena compacta, seca o húmeda	9,0-20,0
Gravilla arenosa floja	4,0-8,0
Gravilla arenosa compacta	9,0-25,0
Grava arenosa floja	7,0-12,0
Grava arenosa compacta	12,0-30,0
Margas arcillosas	20,0-40,0
Rocas blandas o algo alteradas	30,0-500
Rocas sanas	800-30.000

A partir de la determinación de parámetros característicos del suelo (módulo de deformación, tensión admisible, etc.) que se relacionan con el módulo de balasto mediante fórmulas dadas por varios autores.

- o Es conocida, por ejemplo, la fórmula de Vesic en función del módulo de deformación o elasticidad (E_s) y coeficiente de Poisson (ν_s) el terreno, que en su forma reducida tiene la siguiente expresión:

$$K_s = \left[\frac{E_s}{B(1-\nu_s^2)} \right] \quad (1.4)$$

Donde B es el ancho de la cimentación.

- o La fórmula de Klepikov [9]:

$$K_s = \left[\frac{E_s}{\omega A^{1/2} (1-\nu_s^2)} \right] \quad (1.5)$$

Con (A) el área de la base de la cimentación y (ω) un coeficiente de forma de la cimentación que para zapatas o losas se puede obtener de la tabla en función del largo (L) y del ancho (b) de la cimentación:

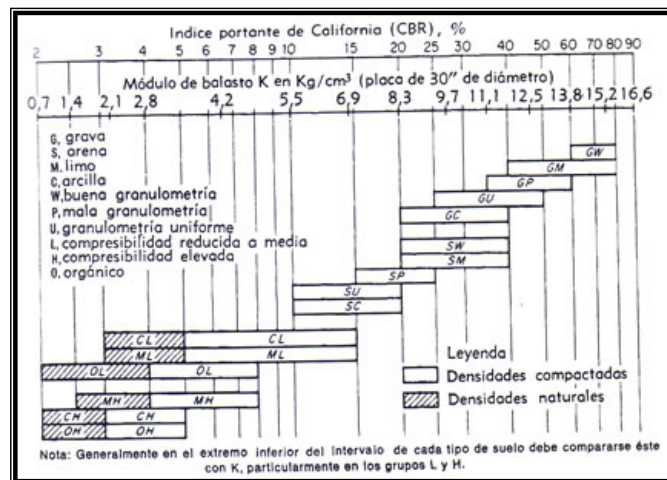
- o También la fórmula de Bowles [10], basada en la tensión admisible de la cimentación:

$$k_s \left(\frac{kN}{m^3} \right) = 40 * (\text{factor.de.seguridad}) * \sigma_a (kPa) \quad (1.6)$$

Donde el factor de seguridad es el empleado para minorar la tensión admisible (2-3).

- o Tablas, como esta [11] que relaciona el módulo de balasto en placa circular de 30" y el índice CBR para diferentes tipos de suelo:

Figura 1.10 Relación entre la composición del suelo y la tensión admisible del terreno [11]



1.3 CIMENTACIÓN SUPERFICIAL, PROFUNDA Y MIXTA

Se denomina cimentación al conjunto de elementos estructurales que tienen la misión de transmitir las cargas de la edificación al suelo. Debido a que la resistencia del suelo generalmente es menor que la de las columnas o muros que soportara; el área de contacto entre el suelo y la cimentación será proporcionalmente más grande que los elementos soportados (excepto en suelos rocosos muy coherentes)

La elección del tipo de cimentación depende especialmente de las características mecánicas del terreno, como su cohesión, su ángulo de rozamiento interno, posición del nivel freático y también de la magnitud de las cargas existentes. A partir de todos esos datos se calcula la capacidad portante, que junto con la homogeneidad del terreno aconsejan usar determinado tipo de cimentación. Siempre que es posible se emplean cimentaciones superficiales, ya que son el tipo de cimentación menos costoso y más simple de ejecutar. Cuando se presentan problemas relacionados con la capacidad portante o los asentamientos no es posible usar cimentación superficial, entonces se toman como alternativas otros tipos de cimentaciones como son las cimentaciones profundas y mixtas.

Clasificación de las cimentaciones [12].

Una primera clasificación divide las cimentaciones en dos grupos:

- Superficiales: cuando el nivel de cimentación es inferior a cuatro veces la dimensión menor del cimientto.
- Profundas: cuando el nivel es superior a diez veces la dimensión menor.

Entre ambos grupos evidentemente hay gran cantidad de casos intermedios.

Los diferentes tipos de cimentaciones superficiales se muestran en la figura 1.11.

En la figura 1.12 se pueden observar la clasificación de las zapatas.

Dentro de las cimentaciones profundas el caso más común es el de pilotes (figura 1.13).

Figura 1.11. Diferentes tipos de cimentaciones superficiales

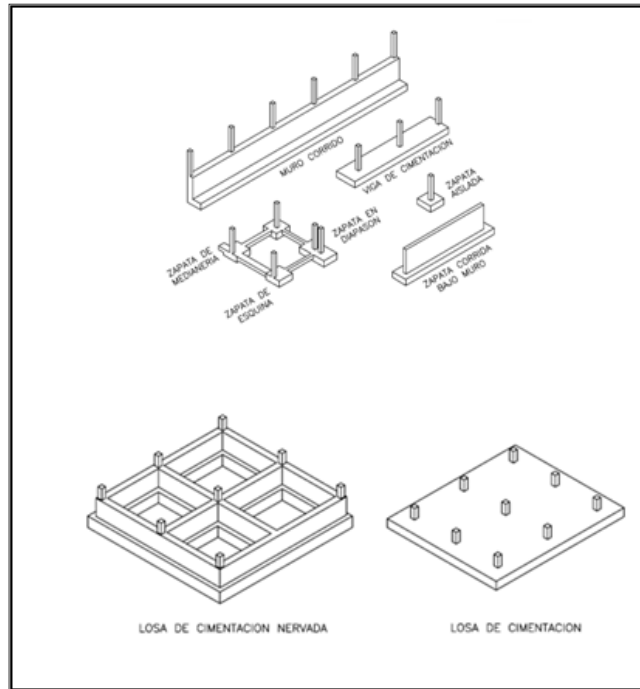


Figura 1.12. Zapatas rígidas y flexibles

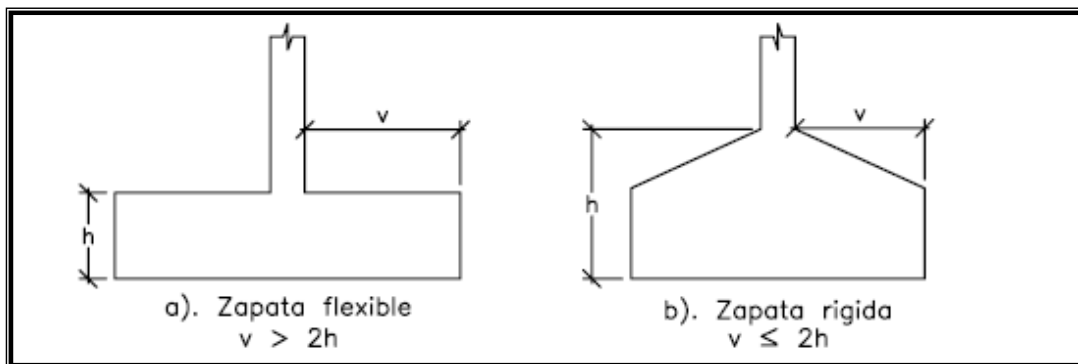
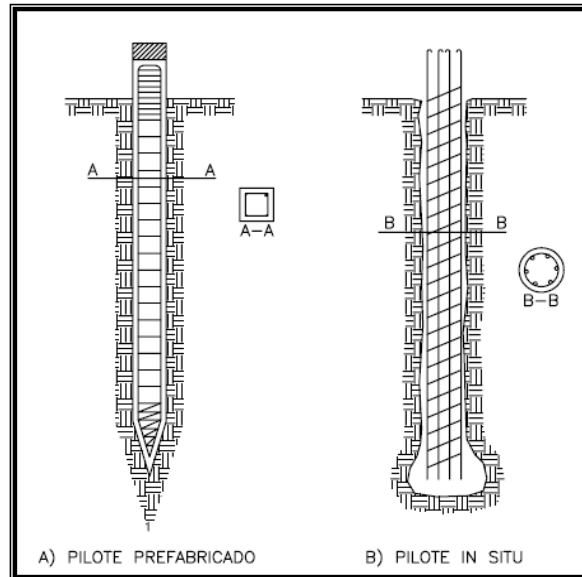


Figura 1.13. Pilotes prefabricados e in situ

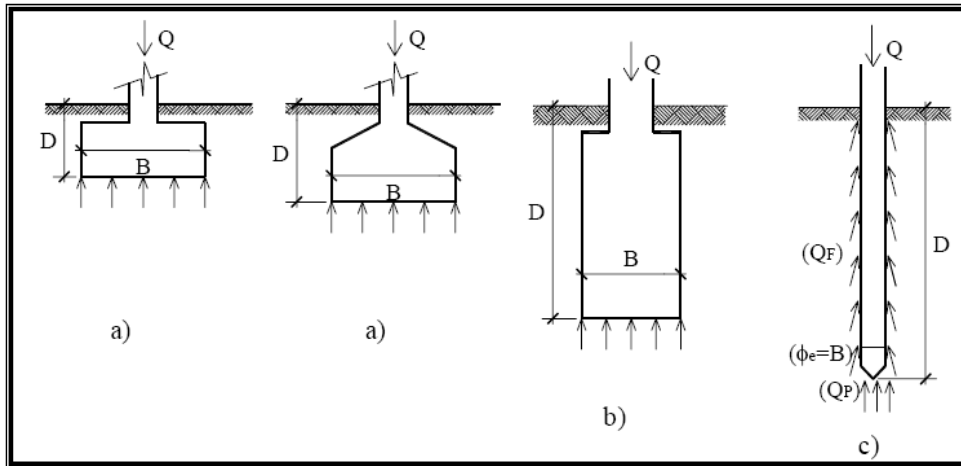


1.3.1 Cimentaciones Superficiales. Una cimentación se clasifica como superficial, cuando se encuentra a una profundidad aproximadamente menor de 3 ó 4 m y mayor a 0.5m, y en su entorno se encuentran estratos suficientemente resistentes como para garantizar una determinada seguridad frente al hundimiento y unos asentamientos tolerables por la estructura.

En función de la relación entre la anchura, B (dimensión menor de su superficie de apoyo), y la profundidad en la que se ubica el cimiento, D, se diferencian:

- *cimentación superficial*, si cumple: $\frac{D}{B} < 4$ (figura 1.14 a);
- *cimentación semiprofunda o pozos*, si cumple: $4 = \frac{D}{B} \leq 8$ (figura 1.14 b);
- *cimentación profunda o pilotaje*, si cumple: $\frac{D}{B} > 8$ (figura 1.14 c).

Figura 1.14. Tipos de Cimentaciones



Aunque las relaciones entre el ancho y la profundidad de la cimentación se toma como un indicador de clasificación, no es suficiente, puesto que está demostrado que las características más importante para determinar el tipo de cimentación, son el comportamiento tenso – deformacional de esta. Así, si se considera la respuesta resistente sólo en relación con la base de cimentación se tratará de tipología superficial, y en la medida en que se vaya involucrando también la respuesta resistente debida al contacto lateral, tenderá a considerarse la tipología de semiprofunda a *profunda*; en ésta, a veces, la respuesta resistente se debe sólo al contacto lateral. [13]

Bases de diseño

Las condiciones que se deben considerar en un proyecto de cimentación pueden resumirse en:

a) Condiciones que impone la estructura

Para cualquier tipología estructural: de muros de carga, de pilares, con o sin sótanos, etc. (en realidad se debería concretar de acuerdo con las condiciones del suelo):

- Seguridad de la estructura de cimentación en relación con la carga transmitida a la superficie de cimentación (comprobada a tensión

normal y cortante), la resistencia propia como elemento estructural y la capacidad de asumir asientos diferenciales; por ejemplo: la estructura metálica se acomoda mejor que la de hormigón armado.

- Influencia de las estructuras próximas. Posibles daños recíprocos, en cuanto a tensiones debidas a sobrecargas, empujes, etc.
- Estabilidad de la cimentación y del terreno involucrado. Se recomienda evitar al máximo el deterioro del material de cimentación, generalmente hormigón armado.
- El factor de seguridad debe ser suficiente para garantizar que la carga de rotura esté alejada de la admisible o de trabajo.

b) Condiciones que impone el suelo

- Profundidad del estrato resistente al que se debe llegar para cimentar. O sea, determinar la cota de cimentación y por tanto el tipo de la misma (superficial, semiprofunda o profunda).
- Capacidad de asentamiento del estrato de apoyo (o de los estratos influenciados).
- Influencia vecinal en cuanto a vibraciones, compactación, hincado de pilotes, etc.
- Situación y posible variación del nivel freático El aumento de cota del nivel freático. Implica disminución de presión efectiva (aumenta la presión neutra que se ha de restar a la total), por tanto disminuye la resistencia, como se verá más adelante; eso indica peligro de posible licuefacción de material granular fino saturado, sobre todo por terremotos.
- Socavación debida a corrientes subterráneas, que provocan erosión y fuga de terreno; lo que da lugar a asientos catastróficos.

Figura 1.15. Placa de cimentación. [14]



1.3.2 Cimentaciones Profundas. Las Cimentaciones Profundas son utilizadas generalmente en suelos compuestos por capas de material blando sobre estratos de terreno firme; la función de este tipo de cimiento es transmitir las cargas producidas por la superestructura a los estratos de suelo fuerte [15].

Entre estas cimentaciones se destacan:

- ❖ Muros Pantalla: son muros verticales profundos de hormigón.
- ❖ Pilotes: son elementos similares a las columnas, hincados a profundidad en el suelo.
- ❖ Micropilotes

➤ ¿En qué casos se utilizan las Cimentaciones Profundas?

- a.) Se opta por cimentaciones profundas cuando los esfuerzos transmitidos por el edificio no pueden ser distribuidos suficientemente a través de una cimentación superficial, y en la solución probable se sobrepasa la capacidad portante del suelo.
- b.) Cuando el terreno tiende a sufrir grandes variaciones estacionales: por hinchamientos y retracciones.

- c.) Cuando los estratos próximos al cimiento pueden provocar asentamientos imprevisibles y a cierta profundidad, caso que ocurre en terrenos de relleno o de baja calidad.
- d.) En edificios sobre el agua.
- e.) Cuando los cimientos están solicitados a tracción; tal como ocurre en edificios altos sometidos a esfuerzos por vientos, o en estructuras que necesitan elementos sometidos a tracción para lograr estabilidad, como estructuras de cables o cualquier estructura anclada al suelo.
- f.) Para resistir cargas inclinadas, como aquellos pilotes que se colocan en los muelles para resistir el impacto de los cascos de barcos durante el atraque.(tablestacado)
- g.) Para el recalce de cimientos existentes

Pilotes:

Los Pilotes o sistema por pilotaje, es un tipo de cimentación profunda de tipo puntual, que se hinca en el terreno buscando siempre el estrato resistente que pueda soportar las cargas transmitidas. [16]

Casos en los que se usan Pilotes

Cuando las cargas transmitidas por el edificio no se pueden distribuir adecuadamente en una cimentación superficial excediendo la capacidad portante del suelo. Puede darse que los estratos inmediatos a los cimientos produzcan asentamientos imprevistos y que el suelo resistente esté a cierta profundidad; es el caso de edificios que apoyan en terrenos de baja calidad.

Cuando el terreno está sometido a grandes variaciones de temperatura por hinchamientos y retracciones producidos con arcillas expansivas.

Cuando la edificación está sobre agua.

Cuando los cimientos están sometidos a esfuerzos de tracción. Aquí tenemos varios casos:

En edificios de altura expuestos a fuertes vientos.

En construcciones que requieren de elementos que trabajen a la tracción, como estructuras de cables, o cualquier estructura anclada en el suelo.

Cuando se necesita resistir cargas inclinadas; como en los muros de contención de los muelles.

Cuando se deben recalzar cimientos existentes.

En la cimentación por pilotaje deben observarse los siguientes factores de incidencia:

El rozamiento y adherencia entre suelo y cuerpo del pilote.

La resistencia por punta, en caso de transmitir compresiones, para absorber esfuerzos de tracción puede ensancharse la parte inferior del pilote, para que trabaje el suelo superior.

De acuerdo a la transmisión de carga los pilotes se clasifican en:

Cimentación Rígida de Primer Orden.

El pilote trabaja por punta, clavado a gran profundidad.

Las puntas de los pilotes se clavan en terreno firme; de manera que se confía en el apoyo en ese estrato, aún si hubiere una pequeña descarga por rozamiento del fuste al atravesar estratos menos resistentes. Lo cual denota que las fuerzas de sustentación actúan sobre la punta del pilote, y en menor medida mediante el rozamiento de la superficie lateral del pilote.

Es el mejor apoyo y el más seguro, porque el pilote se apoya en un terreno de gran resistencia.

Cimentación Rígida de Segundo Orden.

Cuando el pilote se encuentra con un estrato resistente pero de poco espesor y otros inferiores menos firmes.

En este caso se debe profundizar hasta encontrar terreno firme de mayor espesor. El pilote transmite su carga al terreno por punta, pero también descarga gran parte de los esfuerzos de las capas de terreno que ha atravesado por rozamiento lateral. Si la punta del pilote perfora la primera capa firme, puede sufrir asentamientos diferenciales considerables. Como en los de primer orden, las fuerzas de sustentación actúan sobre la planta del pilote y por rozamiento con las caras laterales del mismo.

1.3.3 Cimentaciones mixtas o Fundaciones de Cimentación Tipo Losa Pilote (CTLP). En los últimos años, ha habido un creciente reconocimiento de que el uso de pilotes para reducir los asentamientos y los asentamientos diferenciales en una losa de fundación puede dar lugar a una considerable economía sin comprometer la seguridad y el rendimiento de la fundación. Para resistir los esfuerzos a los cuales está sometido el sistema de fundación, la subestructura utiliza la losa de fundación y los pilotes dando como resultado una considerable reducción de efectos.

Con el uso de losas de fundación combinadas con pilotes se obtiene como ventajas una reducción en los costos sobre la fundación total con pilotes y una importante limitación de asentamientos diferenciales respecto de la fundación directa sobre losas de cimiento.

La cimentación tipo losa - pilotes (CTLP) (ver Fig. 1.16) se empezó aplicar en Europa a partir de los años setenta como una alternativa para la fundación de solo pilotes en estructuras con sollicitación mayor. Esta cimentación se ha utilizado mucho en Alemania, especialmente en la ciudad de Frankfurt para la fundación de rascacielos sobre suelos arcillosos; en esta ciudad se midieron asentamientos de hasta 12 cm en edificios de gran altura los cuales contaban con cimentación superficial, es decir losa de fundación, a estos edificios se les aplico el sistema CTLP, agregando pilotes a la losa de fundación y se obtuvo como

resultado una reducción considerable y eficiente de estos asentamientos (figura 1.17), con la CTLP se economiza la obra en relación con una cimentación pura de solo pilotes.

Figura. 1.16 Cimentación losa-pilote [16]

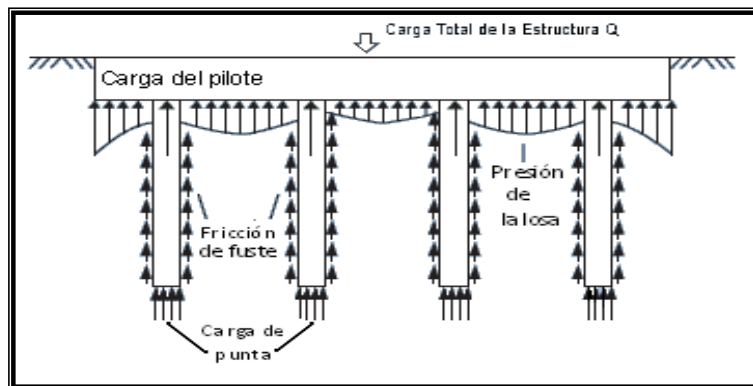
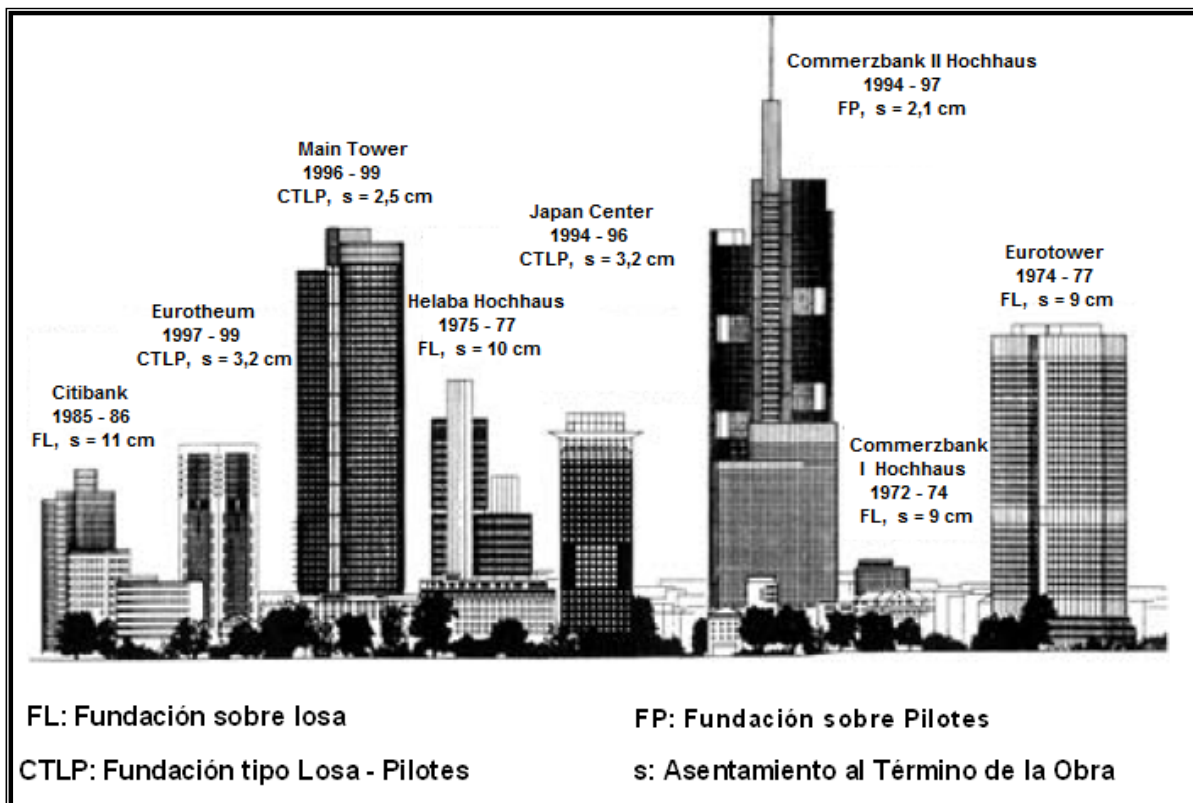


Figura.1.17 Ejemplo de los asentamientos para tipos de cimentaciones. [16]



El mayor problema que tiene este tipo de cimentación es el modelamiento de la interacción entre los elementos portantes losa, pilotes y suelo.

El uso de las fundaciones CTLP, traslada la mayor parte de las cargas producidas en la estructura a estratos de suelo con mayor resistencia. Por lo tanto las CTLP son efectivas cuando la calidad del suelo, como es lo típico, mejora con profundidad creciente.

Una fundación CTLP se caracteriza por el coeficiente α_{KPP} , que representa la relación entre la carga que toman los pilotes y la carga total de la fundación:

$$\alpha_{KPP} = \frac{\sum R_{pil,i}}{R_{tot}} \quad (1.7)$$

Este coeficiente puede tomar valores entre 0 y 1. En caso de que $\alpha_{KPP} = 1$, se trata de una fundación pura sobre pilotes; para $\alpha_{KPP} = 0$ se trata de una fundación directa (losa en este caso). Por experiencia en la práctica se sabe que para obtener una reducción efectiva de los asentamientos el valor α_{KPP} debe ser aproximadamente 0,6.

Mientras que para el diseño de una fundación pura sobre pilotes, basta con adoptar un modelo de la capacidad de carga de los pilotes del lado de la seguridad, para las CTLP se hace necesario conocer con mucha mayor precisión las características de la relación carga - deformación de los pilotes, dado que el comportamiento del conjunto depende fuertemente de éstas. Por ejemplo, pilotes muy rígidos podrían producir un punzonamiento en la losa, mientras que pilotes muy poco rígidos llevarían a asentamientos diferenciales importantes.

El cálculo se dificulta por el hecho que además de la interacción mutua entre la placa y los pilotes, existen otras interacciones que influyen en el desarrollo de la cimentación, como lo son: interacción de grupo entre los pilotes, entre pilotes y suelo y a demás entre losa y suelo, las cuales también deben ser consideradas en el diseño.

Las fundaciones CTLP proporcionan una solución económica para el caso en el cual la losa por sí sola no satisface los requisitos del diseño. En estos casos, la adición de un número limitado de pilotes puede mejorar, en última instancia, la capacidad de carga, el asentamiento diferencial, y el espesor mínimo de la losa.

Procedimiento de Cálculo

Para el cálculo de la CTLP primero se calculan los pilotes en función de su carga última (de aquí la reducción en los costos del sistema) [17].

El comportamiento de las fundaciones CTLP se puede analizar con modelos fuertemente simplificados. Como lo son:

- Modelo con apoyos independientes de las deformaciones: la carga de los pilotes se supone conocida e independiente de las deformaciones. La suma de las cargas de todos los pilotes se resta de la carga total y se diseña la losa de fundación con la carga restante.
- La losa de fundación se calcula según el método tradicional del coeficiente de balasto y los pilotes son considerados como apoyos adicionales y modelados como resortes individuales.

En ambos métodos mencionados no se tienen en cuenta todas las interacciones que existen. Modelos de este tipo pueden entregar sólo valores referenciales, aptos únicamente para un pre dimensionamiento, debiéndose considerar para los parámetros del modelo, anchos de banda o rangos de variación adecuados.

Katzenbach y otros [18] entregan para el segundo modelo valores referenciales para la elección de la rigidez del resorte que modela cada pilote, los cuales fueron determinados en base a modelos numéricos (Tabla 1.3). La base para

esto es la rigidez equivalente del resorte C determinada a partir de una curva esfuerzo-deformación de un pilote individual. Dependiendo de la distancia entre los pilotes referida al diámetro D y el largo L de éstos, la tabla entrega diferentes factores de reducción para pilotes de una fundación CTLP ubicados en el centro, en los costados o en la esquina del grupo de pilotes.

Los valores indicados han sido determinados para un asentamiento de un 3% del diámetro del pilote.

$$C_{KPP,i} = \xi_i C_{pilote.individual} \quad (1.8)$$

El modelamiento tridimensional del sistema global suelo-losa-pilotes de una CTLP hoy en día no se puede realizar de manera completa, debido a la complejidad de las interacciones entre los elementos portantes. El estado actual del desarrollo lo representan los procedimientos de cálculo que determinan la reacción del suelo numéricamente, mediante un modelo de elementos de borde (BEM = «Boundary Elements Method»). En el método de El Mossallamy [19] se modela de esta forma la no linealidad del comportamiento del suelo mediante hipótesis simplificadoras. El procedimiento de cálculo trabaja con dos modelos: la losa se calcula como losa apoyada sobre «resortes», o sea con un modelo de elementos finitos y coeficiente de balasto.

La rigidez de los resortes se modifica en forma iterativa hasta que las deformaciones y las tensiones del modelo de la losa se corresponden con las obtenidas en el segundo modelo planteado para el suelo, en base al método de los elementos de borde (BEM).

Se ha comprobado que con este procedimiento de cálculo se han obtenido resultados realistas de acuerdo a estudios realizados con pruebas de cargas sobre pilotes aislados y grupos de pilotes, así como la comparación del cálculo y las mediciones realizadas sobre CTLP

Tabla 1.3: Factores de reducción ξ_i para rigideces de pilotes de una CTLP, en comparación con el caso de un pilote individual (calculadas para $s = 0,03 D$ según Katzenbach et al.)

Factor de reducción ξ_i				
Distanciamiento entre pilotes	Largo de pilotes	Pilote Central ξ_Z	Pilote lateral ξ_R	Pilote de esquina ξ_E
e/D = 3	L/D = 10	0.13	0.19	0.25
	L/D = 20	0.11	0.18	0.25
	L/D = 30	0.11	0.18	0.25
e/D = 6	L/D = 20	0.33	0.36	0.39
e/D = 8.5	L/D = 20	0.42	-	0.70

Conceptos de Diseño

En Alemania fueron creadas las reglas para el cálculo de cimentaciones combinadas losa-pilotes [20] por un grupo de especialistas. Básicamente se especifican para las CTLP altas exigencias en lo que respecta al alcance y calidad de la exploración del subsuelo. La ejecución de ensayos de laboratorio en probetas especiales para la determinación de la rigidez y de la resistencia al corte del suelo son imprescindibles. Además se debe controlar minuciosamente la ejecución de los pilotes.

Para el cálculo se debe conocer la capacidad de carga de un pilote aislado. Por lo general deben ejecutarse pruebas de carga.

Al modelo de cálculo de fundaciones CTLP se le hacen las siguientes exigencias:

- El modelo debe estar en condiciones de simular en forma adecuada y exacta el comportamiento carga vs. deformación de un pilote individual, además de determinar la carga última.
- Debe considerar la interacción pilote/pilote y pilote/losa

- Los modelos simplificados sólo pueden ser utilizados cuando existen condiciones simples, como suelo homogéneo, largo de pilotes y distancia entre los mismos constante, carga central sobre la fundación [21].

La comprobación de la capacidad de carga global de una CTLP se realiza con un factor de seguridad $FS = 2$. No se exige la verificación de la capacidad de carga para los pilotes individuales, ya que se permite una utilización de la capacidad del pilote hasta la carga última.

Para comprobar la capacidad de carga en servicio de la CTLP se debe realizar finalmente un cálculo con una carga simple no mayorada ($FS = 1$), con el fin de calcular los asentamientos y distribución de esfuerzos. Dada la complejidad del comportamiento estructural, es necesario llevar a cabo un monitoreo geotécnico para la verificación del comportamiento pronosticado para el sistema .

Este sistema es de gran utilidad para estructuras pesadas en sitios con suelos finos (limos y arcillas) de consistencia reciente con la profundidad y susceptibles de sufrir grandes asentamientos. La optimización de costos que se logra con este sistema, permitiría alcanzar fundaciones económicas y seguras para estructuras pesadas, que en otras circunstancias serían inviables estructural o económicamente.

1.4 GEOTECNIA

Para el diseño de cimentaciones de estructuras tales como edificios, puentes y presas, se requiere el conocimiento de factores como:

- a) La carga que será transmitida por la estructura a la cimentación
- b) Los requisitos del reglamento local constructivo
- c) El comportamiento esfuerzo – deformación de los suelos que soportaran el sistema
- d) Las condiciones geológicas del suelo.

Para conocer la respuesta del suelo ante la sollicitación impuesta por el cimiento de la estructura es necesario conocer las propiedades geotécnicas del suelo de fundación.

Dichas propiedades geotécnicas del suelo, como la distribución del tamaño del grano, la plasticidad, la compresibilidad y la resistencia por cortante, pueden ser determinadas mediante apropiadas pruebas de laboratorio. Recientemente, se ha puesto énfasis en la determinación *in situ* de las propiedades de resistencia y deformación del suelo, debido a que así se evita la perturbación de las muestras duras de la exploración de campo.

Distribución granulométrica

La distribución granulométrica de un suelo es la división en distintas fracciones de este, clasificadas de acuerdo al tamaño de las partículas que lo componen; las partículas de cada fracción se caracterizan por su tamaño el cual está comprendido entre un valor máximo y uno mínimo, este proceso es correlativo ya que el tamaño máximo de una fracción es el mínimo de la fracción siguiente; El propósito del análisis granulométrico, es determinar el tamaño de los granos que constituyen un suelo y fijar el porcentaje de su peso total, así como la cantidad de granos de distintos tamaños que este contiene. En la tabla 1.4 se muestra los nombres que le corresponde a cada fracción de suelo según su tamaño:

Tabla 1.4 Tamaño del grano

NOMBRE DEL GRANO	PROPIEDAD	TAMAÑO (mm)
Fragmentos de roca	No aplica	Mayor de 76
Grava	Gruesa	30 a 76
	Media	19 a 30
	Fina	4.76 a 19
Arenas	Gruesa	2 a 4.76
	Media	0.42 a 2
	Fina	0.074 a 0.42

1.4.1 Relaciones peso – volumen. El suelo está compuesto por una fase sólida, una fase líquida y una fase gaseosa; en donde la fase sólida

está compuesta por minerales del suelo, la fase líquida por el agua y en la gaseosa predomina el aire libre, pero en ocasiones se encuentran gases como vapores sulfurosos, anhídrido carbónico entre otros; la figura 1.18 es una representación de una muestra de suelo en un recipiente sellado, mostrando la separación de las tres fases constituyentes del suelo, en donde el volumen de la fase sólida es designado por V_s mientras que el volumen de la fase líquida y de la fase gaseosa (V_w y V_g respectivamente) son relacionados por medio del volumen de vacíos V_v , esto debido a que el volumen de agua y el volumen de gas varían, ya sea por el cambio de las condiciones del agua en el subsuelo o por el efecto de cargas aplicadas.

Cuando los volúmenes vacíos del suelo están ocupados en su totalidad por agua se dice que el suelo está saturado, en este caso específico el suelo se compone de dos fases: la sólida y la líquida; gracias a las relaciones entre las fases sólida, líquida y gaseosa de un suelo se puede avanzar en el análisis del grado de plasticidad del conjunto.

Las primeras relaciones que entran en el modelamiento de un suelo son; la relación de volumen total y de peso total las cuales se representan en la figura 1.19:

Figura 1.18 Representación de muestra de suelo en un recipiente sellado

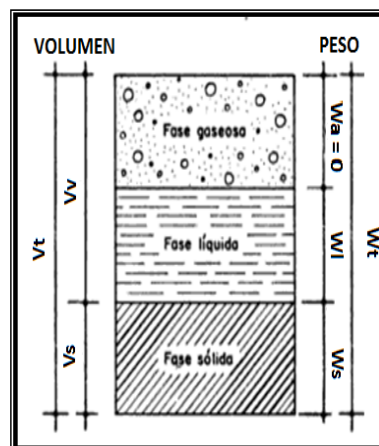
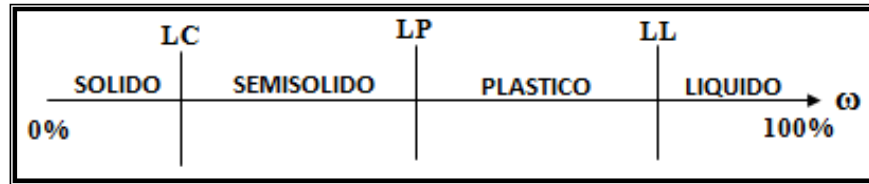


Figura 1.19 relación de volumen total y de peso total



En donde:

$$V_T = V_v + V_s \quad (1.9)$$

$$W_T = W_L + W_s \quad (1.10)$$

Las relaciones que se presentan a continuación son de vital importancia para el estudio de las propiedades mecánicas de un suelo, para su posible utilización como elemento soporte de una estructura:

Índice de poros (e), donde se relacionan el volumen de vacíos y el de sólidos del suelo su valor puede ser en teoría: $0 < e \rightarrow \infty$.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.11)$$

En la tabla 1.5 se muestra la relación de vacíos típica para algunos suelos:

Tabla 1.5 Índice de poros (e) para los tipos de suelo

TIPO DE SUELO	e
ARENA UNIFORME SUELTA	0.8
ARENA UNIFORME DENSA	0.45
ARENA LIMOSA SUELTA	0.65
ARENA LIMOSA DENSA	0.4
ARCILLA DURA	0.6
ARCILLA SUAVE	0.9 - 1.4
LOES	0.9
ARCILLA ORGANICA SUAVE	2.5 - 3.2
MORRENA GLACIAL	0.3

Porosidad (η), es la probabilidad de encontrar vacios en el volumen total de la masa de un suelo, o sea es la relación entre el volumen de vacios y el volumen total de un suelo expresada en porcentaje; su valor está entre 0 y 100%, para el caso de un suelo perfecto $\eta = 0$.

$$\eta(\%) = \frac{V_v}{V_T} \times 100 = \frac{e}{1+e} \quad (1.12)$$

Los valores que se han encontrado oscilan entre 19% y 95%.

Grado de saturación (G_s), es la relación entre el volumen de agua en los espacios vacios y el volumen de vacios del suelo, en otras palabras es la probabilidad de encontrar agua en los vacios del suelo, por lo que $0 \leq G_s \leq 100$, nunca se encontrara que el grado de saturación de un suelo sea cero, pero a manera ideal cuando se clasifica un suelo como seco es porque su $G_s = 0$, y se define un suelo como saturado cuando su grado de saturación es de 100%.

$$G_s(\%) = \frac{V_L}{V_s} \times 100 \quad (1.13)$$

Contenido de agua o humedad de un suelo (ω), es la relación entre peso del agua contenida en el suelo y el peso de su fase sólida expresada en porcentaje, esta relación varía teóricamente de 0 a ∞ , en la práctica se han encontrado valores entre 0 y 100% pero en el valle de México se presentaron valores de 500% o 600%.

$$\omega(\%) = \frac{W_L}{W_S} \times 100 \quad (1.14)$$

Tabla 1.6 Humedad en los diferentes tipos de suelo

TIPO DE SUELO	ω saturada
ARENA UNIFORME SUELTA	30
ARENA UNIFORME DENSA	16
ARENA LIMOSA SUELTA	25
ARENA LIMOSA DENSA	15
ARCILLA DURA	21
ARCILLA SUAVE	30 - 50
LOES	25
ARCILLA ORGANICA SUAVE	90 - 120
MORRENA GLACIAL	10

Peso específico (γ), es una de las propiedades físicas más importantes de un suelo, ya que es necesaria para el cálculo de las presiones de tierra o de las que se producen por sobrecarga en el suelo.

$$\gamma = \frac{W_T}{V_T} \quad (1.15)$$

Peso específico seco (γ_d)

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_T} \quad (1.16)$$

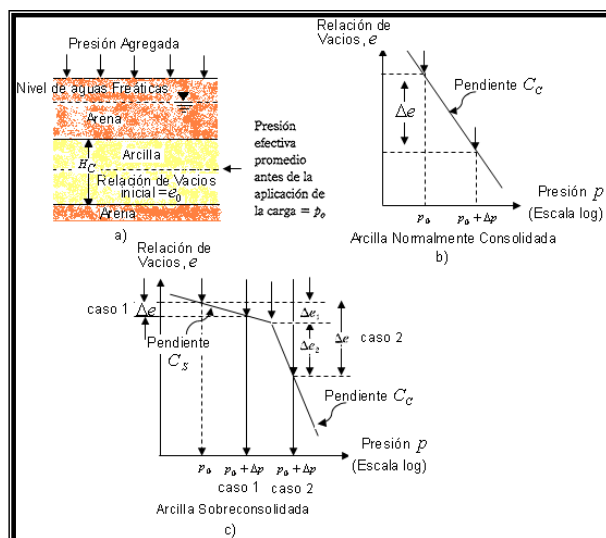
Tabla 1.7 Peso específico en los diferentes tipos de suelo

TIPO DE SUELO	δd (KN/m ³)
ARENA UNIFORME SUELTA	14.5
ARENA UNIFORME DENSA	18
ARENA LIMOSA SUELTA	16
ARENA LIMOSA DENSA	19
ARCILLA DURA	17
ARCILLA SUAVE	11.5 - 14.5
LOES	13.5
ARCILLA ORGANICA SUAVE	6 - 8
MORRENA GLACIAL	21

1.4.2 Calculo de asentamientos por consolidación. Es muy importante para el análisis de una cimentación determinar el asentamiento que se produce por el peso de la estructura en el terreno ya que se debe cumplir con unos requerimientos mínimos para que la edificación sea estable y segura, es por esto que se expondrá como se calcula el asentamiento para un determinado tipo de suelo. El asentamiento unidimensional por consolidación (causado por una carga adicional) de una capa de arcilla como se muestra la Figura 1.19, con un espesor H_C puede calcularse como

$$S = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H_C \quad (1.17)$$

Figura 1.20. Calculo de asentamiento Unidimensional [21]



Donde:

S= Asentamiento

Δe = cambio total de la relación de vacíos causada por la aplicación de carga adicional

e_0 = relación de vacíos de la arcilla antes de la aplicación de la carga

Note que

$$\frac{\Delta e}{1 + e_0} = \varepsilon_v = \text{deformación unitaria vertical}$$

Para arcilla normalmente consolidada, la curva de campo $e - \log p$, tendrá la forma mostrada en la Grafica 1.19 b. si p_0 = presión de sobrecarga efectiva promedio inicial sobre el estrato de arcilla y Δp = el incremento promedio de presión sobre el estrato de arcilla, causado por la carga agregada, el cambio de la relación de vacíos provocada por el incremento de carga es

$$\Delta e = C_c \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (1.18)$$

Ahora, combinando las ecuaciones 1.17 y 1.18 se obtiene:

$$S = \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (1.19)$$

Para arcilla sobre consolidada, la curva de campo $e - \log p$ se vera como la mostrada en la Grafica 1.19 c. en este caso dependiendo del valor de Δp , pueden presentarse dos condiciones.

Primera, si $p_0 + \Delta p < p_c$

$$\Delta e = C_s \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (1.20)$$

$$S = \frac{H_c C_s}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (1.21)$$

Segunda, si $p_0 < p_c < p_0 + \Delta p$,

$$\Delta e = \Delta e_1 + \Delta e_2 = C_s \log \frac{p_c}{p_0} + C_c \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (1.22)$$

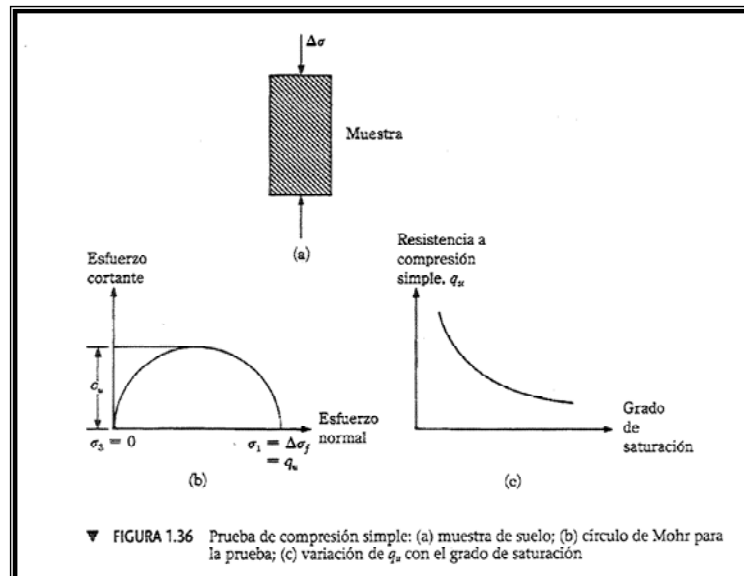
$$S = \frac{C_s + H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (1.23)$$

1.4.3 Prueba de compresión simple. Es un tipo especial de prueba triaxial no consolidada y no drenada en la que la presión de confinamiento $\sigma_3 = 0$. En esta prueba se aplica un esfuerzo axial $\Delta\sigma$ al espécimen para generar la falla (es decir, $\Delta\sigma = \Delta\sigma_f$). El correspondiente círculo de Mohr se muestra en la figura 1.20 b. Note que para este caso

$$\text{Esfuerzo total principal mayor} = \Delta\sigma_f = q_u$$

$$\text{Esfuerzo total principal menor} = 0$$

Figura 1.21. Prueba de compresión simple [22]



Al esfuerzo axial en la falla, $\Delta\sigma_f = q_u$ se le denomina resistencia a compresión simple. La resistencia al corte de arcillas saturadas bajo esta condición ($\phi = 0$), De la ecuación 1.56, es

$$s = c_u = \frac{q_u}{2} \quad (1.24)$$

La resistencia a compresión simple se usa como indicador de la consistencia de las arcillas.

Los experimentos de compresión simple a veces se efectúan en suelos no saturados. Manteniendo constante la relación de vacíos de un espécimen de suelo, la resistencia a compresión simple disminuye rápidamente con el grado de saturación (figura 1.20 c.)

1.5 SOFTWARE MODELOS

Inicialmente, las computadoras eran herramientas que servían para procesar datos, y los programadores se ayudaban entre sí compartiendo los códigos. Sin embargo, poco a poco las empresas decidieron convertir los programas informáticos o software en un producto comercial y prohibir su libre copia y modificación.

En estudios de ingenierías se ha podido trabajar un buen número de programas para cada una de las áreas, los cuales son de fácil manejo; y el estudio de las cimentaciones está muy ligado al modelamiento a través de programas de computo. Para calcular la capacidad portante de cimentaciones se pueden utilizar programas basados en diferentes hipótesis de mecanismos de rotura. En general, puede determinarse la carga admisible en función de la estratigrafía y de la forma de la cimentación dependiendo del tipo (superficial o profunda).

Algunos programas, para estos estudios de cimentaciones son:

GASP

Análisis Geotécnicos de placa con pilotes, el cual ha demostrado que para el cálculo de asentamiento da una mejor aproximación comparada con los métodos de análisis. Sin embargo, tiene algunas limitaciones importantes, especialmente que no puede considerar momentos de torsión en la losa, y no da asentamientos coherentes en un punto analizado cuando se trata de una placa en dos direcciones.

El GASP tiene en cuenta la no linealidad del suelo en una manera aproximada mediante la limitante de que las presiones de la placa en contacto con el suelo no deben sobrepasar la capacidad portante (en compresión) o mejorar la capacidad de tensión de la losa. La carga a compresión en los pilotes se limita a no superar la capacidad de los pilotes. Sin embargo, en última instancia, la capacidad de carga de los pilotes debe ser determinada, y generalmente se supone que será la misma que los pilotes aislados. En realidad, como demostró Katzenbach en (1998), la carga transmitida al suelo por la losa puede tener un efecto beneficioso sobre el comportamiento de los pilotes en el sistema losa - pilotes. Así pues, las suposiciones del GASP para el modelamiento de los pilotes tienden a ser conservadores.

Para llevar a cabo un análisis no lineal de una placa en dos direcciones se ha encontrado conveniente considerar la no linealidad en una dirección (la dirección larga) y considerar el comportamiento de los pilotes en la otra dirección (más corta) y este será lineal. Este procedimiento no incluye el límite elástico del suelo debajo de la placa en su análisis y, por tanto, da como resultado asentamientos poco reales.

Funcionamiento ISE 94

El programa ISE 94 desarrollado por los ingenieros Francisco Hoyos y Winston Echavarría [24], modela los efectos de la interacción Suelo Estructura. Las características principales del ISE 94 son:

- ✓ La superestructura se modela de la misma manera que en SAP90.

- ✓ La losa de cimentación se modela con elementos tipo SHELL utilizando una discretización aceptable.
- ✓ Se define el número de estratos, el espesor y módulo de compresibilidad volumétrico. El programa se encarga de dividir estos estratos en subestratos de similar dimensión a las dovelas.
- ✓ Por último se le asigna al suelo la capacidad última. El programa se auto controla cuando esta capacidad última es excedida redistribuyendo a las dovelas vecinas el excedente.

Este programa interactúa con el programa SAP 90 así:

- ✓ Inicialmente hace un análisis de la estructura con unos resortes supuestos a la cimentación
- ✓ Las reacciones obtenidas del primer análisis son llevadas al ISE modelando los efectos del suelo en una primera iteración.
- ✓ El programa ISE regresa al SAP 90 unos valores equivalentes de unas constantes de resorte para realizar un segundo análisis.
- ✓ Nuevamente extrae las reacciones de la superestructura y las lleva al ISE para realizar una segunda iteración.
- ✓ Este proceso se repite hasta que las constantes de resorte converjan.

Estos modelos de software (CIVILFEM y ETABS) son los que vamos a trabajar de ahora en adelante.

CIVILFEM

El módulo de geotecnia de CIVILFEM [25] nace con la intención de ser un instrumento poderoso que permite al ingeniero civil abordar con sencillez problemas de su disciplina que hasta el momento, no podía tratar con ANSYS, o su tratamiento resultaba muy complicado.

Con objeto de realizar un programa compacto que permita su integración en él de herramientas muy diversas, CIVILFEM ha sido dotado de una base de datos geotécnicos que tiene varias características importantes:

- Incluye y mantiene propiedades propias de suelos y rocas que ANSYS no contemplaba.
- Permite el manejo de correlaciones, practica muy habitual en Geotecnia, entre magnitudes de muy diferente origen y significación (por ejemplo el módulo de elasticidad E con el ensayo de penetración estándar SPT).
- El módulo incluye librerías nativas con propiedades características de suelos y rocas y con un gran número de correlaciones obtenidas de la bibliografía.
- El usuario puede crear sus propias librerías.

Trabajando sobre esta base de partida, al módulo se le han incorporado las siguientes herramientas:

- Estabilidad de taludes, que se analiza utilizando métodos clásicos en rotura (Fellenius, Bishop y Janbu) o el método de los elementos finitos.
- La generación del modelo del talud se realiza utilizando las capacidades del mallado de ANSYS y por la definición de familias de curvas de rotura (círculos o poligonales). Se han desarrollado comandos y pantallas gráficas que hacen muy sencilla la tarea.
- Modelo de Hoek y Brown, para simular el comportamiento de cimentaciones en rocas.
- Determinación del modulo de balasto en cimentación. Su determinación se realiza a partir de las ecuaciones de Boussinesq y modelos de cálculo por el MEF.
- Generación y cálculo de pantallas de sostenimiento que se modelan mediante las teorías elásticas: elementos 'beam' para la pantalla y elementos muelle para simular empujes.
- Redes de filtración. Esta herramienta permite obtener de forma automática la línea de saturación y resuelve el problema de la filtración a través de un medio poroso.

También se ha incluido una utilidad de conexión ANSYS-FLAC-CIVILFEM. El modelo se genera con las herramientas de ANSYS, se exporta a FLAC para un

cálculo en diferencias finitas y los resultados de uno o varios cálculos son capturados por CIVILFEM para su postproceso posterior (envolventes, comprobación, diseño de armaduras, etc.). Para una mayor información véase el capítulo 16 de este manual.

ETABS

ETABS (versión 8), es un programa de análisis estructural basada en elementos finitos con características de propósito especial para diseño estructural y análisis del edificio. Es un programa con muy eficiente y potentes en métodos numéricos y procedimientos de diseño

ETABS trabaja fuera de una base de datos integrada. El concepto básico es que crea un único modelo que consiste en los sistemas de piso y la vertical y lateral, sistemas de encuadre para analizar y diseñar edificios.

Todo lo que necesita es integrado en un análisis versátil y diseño de sistema con una interfaz de usuario. No hay módulos externos a mantener y no se preocupa de datos de transferencia entre los módulos. Los efectos sobre son una parte de la estructura de los cambios en otra parte instantánea y automática.

Los métodos de análisis incluyen una amplia variedad de estática y dinámica. El modelo integrado puede incluir, sistemas, suelos rígidos y flexibles, inclinados techos y Estacionamiento.

Los métodos numéricos utilizados para analizar edificios, permiten modelamiento de pisos de cubierta de acero y sistemas de piso de concreto.

Sus cargas a vigas principales. El mallado de elementos finitos automatizada de sistemas de piso complejos con interpolación de desplazamiento automatizada en transiciones de malla no coincidentes, junto con análisis de Ritz para dinámica, hace de inserción de diafragma efectos de flexibilidad en el análisis muy práctico.

Opciones de análisis dinámico vertical permiten incluir los efectos verticales componentes de movimiento de tierra en su análisis de sismo.

2. ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN

Se realizara el análisis para el modelo de tres tipos de cimentaciones como son la cimentación superficial, cimentación profunda y cimentación combinada. Cada tipo de cimentación se va a modelar interactuando con un terreno en primer lugar compuesto por una sola capa de arcilla, en segunda medida uno de solo arena, y en tercer lugar un terreno con estratos combinados de arcilla y arena.

Con esto se analizara el comportamiento de cada tipo de cimentación interactuando con cada uno de los perfiles de suelo; para dicho análisis se utilizaran los resultados de respuesta estructural para las diferentes sollicitaciones de carga; el procedimiento que se utilizara en este proyecto es el que se observa en la figura 1.1.

Se hará una comparación entre los desplazamientos producidos por la carga impuesta a cada tipo de cimentación , esto con el fin de encontrar la mejor opción de rigidez del conjunto cimentación - suelo.

2.1 DEFINICIÓN DE MODELOS (CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS)

Se estudiara el comportamiento de los tres tipos de cimentaciones; superficial en este caso una losa de cimentación , profunda para este proyecto encepado de pilotes y combinada la CTLP.

Cada cimentación va a soportar el peso de una edificación de concreto reforzado de once niveles incluyendo la cubierta, la cual será sometida a un análisis estático y dinámico para obtener las cargas de transmisión entre superestructura y subestructura.

2.1.1 Aspectos Geométricos Generales. En la figura 2.1 se muestra la planta del edificio que se analizara para obtener las cargas que este transmite a la cimentación.

Con una sección de vigas principales de 0.40 x 0.40 m, y una sección de columnas en todas las alturas del edificio de 0.50 x 0.50 m. el corte de los pórticos típicos en cada dirección se muestra en la figura 2.2.

El espesor de la placa de entrepiso es de 0.40 m y la altura del entrepiso es de 3.00 m. La placa de entrepiso es aligerada convencional, funciona armada en una sola dirección con vigas secundarias de 0.10 x 0.40 orientadas en la misma dirección de x. El detalle de los elementos de la placa aligerada se puede observar en la figura 2.3.

En cuanto a la fundación, como ya se mencionó anteriormente, se hará primero cimentación superficial por una losa , luego tendrá una cimentación a base de pilotes y por último se utilizará una cimentación mixta (superficial + profunda) losa – pilotes.

Figura 2.1 planta de entre piso típico

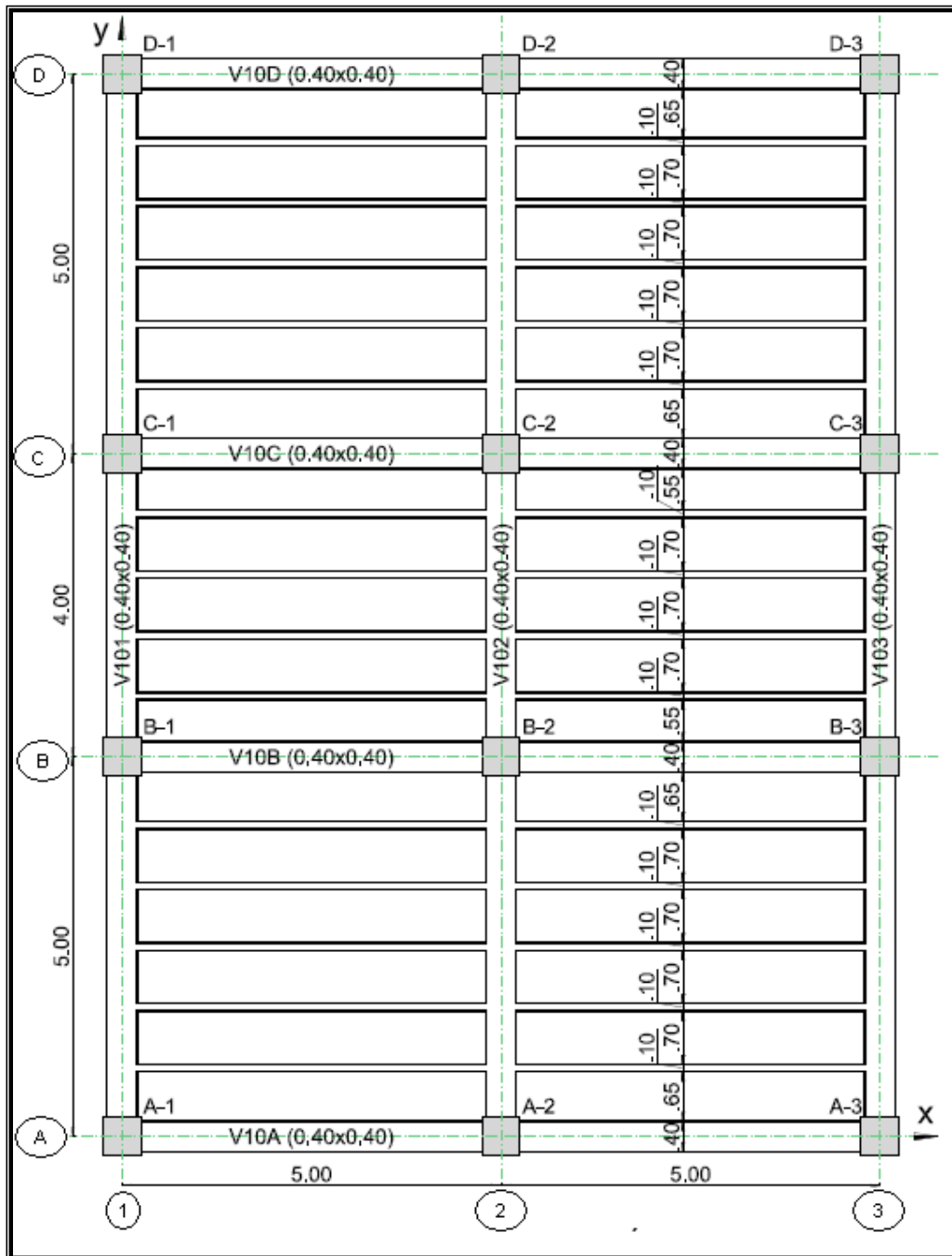


Figura 2.2 a) corte del pórtico en dirección Y

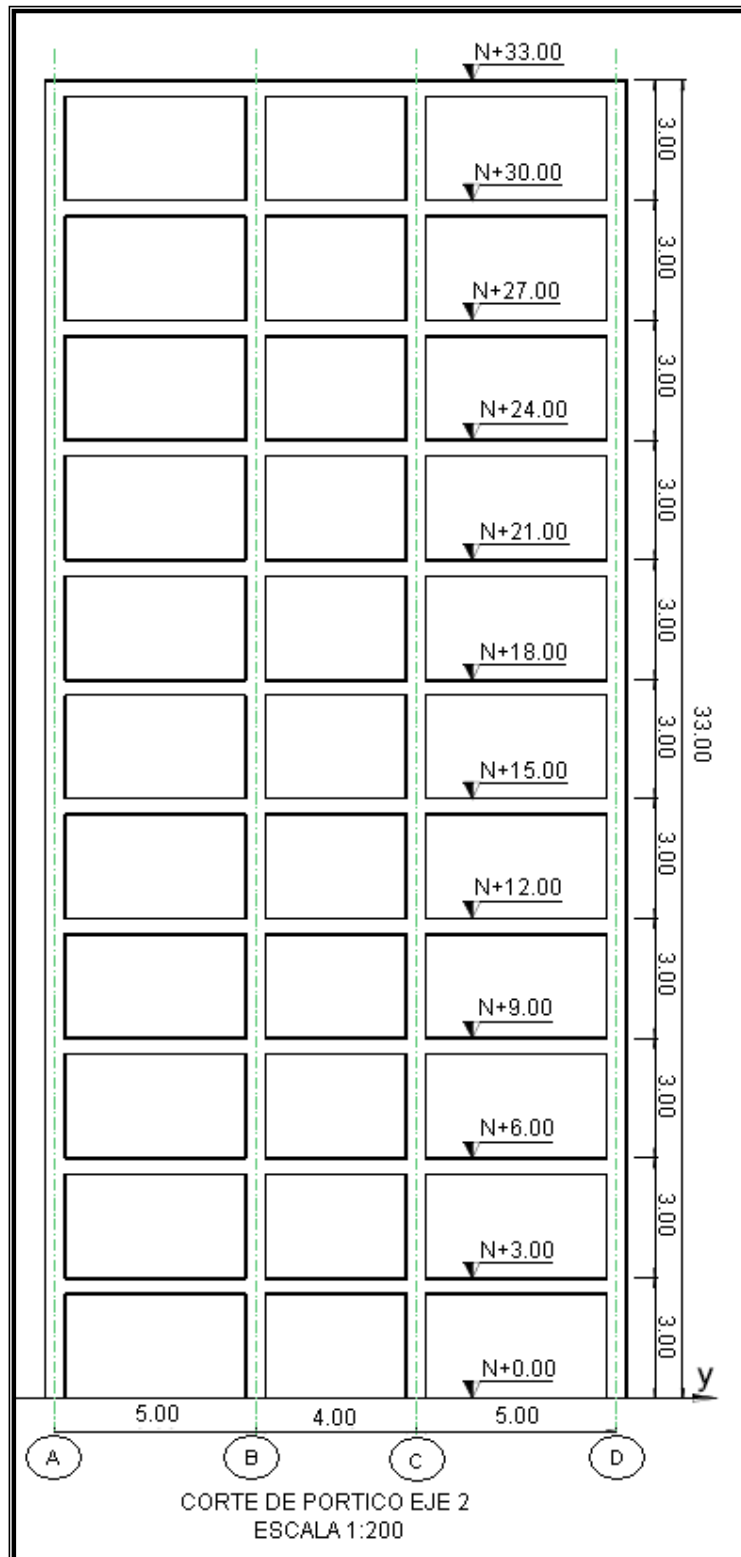


Figura 2.2 b) corte del pórtico en dirección X

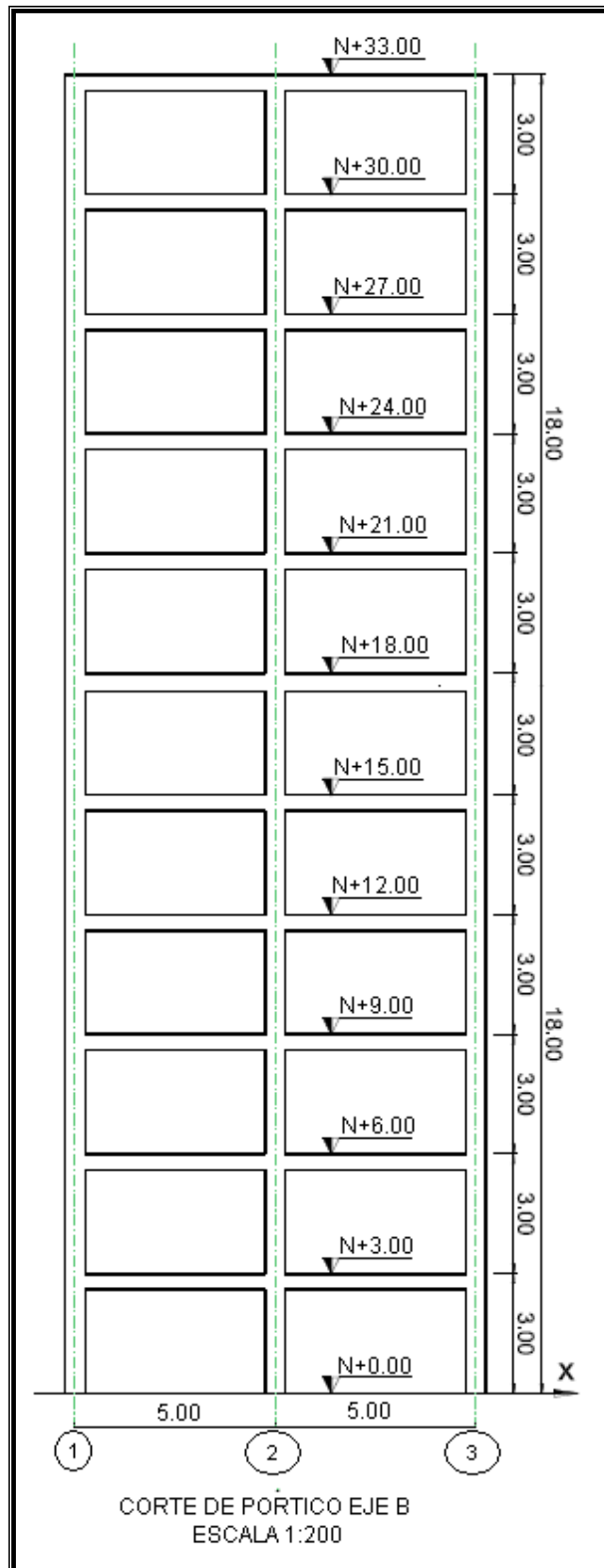
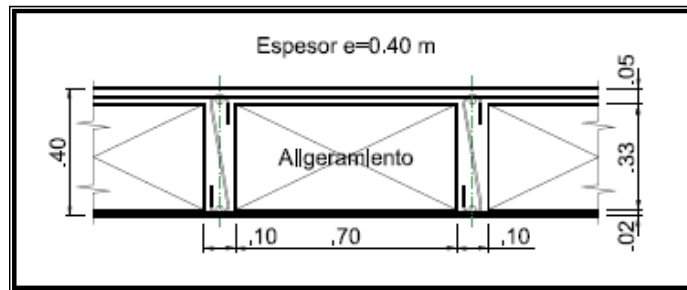


Figura 2.3 Detalles de la placa típica de entrepiso



2.1.2 Geometría de los sistemas de cimentación. Al realizar los análisis dinámicos y estáticos de la edificación, se obtuvieron las cargas que transmite la superestructura a través de las columnas a la cimentación; por medio de las combinaciones de estas cargas (Hipótesis de carga), se harán comparaciones entre el comportamiento de cada tipo de cimentación fundados sobre cada perfil de suelo.

2.1.2.1 Cimentación Superficial (losa). Para el análisis de los desplazamientos que se producen en este tipo de cimentación, solo se necesitan las características geométricas del sistema monolítico; de acuerdo a la composición estructural del edificio y tomando como base el método rígido convencional para el diseño de losas de cimentación [13] Se obtiene las siguientes dimensiones (figura 2.4):

- 15m (para la longitud más larga en sentido Y)
- 11m (para la longitud más corta en sentido X)
- 1.20m (para el espesor de la losa)

Figura 2.4 Dimensiones de la losa

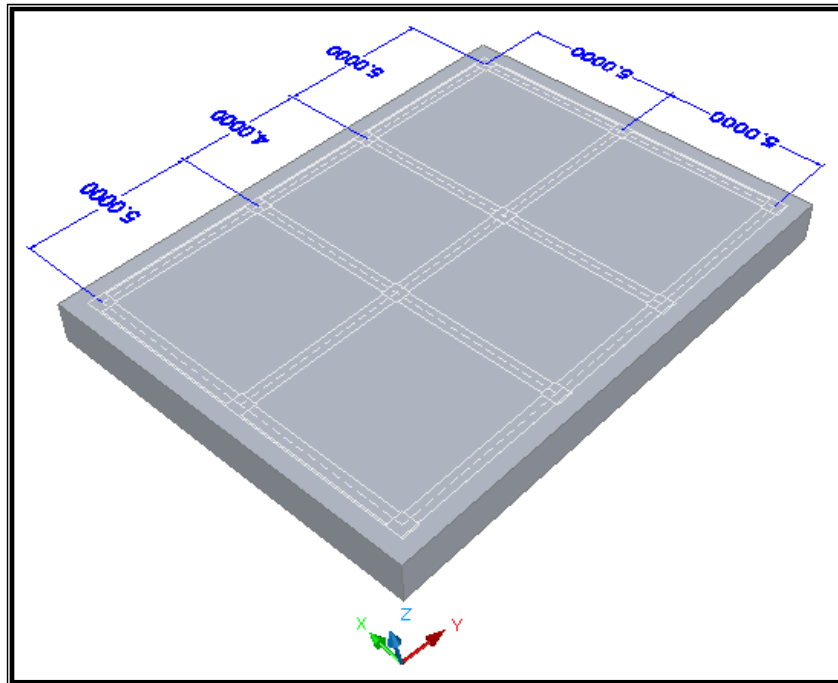
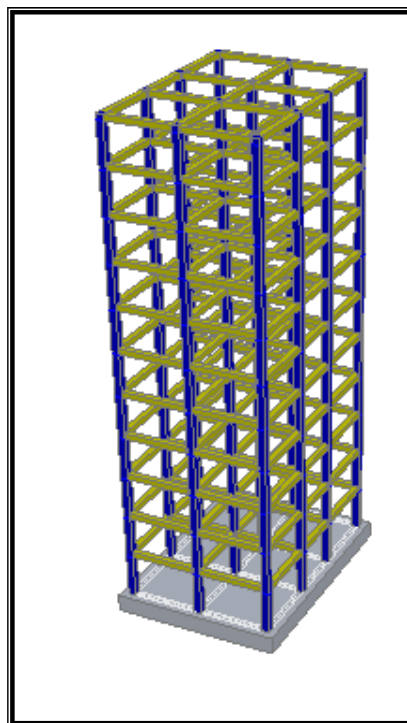


Figura 2.5. Vista 3d de la superestructura con la cimentación superficial

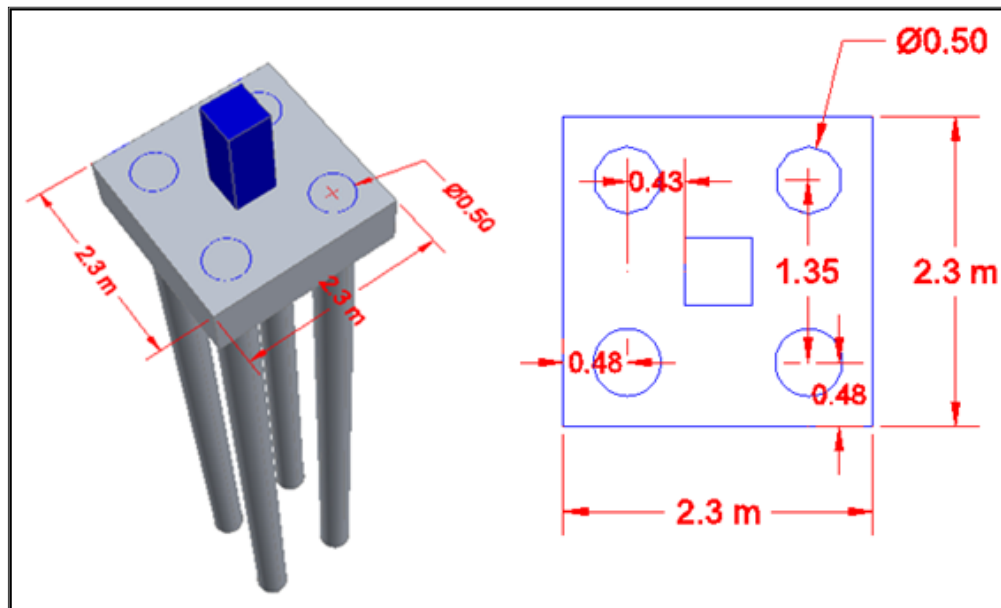


No es necesario tener en cuenta la distribución del acero de refuerzo en los elementos que componen los tipos de cimentación debido a que se realizara un análisis y no un chequeo de diseño .

2.1.2.2 Cimentación Profunda (pilotes). Para hacer el análisis de desplazamiento de la estructura, el modelo requiere las características geométricas de los encepados de pilotes sobre los cuales estará cimentada la estructura, :

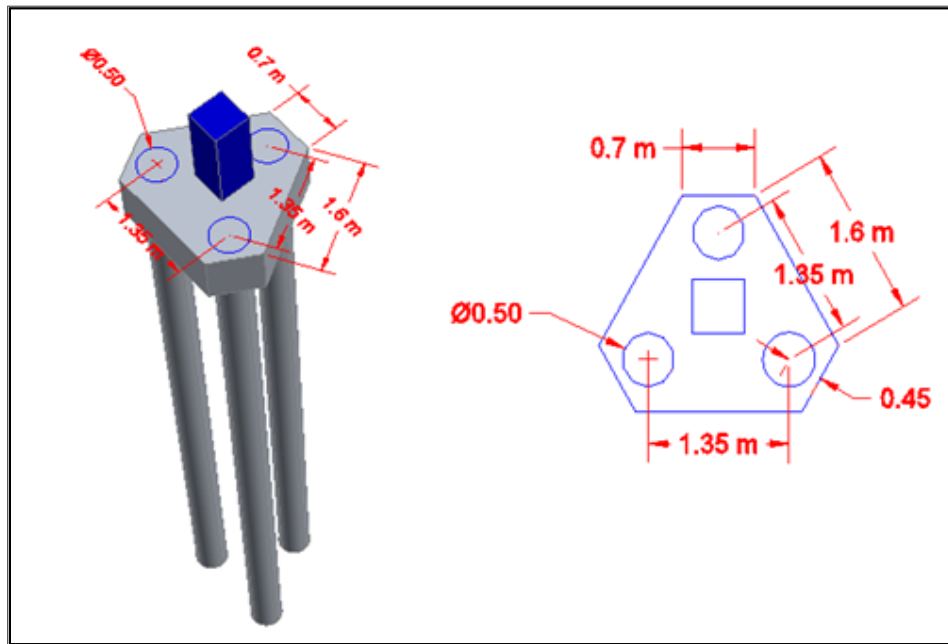
Según la NTE [28] Para las columnas B-2 y C-2 (columnas más cargadas). Se propone un encepado rectangular de 2,30m * 2,30m, con un espesor de 0,70m, y con 4 pilotes de 0,50m de diámetro y 14 m de largo figura 2.6.

Figura 2.6. Encepado mas pilote, para columnas B-2 y C-2 (mas cargadas)



Para las columnas A-1, A-2, A-3, B-1, B-3, C-1, C-3, D-1, D-2, y D-3 Se propone un encepado poligonal con un espesor de 0,70m para 3 pilotes de 0,50m de diámetro y 14 m de largo, figura 2.7.

Figura 2.7. Encepado mas pilote para columnas B-1, C-1, B-3, C-3, A-2, D-2, A-1, D-1, A-3 y D-3



.Figura 2.8. Distribución de los encepados+ pilotes para el edificio.

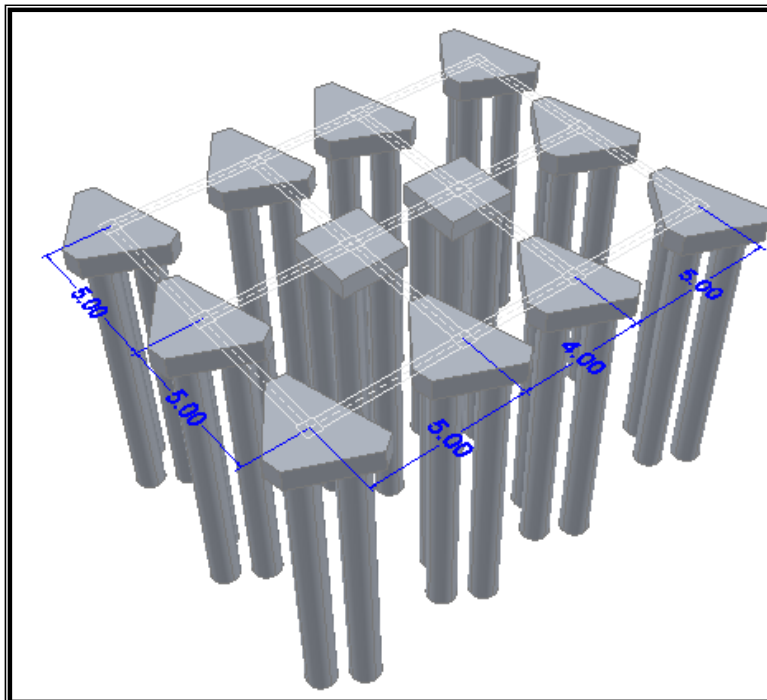
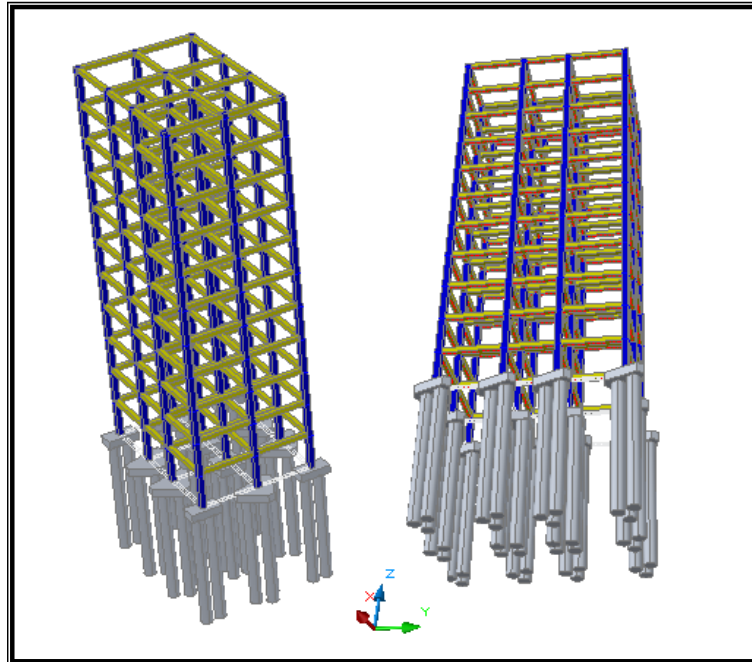
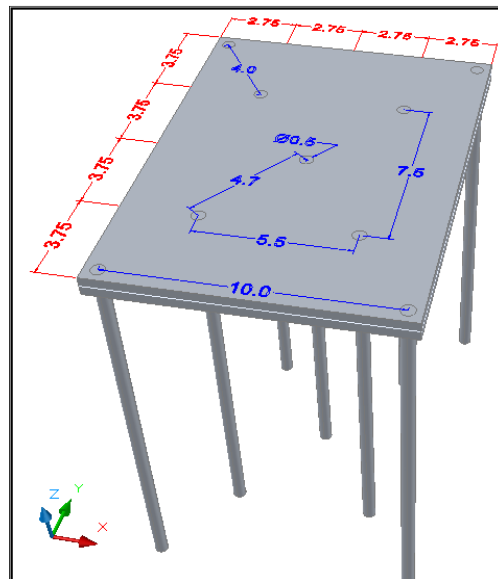


Figura 2.9. Vista de la superestructura con la cimentacion profunda



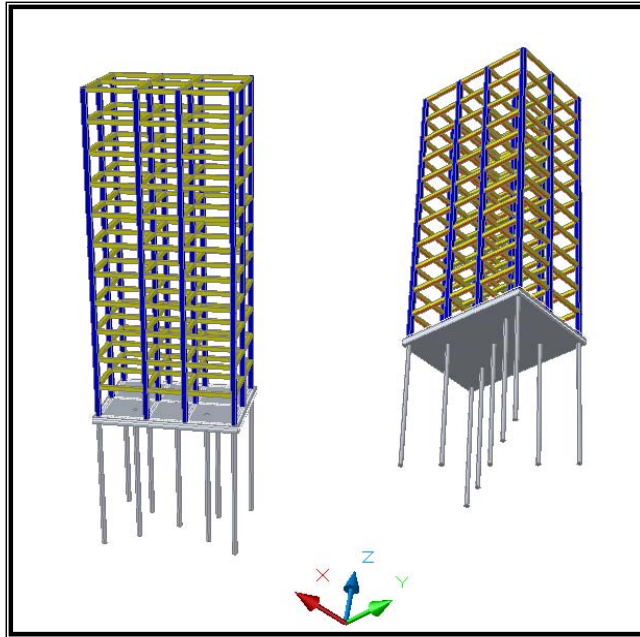
2.1.2.3 Cimentación Combinada o mixta (losa-pilote). Para las dimensiones de la cimentación combinada se uso el método tradicional de modulo de balasto descrito en el capitulo anterior.

Figura 2.10 Distribucion de los pilotes sobre la placa para cimentacion combinada



Losa de 15 m de largo por 11m de ancho y 0,70m de espesor con 9 pilotes de 0,50m de diámetro y 14m de largo. (Figura 2.13).

Figura 2.11 Vista de la superestructura para la cimentación combinada



2.2 MATERIALES

Los materiales para los elementos estructurales son:

Concreto $f_c = 21 \text{ Mpa}$

Acero de refuerzo $f_y = 420 \text{ Mpa}$.

Como se menciona anteriormente no será tomada en cuenta la distribución de los aceros de refuerzo en los elementos, pero para el análisis de cada sistema de cimiento es necesario especificar las características de los materiales que componen cada uno de los miembros estructurales.

2.3 ANÁLISIS MODAL

El análisis modal es utilizado para determinar los modos de vibración de la estructura, en el cual se tendrá en cuenta la acción de las cargas gravitacionales, tanto la carga viva (L) como la carga muerta (D), siendo la masa de la estructura tomada de estas cargas.

Los resultados del análisis modal se encuentran en la tabla 2.33

2.4 CONTROL DE DERIVAS

Para saber cómo se comporta la estructura ante una carga sísmica se realiza un análisis de espectro de respuesta, que no es más que un análisis dinámico, reducido a una serie de análisis estáticos. El análisis de espectro de respuesta usa las propiedades de vibración de la estructura, derivados del análisis modal y de las características dinámicas del sismo por medio del respectivo espectro de respuesta [26].

En la tabla 2.34, se observa que la deriva para cada nivel es menor del 1%, por esto, se conservan las dimensiones propuestas para los elementos estructurales.

2.5 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL TERRENO

Con el fin de obtener una mejor interpretación de la interacción entre el suelo y la cimentación se realizarán los modelos del sistema de fundación sobre 10 perfiles diferentes de terreno; a continuación se observan los perfiles de suelo:

Tabla 2.1 Perfil 2.1

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	Arena compacta ángulo(γ) = 32° Gsat=2,0 Ton/m3
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	Arcilla rígida qu= 5,4 Kg/cm2 Gsat=1,9Ton/m3 Cc=0,26 e=0,8
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	

Tabla 2.2 Perfil 2.2

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	Arena compacta ángulo(γ) = 32° Gsat=2,0 Ton/m3
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	

Tabla 2.3 Perfil 2.3

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	Arcilla rígida qu= 5,4 Kg/cm2 Gsat=1,9Ton/m3 Cc=0,26 e=0,8
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	

Tabla 2.4 Perfil 2.4

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	Arena Limosa suelta ángulo(γ) = 27° Gsat=1,8 Ton/m3
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	Arena compacta ángulo(γ) = 32° Gsat=2,0 Ton/m3
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	

Tabla 2.5 Perfil 2.5

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	arcilla blanda qu=0,46 Kg/cm2 Gm=1,6 Ton/m3 Cc=0,35 e=1
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	Arcilla rígida qu= 5,4 Kg/cm2 Gsat=1,9Ton/m3 Cc=0,26 e=0,8
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	

Tabla 2.6 Perfil 2.6

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	arcilla blanda qu=0,46 Kg/cm2 Gm=1,6 Ton/m3 Cc=0,35 e=1
2	
3	
4	
5	
6	
7	Arena Limosa suelta ángulo(γ) = 27° Gsat=1,8 Ton/m3
8	
9	
10	Arcilla rígida qu= 5,4 Kg/cm2 Gsat=1,9Ton/m3 Cc=0,26
11	
12	
13	
14	
15	
16	Arena compacta ángulo(γ) = 32° Gsat=2,0 Ton/m3
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	

Tabla 2.7 Perfil 2.7

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	Arena Limosa suelta ángulo(γ) = 27° Gsat=1,8 Ton/m3
2	
3	
4	
5	
6	
7	arcilla blanda qu=0,46 Kg/cm2 Gm=1,6 Ton/m3 Cc=0,35 e=1
8	
9	
10	
11	
12	
13	Arena compacta ángulo(γ) = 32° Gsat=2,0 Ton/m3
14	
15	
16	
17	
18	
19	Arcilla rígida qu= 5,4 Kg/cm2 Gsat=1,9Ton/m3 Cc=0,26
20	
21	
22	
23	
24	

Tabla 2.8 Perfil 2.8

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	Arena Limosa suelta ángulo(γ) = 27° Gsat=1,8 Ton/m3
2	
3	
4	
5	
6	
7	Arena compacta ángulo(γ) = 32° Gsat=2,0 Ton/m3
8	
9	
10	
11	
12	
13	arcilla blanda qu=0,46 Kg/cm2 Gm=1,6 Ton/m3 Cc=0,35 e=1
14	
15	
16	
17	
18	
19	Arcilla rígida qu= 5,4 Kg/cm2 Gsat=1,9Ton/m3 Cc=0,26
20	
21	
22	
23	
24	

Tabla 2.9 Perfil 2.9

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	arcilla blanda qu=0,46 Kg/cm2 Gm=1,6 Ton/m3 Cc=0,35 e=1
2	
3	
4	
5	
6	
7	Arcilla rígida qu= 5,4 Kg/cm2 Gsat=1,9Ton/m3 Cc=0,26
8	
9	
10	
11	
12	
13	Arena Limosa suelta ángulo(γ) = 27° Gsat=1,8 Ton/m3
14	
15	
16	
17	
18	
19	Arena compacta ángulo(γ) = 32° Gsat=2,0 Ton/m3
20	
21	
22	
23	
24	

Tabla 2.10 Perfil 2.10

PROFUNDIDAD	PERFIL DEL SUELO
1	Arcilla rígida qu= 5,4 Kg/cm ² Gsat=1,9Ton/m ³ Cc=0,26 e=0,8
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	Arena compacta ángulo(γ) = 32° Gsat=2,0 Ton/m ³
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	

2.6 HIPÓTESIS DE CARGA

Una de las tareas más importantes del ingeniero es determinar de la manera más precisa posible el valor de las cargas que soportará la estructura y que son transmitidas a la cimentación durante su vida útil, así como su posición.

Aquí se analizará el cálculo de los siguientes tipos de cargas:

- Cargas muertas

- Cargas vivas
- Cargas de Sismo

Estos resultados se muestran en las tablas 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 y 2.16

2.6.1 Cargas Muertas. Son aquellas cuya magnitud y posición permanecen prácticamente constantes durante la vida útil de la estructura. Consisten en los pesos de los diversos miembros estructurales y en los pesos de cualesquier objeto que estén permanentemente unidos a la estructura, entre otros:

- Columnas
- Vigas
- Losas
- Muros
- Ventanas
- Plomería
- Instalaciones eléctricas y sanitarias

2.6.2 Cargas Vivas. Son cargas variables en magnitud y posición debidas al funcionamiento propio de la estructura. Pueden ser causadas por los pesos de los objetos colocados temporalmente sobre una estructura, por ejemplo:

- Personal.
- Mobiliario.
- Empujes de cargas de almacenes.

Las cargas mínimas especificadas en los códigos se determinan estudiando la historia de sus efectos sobre estructuras existentes. Usualmente esas cargas incluyen un margen para tener una protección contra deflexiones excesivas o sobrecargas repentinas.

Se supone que los pisos de edificios están sometidos a cargas vivas uniformes, que dependen del propósito para el cual el edificio es diseñado. Estas cargas están tabuladas en códigos locales, estatales o nacionales.

2.6.3 Cargas de Sismo. Los sismos producen cargas sobre una estructura por medio de la interacción del movimiento del suelo y las características de respuesta de la estructura. Esas cargas resultan de la distorsión en la estructura causada por el movimiento del suelo y la resistencia lateral de ésta. Sus magnitudes dependen de la velocidad y tipo de aceleraciones del suelo, así como de la masa y rigidez de la estructura.

Estas cargas se pueden determinar como fuerzas estáticas horizontales aplicadas a las masas de la estructura, aunque en ocasiones debido a la altura de los edificios o esbeltez se hace necesario un análisis dinámico para determinar las fuerzas máximas a que estará sometida la estructura.

En la práctica, los efectos de la aceleración, velocidad y desplazamiento de una estructura pueden determinarse como un espectro de respuesta sísmica. Una vez establecida esta gráfica, las cargas sísmicas pueden calcularse usando un análisis dinámico basado en la teoría de la dinámica estructural. Este análisis es a menudo muy elaborado y requiere el uso de una computadora. Aunque éste puede ser el caso, tal análisis es obligatorio si la estructura es muy grande.

Una de las tareas más importantes del proyectista es determinar de la manera más precisa posible el valor de las cargas que soportará la estructura durante su vida útil, así como su posición y también determinar las combinaciones más desfavorables que de acuerdo a los reglamentos pueda presentarse.

Para este proyecto se evaluarán los siguientes tipos de cargas:

- Cargas muertas
- Cargas vivas
- Cargas de Sismo

Tablas de cargas muerta, viva y de sismo

Tabla 2.11. Fuerza Interna Resultante del Análisis Estructural del Edificio por carga Muerta

FUERZA INTERNA POR CARGA MUERTA								
LOSA	COLUMNA	CARGA	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
BASE	A1	MUERTA	3.47	11.66	1161.26	-11.247	3.344	0
BASE	B1	MUERTA	5.1	-3.78	1721.41	3.658	4.93	0
BASE	C1	MUERTA	5.1	3.78	1721.41	-3.658	4.93	0
BASE	D1	MUERTA	3.47	-11.66	1161.26	11.247	3.344	0
BASE	A2	MUERTA	0	20.96	1779.13	-20.281	0	0
BASE	B2	MUERTA	0	-6.91	2713.68	6.709	0	0
BASE	C2	MUERTA	0	6.91	2713.68	-6.709	0	0
BASE	D2	MUERTA	0	-20.96	1779.13	20.281	0	0
BASE	A3	MUERTA	-3.47	11.66	1161.26	-11.247	-3.344	0
BASE	B3	MUERTA	-5.1	-3.78	1721.41	3.658	-4.93	0
BASE	C3	MUERTA	-5.1	3.78	1721.41	-3.658	-4.93	0
BASE	D3	MUERTA	-3.47	-11.66	1161.26	11.247	-3.344	0

Tabla 2.12. Fuerza Interna Resultante del Análisis Estructural del Edificio por carga Viva

FUERZA INTERNA POR CARGA VIVA								
LOSA	COLUMNA	CARGA	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
BASE	A1	VIVA	0.39	1.86	140.26	-1.793	0.375	0
BASE	B1	VIVA	0.72	-0.61	231.65	0.586	0.697	0
BASE	C1	VIVA	0.72	0.61	231.65	-0.586	0.697	0
BASE	D1	VIVA	0.39	-1.86	140.26	1.793	0.375	0
BASE	A2	VIVA	0	3.57	240.27	-3.456	0	0
BASE	B2	VIVA	0	-1.18	401.9	1.15	0	0
BASE	C2	VIVA	0	1.18	401.9	-1.15	0	0
BASE	D2	VIVA	0	-3.57	240.27	3.456	0	0
BASE	A3	VIVA	-0.39	1.86	140.26	-1.793	-0.375	0
BASE	B3	VIVA	-0.72	-0.61	231.65	0.586	-0.697	0
BASE	C3	VIVA	-0.72	0.61	231.65	-0.586	-0.697	0
BASE	D3	VIVA	-0.39	-1.86	140.26	1.793	-0.375	0

Tabla 2.13. Fuerza Interna Resultante del Análisis Estructural del Edificio por carga Sismo en X

FUERZA INTERNA POR SISMO EN X								
LOSA	COLUMNA	CARGA	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
BASE	A1	SISMOX MAX	42.27	12.85	285.42	36.898	124.863	0
BASE	B1	SISMOX MAX	41.29	17.31	276.53	41.37	124.445	0
BASE	C1	SISMOX MAX	41.29	17.31	276.53	41.37	124.445	0
BASE	D1	SISMOX MAX	42.27	12.85	285.42	36.898	124.864	0
BASE	A2	SISMOX MAX	55.51	12.54	76.62	36.764	138.264	0
BASE	B2	SISMOX MAX	53.87	16.8	29.72	41.177	137.627	0
BASE	C2	SISMOX MAX	53.87	16.8	29.72	41.177	137.628	0
BASE	D2	SISMOX MAX	55.51	12.54	76.62	36.764	138.265	0
BASE	A3	SISMOX MAX	42.27	12.85	285.42	36.898	124.863	0
BASE	B3	SISMOX MAX	41.29	17.31	276.53	41.371	124.445	0
BASE	C3	SISMOX MAX	41.29	17.31	276.53	41.371	124.445	0
BASE	D3	SISMOX MAX	42.27	12.85	285.42	36.898	124.864	0

Tabla 2.14. Fuerza Interna Resultante del Análisis Estructural del Edificio por carga Sismo en Y

FUERZA INTERNA POR SISMO EN Y								
LOSA	COLUMNA	CARGA	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
BASE	A1	SISMOY MAX	12.71	42.75	267.98	122.757	37.531	0
BASE	B1	SISMOY MAX	12.41	57.6	128.88	137.636	37.405	0
BASE	C1	SISMOY MAX	12.41	57.6	128.88	137.636	37.405	0
BASE	D1	SISMOY MAX	12.71	42.75	267.98	122.757	37.531	0
BASE	A2	SISMOY MAX	16.69	41.7	254.9	122.312	41.559	0
BASE	B2	SISMOY MAX	16.19	55.91	98.88	136.994	41.368	0
BASE	C2	SISMOY MAX	16.19	55.91	98.88	136.994	41.368	0
BASE	D2	SISMOY MAX	16.69	41.7	254.9	122.312	41.559	0
BASE	A3	SISMOY MAX	12.71	42.75	267.98	122.758	37.531	0
BASE	B3	SISMOY MAX	12.41	57.6	128.88	137.637	37.405	0
BASE	C3	SISMOY MAX	12.41	57.6	128.88	137.637	37.405	0
BASE	D3	SISMOY MAX	12.71	42.75	267.98	122.758	37.531	0

Tabla 2.15. Tabla de análisis modal

PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN DE MASAS													
MODO	PERIODO	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
1	2.1	79.6	0.0	0.0	79.6	0.0	0.0	0.0	99.4	0.0	0.0	99.4	0.0
2	1.9	0.0	80.1	0.0	79.6	80.1	0.0	99.3	0.0	0.0	99.3	99.4	0.0
3	1.6	0.0	0.0	0.0	79.6	80.1	0.0	0.0	0.0	80.7	99.3	99.4	80.7
4	0.7	10.1	0.0	0.0	89.7	80.1	0.0	0.0	0.3	0.0	99.3	99.7	80.7
5	0.6	0.0	9.9	0.0	89.7	90.0	0.0	0.4	0.0	0.0	99.7	99.7	80.7
6	0.5	0.0	0.0	0.0	89.7	90.0	0.0	0.0	0.0	9.4	99.7	99.7	90.1
7	0.4	3.9	0.0	0.0	93.5	90.0	0.0	0.0	0.3	0.0	99.7	100.0	90.1
8	0.3	0.0	3.8	0.0	93.5	93.7	0.0	0.3	0.0	0.0	100.0	100.0	90.1

Tabla 2.16. Tablas control de derivas

LOSA	Item	CARGA	PUNTO	X	Y	Z	DERIVA X	DERIVA MIN EN X	OBSERVACIÓN
11	Diaph D1 X	DERIVAS	9	10	0	33	0.00345	0.03	CUMPLE
11	Diaph D1 Y	DERIVAS	70	0	8.2	33			
10	Diaph D1 X	DERIVAS	12	10	14	30	0.005085	0.03	CUMPLE
10	Diaph D1 Y	DERIVAS	74	10	8.2	30			
9	Diaph D1 X	DERIVAS	12	10	14	27	0.006525	0.03	CUMPLE
9	Diaph D1 Y	DERIVAS	70	0	8.2	27			
8	Diaph D1 X	DERIVAS	9	10	0	24	0.007625	0.03	CUMPLE
8	Diaph D1 Y	DERIVAS	70	0	8.2	24			
7	Diaph D1 X	DERIVAS	12	10	14	21	0.008495	0.03	CUMPLE
7	Diaph D1 Y	DERIVAS	74	10	8.2	21			
6	Diaph D1 X	DERIVAS	12	10	14	18	0.00925	0.03	CUMPLE
6	Diaph D1 Y	DERIVAS	74	10	8.2	18			
5	Diaph D1 X	DERIVAS	9	10	0	15	0.00996	0.03	CUMPLE
5	Diaph D1 Y	DERIVAS	74	10	8.2	15			
4	Diaph D1 X	DERIVAS	12	10	14	12	0.010633	0.03	CUMPLE
4	Diaph D1 Y	DERIVAS	70	0	8.2	12			
3	Diaph D1 X	DERIVAS	12	10	14	9	0.01103	0.03	CUMPLE
3	Diaph D1 Y	DERIVAS	70	0	8.2	9			
2	Diaph D1 X	DERIVAS	12	10	14	6	0.010229	0.03	CUMPLE
2	Diaph D1 Y	DERIVAS	74	10	8.2	6			
1	Diaph D1 X	DERIVAS	9	10	0	3	0.00553	0.03	CUMPLE
1	Diaph D1 Y	DERIVAS	4	0	14	3			

3. MODELAMIENTO ESTRUCTURAL

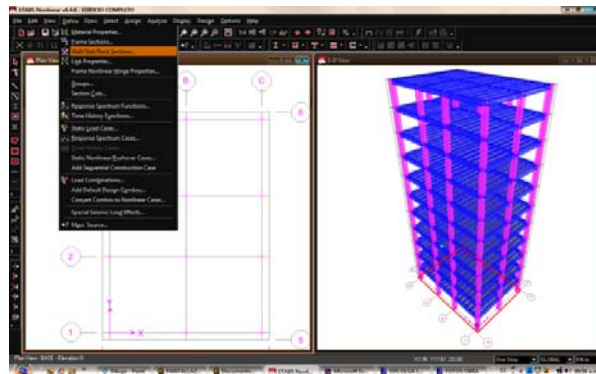
Después de obtener la sollicitación de carga impuesta por la superestructura, se pasa a modelar el comportamiento del conjunto suelo - cimentación. Dicho modelo se resolverá a través de los programas de elementos finitos Ansys Civil FEM (para encepado de pilotes), SAFE (para losas de cimentación) Y ETABS (para la cimentación combinada losa – pilotes)

3.1 MODELAMIENTO PARA LOSA

El programa ETABS se uso para exportar al SAFE las características geométricas y los materiales de elementos estructurales. Del modelo con el que se realizó el análisis del edificio para este proyecto se toman las características de la losa de cimentación.

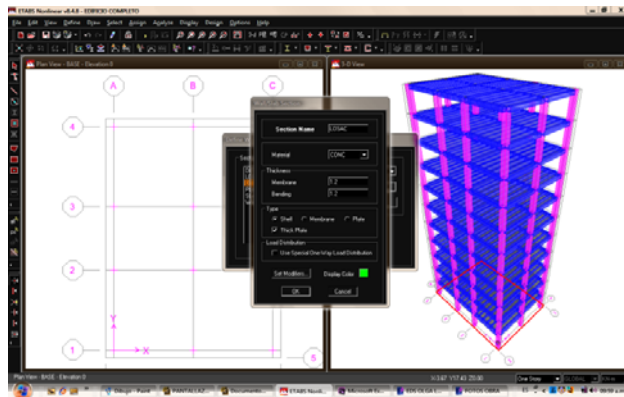
Primero se define la sección de la losa en el menú Define >Wall/Slab/Deck Section figura 3.1

Figura 3.1 Definición de sección de placa



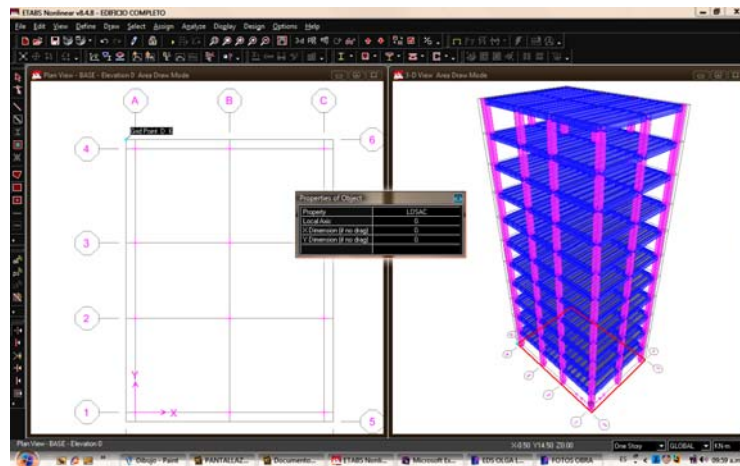
Introduciendo los datos como lo muestra la figura 3.2.

Figura 3.2 introducciones de las características del elemento



Después de definir las características de la losa , se procede a dibujar este elemento en la base del edificio , y para esto se utiliza Área Draw Mode con el cual se dibujan las áreas de los elementos picando sobre los puntos de contorno que esta posea, luego dar click en el botón Select Object representado por una flecha; es importante resaltar que para que el área que se esté dibujando corresponda a la sección previamente definida se debe ubicar en la ventana que aparece en la interface (figura 3.3) en la casilla Property la sección que se definió; en el caso de este proyecto el nombre de la sección es LOSAC.

Figura 3.3. Dibujo del área del elemento losac



En la ventana Export Options (Figura 3.6), se exporta el ítem BASE para que solo lleve a SAFE las características de la base del edificio al cual pertenece el elemento LOSAC

Figura 3.6. Exportación elemento LOSAC

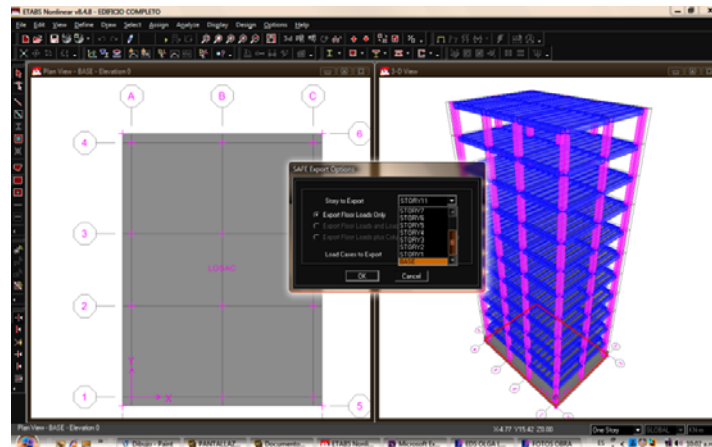
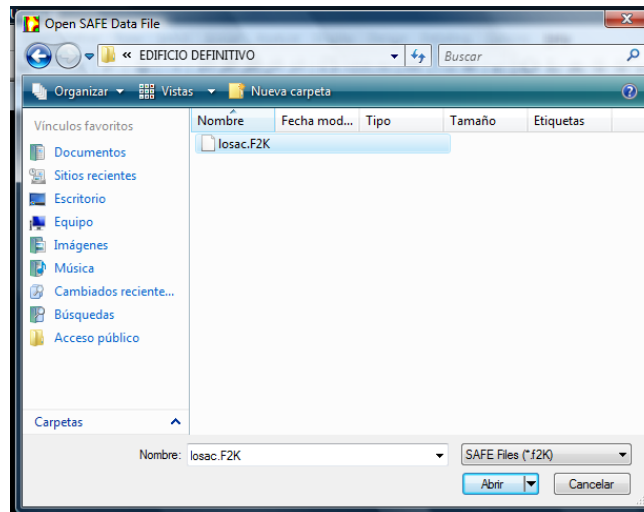


Figura 3.7. Apertura programa SAFE versión 8.0



Después de abrir el programa (figura 3.7) en el menú File > Import se ubica la carpeta donde se encuentra el archivo que previamente se exporto del ETABS (figura 3.8); que para este proyecto se denomino losac

Figura 3.8. Importación del archivo



Después de ubicar y abrir el archivo aparece la geometría y la sección transversal del elemento LOSAC figura 3.9

Figura 3.9. Elemento LOSAC exportado a SAFE

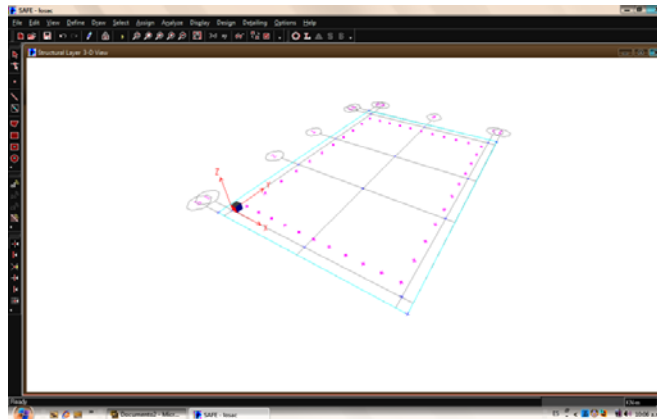
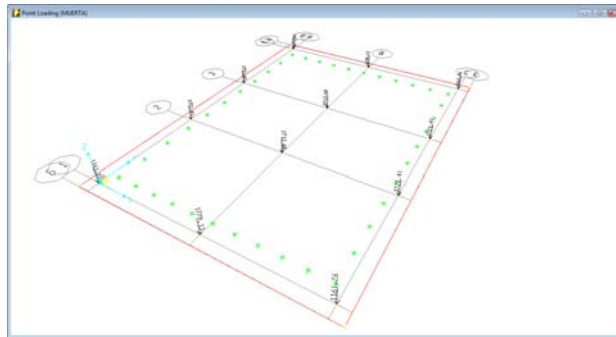


Figura 3.10. Modelo empleado



El modelo que utiliza SAFE para losas de cimentación es el que representa la figura 1.4, el cual modela el suelo como una serie de resortes con una constante K que utiliza la teoría del modulo de balasto para cimentaciones rectangulares del capítulo 1. Luego de exportado el modelo se procede a definir los perfiles de suelo asignando un modulo de balasto correspondiente a las características de cada estrato, en la tabla 3.1 se muestra las constantes de rigidez que se utilizaron para cada perfil de suelo según la teoría expuesta en el capítulo 1.

Para definir las características del suelo soporte se va al menú Define> Soil Supports (figura 3.10), se le asigna a cada perfil el nombre y el coeficiente de balasto en KN/m^3 como se puede observar en la figura 3.11.

Tabla 3.1. Tabla de rigidez para Losa

PERFIL	K
P2.1	18211.94
P2.2	6300
P2.3	10910
P2.4	4699.66302
P2.5	2671.20302
P2.6	3194.27066
P2.7	4532.03066
P2.8	10147.2588
P2.9	5337.18556
P2.10	12898.06

Figura 3.11. Definición suelo soporte

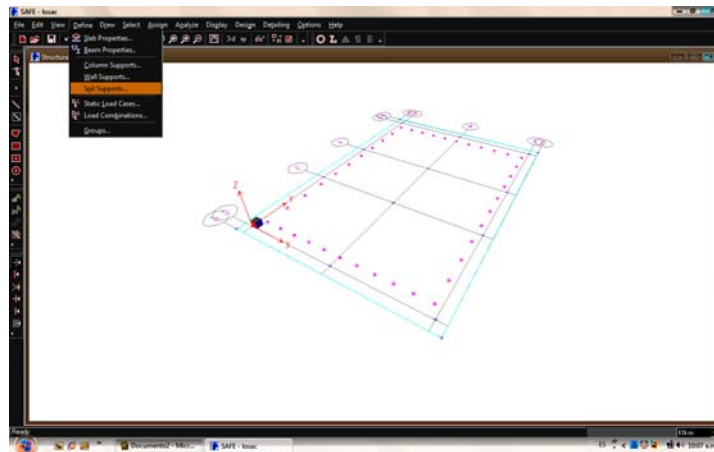
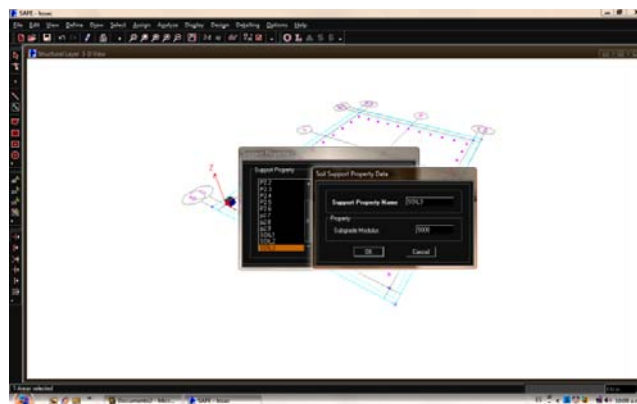
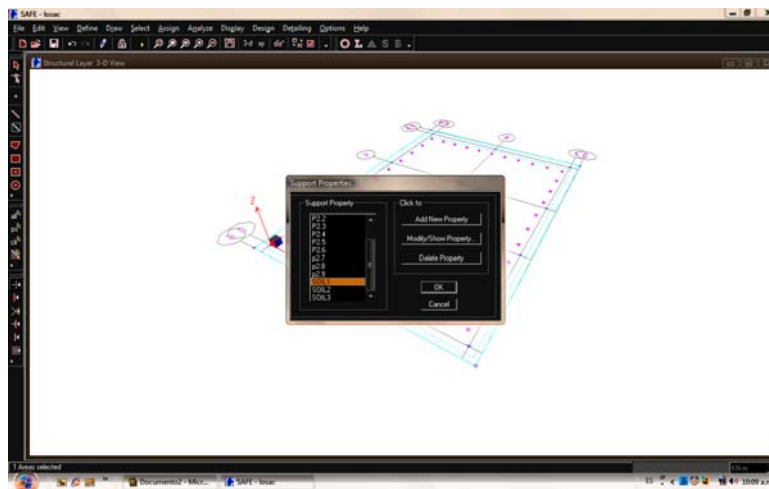


Figura 3.12. Introducción modulo de balasto de cada perfil



Después de definir cada perfil , se asigna el suelo soporte a la losa de cimentación , esto se hace primero dando click en el área de el elemento y luego menú Assign > Soil Support y se escoge el perfil sobre el cual estará soportada la losa . Esto se puede ver en la figura: 3.13

Figura 3.13. Venta para asignar el suelo soporte



Al tener definida en su totalidad las características que componen el modelo se pasa a cargar la estructura para el posterior análisis de desplazamientos , fuerzas y momentos en la losa de cimentación. Para asignar las cargas al elemento se debe picar sobre los puntos o áreas para los cuales existe una sollicitación de carga, como muestra la figura 3.14; con el comando Assign > Point Loads se introducen los datos correspondientes a las cargas.

Figura 3.14. Puntos donde se asignaran cargas

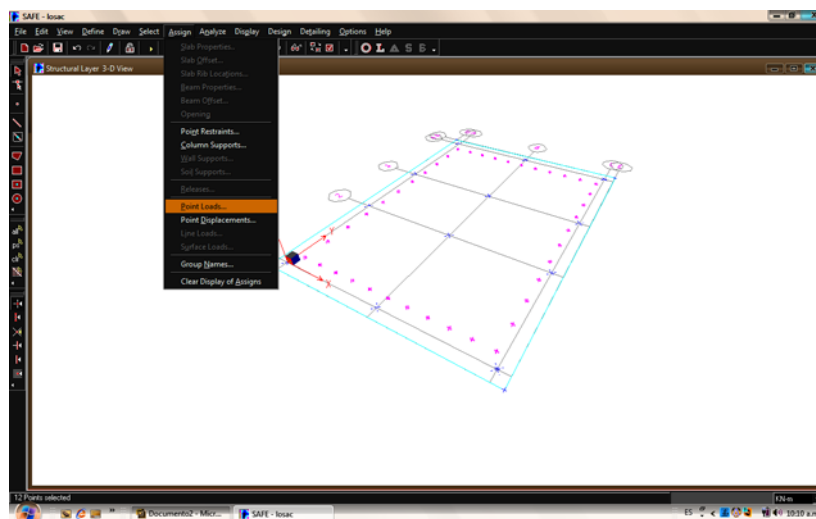
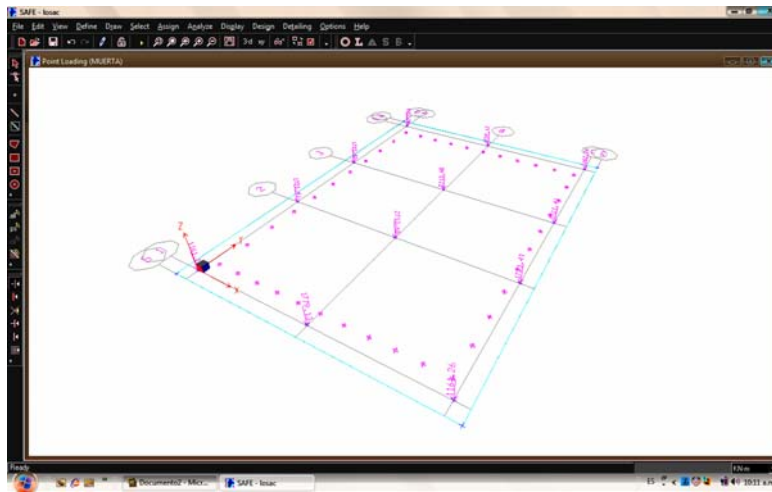
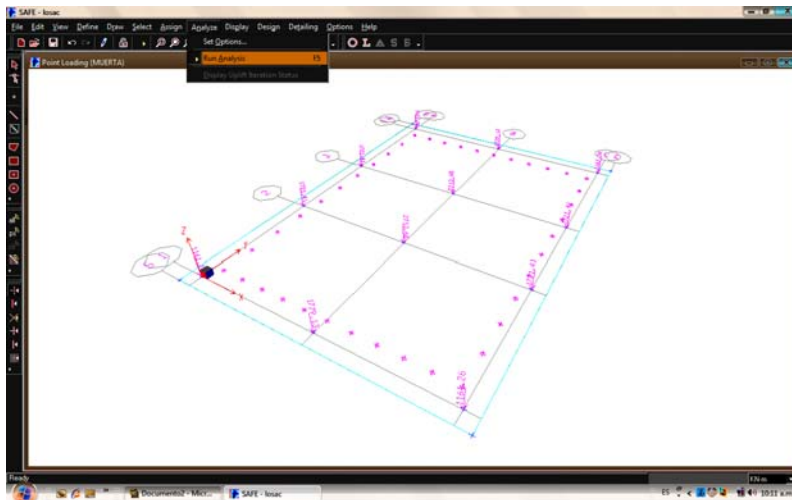


Figura 3.15. Cargas del modelo



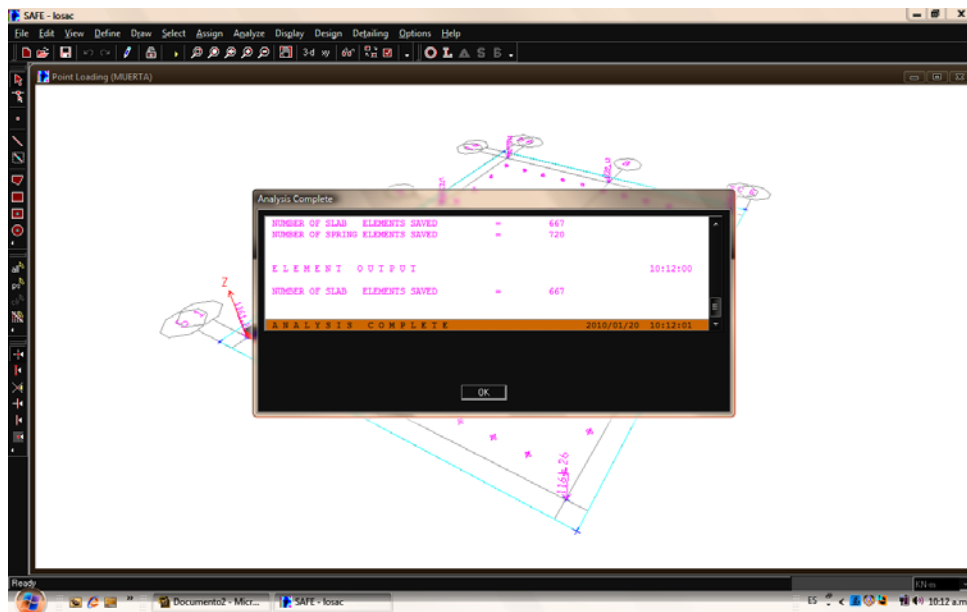
Ya definidas todas las características que integran el modelo se pasa al análisis con el comando `Analyze > Run Analysis` (figura 3.15)

Figura 3.16. Corrida del modelo



Después de correr el modelo aparece la ventana `Analysis Complete` figura 3.16, la cual indica que el SAFE ha calculado el modelo de acuerdo con las definiciones previamente realizadas.

Figura 3.17. Análisis completado



Para observar los resultados del modelamiento se utiliza el comando Display > Show Output Table como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 3.18. Menú para tabla de resultados

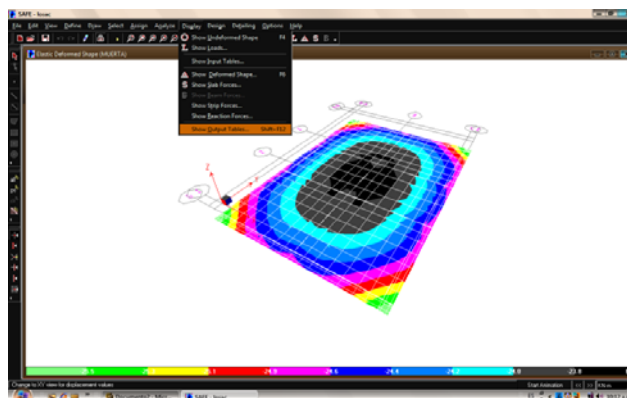
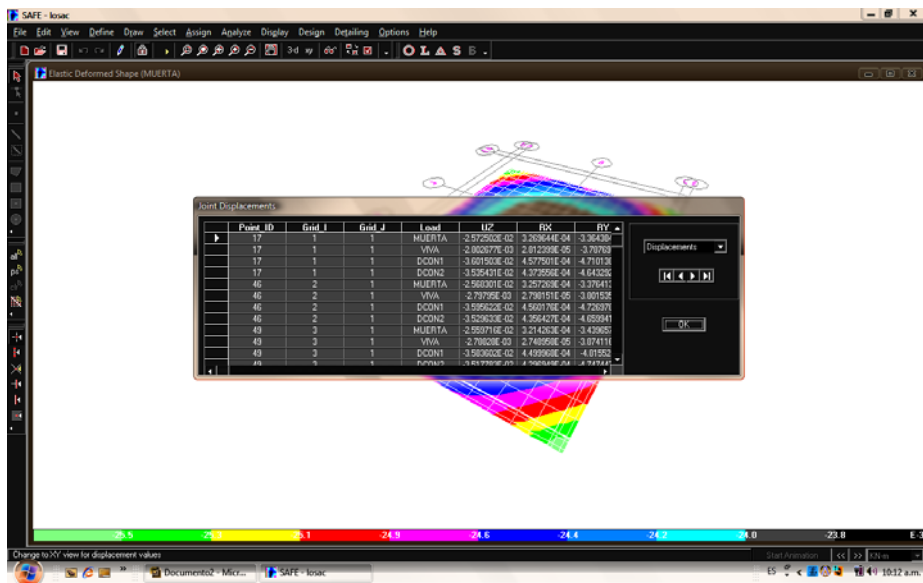


Figura 3.19. Tabla de resultados



Las siguientes graficas son los resultados que presenta SAFE para los casos modelados.

Figura 3.20. Deformacion elastica

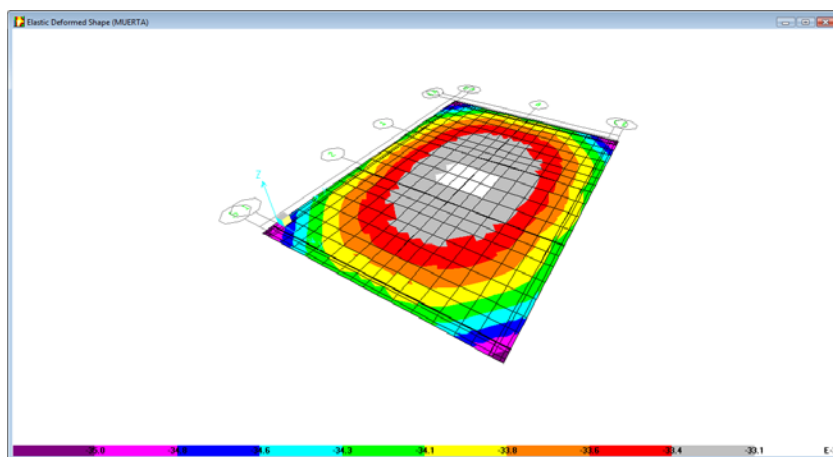


Figura 3.21. Cortante maximo

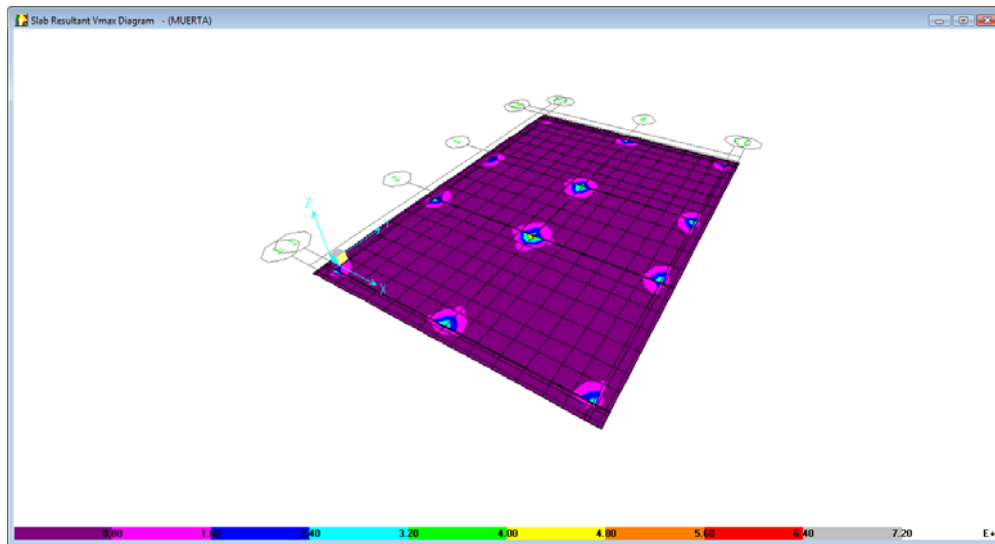
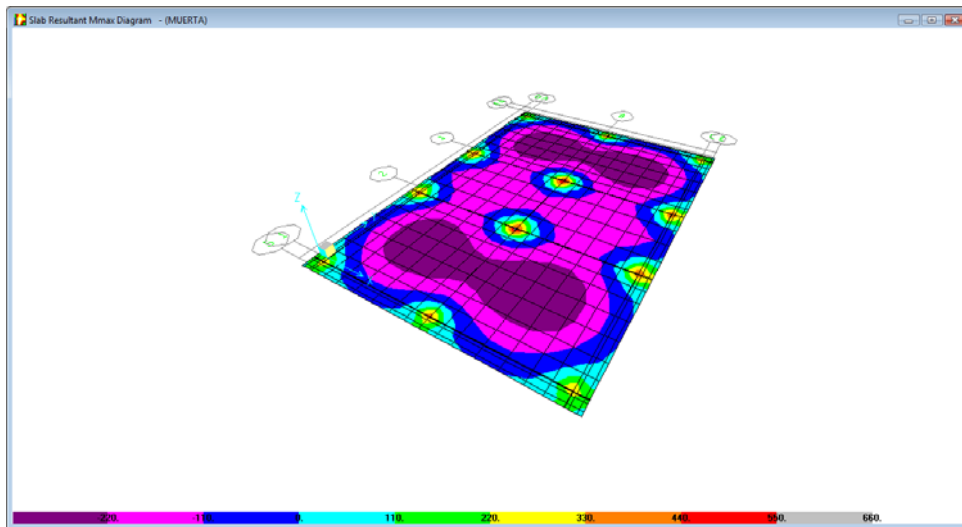


Figura 3.22. Momento maximo



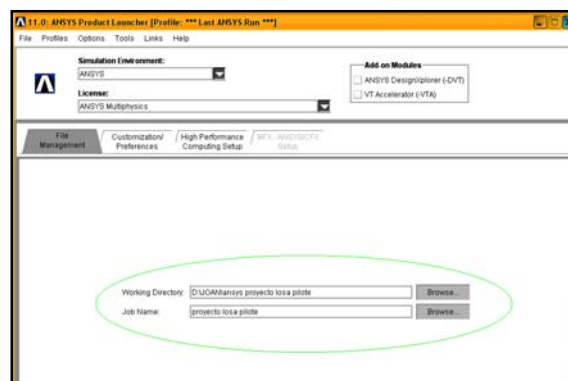
3.2 MODELAMIENTO PARA PILOTES

Figura 3.23. Apertura programa Ansys CivilFEM



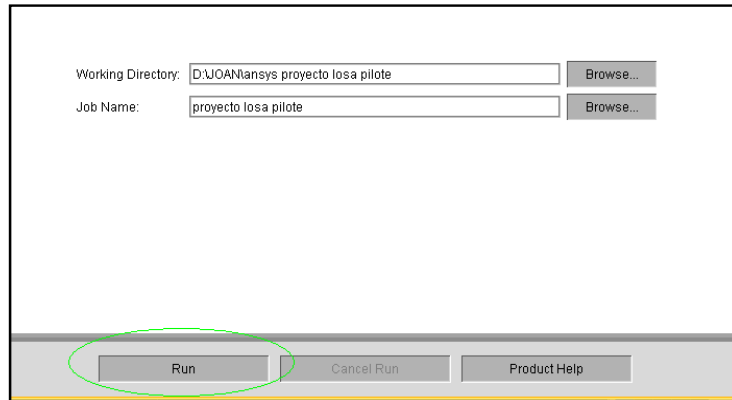
Luego de abrir el programa, se procede a crear una carpeta adicional en el PC, para archivar todo lo realizado en el programa. A continuación se busca la carpeta en la opción WORKING DIRECTORY, (para el caso de este proyecto D:\JOAN\ansys proyecto losa pilote), y de esta manera se archiva el proyecto; seguido de esto se nombra el archivo en la opción JOB NAME (*proyecto losa pilote*) figura 3.24.

Figura 3.24. Herramienta para guardar los datos del programa



Después de ubicar y nombrar el proyecto, se corre el programa en la opción RUN Figura 3.25.

Figura 3.25. Correr el programa



Como primera medida se definirá los códigos y unidades con las cuales se desarrollará el modelamiento, figura 3.27. Para esto se debe tomar la opción CIVIL SETUP, la cual abrirá una venta para definir estos códigos y unidades.

Para el acero (steel code) trabajaremos con la opción AISC – LRFD

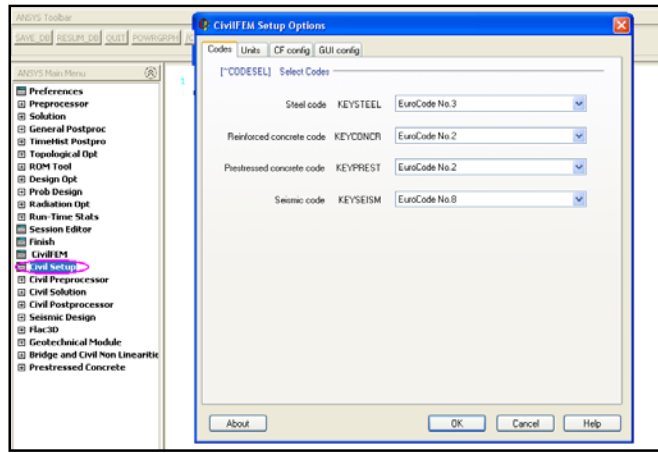
Para el concreto reforzado (Reinforced concrete code) trabajaremos con la opción ACI 318

Para el sismo (seismic code) trabajaremos con la opción AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

La opción del concreto pretensado no se tendrá en cuenta.

Luego de definir estos parámetros dar OK.

Figura 3.26. Código y unidades del modelamiento



En el menú CIVIL PREPROCESSOR > ELEMENT TYPES > CIVIL BEAMS se escoge la opción 3D Elast Beam 4 y OK. En el menú CIVIL SHELL se escoge la opción Elastic Shell 63 y OK, Figura 3.27.

Figura 3.27. Selección del tipo de elemento

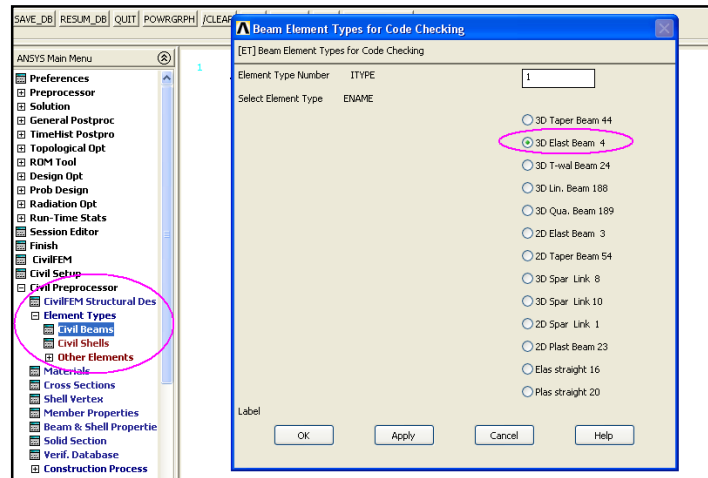
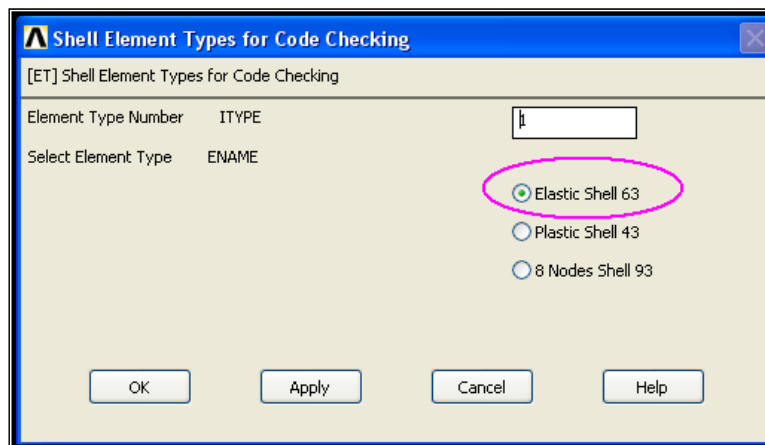


Figura 3.28. Tipos de elemento



Para definir los materiales de los elementos estructurales se utiliza CIVIL PREPROCESSOR > MATERIALS, >NEW (ventana adicional), se eligen las características de los materiales por ejemplo: Concreto (CONCRETE), acero de refuerzo (REINFORCING STEEL) y el tipo de suelo que se quiere evaluar (SOIL), Figura 3.29.

Al abrir la ventana donde se definen estos materiales nuevos se buscan los apropiados y se pulsa el botón Add.

Este proceso se repetirá para cada uno de los materiales.

Figura 3.29. Materiales de Elementos estructurales

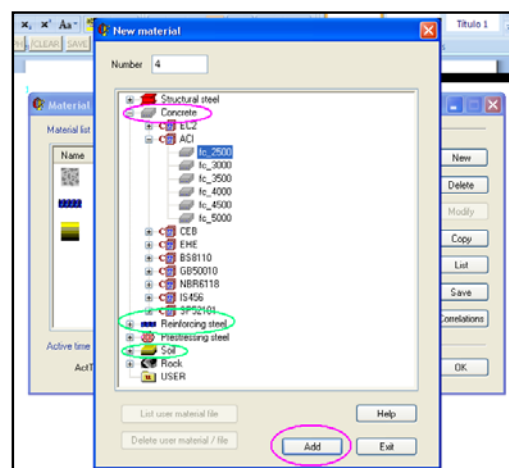
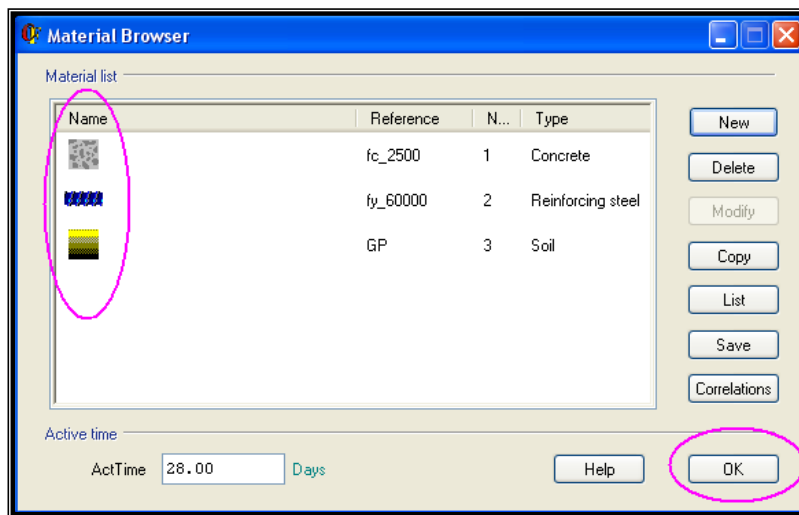
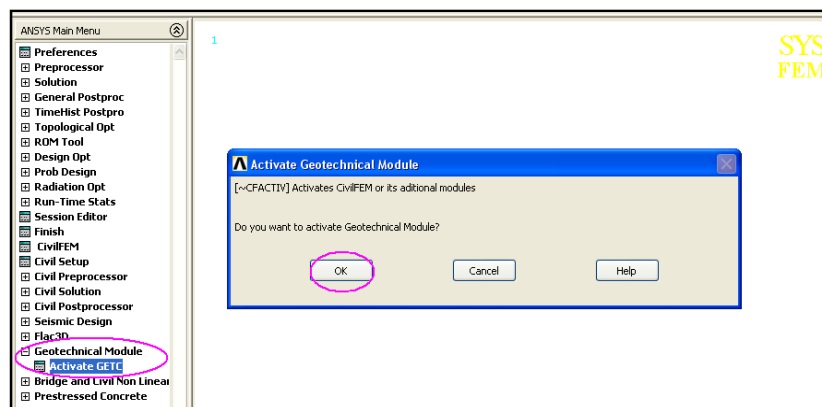


Figura 3.30. Ventana para la Definición de cada material



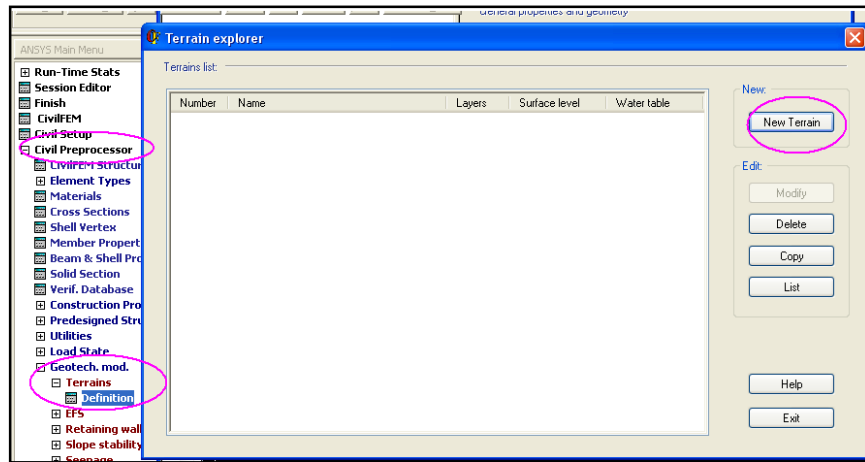
El paso a seguir es la activación del modulo de geotecnia, Figura 3.31.

Figura 3.31. Activación del modulo de geotecnia



Con CIVIL PREPROCESSOR > GEOTECH. MOD. > TERRAINS > Defition > NEW TERRAIN, Figura 3.31, se definen cada uno de los perfiles de suelo mostrados en las tablas desde la 2.1 a la 2.10 .

Figura 3.32. Definición del terreno



Al crear un nuevo terreno aparece la siguiente ventana.

En la parte superior derecha de la ventana (*General properties and geometry*) se introducen los datos generales del terreno:

- *Ueth*: Número identificativo del terreno.
- *Name*: Nombre del terreno.
- *NLayer*: Número de estratos que componen el terreno.
- *eaKcn*: Sistema de coordenadas del terreno.
- *eaDir*: Eje que define la dirección de la gravedad.
- *SurfLv*: Cota de la superficie.
- β : Ángulo que forman los estratos con la horizontal.
- *Q*: Sobre carga sobre la superficie.
- *wKey*: Etiqueta que define si se considera el nivel freático o no.
- *wh*: Cota del nivel freático.

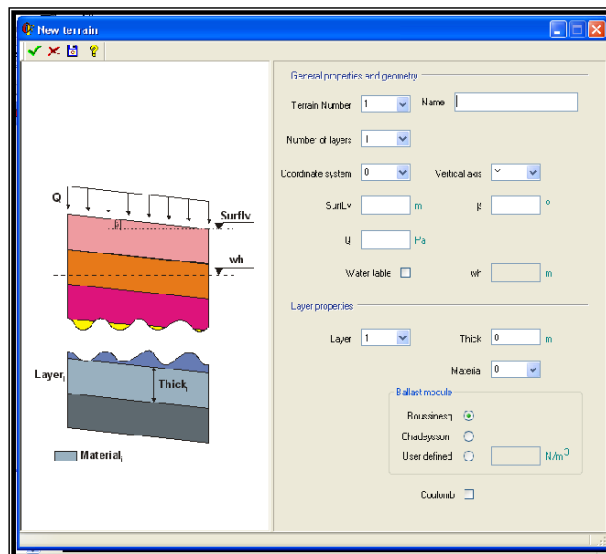
En la parte inferior derecha (*Layer properties*) se definen los parámetros de cada uno de los estratos. Estos parámetros son:

- *Layer*: Número del estrato. Comenzando por el estrato superior y en orden consecutivo según se desciende en cota.

- **Thick:** Potencia del estrato.
- **Material:** Número del material que define el estrato.
- **Ballast Module:** Módulo de balasto horizontal (empleado en la resolución de pantallas). Se puede seleccionar una de las tres opciones: Boussinesq, Chadeysson o definido por el usuario (*User defined*).
- **Coulomb:** Tipo de empuje a considerar en el cálculo. Si no se activa esta casilla se utilizarán los coeficientes de empuje definidos en la base de datos del material (teoría de Rankine). Si se activa, los coeficientes se re calculan durante el cálculo para adaptarse a la teoría de Coulomb.
- Este parámetro no está disponible en esta versión de CivilFEM.

Para cambiar las propiedades de un terreno previamente definido, hay que pulsar sobre el botón *Modify*. La ventana que aparece es la misma que la de creación de terrenos, con la única salvedad de que el campo *Ueth* está deshabilitado [25].

Figura 3.33. Definición de cada tipo de terreno



De esta forma ya definido los terrenos pasamos a las características de los pilotes, losa o losa pilote, aquí se mostrará primero pilotes con sus debidos encepados.

- Encepados poligonales
- Encepados rectangulares

Encepados rectangular

Este tipo de encepados tienen las siguientes características:

- Losa rectangular.
- Todos los pilotes deben de ser circulares y de las mismas características.
- El pilar ha de ser rectangular y puede estar situado en cualquier lugar de la losa
- La estructura estará sometida a las cargas transmitidas por el pilar, además de a su peso propio y a una posible sobrecarga extendida sobre toda la losa.

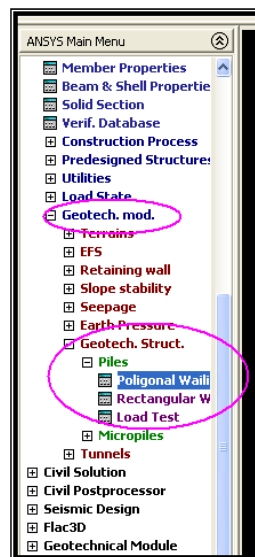
Encepados poligonales

Este tipo de encepados tienen las siguientes características:

- Losa circular o poligonal regular.
- Todos los pilotes deben ser circulares y de las mismas características.
- La estructura estará sometida a las cargas transmitidas por un pilar, circular o rectangular, situado en el centro de la losa, además de su peso propio y a una posible sobrecarga extendida sobre toda la losa.
- El terreno puede estar formado por uno o varios estratos horizontales y cada uno de ellos puede ser arenoso o arcilloso.

De esta forma se escoge la opción de encepado que se quiere evaluar, Figura 3.34.

Figura 3.34. Tipo de encepado



Entrada de datos

La ventana para el diseño de este tipo de encepados se compone de una serie de apartados, marcados por pestañas en la parte superior:

- Geometría (*Geometry*)
- Cargas (*Loads*)
- Armaduras (*Reinforcement*)
- Terreno (*Soil*)
- Configuración (*Configuration*)
- Solución (*Solution*)
- Calcular la longitud de los pilotes (calculate length)

Lo que facilita la introducción de los datos.

NOTA: Si en algún desplegable aparece el símbolo ND> significa que el valor no está definido:



A continuación se muestra las ventanas que tiene el programa para definir las características de un modelo:

Geometría

En la primera pestaña se define la geometría de la losa, número de pilotes, etc.

En la figura se muestra los tipos de encepados, Figura 3.35 y Figura 3.36

Figura 3.35. Forma de los encepados poligonales

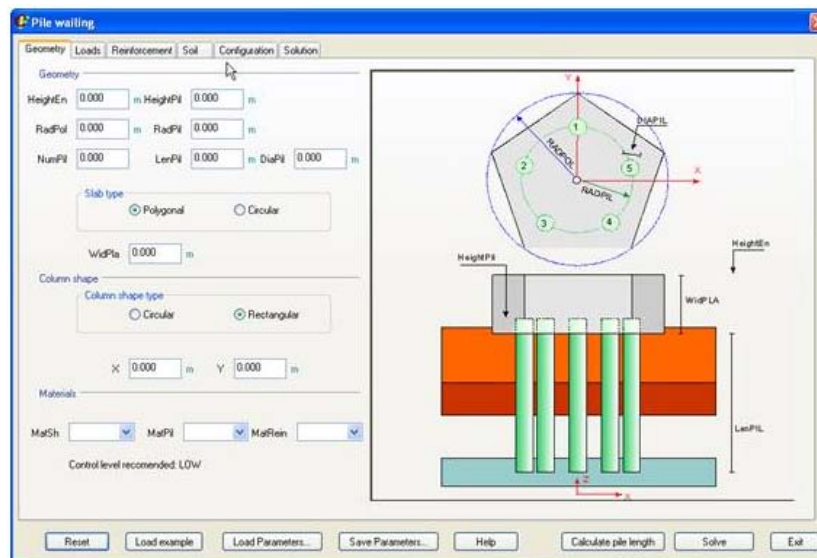
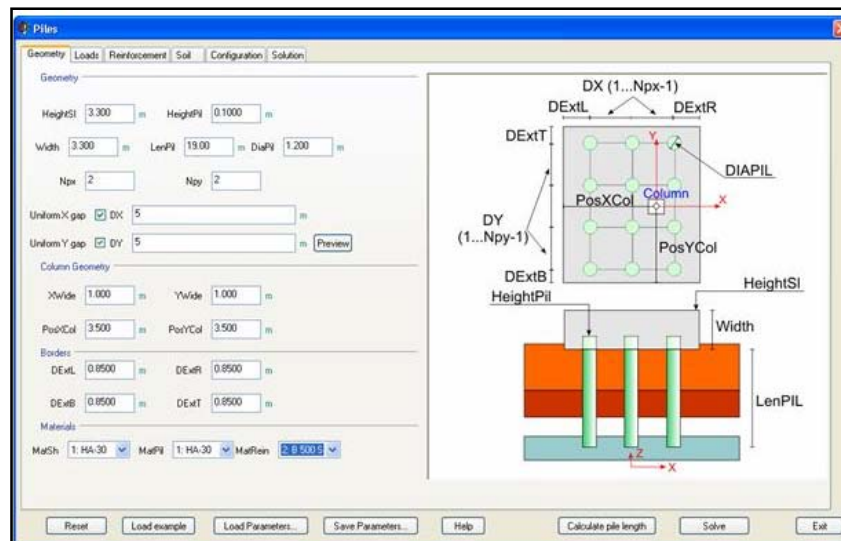


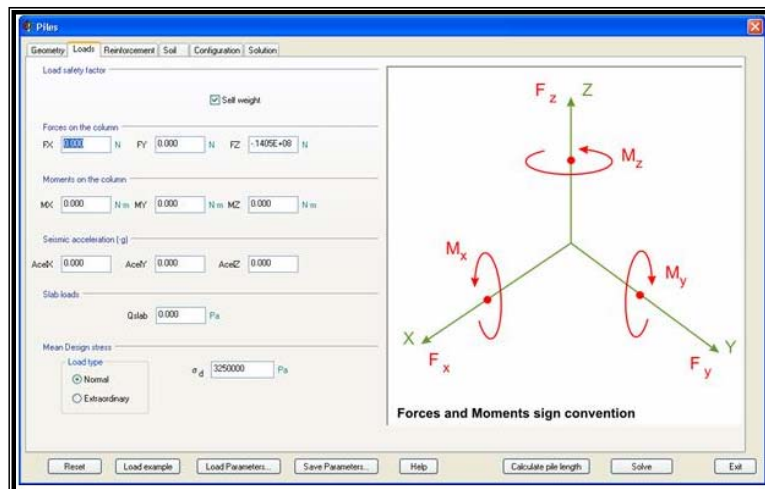
Figura 3.36. Forma de los encepados rectangulares



Cargas

Las cargas sobre la columna se definen en la segunda pestaña (Fuerzas y momentos, presión uniforme, tipo de cargas, etc.), Figura 3.37.

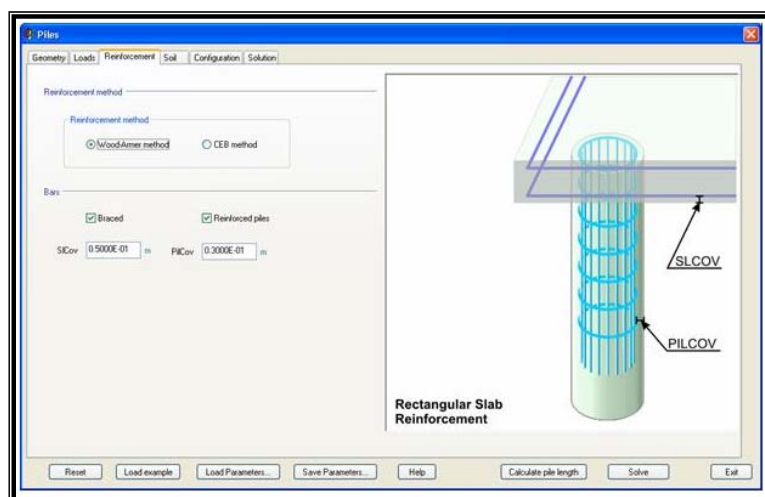
Figura 3.37. Cargas



Armaduras

Hace referencia a el refuerzo transversal y longitudinal del elemento, Figura 3.38.

Figura 3.38. Armadura

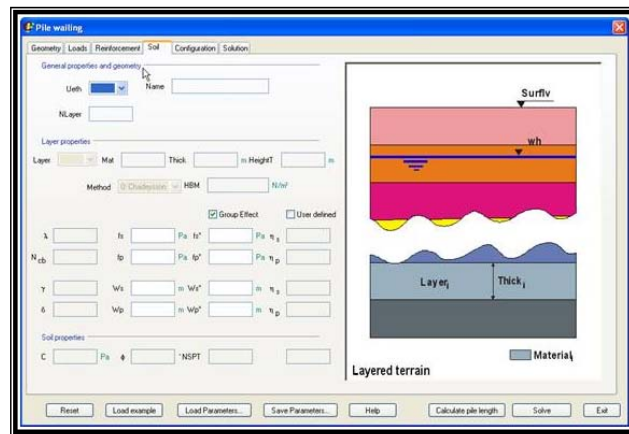


Terreno

Para concluir la definición del modelo, es necesario seleccionar el terreno estratificado soporte para el sistema de CIMENTACION.

Cabe mencionar que este terreno debe estar definido como se explico en los pasos anteriores. Figura 3.39.

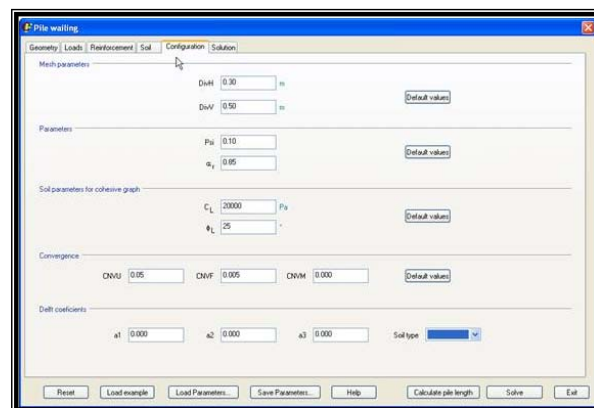
Figura 3.39. Diseño de terreno



Configuración

Los parámetros de configuración incluyen control del mallado y control de tolerancia y convergencia de las iteraciones. Existe la posibilidad de introducir valores por defecto con los botones "Default values. Figura 3.40.

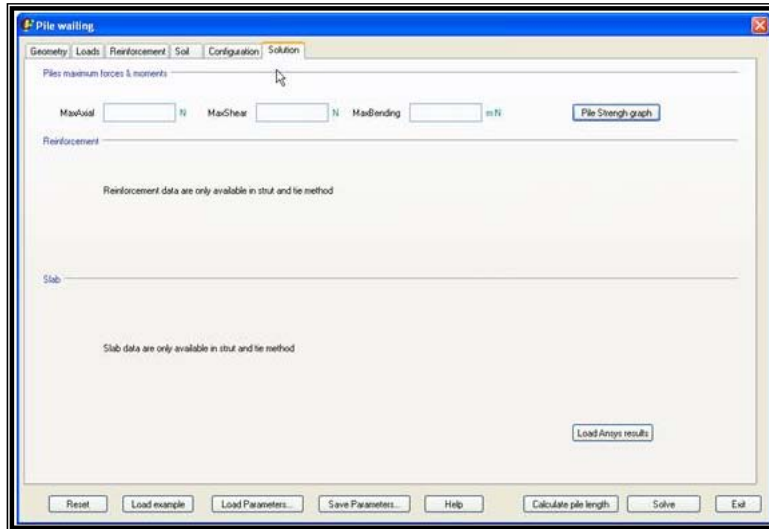
Figura 3.40. Configuración del terreno



Solución

En esta pestaña se obtienen los resultados del diseño. Figura 3.41.

Figura 3.41. Solución



El botón “*Load Ansys results*” sirve para cargar los resultados obtenidos previamente por el programa al haber presionado el botón *Solve*.

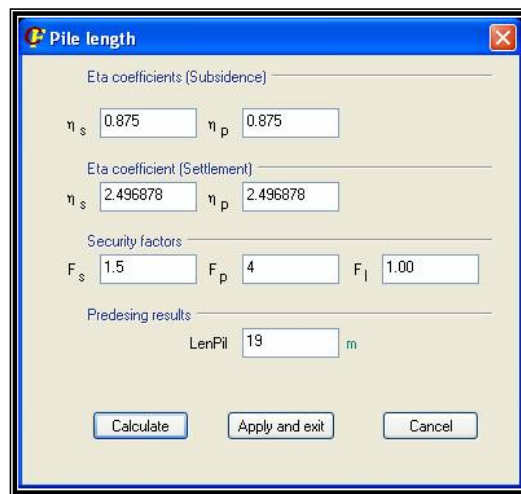
El botón “*Pile Strength graph*” muestra en Ansys el gráfico de la resistencia del pilote. Para ello es necesario haber cargado los resultados mediante el botón de “*Load Ansys results*”.

Otra opción que presenta este modulo de geotecnia es la facilidad para calcular la longitud de los pilotes (*CALCULATE LENGTH*)

Presionando en la ventana principal el botón *Calculate length*, CivilFEM realiza un pre diseño de la longitud necesaria de los pilotes con los materiales, cargas y terrenos elegidos.

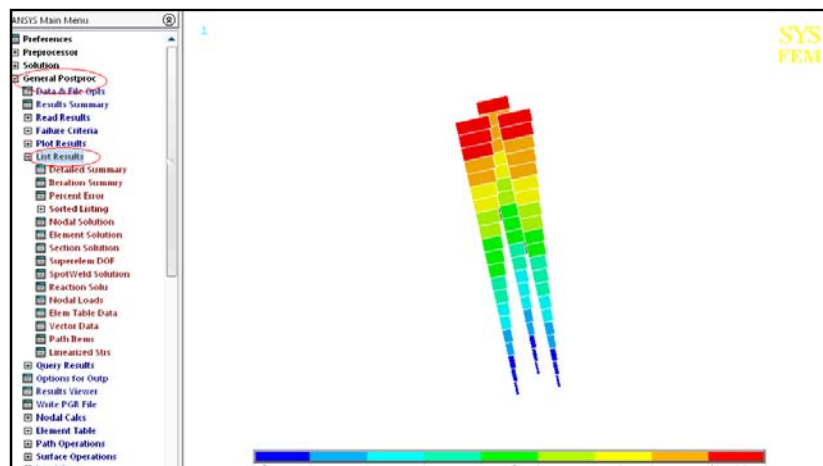
Esta longitud se puede calcular todas las veces que se quiera cambiando los parámetros de la ventana. Una vez que tengamos la longitud deseada bastará con pulsar el botón *Apply and exit* para aplicar los cambios. Figura 3.42.

Figura 3.42. Parámetros de los pilotes



Con el menu general postproc > plot se puede visualizar los diagramas de cortante , momento y axil entre otros. Figura 3.43.

Figura 3.43. Lista de resultados



3.3 MODELAMIENTO PARA LOSA - PILOTE

Para el modelamiento de la cimentación tipo LOSA – PILOTES se usó el programa ETABS , que mediante elementos finitos realiza el cálculo de la estructura de cimentación. El modelo utilizado para representar los elementos losa y pilotes como una estructura monolítica así como la interacción de esta estructura con el suelo soporte se basa en la teoría de modulo de balasto que representa el suelo mediante una distribución de resortes (figura 3.44), para los pilotes la rigidez K de los resortes dependen de la presión que ejerce el tipo de suelo sobre su eje, mientras que a la losa se le asignan resortes como lo muestra la figura 1.4

Figura 3.44. Modelo representativo Losa – pilotes

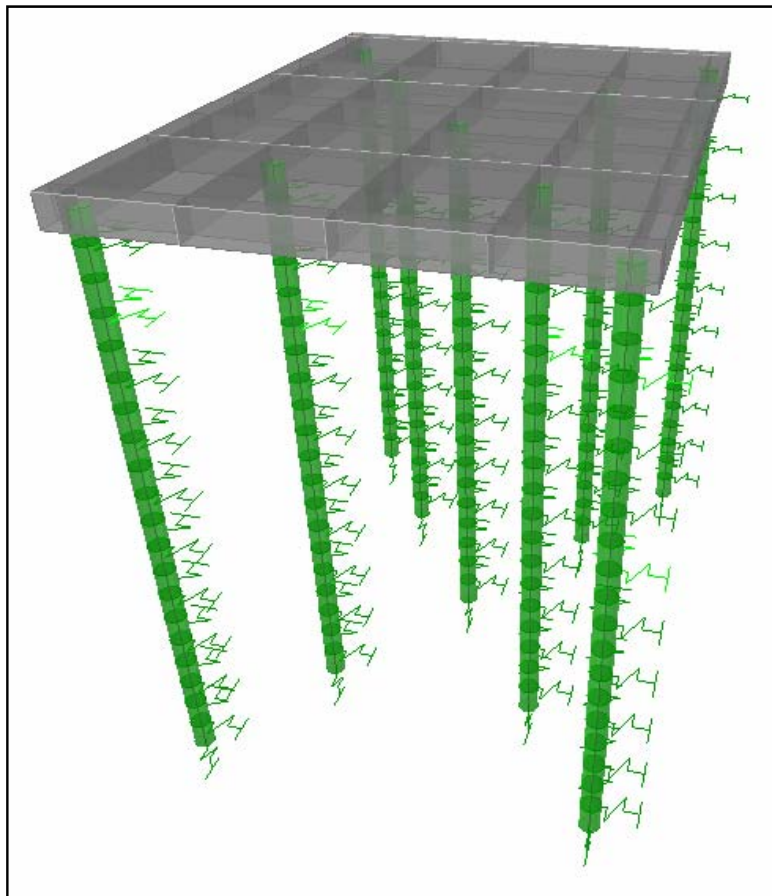


Figura 3.45. Apertura del programa



Después de abrir el programa ETABS, como primer paso se define la líneas de referencia (grilla) dando click en el comando New en la figura 3.46 aparece la ventana de opciones para crear dichas líneas; en el botón Edit Grid se introducen las características geométricas de referencia para el dibujo del modelo en las tres dimensiones.

Figura 3.46. Ventana grillas de referencia

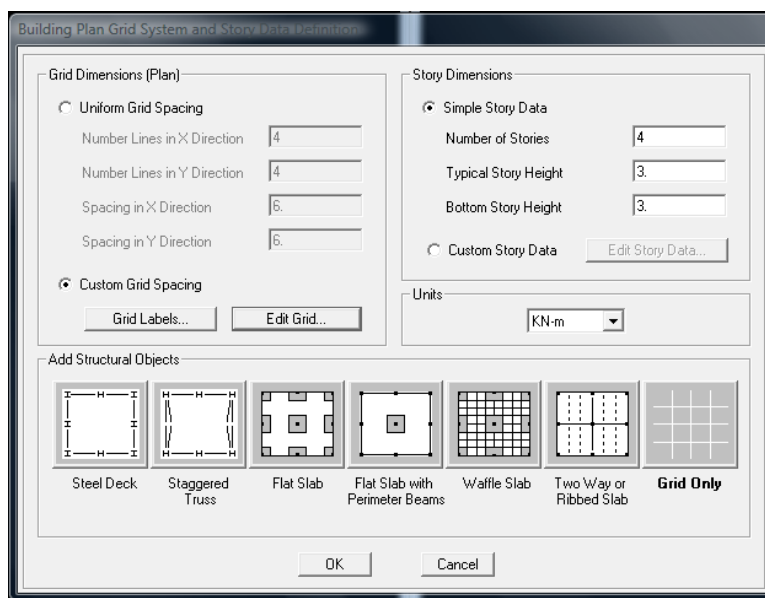
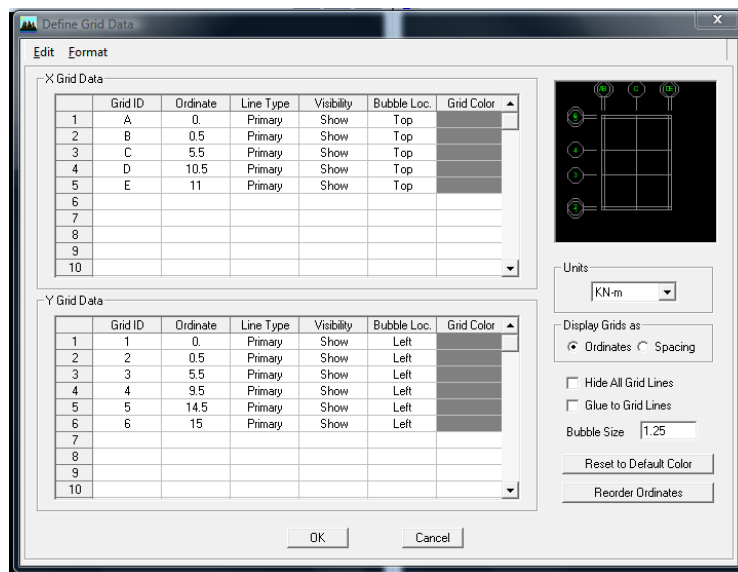


Figura 3.47. Ventana para editar las grillas



Después de editar las líneas de referencia, se definen los tipos de materiales y las secciones transversales de cada elemento con el comando Define > Frame section para los pilotes y Define > Wall/Slab/Deck Section para la losa, en las figuras 3.47, 3.48 y 3.49 se observan los pasos a seguir para definir las características de las secciones transversales de los elementos.

Figura 3.48. Comando Define

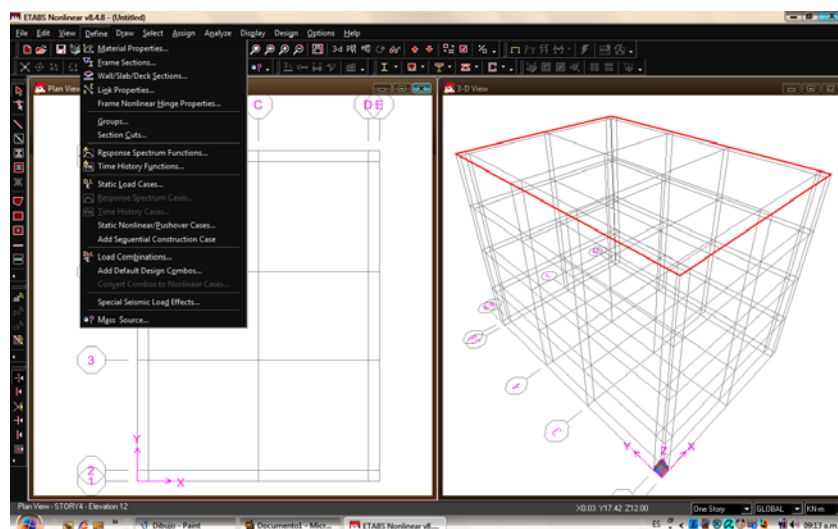


Figura 3.49. Definición elemento PILOTE

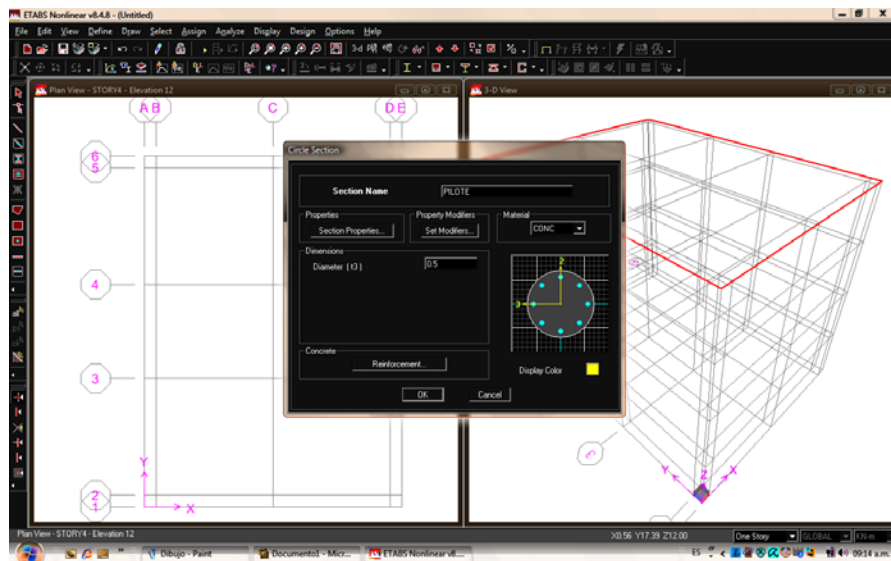
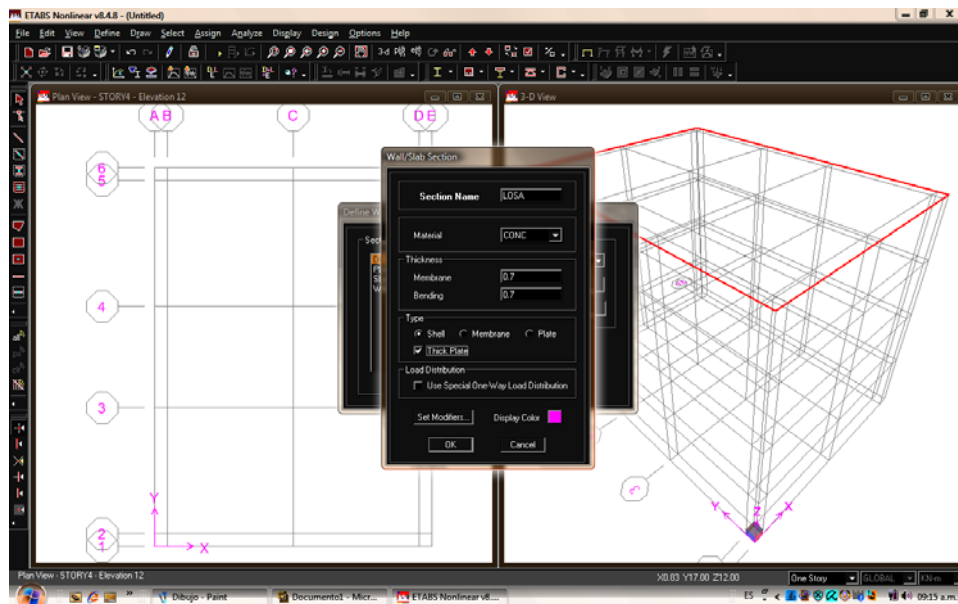


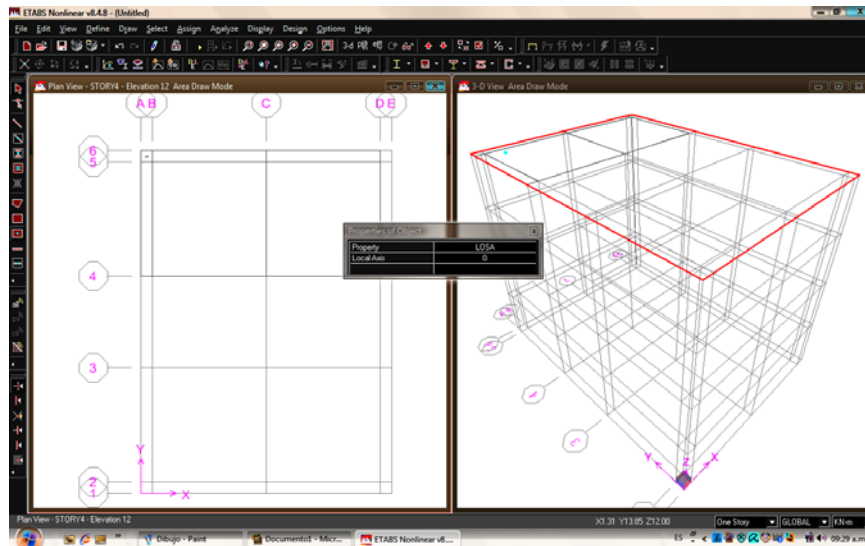
Figura 3.50. Definición elemento LOSA



Teniendo definidas las secciones de los elementos portantes se pasa a crear el área de la losa para el modelamiento, esto se hace con el comando Área Draw Mode seleccionando el área que abarca este elemento y dando click en Select Object , se debe decir que en la ventana Properties Of Object (figura

3.50) se escoge el elemento LOSA definido en el paso anterior. Para la creación de los elementos PILOTE se procede de la misma forma pero con el comando Create Columns in región or at Clicks (Plan), escogiendo en Properties Of Object PILOTE .

Figura 3.51. Dibujo de área elemento LOSA

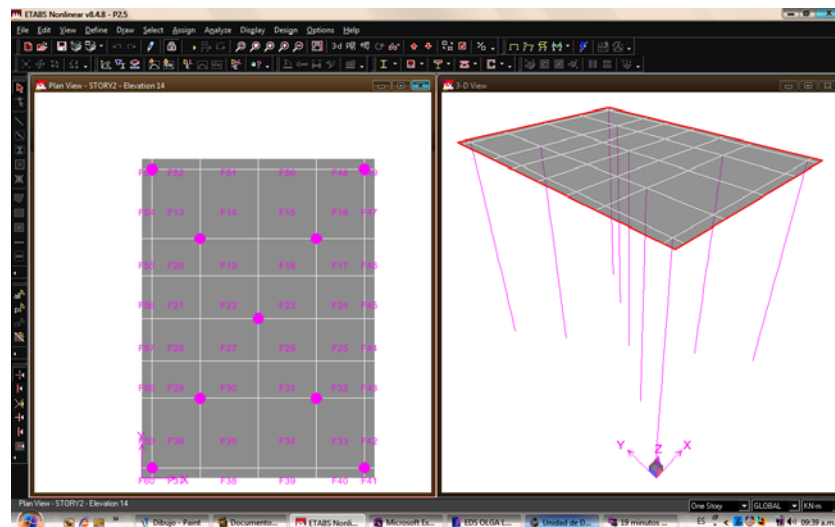


Después de haber dibujado el modelo (figura 3.52) se pasa a definir y asignar los resortes que modelan la interacción de la estructura con el suelo de fundación. Las constantes de rigidez de los resortes fueron definidas partiendo de la teoría de modulo de Balasto para los elementos tipo losa y los elementos tipo pilote; las constantes de rigidez para cada tipo de perfil fue asignada al modelo por separado haciendo un análisis para cada caso en particular a continuación se muestra la tabla de rigidez para el perfil 2.2:

Tabla 3.2. Rigidez de resortes P 2.2

PERFIL 2.2						
					RIGIDEZ DE LOS RESORTES	
NIVEL	PROFUNDIDAD	Kv	Kh	AREA	Rv	Rh
1	1.4	10030.8856	5015.4428	1.09956	11029.5606	5514.780285
2	2.8	20061.7712	10030.8856	1.09956	22059.1211	11029.56057
3	4.2	30092.6568	15046.3284	1.09956	33088.6817	16544.34085
4	5.6	40123.5424	20061.7712	1.09956	44118.2423	22059.12114
5	7	50154.428	25077.214	1.09956	55147.8028	27573.90142
6	8.4	60185.3136	30092.6568	1.09956	66177.3634	33088.68171
7	9.8	70216.1992	35108.0996	1.09956	77206.924	38603.46199
8	11.2	80247.0848	40123.5424	1.09956	88236.4846	44118.24228
9	12.6	90277.9704	45138.9852	1.09956	99266.0451	49633.02256
10	14	100308.856	50154.428	1.09956	110295.606	55147.80285

Figura 3.52. Geometría del modelo



Como paso a seguir se señalan todas las líneas que correspondan a los elementos pilotes y con el comando Edit > Divide Line se dividen los elementos pilotes que inicialmente son 2 de 7 m en 20 elementos de 0.7 m con el fin de asignar los resortes correspondientes a las profundidades que se muestran en las tablas; por ejemplo para asignar el resorte que corresponde al elemento que se encuentra a la profundidad de 1.4 m se señala el punto medio de los tres primeros puntos y se le asigna el resorte con la rigidez correspondiente a 1.4m de profundidad estos pasos se pueden

observar en las figuras 3.52 y 3.53. Para modelar la interacción de la losa con el suelo se hace de la misma forma como se hizo con el programa SAFE , picando el área que compone el elemento LOSA y asignando la rigidez del resorte con el comando Assign > Shell / Area > Area Springs como se ve en la figura 10

Figura 3.53. División de elementos PILOTE

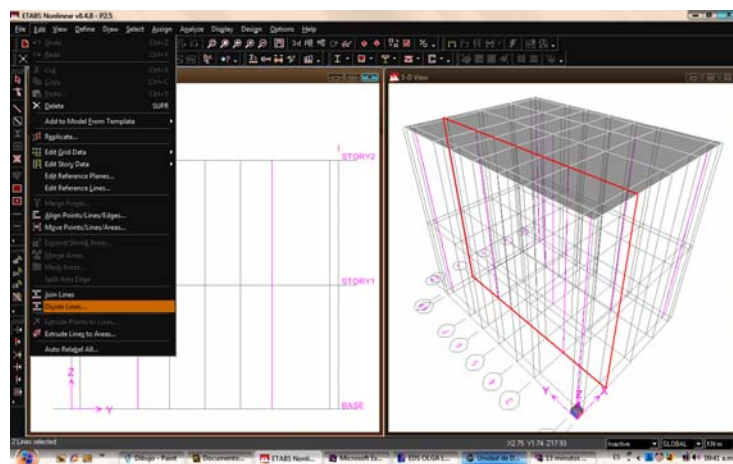


Figura 3.54. Asignación de resortes a los Pilotes

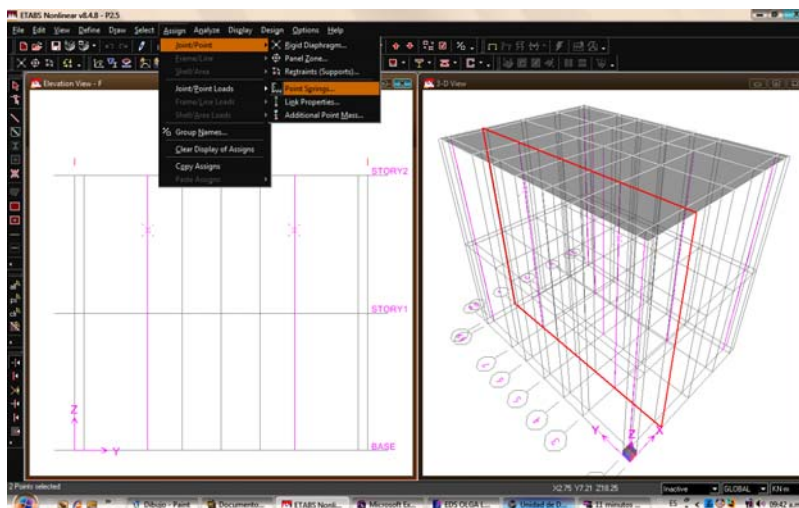


Figura 3.55. Asignacion de resortes a la Losa

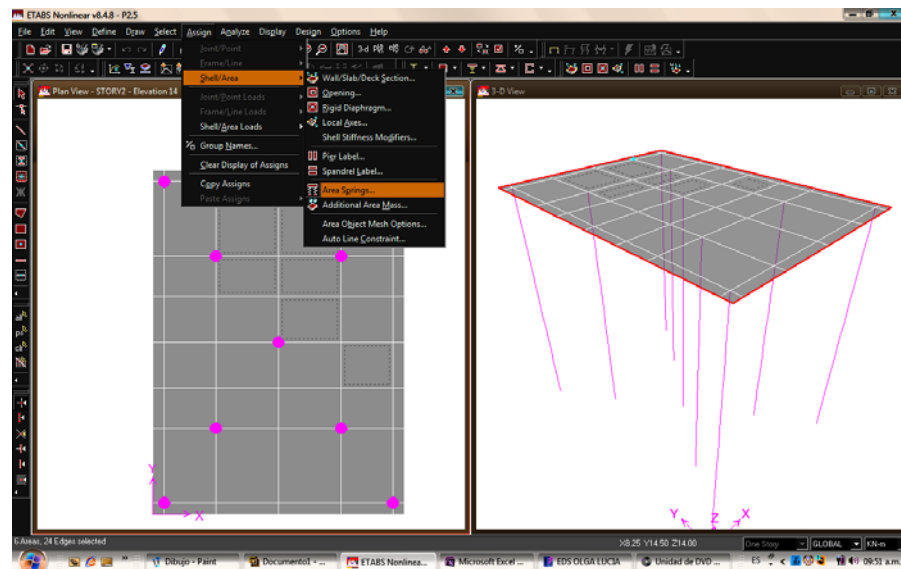
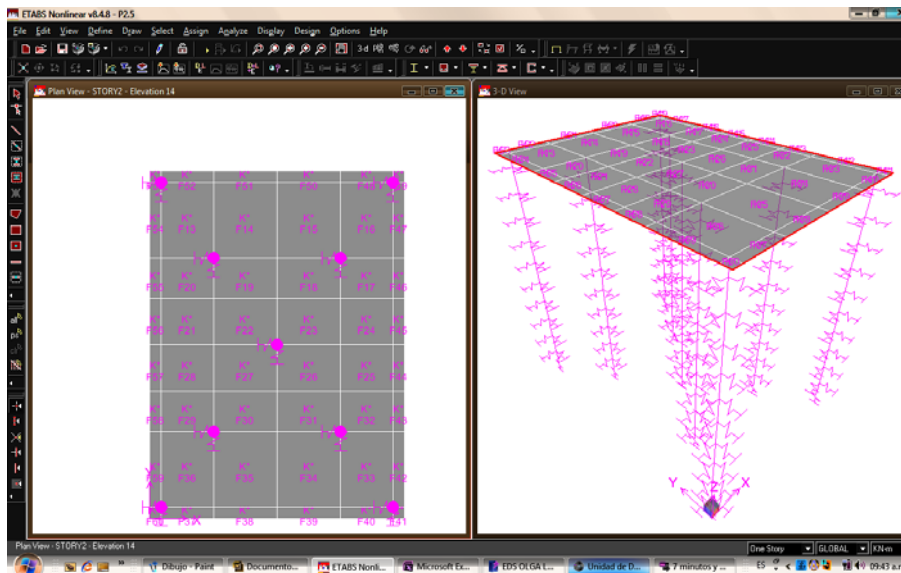


Figura 3.56. Modelo representativo LOSA – PILOTES



Después de definir todas las características del modelo se procede a definir el tipo de sollicitación que tendrá la estructura de cimentación, esto se realiza con el comando Define > Load Combinations (figura 3.55).

Después se debe asignar las cargas a la estructura en los puntos correspondientes a el eje de columna del edificio en estudio ; las cargas asignadas son las que se muestran en las tablas 2.11 a la 2.16; esta introducción de cargas se hace por medio del comando Assign > joint point loads > Force, como se puede ver en la figura 3.56 y 3.57.

Figura 3.57. Definición de cargas

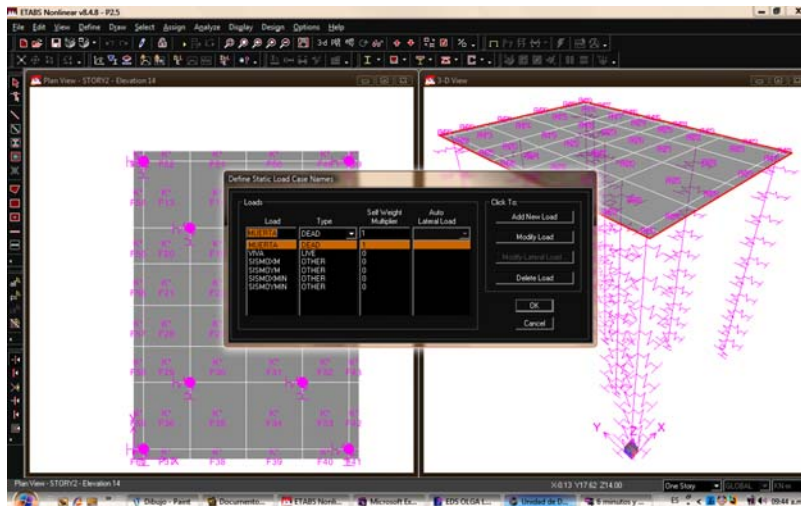
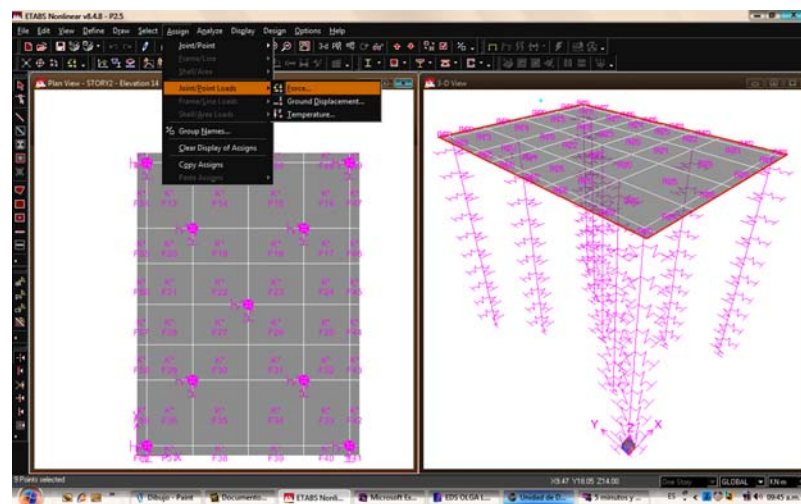


Figura 3.58. Asignación de cargas



Display > Set Output Table Mode (figura 3.61), en donde se encuentra una ventana para escoger el tipo de carga al que se le desean ver los resultados finales (figura 3.62); en la figura 3.63, se puede observar la tabla de resultados

Figura 3.61. Corrida del programa

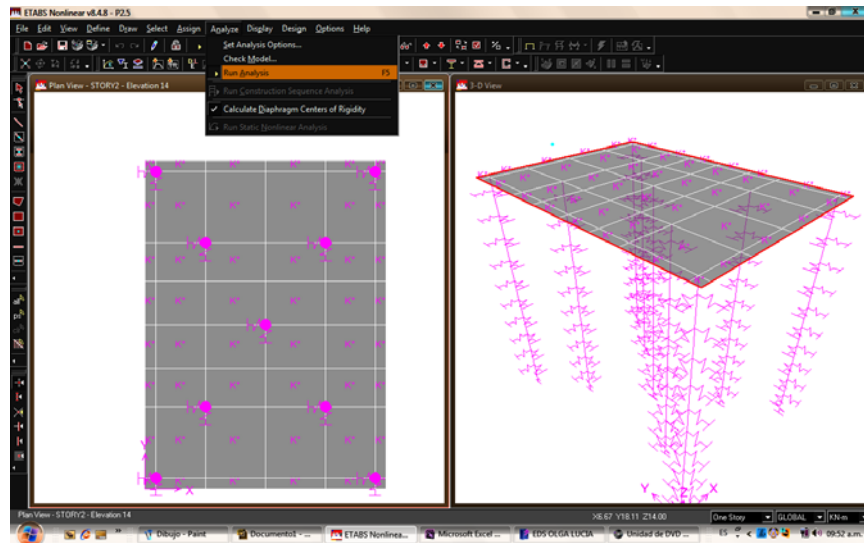


Figura 3.62. Ventana de cálculo del programa

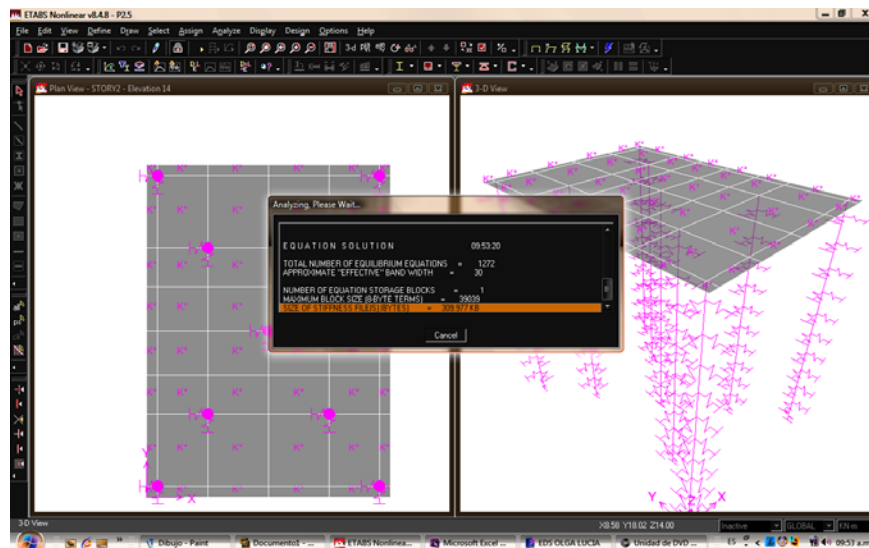


Figura 3.63. Tabla de resultados

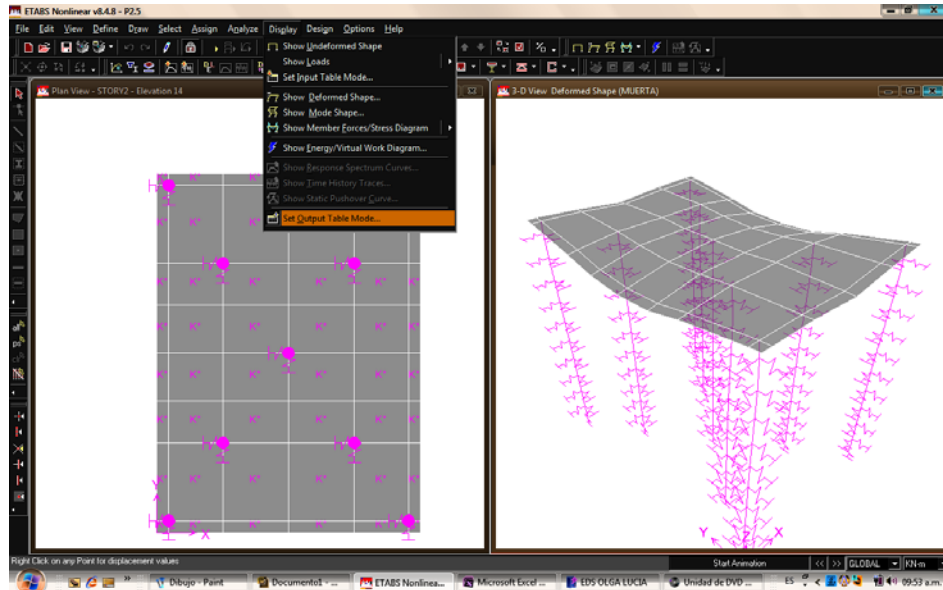


Figura 3.64. Ventana para tablas de resultados

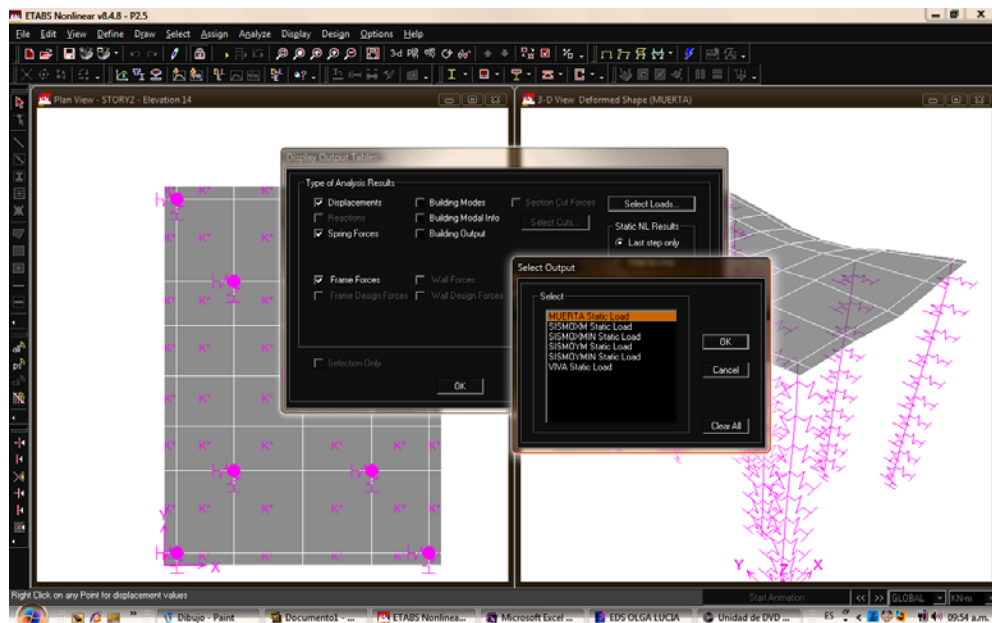
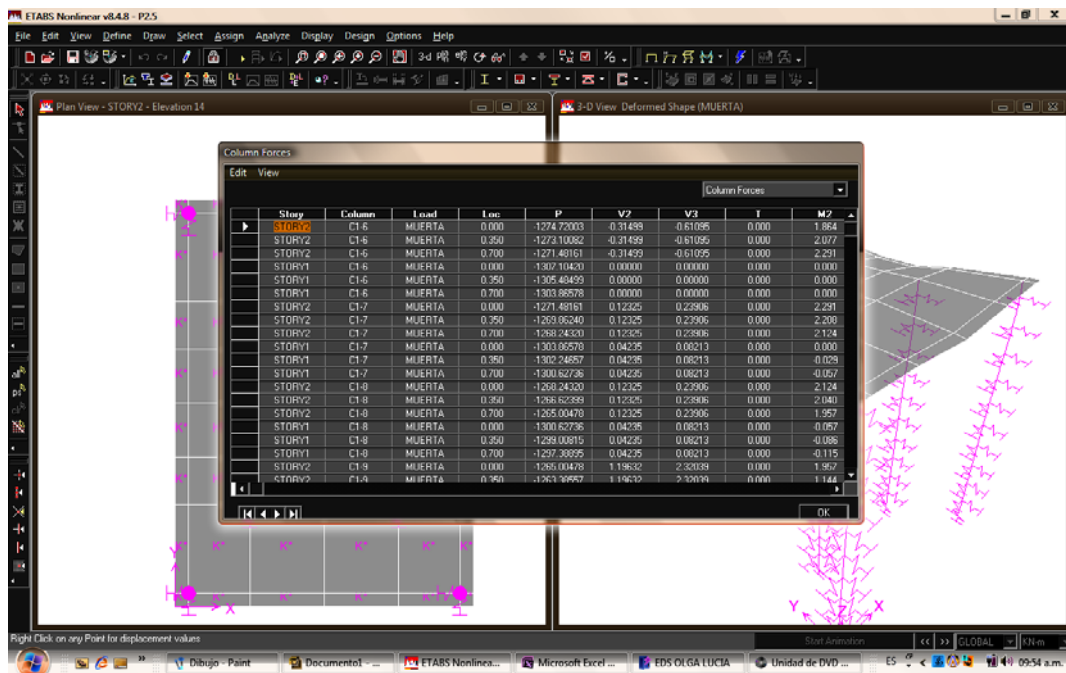


Figura 3.65. Tabla de resultados



4. ANÁLISIS DE RESULTADO

El terreno, al recibir cargas transmitidas por la cimentación, tiende a deformarse en una o en varias de sus capas, debido a la compresión y las propiedades del mismo, las cuales pueden variar con el tiempo o por algunos factores como: la variación del volumen de vacíos como consecuencia de la compactación del terreno, el desplazamiento y deformación de las partículas; éstas al irse acumulando producen asentamientos en la superficie de contacto entre la cimentación y el terreno.

Los cimientos juegan un papel importante dentro de la edificación ya que son los que distribuyen las cargas de la estructura al suelo, de tal manera que el suelo y los materiales que los constituyen tengan una capacidad suficiente para soportarlas sin sufrir deformación excesiva. Dependiendo de la interacción del suelo y la cimentación, las características de ésta cambiarán en cuanto a su tipo, forma, tamaño, costo, etc.

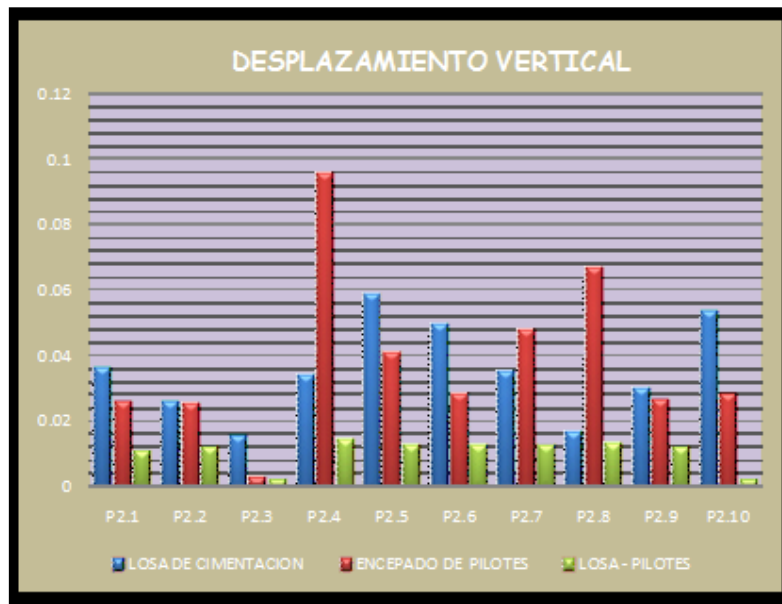
De los modelamientos se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.1. Desplazamiento vertical

Perfil 2.1			Perfil 2.2		
CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga		CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga	
	MUERTA	VIVA		MUERTA	VIVA
LOSA	-3.584E-02	-3.57E-03	LOSA	-2.573E-02	-2.80E-03
PILOTES	-0.025629	-0.001561	PILOTES	-0.025032	-0.0015468
LOSA - PILOTES	-0.0104	-0.0013	LOSA - PILOTES	-0.012	-0.0014

Perfil 2.3			Perfil 2.4		
CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga		CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga	
	MUERTA	VIVA		MUERTA	VIVA
LOSA	-1.53E-02	-1.67E-03	LOSA	-3.40E-02	-3.71E-03
PILOTES	-0.0029364	-0.00042831	PILOTES	-0.09595	-0.0032904
LOSA - PILOTES	-0.0021	-0.0003	LOSA - PILOTES	-0.0144	-0.0017
Perfil 2.5			Perfil 2.6		
CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga		CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga	
	MUERTA	VIVA		MUERTA	VIVA
LOSA	-5.87E-02	-6.43E-03	LOSA	-4.93E-02	-5.40E-03
PILOTES	-0.040613	-0.0014851	PILOTES	-0.028416	-0.0015504
LOSA - PILOTES	-0.0127	-0.0015	LOSA - PILOTES	-0.0126	-0.0015
Perfil 2.7			Perfil 2.8		
CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga		CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga	
	MUERTA	VIVA		MUERTA	VIVA
LOSA	-3.52E-02	-3.85E-03	LOSA	-1.65E-02	-1.79E-03
PILOTES	-0.047814	-0.0017544	PILOTES	-0.066488	-0.0023434
LOSA - PILOTES	-0.0123	-0.0015	LOSA - PILOTES	-0.013	-0.0016
Perfil 2.9			Perfil 2.10		
CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga		CIMENTACION TIPO	Desplazamiento por Carga	
	MUERTA	VIVA		MUERTA	VIVA
LOSA	-3.01E-02	-3.28E-03	LOSA	-0.0532	-0.0076
PILOTES	-0.026272	-0.00069788	PILOTES	-0.027913	-0.00043135
LOSA - PILOTES	-0.0119	-0.0014	LOSA - PILOTES	-0.0021	-0.0003

Figura 4.1, Desplazamiento vertical



Una vez obtenido los resultados de desplazamientos se escoge la cimentación de encepado de pilotes y la cimentación combinada como las dos mejores opciones para este caso particular.

A continuación se muestra una comparación de reducción de desplazamientos verticales en los tipos de cimiento modelados:

Tabla 4.2. Porcentaje de reducción en desplazamiento vertical (losa, pilote y losa-pilote)

P 2.1			P 2.2		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
PILOTES	28.5	56.2	PILOTES	2.7	44.8
LOSA - PILOTES	71.0	63.5	LOSA - PILOTES	53.4	50
P 2.3			P 2.4		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
PILOTES	80.8	74.3	PILOTES	NO HAY	11.2
LOSA - PILOTES	86.3	82	LOSA - PILOTES	57.6	54.1
P 2.5			P 2.6		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
PILOTES	30.8	76.9	PILOTES	42.4	71.3
LOSA - PILOTES	78.4	76.7	LOSA - PILOTES	74.5	72.2
P 2.7			P 2.8		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
PILOTES	NO HAY	54.4	PILOTES	NO HAY	NO HAY
LOSA - PILOTES	65.1	61	LOSA - PILOTES	21.1	10.5

P 2.9			P 2.10		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
PILOTES	12.8	78.8	PILOTES	47.5	94.3
LOSA - PILOTES	60.5	57.4	LOSA - PILOTES	96.1	96.1

Tabla 4.3. Porcentaje de reducción en desplazamiento vertical (pilote vs losa-pilote)

P 2.1			P 2.2		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
LOSA - PILOTES	59.4	16.7	LOSA - PILOTES	52.1	9.5
P 2.3			P 2.4		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
LOSA - PILOTES	28.5	30	LOSA - PILOTES	85	48.3
P 2.5			P 2.6		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
LOSA - PILOTES	68.7	NO HAY	LOSA - PILOTES	55.7	3.3
P 2.7			P 2.8		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
LOSA - PILOTES	74.3	14.5	LOSA - PILOTES	80.4	31.7
P 2.9			P 2.10		
CIMENTACION TIPO	% de reducción		CIMENTACION TIPO	% de reducción	
	C. Muerta	C. Viva		C. Muerta	C. Viva
LOSA - PILOTES	54.7	NO HAY	LOSA - PILOTES	92.5	30.5

Con estos datos obtenidos, se procede a analizar las curvas de fuerza vs desplazamiento, para observar en cuál de los dos sistemas (pilotes y losa - pilotes) es más favorable para cada uno de los perfiles.

Los datos obtenidos fueron los siguientes (Figura 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5):

Encepados (pilote):

Figura 4.2. Diagrama fuerza vs desplazamiento para cada perfil de suelo cimentación con pilotes (carga muerta)

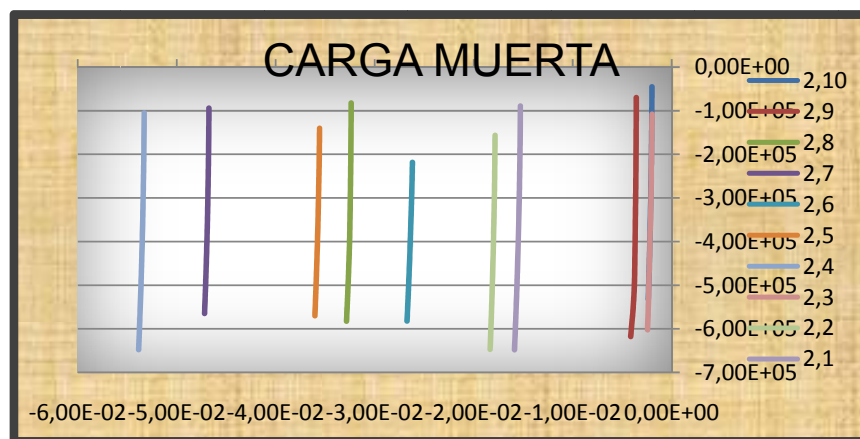
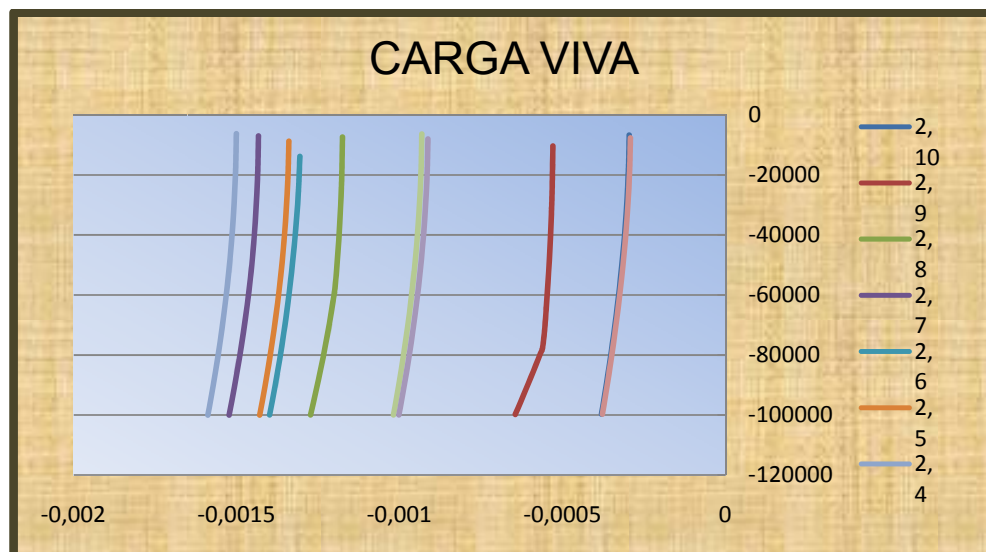


Figura 4.3. Diagrama fuerza vs desplazamiento para cada perfil de suelo cimentación con pilotes (carga viva)

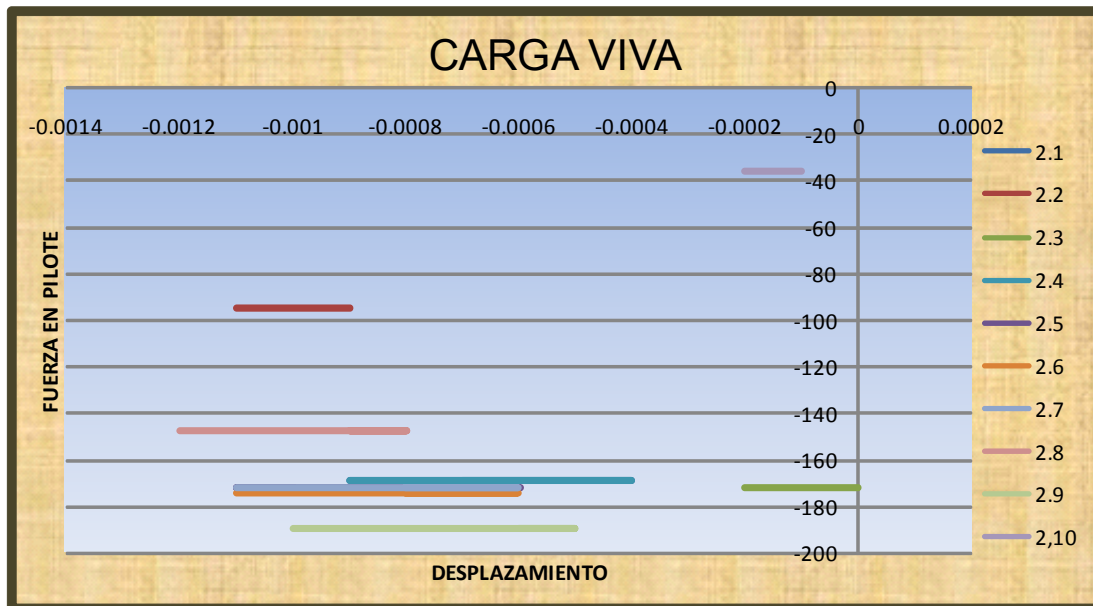


Losa-pilote

Figura 4.4. Diagrama fuerza vs desplazamiento para cada perfil de suelo cimentación con losa-pilotes (carga muerta)



Figura 4.5. Diagrama fuerza vs desplazamiento para cada perfil de suelo cimentación con losa-pilotes (carga viva)



De acuerdo a la teoría de modulo de balasto mencionada en el capítulo uno, se obtiene la rigidez del sistema cimentación - suelo :

Tabla 4.4. Comparación de rigidez entre sistemas de cimentación

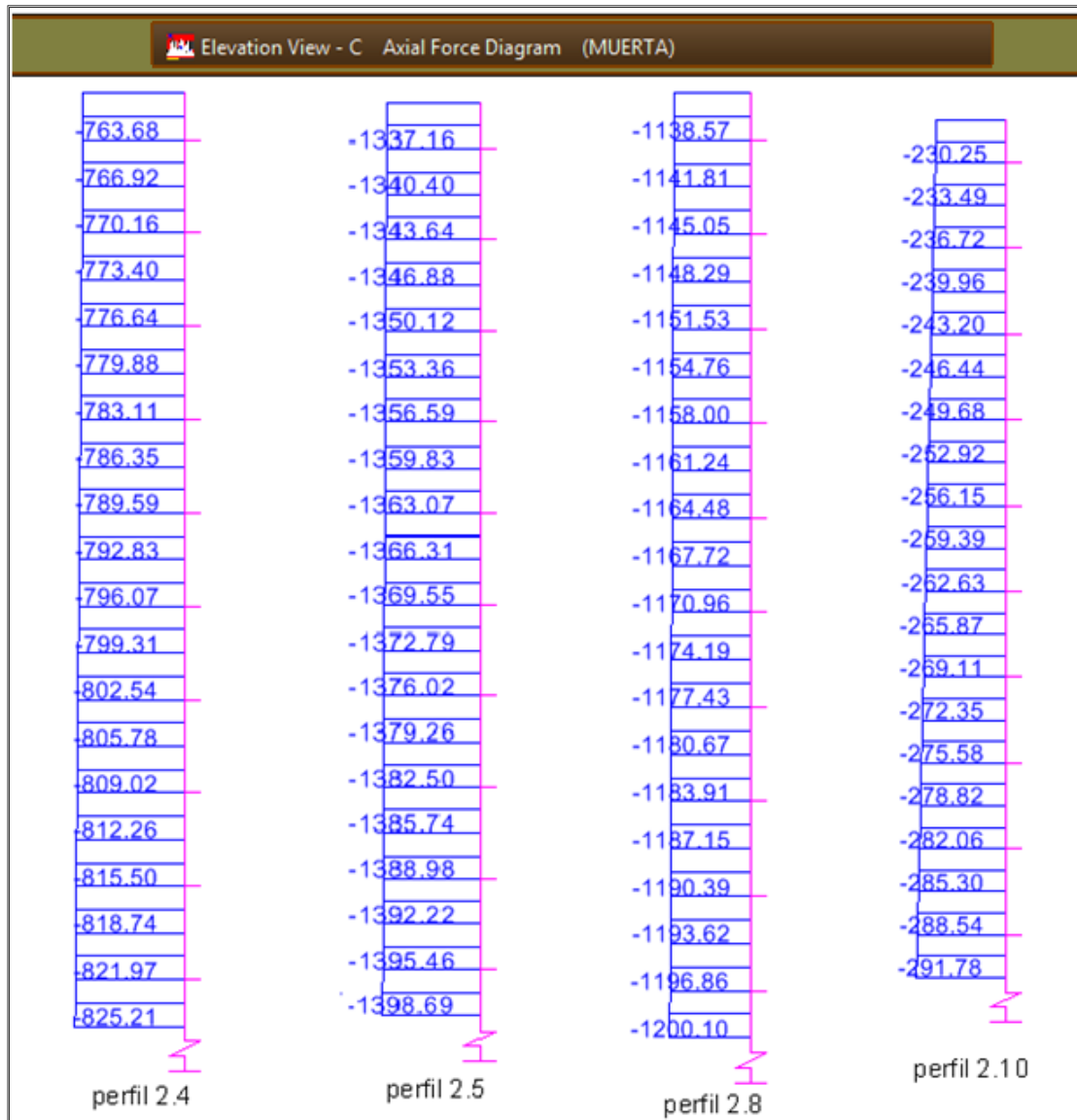
CARGA MUERTA			CARGA VIVA		
PERFIL	K		PERFIL	K	
	LOSA - PILOTES	ENCEPADO		LOSA - PILOTES	ENCEPADO
2,1	-260930.7692	-105883.179	2,1	-2087446.154	-1738424.09
2,2	-226140	-108408.437	2,2	-1938342.857	-1754383.24
2,3	-1292228.571	-924152.023	2,3	-9045600	-6335784.83
2,4	-188450	-28282.2303	2,4	-1596282.353	-824726.477
2,5	-213675.5906	-66818.0139	2,5	-1809120	-1827270.89
2,6	-215371.4286	-95498.3108	2,6	-1809120	-1750309.6
2,7	-220624.3902	-56754.9253	2,7	-1809120	-1546785.23
2,8	-208744.6154	-40814.5831	2,8	-1696050	-1158009.73
2,9	-228040.3361	-103291.717	2,9	-1938342.857	-3888462.2
2,10	-1292228.571	-97219.2169	2,10	-9045600	-6291132.49

En la tabla comparativa de rigidez se observa que para todos los perfiles de suelo, se tiene un valor mayor en el sistema de cimentación tipo losa – pilotes, lo cual indica que en este caso particular el desplazamiento vertical será menor si se usa una cimentación combinada .

A continuación se presentan los diagramas de cortante , momento y axial para el pilote más cargado de la cimentación combinada.

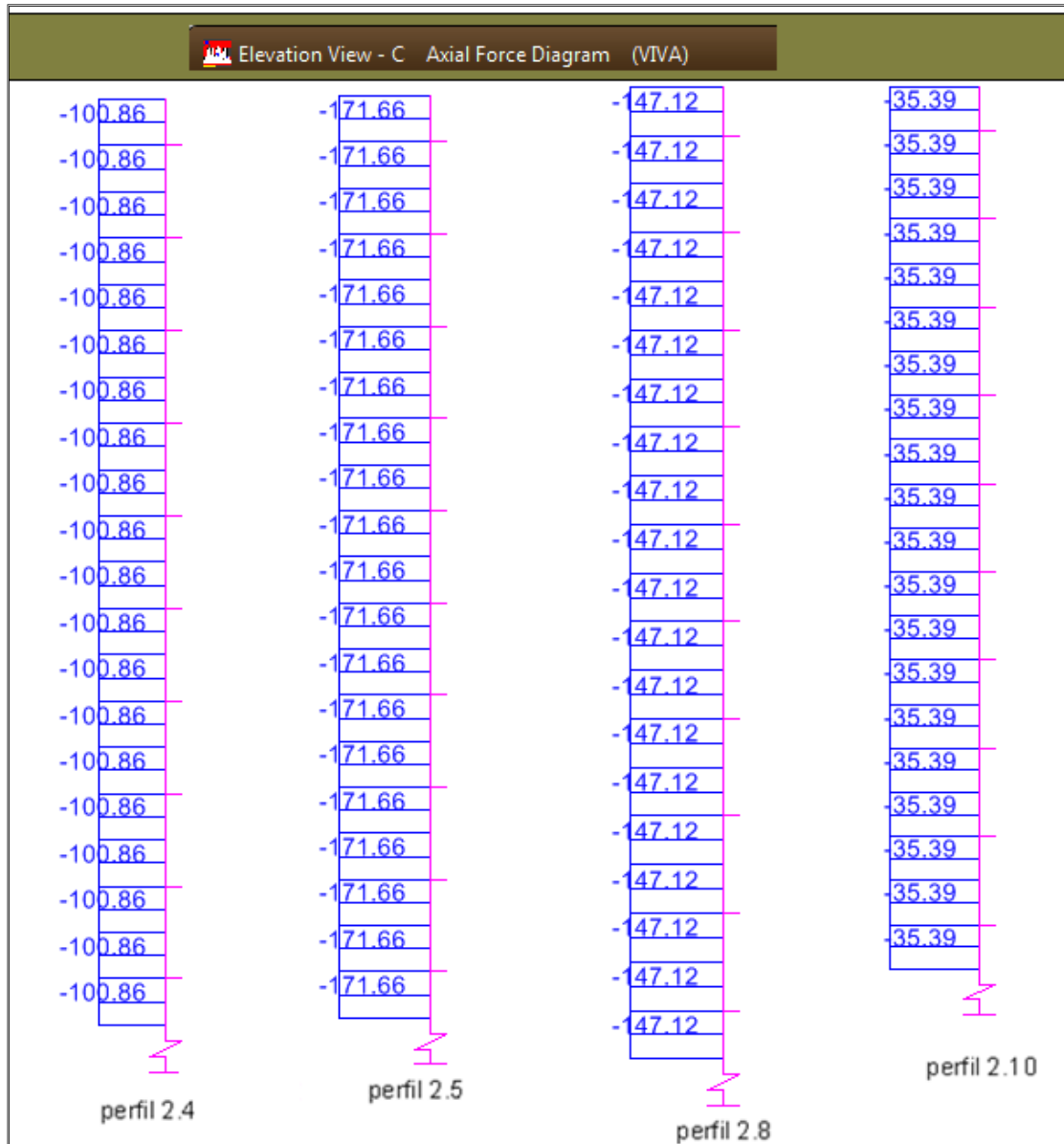
Diagrama de fuerza axial para carga muerta (Figura 4.7)

Figura 4.7. Diagramas de fuerza axial para cada perfil (carga muerta)



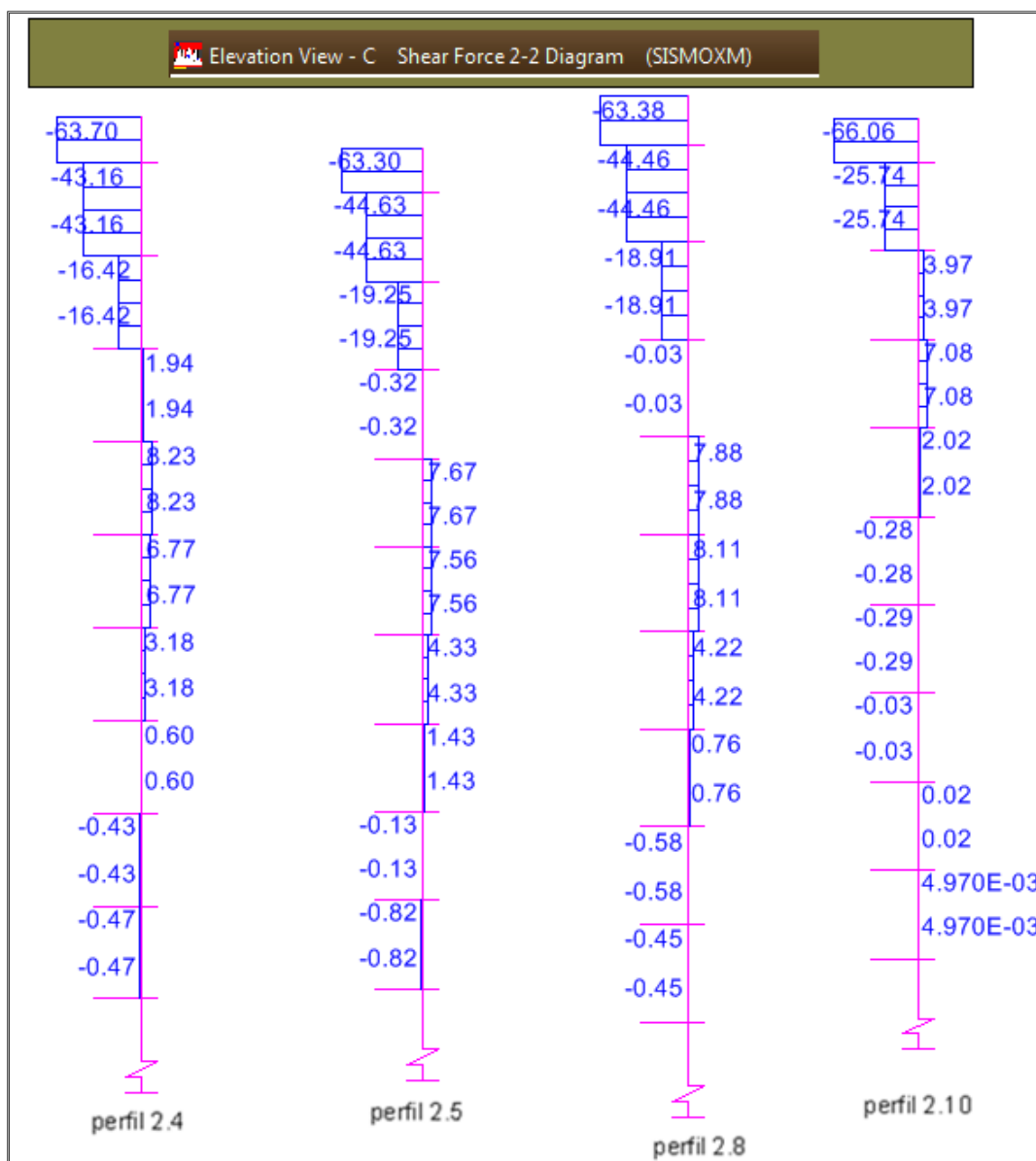
Diagramas de fuerza axial para carga viva (Figura 4.8)

Figura 4.8. Diagramas de fuerza axial para cada perfil (carga viva)



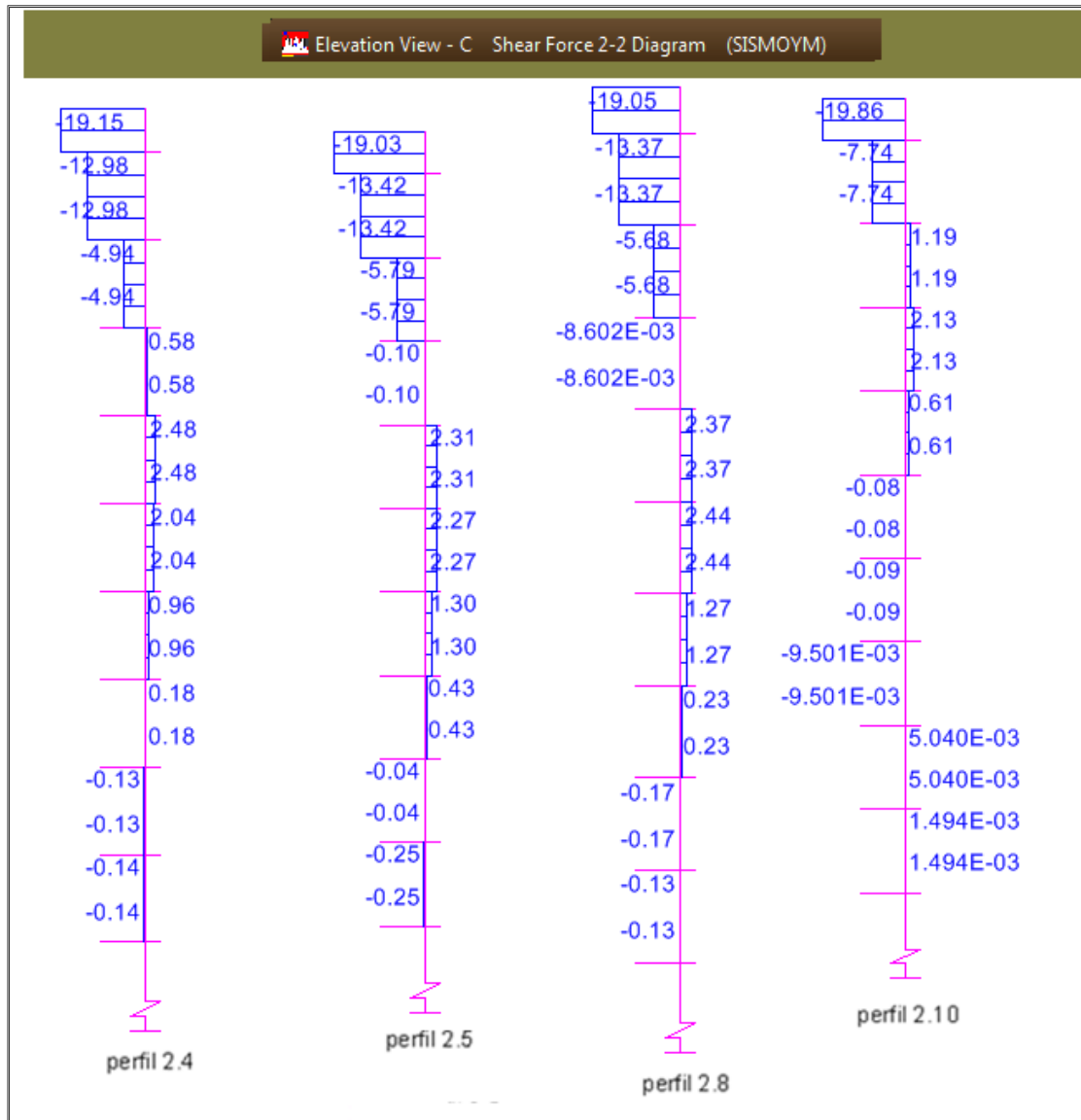
Diagramas de cortante para sismo en X (Figura 4.9)

Figura 4.9. Diagramas de cortante para cada perfil (sismo en X)



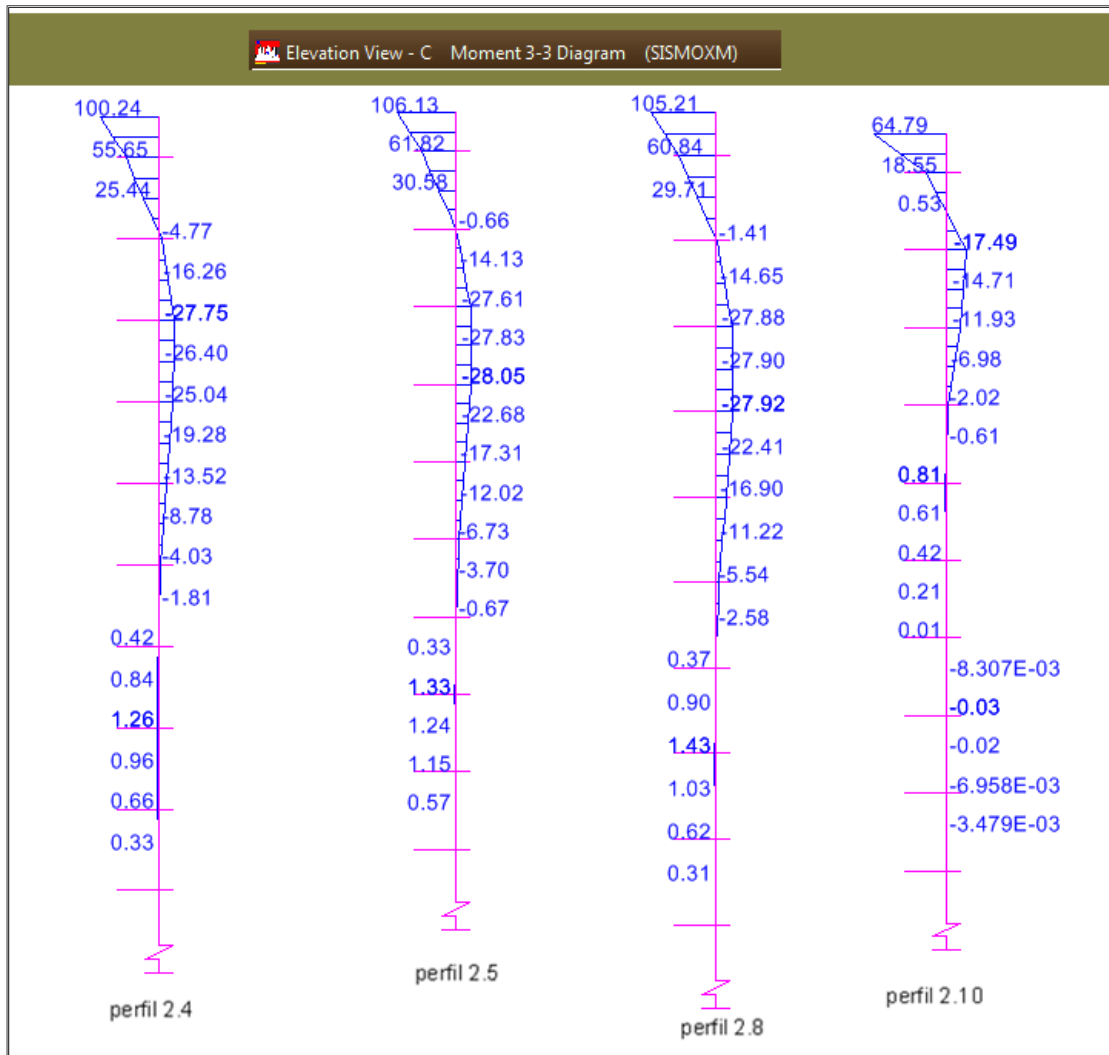
Diagramas de cortante para sismo en Y (Figura 4.10)

Figura 4.10. Diagramas de cortante para cada perfil (sismo en Y)



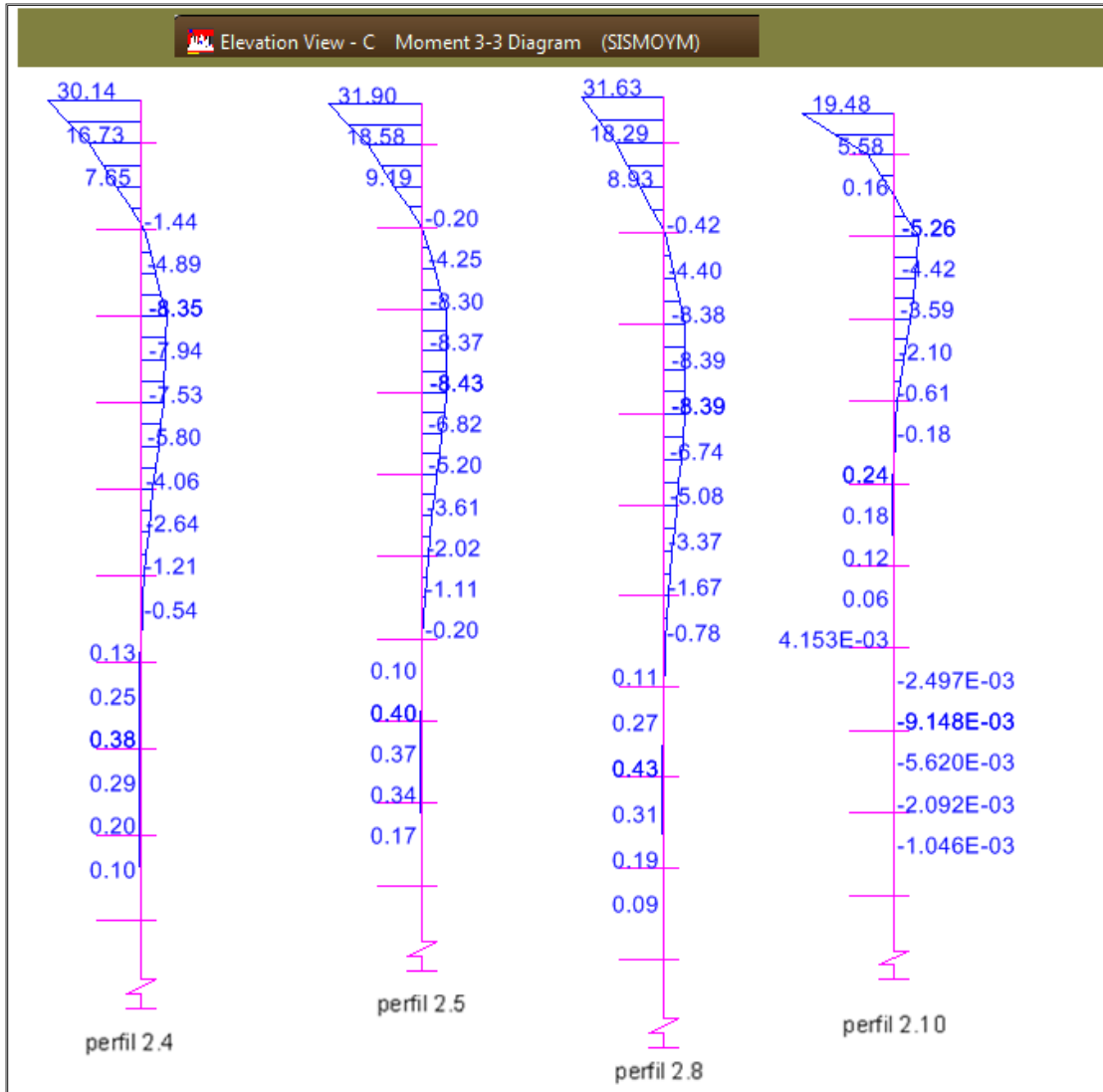
Diagramas de momento para sismo en X (Figura 4.11)

Figura 4.11. Diagramas de momento para cada perfil (sismo en X)



Diagramas de momento para sismo en Y (Figura 4.12)

Figura 4.12. Diagramas de momento para cada perfil (sismo en Y)



Como otro método comparativo para los sistemas combinado y encepado de pilotes , se realizo un nuevo modelamiento aplicando valores de carga de forma análoga a las impuestas por la edificación a cada tipo de cimentación conservando las dimensiones geométricas de los modelos analizados anteriormente, así como las características de los perfiles de suelo P2.1, P2.2 , P2.3 (mostrados en las tablas 2.1 , 2.2 y 2.3).

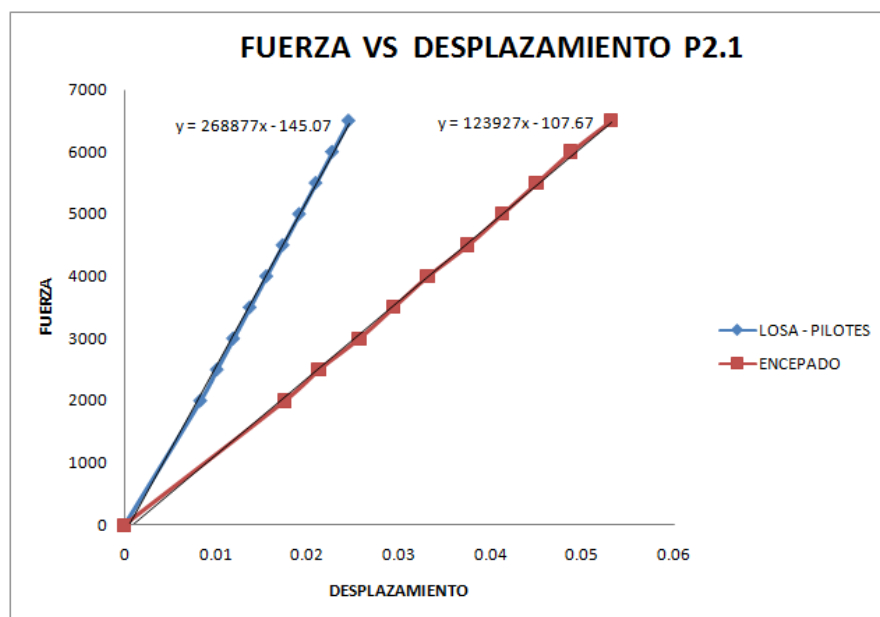
Para el perfil 2.1 (arena y arcilla)

Tabla 4.5. Fuerza vs desplazamiento para tipos de cimentacion en estrato de arena y arcilla

PARA ENCEPADO DE PILOTES	
FUERZA VERTICAL	DESPLAZAMIENTO
0	0
2000	0.0175
2500	0.02125
3000	0.025625
3500	0.029375
4000	0.033125
4500	0.0375
5000	0.04125
5500	0.045
6000	0.04875
6500	0.053125

PARA LOSA - PILOTES	
FUERZA VERTICAL	DESPLAZAMIENTO
0	0
2000	0.0083
2500	0.0101
3000	0.0119
3500	0.0137
4000	0.0155
4500	0.0173
5000	0.0191
5500	0.0209
6000	0.0227
6500	0.0245

Figura 4.13. Diagrama de fuerza vs desplazamiento en los sistemas de cimentación para el perfil 2.1



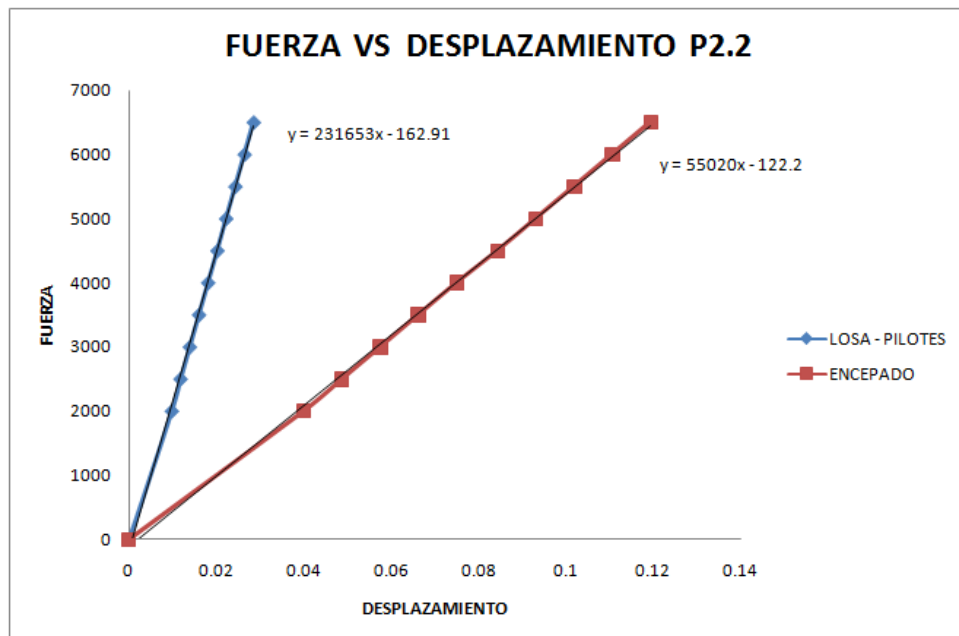
Para el perfil P2.2 (solo arena)

Tabla 4.6. Fuerza vs desplazamiento para tipos de cimentacion en arena

PARA ENCEPADO DE PILOTES	
FUERZA	DESPLAZAMIENTO
0	0
2000	0.04
2500	0.04875
3000	0.0575
3500	0.06625
4000	0.075
4500	0.084375
5000	0.093125
5500	0.101875
6000	0.110625
6500	0.119375

PARA LOSA - PILOTES	
FUERZA	DESPLAZAMIENTO
0	0
2000	0.0098
2500	0.0118
3000	0.0139
3500	0.016
4000	0.0181
4500	0.0202
5000	0.0222
5500	0.0243
6000	0.0264
6500	0.0285

Figura 4.14. Diagrama de fuerza vs desplazamiento en los sistemas de cimentación para P2.2



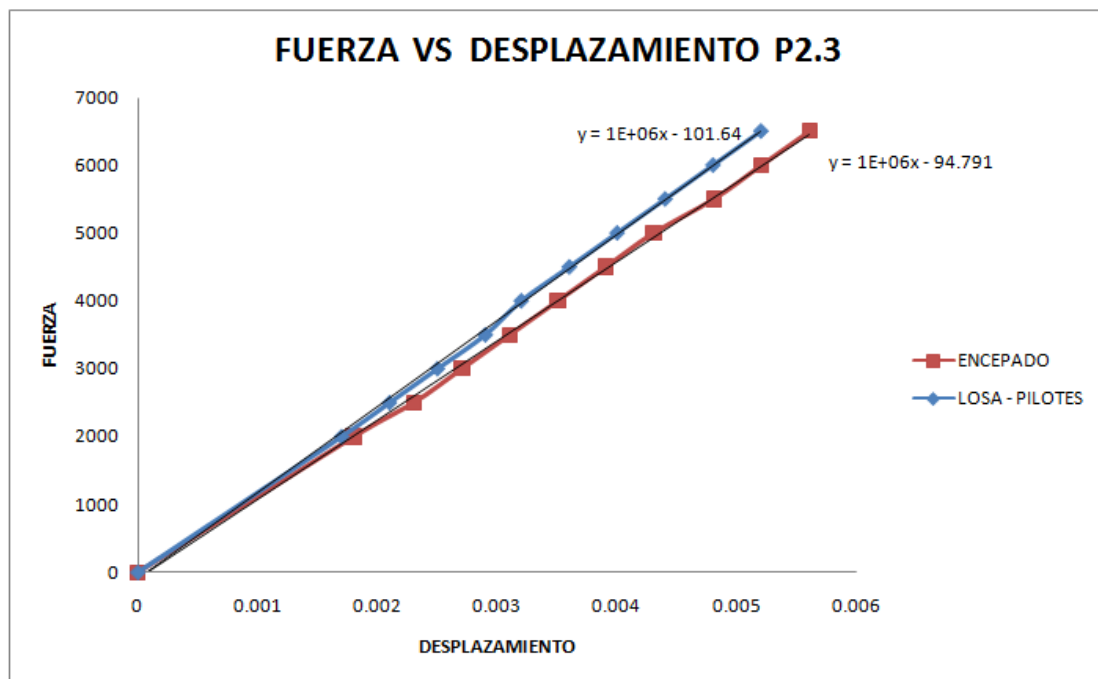
Para el perfil P2.3 (solo arcilla)

Tabla 4.7. Fuerza vs desplazamiento para tipos de cimentacion en arcilla

PARA ENCEPADO DE PILOTES	
FUERZA	DESPLAZAMIENTO
0	0
2000	0.0018
2500	0.0023
3000	0.0027
3500	0.0031
4000	0.0035
4500	0.0039
5000	0.0043
5500	0.0048
6000	0.0052
6500	0.0056

PARA LOSA - PILOTES	
FUERZA	DESPLAZAMIENTO
0	0
2000	0.0017
2500	0.0021
3000	0.0025
3500	0.0029
4000	0.0032
4500	0.0036
5000	0.004
5500	0.0044
6000	0.0048
6500	0.0052

Figura 4.15. Diagrama de fuerza vs desplazamiento en los sistemas de cimentación para P2.3



Para los tres tipos de perfiles de suelo se observa que la curva de resultados de la cimentación losa – pilotes tiene mayor pendiente que la del encepado; esto quiere decir que el conjunto suelo - cimentación combinada (losa – pilotes) posee mayor rigidez que el sistema encepado de pilotes - suelo .

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del análisis comparativo de los diferentes sistemas de cimentación planteados para este proyecto y sus resultados presentados en el Capítulo 4 permiten concluir que:

- El sistema de cimentación del tipo placa – pilotes aumenta el margen de seguridad contra la falla por capacidad portante y reduce los asentamientos elásticos o inmediatos y, principalmente, los asentamientos por consolidación, con respecto a los correspondientes a una solución de losa sin complemento de pilotes y otro de solo pilote.
 - La longitud y la cantidad adecuadas de los pilotes que complementan el trabajo de la placa, aseguran un porcentaje alto para la calidad de esta cimentación.
 - Los criterios básicos de la interacción placa – pilotes – suelo y la metodología de análisis aquí presentados, permiten obtener respuestas lógicas y racionales sobre la capacidad utilizada de los pilotes, la repartición de las cargas del edificio entre la placa y los pilotes y los asentamientos esperados.
 - Para el caso particular del edificio aquí presentado se obtuvo que la solución más adecuada entre las estudiadas fue la cimentación del tipo placa – pilotes con 9 pilotes de 14 metros de longitud y 0,50 m de diámetro.
 - Los parámetros estudiados en este proyecto se basaron en desplazamiento y costos, obteniendo como mejor cimentación en costo la superficial, pero teniendo un grado muy alto de asentamiento, por esta razón se optó por estudiar las otras dos cimentaciones.
 - La optimización de la cimentación placa – pilotes es muy sensible a los patrones de variación de la presión de preconsolidación y de los parámetros de compresibilidad con la profundidad. Por lo tanto, los resultados numéricos del caso presentado no son aplicables directamente a otros casos con perfiles diferentes de suelo, o con pesos del edificio y porcentajes de compensación diferentes a los aquí tratados.

- Finalmente, se puede concluir que los sistemas de cimentación placa – pilotes están mejor preparados que las soluciones de placa sin pilotes o que las soluciones de solo pilotes. Para sobrellevar satisfactoriamente los procesos tardíos de compresión secundaria y los procesos de subsidencia regional por descenso continuado del nivel freático. En efecto, la subsidencia regional producirá excesivos asentamientos de las cimentaciones superficiales; por otro lado, producirá fenómenos de fricción negativa en la parte superior del fuste en la solución de cimentación profunda con pilotes, reduciendo drásticamente el factor de seguridad de la cimentación, mientras que sistemas placa – pilotes estarán exentos de la aparición de dicho fenómeno.

- Se recomienda aplicar sistemáticamente los criterios y la metodología aquí presentada a otros casos, reales o virtuales, con pesos de edificio y con perfiles de suelos diferentes al del caso particular de este proyecto, para incorporar tales variables al estudio de sensibilidad y al proceso de optimización de soluciones placa – pilotes.
- Se recomienda que tales desarrollos adicionales para un mejor entendimiento y una mejor aplicación de sistemas placa – pilotes, se respalden con más resultados de pruebas de carga de pilotes y con el monitoreo de otros casos reales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Meli Piralla. Diseño Estructural

[2] Ings. William Conrad Galicia Guarníz y Javier Rubén León Vasquez 2007. «INTERACCION SISMICA SUELO-ESTRUCTURA EN EDIFICACIONES DE ALBAÑILERIA CONFINADA CON PLATEAS DE CIMENTACION»

[3] Eduardo Rojas Gonzales, Miguel Promo Organista (Investigador, Instituto de ingeniería, UNAM. « Modelos Constitutivos Utilizados en Geotecnia (Modelos de Tesca y Von Mises); Modelos Constitutivos Utilizados en Geotecnia (La teoría plástica); Modelos Constitutivos Utilizados en Geotecnia (Modelos de Mohr - Coulomb)»

[4] J. HAHN. «*Vigas continuas, pórticos, placas y vigas flotantes sobre terreno elástico*». Editorial Gustavo Gili. (1982). Tercera edición

[5] ACI, 336.2 R - 88. Suggested design procedures for combined footing and mats. American Concret Institute

[6] CALAVERA, JOSÉ. «*Cálculo de estructuras de cimentación*», cuarta edición Intemac,

[7] MÓDULO DE BALASTO de una losa a partir del coeficiente de balasto de una placa de 30 x30 cm. (Según Terzagui).

http://www.demecanica.com/formweb_balasto.aspx

[8] Curso aplicado de cimentaciones. José María Rodríguez Ortiz, Jesús Serra Gesta y Carlos Oteo Mazo. COAM

- [9] Edward Tsudik, Ph. D., PE. «Analysis of Beams and Frames on Elastic Foundation». Trafford Publishing
- [10] BOWLES, JOSEPH E. -"Foundation Analysis and Design". Mc Graw-Hill, 1997
- [11] G. WINTER, A. H. NILSON. "Proyectos de Estructuras de Hormigón". Ed. Reverté, 1986
- [12] Tseng, W., Penzien, J. "Soil-Foundation-Structure Interaction." *Bridge Engineering Handbook*. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan Boca Raton: CRC Press, 2000
- [13] problemas relativos a cimentaciones superficiales y con losas braja cap 3, 4 y 5 cuarta edición
- [14] http://www.construmatica.com/construpedia/Cimentaciones_por_Losa
- [15] trabajos con pilotes y pilotes perforados braja cap. 9 y 10 cuarta edición.
- [16] <http://materias.fi.uba.ar/7411/curso/TP2/teoria/FP01.pdf>
- [17] Aldo Guzmán G. Martin Achmus, Concepción y Diseño: Losas de fundación combinadas con pilotes.
- [18] Butterfield, R.; Banerjee, P.K.: The problem of pile group - pile cap interaction; *Géotechnique* 21, 1971
- [19] Katzenbach, R. et al.: Análisis del comportamiento estructural de LFCP Pfahlsymposium; Braunschweig 1999.
- [20] El-Mossallamy, Y.: Un modelo de cálculo para el comportamiento portante de CTLP; Darmstadt 1996.

[21] (Reglas para el diseño, dimensionado y construcción de CTLP); Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2000.

[22] Cálculo de asentamiento por consolidación braja cap. 1 cuarta edición

[23] problemas relativos a cimentaciones superficiales y con losas corridas braja cap. 3, 4 y 5 cuarta edición

[24] ECHAVARRIA W.,HOYOS F., Efecto Tridimensional en el Análisis de ISE. Tesis Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 1995.

[25] Manual de teoría CivilFEM. Primera edición. Ingeciber, S.A.

[26] RAFAEL CORREA, Evaluación de Edificios de Concreto Reforzado con Diferentes Insuficiencias de Estructuración Sismo Resistente. Tesis Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander. 2008.

[27] Chopra, Anil K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. Ed. New Jersey : Prentice Hall, 2001. P. 559.

[28] Diseño y Calculo de Pilotes A partir de la Norma Tecnologica de la Edificacion, NTE