

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOSAS DE CIMENTACIÓN MACIZAS Y
ALIGERADAS, SOBRE EL TERRENO Y SOBRE PILOTES**



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827



**Facultad de
Ingeniería**
Fundada en 1949

SEBASTIAN ALTAMIRANDA MARTELO

NICOLAS JUNIOR FLORIÁN REINEL

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2017

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOSAS DE CIMENTACIÓN MACIZAS Y
ALIGERADAS, SOBRE EL TERRENO Y SOBRE PILOTES**

Autores:

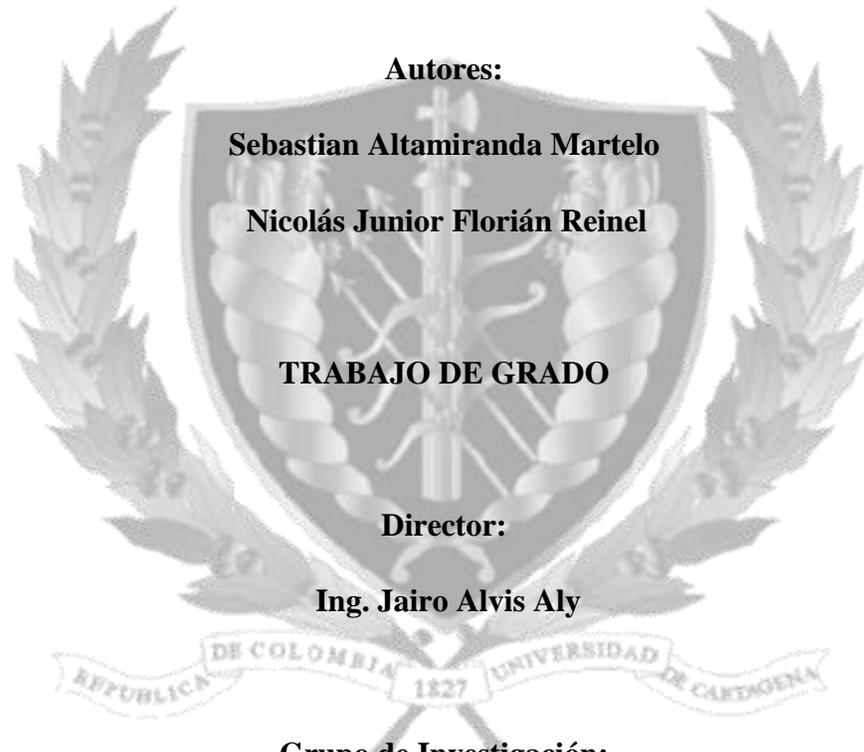
Sebastian Altamiranda Martelo

Nicolás Junior Florián Reinel

TRABAJO DE GRADO

Director:

Ing. Jairo Alvis Aly



Grupo de Investigación:

ESCONPAT

Línea de Investigación:

Gerencia de Proyectos

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2017



AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, agradecer a Dios por la vida, por permitirnos sacar este proyecto adelante y sobre todo por la fortaleza que nos brinda día a día para cumplir cada una de nuestras metas.

De forma similar manifestamos gratitud a nuestras familias, por todo el apoyo y el amor incondicional a lo largo de estos 5 años de formación profesional, ya que son el motor de nuestras vidas y nos impulsan a creer en nosotros.

Por ultimo agradecer al Ing. Jairo Alvis Aly y al Ing. Guilliam Barboza por el tiempo y su colaboración, y a todas que de alguna u otra forma contribuyeron al desarrollo del proyecto.



CONTENIDO

RESUMEN.....	16
ABSTRACT	17
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO REFERENCIAL.....	23
1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	23
1.1.1 Antecedentes a nivel Internacional	23
1.1.2 Antecedentes a nivel Nacional y Local.....	30
1.1.3 Limitaciones de los antecedentes	32
1.2 MARCO TEORICO.....	32
1.2.2 Clasificación de los suelos	33
1.2.3 Losas para cimentaciones.....	34
1.2.3.1 Tipos comunes de losas para cimentaciones	34
1.2.3.2 Capacidad de carga de losas para cimentaciones	35
1.2.3.3 Asentamientos diferenciales de losas para cimentaciones	41
1.2.3.4 Distribución de la armadura de flexión en la placa	42
1.2.3.5 Calculo a esfuerzo cortante	43
1.2.3.6 Cálculo a punzonamiento	44
1.2.4 Pilotes.....	45
1.2.4.1 Pilotes en compresión centrada	47
1.2.4.2 Capacidad de Carga de Pilotes en Arena.....	50
1.2.6 Estabilización de suelo con columnas de cemento (Jet Grouting).....	58
1.2.7 Critical Path Method (CPM).....	60
1.2.7.1 Clasificación de las holguras temporales	61



1.2.8	Presupuesto de obra.....	63
1.2.8.1	Contenido de un presupuesto de obra.....	63
1.2.8.2	Conceptos generales sobre costo.....	64
1.2.8.3	Precios unitarios	65
1.2.9	Softwares.....	66
1.2.9.1	Software ETABS.....	66
1.2.9.2	Software SAFE (SAFE, v2014).	67
2.	OBJETIVOS.....	68
3.	ALCANCE.....	69
3.1	DELIMITACIÓN ESPACIAL.....	69
3.2	DELIMITACIÓN TEMPORAL.....	69
3.3	DELIMITACIÓN CONCEPTUAL	71
3.4	RESULTADOS.....	71
3.5	PRODUCTO FINAL A ENTREGAR Y COMPLEMENTARIOS.....	71
3.6	LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	72
4.	METODOLOGÍA	73
4.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	74
4.1.1	Revisión bibliográfica técnica, teórica y de los antecedentes y estado del arte del marco referencial	74
4.1.2	Consulta virtual de tiempos y costos de construcción	75
4.2	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN.....	75
4.2.1	Caracterización geotécnica del suelo para la modelación y análisis de interacción suelo estructura	75



4.2.2	Identificación y asignación de cargas a los modelos estructurales	76
4.3	CONSTRUCCIÓN, ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE MODELOS COMPUTACIONALES	78
4.3.1	Construcción de los modelos computacionales de losas de cimentación maciza y aligerada apoyada sobre el terreno en el software SAFE 14	78
4.3.2	Construcción de los modelos computacionales de losas de cimentación maciza y aligerada sobre pilotes en el software ETABS	86
4.3.3	Análisis y diseño estructural de los modelos computacionales de losas de cimentación maciza y aligerada apoyada sobre el terreno en el software SAFE 14	91
4.3.4	Análisis y diseño estructural de los modelos computacionales de losas de cimentación maciza y aligerada apoyada sobre pilotes en los softwares ETABS y SAFE 14.....	91
4.4	CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS PARA CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN.....	92
4.5	ELABORACIÓN DE PRESUPUESTO Y PROGRAMACIÓN DE OBRA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN	92
4.5.1	Construcción de planos estructurales	92
4.5.2	Cálculo de cantidades de obra y Análisis de Precios Unitarios (APU).....	92
4.5.3	Programación de obra para cada una de las alternativas de cimentación	93
4.6	EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN	93
4.6.1	Comparación entre los resultados obtenidos de las diferentes alternativas de cimentación.....	93
4.6.2	Comparación de los resultados obtenidos de las diferentes alternativas de cimentación con otras investigaciones.....	93
5.	RESULTADOS	94



5.1	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	94
5.2	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO PARA LA MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA	95
5.3	RESULTADOS DE LA INTERACCION SUELO-CIMIENTO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS MODELOS COMPUTACIONALES	100
5.4	RESULTADOS DEL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS TOTALES Y DIFERENCIALES PARA CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN	110
5.5	PRESUPUESTO Y PROGRAMACIÓN DE OBRA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN	112
5.5.1	Planos estructurales de las alternativas de cimentación	112
5.5.2	Calculo de cantidades de obras y Análisis de Precios Unitarios (APU)	112
5.5.3	Programación de obra para cada una de las alternativas de cimentación	119
5.6	CUADRO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN	123
5.7	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON RESULTADOS DE ESTUDIOS ANTERIORES	125
6	CONCLUSIONES	127
7	LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES	130
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
	ANEXOS	135



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuración típica del refuerzo de losa aligerada sobre el terreno. Fuente: Mazzeo, A., 2004.	26
Figura 2. Tipos de losas de cimentación: losa plana. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 297.....	35
Figura 3. Losa plana de mayor espesor bajo columnas. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 298.....	36
Figura 4. Vigas y losa. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 299.....	37
Figura 5. Losa con muro de sótano. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 300.	38
Figura 6. Gráfica de $q_{atm}/n_{ota}/C \propto$. (Nota: FS = 3). Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 301.....	39
Figura 7. Bandas de soportes y centrales. Fuente: Cálculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 244.....	43
Figura 8. Esquema de distribución de cargas puntuales en losa. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 311.....	44
Figura 9. Esquema de pilote. Fuente: Calculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 267.....	46
Figura 10. Disposiciones típicas de pilotes para grandes cargas. Fuente: Calculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 268.....	46
Figura 11. Grupos de pocos pilotes. Fuente: Calculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 268.....	47
Figura 12. Excentricidad en plantación de pilotes. Fuente: Calculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 270.	49
Figura 13. Variación de α con la cohesión no drenada. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001) 4ta Edición. Pag 596.....	51



Figura 14. Criterio de Meyerhof. Fuente: Introducción a la mecánica de suelos, Covo 2003. Pag 208.....	53
Figura 15. Varios tipos de distribución de la resistencia por fricción (superficial) unitaria a lo largo del fuste del pilote. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 615.....	55
Figura 16. Coeficiente de la variación horizontal de la subrasante. Fuente: Introducción a la mecánica de suelos, Covo 2003. Pag 239.	58
Figura 17. Esquema de sistemas Jet Grouting. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2011). 7ma Edición. Pag 777.....	59
Figura 18. Ubicación geográfica de la Ciudad de Cartagena (Colombia). Fuente: Google Maps (2016).	70
Figura 19. Ubicación geográfica de la Universidad de Cartagena, coordenadas 10°24'06.3"N, 75°30'19.6"W. Fuente: Google Maps (2016).....	70
Figura 20. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del estudio. Fuente: Autor	73
Figura 21. a) Definición de combinación de diseño C.9-1 de la NSR-10 en el software SAFE 14, b) Definición de combinación de servicio. Fuente: Autor	78
Figura 22. Sección transversal típica de una losa maciza de cimentación apoyada sobre el terreno. Fuente: Autor	81
Figura 23. Sección transversal típica de una losa aligerada de cimentación apoyada sobre el terreno. Fuente: Autor	81
Figura 24. Concreto de 4000 PSI definido para los modelos de losas maciza y aligerada en SAFE 2014. Fuente: Autor.....	81
Figura 25. Acero grado 60, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ definido para los modelos de losas maciza y aligerada en SAFE 2014. Fuente: Autor.	82
Figura 26. Módulo de reacción del suelo, $k_{0,3} = 2.6 \text{ Kg/cm}^3$ equivalente para la losa y correspondiente a una arena húmeda de consistencia media definido para los modelos de losas maciza y aligerada en SAFE 2014. Fuente: Autor.....	82
Figura 27. Definición de vigas para el modelo de losa aligerada realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor	83



Figura 28. Modelo en 3D de losa maciza realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor.	83
Figura 29. Planta del modelo de losa maciza realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor.	84
Figura 30. Planta del modelo de losa aligerada realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor. .	85
Figura 31. Modelo en 3D de losa aligerada realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor.	86
Figura 32. Sección transversal típica de una losa maciza de cimentación apoyada sobre pilotes. Fuente: Autor.	87
Figura 33. Sección transversal típica de una losa aligerada de cimentación apoyada sobre pilotes. Fuente: Autor.	87
Figura 34. Definición de pilotes de diámetro 0.6 metros para el modelo de losa maciza y aligerada realizado en ETABS. Fuente: Autor.	87
Figura 35. Modelo preliminar en 2D de losa maciza sobre pilotes de 0.6 metros diámetro realizado en ETABS. Fuente: Autor.	88
Figura 36. Modelo preliminar en 3D de losa maciza sobre pilotes de 0.6 metros diámetro realizado en ETABS. Fuente: Autor.	89
Figura 37. Modelo preliminar en 3D de losa aligerada sobre pilotes de 0.6 metros diámetro realizado en ETABS. Fuente: Autor.	89
Figura 38. Modelo preliminar en 2D de losa aligerada sobre pilotes de 0.6 metros diámetro realizado en ETABS. Fuente: Autor.	90
Figura 39. Verificación de presiones sobre el suelo causado por las combinaciones de servicio para la alternativa de Losa maciza sobre el terreno. Fuente: Autor	101
Figura 40. Verificación de presiones sobre el suelo causado por las combinaciones de servicio para la alternativa de Losa aligerada sobre el terreno. Fuente: Autor	101
Figura 41. Verificación de presiones sobre el suelo causado por las combinaciones de servicio para la alternativa de Losa maciza sobre pilotes. Fuente: Autor	102
Figura 42. Verificación de presiones sobre el suelo causado por las combinaciones de servicio para la alternativa de Losa aligerada sobre pilotes. Fuente: Autor	102
Figura 43. Planta de columnas de cemento por zonas. Fuente: Autor	105
Figura A. 1. Registro fotográfico correspondiente al sondeo #1. Fuente: Guilliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.	149



Figura A. 2. Registro fotográfico correspondiente al sondeo #2. Fuente: Guillian Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.....	149
Figura A. 3. Registro fotográfico correspondiente al sondeo #3. Fuente: Guillian Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.....	150
Figura A. 4. Registro fotográfico correspondiente al sondeo #4. Fuente: Guillian Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.....	150
Figura B. 1. Secciones de columnas empleadas en el análisis estructural de la edificación. Fuente: Autor.	152
Figura B. 2. Distribución de columnas y ejes estructurales en planta del edificio “Las Florez”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Florez” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.	153
Figura B. 3. Planta arquitectónica del piso 1° (izquierda) y piso 2° (Derecha) del edificio “Las Florez”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Florez” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.	165
Figura B. 4. Planta arquitectónica del piso 3° (izquierda) y pisos del 4° al 14° (Derecha) del edificio “Las Florez”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Florez” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.	166
Figura B. 5. Planta arquitectónica del piso 15° (izquierda) y piso 16° (Derecha) del edificio “Las Florez”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Florez” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.	167
Figura B. 6. Fachada frontal (izquierda) y corte transversal (Derecha) del edificio “Las Florez”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Florez” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.	168
Figura B. 7. Fachada lateral derecha del edificio “Las Florez”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Florez” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.	169



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción cualitativa de suelos de grano grueso y fino de acuerdo con su resistencia.....	33
Tabla 2. Proporciones relativas arena y finos.	34
Tabla 3. Valores máximos de los asentamientos diferenciales en función de la distancia entre apoyos o columnas	57
Tabla 4. Características sísmicas de la edificación del proyecto	76
Tabla 5. Resistencia a compresión simple en función del tipo de terreno para el sistema Jet 1.....	79
Tabla 6. Parámetros típicos para columnas de cemento para diferentes sistemas Jet.....	79
Tabla 7. Documentos tomados en cuenta en la revisión bibliográfica.....	94
Tabla 8. Perfil estratigráfico típico del subsuelo del proyecto.	96
Tabla 9. Cálculo de la capacidad admisible de los pilotes de 0.6 metros de diámetro.	97
Tabla 10. Calculo de los asentamientos totales para los pilotes de 0.6 metros de diámetro.	98
Tabla 11. Cálculo del módulo de reacción horizontal K_h , para los pilotes de 0.6 metros de diámetro.....	99
Tabla 12. Cálculo del módulo de reacción vertical K_v , para los pilotes de 0.6 metros de diámetro.....	100
Tabla 13. Calculo de la capacidad de carga del suelo estabilizado con columnas de suelo cemento (Jet Grouting).....	103
Tabla 14. Información del modelo final de la losa maciza apoyada sobre el terreno.	106
Tabla 15. Información del modelo final de la losa aligerada apoyada sobre el terreno. ...	107
Tabla 16. Información del modelo final de la losa maciza apoyada sobre pilotes.....	108
Tabla 17. Información del modelo final de la losa aligerada apoyada sobre pilotes.	109
Tabla 18. Resumen de cantidades de obra de la losa aligerada sobre el terreno.....	112



Tabla 19. Resumen de las cantidades de obra de la losa aligerada sobre pilotes.....	113
Tabla 20. Resumen de cantidades de obra de la losa maciza sobre el terreno.	113
Tabla 21. Resumen de cantidades de obra de la losa maciza sobre pilotes.....	114
Tabla 22. Presupuesto Losa Aligerada sobre el terreno.	115
Tabla 23. Presupuesto Losa Aligerada sobre pilotes.	116
Tabla 24. Presupuesto Losa Maciza sobre el terreno.	117
Tabla 25. Presupuesto Losa Maciza sobre pilotes.	118
Tabla 26. Evaluación comparativa entre las alternativas de cimentación estudiadas.	123
Tabla A. 1. Resumen de perforaciones.	136
Tabla A. 2. Resumen ensayo de penetración estándar (SPT), Sonde # 1.	137
Tabla A. 3. Resumen ensayo de penetración estándar (SPT), Sonde # 2.	140
Tabla A. 4. Resumen ensayo de penetración estándar (SPT), Sonde # 3.	143
Tabla A. 5. Resumen ensayo de penetración estándar (SPT), Sonde # 4.	146
Tabla B. 1. Secciones de columnas en la distribución en planta.....	151
Tabla B. 2. Cargas de servicio de las columnas producto del análisis estructural de la edificación “Las Florez”.	154
Tabla B. 3. Combinaciones de Servicio usadas para el análisis de interacción suelo estructura.	164



LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Cantidad de cemento para el sistema Jet en función del tipo de terreno y resistencia a la compresión. Fuente: Warner, J. (2004)	80
Gráfica 2. Asentamientos máximos totales para cada una de las alternativas de cimentación obtenidos del software SAFE 2014. Fuente: Autor	110
Gráfica 3. Asentamientos mínimos totales para cada una de las alternativas de cimentación obtenidos del software SAFE 2014. Fuente: Autor	111
Gráfica 4. Asentamientos diferenciales para cada una de las alternativas de cimentación. Fuente: Autor.	111
Gráfica 5. Cronograma de construcción de Losa Aligerada apoyada sobre el terreno. Fuente: Autor	119
Gráfica 6. Cronograma de construcción de Losa Aligerada sobre pilotes. Fuente: Autor	120
Gráfica 7. Cronograma de construcción de Losa Maciza apoyada sobre el terreno. Fuente: Autor	121
Gráfica 8. Cronograma de construcción de Losa Maciza sobre pilotes. Fuente: Autor ..	122



LISTA DE ABREVIATURAS

Aa	Aceleración picoefectiva
Altern.	Alternativa
Av	Velocidad horizontal picoefectiva
cm	Centímetro
Kg	Kilogramo
m	Metro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT)
N cor	Número de golpes corregido del ensayo de penetración estándar (SPT)
Psi	Libras por pulgada cuadrada (pounds-force per square inch)
pulg	Pulgada
q adm	Carga admisible
Ton	Tonelada



RESUMEN

Como alternativa de diseño a la losa maciza de hormigón armado, han surgido en las últimas décadas distintas aplicaciones, como la empleada parcialmente en la cimentación del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia (Fachada de la Pasión) ubicado en Barcelona (España), con la utilización de perfiles de acero a modo de emparrillado embebido en el canto de la losa, aun cuando en la práctica funcionaban como armaduras en tracción. El presente proyecto de investigación pretendió evaluar, mediante un análisis comparativo, las alternativas de diseño de losas de cimentaciones aligeradas y macizas, sobre el terreno y sobre pilotes diseñadas para el edificio “Las Florez”. Todo lo anterior con el fin de determinar el tipo de losa de cimentación óptimo en cada caso. Por lo anterior, en la Ciudad de Cartagena de Indias, específicamente en los laboratorios de sistemas del Campus Piedra Bolívar de la Universidad de Cartagena, se construyeron y evaluaron los modelos computacionales usando los softwares ETABS y SAFE, y se elaboraron los respectivos cronogramas y presupuestos de obra para cada una de las alternativas de cimentación del proyecto, con el fin brindar una solución diferente a las losas de cimentación tradicionalmente implementadas. En general, los resultados obtenidos demostraron la viabilidad económica de la alternativa de cimentación aligerada sobre pilotes, obteniendo una reducción en costo del 20% con respecto a la losa maciza sobre el terreno que resultó ser la más costosa. Constructivamente la alternativa con la menor duración es la losa maciza sobre el terreno con 80 días laborales y 2 días menos que la losa aligerada sobre el terreno como segunda alternativa de menor duración.

A partir de los resultados obtenidos, también es posible afirmar que la losa aligerada y maciza sobre pilotes se presentan como alternativas económicas cuando la capacidad portante de los estratos superiores del suelo son deficientes como se presenta en el proyecto, mientras que para la misma condición desde el punto de vista de los tiempos de ejecución incluir una intervención del suelo para cimentar superficialmente el edificio del proyecto es una solución interesante.



ABSTRACT

As an alternative design to the slab of reinforced concrete, have emerged in recent decades various applications, such as the foundation used in part of “La Sagrada Familia” (Facade of the Passion) located in Barcelona (Spain), with the use of steel as a grid embedded in the edge of the slab, even if in practice they worked as reinforcements in traction. This research project tried to evaluate through a comparative analysis, the design alternatives of lightened slabs and solid foundations, on the ground and on piles designed for the "Las Florez" building. All this in order to determine the optimal type of foundation slab in each case. Therefore, in the City of Cartagena de Indias, specifically in the systems room of University of Cartagena Campus Piedra de Bolivar, were built and tested the computer models using software as ETABS and SAFE, and the respective schedules and budgets were developed for each of the project foundation alternatives, to provide a different foundation solution to the slabs traditionally implemented. Overall, the results demonstrated the economic viability of the lightened foundation on piles, obtaining a cost reduction of 20% respect to the solid foundation on the ground that was the most expensive. Constructively, the alternative with the least duration is the solid slab on the ground with 80 working days and 2 days less than the lightened slab on the ground as the second alternative of shorter duration.

From the results obtained it is also possible to affirm that the lightened and the solid slab on piles are presented as economic alternatives when the carrying capacity of the upper strata of the soil are deficient as presented in the project, while for the same conditions according with the execution times include a soil intervention to superficially cement the project building is an interesting solution.



INTRODUCCIÓN

Como bien se sabe, la cimentación de una estructura se define como aquella parte de la edificación que está en contacto directo con el terreno, tiene como función principal transmitir toda la carga del edificio hacia el suelo. Actualmente, la tradicional manera del diseño y construcción generalizada por la “experiencia” cotidiana, se ha utilizado por la falta de información sobre nuevas alternativas de cimentación desarrolladas para los diferentes tipos de suelos y condiciones medio ambientales. Por lo anterior es posible afirmar, que la ingeniería debe participar y estar al servicio de las necesidades del hombre que se desenvuelve sujetándose a las condiciones de la zona donde reside. Una de ellas es la necesidad de edificar en suelos con problemas que encarecen el costo y mantenimiento de las edificaciones. Situación que debe ser tratada y resuelta con tecnología adecuada, (Tamia, 2003).

Uno de los tipos de cimientos son las losas macizas de cimentación, que normalmente requieren refuerzo en dos capas y un mayor volumen de hormigón e incluso de refuerzo. Con este sistema es posible aprovechar las losas de piso como sistema de cimentación. Este sistema es el más fácil y rápido de construir, (Vásquez L, 2010).

Como alternativa de diseño a la losa maciza de hormigón armado, han surgido en las últimas décadas distintas aplicaciones, como la empleada parcialmente en la cimentación del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia (Fachada de la Pasión) ubicado en Barcelona (España), con la utilización de perfiles de acero a modo de emparrillado embebido en el canto de la losa, aun cuando en la práctica funcionaban como armaduras en tracción. Una solución con cierta semejanza a la anterior (aplicable a viviendas unifamiliares) consiste en una losa apoyada sobre un continuo de bloques de poliestireno expandido (EPS, por su nombre en inglés), a la que se le añaden unos nervios en los bordes hormigonados sobre unas piezas prefabricadas de EPS. Esta última solución puede ser considerada como losa aligerada y al emplear dicha solución se obtienen importantes ventajas: se reducen de



manera significativa los asientos de la cimentación, junto a una reducción, así mismo, de los términos diferenciales entre distintos puntos de la misma. Junto a esto, se obtiene una reducción de importancia en el volumen de hormigón y las cuantías de acero respecto a las losas macizas tradicionales, (Dávila, J. M., Fortes, J. C., Crespo, L., Rodríguez, C. A., 2015).

En la práctica de ingeniería convencional, los edificios altos son a menudo diseñados considerando la base de la estructura empotrada al suelo, descuidando así los efectos de la interacción suelo-cimientos-estructura (SFSI, por sus siglas en inglés). Aunque esto puede ser considerado razonable para edificios de baja altura sobre suelos relativamente rígido, el efecto de SFSI se hace más frecuente en estructuras pesadas que descansan sobre suelos relativamente blandos. Este efecto puede conducir en un aumento de la deformación global del sistema, con la acumulación de desplazamientos irreversibles significativos, y para una distribución diferente de las fuerzas internas, con una reducción neta de la demanda estructural, (Venanzi I., Salciarini D. & Tamagnini C., 2014). La solución correcta a este problema para el caso donde se implementen losas macizas de cimentación, no es sobredimensionando el elemento estructural, sino realizando un diseño alternativo como las losas aligeradas, que acompañado de una ejecución correcta, es posible que garanticen un ahorro tanto económico como en los tiempos de construcción de la obra. Cabe resaltar que, para el diseño correcto de esta solución es necesario conocer el comportamiento de la cimentación de hormigón en el subsuelo. (Buchta V., Janulikova M. & Fojtik R., 2015).

Como antecedente se tiene la solución para los cimientos de dos edificios altos de hormigón armado, construidos en zona sísmica alta de Caracas (Venezuela). En la investigación “MAT FOUNDATIONS FOR SEISMIC RESISTANT BUILDINGS IN VENEZUELA” realizada por Mazzeo A. en el año 2004, Se implementaron las losas aligeradas de hormigón armado como la mejor opción para llevar a cabo su diseño estructural con las condiciones del suelo resistentes, las respuestas dinámicas y ventajas económicas. Ambas estructuras fueron diseñadas por el autor para soportar las provisiones sísmicas prescritas



por la normativa sísmica de Venezuela. También se estudiaron otras soluciones de cimentación, pero estas lanzaron como resultado la losa aligerada como la más ventajosa.

Por otra parte, Aguilar, H. & Avilés, J. en el año 2003 en el estudio “INFLUENCIA DE PILOTES DE FRICCIÓN EN LA INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO-ESTRUCTURA” analizan un modelo de interacción entre la estructura, cimentación y suelo para evaluar la influencia de una losa de cimentación con pilotes de fricción en la respuesta estructural ante excitación sísmica. El sistema se idealiza por medio de masas concentradas y resortes y amortiguadores discretos. A partir de un depósito de suelo propuesto y estructuras hipotéticas caracterizadas por su periodo fundamental de vibración y 5 % de amortiguamiento estructural, se estudió la variación del periodo y amortiguamiento efectivos en sistemas que presentan una cimentación con cajón y pilotes. Estos resultados se compararon con respecto a los obtenidos en sistemas en que los pilotes se desprecian. Para un periodo estructural se observó que, por su rigidez, el sistema de cimentación mixta genera periodos y amortiguamientos efectivos menores y mayores, respectivamente, que los determinados en sistemas en que los pilotes se desprecian.

En este estudio se hace énfasis principalmente en las losas de cimentación, cabe mencionar que entre más grande sea la losa más costosos resultan los procesos constructivos, ya que son usadas con una alta frecuencia en grandes edificaciones y requieren cantidades muy elevadas de concreto. Por esta razón se busca estudiar las losas aligeradas como una alternativa diferente a las losas de cimentación comúnmente usadas, y a su vez comparar con las losas macizas su viabilidad económica y proceso constructivo. (Letsios, C., Lagaros, N. & Papadrakakis M., 2014). Todo lo anterior, teniendo en cuenta que uno de los principales problemas que presentan las obras civiles en la actualidad, más específicamente las grandes edificaciones, son los elevados costos de construcción (Martínez S, 2012).

Por las razones anteriormente expuestas, este trabajo de investigación procuró realizar una evaluación comparativa entre las alternativas propuestas en este trabajo para losas de cimentación maciza y aligerada; se realizaron los diseños como solución a los cimientos de una edificación local, analizando aspectos económicos, de programación y control de obra.



Debido a que no existen registros en la ingeniería local respecto a la implementación de losas aligeradas.

En la Ciudad de Cartagena de Indias, específicamente en los laboratorios de sistemas del Campus Piedra Bolívar de la Universidad de Cartagena, se construyeron y evaluaron los modelos computacionales para cada una de las alternativas de cimentación del proyecto, con el fin brindar una solución diferente a las losas de cimentación tradicionalmente implementadas.

La investigación realizada en el área de estructuras se asocia con el grupo de investigación de la universidad de Cartagena ESCONPAT, y es afín a su línea de investigación Gerencia de Proyectos, debido a que el proyecto realizado, a pesar de utilizar software como ayuda para el diseño y modelación estructural, con estos se busca obtener y comparar resultados de costos y tiempos de programación, los cuales se relacionan íntimamente con la rama de Gerencia de Proyectos.

Por consiguiente, se efectuó el diseño estructural de las losas macizas y aligeradas de cimentación para los casos de estudio, se identificaron los detalles del comportamiento de los diferentes modelos mediante la interacción sísmica suelo-estructura, además se precisó la respuesta de estos frente a la presencia de deformaciones producto de asentamientos diferenciales y totales. Con base en los resultados obtenidos anteriormente se buscó responder a los siguientes interrogantes: ¿Qué tipo de losa de cimentación es económica y constructivamente más viable para el caso de un terreno de alta capacidad portante? y de la misma forma ¿Cuál es el tipo más idóneo para apoyar sobre pilotes en caso de tener un suelo con baja capacidad portante?

En general, los resultados obtenidos demostraron la viabilidad económica de la alternativa de cimentación aligerada sobre pilotes, obteniendo una reducción en costo del 20% con respecto a la losa maciza sobre el terreno que resultó ser la más costosa. Constructivamente la alternativa con la menor duración es la losa maciza sobre el terreno con 80 días laborales y 2 días menos que la losa aligerada sobre el terreno como segunda alternativa de menor



duración. Para el caso más específico de cimientos superficiales la alternativa de cimentación aligerada puede ser realizada a un menor costo y similar tiempo con respecto a la losa maciza sobre el terreno. Por otro lado al contrastar las alternativas de cimentación profundas se destaca nuevamente la alternativa aligerada en el aspecto económico y con mayores tiempos de ejecución por sobre la losa maciza. En cuanto a asentamientos los resultados fueron los esperados, obteniendo en gran medida asentamientos menores para las alternativas de cimentación sobre pilotes que apoyadas sobre el terreno.

La comparación realizada en el proyecto es de importancia en la rama de las estructuras de la Ingeniería Civil a la hora de seleccionar el tipo de cimentación a emplear, basado en los parámetros de comparación del presente estudio y cuando se requiera distribuir las cargas de la edificación a través de una losa. Por otro lado invita a considerar las técnicas modernas de intervención de suelos para mejorar la capacidad portante como alternativas a los grupos de pilotes, ya que al encontrarse con suelos de baja capacidad portante en la superficie se da por hecho sin estudiar la viabilidad estructural, económica y constructiva, cimentar el edificio a un estrato más duro usando pilotes.

Por último el presente proyecto amplía y afirma la literatura actual en cuanto a las ventajas económicas de emplear alternativas de cimentación aligerada, ya mencionadas por otros autores en la presente investigación. Además examina y genera información de alternativas distintas a las que se presentan comúnmente en la actualidad para cimentar edificios de gran altura en regiones con actividad sísmica y con suelo con capacidad deficiente, abriéndose a las técnicas que brinda la ingeniería de suelos y que han venido mejorando con el tiempo.



1. MARCO REFERENCIAL

1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

A lo largo de la historia es claro que las cimentaciones han sido objeto de mucho cuidado junto a la superestructura, esta última es foco de atención por pertenecer a un considerable porcentaje de la estructura de un edificio. Es evidente que en la actualidad somos testigos de la aplicación de algún modo de la “ciencia de las cimentaciones”, debido a las estructuras que con el pasar de los siglos aún siguen en pie, sin embargo es posible que el desarrollo de esta “ciencia” acompañada de investigaciones haya sentado las bases de los principios y técnicas actuales que definen el diseño y construcción de los cimientos. Con el fin de conocer y establecer comparaciones con otros conocimientos y/o investigaciones recientes, a continuación se pretende identificar el estado de desarrollo más avanzado concerniente a la identificación de la solución óptima entre los modelos de cimientos planteados en el proyecto.

1.1.1 Antecedentes a nivel Internacional

Aguilar y Avilés en su informe “*Influencia de pilotes de fricción en la interacción dinámica suelo–estructura*” realizado en el año 2003 estudian un modelo de interacción entre la estructura, cimentación y suelo para evaluar la influencia de pilotes de fricción en la respuesta estructural ante excitación sísmica. El sistema se idealiza por medio de masas concentradas y resortes y amortiguadores discretos. Los resortes y amortiguadores que representan al suelo se consideran dependientes de la frecuencia de excitación mediante el uso de funciones de impedancia apropiadas al tipo de cimentación. El efecto de grupos de pilotes debido a la interacción pilote–suelo–pilote se tiene en cuenta usando los factores de interacción dinámica desarrollados por Dobry y Gazetas de la misma forma que los reconocidos factores de interacción estática de Poulos. Se proponen fórmulas aproximadas para calcular fácilmente el incremento en el periodo fundamental debido a la flexibilidad



del suelo y el cambio en el amortiguamiento asociado por la radiación de ondas dentro del suelo. La aplicación de los conceptos presentados se ilustra con un ejemplo práctico y se muestran comparaciones entre las soluciones con y sin la presencia de los pilotes.

A partir de un depósito de suelo propuesto y estructuras hipotéticas caracterizadas por su periodo fundamental de vibración y 5 % de amortiguamiento estructural, se estudió la variación del periodo y amortiguamiento efectivos en sistemas que presentan una cimentación con cajón y pilotes. Estos resultados se compararon con respecto a los obtenidos en sistemas en que los pilotes se desprecian. Para un periodo estructural se observó que, por su rigidez, el sistema de cimentación mixta genera periodos y amortiguamientos efectivos menores y mayores, respectivamente, que los determinados en sistemas en que los pilotes se desprecian.

Para los sistemas con cajón de cimentación que incluyen y desprecian los pilotes, se calcularon relaciones de aceleración espectral y cortante basal con interacción con respecto a los originales calculados con base rígida. De este análisis, donde se incluyó un factor de comportamiento sísmico $Q = 4$ para las estructuras, se observó que las fuerzas sísmicas con interacción, en general, siempre fueron menores a las originales, presentando mayores reducciones aquéllas con el sistema de cimentación que incluye pilotes.

Roesset (1984) y otros han demostrado que los resultados obtenidos al aplicar la superposición de Poulos a problemas dinámicos son una buena aproximación de las soluciones rigurosas. Por ello, la respuesta de un grupo de pilotes puede determinarse con buena aproximación al emplear “factores de interacción” obtenidos del efecto entre dos pilotes.

Para este trabajo se han considerado los efectos de la interacción inercial y se desprecian los de la interacción cinemática. Ello resulta conservador siempre que los efectos de amplificación de sitio sean tomados en cuenta mediante el movimiento sísmico en la superficie del terreno, el cual se asigna como excitación de diseño en la base de la cimentación.



Análogamente, como solución para los cimientos de dos edificios altos de hormigón armado, construidos en zona sísmica alta de Caracas (Venezuela), Mazzeo A. en el año 2004 realiza una investigación titulada “Mat foundations for seismic resistant buildings in Venezuela”, en la cual se implementaron las losas aligeradas de hormigón armado como la mejor opción para llevar a cabo su diseño estructural con las condiciones del suelo resistentes, las respuestas dinámicas y ventajas económicas.

La construcción de las losas aligeradas de ambos edificios fueron ejecutadas, ya que es habitual para este tipo de elemento estructural: 1) mediante la colocación de un fondo reforzado losa maciza de hormigón en contacto directo con el estrato de suelo resistente; 2) usando vigas rectangulares de concreto armado, colocadas ortogonalmente entre ellas, formando una rejilla horizontal, cuyos ejes corresponden a los ejes superiores de la estructura en la que se colocan los marcos resistentes, (las vigas se pusieron invertidas en estos casos con el fin de establecer la losa inferior directamente contra el suelo en un plano horizontal); y 3) mediante la colocación de la losa superior de hormigón armado, apoyándose en la parte superior de las vigas, losa que a su vez forma la base de la planta baja del edificio. Estos componentes que se muestran en la Figura 1, hacen las losas lo suficientemente rígida, dando un excelente comportamiento estructural y apoyo a los edificios. Los ejes verticales de las columnas del edificio coinciden y se colocan en las intersecciones de los ejes de las vigas.

Ambas estructuras fueron diseñadas por el autor para soportar las provisiones sísmicas prescritas por la normativa sísmica de Venezuela. También se estudiaron otras soluciones de cimentación, pero estas lanzaron como resultado la más ventajosa. Lo anterior está claramente limitado por el marco legal que es el código de edificaciones sismo-resistentes de Venezuela (COVENIN).



Figura 1. Configuración típica del refuerzo de losa aligerada sobre el terreno. Fuente: Mazzeo, A., 2004.

Por otra parte, algunos autores como Katzenbach, Bachmann, Boled-Mekasha y Ramm, plasman en un estudio denominado “*Combined pile raft foundations (cprf): an appropriate solution for the foundations of high-rise buildings*” realizado en el 2005, teniendo en cuenta el hecho de que las ciudades con los edificios más altos en Alemania son Frankfurt y Mainz. La construcción de estos edificios es una tarea exigente y complicada para todos los ámbitos de la ingeniería civil, especialmente para los ingenieros geotécnicos cuando se consideran los asentamientos de la arcilla Frankfurt. Debido a las altas cargas de las nuevas estructuras, el riesgo de un alto grado de asentamientos y la inclinación no sólo de los nuevos edificios en sí, sino también de las estructuras adyacentes tienen que ser tenido en cuenta.

En las zonas urbanas, la principal duda relacionada con el diseño de edificios de gran altura en suelos sensibles, es la optimización, reducción de costos y asentamientos, buscando reducir al mínimo las deformaciones de las estructuras adyacentes y el propio edificio. Un método convencional para reducir los asentamientos en suelos sensibles es diseñar y construir una cimentación sobre la base de una capa dura como una roca o arena densa. En



el caso de una capa profunda rígida, la losa estará conectada con una gran cantidad de pilotes de gran diámetro, respectivamente, con enormes costos de construcción. Para hacer frente a los problemas encontrados en el diseño de las cimentaciones para edificios de gran altura en suelos susceptibles a grandes asentamientos, el desarrollo de nuevos diseños de base técnica y económicamente optimizado tiene que ser avanzado. El método implementado en la investigación es combinar pilotes convencionalmente con una losa flotante que transmite una considerable parte de la carga junto con los pilotes, que resulta en una combined pile-raft-foundation (CPFR). Se encontró mediante el uso de CPFRs como base para edificios de gran altura en la arcilla Frankfurt, una reducción considerable en asentamiento de más del 50% en comparación con lo logrado con la losa con pilotes comunes, no despreciando el suelo de baja capacidad portante que está cerca de la superficie. Debido a su filosofía de diseño mejorado, un CPFR reduce los costes de las pilas en más de un 60% en comparación con una cimentación con pilotes convencional. Las limitaciones de este estudio están dadas por las condiciones y propiedades mecánicas del suelo encontrado en la ciudad de Frankfurt, además no se realiza ningún comentario con respecto al nivel freático.

En el estudio llevado a cabo en el año 2011 por Imam, “*Influence of structural and soil parameters on Mat deflection*”, para investigar las características de deflexión de losa de cimentación teniendo en cuenta los parámetros estructurales y de suelo. La falta de conocimientos sobre la deflexión característica de las losas trae un poco de incertidumbre en el análisis de la losa de cimentación y puede resultar en un diseño poco rentable o inseguro. Este trabajo implicó una extensa investigación con respecto al efecto de los parámetros estructurales de deflexión de losa de cimentación mediante elementos finitos y el programa SAFE V8. Un estudio comparativo se realiza entre algunas posiciones críticas de la losa de cimentación utilizando métodos de elementos finitos con el fin de percibir la influencia de los diferentes parámetros que ayudan a entender el límite de seguridad práctico de las características de diseño. Se consideró como única estructura, un marco rígido con casos de gravedad y carga lateral. A la luz de las discusiones que precedieron las siguientes conclusiones, pueden extraerse: La deflexión disminuye en el centro de la losa y



en la esquina de la losa con el aumento de grosor. La variación es no lineal en todos los casos.

La deflexión aumenta en el centro de la losa y en el centro del panel interior disminuye con el espacio entre columnas. La variación de la deflexión en la esquina de la losa es sinusoidal con espacio entre columnas.

Las limitaciones del estudio están basadas en el análisis de otro tipo de sistema estructural y modelado matemático de la respuesta de la losa, teniendo en cuenta que solo es usado un pórtico rígido según la metodología.

Letsios, Lagaros y Papadrakakis M. en su trabajo “*Optimum design methodologies for pile foundations in London*” realizado en 2014, afirman que dada la importancia de las fundaciones con pilotes en la ingeniería geotécnica para las estructuras de soporte de alto grado, tales como puentes, edificios de gran altura, estaciones de centrales eléctricas, plataformas marinas y museos, se convierte en una necesidad encontrar el mejor diseño de la fundación con pilotes en términos de rendimiento y economía. El número de pilotes necesarios podrían superar varios cientos o incluso miles, mientras que el costo de la fundación con pilotes podría superar el 20% del costo de construcción de la superestructura. En este estudio el problema de encontrar diseños optimizados de pilotes se examina y se realiza de acuerdo a las recomendaciones de dos códigos de diseño, el Eurocódigo 7 y DIN 4014. El procedimiento de optimización estructural propuesta se implementa en dos edificios del mundo real: El Hiscocks House en Stonebridge Park de 16 plantas fundado sobre la arena, y el Hyde Park Cavalry Barracks de 31 pisos fundado en polvo de ladrillo. Ambos ubicados en Londres (Reino Unido) con el fin de evaluar la eficacia de la formulación del diseño propuesto.

Dos procedimientos de diseño diferentes se consideran en este trabajo con el fin de evaluar el rendimiento de los diseños obtenidos durante el proceso de optimización: el código fundación alemana DIN 4014 y el Eurocódigo 7. Ambas normas se basan en los siguientes criterios de diseño principales: (i) la capacidad de carga axial, (ii) los asentamientos



aceptables, (iii) la fuerza del pilote como elemento estructural y (iv) la capacidad de carga lateral y desplazamientos horizontales aceptables.

A través de la aplicación de la formulación propuesta en dos condiciones diferentes de suelo, se encontró que, dependiendo de las condiciones del suelo el procedimiento de diseño DIN puede ser más conservador en comparación con el EC7 y viceversa. Por otra parte, a través de la propuesta de cimentación con pilotes del estudio se consiguen diseños de cimentación que son más económicos en comparación con las soluciones de cimentación implementadas en el diseño original. El beneficio en términos de costo de construcción de los diseños óptimos varía de 7% a 33% en comparación con soluciones originales. Las limitaciones para esta investigación son el código para el diseño estructural (DIN y EC7) los cuales contienen ciertos parámetros que de alguna forma convergen en el diseño económico de la propuesta de cimentación.

Más enfocado al tema de la presente investigación, Davila, Fortes, Crespo y Rodriguez en el año 2015 en su proyecto *“Análisis comparativo en losas de cimentación: losas aligeradas mediante bloques de EPS frente a losas macizas”* realizan un análisis comparativo entre la solución tradicional de losa maciza frente a una aligerada empleando bloques de poliestireno expandido (EPS) como material aligerante. Mediante esta opción se pretende obtener dos mejoras en la cimentación: por un lado, un aumento de rigidez sin coste en volumen de hormigón; y por otro, reducir los asentamientos. Se plantean 5 objetivos concretos: Estudiar la posibilidad de uso de los bloques de EPS como piezas aligerantes en estructuras de cimentación, comparar la solución de la losa maciza frente a la aligerada, analizar el comportamiento estructural de una losa aligerada con EPS, evaluar el comportamiento frente a asentamientos en este tipo de soluciones y evaluar la viabilidad técnica de la solución propuesta. En esta investigación no se hace estudio económico, es decir, no se evalúa el presupuesto de todas las alternativas, y tampoco se estudian los aspectos constructivos específicos de cada sistema como son la programación y los tiempos de construcción.



1.1.2 Antecedentes a nivel Nacional y Local

Alrededor del año 2003, Duran J. presenta una investigación “OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CIMENTACION PLACA – PILOTES EN EL DEPOSITO LACUSTRE DE BOGOTÁ” en la cual, a través de un caso histórico, presenta la metodología de análisis y el proceso de optimización de una solución de cimentación placa-pilotes en un perfil de suelos blandos del depósito lacustre de Bogotá. 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 – pilotes – 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 el corto como para el largo plazo. Los varios esquemas analizados de placa – pilotes se comparan entre sí y con las alternativas de cimentación de losa corrida y de cimentación profunda con pilotes largos de fricción, discutiendo las ventajas relativas correspondientes para llegar, en el caso particular estudiado, a seleccionar la longitud adecuada de los pilotes y el porcentaje más conveniente de la carga no compensada del edificio tomado por los pilotes, con el fin de lograr los resultados más satisfactorios. Finalmente, se presenta la modelación simplificada de las cargas y reacciones en la cimentación placa – pilotes para su diseño estructural.

Para el caso particular del edificio aquí presentado se obtuvo que la solución más adecuada técnica y económicamente entre las estudiadas fue la cimentación del tipo placa – pilotes con pilotes de 20 – 30 metros de longitud y una capacidad y cantidad tales que, trabajando a la falla, tomarán entre el 100% y el 150% de la carga no compensada. Además, se puede concluir del anterior estudio que los sistemas de cimentación placa – pilotes están mejor preparados que las soluciones de placa corrida sin pilotes o que las soluciones de pilotes largos de fricción, debido a que sobrellevan satisfactoriamente los procesos tardíos de consolidación.



De acuerdo a un proyecto arquitectónico de un edificio de uso residencial de doce pisos y un sótano, ubicado en la ciudad de Bogotá, Moreno J. en el desarrollo de su tesis “*Sistema de cimentación en placa – pilotes. análisis de interacción suelo-estructura, para un edificio de 12 pisos y sótano en la ciudad de Bogotá*” en el año 2014 plantea una solución a la estructura del edificio usando un sistema estructural dual (pórticos en los dos sentidos y muros pantalla) que se cimentara sobre una fundación placa pilotes, la cual se diseña bajo las características de resistencia al corte no drenado y compresibilidad del suelo mencionados en el informe de suelos suministrado por el ingeniero Jorge Enrique Duran, este diseño comprende la capacidad admisible de la fundación y cálculo de los asentamientos elásticos y de consolidación (por métodos tradicionales “Terzagui y Resendiz”) una vez encontrados los valores anteriores se procede a estimar los resortes (método de Winkler) para la fundación a corto y largo plazo, para luego introducirlos al modelo y generara el análisis interacción suelo –estructura a corto y largo plazo.

Este modelo final (interacción suelo estructura) se compara contra el modelo inicial (base empotrada) para comparar como ocurre el cambio de la rigidez, diagramas de acciones internas (momentos, cortantes y axiales) de las vigas, columnas, placa y pantallas entre estos dos modelos, también se revisa la estabilidad del edificio ante fuerzas horizontales.

En el ámbito local, La evaluación comparativa entre las losas de cimentación macizas y aligeradas, para los casos donde las propiedades del suelo permiten apoyarla directamente y cuando es requerido el uso de pilotes, no presenta similitudes a proyectos investigativos llevados a cabo en la Universidad de Cartagena.

Sin embargo, la metodología usada para el desarrollo del proyecto de grado “*Balance de asentamientos diferenciales presentes en edificación con cimentaciones sobre pilotes*” por Largo Rodríguez en el año 2014, marca algunas pautas para la optimización de cimentaciones a través de modelos estructurales empleando análisis de interacción suelo-estructura, que resultó en una aproximación considerable a la realidad, en el comportamiento de la cimentación del edificio modelo para el mencionado proyecto.



1.1.3 Limitaciones de los antecedentes

Considerando los proyectos y/o investigaciones anteriormente descritos, es evidente la poca implementación de las losas de cimentación aligeradas como solución estructural en el ámbito local y nacional del país. Lo anterior puede ser debido a la facilidad en el diseño y construcción de las alternativas similares. El análisis comparativo pretendido por el presente proyecto se justifica en las limitaciones y ausencia de evaluaciones económicas y constructivas de las losas de cimentación aligeradas y macizas, que de alguna manera restringe el campo de selección y se opta por soluciones tradicionales, cuando no se tienen estudios detallados.

Finalmente, es oportuno resaltar que las investigaciones con temáticas vinculadas a la optimización de cimentaciones para edificaciones de gran altura, han obtenido resultados limitados a determinados sistemas estructurales, además se busca reducir costos partiendo de la disminución de la longitud y el número de pilotes, porque disminuir el peralte de las losas de macizas incide en la presencia de deformación indeseadas.

1.2 MARCO TEORICO

1.2.1 Generalidades

Toda edificación debe soportarse sobre el terreno en forma adecuada para sus fines de diseño, construcción y funcionamiento. La cimentación se debe colocar sobre materiales que presenten propiedades mecánicas adecuadas en términos de resistencia y rigidez, o sobre rellenos artificiales, que no incluyan materiales degradables, debidamente compactados. Para determinar los asentamientos diferenciales dados por la capacidad de carga de un grupo de pilotes, se da a conocer los modelos de la interacción suelo estructura



en pilotes basados en modelos de coeficiente de balasto (valores representativo basados en el método) y elemento finitos. (Título H, NSR 10)

La Clasificación de los Suelos está basada en la Clasificación Unificada de los Suelos y la Designación ASTM D-2487 y D-2488. Los Suelos de Gradación Gruesa tienen más del 50% de su Peso Seco Retenido en el Tamiz # 200; y se describen generalmente como Gravas y Arenas. Los Suelos de Gradación fina tienen menos del 50% de su Peso Seco retenido en el Tamiz # 200 y son descritos como Arcillas si son Plásticos y Limos si son de baja plasticidad o no Plásticos. En la Tabla 1 se indica la densidad relativa para suelos de grano fino y grueso que puede ser determinada en función del número de golpes del ensayo estándar y la presión vertical efectiva. Los constituyentes principales como se muestra en la Tabla 2, pueden ser añadidos como Modificadores y los Constituyentes Menores pueden ser añadidos de acuerdo a las Proporciones Relativas. Además de la Gradación, los Suelos de Grano Grueso Son Identificados basándose en la Densidad Relativa Sin Perturbar.

1.2.2 Clasificación de los suelos

Tabla 1. Descripción cualitativa de suelos de grano grueso y fino de acuerdo con su resistencia.

CONSISTENCIA DE LOS SUELOS DE GRADACION FINA		DENSIDAD RELATIVA DE LOS SUELOS DE GRADUACION GRUESA	
Comprensión Inconfinada (Ton/m ²)	Consistencia	N-Golpes/Pie	Densidad Relativa
<2.5	Muy Blando	0 a 3	Muy Suelta
2.5 - 5.0	Blando	4 a 9	Suelta
5.0 - 10.0	Medio	0 a 29	Media Densa
10.0 - 20.0	Resistente	30 a 49	Densa
20.0 - 40.0	Muy resistente	50 a 80	Muy Densa
40.0 - 80.0	Duro		
>80.0	Muy duro		

Fuente: AICO LTDA, 2013



Tabla 2. Proporciones relativas arena y finos.

PROPORCIONES RELATIVA DE ARENA			CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO Y GRAVA
% peso seco	Descripción	Mayor Porción	Tamaño
<15	Vestigio	Grava	3" a Tamiz N° 4
15 a 29	Con Modificador	Arena	Tamiz N° 4 al 200
>30		Limo y Arcilla	Pasa Tamiz N° 200

PROPORCIONES RELATIVAS DE FINOS	
% Peso Seco	Descripción
<5	Vestigio
5 a 12	Con
>12	Modificador

Fuente: AICO LTDA, 2013

1.2.3 Losas para cimentaciones

Este tipo de cimentación es una zapata combinada que cubre toda la superficie bajo una estructura que soporta varias columnas y muros. Las losas de cimentación se prefieren a veces para los suelos de baja capacidad de carga pero que tienen que soportar grandes cargas de columnas y/o muros. Bajo ciertas condiciones, las zapatas corridas tienen que cubrir más de la mitad de la superficie bajo un edificio, y entonces las losas de cimentación resultan más económicas. (BRAJA, 1999)

1.2.3.1 Tipos comunes de losas para cimentaciones

Varios tipos de losas para cimentaciones se usan actualmente. Algunos de los tipos más comunes se muestran esquemáticamente en las Figuras 2, 3, 4 y 5 se incluyen

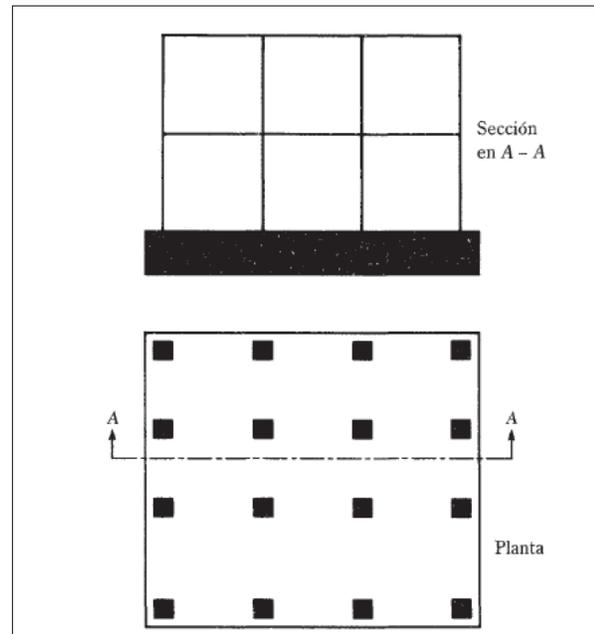


Figura 2. Tipos de losas de cimentación: losa plana. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 297.

1. Placa plana (Figura 2). La losa es de espesor uniforme
2. Placa plana con mayor espesor bajo las columnas (Figura 3)
3. Vigas y losa (Figura 4). Las vigas corren en ambas direcciones y las columnas se localizan en la intersección de las vigas.
4. Losa con muros de sótano como parte de la placa (Figura 5). Los muros actúan como rigidizadores de la losa.

Las losas de cimentación en ocasiones son soportadas por pilotes, que ayudan a reducir el asentamiento de una estructura construida sobre suelo altamente compresible. Cuando el nivel freático es alto, las losas se colocan a menudo sobre pilotes para controlar la flotabilidad. (BRAJA, 1999)

1.2.3.2 Capacidad de carga de losas para cimentaciones

La capacidad de carga total última de una losa de cimentación se determina con la misma ecuación usada para cimentaciones superficiales

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{\infty} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma} F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (1)$$

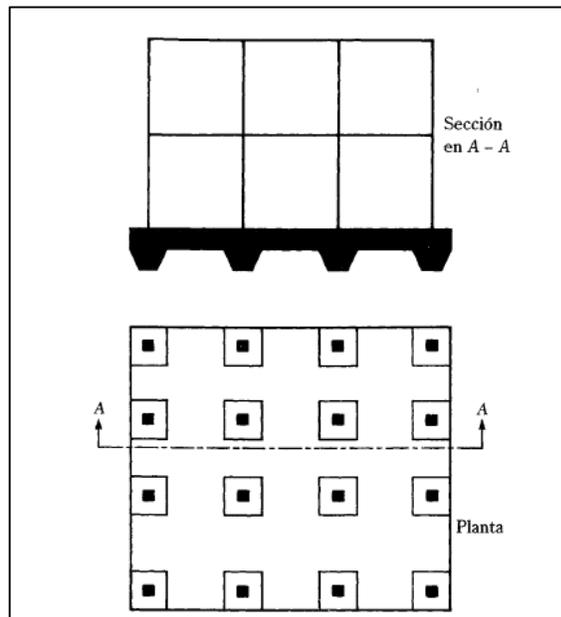


Figura 3. Losa plana de mayor espesor bajo columnas. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 298.

El término B en la ecuación (1) es la dimensión más pequeña de la losa. La capacidad neta última es

$$q_{neta} = q_n - q \quad (2)$$

Un factor de seguridad adecuado debe usarse para calcular la capacidad de carga neta admisible. Para las losas sobre arcilla, el factor de seguridad no debe ser menor que 3 bajo carga muerta y carga viva máxima. Sin embargo, bajo las condiciones más extremas, el factor de seguridad debe ser por lo menos entre 1.75 y 2. Para las losas construidas sobre arena debe usarse normalmente un factor de seguridad de 3. Bajo la mayoría de las condiciones de trabajo, el factor de seguridad contra falla por capacidad de carga en losas sobre arena es muy grande.

Para arcillas saturadas con $\phi = 0$ y condición de carga vertical, la ecuación (1) da

$$q_n = c_{\infty} N_c F_{cx} F_{cd} + q \quad (3)$$

Donde c_{∞} = cohesión no drenada



(Nota: $N_c = 5.14, N_q = 1$ y $N_\gamma = 0$)

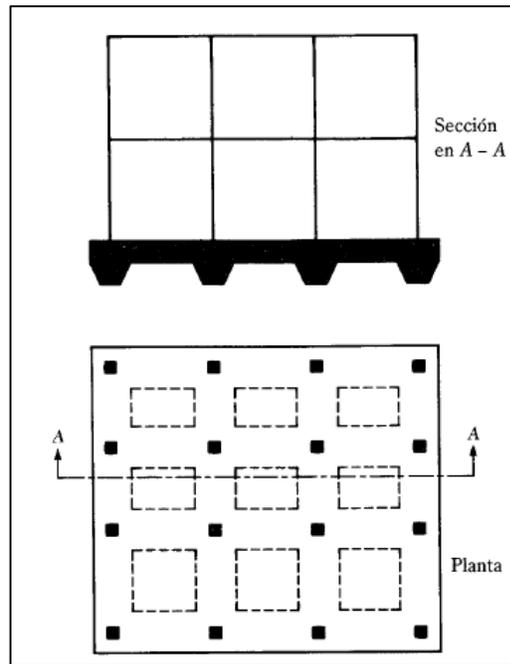


Figura 4. Vigas y losa. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 299.

Para $\phi = 0$,

$$F_{CS} = 1 + \frac{B}{L} \left(\frac{N_q}{N_c} \right) = 1 + \left(\frac{B}{L} \right) \left(\frac{1}{5.14} \right) = 1 + \frac{0.195B}{L}$$

Y

$$F_{CS} = 1 + 0.4 \left(\frac{D_f}{B} \right)$$

La sustitución de los anteriores factores de forma y profundidad de la ecuación (3)

$$q_n = 5.14 * \left(1 + \frac{0.195B}{L} \right) \left(1 + 0.4 \frac{D_f}{B} \right) + q \quad (4)$$

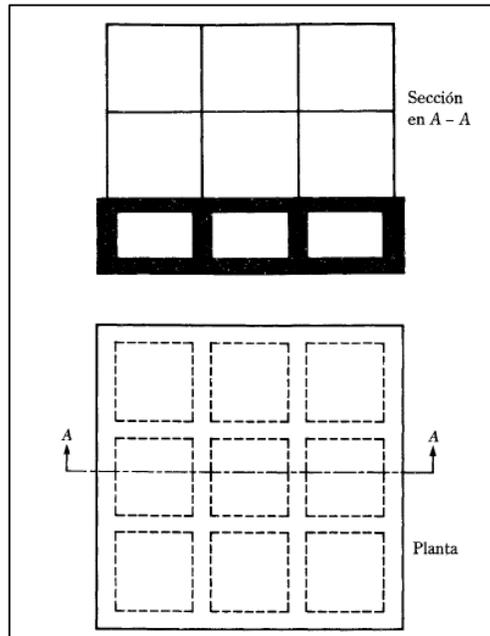


Figura 5. Losa con muro de sótano. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001).
4ta Edición. Pag 300.

Por consiguiente, la capacidad de carga neta última es

$$q_{neta(u)} = q_u - q = 5.14C_u \left(1 + \frac{0.915B}{L}\right) \left(1 + 0.4 \frac{D_f}{B}\right) \quad (5)$$

Para $FS=3$, la capacidad de carga neta admisible del suelo es entonces

$$q_{adm(neta)} = \frac{q_u(neta)}{FS} = 1.713C_u \left(1 + \frac{0.915B}{L}\right) \left(1 + 0.4 \frac{D_f}{B}\right) \quad (6)$$

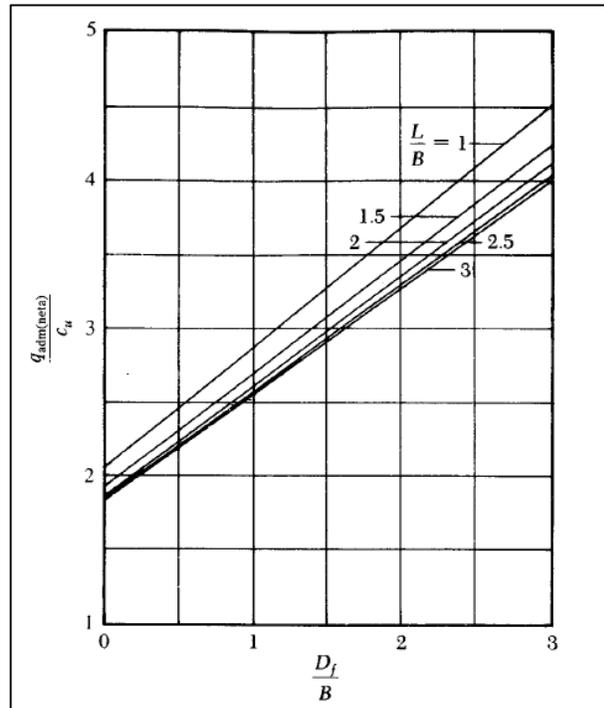


Figura 6. Gráfica de $q_{adm(neta)}/C_u$. (Nota: FS = 3). Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 301.

La Figura 6 muestra una gráfica de $q_{adm(neta)}/C_u$ para varios valores de $\frac{L}{B}$ y D_f/B basados en la ecuación (6).

La capacidad de carga neta admisible para losas de cimentación construidas sobre depósitos de suelo granular es adecuadamente determinada a partir de los números de resistencia por penetración estándar. Para cimentaciones superficiales,

$$q_{adm(neta)} \left(\frac{kN}{m^2} \right) = 11.98 N_{cor} \left(\frac{3.28B+1}{3.28B} \right)^2 F_d \left(\frac{S_e}{25.4} \right) \quad (7)$$

Donde N_{cor} = resistencia por penetración estándar corregida

B = ancho (m)

$F_d = 1 + 0.33 (D_f/B) \leq 1.33$

S_e = asentamiento, en mm



Cuando el ancho B es grande, la ecuación anterior es aproximada (suponiendo que $3.28b + 1 \sim 3.28B$) por

$$\begin{aligned}q_{adm(neta)} \left(\frac{kN}{m^2} \right) &\approx 11.98 N_{cor} F_d \left(\frac{S_e}{25.4} \right) \\&= 11.98 N_{cor} \left[1 + 0.33 \left(\frac{D_f}{B} \right) \right] \left[\frac{S_e(mm)}{25.4} \right] \\&\leq 15.93 N_{cor} \left[\frac{S_e(mm)}{25.4} \right]\end{aligned}\quad (7.1)$$

En unidades inglesas, la ecuación (7) se expresa como

$$\begin{aligned}q_{adm(neta)} \left(\frac{kN}{pie^2} \right) &= 0.25 N_{cor} \left[1 + 0.33 \left(\frac{D_f}{B} \right) \right] [S_e(pulg)] \\&\leq 0.33 N_{cor} [S_e(pulg)]\end{aligned}\quad (8)$$

La hipótesis acostumbrada es por consiguiente que, para un asentamiento máximo de 2 pulg en una losa (50.8 mm), el asentamiento diferencial será de 0.75 pulg (19mm). Usando esta lógica y suponiendo conservadoramente que F_d es igual a 1, se pueden aproximar las ecuaciones (7) y (8) con

$$q_{adm(neta)} \left(\frac{kN}{m^2} \right) \approx 23.96 N_{cor} \quad (9)$$

Y

$$q_{adm(neta)} \left(\frac{kN}{pie^2} \right) \approx 0.5 N_{cor} \quad (10)$$

La presión neta aplicada sobre una cimentación se expresa como

$$q = \frac{Q}{A} - \gamma D_f \quad (11)$$

Donde Q = peso muerto de la estructura y la carga viva

A = área de la losa

En todos los casos, q debe ser menor que o igual a $q_{adm(neta)}$. (BRAJA, 1999)



1.2.3.3 Asentamientos diferenciales de losas para cimentaciones

El Comité 336 (1988) de American Concrete Institute (ACI) sugirió el siguiente método para calcular el asentamiento diferencial de las losas de cimentación. De acuerdo con este método, el factor de rigidez (K_t) se calcula como

$$K_t = \frac{E' I_b}{E_s B^3} \quad (12)$$

Donde E' = módulo de elasticidad del material usado en la estructura

E_g = módulo de elasticidad del suelo

B = ancho de la cimentación

I_δ = momento de inercia de la estructura por unidad de longitud de ángulo recto con B

El término ET_δ expresar como

$$E' I_\delta = E' (I_f + \sum I_v + \sum \frac{ah^3}{12}) \quad (13)$$

Donde ET_δ = rigidez por flexión de la superestructura y cimentación por longitud unitaria en ángulo recto con B

$\sum ET_\delta'$ = rigidez por flexión de los miembros enmarcados en ángulo recto con B

$\sum (E' ah^3/12$ = rigidez por flexión de los muros cortantes

a = espesor del muro cortante

h = altura del muro cortante

ET_f = flexibilidad de la cimentación

Con base en el valor de K_f , la razón (δ) del asentamiento diferencial al asentamiento total se estima de la siguiente manera:



1. Si $K_f > 0.5$, ésta puede tratarse como una losa rígida y $\delta = 0$
2. Si $K_f \approx 0.5$, entonces $\delta \approx 0.1$
3. Si $K_f = 0$, entonces $\delta = 0.35$ para losas cuadradas ($\frac{B}{L} = 1$) Y $\delta = 0.5$ para cimentaciones largas ($\frac{B}{L} = 0$). (BRAJA, 1999)

1.2.3.4 Distribución de la armadura de flexión en la placa

Si el cálculo se hace con ordenador, la distribución de momentos es conocida y la distribución de armaduras no presenta problemas.

Si los momentos se han obtenido mediante el método de emparrillados virtuales, un criterio razonable es no distribuir la armadura uniformemente, sino concentrarla más en las zonas próximas a las líneas de soporte.

Definiendo como bandas de soporte y bandas centrales en cada sentido las indicadas en la Figura 7, se puede adoptar un criterio de reparto de armaduras análogo al que se usa en forjados sin vigas, pero la banda de soporte no se tomará inferior al ancho de soporte más tres veces el canto; de acuerdo con ello, de la armadura correspondiente a la viga virtual de emparrillado en las zonas de momentos positivos el 75% se distribuye uniformemente en la banda de soportes y el 25% se distribuye en partes iguales en las dos semibandas centrales contiguas. (Si no hay semibanda central más que un lado, en ella). En cualquier caso, la densidad de armadura de la banda de soportes no será inferior a la de la banda central contigua más armada.

Nota: En los vanos de luces l_2, l''_2 etc., los anchos de banda se definen de acuerdo con sus luces respectivas en cada uno de los recuadros.

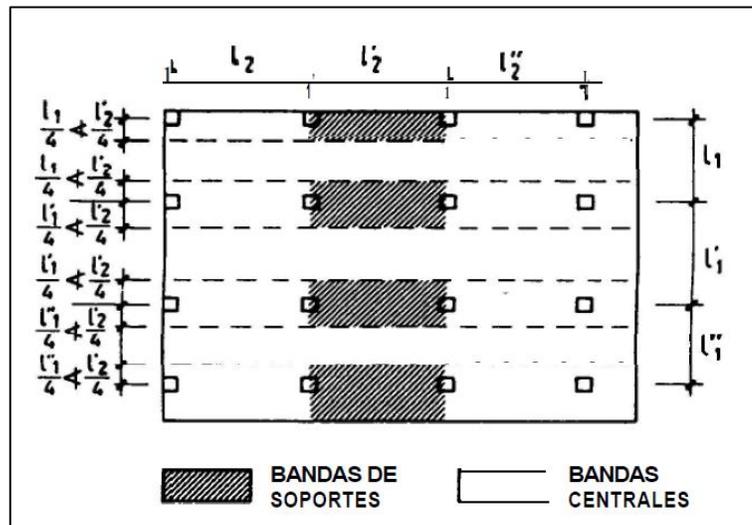


Figura 7. Bandas de soportes y centrales. Fuente: Cálculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 244.

De la armadura correspondiente a la viga virtual de emparrillado en las zonas de momentos negativos, el 60% se distribuye uniformemente en la banda de soportes y el 40% se distribuye en las dos semibandas centrales contiguas. (Si no hay semibanda central más que a un lado, en ella)

En las bandas centrales la armadura total de las dos semibandas se redistribuye de nuevo uniformemente en todo el ancho). (CALAVERA, 1991)

1.2.3.5 Cálculo a esfuerzo cortante

El cálculo a esfuerzo cortante se verifica en cualquier sección de la placa de acuerdo con la presión σ_t del terreno y las cargas de los soportes, aunque nunca suele ser crítico pues lo es habitualmente el cálculo a punzonamiento.

Llamando V_d el esfuerzo cortante de cálculo, debe cumplirse:

$$V_{pd} \leq 0,5f_{cv}bd\xi(1 + 50\rho) \quad (14)$$

Donde $f_{cv} = 0.5\sqrt{f_{cd}}$ (en kp/cm^2)



b = ancho de la sección de comprobación

d = canto útil de la placa

$\xi = 1,6 - d \leq 1$ con d en metros

$$\rho = \frac{A_s}{hd} * \frac{f_{yk}}{4.100} \geq 0,20$$

Siendo A_s el área de armadura de tracción en el ancho b en cm^2 , f_{yk} el límite elástico característico del acero en kp/cm^2 y b y d vienen expresados en cm . (CALAVERA, 1991)

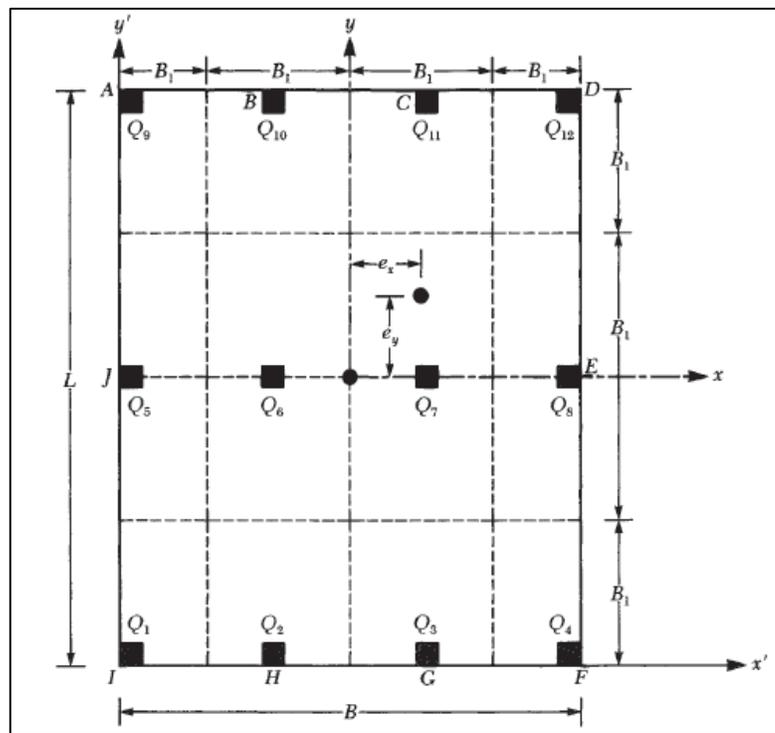


Figura 8. Esquema de distribución de cargas puntuales en losa. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 311.

1.2.3.6 Cálculo a punzonamiento

Llamando V_{pd} al valor de cálculo del esfuerzo punzante, éste viene dado por

$$V_{pd} = N_d - \gamma_f \sigma_t S_p \quad (15)$$



Donde

V_{pd} = Esfuerzo punzante de cálculo

N_d = Esfuerzo axial de cálculo

σ_t = Presión sobre el terreno, sin considerar el peso propio de la placa

S_p = Área en planta encerrada por el perímetro de punzonamiento

Calculado V_{pd} debe verificarse que

$$V_{pd} \leq V_{pu} \quad (16)$$

Donde V_{pu} es el valor resistente del esfuerzo punzante, según se trate de soporte interior, de borde o de esquina. (CALAVERA, 1991)

1.2.4 Pilotes.

El pilote sea cualquiera su tipo se emplea cuando el nivel de cimentación está considerablemente por debajo del nivel de la planta más baja de la construcción. Entre el soporte y el pilote propiamente dicho es necesario disponer una pieza, el encepado, que por un lado reparte los esfuerzos del soporte a los pilotes del grupo y por otro lado sirve de enlace a las vigas de centrado y/o de atado.

En el caso más general, el soporte en su base transmitirá al encepado los esfuerzos N, M, H (Figura 9) como veremos a continuación.

Durante mucho tiempo los pilotes se distribuyeron en grupos numerosos, cuando se trataba de resistir grandes cargas. La Figura 10 muestra disposiciones típicas.

Actualmente, la tendencia a pilotes de gran diámetro, basada en razones económicas, ha orientado la elección hacia grupos de pocos pilotes, tales como los indicados en la Figura



11. La tendencia actual es a encepados prismáticos de canto constante, por la simplificación de ferralla que presentan. (CALAVERA, 1991)

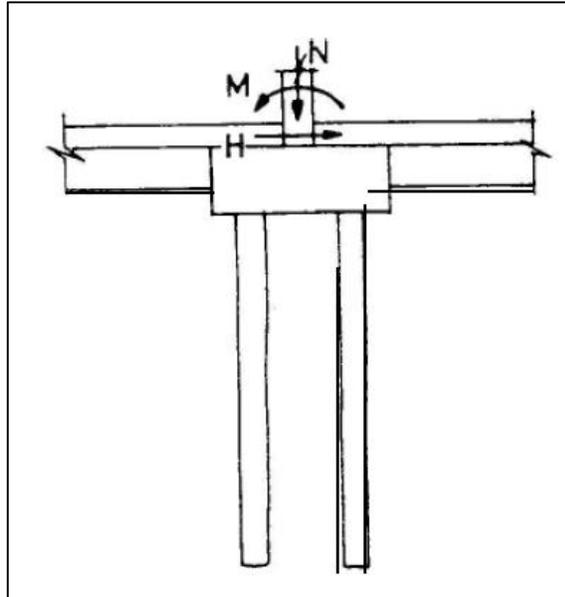


Figura 9. Esquema de pilote. Fuente: Calculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 267.

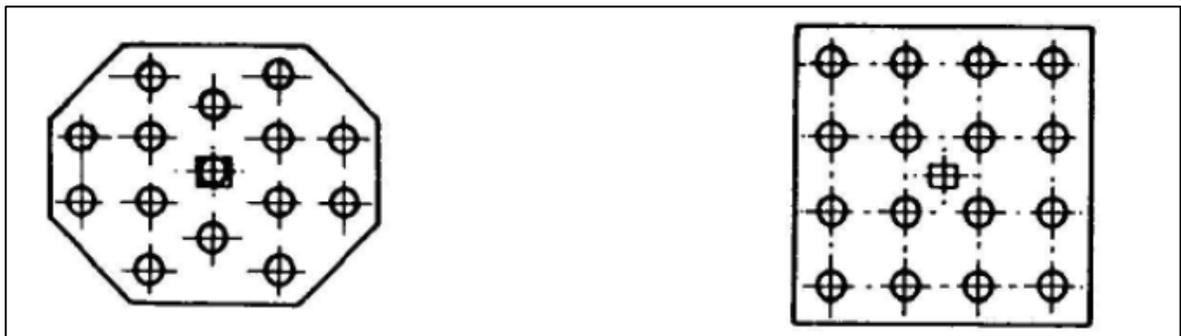


Figura 10. Disposiciones típicas de pilotes para grandes cargas. Fuente: Calculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 268.

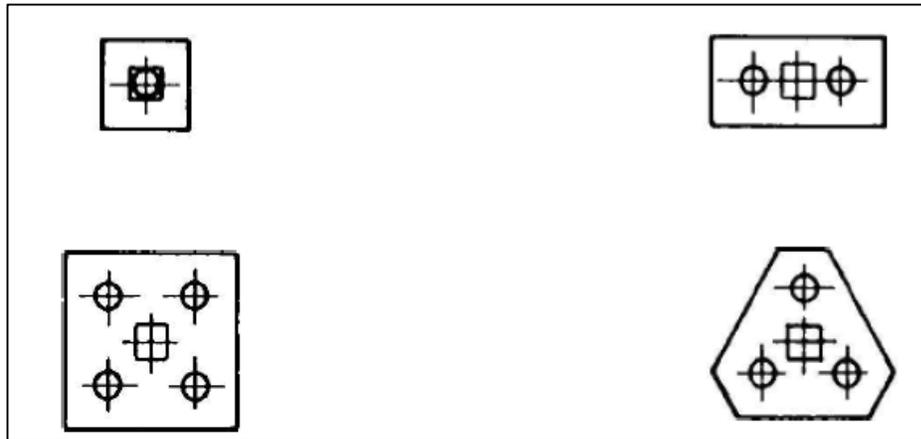


Figura 11. Grupos de pocos pilotes. Fuente: Cálculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 268.

1.2.4.1 Pilotes en compresión centrada

El caso más frecuente, bien porque la sollicitación sea de ese tipo, bien porque los esfuerzos M, H en base de soporte puedan considerarse despreciables. (CALAVERA, 1991)

➤ Cálculo del pilote

En cualquier caso, la comprobación del pilote es análoga a la de un soporte en compresión centrada debido a que la coacción del terreno impide el pandeo y, por lo tanto, llamando n al número de pilotes del grupo, se ha de cumplir

$$N'_d = \frac{\gamma f}{n} \leq N_u \quad (17)$$

Siendo:

$$N_u = 0,85 f_{cd} A_c + A_s f_{vd} \quad (18)$$

Donde



f_{cd} = Resistencia de cálculo del hormigón del pilote (En general, con coeficiente 0,9 de hormigonado vertical)

A_c = Área de la sección recta

A_s = Área de la sección de la armadura longitudinal

f_{vd} = Tensión de cálculo de la armadura longitudinal, de acuerdo con EH-91

A diferencia de muchas otras piezas estructurales, el pilote no es observable después de ejecutado y, en la mayoría de los casos, sus condiciones de hormigonado son medianas, lo que aconseja aumentar el valor de γ_{cd} para obtener $f_{cd} = \frac{f_c}{\gamma}$. No existen normas sobre este aspecto, por lo que queda exclusivamente a criterio del proyectista. Para pilotes en situ sugerimos $\gamma_c = 1,7$.

Por otra parte, la incertidumbre de ejecución, la de transmisión de las cargas y las de colocación de la armadura aconsejan aumentar el valor de γ_f del 10 a 15%.

De todas formas, debe considerarse que en este tipo de piezas, la sección viene fijada por consideraciones geotécnicas, lo cual no permite muchas veces disfrutar de la resistencia característica mínima de 150 a 175 kg/cm², que se fija también por razones de durabilidad, pues con frecuencia el terreno es agresivo.

La resistencia f_{cd} del hormigón puede variar desde valores muy altos en los pilotes prefabricados pretensados, a valores muy moderados en el caso de algunos tipos de pilotes in situ.

En cuanto al valor f_{yd} de la tensión de cálculo, de acuerdo con EH-91, al ser el acortamiento máximo en compresión de 0,002, resulta:

$$f_{yd} \leq 0,002E_a$$

Que, con aceros de dureza natural, conduce a:

$$f_{yd} \leq 0,002 * 2,1 * 10^6 = 4200 \text{ kp/cm}^2$$



Que aun con $\gamma_s = 1,15$ conduce a $f_{yk} = 4830 \text{ kp/cm}^2$, es decir que en pilotes no se agota el acero AEH 400 N

Si el acero es estirado en frio, E_s suele acercarse más al valor $1,9 \times 10^6$ y, por tanto aun:

$$f_{yd} \leq 0,002 * 1,9 * 10^6 = 3800 \text{ kp/cm}^2$$

Que aun con el valor mínimo de $\gamma_s = 1,10$ conduce a $f_{yk} = 1,1 \times 3800 = 4180 \text{ kp/cm}^2$

Por tanto, en ambos casos resulta recomendable la calidad AEH 400

Aunque EH-91, para los casos de compresión centrada teórica, considera siempre una excentricidad mínima accidental, entendemos que rige para soportes pero no para pilotes. Sin embargo, en la práctica (Figura 12), unas ciertas excentricidades de hinca o ejecución in situ y de implantación del soporte son inevitables y mayores de lo que generalmente se cree.

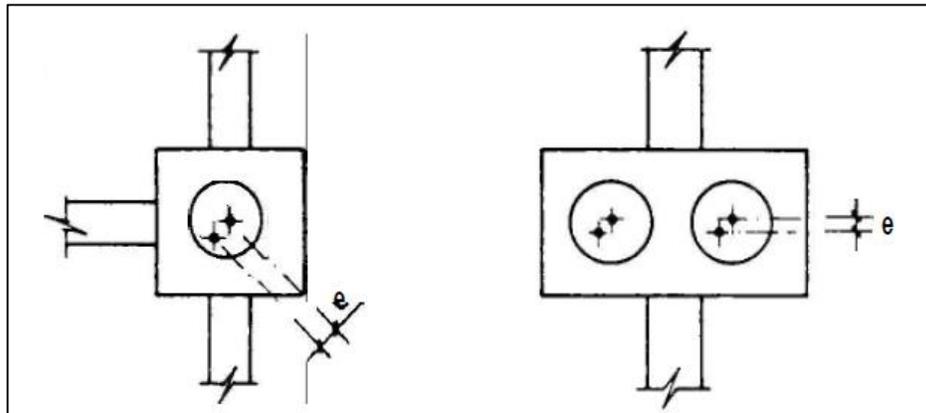


Figura 12. Excentricidad en plantación de pilotes. Fuente: Calculo Estructuras de Cimentación, Calavera J. (1991) 3ra Edición. Pag 270.

En nuestra opinión, esta excentricidad accidental debe tomarse con valor:

$e = 5 \text{ cm}$ en obras bajo control de ejecución intenso

$e = 10 \text{ cm}$ en obras bajo control normal



$e = 15$ cm en obras bajo control reducido.

Si el soporte es aislado o se trata de un grupo de dos pilotes, se disponen vigas de centrado y la excentricidad es prácticamente absorbida por las vigas de centrado.

Se recuerda que conforme a EH-91 la cuantía mecánica mínima debe ser

$$A_s f_{yd} \geq 0,1 N_d \quad (19)$$

También la cuantía máxima debe ser limitada y, dada la menos facilidad de hormigonado, creemos aconsejable reducirla respecto a la que con carácter general establece EH-91. Un límite razonable es

$$A_s f_{vd} \geq 0,6 f_{cd} A_s \quad (20)$$

La armadura longitudinal no será de diámetro inferior a 12mm y el número de barras debe ser 6 (5 excepcionalmente para pilotes de pequeño diámetro). Los estribos o la espiral deben ser de diámetro no inferior a $\frac{1}{4}$ de la armadura longitudinal y su separación o paso no superior a 15 veces el diámetro de dicha armadura.

Los ábacos GT-34 a GT-37 permiten el dimensionamiento en flexión compuesta (*). Debe tenerse en cuenta que en pilotes ejecutados in situ el recubrimiento no debe ser inferior a 4cm. (CALAVERA, 1991).

1.2.4.2 Capacidad de Carga de Pilotes en Arena.

La capacidad de carga de un pilote en arena puede calcularse también como la suma de su capacidad de carga lateral más la capacidad por punta. La capacidad de carga por punta puede estimarse utilizando el criterio de Meyerhof para pilotes el cual se puede resumir como:

$$Q_p = C N_c A_p = 9 C A_p \quad (21)$$

Dado que la resistencia al corte del suelo está dada por el valor de la cohesión “C” el valor de la resistencia por unidad de área a lo largo del perímetro y profundidad del pilote se



puede expresar como:

$$Q_l = C * a_2 * L * Per \quad (22)$$

Donde el L es la longitud del pilote, (Per) el perímetro, C la cohesión y a_2 es un factor de adhesión (Tomlinson 1957 y Peck 1958), el cual está dado por la Figura 13.

La capacidad última del pilote se puede calcular sumando las contribuciones dadas por la ecuaciones 21 y 22, obteniendo:

$$Q_{falla} = Q_p + Q_l = 9CA_p + C * a_2 * L * Per \quad (23)$$

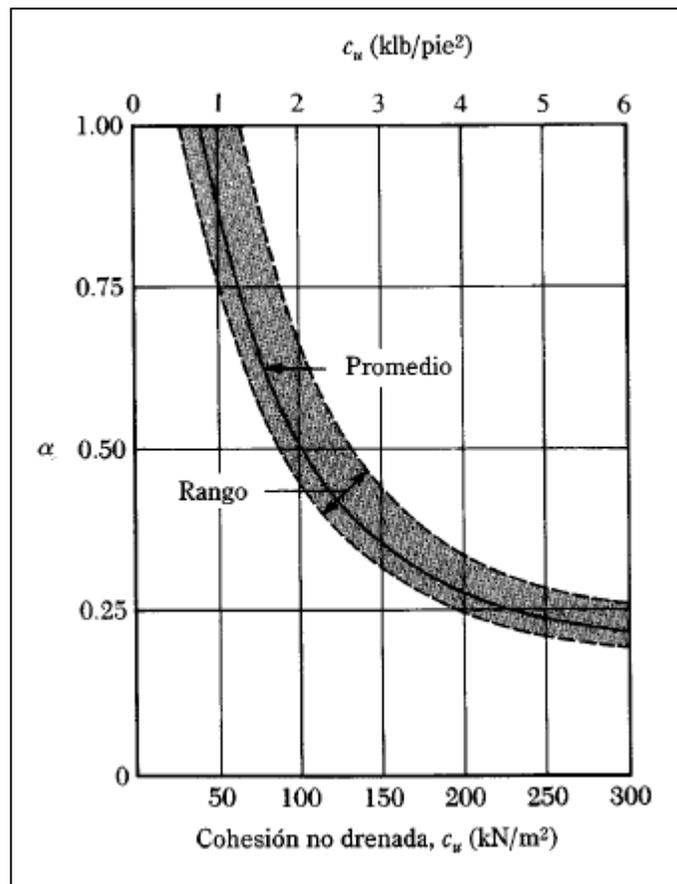


Figura 13. Variación de α con la cohesión no drenada. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001) 4ta Edición. Pag 596.

La adhesión en pilotes hincados puede llegar incluso a ser igual a la cohesión, esto es



particularmente cierto después de transcurrido un cierto tiempo de la hinca. Dadas las incertidumbres asociadas con el cálculo de la capacidad última de los pilotes, recomendamos utilizar la línea correspondiente al límite superior mostrado en la Figura 14.

Para pilotes Pre-excavados, recomendamos utilizar la curva correspondiente al promedio de la misma Figura. La reducción en la adhesión para este tipo de pilotes se debe entre otros factores a la utilización de bentonita cuando se encuentran suelos granulares. Esta práctica ha sido verificada mediante la ejecución de pruebas de carga dándole resultados satisfactorios al autor en la Ciudad de Cartagena de Indias, donde se ha utilizado en más de 20 edificios de mediana altura. (Covo, 2003)

1.2.4.3 Capacidad de Carga de Pilotes en Arena.

La capacidad de carga de un pilote en arena puede calcularse también como la suma de su capacidad de carga lateral más la capacidad por punta. La capacidad de carga por punta puede estimarse utilizando el criterio de Meyerhof para pilotes el cual se puede resumir como:

$$f_p = \beta N \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (24)$$

β es igual a 4 para pilotes **hincados con desplazamiento** y 2 para pilotes donde el suelo **no es desplazado**.

La capacidad de carga última por fricción se puede calcular utilizando el criterio propuesto por Meyerhof, el cual puede ser resumido con el esquema que se muestra en la Figura 14.

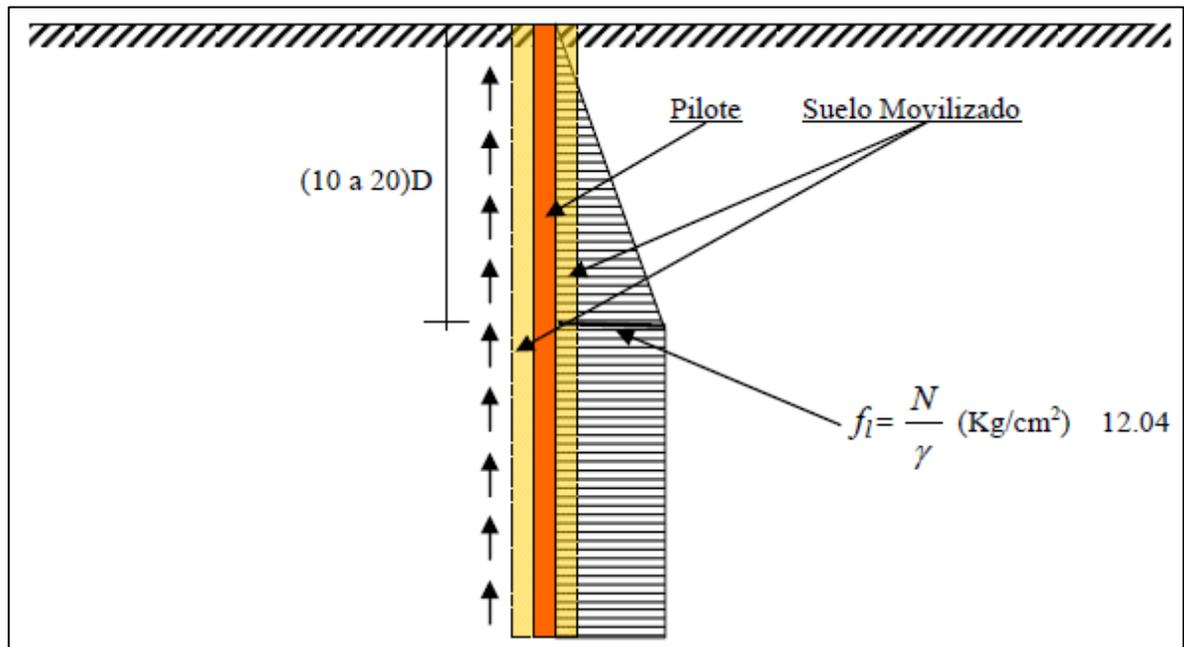


Figura 14. Criterio de Meyerhof. Fuente: Introducción a la mecánica de suelos, Covo 2003. Pag 208.

$$f_l = \frac{N}{\gamma} \quad (25)$$

El valor de γ depende del tipo de instalación del pilote. Para Pilotes Hincados se utiliza un valor de γ de 35 ($\gamma = 35$). Pilotes Preexcavados se pueden calcular utilizando un valor de γ de 50 ($\gamma = 50$). La profundidad a la cual ocurre el cambio de variación lineal a constante está comprendido entre 10 y 20 veces el diámetro o lado del pilote. El valor de 10 corresponde a una densidad relativa menor que 30 por ciento y el de 20 a una densidad relativa mayor que el 70 por ciento; valores entre 10 y 20 se presentan para valores intermedios de la densidad relativa. En la práctica se puede utilizar el valor promedio o sea de 15.

La distribución de presión lateral se debe al efecto de arco que se produce en el suelo, debido al movimiento relativo del pilote con respecto a este, fenómeno que ocasionan una disminución en el esfuerzo vertical en el suelo adyacente al pilote debido al esfuerzo cortante que se produce alrededor de este, el cual es movilizado junto, tal como se ilustra en las Figuras 14. La capacidad última del pilote se puede calcular mediante:



$$Q_p = f_p A_p = \beta N A_p \quad (26)$$

Dado que la resistencia al corte del suelo está dada por el valor de la cohesión “C” el valor de la resistencia por unidad de área a lo largo del perímetro y profundidad del pilote se puede expresar para un suelo uniforme como:

$$Q_l = \frac{f_1}{2} * 15D * Per + f_1 * (L - 15D) * Per = \frac{N}{\gamma} * L * Per \quad (27)$$

Donde L es la longitud del pilote, (Per) el perímetro y N el número de golpes del ensayo estándar. La capacidad última del pilote se puede calcular sumando las contribuciones dadas por las ecuaciones 26 y 27. (Covo, 2003)

$$Q_{falla} = Q_p + Q_l \quad (28)$$

1.2.4.4 Asentamientos en pilotes.

El asentamiento de un pilote bajo una carga de trabajo vertical, Q_w , es causado por tres factores:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (29)$$

Donde, s asentamiento total del pilote, s_1 asentamiento elástico del pilote, s_2 asentamiento del pilote causado por la carga en la punta del pilote, s_3 asentamiento del pilote causado por la carga transmitida a lo largo del fuste del pilote.

Si el material del pilote se supone elástico, la deformación del fuste se evalúa usando los principios fundamentales de la mecánica de materiales:



$$S_1 = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \quad (30)$$

Donde, Q_{wp} es carga en la punta del pilote bajo condición de carga de trabajo, Q_{ws} carga por resistencia de fricción (superficial) bajo condición de carga de trabajo, A_p área de la sección transversal del pilote, L longitud del pilote y E_p módulo de elasticidad del material del pilote.

La magnitud de ξ dependerá de la distribución de la resistencia por fricción (superficial) unitaria a lo largo del fuste. Si la distribución de ξ es uniforme o parabólica, como muestran las figuras 15a y 15b, $\xi = 0.5$. Sin embargo, para una distribución triangular de ξ (figura 15c), la magnitud de ξ es aproximadamente de 0.67.(BRAJA, 1999).

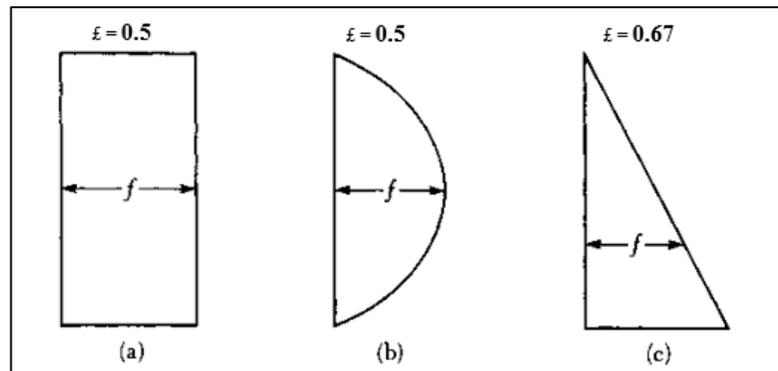


Figura 15. Varios tipos de distribución de la resistencia por fricción (superficial) unitaria a lo largo del fuste del pilote. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2001). 4ta Edición. Pag 615.

El asentamiento de un pilote cargado en la punta se expresa en forma similar a la de cimentaciones superficiales:

$$S_2 = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad (31)$$



Donde, D es el ancho o diámetro del pilote, q_{wp} es la carga puntual por unidad de área en la punta del pilote $= Q_{wp}/A_p$, E_s es el módulo de elasticidad del suelo en o bajo la punta del pilote, μ_s es la relación de Poisson del suelo e I_{wp} es el factor de influencia $= 0.85$.

El asentamiento de un pilote causado por la carga llevada por el fuste se da por una relación similar a la ecuación 31.

$$s_3 = \left(\frac{Q_{ws}}{pL} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad (32)$$

Donde, p es el perímetro del pilote, L la longitud empotrada del pilote e I_{ws} es el factor de influencia.

El factor de influencia, I_{ws} , tiene una relación empírica simple (BRAJA, 1999):

$$I_{ws} = 2 + 0.35 \sqrt{\frac{L}{D}} \quad (33)$$

➤ **Limite asentamiento diferencial.**

Los asentamientos diferenciales calculados se deben limitar a los valores fijados en la Tabla 3, expresados en función de L , distancia entre apoyos o columnas de acuerdo con el tipo de construcción.



Tabla 3. Valores máximos de los asentamientos diferenciales en función de la distancia entre apoyos o columnas

Tipo de construcción	Δ_{max}
(a) Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{\ell}{1000}$
(b) Edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería	$\frac{\ell}{500}$
(c) Edificaciones con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{\ell}{300}$
(d) Edificaciones en estructura metálica, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{\ell}{160}$

Fuente: Tabla H.4.9-1. Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente. NSR 10. (2016)

1.2.5 Esfuerzos laterales en estructuras considerando el suelo como resorte.

La respuesta esfuerzo-deformación de un suelo depende del grado de preconsolidación o de compactación a que haya sido sometido. Suelos normalmente consolidados pueden ser modelados considerando que el coeficiente de reacción horizontal de la subrasante puede ser evaluado como:

$$Kh = \frac{fz}{D} \quad (34)$$

Donde, Kh = Coeficiente de reacción horizontal del subsuelo a la profundidad z.

f = Coeficiente de variación de reacción horizontal de la subrasante. Dado por la Figura 16.

z = Profundidad en metros.

D = Ancho o diámetro de la estructura.

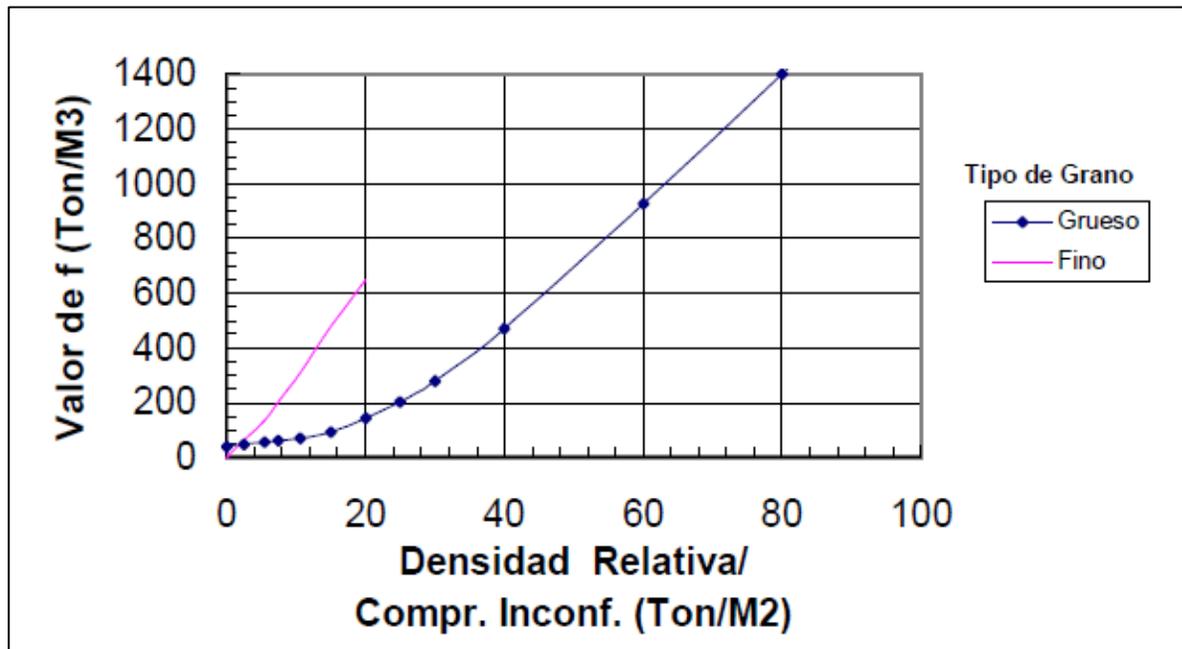


Figura 16. Coeficiente de la variación horizontal de la subrasante. Fuente: Introducción a la mecánica de suelos, Covo 2003. Pag 239.

El valor de la constante horizontal del resorte se calcula multiplicando el coeficiente de reacción horizontal de la subrasante por el área, tal como se muestra en la ecuación 35.

$$K = Kh * Area \quad (35)$$

1.2.6 Estabilización de suelo con columnas de cemento (Jet Grouting)

El Jet Grouting es un proceso de estabilización del suelo en donde se inyecta lechada de cemento en el suelo a alta velocidad para formar una matriz suelo-cemento. El concepto del proceso del Jet Grouting fue puesto en práctica por primera vez en la década de 1960.

La mayor parte del trabajo de investigación después de su inicio se realizó en Japón (Ohta y Shibasaki, 1982). La técnica se introdujo en Europa a finales de la década de 1970, en tanto que el proceso se introdujo por primera vez en los Estados Unidos a principios de la década de 1980 (Welsh, Rubright y Coomber, 1986).



Se han creado tres sistemas básicos de Jet Grouting: sistemas de barra simple, doble y triple. En todos los casos, se utiliza la perforación rotatoria hidráulica para alcanzar la profundidad de diseño a la que el suelo se tiene que estabilizar. En la figura 17a se muestra el *sistema de barra simple* en el que una lechada de cemento se inyecta a alta velocidad para formar una matriz suelo-cemento. En el *sistema de barra doble* (figura 17b), la lechada de cemento se inyecta a alta velocidad protegida con un cono de aire igualmente a una alta velocidad para erosionar y mezclar el pozo del suelo. En el *sistema de barra triple* (figura 17c) se utiliza agua a alta presión protegida con un cono de aire para erosionar el suelo. Luego el vacío creado en este proceso se rellena con lechada de cemento prediseñada. (Braja, 2011)

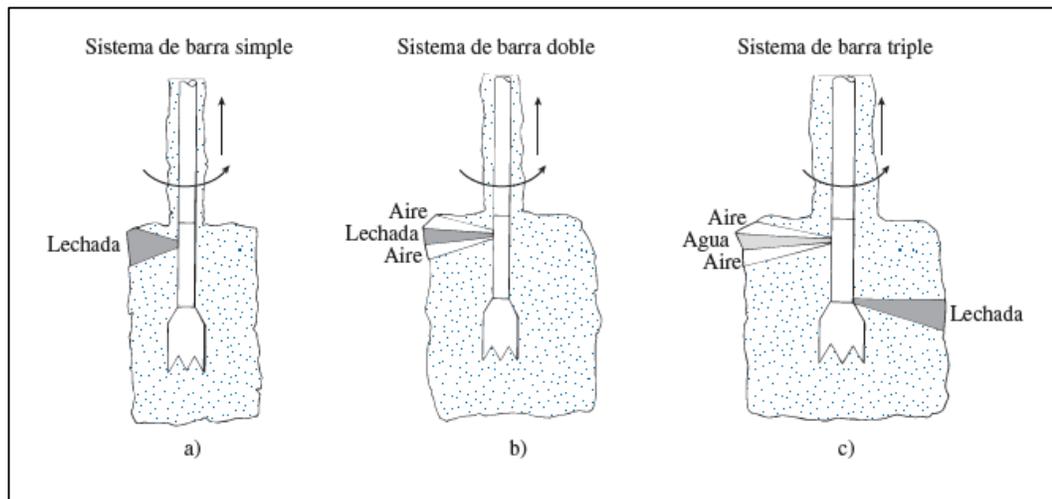


Figura 17. Esquema de sistemas Jet Grouting. Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das (2011). 7ma Edición. Pag 777.

La efectividad del Jet Grouting está influenciada en gran medida por la naturaleza erosionable de suelo. Un suelo gravoso y una arena limpia son altamente erosionables, en tanto que las arcillas altamente plásticas son difíciles de erosionar. El siguiente es un resumen del intervalo de los parámetros que generalmente se encuentra en el Jet Grouting de barra simple (Welsh y Burke, 1991; Burke, 2004):



Sistema de barra simple:

A. Lechada inyectada

- Presión. 0.4 a 0.7 MNym²
- Volumen. 100-300 lymin
- Gravedad específica. 1.25-1.6
- Número de toberas. 1-6

B. Colada

- Altura de paso. 5-600 mm
- Tiempo de paso. 4-30 s

C. Rotación. 7-20 rpm

D. Diámetro de la columna de suelo estabilizado

- Arcilla suave. 0.4-0.9 m
- Limo. 0.6-1.1 m
- Arena. 0.8-1.2 m

1.2.7 Critical Path Method (CPM)

La duración total del proyecto viene siempre condicionada por el conjunto de actividades que definen el camino crítico. Ahora bien, cuando el proyecto es de gran envergadura, la determinación de las actividades que forman el camino crítico reclama una metodología como la que se expone a continuación y basada en el cálculo de los tiempos «early» y «last» de cada uno de los nudos. Si para el nudo j se verifica que $E_i=L_i$, significa que el acontecimiento definido por el mismo se produce en una fecha fija y por ello el nudo es fijo; si $E_i < L_i$, significa que existe una holgura temporal para alcanzar el acontecimiento, no



hay una fecha fija, y de ahí que el nudo sea flotante, oscilante o fluctuante y que se define dicha holgura por $O_i = L_i - E_i$. El camino crítico está jalonado por nudos fijos, es decir, por el conjunto de arcos que representan actividades cuya ejecución consume la totalidad del tiempo que media entre dichos nudos. Para los nudos inicial y final se cumple siempre la coincidencia de los tiempos «early» y «last».

Cálculo de los tiempos «early»: Se efectúa comenzando por el nudo inicial al que se le asigna un tiempo «early» igual a 0. Para los nudos inmediatos de todas las actividades que parten del nudo inicial, los tiempos «early» se corresponderán con las respectivas duraciones. Para las actividades de los restantes nudos, los tiempos «early» verificarán que:

$$E_i = \max[E_i + D_i], V. \quad (36)$$

El tiempo «early» del último nudo indica el tiempo necesario para finalizar la ejecución del proyecto.

Cálculo de los tiempos «last»: Se efectúa partiendo del último nudo, cuyo tiempo «early» ya se conoce, hasta llegar al nudo inicial. El cálculo que es también iterativo responde a la siguiente fórmula:

$$L_i = \max[L_i + D_i], V. \quad (37)$$

El cálculo de los tiempos «early» y «last» se puede efectuar siguiendo otros métodos, siendo de corriente aplicación, sobre todo cuando el proyecto consta de un elevado número de actividades, el matricial de Zaderenko S. G (1968). (PIÑEIRO, 1995)

1.2.7.1 Clasificación de las holguras temporales

La determinación del camino crítico pone en evidencia qué actividades del proyecto tienen holgura temporal, es decir, aquéllas que disponen para su ejecución de más tiempo del que necesitan para su realización. El análisis de las posibles holguras permiten hacer una clasificación de los tiempos en tres tipos: 1) Tiempo total sobrante de fluctuación (T); 2)



Tiempo libre (T_L), y 3) Tiempo independiente (T_i). Es evidente, después de lo apuntado anteriormente, que para las actividades definidoras del camino crítico se consume la totalidad del tiempo que media entre dos nudos y que, por consiguiente, se cumple que $T=0$, circunstancia que va asociada al hecho de que para los nudos que jalonan dicho camino se cumple que el tiempo «early» es igual al tiempo «last» ; mientras que para los restantes caminos se producen holguras temporales al no producirse tal coincidencia y que, por lo tanto, $TF > 0$. El análisis de qué tipo de holgura se produce es particularmente importante para la mejor y efectiva realización del proyecto, habida cuenta, por otra parte, la relación que existe entre ellas. Precisemos el significado de las diferentes holguras:

- Tiempo de fluctuación total o tiempo sobrante total (T), es la mayor disponibilidad de tiempo que puede afectarse a la ejecución de una actividad con perjuicio de los tiempos sobrantes en las actividades precedentes y siguientes. La holgura total de una determinada actividad es, por otra parte, el tiempo máximo que puede prolongarse o retrasarse el tiempo de ejecución de la misma sin que ello altere la fecha de terminación del proyecto. Se obtiene de la siguiente forma:

$$T=L_i - E_i - D_i \quad (38)$$

- Tiempo libre (T_L), cantidad del tiempo total que se puede utilizar sin afectar a las holguras de las actividades siguientes, pero que reducirá, sin embargo, las holguras de las actividades precedentes. Viene dado por:

$$T_L= E_i - E - D_i \quad (39)$$

- Tiempo independiente (T_i), es la parte del tiempo libre en que puede alargarse una cierta actividad sin afectar a las holguras de las actividades precedentes y siguientes. Esta holgura se pierde si no es utilizada en la propia actividad. (PIÑEIRO, 1995). Se formula así:

$$T_i= E_i -L_i - D_i \quad (40)$$



1.2.8 Presupuesto de obra

El presupuesto de obra lo definen como la valoración o estimación económica “a priori” de un producto o servicio. Se basa en la previsión del total de los costos involucrados en la construcción de la obra, incrementados con el margen de beneficio que se tenga previsto.

Para conocer el presupuesto de obra de un proyecto se deben seguir los siguientes pasos básicos a nivel general son:

- Registrar y detallar los distintos conceptos de obra que intervengan en el proyecto.
 - Hacer las cuantificaciones y anotaciones de cada concepto de obra.
 - Conocer el precio unitario de cada concepto de obra.
 - Multiplicar el precio unitario de cada concepto por su medición respectiva.
- (BELTRAN, 2012)

1.2.8.1 Contenido de un presupuesto de obra

- Formación de Precios: El cuadro de precios unitarios de los materiales, mano de obra y elementos auxiliares como herramientas que componen las partidas o unidades de obra del proyecto.
- Catálogo de obra: Un cuadro de precios unitarios de los conceptos, de acuerdo con la cuantificación.
- El presupuesto de obra como tal, que contendrá la estimación económica global, desglosada y ordenada según el previo estudio de la cuantificación de los conceptos.

El Presupuesto mostrará claramente si los precios dados incluyen o no conceptos como: gastos generales, impuestos, tasas y otras contribuciones; seguros; beneficios, costos de certificación y visado; permisos y/o licencias; y cualquier otro concepto aplicable que pueda influir en el costo final de ejecución del objeto del proyecto de obra. (BELTRAN, 2012)



1.2.8.2 Conceptos generales sobre costo

El costo es el valor que representa el monto total de lo invertido — tiempo, dinero y esfuerzo— para comprar o producir un bien o un servicio. En otras palabras el costo lleva implícito otros términos que deben definirse, siendo los siguientes:

Todo lo que no sea utilidad o ganancia y que se aplique a la elaboración del producto, es costo, sin que importe la clasificación o nominación que se quiera dar a ellos, directos, indirectos, de prestaciones sociales, federales, adicionales, especiales, etc. (BELTRAN, 2012)

En la industria de la construcción, normalmente dividimos los costos en dos grupos principales: Costos directos e indirectos.

➤ Costos indirectos

Se denominan costos indirectos a toda erogación necesaria para la ejecución de un proceso constructivo del cual se derive un producto; pero en el cual no se incluya mano de obra, materiales ni maquinaria. (BELTRAN, 2012)

➤ Costos directos

El costo directo se define como: "la suma de los costos de materiales, mano de obra y equipo necesario para la realización de un proceso productivo".

La secuencia para la elaboración del costo directo es como sigue:

- Planos y especificaciones.- Se deben estudiar perfectamente todos los planos de cortes, isométricos, equipos, estructurales, instalaciones y de fachadas, así como las especificaciones que en ellos se proponen. Entre más detallados estén los planos, se tiene una mayor oportunidad de obtener el costo directo más preciso y, por ende, un presupuesto acertado.



- Determinación de los conceptos de obra.- Del estudio anterior se deduce el tipo de obra de que se trata para hacer una apreciación de las partidas y conceptos que en ella puedan intervenir.
- Lista de materiales.- Del estudio de los planos se obtiene la lista de materiales fijos, es decir, aquellos materiales que serán instalados y quedaran permanentes en la obra; del estudio de las especificaciones se obtiene la clase de material requerido; también este estudio permite determinar el volumen de materiales de consumo necesario para realizar la instalación de los materiales permanentes.
- Cuantificación de conceptos.- Para la realización de esta actividad es necesario seguir un método que permita cuantificar los conceptos en una forma ordenada y precisa, así como verificar en forma directa las cantidades de obra obtenidas.
- Maquinaria y equipo.- El análisis de los planos y especificaciones también permiten determinar el procedimiento constructivo a seguir y, por lo tanto, se puede determinar la maquinaria y equipo necesario para el desarrollo de la obra en cuestión, esto obliga a determinar los costos horarios de la maquinaria y equipo que intervendrán en la obra y que formarán parte del costo directo. (BELTRAN, 2012)

1.2.8.3 Precios unitarios

El artículo 185 del Reglamento de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las mismas define como Precio Unitario:

Artículo 185.- Para los efectos de la Ley y este Reglamento, se considerará como precio unitario: El importe de la remuneración o pago total que debe cubrirse al contratista por unidad de concepto terminado, ejecutado conforme al proyecto, especificaciones de construcción y normas de calidad. El precio unitario se integra con los costos directos



correspondientes al concepto de trabajo, los costos indirectos, el costo por financiamiento, el cargo por la utilidad del contratista y los cargos adicionales.”

Artículo 187.- El análisis, cálculo e integración de los precios unitarios para un trabajo determinado deberá guardar congruencia con los procedimientos constructivos o la metodología de ejecución de los trabajos, con el programa de ejecución convenido, así como con los programas de utilización de personal y de maquinaria y equipo de construcción, debiendo tomar en cuenta los costos vigentes de los materiales, recursos humanos y demás insumos necesarios en el momento y en la zona donde se llevarán a cabo los trabajos, sin considerar el impuesto al valor agregado. Lo anterior, de conformidad con las especificaciones generales y particulares de construcción y normas de calidad que determine la dependencia o entidad. (BELTRAN, 2012)

1.2.9 Softwares

1.2.9.1 Software ETABS.

El innovador y revolucionario nuevo ETABS es el último paquete de software integrado para el análisis y diseño estructural de edificios. Ofrece modelado basado en objetos 3D sin igual y herramientas de visualización, poder de análisis lineal y no lineal extraordinariamente rápido, capacidad de diseño sofisticadas y completas para una amplia gama de materiales, y las interesantes pantallas gráficas, informes, y dibujos esquemáticos que permiten a los usuarios descifrar y comprender los resultados de análisis y diseño de forma rápida y fácil.

Desde el inicio de la concepción del diseño a través de la producción de dibujos esquemáticos, ETABS integra todos los aspectos del proceso de diseño de ingeniería. El zafiro estado de la técnica del solucionador de 64 bits permite modelos extremadamente grandes y complejos para ser analizados rápidamente, y es compatible con las técnicas de



modelado no lineal como la secuenciación de la construcción y los efectos del tiempo (por ejemplo, retracción y fluencia).

Diseño de estructuras de acero y hormigón (con optimización automatizada), vigas compuestas, columnas compuestas, viguetas de acero y muros de corte de hormigón y mampostería está incluido, así como la comprobación de la capacidad de las conexiones de acero y placas de base. Los modelos pueden ser realistas, y todos los resultados se pueden mostrar directamente en la estructura. Informes completos y personalizables están disponibles para todos los análisis y resultados del diseño, y planos de construcción esquemáticos de los planes de enmarcado, horarios, detalles y secciones transversales pueden ser generados para estructuras de hormigón y acero. (COMPUTERS & STRUCTURES, CSI CARIBE, 2016)

1.2.9.2 Software SAFE (SAFE, v2014).

SAFE es la última herramienta para el diseño de sistemas de piso de concreto y fundaciones. Es un programa especializado que automatiza el análisis y diseño de simple a complejas plateas y cimentaciones de concreto usando avanzados sistemas de modelación. El programa puede analizar y diseñar losas o plateas de formas arbitrarias y de espesor variable, de paneles desnivelados, con aberturas, vigas de borde y discontinuidades. Las cimentaciones pueden ser combinaciones de plateas, franjas de cimentación o cimentaciones corridas aisladas.

El análisis está basado en el método de elementos finitos, una moderna y consistente teoría la cual contempla la variación de las propiedades por los efectos de los momentos torsores. El enmallado es automático y está basado en parámetros especificados por el usuario. Las cimentaciones son modeladas como placas gruesas sobre cimentaciones elásticas, donde solamente la rigidez a la compresión del suelo es automáticamente discretizados basados en el módulo de la reacción de la sub-base que es especificada para cimentación. (COMPUTERS & STRUCTURES, CSI CARIBE, 2016).



2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar, mediante un análisis comparativo, las alternativas de diseño de losas de cimentaciones aligeradas y macizas, sobre el terreno y sobre pilotes. Todo lo anterior con el fin de determinar el tipo de losa de cimentación óptimo en cada caso, teniendo en cuenta los parámetros económicos y constructivos del diseño, tales como cantidades de obra, presupuesto y tiempo de ejecución.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el diseño estructural de las losas macizas y aligeradas de cimentación para cada una de las alternativas propuestas.
- Identificar los detalles del comportamiento de los diferentes modelos mediante la interacción sísmica suelo-estructura teniendo en cuenta los requisitos establecidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10).
- Precisar la respuesta de los modelos de cimentación ante la presencia de deformaciones producto de asentamiento diferenciales y totales.
- Identificar la solución de cimentación con mejor viabilidad económica y constructiva.



3. ALCANCE

El presente proyecto pretendió determinar el tipo de losa de cimentación óptimo en cada caso ya definido, teniendo en cuenta los parámetros económicos y constructivos del diseño, tales como cantidades de obra, presupuesto y tiempo de ejecución. Para el análisis de los modelos construidos con ayuda de los programa de diseño estructural, fue pertinente establecer en primera instancia, las fronteras que fijaron determinadas características de estos, así como la extensión temporal, espacial y teórica utilizada durante el desarrollo del proyecto.

3.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL

La modelación, evaluación y diseño estructural para cada uno de los casos definidos de cimentación, se realizó en los laboratorios de sistemas dentro de las instalaciones de la Universidad de Cartagena en el Campus Piedra Bolívar, situada en la Ciudad de Cartagena de Indias (Colombia) con coordenadas geográficas $10^{\circ}24'06.3''N$, $75^{\circ}30'19.6''W$ y a una altura de 35 metros con respecto al nivel del mar. (Ver Figura 18 y Figura 19)

3.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL

La ejecución del proyecto se llevó a cabo a partir del segundo periodo académico del año 2016. La duración del mismo fue de 16 semanas a partir del mes de Agosto hasta el mes de Noviembre del mismo año. En cuanto a la disponibilidad de los laboratorios de sistemas de la Universidad de Cartagena para el desarrollo del proyecto, obedeció al horario establecido por la Dirección del Programa de Ingeniería Civil.



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*

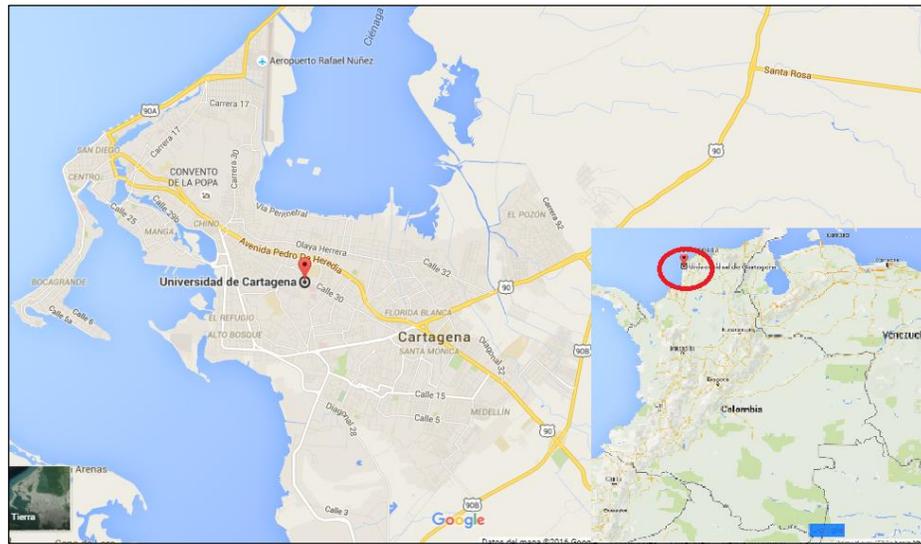


Figura 18. Ubicación geográfica de la Ciudad de Cartagena (Colombia). Fuente: Google Maps (2016).

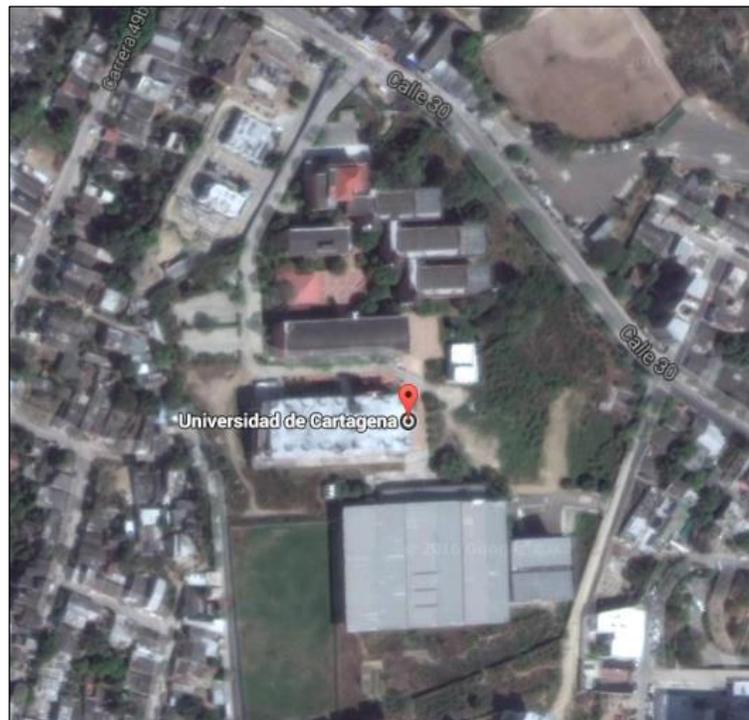


Figura 19. Ubicación geográfica de la Universidad de Cartagena, coordenadas 10°24'06.3"N, 75°30'19.6"W.
Fuente: Google Maps (2016).



3.3 DELIMITACIÓN CONCEPTUAL

El proyecto se ajustó al estudio del comportamiento de los modelos de cimentación definidos y construidos con ayuda de los programas de diseño estructural. Esto comprendió la medición y comparación de asentamientos diferenciales y totales, para chequear que se cumple con los parámetros establecida por la NSR-10 para este tipo de elementos estructurales. Además, se realizó la evaluación financiera acotada a las cantidades de obra y tiempo de ejecución, con el fin de comparar todos los modelos y destacar el que presentó menor valor económico.

3.4 RESULTADOS

En los resultados esperados con el desarrollo del proyecto, se contempló obtener la caracterización del comportamiento de los modelos de cimentación definido, es decir, el resultado obtenido del diseño estructural, de la interacción suelo-estructura, así como el presupuesto y la programación para cada caso. Además, se buscó decretar la solución ingenieril que brinde óptimo provecho y comodidad.

3.5 PRODUCTO FINAL A ENTREGAR Y COMPLEMENTARIOS

Al ejecutar el proyecto, se presentó un análisis mediante un cuadro comparativo donde se detallaron de manera cualitativa y cuantitativa, las características del comportamiento estructural de los modelos de cimentación, además de un despiece de los diseños estructurales junto la descripción específica del método constructivo. Finalmente se presentó la mejor alternativa con las razones de su elección. Con lo anterior se procuró fomentar la implementación de los resultados de la investigación, como alternativa innovadora y económica para las losas de cimentación tradicionales usadas en los proyectos actuales.

Debido al aporte en la construcción del conocimiento en el área del diseño estructural, específicamente en la cantidad y variedad de alternativas a cimientos de edificaciones,



se esperó que la investigación sirviera como base para futuros análisis y evaluaciones de factibilidad entre otros sistemas de cimentación y para otro tipo de estructuras.

3.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Se analizaron las losas de cimentación macizas y aligeradas, para los casos donde se apoya directamente sobre el suelo y sobre pilotes, para un modelo de edificación seleccionado como ejemplo, la cual tiene una altura total de 61.14 m y consta de 16 pisos, de los cuales 3 pisos son de parqueaderos, 11 de uso doméstico para apartamentos y los dos pisos restantes para zonas comunes. Además para las características del suelo en la modelación se tuvo en cuenta un *“ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA EDIFICACIÓN DE 15 NIVELES, EN EL CALLEJÓN NUEVO DANDY, BARRIO MANGA, DISTRITO DE CARTAGENA”* proporcionado por el Ingeniero Civil y MSc., Guilliam Barboza. Para el diseño estructural en concreto armado se sometieron los modelos de cimientos a los requisitos presentes en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y no se calculó para el edificio el diseño de la superestructura.



4. METODOLOGÍA

La filosofía de la investigación es de tipo descriptiva, debido a que se evaluó, mediante un análisis comparativo, las alternativas de diseño de losas de cimentaciones aligeradas y macizas, teniendo en cuenta los parámetros económicos y constructivos del diseño, tales como cantidades de obra, presupuesto y tiempo de ejecución. La Figura 20 muestra el esquema de la metodología empleada para el desarrollo del estudio.

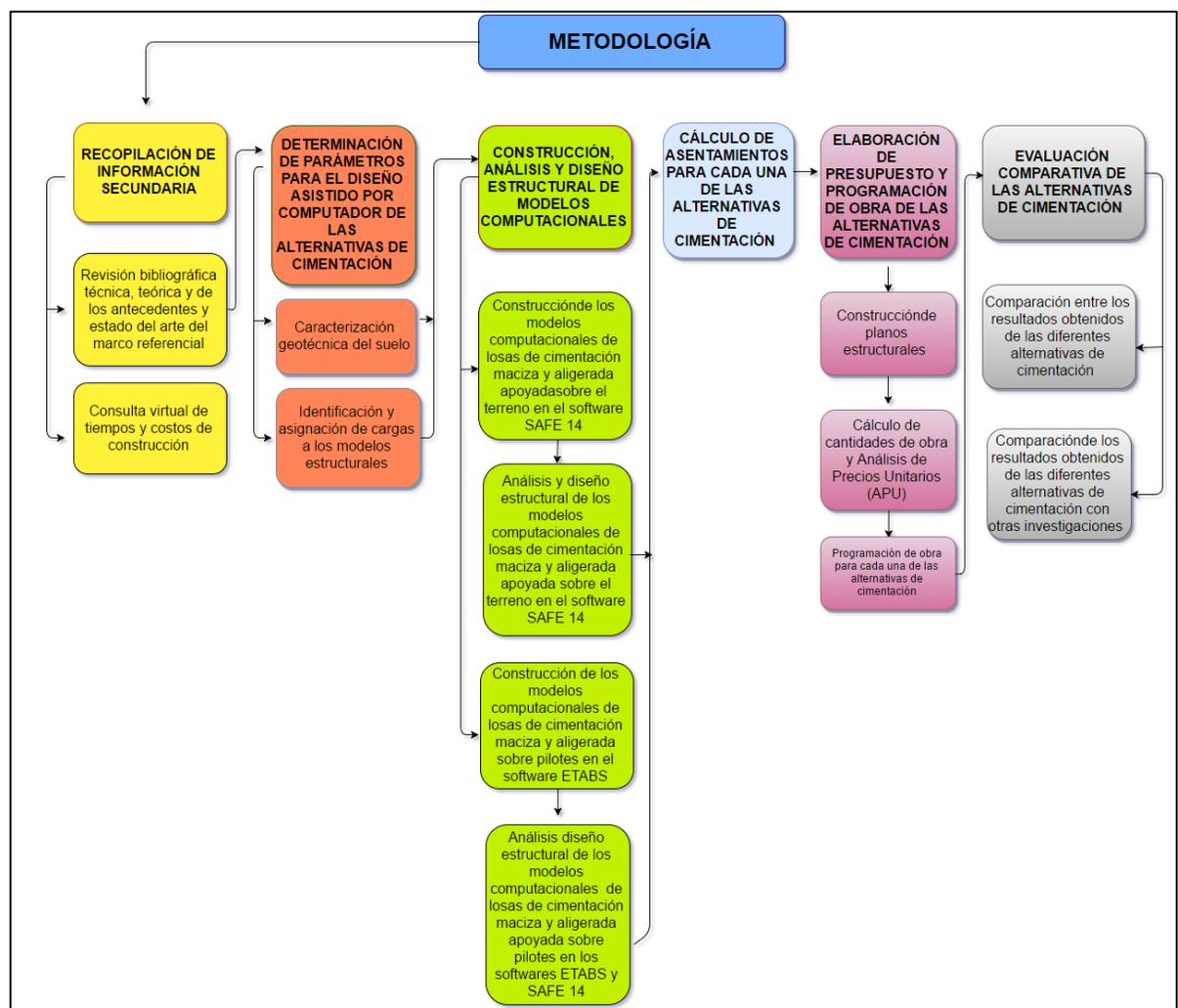


Figura 20. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del estudio. Fuente: Autor



La modelación, evaluación y diseño estructural para cada uno de los casos definidos de cimentación, se realizó en la Ciudad de Cartagena de Indias (Colombia), exactamente en los laboratorios de sistemas dentro de las instalaciones de la Universidad de Cartagena en el Campus Piedra Bolívar. El proyecto se ejecutó en 4 meses a partir del mes de Agosto del 2016.

4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

En esta etapa se realizó la recopilación de la información referente al empleo de losas de cimentación maciza y aligerada como solución estructural a cimientos superficiales y profundos en el ámbito ingenieril, así mismo su respectivo proceso constructivo y modelación en software de diseño y análisis estructural. Por otro lado se consultaron costos y tiempos de construcción en bases de datos locales, con el fin de obtener la información necesaria referente a la concepción en obra de las alternativas de diseño planteadas. La información fue obtenida de la bibliografía técnica del presente proyecto y el Reglamento Colombiano Sismorresistente (NSR-10).

4.1.1 Revisión bibliográfica técnica, teórica y de los antecedentes y estado del arte del marco referencial

Consistió en examinar la bibliografía referente a la teoría y conceptos básicos para la modelación, análisis y diseño estructural de losas aligeradas y macizas de cimentación en edificaciones, abordando aspectos como las características geométricas de los cimientos a evaluar en el presente estudio, el coeficiente de reacción necesario para la modelación en los software estructurales y los requisitos mínimos establecidos por el Reglamento Colombiano Sismorresistente (NSR-10) para el diseño, control de asentamientos y correcta ejecución en obra de los cimientos, teniendo en cuenta además los estudios e implementaciones similares realizadas de manera internacional. Por otro lado se realizó la consulta detallada los conceptos de costos y tiempos de procesos constructivos de las alternativas planteadas, incluyendo la información teórica necesaria para realizar de manera



correcta la programación y presupuesto de obra. Los resultados obtenidos de las búsquedas se presentan en el marco referencial del documento.

4.1.2 Consulta virtual de tiempos y costos de construcción

Las consultas referentes a tiempo y costos de construcción, inicialmente se había planteado realizarlas en la base de datos de construcción CONSTRUDATA, pero debido a inconvenientes con la licencia, y facilidad de acceso a los A.P.U proporcionados por el instituto nacional de vías (INVIAS), se optó por usar esta última como herramienta, donde aparecen detallados presupuestos, proveedores, tarifas, indicadores de costos y demás aspectos necesarios para definir correctamente lo relacionado a planeación y control de obra de las alternativas planteadas, como son la duración y los costos de construcción. Se usó este banco de datos, debido a que es muy actualizado y es uno de los más populares y usado entre las empresas de construcción en Colombia, gracias a su facilidad accesibilidad en todo el país. La información anterior fue recolectada en las instalaciones de la Universidad de Cartagena, precisamente en el laboratorio de sistemas del Campus Piedra Bolívar.

4.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN

En esta etapa se definieron los parámetros y condiciones a utilizar en el modelado, análisis y diseño estructural de las diferentes alternativas de cimentación en los softwares de modelación. Se realizó la caracterización geotécnica del suelo, y se identificaron los tipos y el valor de las cargas producto del análisis estructural de la superestructura.

4.2.1 Caracterización geotécnica del suelo para la modelación y análisis de interacción suelo estructura

Entre los parámetros principales necesarios para iniciar el diseño de las alternativas está la caracterización geotécnica del suelo, la cual se realizó en base a un *“ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA EDIFICACIÓN DE 15 NIVELES,*



EN EL CALLEJÓN NUEVO DANDY, BARRIO MANGA, DISTRITO DE CARTAGENA” proporcionado por el Ingeniero Civil y MSc., Guilliam Barboza. Este se utilizó en el análisis de la cimentaciones profundas, para el cual se identificó el perfil estratigráfico del suelo hasta una profundidad de 25.0 metros, incluyendo la clasificación del material presente en cada estrato, humedad natural, límites de Atterberg, pesos unitarios y parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción (ϕ) para cada uno de los estratos. Todo lo anterior basado en los ensayos de laboratorio incluidos en el estudio de suelo que se muestra en el Anexo A. Para el caso de las alternativas de cimentación superficial, se evaluó la opción intervenir el estrato inmediatamente superior con columnas de suelo-cemento (Jet Grouting) para mejorar la capacidad de soporte admisible hasta un valor suficiente y así considerar la losa de cimentación como solución, teniendo en cuenta que los estratos de suelo cerca del nivel del terreno en el estudio geotécnico presentan insuficiente capacidad portante.

4.2.2 Identificación y asignación de cargas a los modelos estructurales

La edificación con la cual se trabajó en el presente proyecto es residencial, cuenta con 16 pisos, y está ubicada en la ciudad de Cartagena, Bolívar. Tiene las siguientes características sísmicas.

Tabla 4. Características sísmicas de la edificación del proyecto

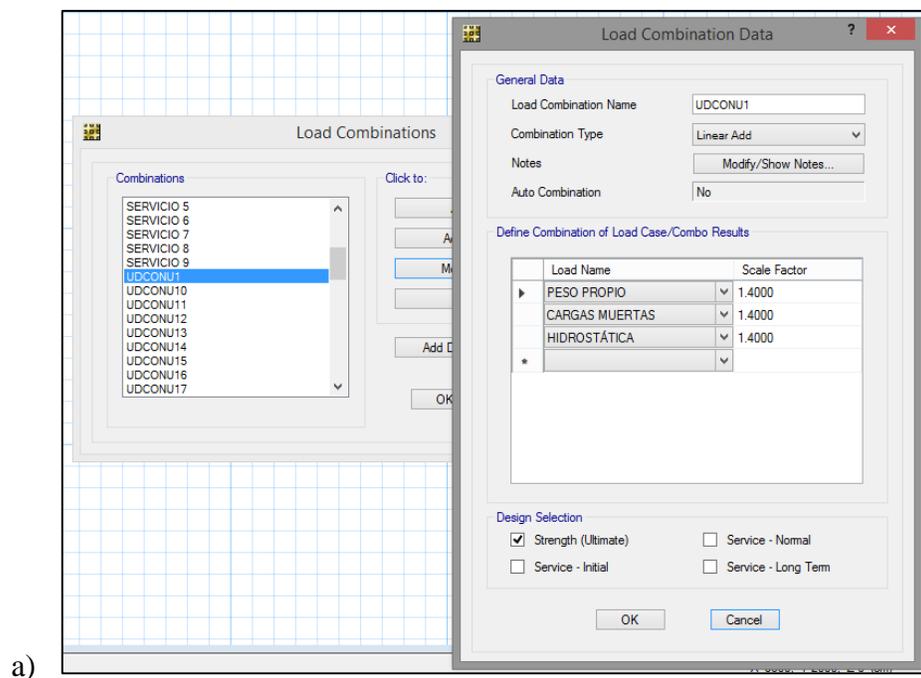
CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS DE LA ESTRUCTURA	
Sistema estructural	Pórticos en Concreto Resistentes a Momento
Capacidad de disipación de energía	DMI
Coeficiente de disipación de energía	2.5
Zona de amenaza sísmica	Baja
Aa	0.1
Av	0.1
Tipo de perfil	D
Grupo de uso	1

Fuente: Ingeniero Jairo Alvis Aly, 2016.



Las cargas producto del análisis estructural de la superestructura de la edificación “Las Flórez”, Fueron proporcionadas por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, y pueden ser examinadas en el Anexo B. En las Tablas anexas se observan cada uno de los casos de cargas evaluados en los que se destacan el peso propio de la estructura, cargas muertas permanentes, carga hidrostática (Piscina de la edificación) y carga viva o sobrecarga de uso como cargas gravitacionales comunes, además las cargas temporales de viento y sismo evaluadas en las principales direcciones X y Y, tomando en cuenta las excentricidades accidentales.

Así mismo se definieron y se incluyeron las combinaciones de servicio mostradas en la Tabla B.3 de los Anexos y combinaciones de diseño estipuladas en el capítulo C.9.2.1. (NSR-10) en las combos de diseño en el software SAFE 14 (ver Figuras 21a y 21b).



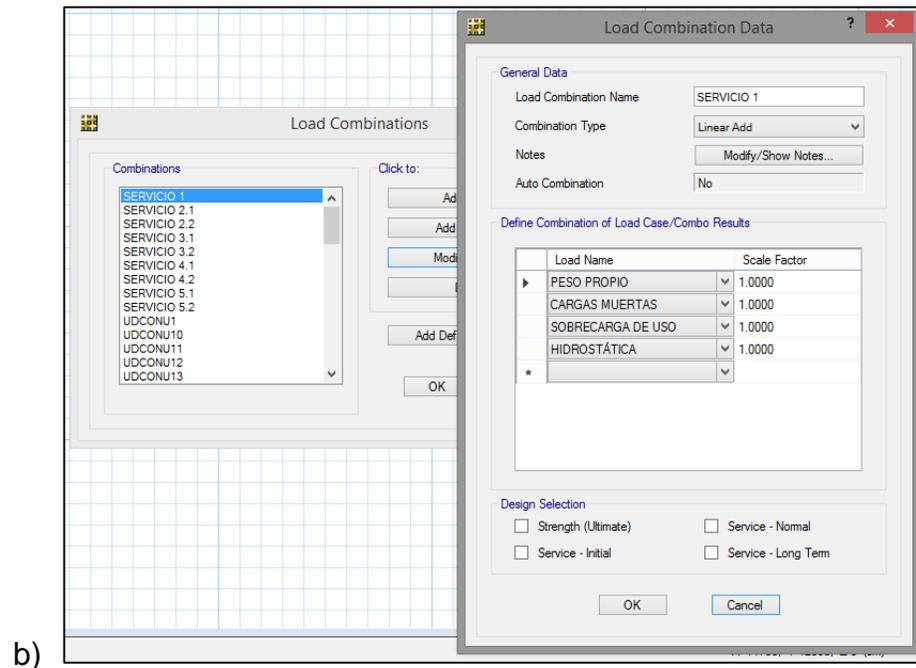


Figura 21. a) Definición de combinación de diseño C.9-1 de la NSR-10 en el software SAFE 14, b) Definición de combinación de servicio. Fuente: Autor

4.3 CONSTRUCCIÓN, ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE MODELOS COMPUTACIONALES

4.3.1 Construcción de los modelos computacionales de losas de cimentación maciza y aligerada apoyada sobre el terreno en el software SAFE 14

Teniendo en cuenta el estudio geotécnico nombrado anteriormente, se observó que hasta 2.5 metros de profundidad se presenta aún suelo con mala capacidad portante (con un $q_{adm} = 0.65 \text{ kg/cm}^2$) como para cimentar superficialmente el edificio del proyecto. Por lo anterior, se consideró prudente evaluar la intervención del perfil de suelo con columnas de suelo-cemento (Jet Grouting) a partir de tablas y gráficos de aplicaciones previas como opción para obtener una capacidad admisible (q_{adm}) de 4.0 kg/cm^2 (40.0 Ton/m^2) con un módulo de reacción del suelo $k_{0,3} = 15.1 \text{ kg/cm}^3$,



suficiente para el soporte de las losas de cimentación maciza y aligerada apoyadas sobre el terreno.

A partir de la Tabla 5 se seleccionó la resistencia a compresión inicial dada al suelo tratado o zona tratada en función de datos previos para los distintos tipos de Jet.

Tabla 5. Resistencia a compresión simple en función del tipo de terreno para el sistema Jet 1.

Tipo de terreno	Resistencia a compresión simple (MPa)
Arcillas y limos	1 - 4
Arenas limosas	3 - 10
Arenas y gravas	6 - 30

Fuente: Bielza F., A. (1999)

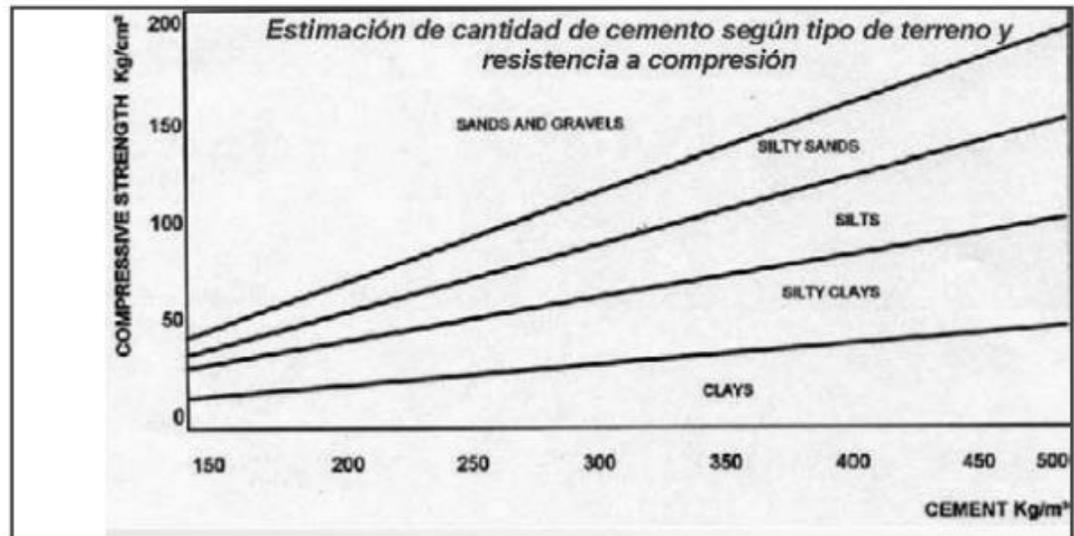
La Tabla 6 provee el diámetro de las columnas de cemento seleccionado para el diseño preliminar en función del tipo de terreno y sistema Jet.

Tabla 6. Parámetros típicos para columnas de cemento para diferentes sistemas Jet.

Jet System and Soil Type	Unconfined Compressive Strength (MPa)	Column Diameter (m)
Single jet		
Sands and gravels	7–20	0.6–0.9
Clays	1.7–7	0.6–0.9
Double jet		
Sands and gravels	3.5–14	0.9–1.8
Clays	1–7	0.9–1.5
Triple jet		
Sands and gravels	3.5–10	1.5–2.5
Clays	1–5	0.9–1.8

Fuente: Han, J. (2015)

Por últimos la estimación de la cantidad de cemento en función del tipo de terreno y resistencia a la compresión se determinó usando la Gráfica 1.



Grafica 1. Cantidad de cemento para el sistema Jet en función del tipo de terreno y resistencia a la compresión. Fuente: Warner, J. (2004)

Por otro lado las dimensiones en área de las losas estuvieron limitadas por el lote y las edificaciones vecinas, por esto solo se tuvo en cuenta el perímetro compuesto por las columnas exteriores del diseño estructural y el área perteneciente al lote en dirección a la vía pública. En cuanto al espesor, este va ligado a la revisión por punzonamiento en las áreas cercanas a las columnas realizado en el diseño estructural, así como la cantidad y colocación del refuerzo típico para las alternativas de cimentación como se indica en las figuras 22 y 23. Los modelos fueron realizados en el software SAFE 2014, donde en primera instancia se definieron los materiales (ver Figura 24 y 25), el módulo de reacción K del suelo (ver Figura 26), se definieron las dimensiones preliminares para las vigas de la losa de cimentación aligerada (ver Figura 27) y finalmente se construyeron los modelos con dimensiones tentativas respetando los valores mínimos estipulados en la NSR-10. Las Figuras 28, 29, 30 y 31 muestran la vista en 3D y la vista en planta respectivamente de los modelos de losa maciza y aligerada sobre el terreno realizado en SAFE 2014.

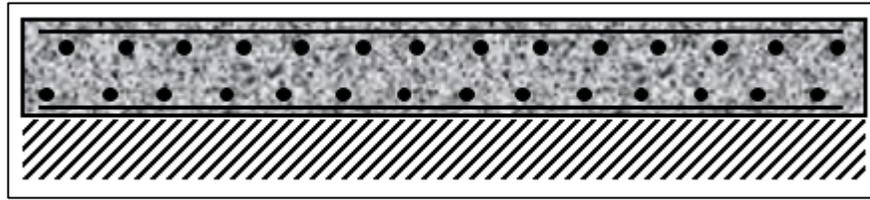


Figura 22. Sección transversal típica de una losa maciza de cimentación apoyada sobre el terreno. Fuente:

Autor

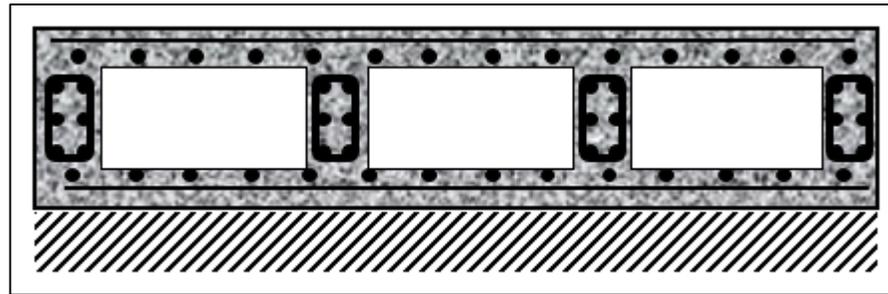


Figura 23. Sección transversal típica de una losa aligerada de cimentación apoyada sobre el terreno. Fuente:

Autor

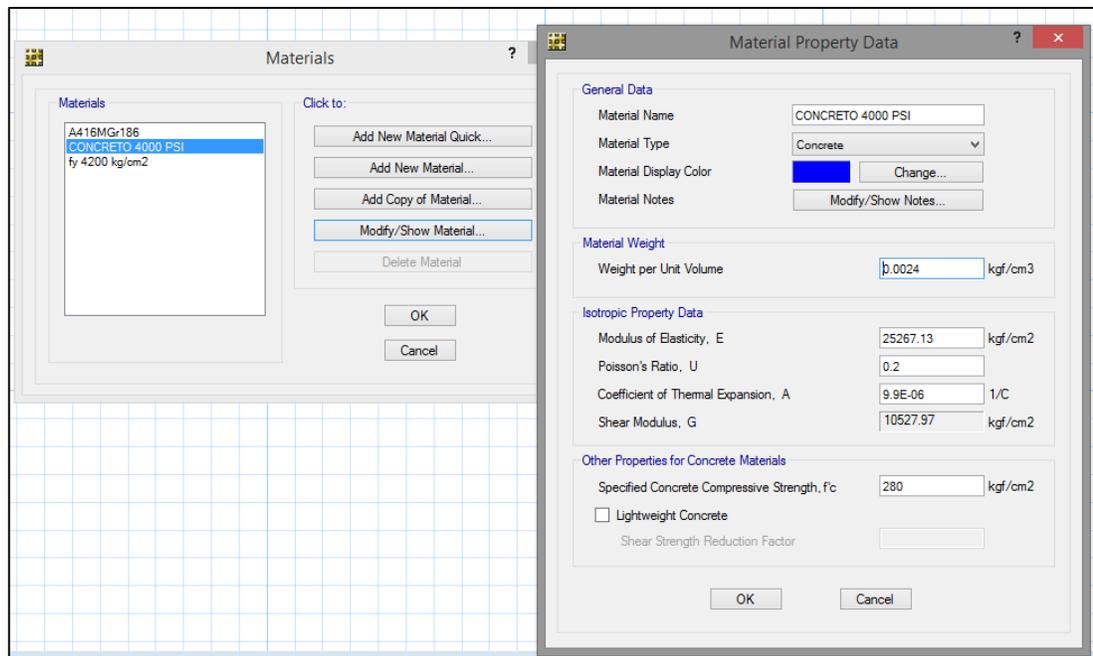


Figura 24. Concreto de 4000 PSI definido para los modelos de losas maciza y aligerada en SAFE 2014.

Fuente: Autor.

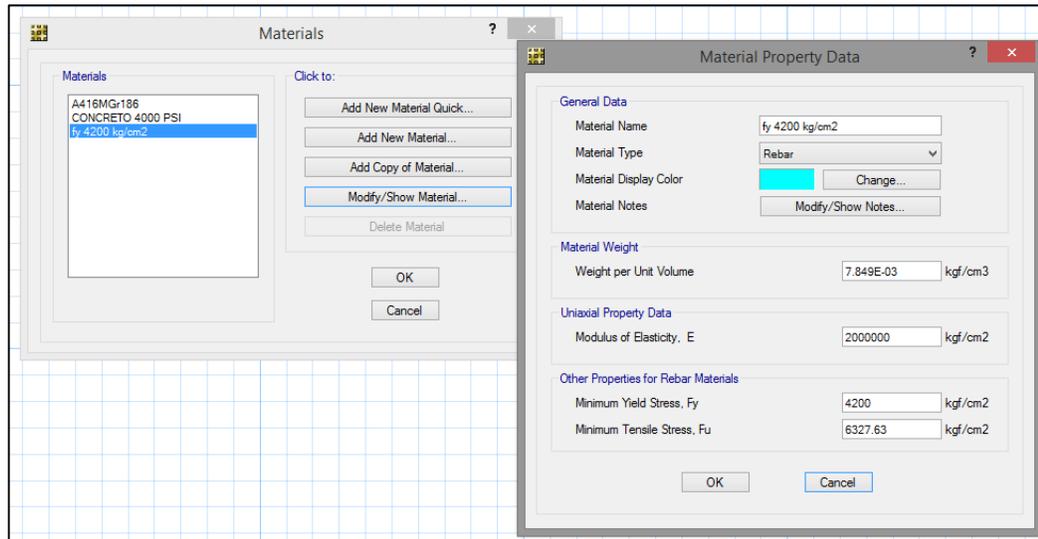


Figura 25. Acero grado 60, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ definido para los modelos de losas maciza y aligerada en SAFE 2014. Fuente: Autor.

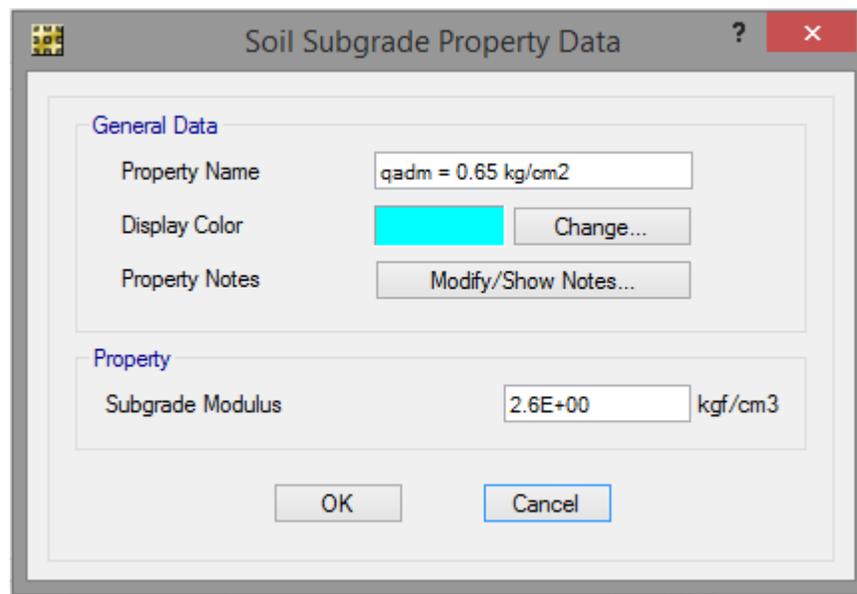


Figura 26. Módulo de reacción del suelo, $k_{0,3} = 2.6 \text{ Kg/cm}^3$ equivalente para la losa y correspondiente a una arena húmeda de consistencia media definido para los modelos de losas maciza y aligerada en SAFE 2014.

Fuente: Autor.

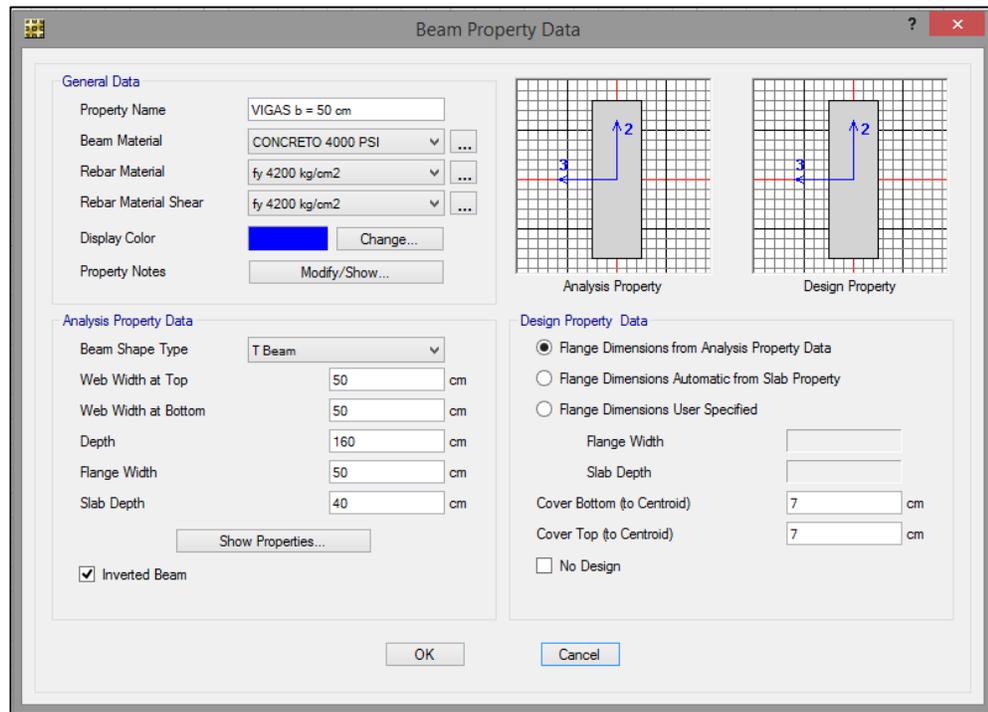


Figura 27. Definición de vigas para el modelo de losa aligerada realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor

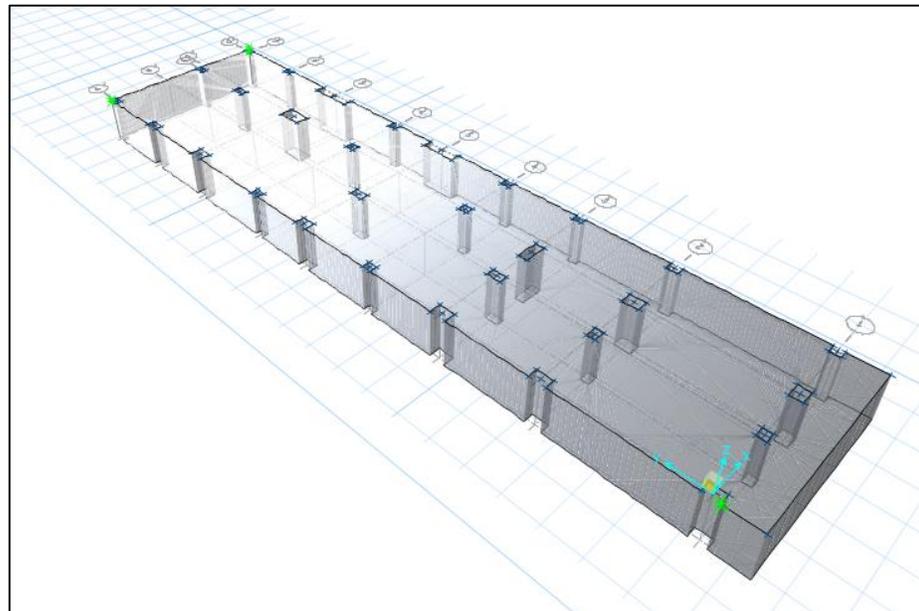


Figura 28. Modelo en 3D de losa maciza realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor.

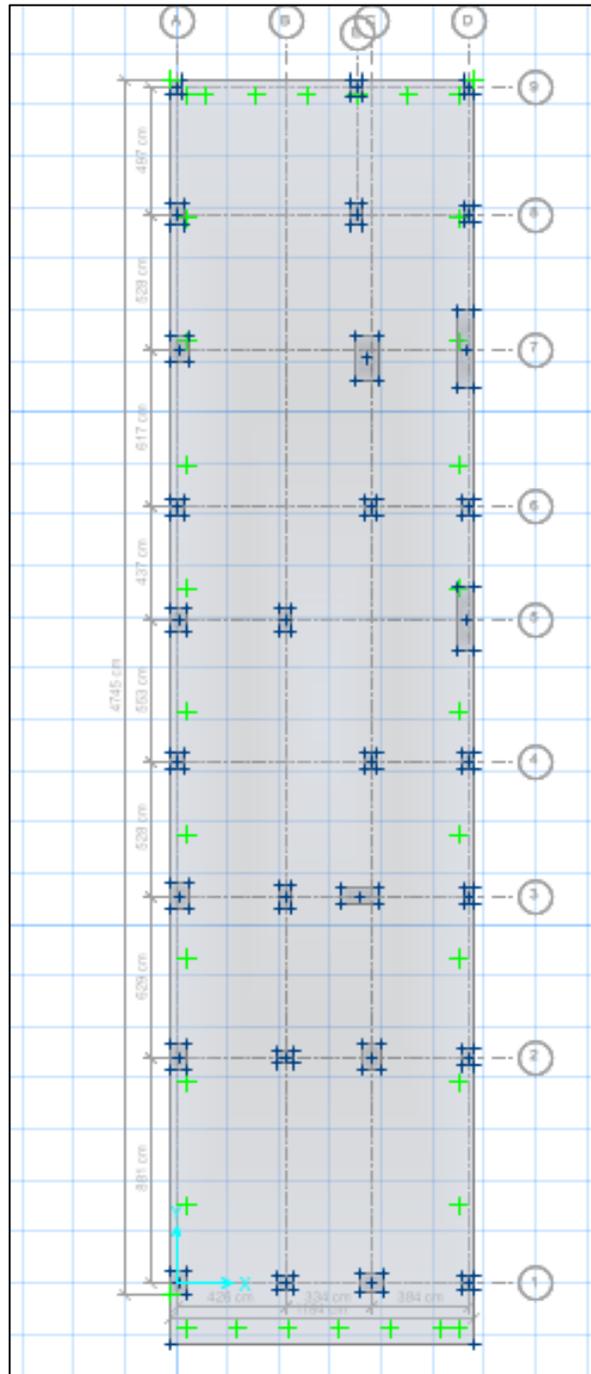


Figura 29. Planta del modelo de losa maciza realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor.

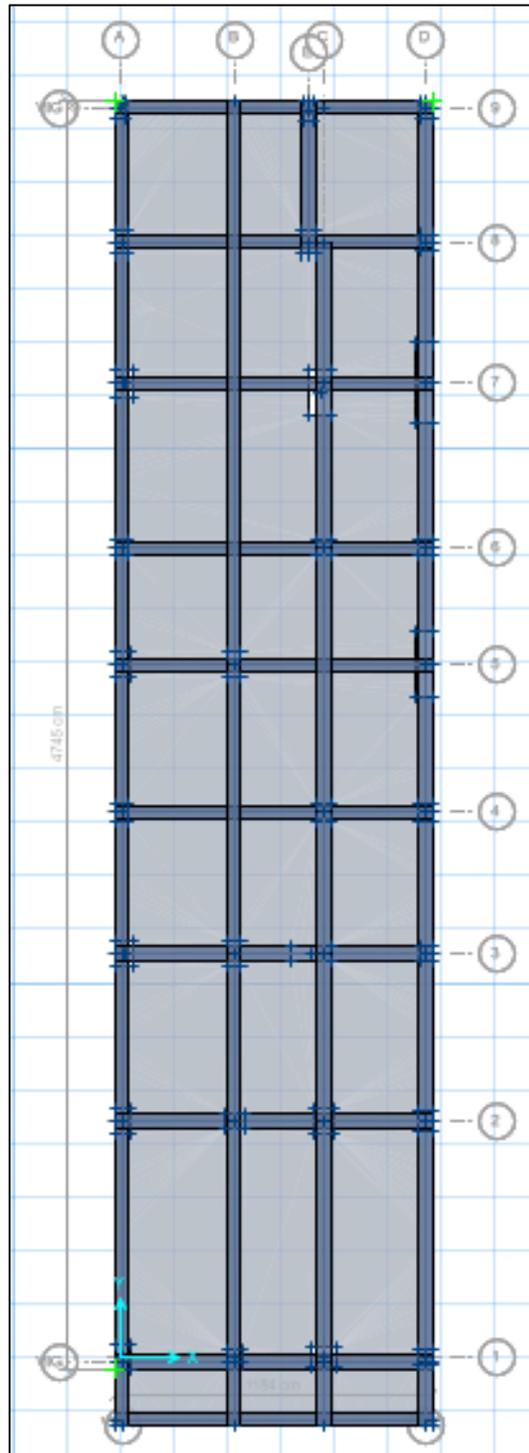


Figura 30. Planta del modelo de losa aligerada realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor.

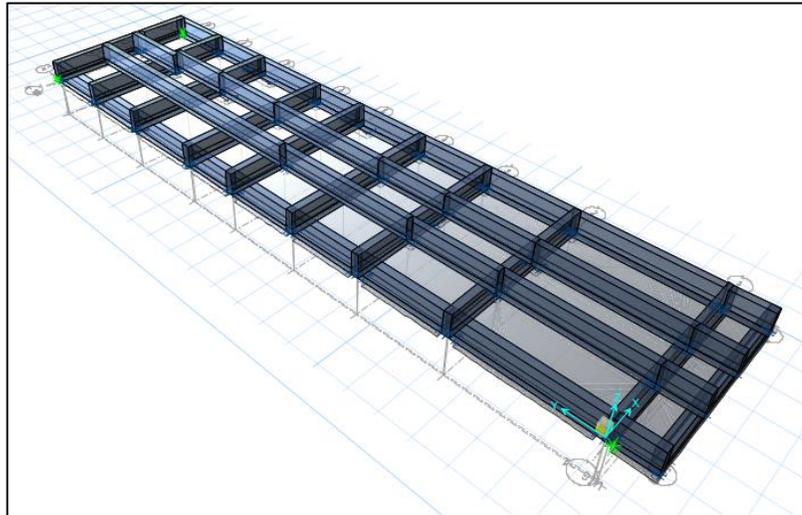


Figura 31. Modelo en 3D de losa aligerada realizado en SAFE 2014. Fuente: Autor.

4.3.2 Construcción de los modelos computacionales de losas de cimentación maciza y aligerada sobre pilotes en el software ETABS

Las losas de cimentación maciza y aligerada sobre pilotes con sección y armado típico como se indica en las Figuras 32 y 33, se modelaron en primera instancia en el software ETABS para luego ser analizadas y diseñadas en el software SAFE 2014, el cual se considera más adecuado para el análisis de cimentaciones.

Se consideró para los pilotes un diámetro de 0.6 m como se indica en la Figura 34, una longitud de 23.50 m, con una separación mínima de 2.5 veces el diámetro del pilote de centro a centro y una profundidad de 25.0 metros desde el nivel del terreno para cimentarlos. A partir de los resultados del estudio geotécnico, se determinó la capacidad de carga admisible, los asentamientos totales y el módulo de reacción horizontal (K_h) y vertical (K_v) para cada uno de los pilotes.

Por otro lado se modelaron las losas apoyadas sobre pilotes (ver Figuras 35, 36, 37 y 38) con un área igual a las cimentaciones superficiales, guardando similitud en las dimensiones de las vigas para el caso de la losa aligerada.

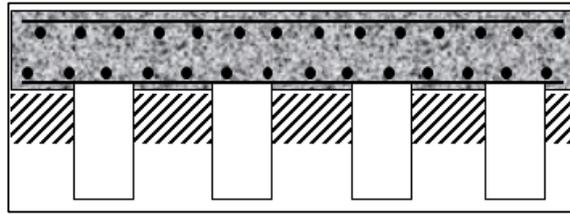


Figura 32. Sección transversal típica de una losa maciza de cimentación apoyada sobre pilotes. Fuente:
Autor.

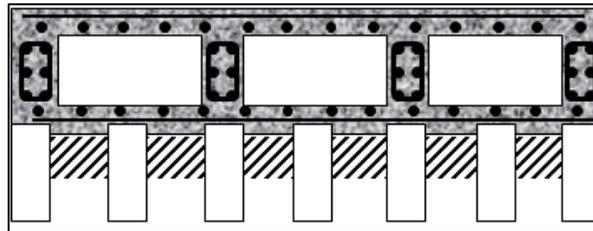


Figura 33. Sección transversal típica de una losa aligerada de cimentación apoyada sobre pilotes. Fuente:
Autor.

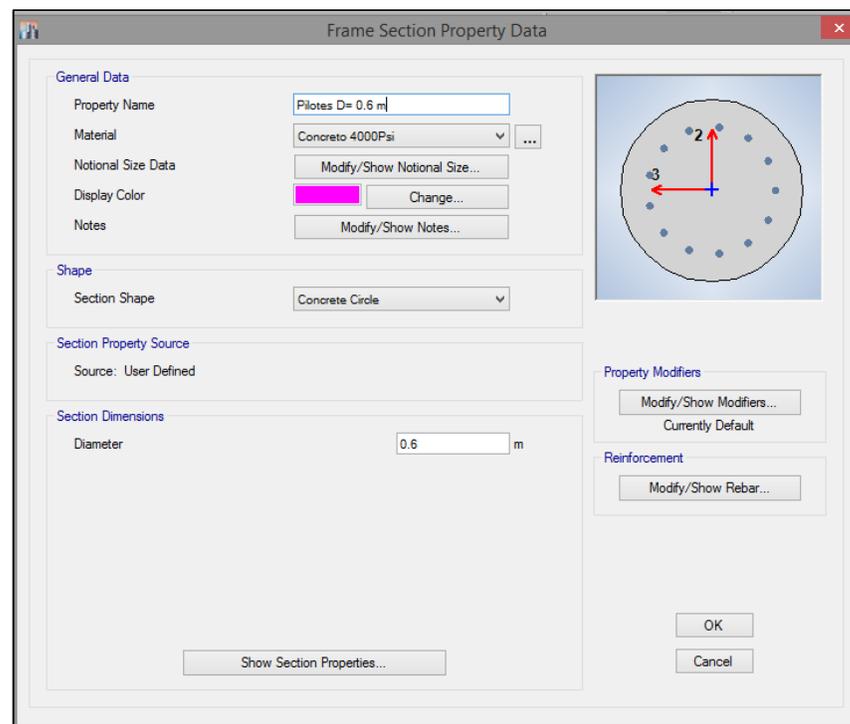


Figura 34. Definición de pilotes de diámetro 0.6 metros para el modelo de losa maciza y aligerada realizado en ETABS. Fuente: Autor.

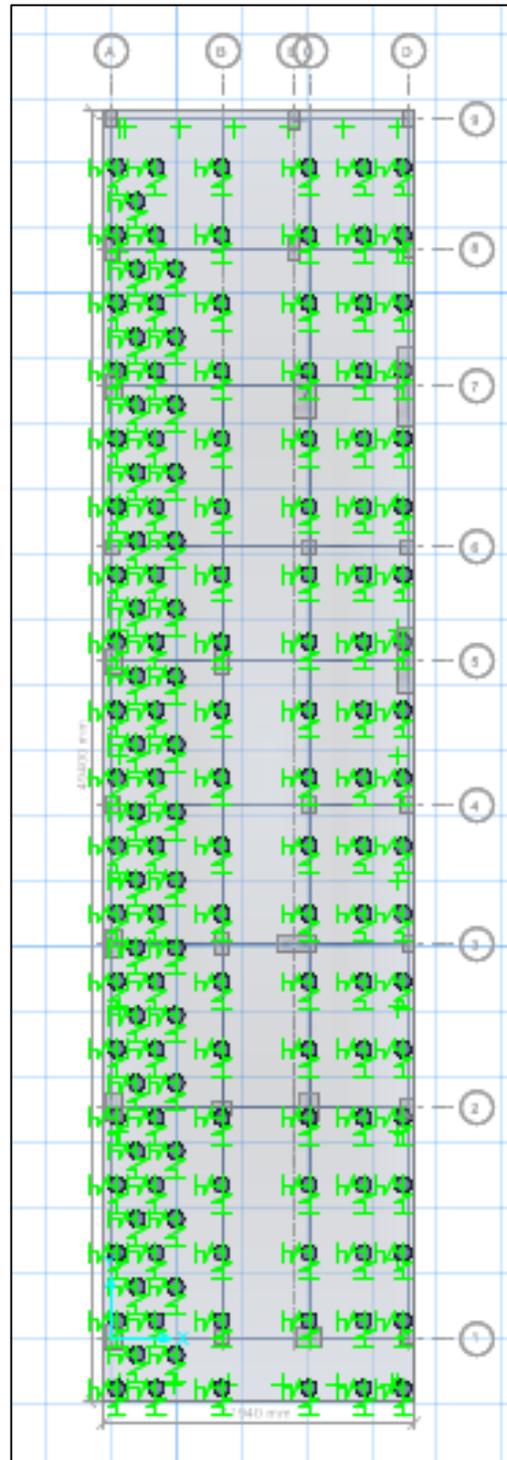


Figura 35. Modelo preliminar en 2D de losa maciza sobre pilotes de 0.6 metros diámetro realizado en ETABS. Fuente: Autor.

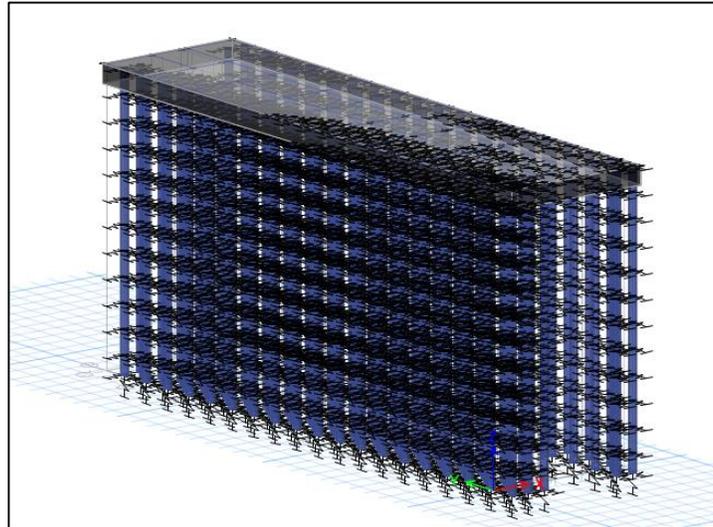


Figura 36. Modelo preliminar en 3D de losa maciza sobre pilotes de 0.6 metros diámetro realizado en ETABS. Fuente: Autor.

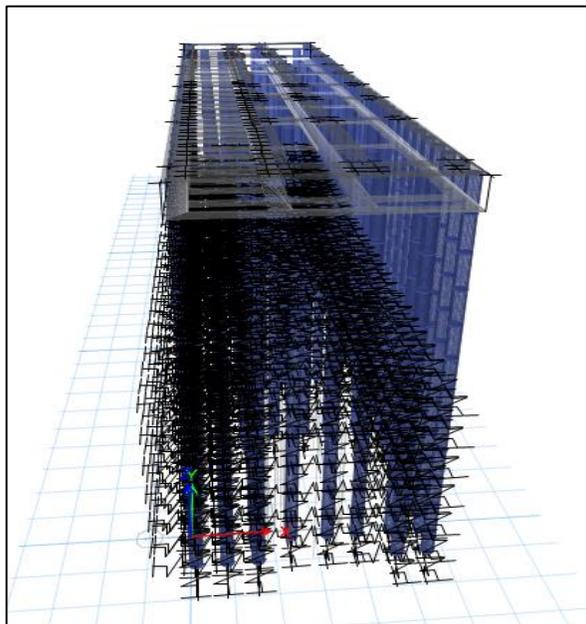


Figura 37. Modelo preliminar en 3D de losa aligerada sobre pilotes de 0.6 metros diámetro realizado en ETABS. Fuente: Autor.

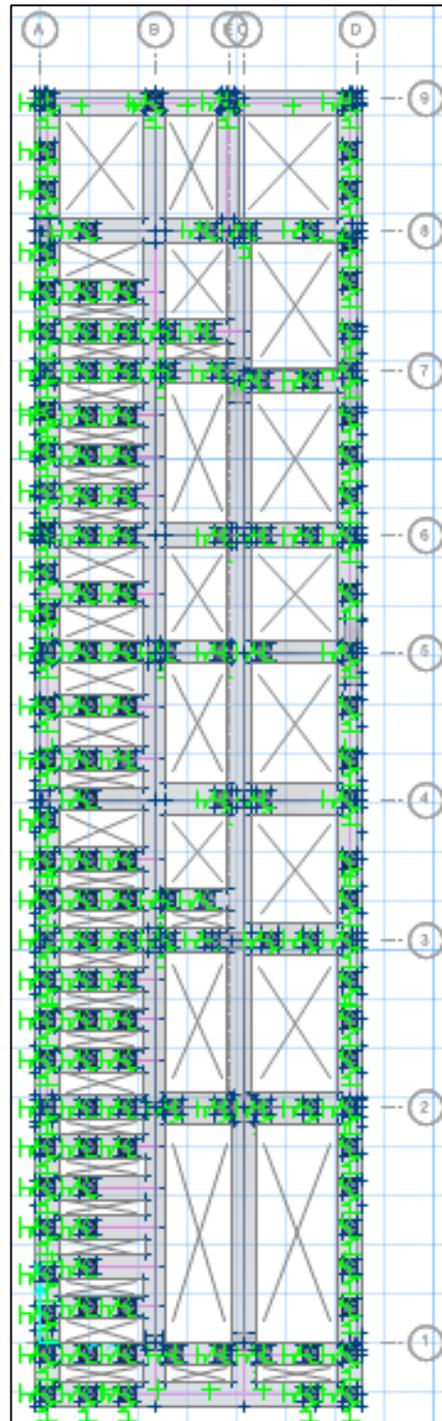


Figura 38. Modelo preliminar en 2D de losa aligerada sobre pilotes de 0.6 metros diámetro realizado en ETABS. Fuente: Autor.



4.3.3 Análisis y diseño estructural de los modelos computacionales de losas de cimentación maciza y aligerada apoyada sobre el terreno en el software SAFE 14

Construidos en su totalidad los modelos computacionales de las alternativas de cimentación sobre el terreno, se procedió a realizar el análisis estructural en el software SAFE 2014, verificando en cada caso que la presión sobre el suelo para cada una de las combinaciones de servicio cumpliera con la presión admisible (q_{adm}) establecida con base en el estudio geotécnico. Para lograr lo anterior fue necesario realizar iteraciones variando en cada una de estas el espesor de la losa y además la altura de las vigas para el caso de losa aligerada.

Posteriormente se realizó el diseño estructural de las losas, verificando primero que las dimensiones adoptadas en el paso anterior cumplan con el diseño por punzonamiento, con la longitud de desarrollo necesaria para el refuerzo a compresión de las columnas, además por cortante como viga ancha, y seguidamente se diseñó para flexión. Las vigas en el modelo de losa de cimentación aligerada fueron diseñadas para cortante y flexión.

4.3.4 Análisis y diseño estructural de los modelos computacionales de losas de cimentación maciza y aligerada apoyada sobre pilotes en los softwares ETABS y SAFE 14

Construidos los modelos computacionales de las alternativas de diseño sobre pilotes, se realizó el análisis estructural de ambos modelos en el software ETABS verificando que la carga que se ejerce sobre los pilotes no superara la carga admisible (Q_{adm}) del estrato sobre el cual se apoyan, y se procedió a realizar el diseño de los pilotes a flexión y cortante.

Posteriormente, en el software SAFE 14, se analizó la losa maciza verificando que las dimensiones adoptadas cumplieran con el diseño por punzonamiento, cortante como viga ancha y se diseñó por flexión. En el caso de la losa aligerada, las losas se verificaron y diseñaron de igual forma que la losa maciza, y las vigas de este modelo fueron diseñadas para resistir el cortante y flexión.



4.4 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS PARA CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN

Los asentamientos totales y diferenciales para cada uno de los modelos fueron obtenidos mediante la interacción suelo-estructura realizada en el software SAFE 2014, modelando la rigidez del suelo y realizando el análisis estructural para cada una de las combinaciones de servicio. Estos fueron comparados con los asentamientos admisibles permitidos por la NSR-10.

4.5 ELABORACIÓN DE PRESUPUESTO Y PROGRAMACIÓN DE OBRA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN

En esta etapa del proyecto se examinaron los detalles del diseño estructural de cada una de las alternativas de cimentación, para calcular cantidades de obras, determinar los materiales adecuados y mano de obra necesaria para ser incluidos en su respectivo presupuesto y cronograma.

4.5.1 Construcción de planos estructurales

Teniendo en cuenta los resultados arrojados por los software de diseño estructural SAFE 2014 se dibujaron los planos donde se detalla para cada una de las alternativas de cimentación las dimensiones y colocación del refuerzo. Lo anterior se realizó en el laboratorio de sistemas de la Universidad de Cartagena, exactamente en el Campus Piedra Bolívar usando el software de diseño asistido por computador AUTOCAD 2015.

4.5.2 Cálculo de cantidades de obra y Análisis de Precios Unitarios (APU)

Construidos los planos estructurales de los modelos de cimentación, se procedió a calcular las cantidades de obras, se realizó el Análisis de Precios Unitarios y finalmente se elaboró el presupuesto para cada alternativa de cimentación con base en la información recolectada en la base de datos de construcción de INVIAS.



4.5.3 Programación de obra para cada una de las alternativas de cimentación

Con base en los rendimientos obtenidos de INVIAS y los APU de cada alternativa, se realizó el cálculo de los tiempos de construcción y diagrama de Gantt usando el software Microsoft Project 2013. Lo anterior se realizó en el laboratorio de sistemas de la Universidad de Cartagena, exactamente en el Campus Piedra Bolívar.

4.6 EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN

Con base en parámetros económicos, constructivos y mecánicos se compararon cada una de las alternativas de cimentación, indicando en cuál de estos tienen ventajas y desventajas las alternativas evaluadas.

4.6.1 Comparación entre los resultados obtenidos de las diferentes alternativas de cimentación

Se elaboró un cuadro comparativo donde se contrastan los aspectos económicos, constructivos y mecánicos de las alternativas de cimentación, con base en los resultados obtenidos del diseño estructural, cálculo de asentamientos, presupuesto y programación de obra.

4.6.2 Comparación de los resultados obtenidos de las diferentes alternativas de cimentación con otras investigaciones

Se realizó un contraste entre los resultados obtenidos en este estudio con otras investigaciones realizadas, más que todo resaltando el aspecto económico y constructivo de las soluciones de cimentación analizadas.



5. RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

La información recolectada describe los requisitos mínimos para el dimensionamiento y refuerzo de las losas de cimentación y pilotes de acuerdo con la NSR-10. Específicamente las secciones revisadas están contenidas en el capítulo C.15 (Titulo C, NSR-10), donde se indican la recomendaciones a tener en cuenta en el diseño de losas de cimentación (sección C.15.10), diseño de pilotes (sección C.15.11) y diseño de vigas para el caso de la losa aligerada (Capitulo C-9 hasta C-12). Además se resaltan las recomendaciones para estabilidad general de la cimentación contenidas en el capítulo H.4 (Titulo H, NSR-10), con énfasis en los estados límites de falla y servicio del suelo para las losas de cimentación apoyadas sobre el terreno (sección H.4.2) y sobre pilotes (sección H.4.4). Finalmente para el cálculo y control de asentamientos se siguieron las indicaciones descritas en la sección H.4.8 y H.4.9, donde se identifican los diferentes tipos de asentamientos además de los valores admisibles totales y diferenciales. En la Tabla 7 están relacionados los documentos revisados para la obtención de la información anteriormente descrita.

Tabla 7. Documentos tomados en cuenta en la revisión bibliográfica

Nombre	Autor	Año	Objetivo del Documento
Calculo de Estructuras de Cimentación. 3ra Edición.	Calavera J.	1991	Conceptos técnicos y teóricos de diseño de pilotes
Foundation Engineering Handbook	Fang Hsai Yang	1991	Estabilización de suelo con columnas de cemento
Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. 7ma Edición	Braja M. Das	2011	Conceptos técnicos y teóricos de diseño de losas de cimentación y pilotes



Manual de Técnicas de Mejora del Terreno	Bielza Feliu, Ana.	1999	Parámetros de resistencia de suelo estabilizado en columnas de cemento
Norma Sismo Resistente Colombiana 2010	Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica	2010-	Requisitos mínimos de dimensiones y refuerzas de losas de cimentación y pilotes
Practical Handbook of Grouting	Warner James	2004	Requisitos mínimos de cantidad de cemento para Jet Grouting
Principles and Practice of Ground Improvement	Han Jie	2015	Parámetros típicos para sistemas de estabilización de Jet Grouting

Fuente: Autor

5.2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO PARA LA MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA

El perfil estratigráfico identificado del análisis del estudio geotécnico suministrado por el Ingeniero Civil y MSc., Guilliam Barboza, se muestra en la Tabla 8, donde se describen las propiedades y características encontradas en cada estrato para los cuatro (4) sondeos realizados hasta una profundidad de 25 m. Posteriormente en la Tabla 9 se muestra el cálculo de la capacidad admisible de los pilotes de 0.6 m de diámetros, teniendo en cuenta las propiedades geotécnicas del suelo en toda la profundidad hasta el estrato donde se apoyan. Finalmente se indica en la Tabla 10 el asentamiento total calculado para los pilotes, teniendo en cuenta el asentamiento en la punta, por fricción y elástico del pilote.

Para la modelación de la rigidez del suelo en toda la profundidad y punta del pilote se calculó el módulo de reacción horizontal K_h y el módulo de reacción vertical K_v , presentados en la Tabla 11 y 12 respectivamente. Estos módulos corresponden a la simulación de la rigidez del suelo como resorte utilizados para el análisis de interacción suelo-estructura en los softwares de diseño estructural.



Tabla 8. Perfil estratigráfico típico del subsuelo del proyecto.

	<p>A partir de 2.5 hasta 13.0 metros de profundidad se tiene una Arena limo arcillosa de color gris oscura con humedad natural (Wn) entre 18 y 30 %. Además LL= 33, LP=22 y porcentaje que pasa por el tamiz No 200 entre 20 y 42 %. Su clasificación según el SUCS es SC, con ángulo de fricción (ϕ) = 24° y pesos unitarios iguales a 1.35 y 1.05 Ton/m³. El nivel freático se encuentra a 1.6 metros del nivel del terreno.</p>
	<p>Entre 13.0 y 19.0 metros de profundidad se tiene una Arcilla parda amarillenta con vetas grises y oxido, con humedad natural (Wn) entre 42 y 48 %. Además LL= 53, LP=24 y porcentaje que pasa por el tamiz No 200 entre 94 y 97 %. Su clasificación según el SUCS es CH, con cohesión no drenada de 2.20 Ton/m² y pesos unitarios iguales a 1.55 y 1.05 Ton/m³</p>
	<p>Finalmente entre 19.0 y 25.0 metros de profundidad se tiene una Arcilla limo arenosa parda clara con vetas grises, oxido y gravillas, con humedad natural (Wn) entre 37 y 42 %. Además LL= 38, LP=21 y porcentaje que pasa por el tamiz No 200 entre 76 y 85 %. Su clasificación según el SUCS es CL, con cohesión no drenada de 11.0 Ton/m² y pesos unitarios iguales a 2.11 y 1.53 Ton/m³</p>

Fuente: Autor



Tabla 9. Cálculo de la capacidad admisible de los pilotes de 0.6 metros de diámetro.

CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE DE LOS PILOTES, Q_{adm} (Ton)	
f'c del Concreto (PSI)	4000
Longitud (m)	23.5
Desplante (m)	1.5
PILOTES D = 0.6 m	
Carga por punta, Q_p (Ton)	
N	65.00
C (Ton/m ²)	28.60
Area	0.28
Q_p (Ton)	72.78
Carga por fricción, Q_s (Ton)	
L (m) estrato No.1	10.5
L'	9
ø	24
δ	15.60
K _o	0.59
Per	1.88
Peso esp. Efec. (Ton/m ³)	1.05
Q_{s1} (Ton)	18.44
L (m) estrato No.2	6.0
N ₂	5
C (Ton/m ²)	2.2
α ₁	1
Q_{s2} (Ton)	24.88
L (m) estrato No.3	6.0
N ₃	30
C (Ton/m ²)	13.2
α ₂	0.56
Q_{s3} (Ton)	83.60
Q_s (Ton)	126.92
Carga ultima, Q_{ult} (Ton)	
Q_{ult} (Ton)	199.70
F_s	2.3
Q_{adm} (Ton)	86

Fuente: Autor



Tabla 10. Calculo de los asentamientos totales para los pilotes de 0.6 metros de diámetro.

Asentamiento total, St (mm)	
D (m)	0.6
Qadm (Ton)	86.0
Qwp (Ton)	27.0
Qws (Ton)	59.0
Ep (Ton/m2)	2537761.5
ε	0.5
L (m)	23.5
Ap (m2)	0.3
S1 (m)	0.00185
S1 (mm)	1.85043
qwp (Ton/m2)	95.5
N (SPT)	56
Es (Ton/m2)	7392.0
μs	0.4
Iwp	0.85
S2 (m)	0.00553
S2 (mm)	5.53425
Iws	4.2
Per. (m)	1.9
N (SPT)	5
Es (Ton/m2)	660
S3 (m)	0.00426
S3 (mm)	4.26213
St (mm)	11.64681
St (pulg)	0.45854

Fuente: Autor



Tabla 11. Cálculo del módulo de reacción horizontal K_h , para los pilotes de 0.6 metros de diámetro.

MÓDULO DE REACCIÓN HORIZONTAL, K_h						
z (m)	N	N cor	Compresión Inconfinada (Ton/m²)	factor "f" (Ton/m³)	K_h (Ton/m³)(D= 0.6)	K (Ton/m) (D= 0.6)
2.5	2	1	0.88	47	195.83	58.75
3.5	2	1	0.88	47	274.17	164.50
4.5	2	1	0.88	47	352.50	211.50
5.5	2	1	0.88	47	430.83	258.50
6.5	2	1	0.88	47	509.17	305.50
7.5	2	1	0.88	47	587.50	352.50
8.5	2	1	0.88	47	665.83	399.50
9.5	2	1	0.88	47	744.17	446.50
10.5	2	1	0.88	47	822.50	493.50
11.5	2	1	0.88	47	900.83	540.50
12.5	3	2	1.76	49	1020.83	612.50
13.5	4	3	2.64	52	1170.00	702.00
14.5	5	3	2.64	60	1450.00	870.00
15.5	5	3	2.64	60	1550.00	930.00
16.5	5	3	2.64	60	1650.00	990.00
17.5	5	3	2.64	60	1750.00	1050.00
18.5	6	4	3.52	90	2775.00	1665.00
19.5	6	4	3.52	90	2925.00	1755.00
20.5	8	6	5.28	110	3758.33	2255.00
21.5	10	7	6.16	140	5016.67	3010.00
22.5	14	10	8.8	205	7687.50	4612.50
23.5	30	22	19.36	450	17625.00	10575.00
24.5	45	33	29.04	650	26541.67	15925.00
25	56	42	36.96	650	27083.33	8125.00

Fuente: Autor

Para $z = 2.5$ m, $N = 2$, $D = 0.6$ m. $N_{cor} = N * 0.75 = 1.5 \approx 1.0$. **Comp. inconf.** = $0.88 * N_{cor} = 0.88$ (Ton/m²). **Factor "f"** = 47 (Ton/m²) (Figura 16). **Kh** (Ecu. 34) = $f * z / D = 195.83$ (Ton/m³). **K** = $K_h * Area = 58.75$ (Ton/m). (Para el primer y último caso se toma la mitad del área proyectada). $Area = D * \Delta z$



Tabla 12. Cálculo del módulo de reacción vertical K_v , para los pilotes de 0.6 metros de diámetro.

MÓDULO DE REACCIÓN VERTICAL, K_v (Ton/m)				
Prof. (m)	2.5 - 13	13 - 19	19 - 25	Total
Qs (Ton)	18.44	24.88	83.60	
Qs adm (Ton)	8	10	36	54
Qp adm (Ton)				32
Qu adm (Ton)				86
%Qs	9%	12%	42%	
s total (m)				0.00980
Kv fricc. (Ton/m)	816.63	1020.79	3674.83	5512.24
Kv Punta (Ton/m)				3266.51

Fuente: Autor

$$K_v \text{ fricc.} = Q_s \text{ adm} / s \text{ total} = 5512.24 \text{ (Ton/m)}$$

$$K_v \text{ Punta.} = Q_p \text{ adm} / s \text{ total} = 3266.51 \text{ (Ton/m)}$$

5.3 RESULTADOS DE LA INTERACCION SUELO-CIMIENTO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS MODELOS COMPUTACIONALES

Construidos los modelos preliminares, se procedió a realizar el análisis estructural y modificaciones en las dimensiones, verificando que las presión sobre el suelo (ver Figuras 39, 40, 41 y 42) para cada una de las alternativas de cimentación y para cada combinación de servicio no fuera mayor a la admisible. Este procedimiento para las cimentaciones apoyadas sobre pilotes se ejecutó en el software ETABS mientras que para las losas apoyadas sobre el terreno se realizó en SAFE 2014. Realizadas las respectivas revisiones construyeron las Tablas 14, 15, 16 y 17, donde se muestra la información básica de los modelos finales para cada alternativa de cimentación.

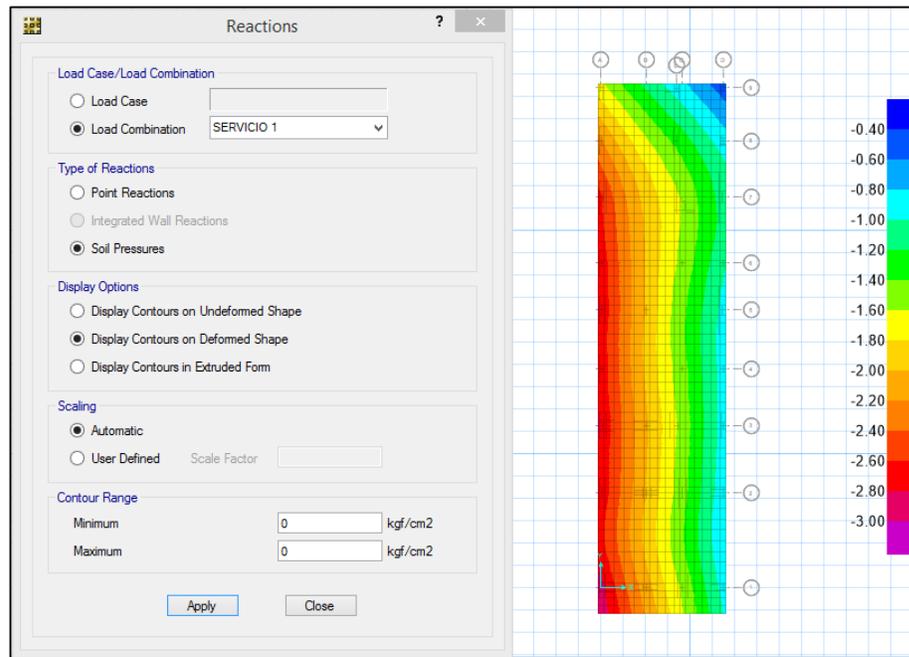


Figura 39. Verificación de presiones sobre el suelo causado por las combinaciones de servicio para la alternativa de Losa maciza sobre el terreno. Fuente: Autor

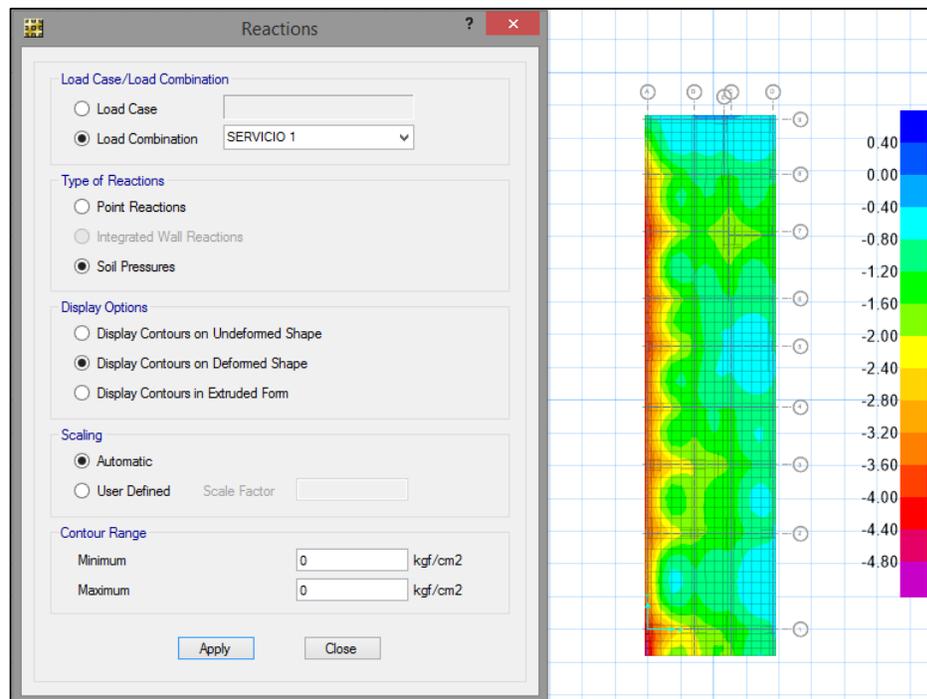


Figura 40. Verificación de presiones sobre el suelo causado por las combinaciones de servicio para la alternativa de Losa aligerada sobre el terreno. Fuente: Autor

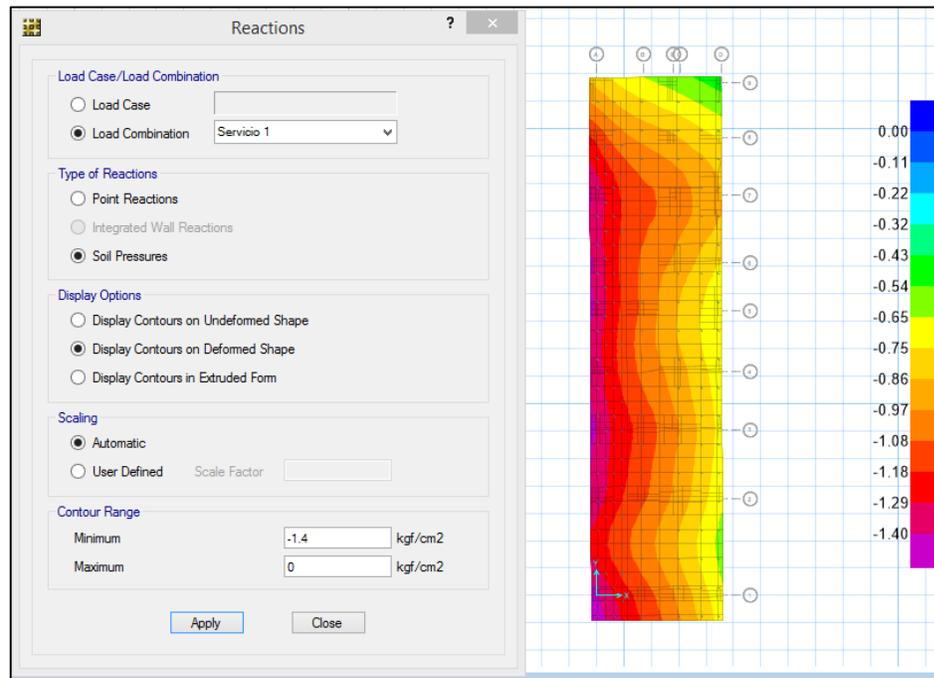


Figura 41. Verificación de presiones sobre el suelo causado por las combinaciones de servicio para la alternativa de Losa maciza sobre pilotes. Fuente: Autor

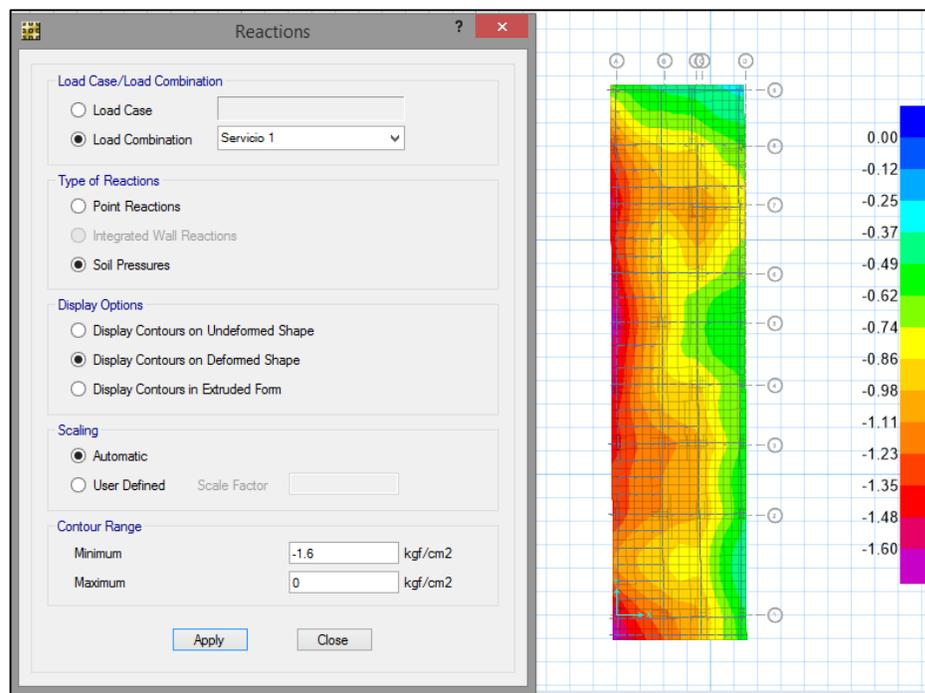


Figura 42. Verificación de presiones sobre el suelo causado por las combinaciones de servicio para la alternativa de Losa aligerada sobre pilotes. Fuente: Autor



En las Figuras 39 y 40 correspondientes a las presiones sobre el suelo de los modelos de losa maciza y aligerada sobre el terreno respectivamente, es posible apreciar que las cargas de la superestructura superan la carga admisible ($q_{adm} = 0.65 \text{ kg/cm}^2$) del estrato compuesto por Arena limo arcillosa donde se desplantan las cimentaciones superficiales. De acuerdo con lo anterior se realizó el cálculo de las columnas de suelo-cemento para la estabilización de los estratos hasta una profundidad aproximada de 23.5 m desde el nivel del terreno y los resultados obtenidos son mostrados en la Tabla 13.

Tabla 13. Calculo de la capacidad de carga del suelo estabilizado con columnas de suelo cemento (Jet Grouting).

Datos del Jet Grouting			
Densidad aparente del suelo-cemento (sat)	γ_{s-c}	2.25	Ton/m ³
Resistencia a compresión simple	q_u	4	MPa
Cohesión	C	13.33	Ton/m ²
Cohesión del "suelo equivalente"	C_e	2.62	Ton/m ²
Ángulo de rozamiento interno	ϕ_c	35	°
Resistencia a la tracción	R_t	8.889	Ton/m ²
Configuración del Jet Grouting			
Tipo de Jet Grouting	1		
Cemento por volumen de columna	av	260	kg/m ³
Geometría del Jet Grouting Zona #1			
Profundidad desde el nivel de la cimentación	z	22	m
Diametro de columna suelo-cemento	ϕ_j	0.6	m
Sección de columna	S_c	0.28	m ²
Espaciado de columnas de centro a centro	S	1.2	m
Numero de columnas	N_o	244	
Cantidad de columnas	L	5368	m
% de área mejorada		20%	
Cemento por longitud de columna	al	73.51	kg/m

*Se asumió $\gamma_{s-c} = 2.25$ (Al no poder realizar estudios de campo en el suelo estabilizado). q_u es obtenido de la Tabla 5. $C = (q_u/30) \cdot 100 = 13.33 \text{ Ton/m}^2$ (Japan Jet Grouting Association). $C_e = C \cdot S_c / (S^2) = 2.62 \text{ Ton/m}^2$. $R_t = 2 \cdot C / 3 = 8.889 \text{ (Ton/m}^2)$. Velez et al. (2012).



Capacidad de carga del suelo Zona #1			
Capacidad neta (Meyerhof, 1963)	q neta	114.19	Ton/m ²
Capacidad admisible	q adm	40	Ton/m ²
Capacidad neta por bloque de pilotes	Q neta	39085	Ton
Capacidad admisible por bloque de pilotes	Q adm	15634	Ton
Capacidad admisible por bloque de pilotes	qp adm	45	Ton/m ²
Capacidad admisible del suelo Zona #1	q adm	40	Ton/m ²
Geometria del Jet Grouting Zona #2			
Profundidad desde el nivel de la cimentación	z	17.5	m
Diametro de columna suelo-cemento	øj	0.6	m
Seccion de columna	Sc	0.28	m ²
Espaciado de columnas de centro a centro	S	2	m
Numero de columnas	No	63	
Cantidad de columnas	L	1102.5	m
% de área mejorada		7%	
Cemento por longitud de columna	al	20.79	kg/m
Capacidad de carga del suelo Zona #2			
Capacidad neta (Meyerhof, 1963)	q neta	75.52	Ton/m ²
Capacidad admisible	q adm	25	Ton/m ²
Capacidad neta por bloque de pilotes	Q neta	15015	Ton
Capacidad admisible por bloque de pilotes	Q adm	6006	Ton
Capacidad admisible por bloque de pilotes	qp adm	25	Ton/m ²
Capacidad admisible del suelo Zona #2	q adm	25	Ton/m ²

Fuente: Autor

Cabe anotar que la capacidad admisible del suelo estabilizado se escogió a partir del menor valor obtenido entre la ecuación general de la capacidad de carga de Meyerhof (1963) y la capacidad de carga por bloque de pilotes. Además se estabilizó el suelo para obtener una capacidad admisible para las dos zonas en las que se dividió el terreno debido a la configuración en altura del edificio del proyecto.



La Figura 43 representa la configuración en planta de las columnas de cemento de 0.6 m de diámetro distribuidas en el terreno para cimentar la losa maciza y aligerada sobre el suelo estabilizado.

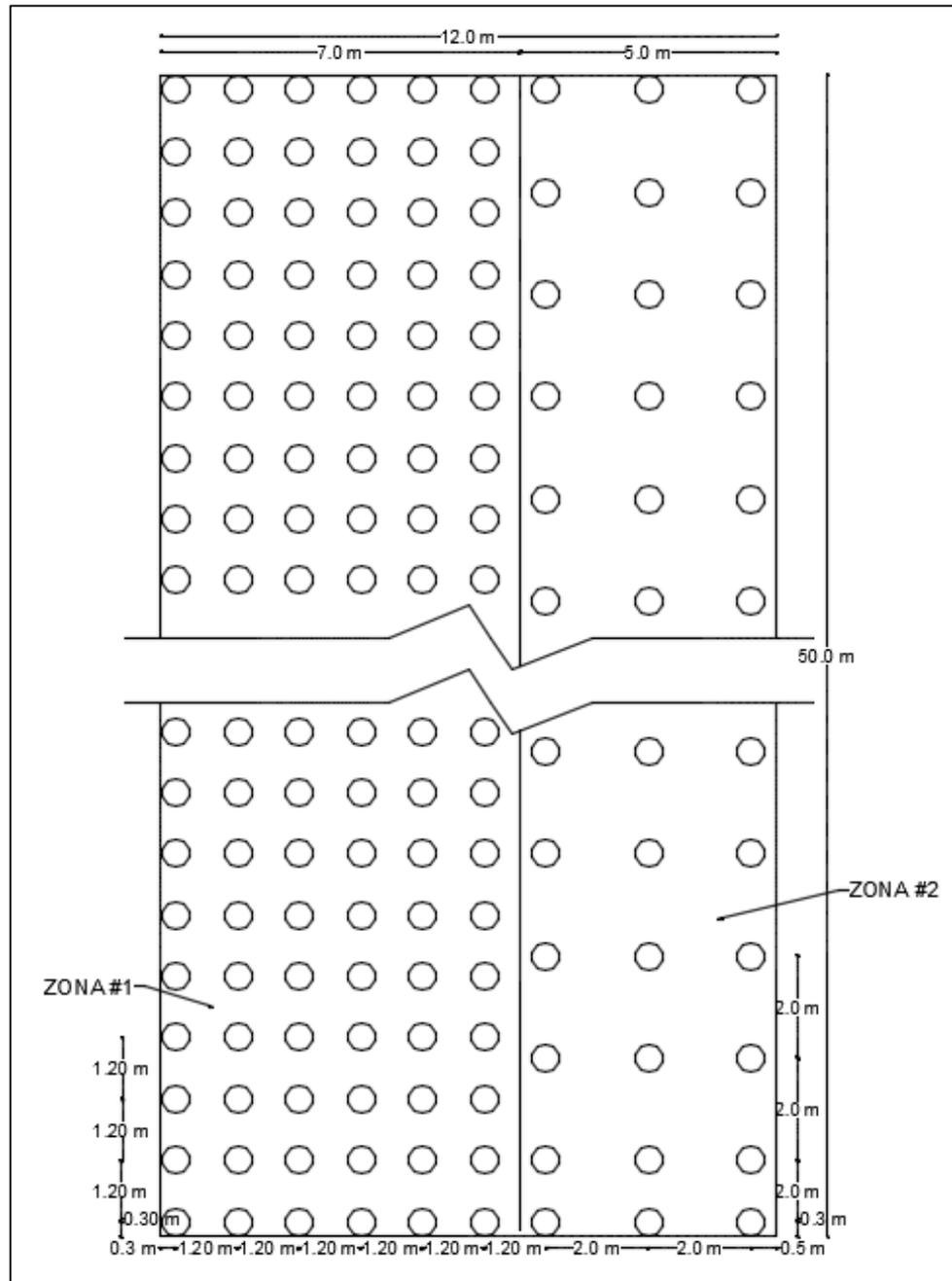
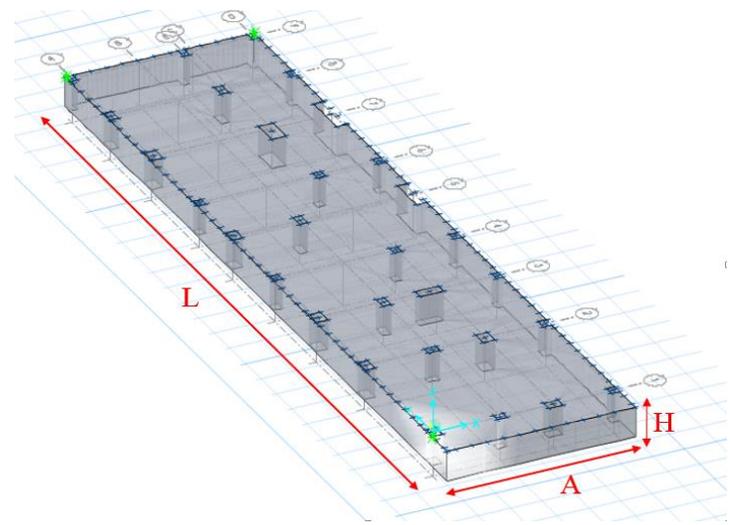


Figura 43. Planta de columnas de cemento por zonas. Fuente: Autor



Tabla 14. Información del modelo final de la losa maciza apoyada sobre el terreno.

LOSA MACIZA APOYADA SOBRE EL TERRENO		
		
Característica	Simbología/Unid	Valor
Ancho	A (m)	11.95
Largo	L (m)	49.20
Espesor	H (m)	2.00
Espesor neto	d (m)	1.93
Concreto	$f'c$ (PSI)	4000
Acero refuerzo	f_y (PSI)	60000
Modulod de reacción del suelo	K (Kg/cm3)	318.80
Desplante	Df (m)	1.50

Fuente: Autor



Tabla 15. Información del modelo final de la losa aligerada apoyada sobre el terreno.

LOSA ALIGERADA APOYADA SOBRE EL TERRENO		
Característica	Simbología/Unid	Valor
Ancho	A (m)	11.85
Largo	L (m)	49.20
Altura de Vigas	H (m)	1.40
Espesor neto	d (m)	1.33
Ancho de Vigas	-	Variable
Espesor de losa inferior	e (m)	0.25
Espesor de losa superior	es (m)	0.15
Concreto	f'c (PSI)	4000
Acero refuerzo	fy (PSI)	60000
Modulo de reacción del suelo	K (Kg/cm3)	318.80
Desplante	Df (m)	1.4

Fuente: Autor



Tabla 16. Información del modelo final de la losa maciza apoyada sobre pilotes.

LOSA MACIZA APOYADA SOBRE PILOTES		
Característica	Simbología/Unid	Valor
Ancho	A (m)	11.95
Largo	L (m)	49.40
Espesor	H (m)	1.85
Espesor neto	d (m)	1.78
Concreto	f'c (PSI)	4000
Acero refuerzo	fy (PSI)	60000
Carga admisible suelo bajo losa	q adm (kg/cm ²)	0.65
No de pilotes	Unid	149
Diametro de pilotes	D (m)	0.6
Desplante	Df (m)	1.5

Fuente: Autor



Tabla 17. Información del modelo final de la losa aligerada apoyada sobre pilotes.

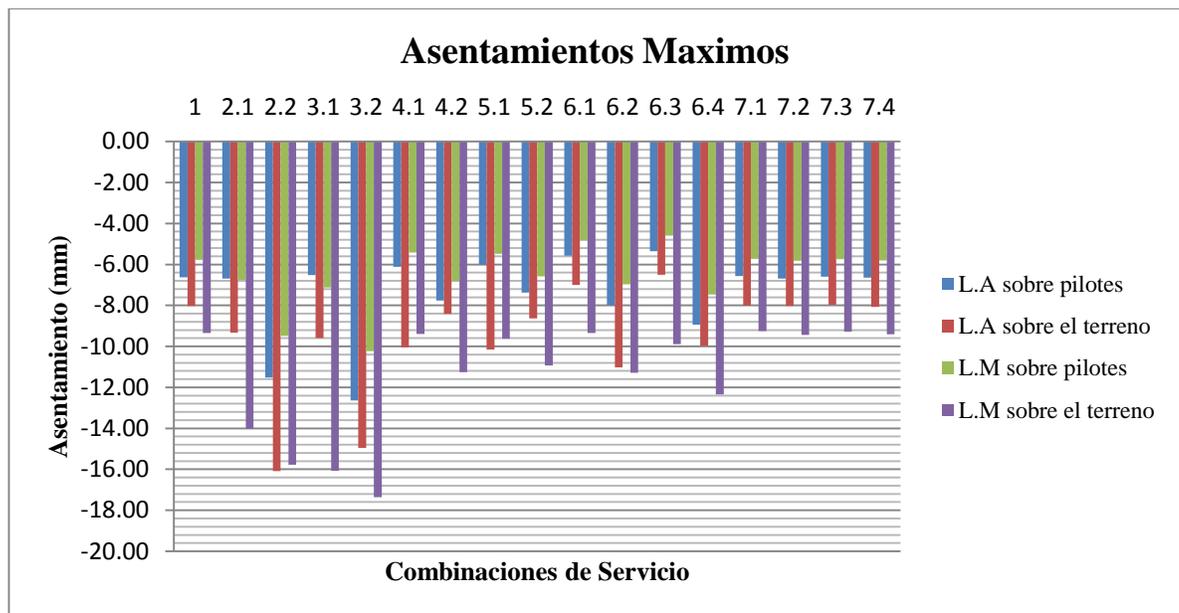
LOSA ALIGERADA APOYADA SOBRE PILOTES		
Característica	Simbología/Unid	Valor
Ancho	A (m)	11.85
Largo	L (m)	49.40
Altura de Vigas	H (m)	1.80
Espesor neto	d (m)	1.73
Ancho de Vigas	-	Variable
Espesor de losa inferior	e (m)	0.40
Espesor de losa superior	es (m)	0.15
Concreto	$f'c$ (PSI)	4000
Acero refuerzo	f_y (PSI)	60000
Carga admisible suelo bajo losa	q adm (kg/cm ²)	0.65
No de pilotes	Unid	146
Diametro de pilotes	D (m)	0.6
Desplante	Df (m)	1.5

Fuente: Autor



5.4 RESULTADOS DEL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS TOTALES Y DIFERENCIALES PARA CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN

Finalizado el diseño de los modelos estructurales, se calcularon los asentamientos totales y diferenciales para cada modelo teniendo en cuenta las combinaciones de servicio establecidas por la NSR-10. Lo anterior se presenta a continuación en las Gráficas 2, 3 y 4.

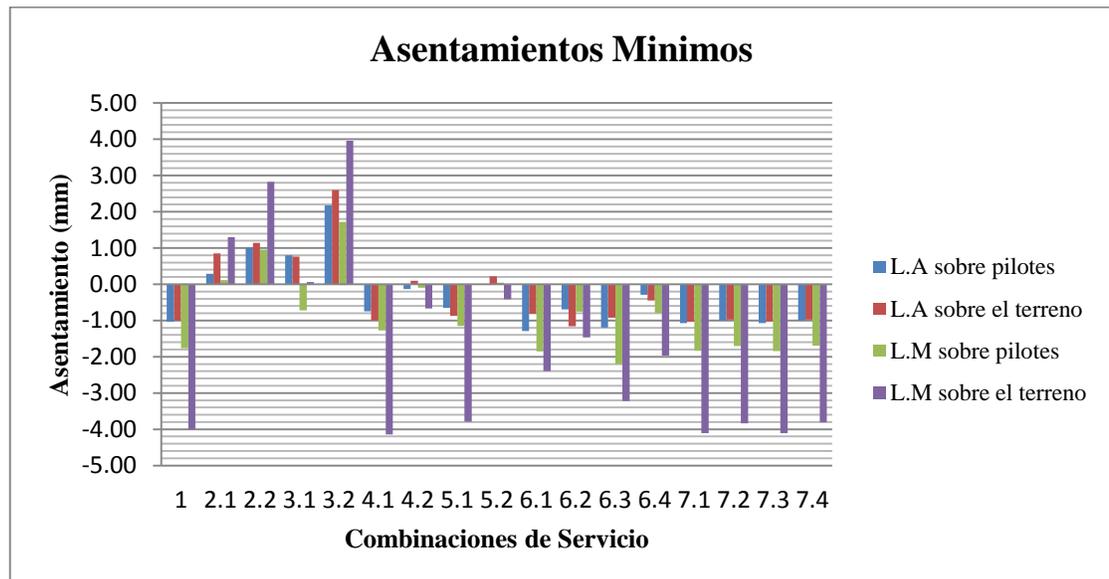


Gráfica 2. Asentamientos máximos totales para cada una de las alternativas de cimentación obtenidos del software SAFE 2014. Fuente: Autor

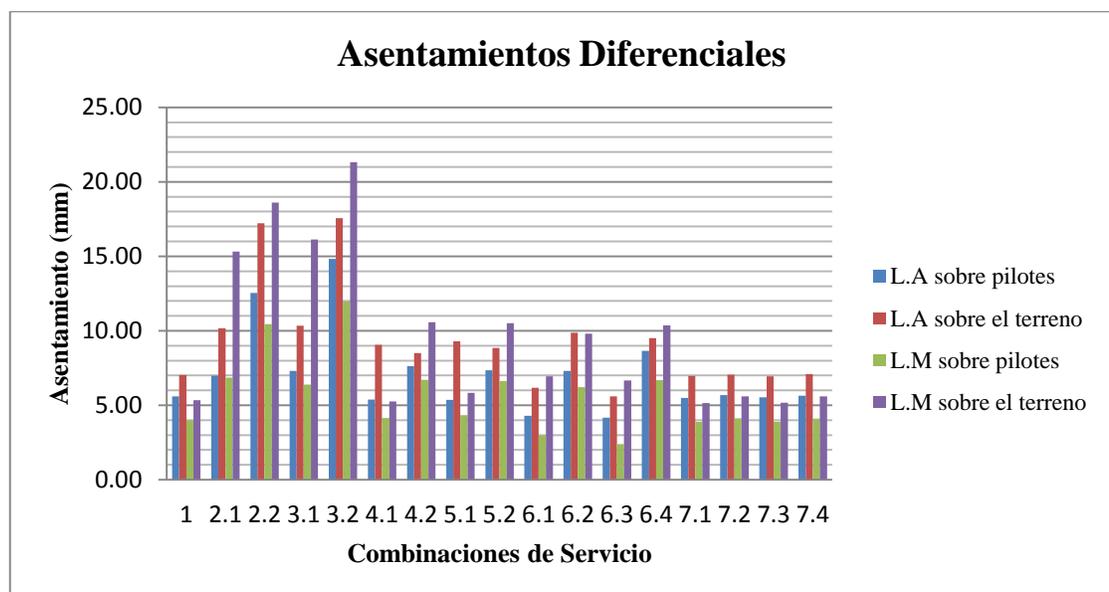
Se observó que los valores más altos de asentamientos se presentaron en las combinaciones 2.2 y 3.2, correspondientes a la participación de cargas gravitacionales y sísmicas en la dirección X (Lado más corto en planta de la edificación del proyecto), los cuales no superan el valor admisible de una pulgada (2.54 cm) y por lo tanto no representa ningún riesgo para los elementos estructurales y no estructurales susceptibles a daños. Por otro lado los asentamientos diferenciales más elevados se presentaron para las combinaciones 2.2 y 3.2, no superando para nuestro caso el valor admisible de 4 cm obtenido de la expresión (c) de la Tabla H.4.9-1 (NSR-10), por lo cual cumple con los requisitos máximos para



establecidos por el código de construcción sismorresistente. Por último se resalta el volcamiento que ocurre en las combinaciones de servicio 2.1, 2.2 y 3.2, las cuales son apreciables en la Gráfica 2.



Gráfica 3. Asentamientos mínimos totales para cada una de las alternativas de cimentación obtenidos del software SAFE 2014. Fuente: Autor



Gráfica 4. Asentamientos diferenciales para cada una de las alternativas de cimentación. Fuente: Autor.



Los asentamientos arrojados por el software SAFE 2014 responden a la modelación de la rigidez del suelo de apoyo como resorte, es decir a la interacción suelo-estructura, que obedece al comportamiento de la cimentación en conjunto con el suelo sobre el cual se apoya, obteniendo de esta forma un comportamiento aproximado a la realidad.

5.5 PRESUPUESTO Y PROGRAMACIÓN DE OBRA DE LAS ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN

5.5.1 Planos estructurales de las alternativas de cimentación

Los planos estructurales construidos para cada una de las alternativas planteadas, fueron realizados con base en los requisitos mínimos para colocación del refuerzo en elementos de cimentación. Estos son mostrados en los Anexos del presente documento.

5.5.2 Cálculo de cantidades de obras y Análisis de Precios Unitarios (APU)

A partir de los planos estructurales se calcularon las cantidades de obras necesarias para la elaboración del presupuesto y cronograma de construcción. Las tablas 18, 19, 20 y 21 muestran el resumen del cálculo realizado para cada alternativa.

Tabla 18. Resumen de cantidades de obra de la losa aligerada sobre el terreno.

RESUMEN LOSA ALIGERADA SOBRE EL TERRENO	
Área losa (m ²)	586
Excavación de desplante(m ³)	820
Excavación solado e= 0.1 (m ³)	59
Excavación para remplazo de material (m ³)	118
Excavación total (m ³)	996
Relleno material seleccionado e = 0.2 (m ³)	150
Acero longitudinal (incluye piel) 6000 PSI (Kg)	12054
Acero estribos 60000 PSI (Kg)	2324
Acero losas 60000 PSI (Kg)	29831
Total Acero de refuerzo 60000 PSI (Kg)	44209
Concreto 2000 PSI solado e=0.1 (m ³)	59
Concreto vigas 4000 PSI (m ³)	219
Concreto Losas 4000 PSI (m ³)	234
Total Concreto 4000 PSI (m ³)	454
Total casetones de Icopor (m ³)	585

Fuente: Autor



Tabla 19. Resumen de las cantidades de obra de la losa aligerada sobre pilotes.

RESUMEN LOSA ALIGERADA SOBRE PILOTES	
Área losa (m ²)	586
Excavación de desplante (m ³)	878
Excavación plantilla para pilotes (m ³)	88
Excavación solado e = 0.1 (m ³)	59
Excavación para remplazo de material (m ³)	118
Excavación Total (m ³)	1142
Numero de Pilotes D=0.6	146
Longitud Pilotes D= 0.6 (m)	23,5
Total de Pilotes D= 0.6 (m)	3431
Relleno material seleccionado e = 0.2 (m ³)	150
Acero Longitudinal 60000 PSI (Incluye piel) (Kg)	22903
Acero estribos 60000 PSI (Kg)	4008
Acero Pilotes 60000 PSI D= 0.6 (Kg)	33122
Acero losas 60000 PSI (Kg)	29831
Total Acero de refuerzo 60000 PSI (Kg)	89865
Concreto 4000 PSI Vigas (m ³)	454
Concreto 4000 PSI Pilotes D= 0.6 (m ³)	970
Concreto 4000 PSI Losas (m ³)	410
Total Concreto Losa (Sin pilotes) 4000 PSI (m ³)	864
Concreto 2000 PSI Solado e=0.1 (m ³)	59
Total casetones de Icopor (m ³)	278

Fuente: Autor

Tabla 20. Resumen de cantidades de obra de la losa maciza sobre el terreno.

RESUMEN LOSA MACIZA SOBRE EL TERRENO	
Área losa (m ²)	590
Excavación de desplante(m ³)	885
Excavación solado e= 0.1 (m ³)	59
Excavación para remplazo de material (m ³)	118
Excavación total (m ³)	1063
Relleno material seleccionado e = 0.2 (m ³)	150
Concreto 2000 PSI Solado e = 0.1 (m ³)	59
Concreto Losa 4000 PSI (m ³)	885
Acero Longitudinal 6000 PSI (Kg)	28762
Acero Transversal 6000 PSI (Kg)	30871
Total Acero de refuerzo 6000 PSI (Kg)	59633

Fuente: Autor



Tabla 21. Resumen de cantidades de obra de la losa maciza sobre pilotes.

RESUMEN LOSA MACIZA SOBRE PILOTES	
Área losa (m ²)	590
Plantilla para pilotes (m)	0,15
Excavación de desplante(m ³)	885
Excavación plantilla para pilotes e=0.15 (m ³)	89
Excavación solado e= 0.1 (m ³)	59
Excavación para remplazo de material (m ³)	118
Total excavación (m ³)	1151
Relleno material seleccionado e = 0.2 (m ³)	150
Numero de Pilotes D= 0.6	149
Longitud Pilotes (m)	23,5
Total de Pilotes D= 0.6 (m)	3502
Concreto Pilotes 4000 PSI (m ³)	991
Concreto Total Losa 4000 PSI (m ³)	1181
Concreto 2000 PSI solado e= 0.1 (m ³)	59
Acero Longitudinal 60000 PSI (Kg)	28762
Acero Transversal 60000 PSI (Kg)	33254
Acero pilotes 60000 PSI (Kg)	31989
Total Acero de refuerzo 60000 PSI (Kg)	94004

Fuente: Autor

Al revisar las tablas anteriores, comparando las cantidades de concreto y acero entre las losas macizas y aligeradas, se observó que las cuantías de acero por unidad de área de 101.07 kg/m² para la losa maciza sobre el terreno y 105.17 kg/m² para la losa maciza sobre pilotes son mayores en comparación con su alternativa homologa aligerada (74.93 kg/m² para la losa aligerada sobre el terreno y 96.17 kg/m² para la losa aligerada sobre pilotes). Lo anterior se justifica debido a la cantidad de acero por retracción y temperatura del concreto (NSR-10, Sec. C.7.12.2.1), que demandan las alternativas de cimentación macizas sobre el terreno y sobre pilotes, además de cumplir con los requisitos de resistencia por flexión.



Las Tablas 22, 23, 24 y 25, muestran el presupuesto resumido para cada alternativa de cimentación, teniendo en cuenta los precios unitarios para el departamento de Bolívar que se encontraron en la base de datos de INVIAS y las cantidades de obra calculadas a partir de los planos estructurales. Se aprecia en cada presupuesto el costo total para la construcción de la cimentación y además se incluye el capítulo de preliminares necesario para acondicionar la zona de trabajo. Contrastando alternativas superficiales y apoyadas sobre pilotes, se destaca la Losa Aligerada apoyada sobre pilotes como la alternativa de menor costo entre todos los casos presupuestados. Por otro lado la Losa Maciza sobre el terreno presenta el mayor costo con aproximadamente 3,352 millones de pesos Colombianos (COP). Por último, el ahorro de la Losa Aligerada sobre pilotes con respecto a la Losa Maciza sobre el terreno es de aproximadamente 20%.

Tabla 22. Presupuesto Losa Aligerada sobre el terreno.

PRESUPUESTO LOSA ALIGERADA SOBRE EL TERRENO						
Item/cap	Descripción	Unid	Cant	Precio Unitario	Valor Parcial	Valor Capitulo
Cap.01	Preliminares					\$ 13,738,746.00
Item 1.1	Localización y Replanteo	m2	586	\$ 1,827.00	\$ 1,070,622.00	
Item 1.2	Excavación mecánica y retiro de material	m3	996	\$ 12,719.00	\$ 12,668,124.00	
Cap.02	Cimentación					\$ 2,429,898,147.00
Item 2.1	Columnas Jet Grouting	m	6471	\$ 300,000.00	\$ 1,941,300,000.00	
Item 2.2	Relleno compactado con material seleccionado. e= 0,2 m	m3	150	\$ 36,102.00	\$ 5,415,300.00	
Item 2.3	Solado e= 0.10 m	m3	59	\$ 299,122.00	\$ 17,648,198.00	
Item 2.4	Acero de refuerzo losa 60000 PSI	Kg	44209	\$ 4,093.00	\$ 180,947,437.00	
Item 2.5	Aligerante	m3	585	\$ 99,000.00	\$ 57,915,000.00	
Item 2.6	Concreto losa aligerada 4000 PSI	m3	454	\$ 499,278.00	\$ 226,672,212.00	
Total Costos Directos						\$ 2,443,636,893.00
Administración de obra		15%				\$ 366,545,533.95
Imprevistos		5%				\$ 122,181,844.65
Honorarios		5%				\$ 122,181,844.65
IVA sobre utilidad		16%				\$ 19,549,095.14
Costo Total						\$ 3,074,095,211.39

Fuente: Autor



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



Tabla 23. Presupuesto Losa Aligerada sobre pilotes.

PRESUPUESTO LOSA ALIGERADA SOBRE PILOTES						
Item/Cap	Descripción	Unid	Cant	Precio Unitario	Valor Parcial	Valor Capitulo
Cap.01	Preliminares					\$ 12,237,904.00
Item 1.1	Localización y Replanteo	m2	586	\$ 1,827.00	\$ 1,070,622.00	
Item 1.2	Excavación mecánica y retiro de material	m3	878	\$ 12,719.00	\$ 11,167,282.00	
Cap.02	Cimentación					\$ 2,203,148,618.00
Item 2.1	Concreto 4000 PSI Pilotes (Sin incluir Acero de refuerzo) vaciado in situ	m	3431	\$ 392,685.00	\$ 1,347,302,235.00	
Item 2.2	Excavación manual y descabezado de pilotes	m3	264	\$ 22,982.00	\$ 6,067,248.00	
Item 2.3	Relleno compactado con material seleccionado e=0,2	m3	150	\$ 36,102.00	\$ 5,415,300.00	
Item 2.4	Solado e= 0.10 m	m3	59	\$ 299,122.00	\$ 17,648,198.00	
Item 2.5	Total Acero de refuerzo 60000 PSI	Kg	89865	\$ 4,093.00	\$ 367,817,445.00	
Item 2.6	Aligerante	m3	278	\$ 99,000.00	\$ 27,522,000.00	
Item 2.7	Concreto losa aligerada	m3	864	\$ 499,278.00	\$ 431,376,192.00	
Total Costos Directos						\$ 2,215,386,522.00
Administración de obra		15%				\$ 332,307,978.30
Imprevistos		5%				\$ 110,769,326.10
Honorarios		5%				\$ 110,769,326.10
IVA sobre utilidad		16%				\$ 17,723,092.18
Costo Total						\$ 2,786,956,244.68

Fuente: Autor



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



Tabla 24. Presupuesto Losa Maciza sobre el terreno.

PRESUPUESTO LOSA MACIZA SOBRE EL TERRENO						
Item/Cap	Descripción	Unid	Cant	Precio Unitario	Valor Parcial	Valor Capítulo
Cap. 01	Preliminares					\$ 14,610,946.00
Item 1.1	Localización y Replanteo	m2	590	\$ 1,827.00	\$ 1,077,930.00	
Item 1.2	Excavación mecánica y retiro de material	m3	1064	\$ 12,719.00	\$ 13,533,016.00	
Cap. 02	Cimentación					\$ 2,650,302,397.00
Item 2.1	Columnas Jet Grouting	m	6471	\$ 300,000.00	\$ 1,941,300,000.00	
Item 2.2	Relleno compactado con material seleccionado e=0.2	m3	150	\$ 36,102.00	\$ 5,415,300.00	
Item 2.3	Solado e=0.10	m3	59	\$ 299,122.00	\$ 17,648,198.00	
Item 2.4	Acero de refuerzo Losa 60 000 PSI	Kg	59633	\$ 4,093.00	\$ 244,077,869.00	
Item 2.5	Concreto de Losa 4 000 PSI	m3	885	\$ 499,278.00	\$ 441,861,030.00	
Total Costos Directos						\$ 2,664,913,343.00
Administración de obra		15%				\$ 399,737,001.45
Imprevistos		5%				\$ 133,245,667.15
Honorarios		5%				\$ 133,245,667.15
IVA sobre Utilidad		16%				\$ 21,319,306.74
Costo Total						\$ 3,352,460,985.49

Fuente: Autor



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



Tabla 25. Presupuesto Losa Maciza sobre pilotes.

PRESUPUESTO LOSA MACIZA SOBRE PILOTES						
Item/Cap	Descripción	Unid	Cant	Precio Unitario	Valor Parcial	Valor Capítulo
Cap. 01 Preliminares						\$ 12,334,245.00
Item 1.1	Localización y Replanteo	m2	590	\$ 1,827.00	\$ 1,077,930.00	
Item 1.2	Excavación mecánica y retiro de material	m3	885	\$ 12,719.00	\$ 11,256,315.00	
Cap. 02 Cimentación						\$ 2,378,765,270.00
Item 2.1	Concreto 4000 PSI Pilotes (Sin incluir Acero de refuerzo) vaciado in situ D=0.6 m	m	3502	\$ 392,685.00	\$ 1,375,182,870.00	
Item 2.2	Excavación manual y descabezado de pilotes	m3	266	\$ 22,982.00	\$ 6,113,212.00	
Item 2.3	Relleno compactado con material seleccionado	m3	150	\$ 36,102.00	\$ 5,415,300.00	
Item 2.4	Solado e=0.10	m3	59	\$ 299,122.00	\$ 17,648,198.00	
Item 2.5	Acero Total de refuerzo 60 000 PSI	Kg	94004	\$ 4,093.00	\$ 384,758,372.00	
Item 2.6	Concreto Total de Losa 4 000 PSI	m3	1181	\$ 499,278.00	\$ 589,647,318.00	
Total Costos Directos						\$ 2,391,099,515.00
Administración de obra		15%				\$ 358,664,927.25
Imprevistos		5%				\$ 119,554,975.75
Honorarios		5%				\$ 119,554,975.75
IVA sobre Utilidad		16%				\$ 19,128,796.12
Costo Total						\$ 3,008,003,189.87

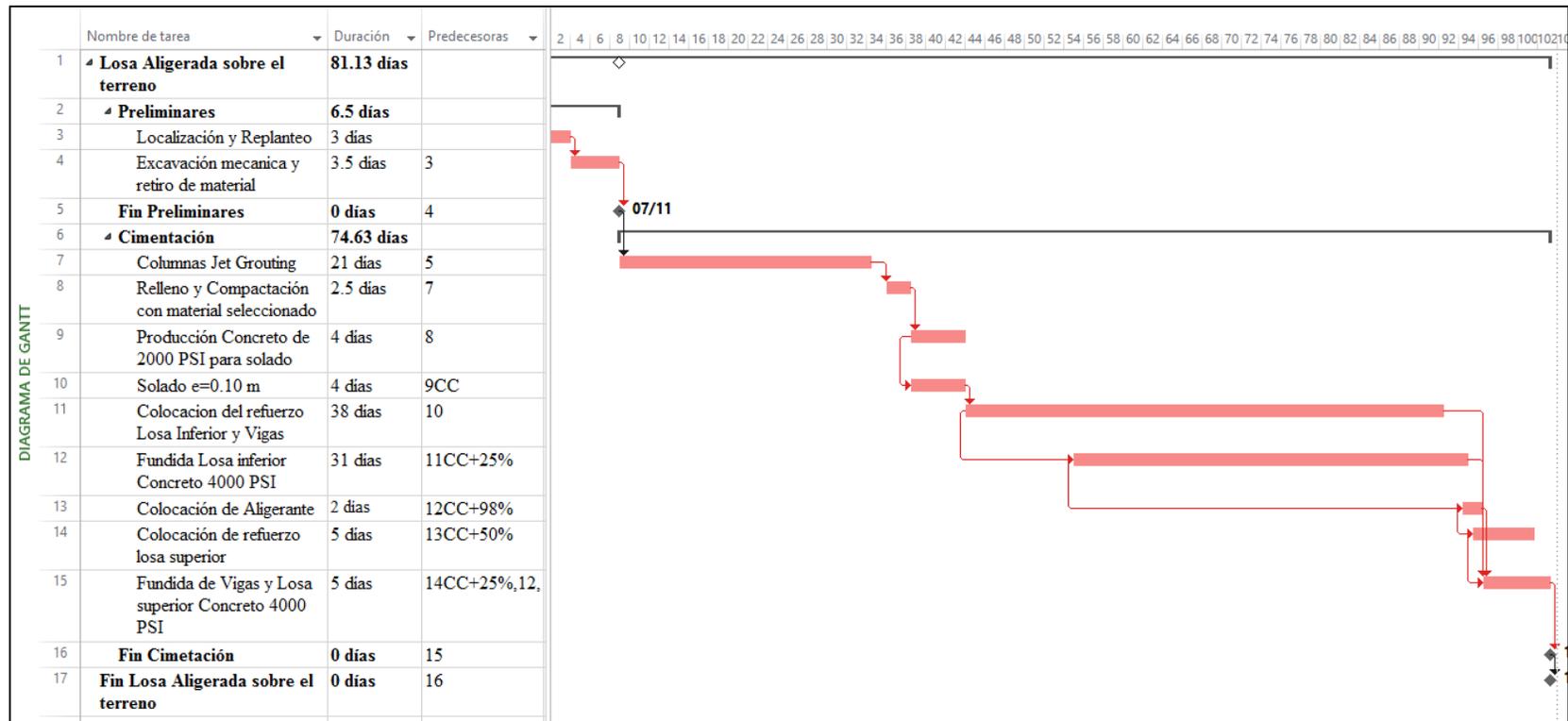
Fuente: Autor



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



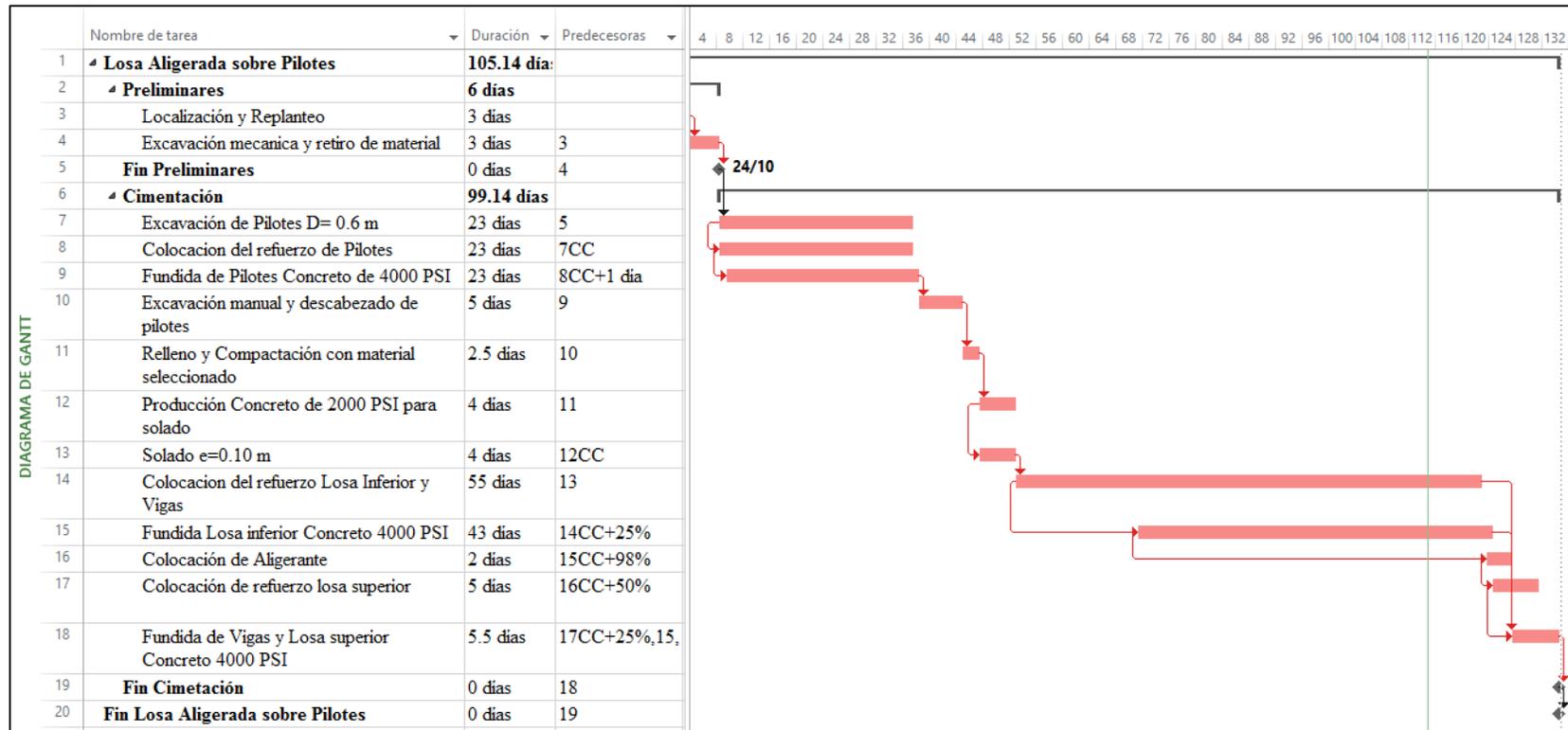
5.5.3 Programación de obra para cada una de las alternativas de cimentación



Gráfica 5. Cronograma de construcción de Losa Aligerada apoyada sobre el terreno. Fuente: Autor



“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



Gráfica 6. Cronograma de construcción de Losa Aligerada sobre pilotes. Fuente: Autor



El cronograma de construcción para cada alternativa elaborado en el software Microsoft Project 2013 se presenta en las Gráficas 5, 6, 7 y 8. En cada uno es posible apreciar la duración en días laborales de cada capítulo y en el diagrama de Gantt la duración en días calendario para una jornada laboral de 44 horas semanales. La ruta crítica para cada proyecto de cimentación se señala en color rojo. Ordenando los proyectos de cimentación de menor a mayor duración se tiene la Losa Maciza sobre el terreno en primer lugar, luego la Losa Aligerada sobre el terreno, Losa Maciza sobre pilotes y por último la Losa Aligerada sobre pilotes.

5.6 CUADRO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN

Finalmente se resumieron los resultados de cada uno de los modelos en la Tabla 26, destacando los aspectos más relevantes para cada parámetro de comparación. De esta manera se logró contrastar todas las alternativas de cimentación planteadas en este estudio y apreciar de mejor forma las ventajas y desventajas de cada una con respecto a las demás.

Tabla 26. Evaluación comparativa entre las alternativas de cimentación estudiadas.

Altern./ Parámetro	Losa Aligerada sobre terreno	Losa Maciza sobre terreno	Losa Aligerada sobre pilotes	Losa Maciza sobre pilotes
Tiempo de construcción (días)	El tiempo de construcción de esta alternativa es de 82 días.	El tiempo de construcción de esta alternativa es de 80 días. Es la alternativa de menor duración.	El tiempo de construcción de esta alternativa es de 106 días. Es la alternativa de mayor duración.	El tiempo de construcción de esta alternativa es de 89 días.
Asent. Max (mm)	El asentamiento máximo de la losa aligerada sobre el terreno corresponde al servicio 2.2 (Ver Tabla B.3) con un valor de -16,09.	El asentamiento máximo de la losa maciza sobre el terreno corresponde al servicio 3.2 (Ver Tabla B.3) con un valor de -17,36.	El asentamiento máximo de la losa aligerada sobre pilotes corresponde al servicio 3.2 (Ver Tabla B.3) con un valor de -12,65.	El asentamiento máximo de la losa maciza sobre pilotes corresponde al servicio 3.2 (Ver Tabla B.3) con un valor de -10,23.



“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



Asent. Min (mm)	El asentamiento mínimo de la losa aligerada sobre el terreno corresponde al servicio 3.2 al levantarse la losa con un valor de 2,60.	El asentamiento mínimo de la losa maciza sobre el terreno corresponde al servicio 3.2 al levantarse la losa con un valor de 3,96.	El asentamiento mínimo de la losa aligerada sobre pilotes corresponde al servicio 3.2 al levantarse la losa con un valor de 2,18.	El asentamiento mínimo de la losa maciza sobre pilotes corresponde al servicio 3.2 al levantarse la losa con un valor de 1,72.
Asent. Diferencial Max. (mm)	El asentamiento diferencial máximo de esta losa corresponde al servicio 3.2 con un valor de 17,56.	El asentamiento diferencial máximo de esta losa corresponde al servicio 3.2 con un valor de 21,32.	El asentamiento diferencial máximo de esta losa corresponde al servicio 3.2 con un valor de 14,83.	El asentamiento diferencial máximo de esta losa corresponde al servicio 3.2 con un valor de 11,96.
Costo Total (\$)	La construcción de esta alternativa tiene un costo total de \$ 3.074.095.212.	La construcción de esta alternativa tiene un costo total de \$ 3.352.460.985 siendo la alternativa más costosa.	La construcción de esta alternativa tiene un costo total de \$ 2.786.956.245 siendo la alternativa más económica.	La construcción de esta alternativa tiene un costo total de \$ 3.008.003.190.
Constructividad	Facilita la ubicación del refuerzo en la losa superior debido a la presencia de vigas con las cuales se puede realizar el amarre. Dificulta la fundida debido a que debe realizarse por etapas. Dificulta el vibrado del concreto. Por la estabilización con Jet Grouting es necesario mano de obra especializada.	Mayor dificultad en la ubicación de refuerzo superior en la losa por la altura en este caso. Facilita la fundida debido a que es un proceso monolítico. Facilita vibración del concreto. Por la estabilización con Jet Grouting es necesario mano de obra especializada.	Cuenta con la misma metodología constructiva de la losa aligerada sobre el terreno y además, debido a la presencia de pilotes hay que agregar el descabezado de estos. A su vez, dificulta el armado debido a la gran cantidad de nervios presentes y la limitación de los ejes de columna.	Menor dificultad de vaciado que la losa aligerada sobre pilotes pero entre más etapas tenga el vaciado más costosa se vuelve esta alternativa por cuida la retracción por fraguado.



Complejidad del diseño	El diseño se divide en tres partes que funcionan ligadas: vigas, losa superior e inferior, y se hace necesario reforzar y ajustar algunos espesores de las vigas a las presiones. Además, apoyar esta alternativa sobre el suelo estabilizado con columnas de cemento es poco común y se debe ser conservador debido al comportamiento de las columnas del suelo con la losa inferior.	Fácil diseño debido a que las fuerzas se distribuyen de mejor forma, y es más sencillo el análisis del espesor de la losa y la distribución del refuerzo en esta. No presenta la misma consideración respecto al Jet Grouting de la losa aligerada.	Presenta la misma concepción de diseño de la losa aligerada sobre el terreno, pero presenta mayor dificultad, debido a la presencia de pilotes, los cuales deben ajustarse a los ejes de columnas y en caso de que una sola línea de pilotes no sea suficiente, se deben modelar nervios para satisfacer las necesidades de carga del proyecto.	Cuenta con una complejidad similar a la losa maciza sobre el terreno, con la ventaja de poder realizar una distribución de pilotes en el diseño sin restricciones de geometría.
-------------------------------	--	---	---	---

Fuente: Autor

5.7 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON RESULTADOS DE ESTUDIOS ANTERIORES

En la implementación de Losas aligeradas apoyadas sobre el terreno para dos edificios en Caracas (Venezuela) realizado por Mazzeo, A. (2004), destaca que cuando las condiciones mecánicas del suelo permiten el uso de la losa aligerada apoyada sobre el terreno en lugar de grupos de pilotes de alta capacidad como alternativa de cimentación, ambas soluciones tendrán un costo igual, lo que no es aplicable para la presente investigación teniendo en cuenta que la capacidad portante del suelo sin estabilizar es deficiente y el costo total de la losa aligerada sobre el terreno está condicionado por la estabilización realizada. Sin embargo al comparar el costo total de la losa aligerada apoyada sobre el terreno con las soluciones que incluyen pilotes en el presente proyecto, esta supera en precio a ambas alternativas.



En el análisis de interacción suelo-estructura para un edificio de 12 pisos y sótano en la ciudad de Bogotá con un sistema de cimientos en placa-pilotes (Morreno, J., 2014), el autor coincide en que los asentamientos diferenciales obtenidos en la modelación por el método de Winkler como se realiza en la presente investigación se acercan mucho a la realidad, porque los parámetros con los que se modela la estructura (materiales, secciones de elementos, cargas y geometría de la edificación) y el suelo, como resorte, tienen una incertidumbre muy baja de ser modificados en su construcción por lo tanto los asentamientos diferenciales se hacen muy aproximados a una condición real.

En el estudio realizado por J.M. Dávila, con título “Análisis comparativo en losas de cimentación: losas aligeradas mediante bloques de EPS frente a losas macizas”, observamos que la alternativa propuesta de losa aligerada ofrece una reducción significativa de los asentamientos diferenciales de la cimentación, como ejemplo para una losa maciza de 8,10 m x 6,45 m, se obtuvo un asentamiento diferencial del 7% y para una aligerada de las mismas dimensiones se obtuvo un asentamiento diferencial del 2,8 %, a su vez ocurre una reducción de importancia en el volumen de hormigón y en la cantidad de acero requerida. Atendiendo a lo anterior, en el estudio realizado en el presente proyecto, se obtiene un comportamiento contrario para el servicio 1 (cargas gravitacionales), teniendo un aumento en los asentamientos diferenciales, de 57,2% (aprox. 5.35 mm) en el caso de la losa maciza sobre el terreno a 87,5% (aprox. 7.02 mm) que se presenta en la losa aligerada sobre el terreno; y lo mismo ocurre para las alternativas sobre pilotes, y puede ser debido a que la losa maciza tiene un número mayor de pilotes que la aligerada, causando que esta última se asiente en mayor magnitud. De igual forma es evidente que ocurre una reducción en los asentamientos máximos, en los volúmenes de concreto y en las cantidades de acero para las alternativas de losas aligeradas al ser comparadas con las losas macizas.



6 CONCLUSIONES

En el presente proyecto de investigación se llevó a cabo un análisis comparativo de las losas de cimentación macizas y aligeradas, tanto sobre el terreno como sobre pilotes, con el fin de conocer cuál era la alternativa más viable en el ámbito económico y constructivo, refiriéndonos principalmente con este último a tiempos de construcción. Para analizar el ámbito económico se calcularon cantidades de obra y con estas se hizo un presupuesto aproximado de cada alternativa, mientras que para el aspecto constructivo, se calculó la duración total de cada solución, estableciendo cual presenta mayor y menor duración. Cabe resaltar que para poder realizar una comparación general entre todas las alternativas, se hizo necesario emplear una estabilización completa del suelo en las alternativas sobre el terreno mediante Jet Grouting, y a pesar que se intervino el suelo hasta una profundidad aproximada de 22.0 m, esto generó costos que son comparables con las alternativas sobre pilotes, y por esta razón, se tuvieron en cuenta en el contraste realizado.

La modelación y el diseño estructural de las alternativas propuestas se pueden apreciar en los resultados del proyecto, la cual se realizó en los softwares o programas computacionales ETABS y SAFE, empleando la metodología de interacción sísmica Suelo-Estructura por el método de Winkler, y se cumplió con los requisitos establecidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), respetando las dimensiones geométricas mínimas de las alternativas de cimentación, configuración y cantidad de refuerzo mínimo, se aseguró la estabilidad local y general comprobando que las presiones de contacto en el suelo fueran menores a la admisibles y por último se verificó que los asentamientos diferenciales no representaran ningún peligro para los elementos no estructurales.

Los asentamientos que se presentaron son menores a una pulgada (2,54 cm), dándose el máximo asentamiento para la losa maciza sobre el terreno con un valor de 1,74 cm y el asentamiento mínimo se presentó en la misma losa al levantarse con un valor de 0,4 cm, evidenciando que no existe riesgo alguno sobre los elementos no estructurales de la



edificación, al emplear cualquiera de las anteriores alternativas. Observando los resultados de las alternativas de cimentación y atendiendo a la última afirmación, se recomienda el uso de la losa aligerada sobre el terreno debido a que ocurre una reducción de los asentamientos máximos a pesar del aumento en los asentamientos diferenciales (bajo cargas solamente gravitacionales) en comparación con la losa maciza sobre el terreno, reflejando una respuesta completamente diferente al estudio realizado por Davila, J. et al. (2015). Lo anterior aplica en la misma medida a las alternativas sobre pilotes, y el aumento en los asentamientos diferenciales se explica posiblemente porque la losa maciza tiene mayor número de pilotes que la losa aligerada, lo cual genera que los asentamientos en esta última fueran mayores.

Según la literatura estudiada la losa aligerada presenta muchas ventajas en comparación con la losa maciza, principalmente debido a que muchas veces esta alternativa es menos costosa. El factor más importante en la comparación económica es la cantidad de concreto que se ahorra en la losa aligerada así como lo asegura Dávila, J. et al. (2015), debido al gran costo de este material, por esta razón, en las construcciones siempre se busca reducir al máximo la proporción de este como también la cantidad de acero a utilizar. Otro aspecto importante con el fin de responder cuál de las alternativas es más viable es el tiempo de construcción, debido a que en muchas ocasiones los clientes establecen una fecha límite para culminar la obra. Durante el desarrollo del presente proyecto se buscó respuesta a estos aspectos para elegir con claridad la mejor solución.

De acuerdo a los resultados, para el caso de las alternativas sobre el terreno con suelo estabilizado con columnas de cemento, la más económica es la losa aligerada con un costo total de \$ 3.074.095.212 pesos colombianos (COP) generando un ahorro de aproximadamente 278 millones de pesos colombianos (9%) con respecto a la losa maciza, y en cuanto a tiempo de construcción la de menor duración es la maciza con 80 días, realizándose en 2 días menos (3%) que la losa aligerada, por lo cual es posible afirmar que la losa aligerada representa una mejor opción desde el punto de vista económico siendo 13% menos costosa, con tiempo de ejecución similar a la alternativa maciza y además



acompañada con la reducción de los asentamientos máximos. Por otro lado, al comparar las alternativas sobre pilotes se presenta una situación similar a la anterior, donde la alternativa más económica es la losa aligerada con un costo total de \$ 2.786.956.245 pesos colombianos generando un ahorro de aproximadamente 220 millones de pesos colombianos (7.4%) sobre la losa maciza, además la losa aligerada cuenta con una mayor duración en su construcción con 106 días, realizándose en 17 días (19%) más que la losa maciza, reafirmando nuevamente la alternativa de losa aligerada como mejor opción económica y con mayores tiempos de ejecución por sobre la losa maciza sin que los asentamientos diferenciales para el caso de este estudio no represente ningún riesgo.

A nivel general se puede concluir que la alternativa más económica es la losa aligerada sobre pilotes y la de menor tiempo de construcción es la losa maciza sobre el terreno. Inesperadamente, en el caso de las alternativas sobre el terreno la losa aligerada se ejecuta en tiempo similar a la losa maciza, esto debido a que la reducción en las cantidades de obra en la alternativa aligerada son tales que compensan los bajos rendimientos en su ejecución. Esto nos lleva a inferir que vale la pena fomentar el uso de las losas aligeradas en la construcción, ya que la reducción considerable de las cantidades de obra influye significativamente en el costo y tiempo de construcción. A partir de los resultados obtenidos, también es posible afirmar que la losa aligerada y maciza sobre pilotes se presentan como alternativas económicas cuando la capacidad portante de los estratos superiores del suelo son deficientes, mientras que para la misma condición desde el punto de vista de ejecución, incluir una intervención del suelo para cimentar superficialmente el edificio del proyecto es una solución interesante.

La importancia de este estudio radicó en establecer cuál de las diferentes alternativas es la más rentable, y se considera que es la alternativa aligerada sobre el terreno debido a que presenta el mejor equilibrio Costo-Tiempo de construcción. Por las razones expuestas anteriormente, nuestro estudio desde el enfoque académico sirve como soporte para enriquecer las fuentes bibliográficas de la Universidad de Cartagena, ofrecer conocimiento y a su vez servir como base en investigaciones siguientes.



7 LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

Durante la ejecución del proyecto de investigación se presentaron algunas limitantes en cuanto al diseño de los modelos computacionales de las alternativas de cimentación, el diseño para la intervención del suelo y elaboración de presupuestos. A continuación se realiza un resumen de estas con cada una de las medidas o estrategias planteadas.

- La información brindada por el estudio de suelo no presentó un ensayo de placa en el lote del proyecto, por lo que el módulo de reacción del suelo utilizado para el diseño de los modelos se calculó a partir de relaciones empíricas encontradas en la bibliografía del proyecto. Lo anterior conlleva a resultados con una incertidumbre considerable al no tener información de primera mano importante para el diseño.
- El Jet Grouting al ser un sistema de estabilización in situ, más que todo por las pruebas antes y luego de ser ejecutado, se planteó un diseño conceptual haciendo uso de datos meramente empíricos y revisando en la bibliografía datos usuales en aplicaciones de dicho sistema para tipos de suelo similares a los del proyecto.
- La bibliografía revisada para el proyecto tuvo la ausencia de aplicaciones o estudios previos a nivel nacional y local con respecto a las losas aligeradas de cimentación. Esto habla de lo poco común que es en país el uso y estudio de este tipo de cimentaciones. Por lo anterior solo se tuvo en cuenta para la ejecución de los diseños: las investigaciones internacionales, los estudios comparativos basados en diseños conceptuales y requisitos mínimos de la NSR-10.
- Los resultados obtenidos estuvieron limitados al diseño realizado usando los softwares ETABS y SAFE, teniendo en cuenta que la Universidad de Cartagena tiene licencia de solo estos y no cuenta con otros programas especializados en el diseño de cimentaciones con las características del proyecto y que presente una interfaz más familiarizada con los parámetros geotécnicos del suelo.
- A falta de la renovación de la licencia del software Construdata para obtener los precios y rendimientos en obra, se recurrió a las bases de datos de INVIAS



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



actualizadas al año 2016 para el departamento de Bolívar. Además por lo poco común que es la construcción de este tipo de cimentaciones algunos rendimientos estuvieron basados en elementos estructurales similares a los del proyecto.

Con base en los objetivos específicos del proyecto se plantean las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras.

- Recolectar toda la información primaria de la zona del proyecto incluyendo ensayos de placa necesarios para realizar un análisis más aproximado a la realidad.
- Contrastar resultados haciendo uso de al menos otro software de diseño estructural de igual característica o más especializado en el modelamiento de cimientos e interacción suelo-estructura.
- Realizar ensayos de campo donde se ejecuten estabilización con el sistema Jet Grouting para extraer correlaciones que mejoren la modelación con software y no se incurra en gastos por pruebas de campo antes de la ejecución en la zona de trabajo.
- Investigar con mayor profundidad la respuesta de la losa inferior de la alternativa aligerada cuando se apoya sobre el suelo estabilizado con columnas de cemento.



8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abedalkareem, M. (2008). *Modifications Of Conventional Rigid And Flexible Methods For Mat Foundation Design*. Gaza: Trabajo De Grado.
- Aguilar, H., & Aviles, J. (2003). *Influencia de pilotes de fricción en la interacción dinámica suelo- estructura*. Mexico D.F.
- Beltran, A. (2012). *Instituto Tecnológico De Tepic*. Recuperado El 2 De Mayo De 2016, De <https://icittepic.wikispaces.com/file/view/costos+y+presupuestos.pdf>
- Bielza F., A. (1999). *Manual de Tecnicas de Mejora del Terreno 1ra Edicion*. Editorial Entorno Grafico. 432 pag.
- Braja, D. (1999). *Principios de Ingenieria de Cimentaciones 4ta Edicion*. Sacramento: International Thomson Editores.
- Braja, D. (2011). *Principios de Ingenieria de Cimentaciones 7ma Edicion*. Sacramento: International Thomson Editores.
- Buchta, V., Janulikova, M., & Fojtik, R. (2015). *Experimental Tests Of Reinforced Concrete Foundation Slab*. Madeira: Procedia Engineering, Elsevier(114), 530-537, DOI:10.1016/J.PROENG.2015.08.102.
- Calavera, j. (1991). *Calculo de Estructuras de Cimentacion 3ra Edicion*. Madrid.
- Computers & Structures, i. (2016). *CSI Caribe*. Recuperado el 20 de 03 de 2016, de <http://csicaribe.com/software/safe/>
- Computers & Structures, i. (2016). *Csi Caribe*. Recuperado el 21 de 03 de 2016, de <https://www.csiamerica.com/products/etabs>
- Covo, A. I. (2003). *Introduccion a la Mecánica de Suelos*. Cartagena.



- Davila, J., Fortes, J., Crespo, I., & Rodriguez, C. (2015). *Analisis comparativo en losas de cimentacion: Losas aligeradas mediante bloques de eps frente a losas macizas*. Huelva: Informes de la Construcción, dialnet plus(67), 538, e080, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.157>.
- Duran, J. (2003). *Optimizacion de un sistema de cimentacion placa-pilotes en el deposito lacustre de Bogota*. Bogota.
- Han, J. (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement 1ra Edicion*. Editorial John Wiley & Sons, Inc. 403 pag.
- INVIAS APU Bolivar (2016). Disponible en la web: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/hechos-de-transparencia/analisis-de-precio-unitarios>. Fecha de Consulta: 14 de Octubre de 2016
- Imam, M. (2011). *Influence of Structural and Soil Parameters on Mat Deflection*. Bangladesh.
- Katzenbach, R., Bachmann, G., Boled-Ekasha, G., & Ramm, h. (2005). *Combined Pile Raft Foundations(cprf): An Appropriate Solution for The Foundations of High-Rise Buildings*. Darmstadt.
- Klemencic, R. (2012). Seismic Design of Reinforced Concrete Mat Foundations. *Nehrp*. 33
- Largo, C. (2014). *Balance de asentamientos diferenciales presentes en edificacion con cimentaciones sobre pilotes*. Cartagena de indias: Trabajo de grado, Universidad de Cartagena, Ing. Civil.
- Letsios, C., Lagaros, N., & Papadrakakis, M. (2014). *Optimum Design Methodologies for Pile Foundations in London*. London: Structural Engineering, Elsevier(2), 24-32. Doi:10.1016/j.csse.2014.08.001.
- Martinez, S. (2012). *Metodo de analisis simplificado para un nuevo tipo de cimentacion en suelos blandos*. Mexico d.f: Trabajo de grado.



- Mazzeo, A. A. (2004). *Mat Foundations for Seismic Resistant Buildings in Venezuela*. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Caracas.
- Moreno, J. (2014). *Sistema de cimentacion en placa-pilotes, analisis de interaccion suelo-estructura en edificio de 12 pisos*. Bogota: Trabajo de grado.
- Morrison, N. (1993). “*Interacción Suelo-Estructuras: Semi-espacio de Winkler*”. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona- España.
- Perea, Y. (2012). *Sistemas constructivos y estructurales aplicados al desarrollo habitacional*. Medellin: Trabajo de grado.
- Piñeiro, S. (1995). *Pert y Cpm: Programacion y Control de Proyectos*. Madrid : Servicio de Publicaciones ucm.
- Rodriguez, J. (2006). *Optimizacion de cimentaciones en suelos blandos de bogota*. Bogota.
- Saenz, A. (2009). *Procesos Constructivos*. Recuperado el 11 de Abril de 2016, de <https://procesosconstructivos.wordpress.com/>
- Tamia, S. (2003). *Sistema de fundación sobre micropilotes: Alternativas para edificaciones livianas*. Universidad de Piura, Departamento de Ingeniería Civil, Piura.
- Vasquez, I. (2010). *Diseño de estructuras de cimentacion de acuerdo a NSR-10*. Medellin.
- Vélez, H., Caro, P., Gómez, P. & Von Munthe, E. (2012). “*Tratamientos del terreno mediante la técnica de Jet-Grouting. Aspectos analíticos para casos de tapones de fondo*”. Pags 60-67. Recuperado el 28 de Septiembre de 2016, de <http://obrasurbanas.es/>.
- Venanzi, I., Salciarini, D., & Tamagnini, C. (2014). *The Effect of Soil-Foundation-Structure Interaction on The Wind-Induced Response of Tall Buildings*. Perugia: Engineering Structures, Elsevier(79), 117-130, doi:10.1016/j.engstruct.2014.08.002.
- Warner, J. (2004). *Practical Handbook of Grouting 1ra Edicion*. Editorial John Wiley & Sons, Inc. 637 pag.



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



ANEXOS



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



ANEXO A

Tabla A. 1. Resumen de perforaciones.

GUILLIAM BARBOZA MIRANDA Ing. Civil - Msc GEOTECNIA LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES REGISTRO DE PERFORACIONES																			
	Perforación N°	Muestra N°	Profundidad (m)		Wn (%)	Análisis de Consistencia			Pasa No. 4 (%)	Pasa No. 200 (%)	G _s	Módulo de Elasticidad (T/m ²)	Cu (T/m ²)	Φ (grados)	No. De Golpes/pié	S.U.C.S	Descripción del Suelo	γ _t	γ _d
						LL (%)	LP (%)	IP (%)											
Zona 1	SPT-1	1	3.50	6.00	46.30	48	36	12	100.00	58.10	2.74	132	0.44	--	1	ML	Limo areno arcilloso gris oscuro	1.40	1.10
		5	13.00	13.50	43.10	49	23	26	100.00	90.00	2.60	132	0.44	--	1	CL	Arcilla limosa parda clara con vetas grises, oxido y gravillas	1.35	1.08
		8	19.00	19.50	30.30	55	25	30	100.00	96.40	2.75	3564	11.88	--	27	CH	Arcilla parda grisacea con vetas de oxido	1.91	1.47
Zona 2	SPT-2	2	1.50	2.00	19.80	NL	NP	NIP	100.00	19.90	2.59	306.4	--	29	4	SM	Arena limosa fina gris oscura	1.50	1.25
		5	5.50	7.50	42.60	50	33	17	100.00	76.60	2.70	396	1.32	--	3	MH	Limo areno arcilloso gris claro con caracuchas	1.43	1.08
		11	19.00	19.50	30.20	53	24	29	100.00	96.40	2.75	5280	17.60	--	40	CH	Arcilla parda clara con vetas grises y oxido	1.97	1.51
Zona 1	SPT-3	2	4.50	5.00	42.00	53	34	19	100.00	79.70	2.70	132	0.44	--	1	MH	Limo arcillo arenoso gris oscuro con mangle	1.40	1.10
		5	8.50	10.50	42.70	39	23	16	100.00	77.40	2.75	396	1.32	--	3	CL	Arcilla limo arenosa gris clara con carcuchas menudas	1.43	1.08
		8	16.00	18.00	44.60	52	24	28	100.00	95.90	2.75	660	2.20	--	5	CH	Arcilla parda clara con vetas grises y oxido	1.55	1.10
Zona 2	SPT-4	1	2.50	4.50	29.30	33	22	11	100.00	41.40	2.59	76.6	--	24	1	SC	Arena limo arcilloso gris claro	1.35	1.05
		4	13.00	15.00	47.30	53	24	29	100.00	94.20	2.75	660	2.20	--	5	CH	Arcilla parda amarillenta con vetas grises y oxido	1.55	1.05
		6	19.00	25.00	37.60	38	21	17	93.00	77.40	2.60	7392	24.64	--	56	CL	Arcilla limo arenosa parda clara con vetas de grises, oxido y gravillas	2.11	1.53

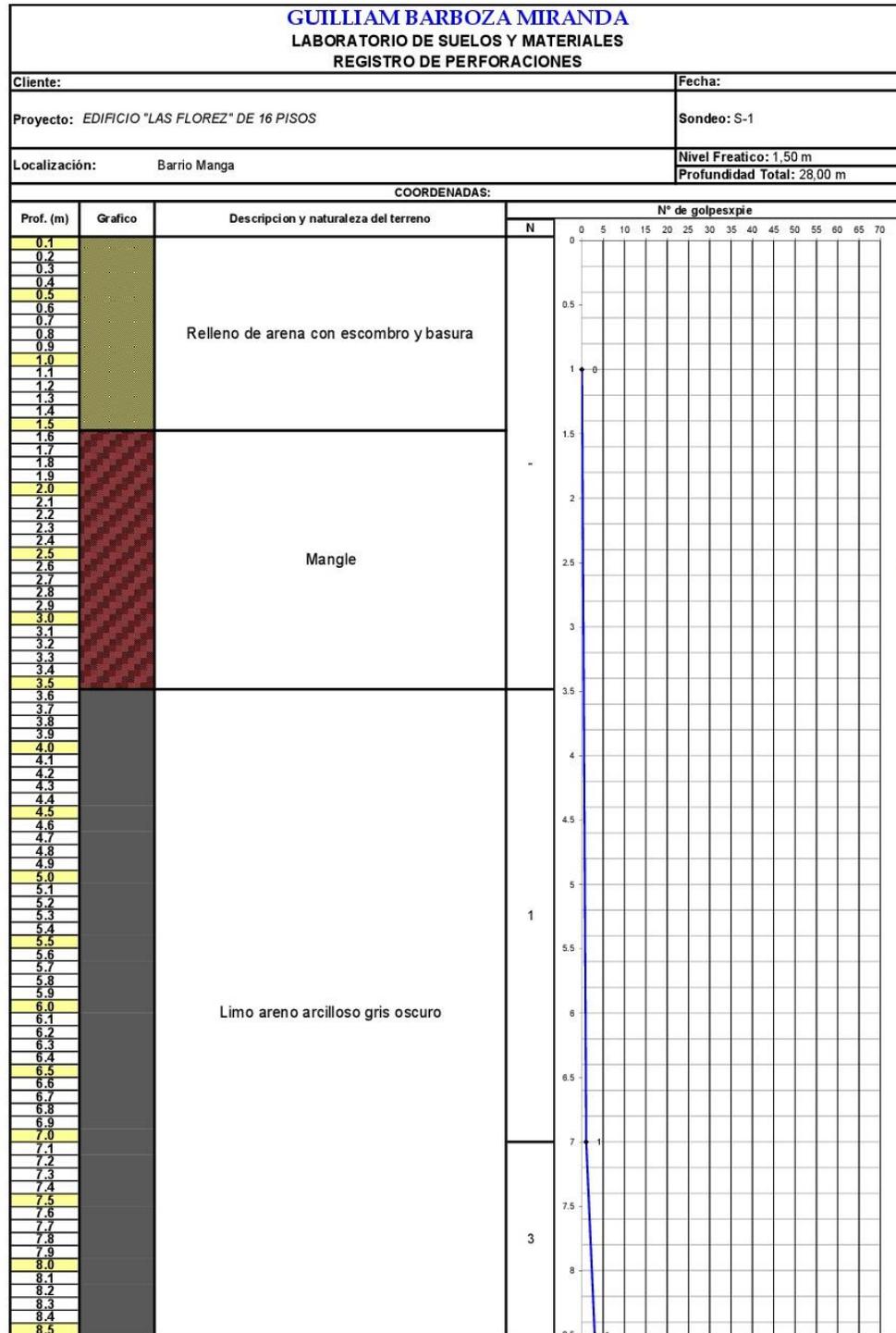
Fuente: Guilliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*

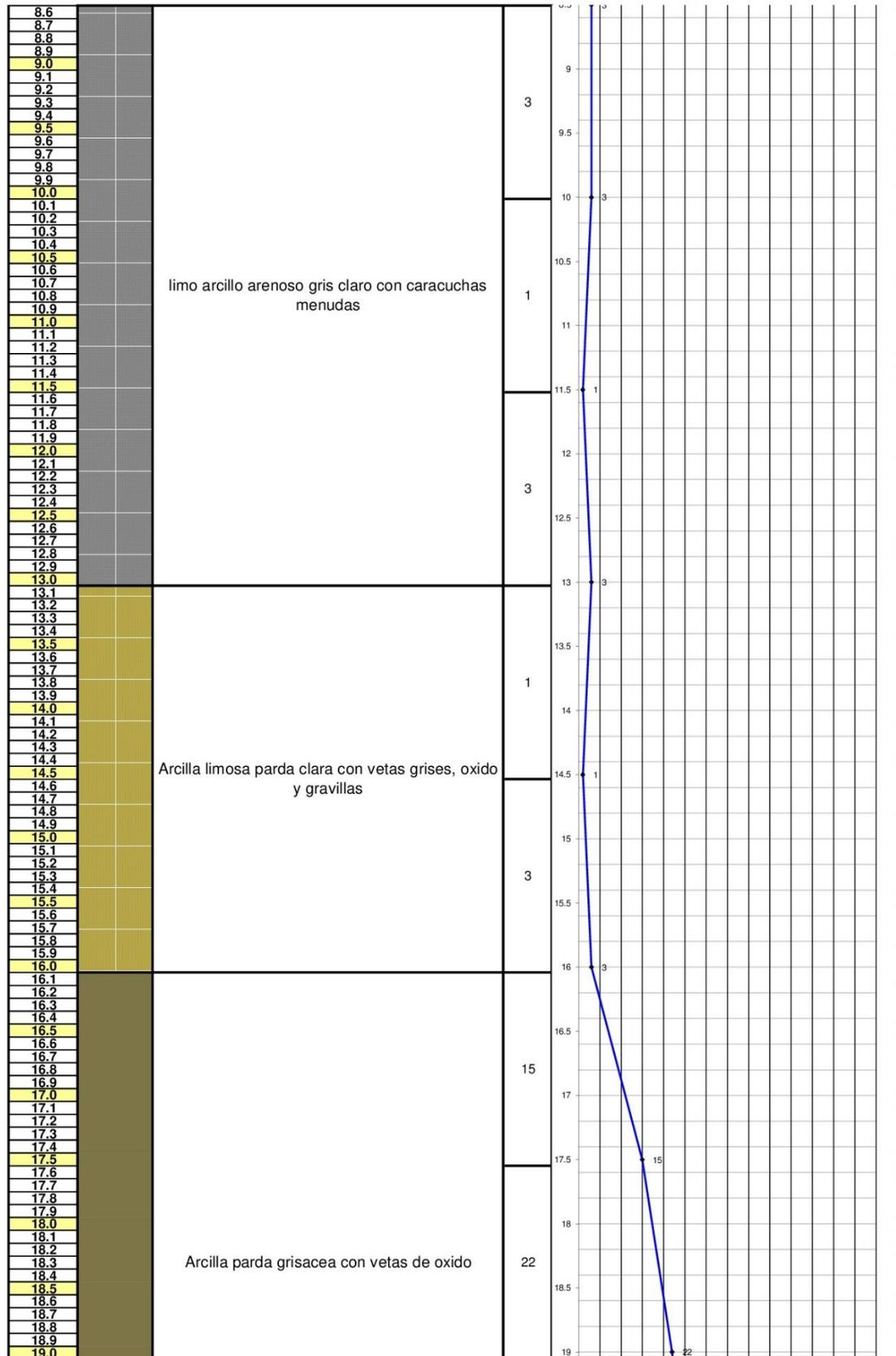


Tabla A. 2. Resumen ensayo de penetración estándar (SPT), Sonde # 1.



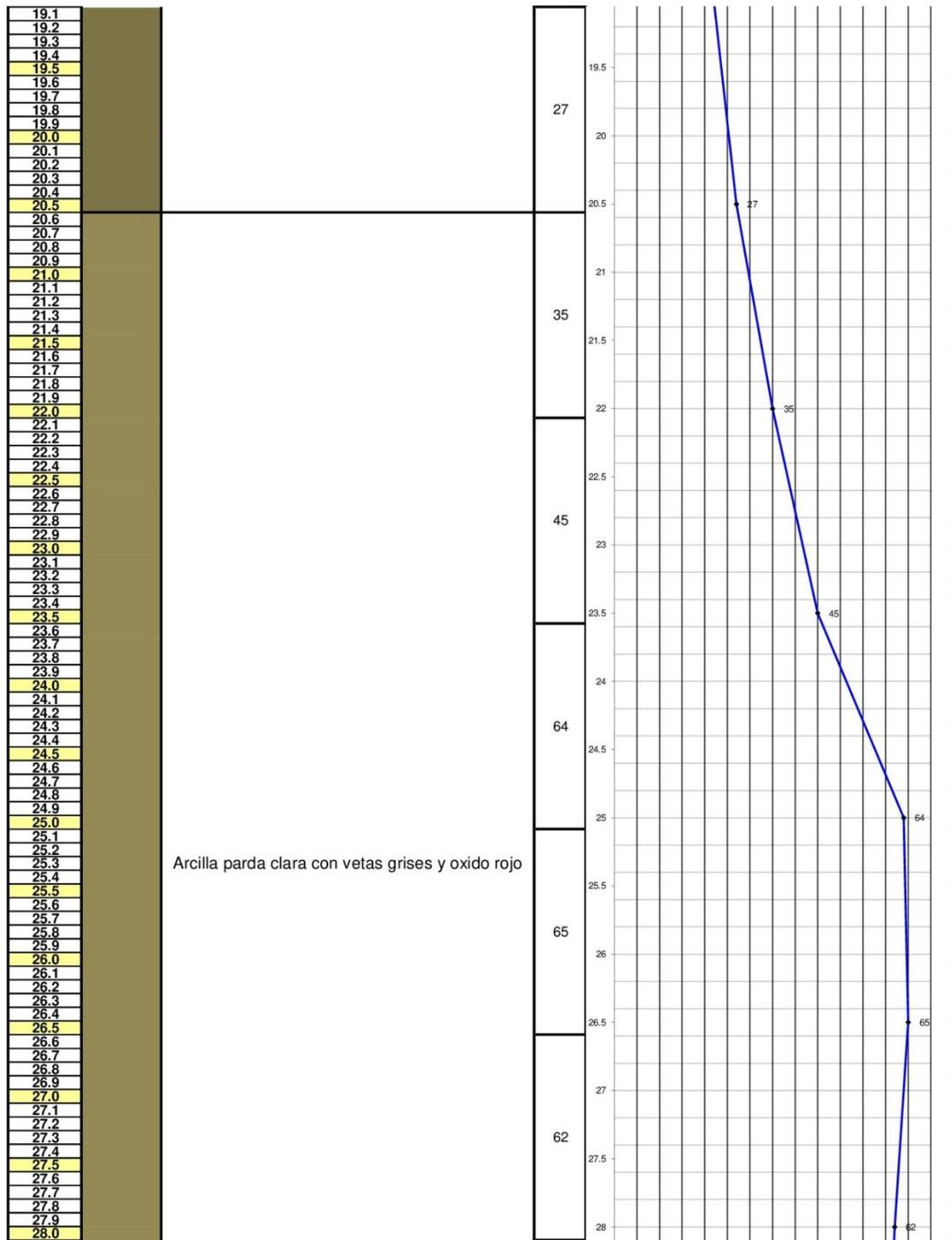


“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”





“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



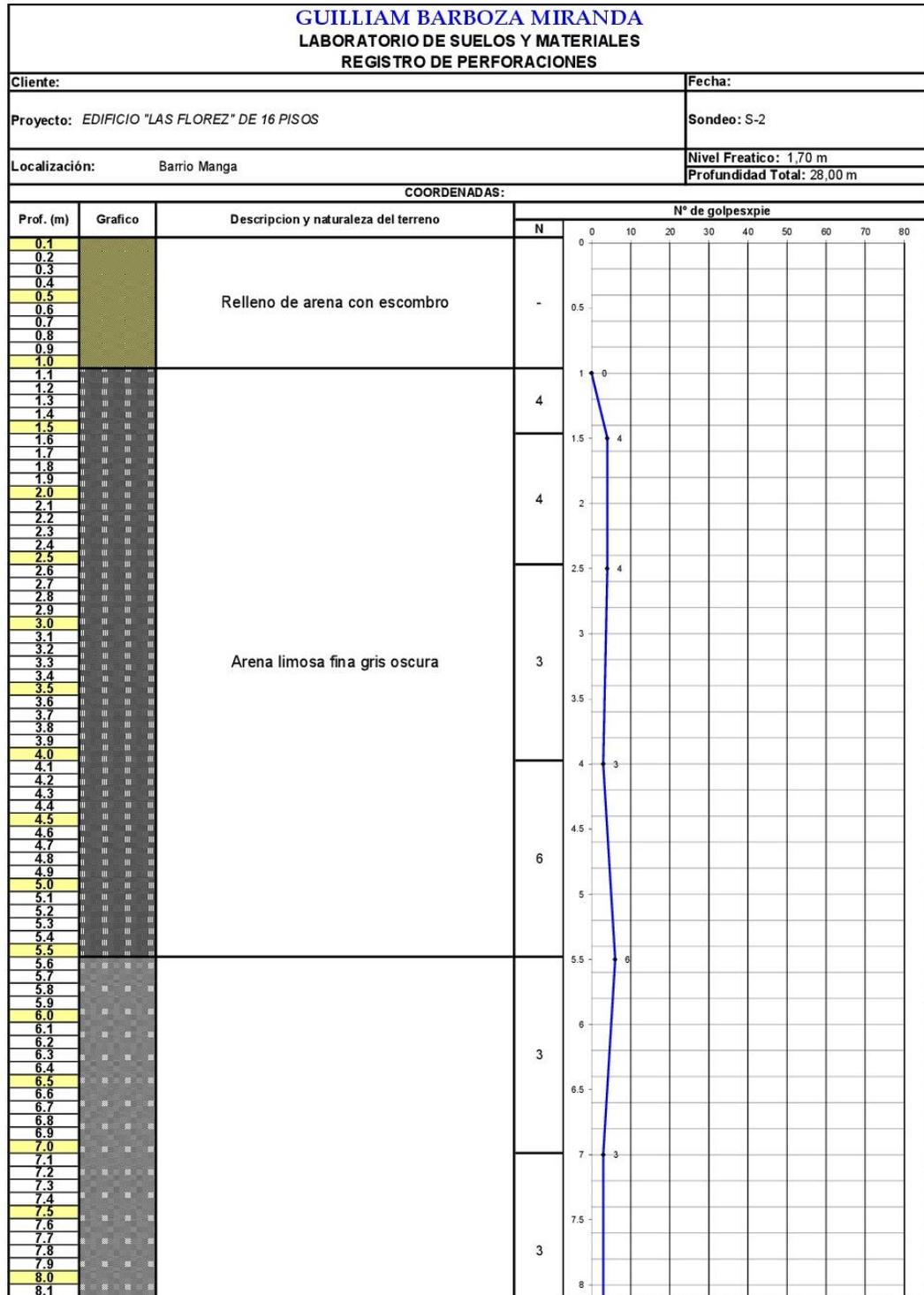
Fuente: Guilliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016



“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”

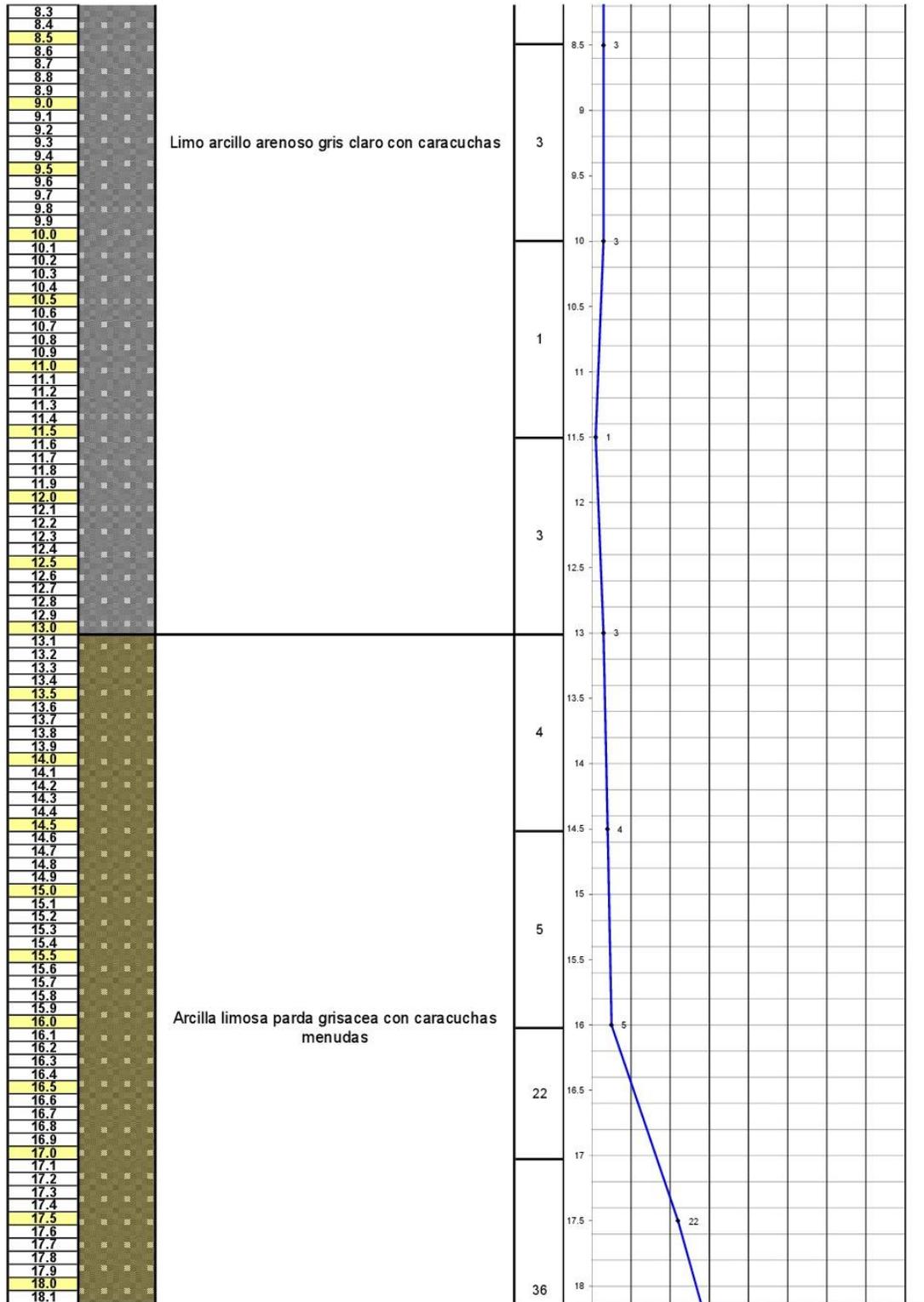


Tabla A. 3. Resumen ensayo de penetración estándar (SPT), Sonde # 2.



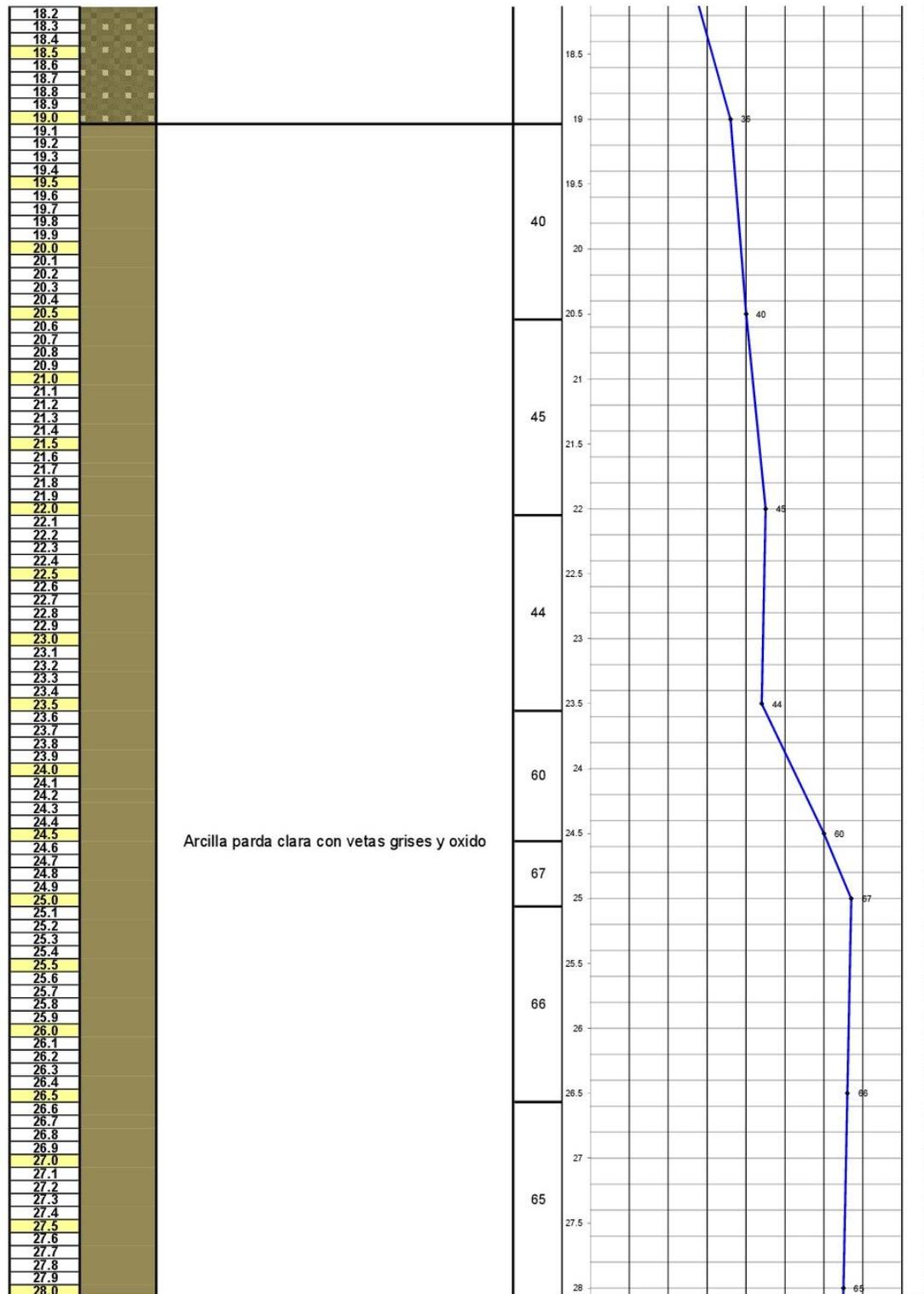


“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”





“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



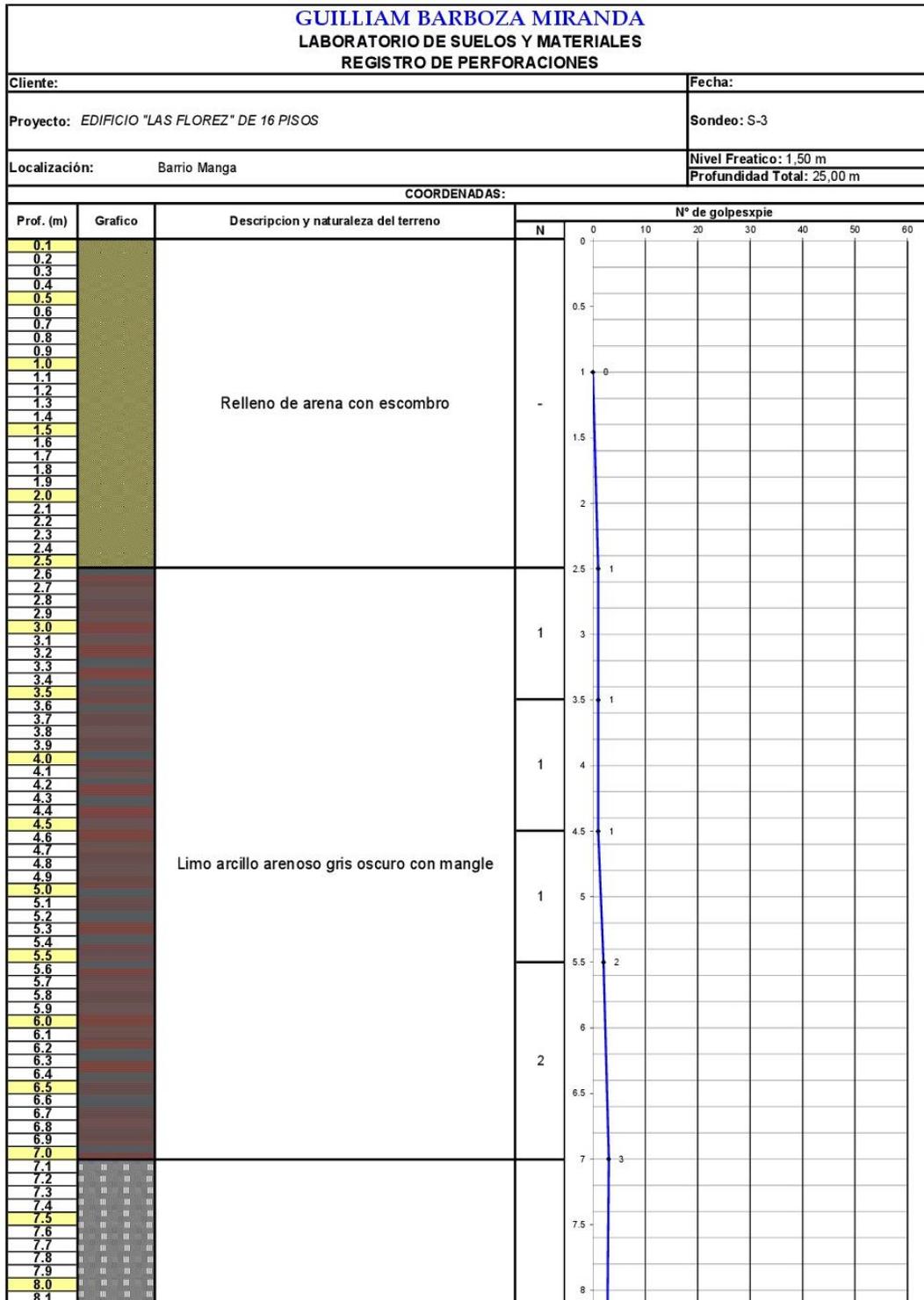
Fuente: Guilliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.



"Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes"

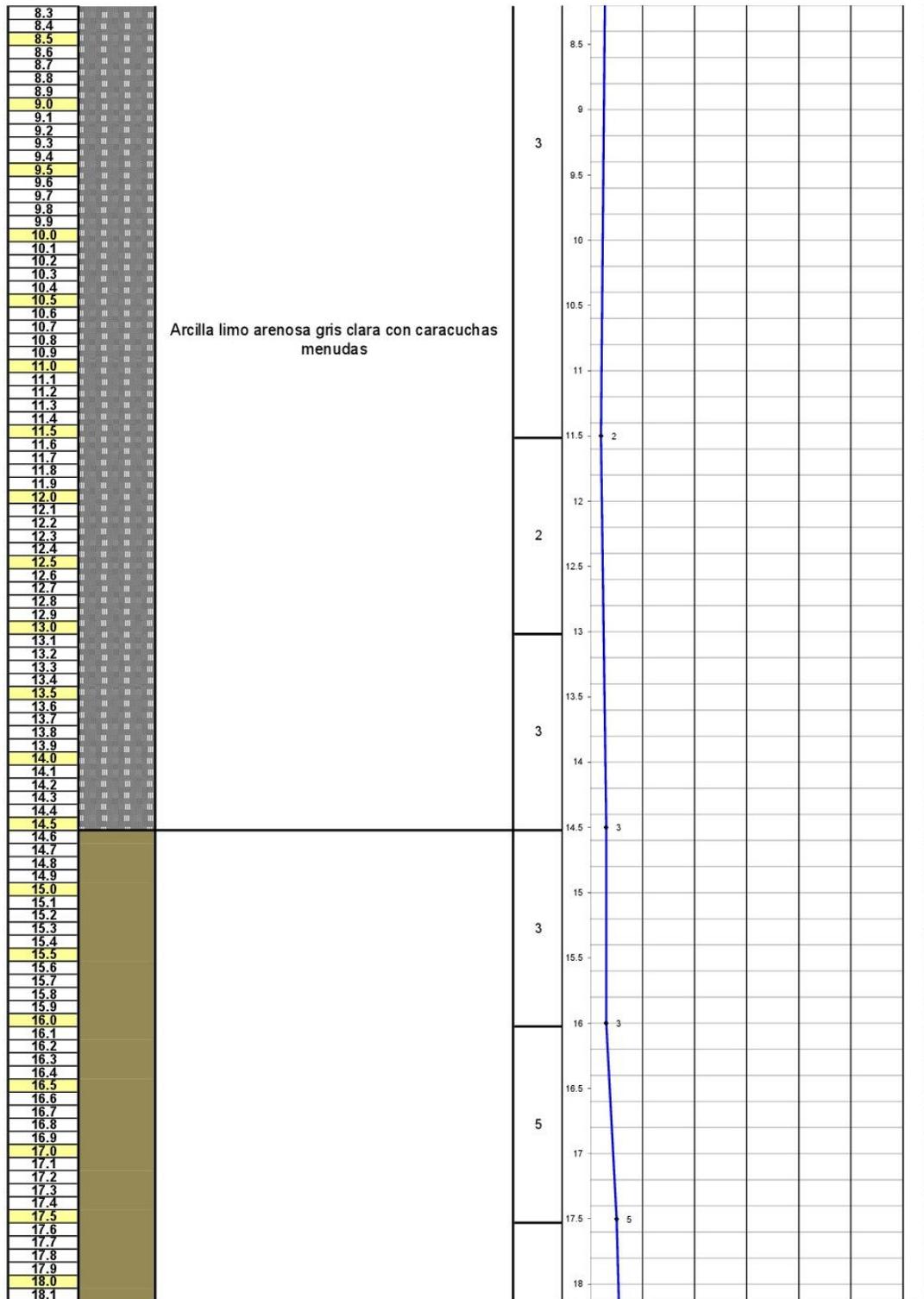


Tabla A. 4. Resumen ensayo de penetración estándar (SPT), Sonde # 3.



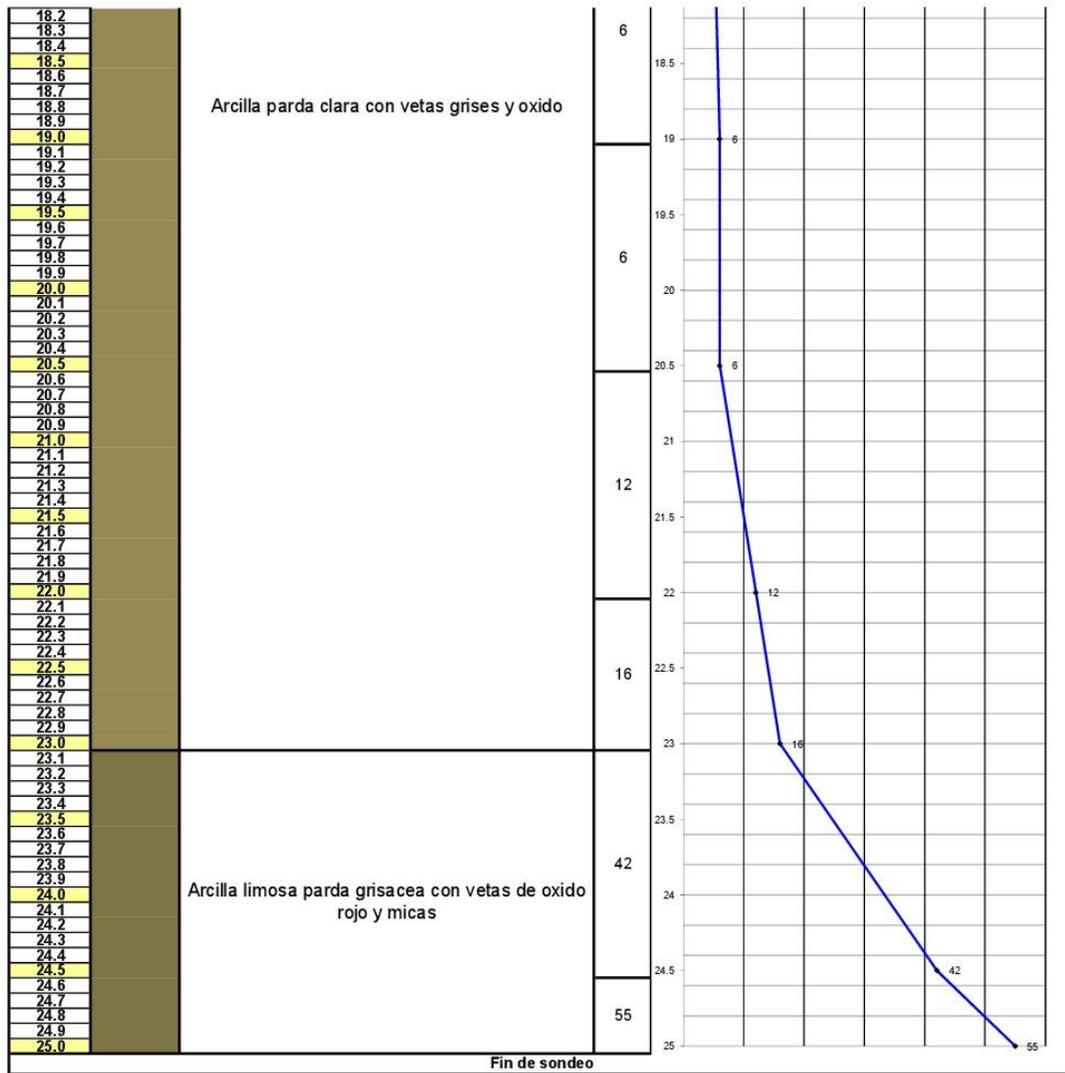


“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”





“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



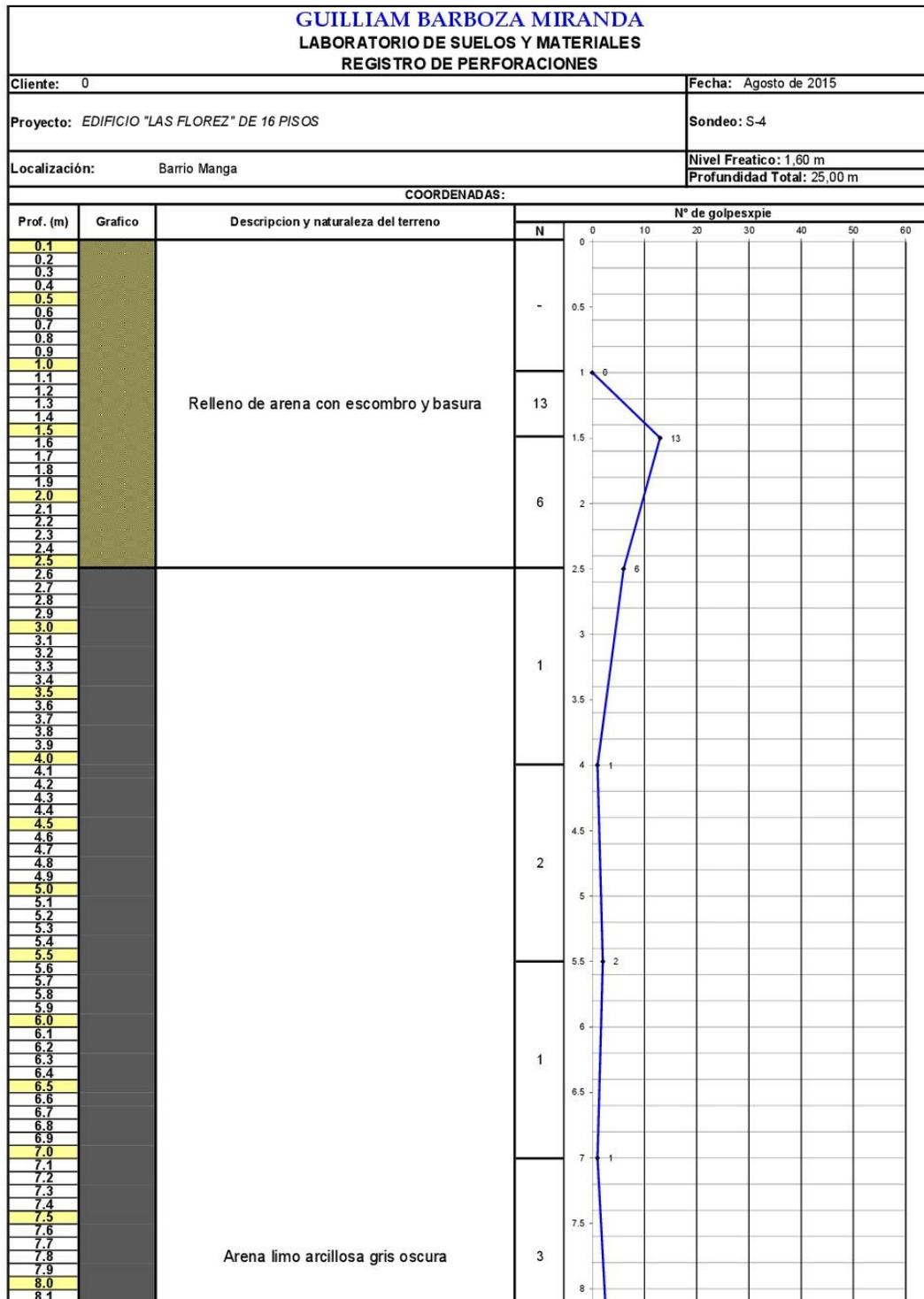
Fuente: Guiliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*

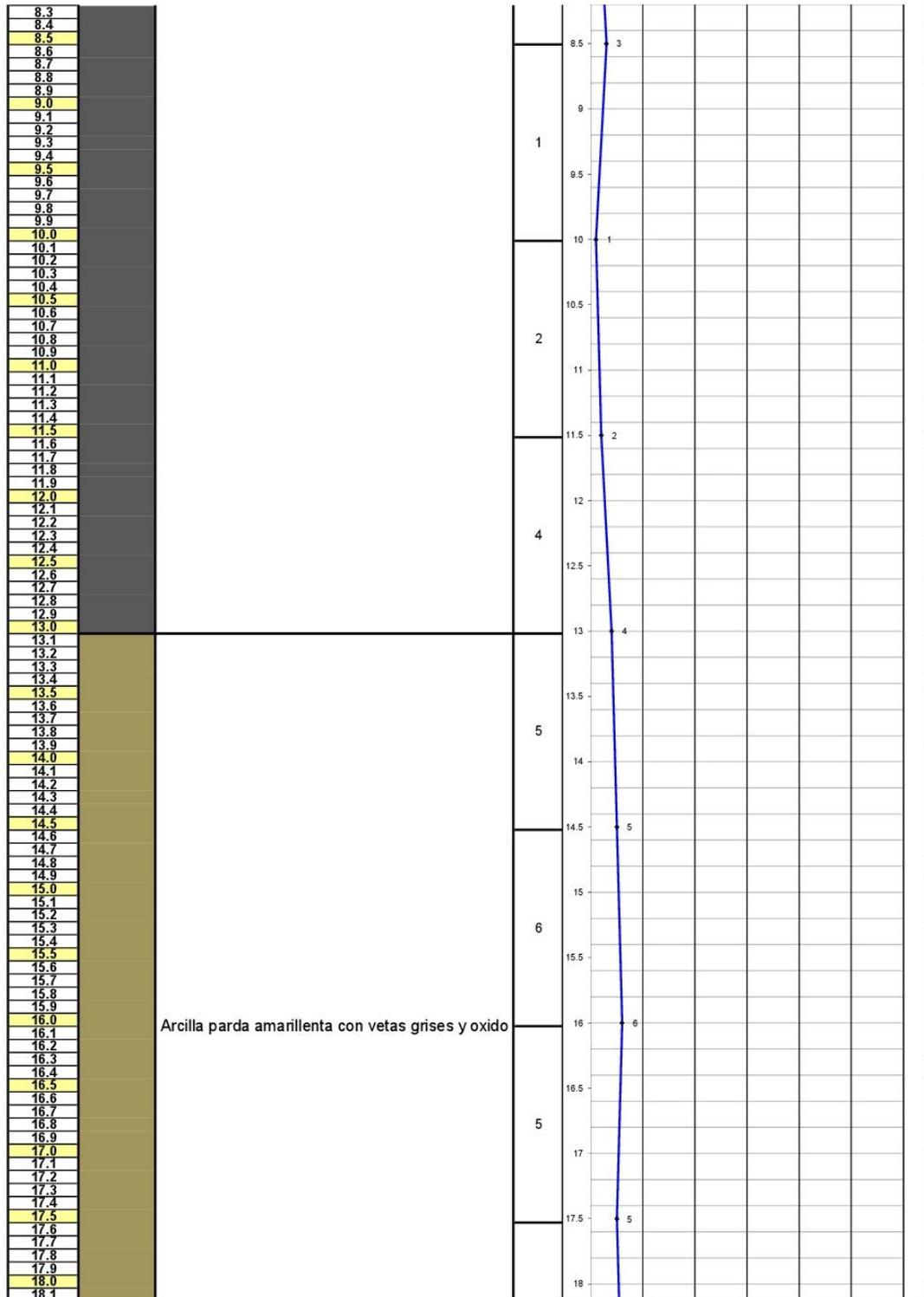


Tabla A. 5. Resumen ensayo de penetración estándar (SPT), Sonde # 4.



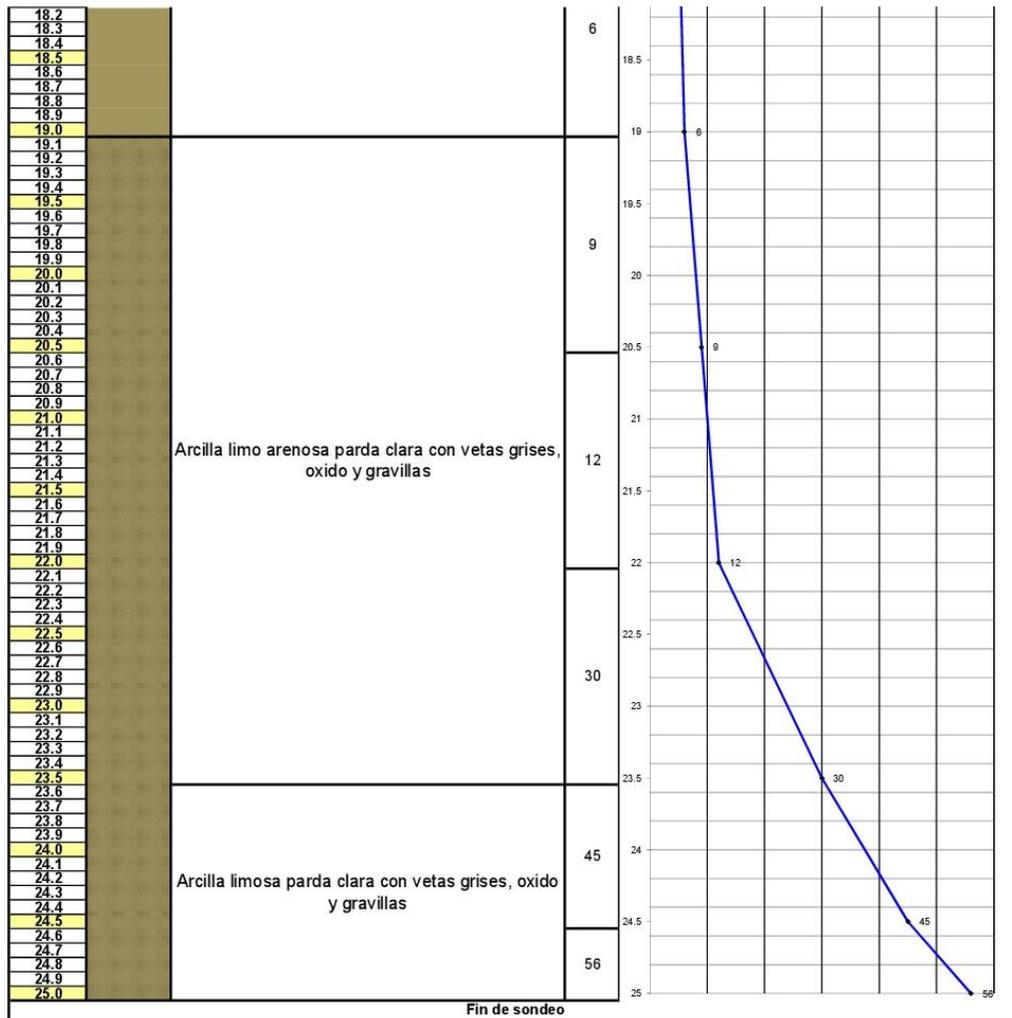


“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”





“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



Fuente: Guilliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



Figura A. 1. Registro fotográfico correspondiente al sondeo #1. Fuente: Guilliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.



Figura A. 2. Registro fotográfico correspondiente al sondeo #2. Fuente: Guilliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



Figura A. 3. Registro fotográfico correspondiente al sondeo #3. Fuente: Guilliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.



Figura A. 4. Registro fotográfico correspondiente al sondeo #4. Fuente: Guilliam Barboza Ing. Civil – MSc Geotecnia, 2016.



ANEXO B

Tabla B. 1. Secciones de columnas en la distribución en planta.

Sección	Dimensiones (m)	Columnas
S1	0.60 X 0.90	A1, A5,
S2	0.60 X 0.50	B1, D1, A4, C4, D4, A6, C6, D6,
S3	0.90 X 0.70	C1
S4	0.60 X 1.00	A2
S5	0.70 X 0.50	B2, D2
S6	0.75 X 1.00	C2
S7	0.70 X 1.00	A3, A7
S8	0.50 X 0.90	B3, B5, A8, E8
S9	1.50 X 0.60	C3
S10	0.40 X 0.60	D3, D8, A9, D9
S11	0.65 X 2.50	D5
S12	0.90 X 1.70	C7
S13	0.65 X 3.00	D7
S14	0.40 X 0.70	E9

Fuente: Autor.

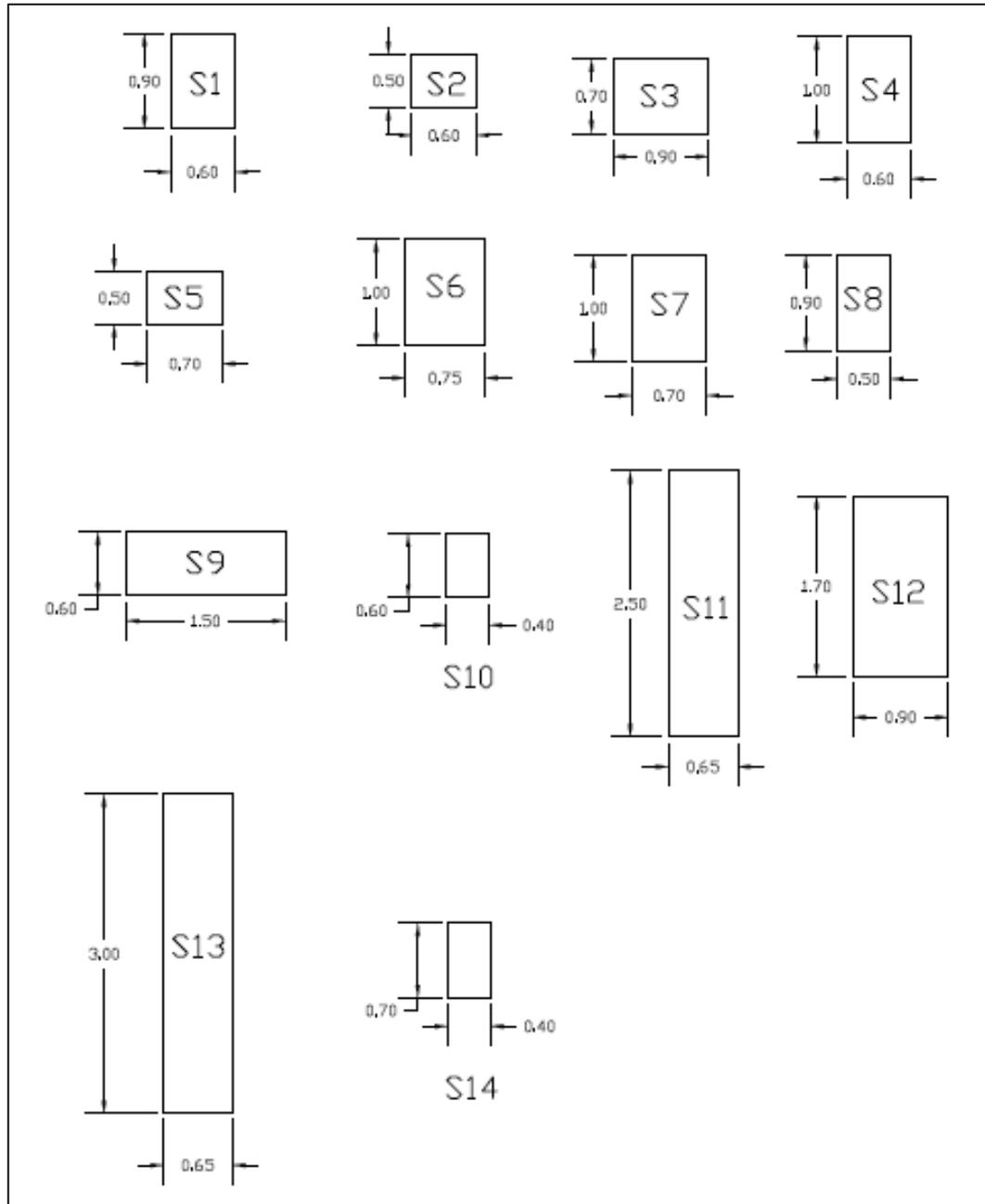


Figura B. 1. Secciones de columnas empleadas en el análisis estructural de la edificación. Fuente: Autor.

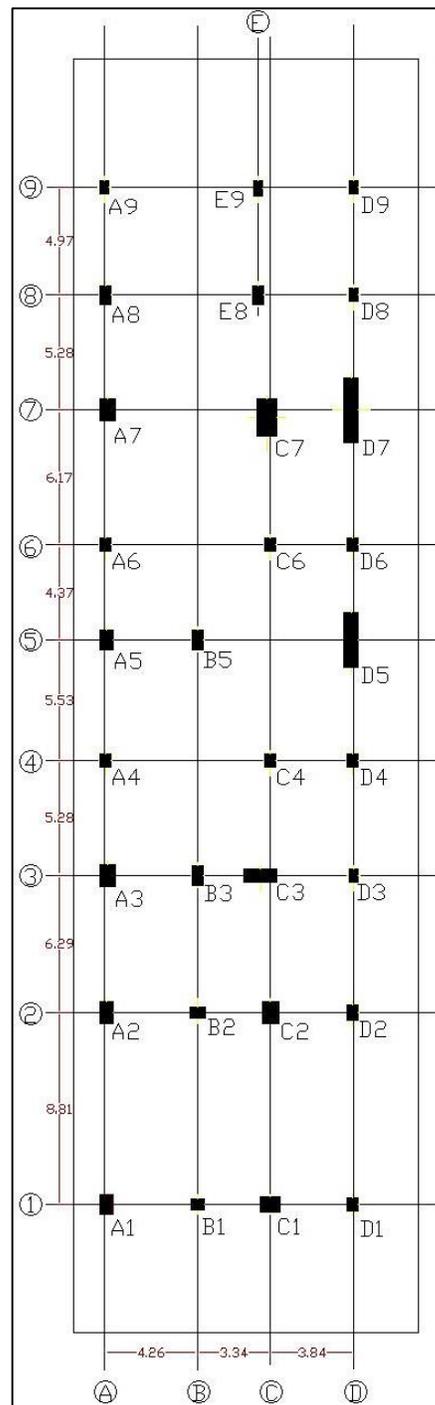


Figura B. 2. Distribución de columnas y ejes estructurales en planta del edificio “Las Florez”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Florez” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



Tabla B. 2. Cargas de servicio de las columnas producto del análisis estructural de la edificación “Las Florez”.

CARGAS DE SERVICIO PARA CIMIENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
A1	PESO PROPIO	-0.48	-1.34	255.70	-1.04	-2.36
	CARGAS MUERTAS	-0.2	-0.44	94.16	-0.47	-0.75
	SOBRECARGA DE USO	-0.2	-0.52	56	-0.39	-0.9
	VIENTO +X exc. +	0.77	1.92	-71.93	3.69	7.26
	VIENTO +X exc. -	4.36	-0.64	-149.06	15.67	-2.63
	VIENTO -X exc. +	-0.77	-1.92	71.93	-3.69	-7.26
	VIENTO -X exc. -	-4.36	0.64	149.06	-15.67	2.63
	VIENTO +Y exc. +	-0.18	0.48	-2.88	-0.55	2.12
	VIENTO +Y exc. -	-0.28	0.56	-0.85	-0.88	2.4
	VIENTO -Y exc. +	0.18	-0.48	2.88	0.55	-2.12
	VIENTO -Y exc. -	0.28	-0.56	0.85	0.88	-2.4
	SISMO X1	3.83	2.57	-271.26	15.67	9.85
	SISMO X2	7.73	-0.19	-394.29	28.97	-1.05
	SISMO Y1	-3.39	8.08	-62.22	-10.52	36.39
SISMO Y2	-4.15	8.62	-38.28	-13.12	38.52	
HIDROSTÁTICA	0	0.01	-0.01	-0.01	0.03	
B1	PESO PROPIO	0.08	-1.71	164.48	-0.05	-2.73
	CARGAS MUERTAS	0.02	-0.66	65.09	-0.06	-1.05
	SOBRECARGA DE USO	0.05	-0.79	40.7	0.03	-1.26
	VIENTO +X exc. +	1.27	0.23	-16.08	3.39	0.72
	VIENTO +X exc. -	5.22	-0.12	-40.24	13.16	-0.31
	VIENTO -X exc. +	-1.27	-0.23	16.08	-3.39	-0.72
	VIENTO -X exc. -	-5.22	0.12	40.24	-13.16	0.31
	VIENTO +Y exc. +	-0.18	0.13	-1.68	-0.44	0.42
	VIENTO +Y exc. -	-0.29	0.14	-1.05	-0.71	0.45
	VIENTO -Y exc. +	0.18	-0.13	1.68	0.44	-0.42
	VIENTO -Y exc. -	0.29	-0.14	1.05	0.71	-0.45
	SISMO X1	5.2	0.28	-58.64	13.6	0.95
	SISMO X2	9.53	-0.1	-91.27	24.44	-0.19
	SISMO Y1	-3.53	2.27	-39.1	-8.45	7.25
SISMO Y2	-4.38	2.34	-32.78	-10.56	7.47	
HIDROSTÁTICA	0	0	-0.04	-0.01	0.01	
C1	PESO PROPIO	-0.04	-1.91	235.92	-0.84	-3.15
	CARGAS MUERTAS	-0.02	-0.74	79.35	-0.44	-1.21
	SOBRECARGA DE USO	-0.06	-0.84	50.41	-0.3	-1.39
	VIENTO +X exc. +	2.14	0.16	66.68	9.79	0.48
	VIENTO +X exc. -	11.59	-0.03	148.03	40.9	0
	VIENTO -X exc. +	-2.14	-0.16	-66.68	-9.79	-0.48
	VIENTO -X exc. -	-11.59	0.03	-148.03	-40.9	0
	VIENTO +Y exc. +	-0.47	0.28	-3.75	-1.42	1.23
	VIENTO +Y exc. -	-0.74	0.28	-5.88	-2.28	1.24
	VIENTO -Y exc. +	0.47	-0.28	3.75	1.42	-1.23
	VIENTO -Y exc. -	0.74	-0.28	5.88	2.28	-1.24
	SISMO X1	10.36	0.25	260.73	41.21	0.77
	SISMO X2	20.67	0.05	392.35	75.82	0.29
	SISMO Y1	-8.97	4.42	-95.84	-27.39	20.43
SISMO Y2	-10.99	4.46	-121.44	-34.13	20.52	
HIDROSTÁTICA	-0.01	0	-0.19	-0.03	0.02	



“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



CARGAS DE SERVICIO PARA CIMIENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
D1	PESO PROPIO	0.26	-1.04	30.29	0.3	-1.69
	CARGAS MUERTAS	0.08	-0.34	6.95	0.07	-0.56
	SOBRECARGA DE USO	0.09	-0.38	6.52	0.1	-0.62
	VIENTO +X exc. +	0.79	-0.23	16.07	2.22	-0.79
	VIENTO +X exc. -	3.23	0.11	40.01	8.54	0.41
	VIENTO -X exc. +	-0.79	0.23	-16.07	-2.22	0.79
	VIENTO -X exc. -	-3.23	-0.11	-40.01	-8.54	-0.41
	VIENTO +Y exc. +	-0.11	0.12	-1.15	-0.28	0.44
	VIENTO +Y exc. -	-0.18	0.11	-1.79	-0.45	0.4
	VIENTO-Y exc. +	0.11	-0.12	1.15	0.28	-0.44
	VIENTO -Y exc. -	0.18	-0.11	1.79	0.45	-0.4
	SISMO X1	3.35	-0.31	55.71	9.06	-1.03
	SISMO X2	6.11	0.08	85.63	16.22	0.32
	SISMO Y1	-2.13	1.93	-23.42	-5.38	7.18
	SISMO Y2	-2.67	1.86	-29.24	-6.78	6.92
HIDROSTÁTICA	0	0	-0.03	-0.01	0.01	
A2	PESO PROPIO	-0.35	0.56	261.13	-0.89	0.4
	CARGAS MUERTAS	-0.17	0.2	99.49	-0.44	0.19
	SOBRECARGA DE USO	-0.18	0.2	59.12	-0.36	0.15
	VIENTO +X exc. +	2.36	2.97	-101.7	8.76	10.36
	VIENTO +X exc. -	4.54	-0.92	-147.11	15.96	-3.63
	VIENTO -X exc. +	-2.36	-2.97	101.7	-8.76	-10.36
	VIENTO -X exc. -	-4.54	0.92	147.11	-15.96	3.63
	VIENTO +Y exc. +	-0.1	0.8	-3.72	-0.32	3.1
	VIENTO +Y exc. -	-0.16	0.91	-2.52	-0.51	3.48
	VIENTO -Y exc. +	0.1	-0.8	3.72	0.32	-3.1
	VIENTO -Y exc. -	0.16	-0.91	2.52	0.51	-3.48
	SISMO X1	6.43	4.08	-335.72	23.93	14.2
	SISMO X2	8.83	-0.18	-408.36	31.97	-1.29
	SISMO Y1	-1.96	13.48	-81.64	-6.08	53.3
	SISMO Y2	-2.43	14.32	-67.50	-7.65	56.32
HIDROSTÁTICA	0	0.01	-0.03	-0.01	0.05	
B2	PESO PROPIO	0.05	0.91	179.45	-0.19	1.37
	CARGAS MUERTAS	0.03	0.35	71.91	-0.1	0.53
	SOBRECARGA DE USO	0.06	0.4	45.1	0.03	0.6
	VIENTO +X exc. +	3.26	0.96	-51.4	9.14	1.94
	VIENTO +X exc. -	6.02	0.72	-79.4	16.44	1.01
	VIENTO -X exc. +	-3.26	-0.96	51.4	-9.14	-1.94
	VIENTO -X exc. -	-6.02	-0.72	79.4	-16.44	-1.01
	VIENTO +Y exc. +	-0.11	0.2	-5.33	-0.29	0.56
	VIENTO +Y exc. -	-0.19	0.21	-4.6	-0.49	0.59
	VIENTO-Y exc. +	0.11	-0.2	5.33	0.29	-0.56
	VIENTO -Y exc. -	0.19	-0.21	4.6	0.49	-0.59
	SISMO X1	8.77	1.96	-157.58	24.74	3.72
	SISMO X2	11.8	1.71	-198	32.89	2.7
	SISMO Y1	-2.06	3.3	-118.01	-5.61	9.5
	SISMO Y2	-2.66	3.35	-110.18	-7.2	9.7
HIDROSTÁTICA	0	0	-0.09	-0.01	0.01	



“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



CARGAS DE SERVICIO PARA CIMIENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
C2	PESO PROPIO	-0.04	1.51	255.08	-0.74	1.76
	CARGAS MUERTAS	-0.03	0.6	79.45	-0.38	0.75
	SOBRECARGA DE USO	-0.04	0.63	50.28	-0.23	0.75
	VIENTO +X exc. +	4.77	-0.46	123.95	17.3	-0.17
	VIENTO +X exc. -	9.19	-1.45	167.45	31.51	-2.12
	VIENTO -X exc. +	-4.77	0.46	-123.95	-17.3	0.17
	VIENTO -X exc. -	-9.19	1.45	-167.45	-31.51	2.12
	VIENTO +Y exc. +	-0.22	0.87	-18.66	-0.65	3.26
	VIENTO +Y exc. -	-0.35	0.9	-19.8	-1.04	3.32
	VIENTO -Y exc. +	0.22	-0.87	18.66	0.65	-3.26
	VIENTO -Y exc. -	0.35	-0.9	19.8	1.04	-3.32
	SISMO X1	12.99	-1.61	395.76	47.21	-1.58
	SISMO X2	17.82	-2.69	461.47	63.05	-3.63
	SISMO Y1	-4.29	14.13	-415.69	-12.54	54.32
	SISMO Y2	-5.24	14.34	-428.54	-15.63	54.73
HIDROSTÁTICA	-0.01	0.01	-0.48	-0.02	0.04	
D2	PESO PROPIO	0.25	0.45	40.42	0.26	0.6
	CARGAS MUERTAS	0.08	0.15	10.5	0.06	0.21
	SOBRECARGA DE USO	0.09	0.15	9.52	0.11	0.19
	VIENTO +X exc. +	1.73	-0.61	25.35	4.8	-1.62
	VIENTO +X exc. -	3.12	-0.05	38.75	8.53	0.29
	VIENTO -X exc. +	-1.73	0.61	-25.35	-4.8	1.62
	VIENTO -X exc. -	-3.12	0.05	-38.75	-8.53	-0.29
	VIENTO +Y exc. +	-0.08	0.23	-1.03	-0.18	0.75
	VIENTO +Y exc. -	-0.11	0.21	-1.38	-0.29	0.69
	VIENTO -Y exc. +	0.08	-0.23	1.03	0.18	-0.75
	VIENTO -Y exc. -	0.11	-0.21	1.38	0.29	-0.69
	SISMO X1	4.79	-0.99	71.22	13.22	-2.42
	SISMO X2	6.36	-0.37	87.89	17.45	-0.26
	SISMO Y1	-1.51	3.65	-21.26	-3.61	12.27
	SISMO Y2	-1.82	3.53	-24.5	-4.44	11.85
HIDROSTÁTICA	0	0	-0.03	-0.01	0.01	
A3	PESO PROPIO	-0.88	-0.31	226.49	-1.92	-0.99
	CARGAS MUERTAS	-0.36	-0.12	75.23	-0.83	-0.32
	SOBRECARGA DE USO	-0.29	-0.12	42.84	-0.57	-0.35
	VIENTO +X exc. +	4.37	3.34	-105.44	17.44	11.86
	VIENTO +X exc. -	5.44	-1.21	-124.14	21.35	-4.42
	VIENTO -X exc. +	-4.37	-3.34	105.44	-17.44	-11.86
	VIENTO -X exc. -	-5.44	1.21	124.14	-21.35	4.42
	VIENTO +Y exc. +	-0.05	0.9	-0.63	-0.17	3.56
	VIENTO +Y exc. -	-0.08	1.02	-0.14	-0.27	4.01
	VIENTO -Y exc. +	0.05	-0.9	0.63	0.17	-3.56
	VIENTO -Y exc. -	0.08	-1.02	0.14	0.27	-4.01
	SISMO X1	10.23	4.45	-327.15	41.37	16.04
	SISMO X2	11.42	-0.5	-356.72	45.82	-1.94
	SISMO Y1	-1.05	15.04	-11.63	-3.26	61.08
	SISMO Y2	-1.28	16.01	-5.86	-4.13	64.59
HIDROSTÁTICA	0	0.01	0.03	-0.01	0.05	



“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



CARGAS DE SERVICIO PARA CIMENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
B3	PESO PROPIO	0	-0.91	183.53	-0.19	-1.64
	CARGAS MUERTAS	-0.02	-0.35	67.33	-0.13	-0.59
	SOBRECARGA DE USO	0.06	-0.4	39.63	0.05	-0.71
	VIENTO +X exc. +	4.21	0.15	-104.24	10.21	1.95
	VIENTO +X exc. -	5.11	-1.55	-125.8	12.37	-2.97
	VIENTO -X exc. +	-4.21	-0.15	104.24	-10.21	-1.95
	VIENTO -X exc. -	-5.11	1.55	125.8	-12.37	2.97
	VIENTO +Y exc. +	-0.06	0.48	6.25	-0.12	1.76
	VIENTO +Y exc. -	-0.09	0.52	6.82	-0.18	1.9
	VIENTO-Y exc. +	0.06	-0.48	-6.25	0.12	-1.76
	VIENTO -Y exc. -	0.09	-0.52	-6.82	0.18	-1.9
	SISMO X1	9.72	-0.73	-294.33	23.85	1.25
	SISMO X2	10.7	-2.59	-322.87	26.26	-4.17
	SISMO Y1	-1.2	7.87	138.95	-2.44	29.82
	SISMO Y2	-1.39	8.23	144.52	-2.92	30.88
HIDROSTÁTICA	0	0.01	0.17	0	0.02	
C3	PESO PROPIO	-0.48	-0.63	278.7	-4	-1.2
	CARGAS MUERTAS	-0.15	-0.27	79.5	-1.83	-0.48
	SOBRECARGA DE USO	-0.22	-0.3	45.33	-1.03	-0.56
	VIENTO +X exc. +	19.15	0.87	147.76	89.44	1.79
	VIENTO +X exc. -	23.8	0.68	193.24	109.18	1.05
	VIENTO -X exc. +	-19.15	-0.87	-147.76	-89.44	-1.79
	VIENTO -X exc. -	-23.8	-0.68	-193.24	-109.18	-1.05
	VIENTO +Y exc. +	-0.28	0.51	16.6	-0.88	1.66
	VIENTO +Y exc. -	-0.41	0.52	15.42	-1.42	1.68
	VIENTO-Y exc. +	0.28	-0.51	-16.6	0.88	-1.66
	VIENTO -Y exc. -	0.41	-0.52	-15.42	1.42	-1.68
	SISMO X1	43.32	1.75	453.92	210.48	3.41
	SISMO X2	48.33	1.56	524.59	232.77	2.65
	SISMO Y1	-5.16	8.34	367.11	-16.85	27.56
	SISMO Y2	-6.14	8.38	353.41	-21.21	27.71
HIDROSTÁTICA	-0.01	0.01	0.32	-0.03	0.02	
D3	PESO PROPIO	0.15	0.05	27.2	0.17	0.02
	CARGAS MUERTAS	0.04	0	6.86	0.04	-0.02
	SOBRECARGA DE USO	0.06	0	6.42	0.08	-0.03
	VIENTO +X exc. +	1.57	-0.15	26.11	3.7	-0.57
	VIENTO +X exc. -	1.92	0.36	31.83	4.51	0.76
	VIENTO -X exc. +	-1.57	0.15	-26.11	-3.7	0.57
	VIENTO -X exc. -	-1.92	-0.36	-31.83	-4.51	-0.76
	VIENTO +Y exc. +	0	0.16	0.06	-0.02	0.45
	VIENTO +Y exc. -	-0.01	0.15	-0.09	-0.04	0.41
	VIENTO-Y exc. +	0	-0.16	-0.06	0.02	-0.45
	VIENTO -Y exc. -	0.01	-0.15	0.09	0.04	-0.41
	SISMO X1	3.77	0	67.19	8.9	-0.44
	SISMO X2	4.18	0.57	74.45	9.84	1.06
	SISMO Y1	-0.06	2.61	1.51	-0.29	7.41
	SISMO Y2	-0.14	2.49	0.09	-0.47	7.12
HIDROSTÁTICA	0	0	0	0	0.01	



“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



CARGAS DE SERVICIO PARA CIMIENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
A4	PESO PROPIO	-1.05	-0.16	183.12	-1.77	-0.33
	CARGAS MUERTAS	-0.41	-0.06	76.75	-0.7	-0.11
	SOBRECARGA DE USO	-0.47	-0.06	43.92	-0.76	-0.12
	VIENTO +X exc. +	1.58	1.03	-43.66	5.3	2.68
	VIENTO +X exc. -	1.43	-0.41	-44.14	4.88	-1.06
	VIENTO -X exc. +	-1.58	-1.03	43.66	-5.3	-2.68
	VIENTO -X exc. -	-1.43	0.41	44.14	-4.88	1.06
	VIENTO +Y exc. +	0	0.31	0.5	0.01	0.83
	VIENTO +Y exc. -	0	0.35	0.51	0.02	0.94
	VIENTO -Y exc. +	0	-0.31	-0.5	-0.01	-0.83
	VIENTO -Y exc. -	0	-0.35	-0.51	-0.02	-0.94
	SISMO X1	3.33	1.37	-132.83	11.48	3.63
	SISMO X2	3.18	-0.23	-133.27	11.04	-0.54
	SISMO Y1	-0.01	5.39	10.38	0.21	14.41
	SISMO Y2	0.02	5.7	10.48	0,29	15,23
HIDROSTÁTICA	0	0	0.02	0	0.01	
C4	PESO PROPIO	1.93	8.92	200.39	1.15	-0.88
	CARGAS MUERTAS	0.72	3.09	79.54	0.38	-0.11
	SOBRECARGA DE USO	0.87	3.96	50.97	0.49	-0.06
	VIENTO +X exc. +	5.04	3.53	18.99	11.33	4.18
	VIENTO +X exc. -	3.71	3.59	22.36	9.94	3.94
	VIENTO -X exc. +	-5.04	-3.53	-18.99	-11.33	-4.18
	VIENTO -X exc. -	-3.71	-3.59	-22.36	-9.94	-3.94
	VIENTO +Y exc. +	-0.24	2.43	1.59	0.03	3.03
	VIENTO +Y exc. -	-0.2	2.43	1.5	0.07	3.04
	VIENTO -Y exc. +	0.24	-2.43	-1.59	-0.03	-3.03
	VIENTO -Y exc. -	0.2	-2.43	-1.5	-0.07	-3.04
	SISMO X1	10.62	7.88	73.73	24.66	9.16
	SISMO X2	9.09	8.11	78.92	23.13	9.09
	SISMO Y1	-4.15	41.17	46.8	0.7	51.33
	SISMO Y2	-3.86	41.12	45.78	1	51.35
HIDROSTÁTICA	0	0.03	0.05	0	0.04	
D4	PESO PROPIO	-0.6	8.99	41.48	0.87	-0.66
	CARGAS MUERTAS	-0.27	3.12	11.54	0.28	-0.06
	SOBRECARGA DE USO	-0.36	3.93	11.45	0.36	-0.09
	VIENTO +X exc. +	5.52	-6.9	30.19	11.38	-8.26
	VIENTO +X exc. -	4.89	-1.7	23.13	10.07	-1.43
	VIENTO -X exc. +	-5.52	6.9	-30.19	-11.38	8.26
	VIENTO -X exc. -	-4.89	1.7	-23.13	-10.07	1.43
	VIENTO +Y exc. +	0.34	2.17	-2.31	0.1	2.71
	VIENTO +Y exc. -	0.36	2.03	-2.12	0.13	2.52
	VIENTO -Y exc. +	-0.34	-2.17	2.31	-0.1	-2.71
	VIENTO -Y exc. -	-0.36	-2.03	2.12	-0.13	-2.52
	SISMO X1	11.97	-12.54	68.52	24.81	-14.58
	SISMO X2	11.31	-6.54	60.29	23.37	-6.73
	SISMO Y1	6.06	36.19	-39.5	1.83	45.1
	SISMO Y2	6.19	35.01	-37.91	2.1	43.58
HIDROSTÁTICA	0	0.03	-0.03	0	0.03	



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



CARGAS DE SERVICIO PARA CIMENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
A5	PESO PROPIO	-0.49	-0.21	229.55	-1.1	-0.64
	CARGAS MUERTAS	-0.21	-0.03	84.31	-0.49	-0.12
	SOBRECARGA DE USO	-0.2	-0.04	46.45	-0.37	-0.17
	VIENTO +X exc. +	4.53	2.48	-105.01	15.7	8.13
	VIENTO +X exc. -	3.13	-0.86	-77.3	11.14	-2.97
	VIENTO -X exc. +	-4.53	-2.48	105.01	-15.7	-8.13
	VIENTO -X exc. -	-3.13	0.86	77.3	-11.14	2.97
	VIENTO +Y exc. +	0.07	0.67	-2.49	0.22	2.41
	VIENTO +Y exc. -	0.11	0.77	-3.21	0.35	2.72
	VIENTO-Y exc. +	-0.07	-0.67	2.49	-0.22	-2.41
	VIENTO -Y exc. -	-0.11	-0.77	3.21	-0.35	-2.72
	SISMO X1	8.93	3.35	-290.49	31.87	11.06
	SISMO X2	7.42	-0.29	-248.2	26.89	-1.2
	SISMO Y1	1.35	11.35	-55.96	4.26	41.43
	SISMO Y2	1.65	12.07	-64.17	5.23	43.82
HIDROSTÁTICA	0	0.01	-0.04	0	0.04	
B5	PESO PROPIO	0.24	-0.29	200.47	0.18	-0.69
	CARGAS MUERTAS	0.08	-0.11	80.64	0.03	-0.23
	SOBRECARGA DE USO	0.13	0	46.76	0.17	-0.1
	VIENTO +X exc. +	3.65	1.16	23.25	10.75	3.52
	VIENTO +X exc. -	2.58	-0.08	18.8	7.7	-0.69
	VIENTO -X exc. +	-3.65	-1.16	-23.25	-10.75	-3.52
	VIENTO -X exc. -	-2.58	0.08	-18.8	-7.7	0.69
	VIENTO +Y exc. +	0.05	0.43	-0.04	0.15	1.69
	VIENTO +Y exc. -	0.08	0.46	0.08	0.23	1.81
	VIENTO-Y exc. +	-0.05	-0.43	0.04	-0.15	-1.69
	VIENTO -Y exc. -	-0.08	-0.46	-0.08	-0.23	-1.81
	SISMO X1	7.32	1.8	61.42	21.95	5.19
	SISMO X2	6.17	0.46	55.2	18.61	0.58
	SISMO Y1	1.01	7.16	-1.99	2.83	28.73
	SISMO Y2	1.23	7.42	-0.79	3.48	29.63
HIDROSTÁTICA	0	0.01	-0.01	0	0.02	
D5	PESO PROPIO	0.19	-3.25	59.45	-0.91	-9.83
	CARGAS MUERTAS	0.08	-1.05	4.81	-0.42	-3.01
	SOBRECARGA DE USO	0.06	-1.41	2.97	-0.13	-4.45
	VIENTO +X exc. +	9.94	-9.32	20.44	45.7	-47.66
	VIENTO +X exc. -	6.65	3.19	13.16	32.29	24.17
	VIENTO -X exc. +	-9.94	9.32	-20.44	-45.7	47.66
	VIENTO -X exc. -	-6.65	-3.19	-13.16	-32.29	-24.17
	VIENTO +Y exc. +	0.17	4.46	-1.36	0.65	28.05
	VIENTO +Y exc. -	0.26	4.11	-1.17	1.02	26.09
	VIENTO-Y exc. +	-0.17	-4.46	1.36	-0.65	-28.05
	VIENTO -Y exc. -	-0.26	-4.11	1.17	-1.02	-26.09
	SISMO X1	19.56	-12.4	46.87	93.38	-61.69
	SISMO X2	15.98	0.99	37.82	78.6	19.58
	SISMO Y1	3.12	67.99	-23.96	12.41	461.41
	SISMO Y2	3.82	65.36	-22.21	15.29	445.67
HIDROSTÁTICA	0	0.05	-0.02	0.01	0.35	



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



CARGAS DE SERVICIO PARA CIMENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
A6	PESO PROPIO	-1.25	-0.26	183.18	-2.09	-0.49
	CARGAS MUERTAS	-0.48	-0.1	70.29	-0.81	-0.18
	SOBRECARGA DE USO	-0.55	-0.11	40.26	-0.88	-0.2
	VIENTO +X exc. +	2.26	1.12	-49.4	7.29	2.84
	VIENTO +X exc. -	1.31	-0.36	-40.21	4.3	-0.98
	VIENTO -X exc. +	-2.26	-1.12	49.4	-7.29	-2.84
	VIENTO -X exc. -	-1.31	0.36	40.21	-4.3	0.98
	VIENTO +Y exc. +	0.04	0.32	3.54	0.13	0.84
	VIENTO +Y exc. -	0.06	0.36	3.3	0.21	0.95
	VIENTO-Y exc. +	-0.04	-0.32	-3.54	-0.13	-0.84
	VIENTO -Y exc. -	-0.06	-0.36	-3.3	-0.21	-0.95
	SISMO X1	4.32	1.57	-144.67	14.26	3.94
	SISMO X2	3.29	-0.08	-128.77	10.98	-0.31
	SISMO Y1	0.77	5.45	75.93	2.52	14.52
	SISMO Y2	0.97	5.78	72.85	3.16	15.35
HIDROSTÁTICA	0	0	0.08	0	0.01	
C6	PESO PROPIO	1.2	-0.24	169.76	1.74	-0.45
	CARGAS MUERTAS	0.44	-0.09	62.88	0.63	-0.16
	SOBRECARGA DE USO	0.54	-0.11	35.81	0.82	-0.2
	VIENTO +X exc. +	2.38	0.06	28.47	7.47	0.18
	VIENTO +X exc. -	1.32	-0.01	17.82	4.32	0
	VIENTO -X exc. +	-2.38	-0.06	-28.47	-7.47	-0.18
	VIENTO -X exc. -	-1.32	0.01	-17.82	-4.32	0
	VIENTO +Y exc. +	0.07	0.26	0.4	0.18	0.69
	VIENTO +Y exc. -	0.1	0.26	0.68	0.27	0.7
	VIENTO-Y exc. +	-0.07	-0.26	-0.4	-0.18	-0.69
	VIENTO -Y exc. -	-0.1	-0.26	-0.68	-0.27	-0.7
	SISMO X1	4.55	0.1	84.12	14.63	0.29
	SISMO X2	3.4	0.03	66.17	11.16	0.12
	SISMO Y1	1.31	4.37	6.89	3.38	11.62
	SISMO Y2	1.54	4.38	10.37	4.06	11.66
HIDROSTÁTICA	0	0	0	0	0.01	
D6	PESO PROPIO	0.06	-0.17	17.96	-0.04	-0.34
	CARGAS MUERTAS	0.03	-0.04	3.11	-0.01	-0.09
	SOBRECARGA DE USO	0.02	-0.06	2.03	0.01	-0.12
	VIENTO +X exc. +	1.49	-0.5	6.29	6.05	-1.21
	VIENTO +X exc. -	0.82	0.28	7.2	3.52	0.67
	VIENTO -X exc. +	-1.49	0.5	-6.29	-6.05	1.21
	VIENTO -X exc. -	-0.82	-0.28	-7.2	-3.52	-0.67
	VIENTO +Y exc. +	0.03	0.3	1.69	0.12	0.72
	VIENTO +Y exc. -	0.05	0.28	1.66	0.18	0.67
	VIENTO-Y exc. +	-0.03	-0.3	-1.69	-0.12	-0.72
	VIENTO -Y exc. -	-0.05	-0.28	-1.66	-0.18	-0.67
	SISMO X1	2.9	-0.64	16.63	11.99	-1.54
	SISMO X2	2.16	0.25	17.6	9.17	0.6
	SISMO Y1	0.58	4.92	30.33	2.22	11.9
	SISMO Y2	0.73	4.74	30.14	2.77	11.49
HIDROSTÁTICA	0	0	0.02	0	0.01	



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



CARGAS DE SERVICIO PARA CIMIENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
A7	PESO PROPIO	-1.74	-0.08	291.53	-3.32	-0.64
	CARGAS MUERTAS	-0.7	0	119.05	-1.37	-0.13
	SOBRECARGA DE USO	-0.76	-0.03	66.3	-1.26	-0.22
	VIENTO +X exc. +	7.82	3.39	-161.02	31.62	11.93
	VIENTO +X exc. -	3.19	-1.12	-83.33	14.06	-4.28
	VIENTO -X exc. +	-7.82	-3.39	161.02	-31.62	-11.93
	VIENTO -X exc. -	-3.19	1.12	83.33	-14.06	4.28
	VIENTO +Y exc. +	0.24	0.89	-2.39	0.84	3.55
	VIENTO +Y exc. -	0.37	1.02	-4.42	1.32	4
	VIENTO-Y exc. +	-0.24	-0.89	2.39	-0.84	-3.55
	VIENTO -Y exc. -	-0.37	-1.02	4.42	-1.32	-4
	SISMO X1	13.91	4.61	-433.5	58.94	16.29
	SISMO X2	8.94	-0.28	-310.66	39.61	-1.6
	SISMO Y1	4.45	14.86	-56	15.96	60.81
	SISMO Y2	5.43	15.82	-79.84	19.73	64.3
HIDROSTÁTICA	0	0.01	-0.05	0.01	0.05	
C7	PESO PROPIO	0.6	-2.37	490.37	-1.37	-6.13
	CARGAS MUERTAS	0.27	-0.79	161.98	-0.6	-1.9
	SOBRECARGA DE USO	0.17	-1.06	95.31	-0.08	-2.64
	VIENTO +X exc. +	28.4	2.73	105.92	113.16	7.67
	VIENTO +X exc. -	11.94	-0.17	59.14	51.32	0.09
	VIENTO -X exc. +	-28.4	-2.73	-105.92	-113.16	-7.67
	VIENTO -X exc. -	-11.94	0.17	-59.14	-51.32	-0.09
	VIENTO +Y exc. +	0.83	2.86	-1.54	2.93	15.31
	VIENTO +Y exc. -	1.29	2.94	-0.33	4.64	15.53
	VIENTO-Y exc. +	-0.83	-2.86	1.54	-2.93	-15.31
	VIENTO -Y exc. -	-1.29	-2.94	0.33	-4.64	-15.53
	SISMO X1	50.85	4.22	341.46	211.75	12.08
	SISMO X2	33.14	1.09	250.04	143.63	4.2
	SISMO Y1	15.82	45.2	-26.27	56.21	255.58
	SISMO Y2	19.3	45.81	-8.53	69.47	257.15
HIDROSTÁTICA	0.01	0.04	-0.02	0.05	0.2	
D7	PESO PROPIO	1.89	-4.75	94.79	1.42	-14.94
	CARGAS MUERTAS	0.69	-1.57	14.61	0.4	-4.57
	SOBRECARGA DE USO	0.86	-2.09	14.96	1.12	-6.82
	VIENTO +X exc. +	20.89	-14.04	80.1	79.43	-76.7
	VIENTO +X exc. -	8.77	4.26	42.67	35.56	39.39
	VIENTO -X exc. +	-20.89	14.04	-80.1	-79.43	76.7
	VIENTO -X exc. -	-8.77	-4.26	-42.67	-35.56	-39.39
	VIENTO +Y exc. +	0.66	6.47	2.76	2.16	45.57
	VIENTO +Y exc. -	1	5.95	3.76	3.37	42.41
	VIENTO-Y exc. +	-0.66	-6.47	-2.76	-2.16	-45.57
	VIENTO -Y exc. -	-1	-5.95	-3.76	-3.37	-42.41
	SISMO X1	38.14	-19.01	168.88	149.27	-99.34
	SISMO X2	24.88	0.45	123.81	100.66	32.37
	SISMO Y1	12.4	97.58	52.32	41.11	752.48
	SISMO Y2	15	93.75	61.07	50.56	726.96
HIDROSTÁTICA	0.01	0.07	0.04	0.04	0.57	



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



CARGAS DE SERVICIO PARA CIMIENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
A8	PESO PROPIO	-1.85	-0.08	175.65	-3.11	-0.39
	CARGAS MUERTAS	-0.73	0	62.36	-1.24	-0.07
	SOBRECARGA DE USO	-0.54	-0.06	36.2	-0.87	-0.18
	VIENTO +X exc. +	4.45	2.11	-117.48	14.16	6.85
	VIENTO +X exc. -	1.55	-0.86	-61.56	5.14	-2.69
	VIENTO -X exc. +	-4.45	-2.11	117.48	-14.16	-6.85
	VIENTO -X exc. -	-1.55	0.86	61.56	-5.14	2.69
	VIENTO +Y exc. +	0.08	0.62	6.93	0.33	2.11
	VIENTO +Y exc. -	0.16	0.71	5.47	0.58	2.37
	VIENTO-Y exc. +	-0.08	-0.62	-6.93	-0.33	-2.11
	VIENTO -Y exc. -	-0.16	-0.71	-5.47	-0.58	-2.37
	SISMO X1	8.09	2.7	-312.17	26.03	9.08
	SISMO X2	4.87	-0.51	-224.73	15.97	-1.42
	SISMO Y1	1.33	10.58	156.79	5.92	36.25
	SISMO Y2	1.96	11.21	139.86	7.88	38.3
HIDROSTÁTICA	0	0.01	0.17	0	0.03	
E8	PESO PROPIO	1.63	-0.15	192.52	2.34	-0.48
	CARGAS MUERTAS	0.62	-0.03	64.74	0.88	-0.12
	SOBRECARGA DE USO	0.34	-0.11	41.21	0.5	-0.27
	VIENTO +X exc. +	5.33	0.21	77.76	15.56	0.83
	VIENTO +X exc. -	1.84	-0.15	38.51	5.61	-0.29
	VIENTO -X exc. +	-5.33	-0.21	-77.76	-15.56	-0.83
	VIENTO -X exc. -	-1.84	0.15	-38.51	-5.61	0.29
	VIENTO +Y exc. +	0.25	0.52	10.47	0.59	1.76
	VIENTO +Y exc. -	0.34	0.53	11.5	0.87	1.79
	VIENTO-Y exc. +	-0.25	-0.52	-10.47	-0.59	-1.76
	VIENTO -Y exc. -	-0.34	-0.53	-11.5	-0.87	-1.79
	SISMO X1	9.24	0.25	212.14	27.87	1.15
	SISMO X2	5.52	-0.14	148.31	17.02	-0.04
	SISMO Y1	5.03	8.58	246.55	11.8	29.46
	SISMO Y2	5.76	8.66	258.98	13.92	29.69
HIDROSTÁTICA	0	0.01	0.27	0.01	0.02	
D8	PESO PROPIO	0.13	-0.16	20.55	0.13	-0.31
	CARGAS MUERTAS	0.05	-0.05	4.49	0.05	-0.1
	SOBRECARGA DE USO	0.1	-0.07	5.24	0.14	-0.14
	VIENTO +X exc. +	2.6	-0.36	21.1	6.59	-0.9
	VIENTO +X exc. -	0.95	0.24	11.5	2.44	0.56
	VIENTO -X exc. +	-2.6	0.36	-21.1	-6.59	0.9
	VIENTO -X exc. -	-0.95	-0.24	-11.5	-2.44	-0.56
	VIENTO +Y exc. +	0.08	0.24	2.14	0.19	0.57
	VIENTO +Y exc. -	0.12	0.22	2.39	0.3	0.53
	VIENTO-Y exc. +	-0.08	-0.24	-2.14	-0.19	-0.57
	VIENTO -Y exc. -	-0.12	-0.22	-2.39	-0.3	-0.53
	SISMO X1	4.83	-0.43	45.31	12.25	-1.11
	SISMO X2	2.98	0.24	33.59	7.59	0.55
	SISMO Y1	1.46	3.92	39.81	3.63	9.5
	SISMO Y2	1.82	3.79	42.09	4.54	9.18
HIDROSTÁTICA	0	0	0.03	0	0.01	



“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”



CARGAS DE SERVICIO PARA CIMENTOS						
COLUMNA	CASO DE CARGA	Fx	Fy	Fgrav	Mx	My
		Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
A9	PESO PROPIO	-0.56	0.21	17.27	-0.96	0.27
	CARGAS MUERTAS	-0.18	0.08	3.72	-0.31	0.1
	SOBRECARGA DE USO	-0.19	0.07	4.1	-0.31	0.08
	VIENTO +X exc. +	2.04	0.65	-3.03	5.91	1.87
	VIENTO +X exc. -	0.59	-0.25	-2.91	1.75	-0.72
	VIENTO -X exc. +	-2.04	-0.65	3.03	-5.91	-1.87
	VIENTO -X exc. -	-0.59	0.25	2.91	-1.75	0.72
	VIENTO +Y exc. +	0.07	0.19	0.85	0.19	0.58
	VIENTO +Y exc. -	0.11	0.22	0.85	0.30	0.65
	VIENTO-Y exc. +	-0.07	-0.19	-0.85	-0.19	-0.58
	VIENTO -Y exc. -	-0.11	-0.22	-0.85	-0.3	-0.65
	SISMO X1	3.58	0.8	-7.67	10.54	2.43
	SISMO X2	1.99	-0.16	-7.33	5.93	-0.4
	SISMO Y1	1.23	3.29	15.46	3.55	9.92
	SISMO Y2	1.55	3.48	15.4	4.44	10.48
HIDROSTÁTICA	0	0	0.01	0	0.01	
E9	PESO PROPIO	0.27	0.37	28.61	0.34	0.48
	CARGAS MUERTAS	0.07	0.16	7.26	0.07	0.21
	SOBRECARGA DE USO	0.1	0.16	8.19	0.15	0.2
	VIENTO +X exc. +	3.6	0.24	-4.24	8.87	0.57
	VIENTO +X exc. -	1.07	0	-1.51	2.66	-0.03
	VIENTO -X exc. +	-3.6	-0.24	4.24	-8.87	-0.57
	VIENTO -X exc. -	-1.07	0	1.51	-2.66	0.03
	VIENTO +Y exc. +	0.13	0.2	0.99	0.3	0.68
	VIENTO +Y exc. -	0.2	0.21	0.91	0.47	0.69
	VIENTO-Y exc. +	-0.13	-0.2	-0.99	-0.3	-0.68
	VIENTO -Y exc. -	-0.2	-0.21	-0.91	-0.47	-0.69
	SISMO X1	6.43	0.41	-7.77	15.92	0.94
	SISMO X2	3.62	0.14	-4.69	9.01	0.28
	SISMO Y1	2.4	3.34	18.11	5.68	11.35
	SISMO Y2	2.95	3.39	17.52	7.03	11.48
HIDROSTÁTICA	0	0	0.02	0.01	0.01	
D9	PESO PROPIO	0.06	0.16	10.59	0.02	0.2
	CARGAS MUERTAS	0.02	0.05	1.54	0	0.07
	SOBRECARGA DE USO	0.04	0.07	2.14	0.06	0.08
	VIENTO +X exc. +	2.56	-0.26	8.65	6.75	-0.75
	VIENTO +X exc. -	0.75	0.07	3.66	2.01	0.29
	VIENTO -X exc. +	-2.56	0.26	-8.65	-6.75	0.75
	VIENTO -X exc. -	-0.75	-0.07	-3.66	-2.01	-0.29
	VIENTO +Y exc. +	0.08	0.1	0.7	0.22	0.36
	VIENTO +Y exc. -	0.14	0.09	0.84	0.35	0.33
	VIENTO-Y exc. +	-0.08	-0.1	-0.7	-0.22	-0.36
	VIENTO -Y exc. -	-0.14	-0.09	-0.84	-0.35	-0.33
	SISMO X1	4.54	-0.37	16.95	12.08	-1.02
	SISMO X2	2.54	0	11.19	6.82	0.15
	SISMO Y1	1.62	1.63	12.78	4.16	5.88
	SISMO Y2	2.01	1.56	13.9	5.19	5.65
HIDROSTÁTICA	0	0	0.01	0	0	

Fuente: Análisis estructural edificio “Las Flores” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.



*“Análisis comparativo entre losas de cimentación macizas y aligeradas,
sobre el terreno y sobre pilotes”*



Tabla B. 3. Combinaciones de Servicio usadas para el análisis de interacción suelo estructura.

Servicio	Combinación de Servicio
1	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática.
2.1	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Sismo X1
2.2	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática - Sismo X1
3.1	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Sismo X2
3.2	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática - Sismo X2
4.1	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Sismo Y1
4.2	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática - Sismo Y1
5.1	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Sismo Y2
5.2	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática - Sismo Y2
6.1	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Viento +X exc. +
6.2	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Viento -X exc. +
6.3	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Viento +X exc. -
6.4	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Viento -X exc. -
7.1	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Viento +Y exc. +
7.2	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Viento -Y exc. +
7.3	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Viento +Y exc. -
7.4	Peso propio + Cargas muertas + Sobrecarga de uso + Hidrostática + Viento -Y exc. -

Fuente: Autor

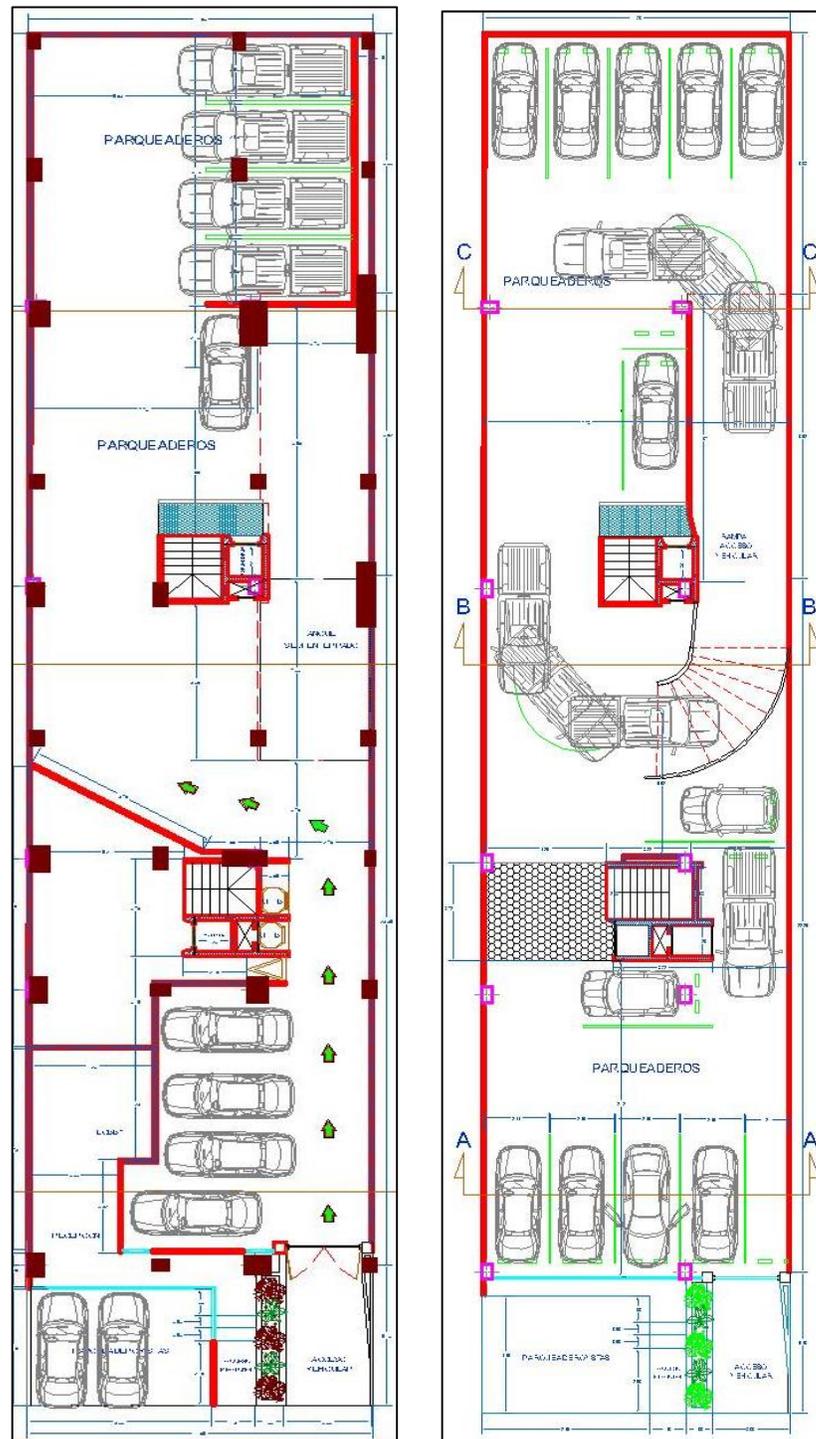


Figura B. 3. Planta arquitectónica del piso 1° (izquierda) y piso 2° (Derecha) del edificio “Las Florez”.
Fuente: Análisis estructural edificio “Las Florez” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.

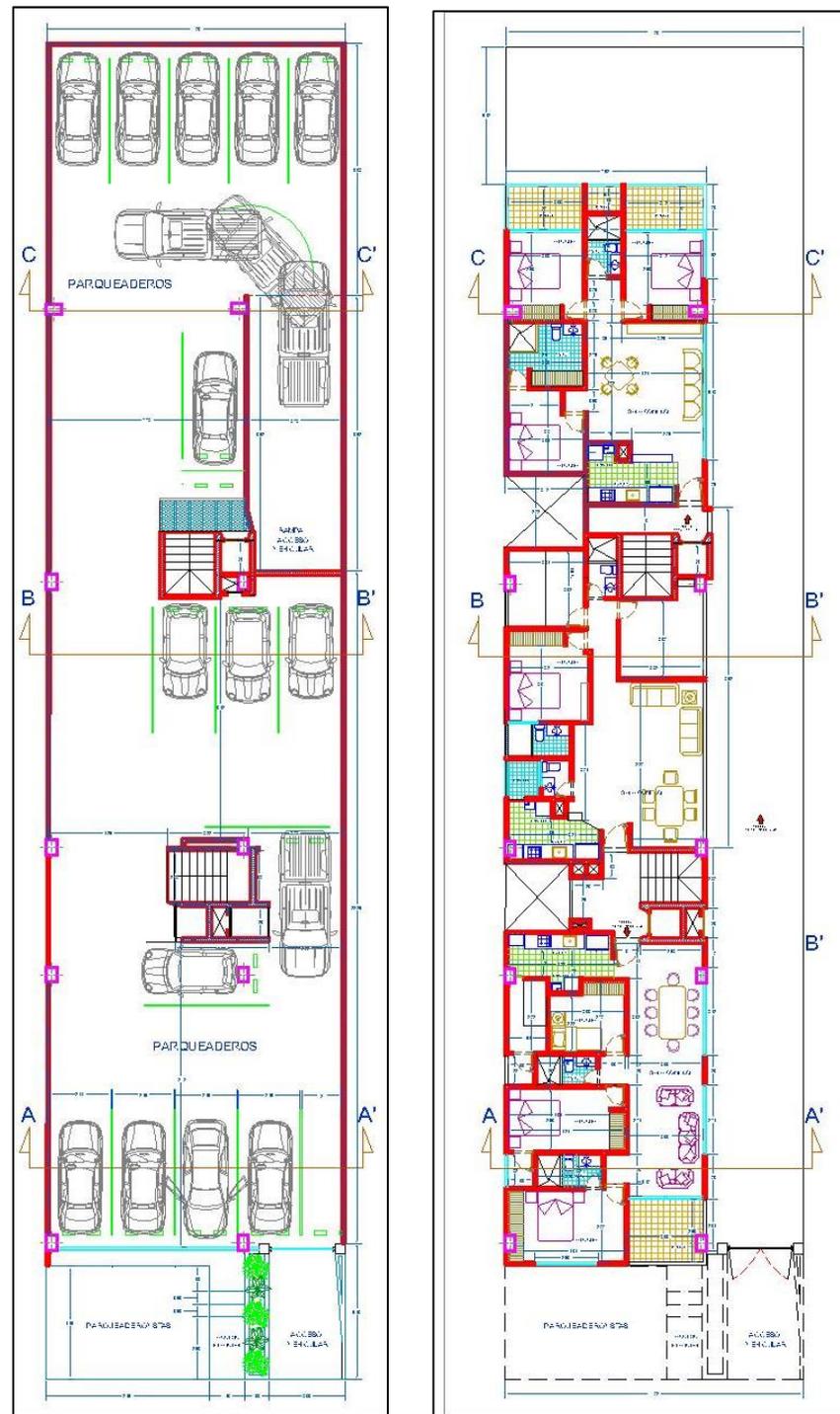


Figura B. 4. Planta arquitectónica del piso 3° (izquierda) y pisos del 4° al 14° (Derecha) del edificio “Las Florez”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Florez” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.

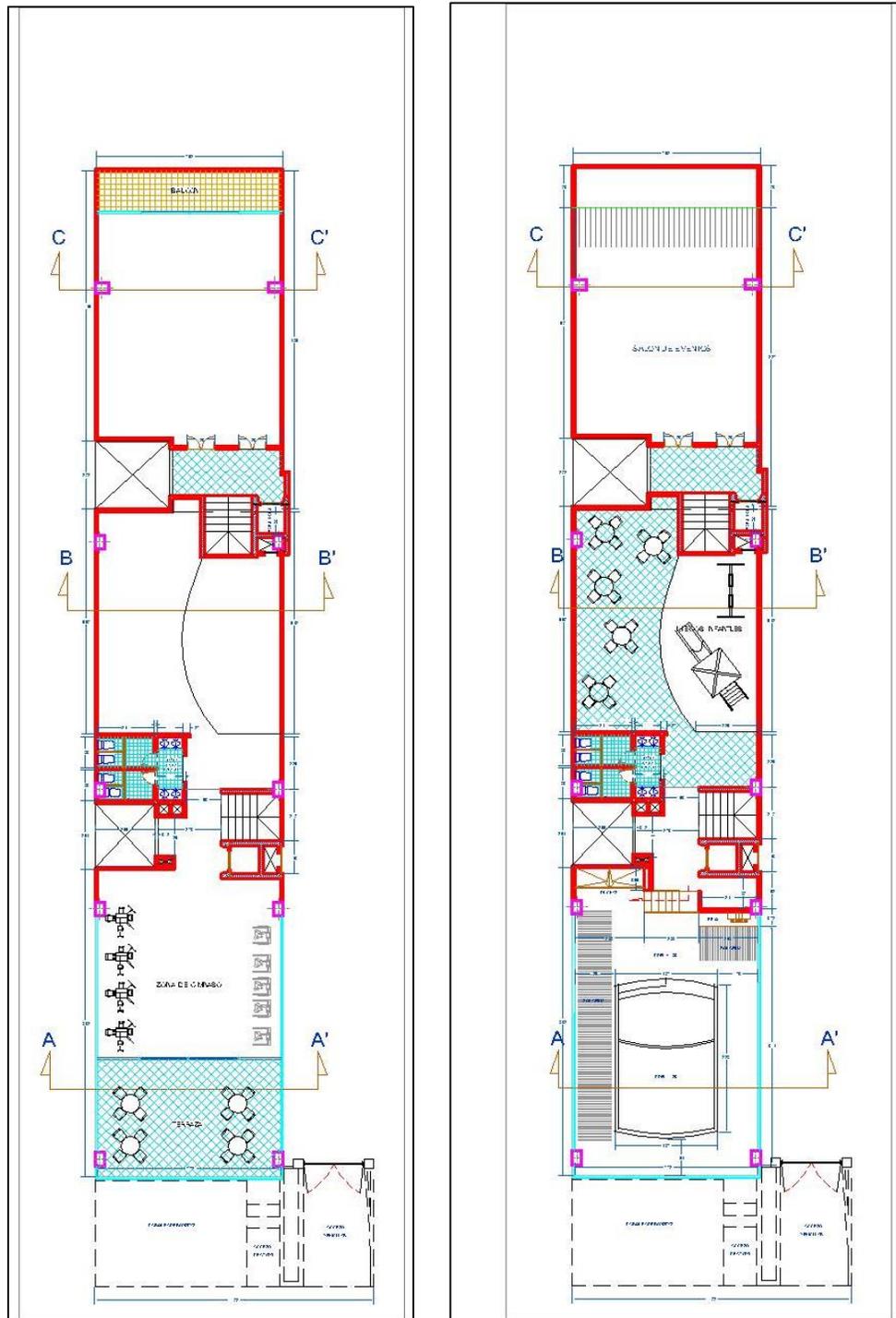


Figura B. 5. Planta arquitectónica del piso 15° (izquierda) y piso 16° (Derecha) del edificio “Las Flores”.

Fuente: Análisis estructural edificio “Las Flores” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.

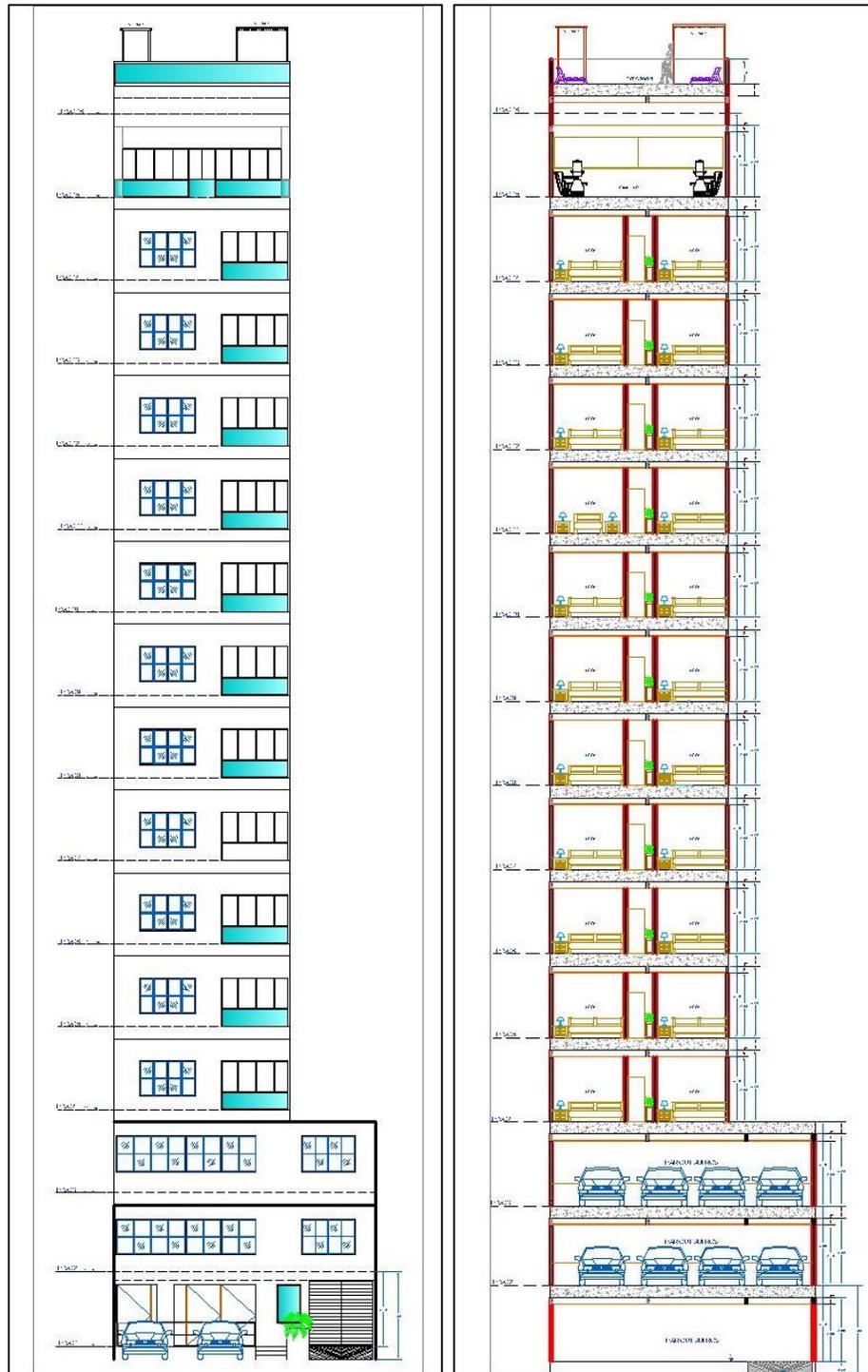


Figura B. 6. Fachada frontal (izquierda) y corte transversal (Derecha) del edificio “Las Flores”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Flores” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.



Figura B. 7. Fachada lateral derecha del edificio “Las Flores”. Fuente: Análisis estructural edificio “Las Flores” realizado por el Ingeniero Civil Jairo Alvis Aly, 2016.