

Comparación Técnica-Económica de Cimentaciones Superficiales en Edificios Sismorresistentes de Acero y Hormigón Armado
Technical-Economic Comparison of Surface Foundations of Seismic-Resistant Steel and Reinforced Concrete Buildings

Mgs. Abril Camino Andrés Rafael; PhD. Pablo Enrique Caiza Sánchez

APRENDIZAJE

Junio, V°4-N°1; 2023

- ✓ **Recibido:** 20/04/2023
- ✓ **Aceptado:** 18/05/2023
- ✓ **Publicado:** 30/06/2023

PAIS:

- 📍 Ecuador, Ambato
- 📍 Ecuador, Quito

INSTITUCIÓN

- Pontificia Universidad Católica del Ecuador
- Escuela Politécnica del Ejército
- Pontificia Universidad Católica del Ecuador

CORREO:

- ✉ aabril0402@pucesm.edu.ec
- ✉ pcaiza@pucesm.edu.ec
- ✉ pecaiza1@espe.edu.ec

ORCID:

- 🌐 <https://orcid.org/0000-0003-1342-2651>
- 🌐 <https://orcid.org/0000-0003-1254-0867>

FORMATO DE CITA APA.

Abril, A. Caiza, P. (2023) *Comparación Técnica-Económica de Cimentaciones Superficiales en Edificios Sismorresistentes de Acero y Hormigón Armado* Revista G-ner@ndo, V°4 (N°1), 1139 – 1181.

Resumen

La cimentación es una de las partes más esenciales de una estructura, la presente investigación parte de las reacciones producidas en la base de 9 arquetipos de acero estructural y 9 arquetipos de hormigón armado, se ha considerado un suelo semirrígido con características similares de cohesión, capacidad de carga, ángulo de rozamiento interno para el análisis de los 18 arquetipos en los que hay 3 niveles, 8 niveles y 12 niveles, variando en tres ocasiones la distancia entre ejes de los mismos. Considerando la acción de momentos flexionantes y carga axial puntal en la intersección de los ejes. La cimentación se considera desde debajo del nivel 0+00, analizando y considerando el correcto comportamiento estructural de las cimentaciones a cortante, flexión, punzonamiento y aplastamiento. Verificando el refuerzo mediante software de elementos finitos. El tipo de cimentación se ha considerado en función de la necesidad y características del arquetipo de forma que satisfaga las necesidades estructurales, se han considerado las siguientes opciones estructurales: zapata aislada, zapata extendida y cimentación de vigas, siendo las mismas cimentaciones poco profundas. También se ha considerado el las posibles excentricidades en cargas puesto se han considerado cargas concéntricas sobre las cimentaciones y adicionalmente cargas excéntricas puesto que las mismas no coinciden con el centro de gravedad del elemento, el diseño se ha realizado según consideraciones ACI 318-19. Se han asumido las mismas consideraciones de suelo para todos los arquetipos analizados. Finalmente, partiendo de cimentaciones estructuralmente funcionales, se comparan dimensiones, secciones y coste de los 18 arquetipos para determinar el tipo de sistema estructural, empleando un análisis de precios unitarios para determinar que material demanda una cimentación más económica.

Palabras clave: Cimentación superficial, losa, viga, zapata, análisis de precios unitarios.

Abstract

The foundation is one of the most essential parts of a structure, the present investigation starts from the reactions produced at the base of 9 archetypes of structural steel and 9 archetypes of reinforced concrete, a semi-rigid soil with similar characteristics of cohesion, load capacity, angle of internal friction has been considered for the analysis of the 18 archetypes in which there are 3 levels, 8 levels and 12 levels, varying in three occasions the distance between axes of the archetypes. The foundation is considered from below level 0+00, analyzing and considering the correct structural behavior of the foundations in shear, bending, punching and crushing. Verifying the reinforcement using finite element software. The type of foundation has been considered according to the need and characteristics of the archetype in order to satisfy the structural needs, the following structural options have been considered: isolated footing, spread footing and beam foundation, being the same shallow foundations. The possible eccentricity loads have also been considered since concentric loads on the foundations and additionally eccentric loads have been considered since they do not coincide with the center of gravity of the element, the design has been carried out according to ACI 318-19 considerations. The same soil considerations have been assumed for all the archetypes analyzed. Finally, starting from structurally functional foundations, dimensions, sections and cost of the 18 archetypes are compared to determine the type of structural system, using a unit price analysis to determine which material demands a more economical foundation.

Keywords: Shallow foundation, slab, beam, footing, unit price analysis

Introducción

El cuestionamiento sobre cuál cimentación es la más económica considerando dos materiales más empleados en la construcción en Latinoamérica en superestructuras: acero estructural y hormigón armado de edificios (Villamil, 2008); los cuales cumplen con parámetros de sismo resistencia nacional e internacional, ha llevado a una discusión que se mantiene hasta actualidad, y aún se desconoce. La presente investigación responde a esa prerrogativa y también establece un criterio científico y sustentado de cuándo y por qué usar un tipo de cimentación superficial respecto a la otra. El objetivo general es comparar técnica y económicamente en cimentaciones superficiales de edificios sismorresistentes de acero y Hormigón Armado. Ecuador cuenta con la Norma Ecuatoriana de la Construcción, con un capítulo exclusivo al análisis de cimentaciones y estudios geotécnicos (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda; Cámara de la Industria de la Construcción, 2015), la cual establece criterios de diseño para el diseño de cimentaciones y ensayos, sin embargo no existe una fundamentación con respecto a cuando emplear una cimentación con respecto a otra, el ACI define claramente las cimentaciones superficiales existentes (American Concrete Institute, 2019), las cuales serán empleadas en la presente investigación, considerando sus propiedades mecánicas y geométricas según la necesidad y cumpliendo con lo dispuesto en los códigos, se verifica que las cimentaciones sean capaces de soportar esfuerzos de cortante, punzonamiento, flexión, aplastamiento y esfuerzos, conjuntamente con las cuantías de acero partiendo de la observación y estudio de diferentes tipos de cimentaciones superficiales empleadas en métodos constructivos, y establecidas en normativas se establecen 4 tipos de cimentaciones superficiales: vigas de cimentación, mediante

investigaciones previas se establece la hipótesis de que las cimentaciones de estructuras sísmo resistentes en acero son más económicas y tienen menos volumen constructivo que las cimentaciones de arquetipos con superestructura de hormigón armado, por lo que mediante la experimentación se corrobora la hipótesis planteada, adicionalmente se establece cual es el tipo de cimentación superficial más óptimo en cada arquetipo de estudio y se comparará el incremento de costo, secciones, volúmenes de obra entre ambos sistemas estructurales y excentricidad o no (Navarro C., 2022).

El dimensionamiento de cimentaciones superficiales puede realizarse mediante la capacidad de carga en el suelo considerado por Terzaghi (Taghvamanesh & Ziaie Moayed, 2019), sin embargo, esta metodología no considera la sobre carga establecida por dos cimentaciones demasiado juntas, se establecen parámetros de cuando emplear diferentes tipos de cimentaciones superficiales (Braja, 2012), dicho autor sugiere empezar con cimentaciones aisladas, continuar con zapatas corridas o zapatas mixtas y en casos de existir una capacidad de carga baja en el suelo y esta no puede ser mejorada claramente se recomienda usar losas de cimentación, la excentricidad en cargas influye directamente en el tamaño de cimentaciones e influyen también los momentos flectores fuera del centro geométrico de la cimentación (Luévanos, López, M., & Sandoval, 2020). En el artículo: “Análisis sísmico de un edificio de doce pisos...considerando interacción suelo estructura” se analiza un edificio de hormigón armado y se puede evidenciar que se han empleado suelos tipo C en la modelación, así como la implementación de vigas de cimentación con 1,2 m. de Altura, (Aguar & Ortiz, 2017), lo que establece una base de una posible cimentación superficial a usar. Un análisis estructural detallado acompañado de una adecuada distribución arquitectónica puede dar el caso del uso de

zapatas combinadas trapezoidales (Pasillas, Alberto, López, Medina, & Manuel, 2021), o un cambio entre una sección de columna a otra podría inducir a la colocación de zapatas trapezoidales, en el presente estudio mediante un modelo más generalista se establecen zapatas rectangulares y cuadradas buscando la máxima optimización de costos y teniendo dimensiones de columnas similares entre medianeras, centrales y esquineras. La distribución de las zapatas está dada netamente en función de la configuración arquitectónica puesto que una zapata más óptima siempre tendrá cargas concéntricas a su centroide geométrico (García-Galván, Luévanos-Rojas, López-Chavarría, Medina-Elizondo, & Rivera-Mendoza, 2022). Adicionalmente basándose en el estado del arte se ha tomado un modelo de interacción del suelo netamente a compresión (Montes-Paramo, Luevanos-Rojas, López-Chavarría, Medina-Elizondo, & Sandoval-Rivas, 2023). Juntamente con los parámetros mínimos establecidos en la normativa se busca definir el costo más óptimo de diseño en cimentaciones, cumpliendo con requisitos se optimizará secciones economizando costos de construcción. Existen diversas formulaciones que buscan optimizar el diseño de cimentaciones superficiales para una optimización de recursos. (Chagoyén, Negrín, Cabrera, López, & Padrón, 2009)

El presente artículo parte de la reacciones: axial y de momentos Bi axiales flexionantes en la base de 18 arquetipos estructurales sismo resistentes (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015), 9 en acero estructural, dimensionadas según lo dispuesto en el American Institute of Steel Construction (American Institute of Steel Construction, 2022) y 9 en hormigón armado, con la finalidad de comparar primero los momentos y carga axial puntual en dirección gravitacional, posterior se prediseño las cimentaciones y se inserta las reacciones de la base en un software de elementos finitos

en los cuales se considera cargas concéntricas es decir que la carga coincide directamente con el centro de gravedad de la cimentación y cargas excéntricas, mediante la asignación de propiedades geotécnicas del suelo las mismas propiedades en todo los casos al tratarse de un suelo semi duro sin evidencia de nivel freático (Jawad & Shakir, 2021), todas las 18 estructuras tendrán un mismo nivel de desplante, ya que es un factor que podría variar el costo e influencia en las propiedades geotécnicas del suelo (Ibáñez, 2017) se asignará según el requerimiento de la cimentación más económica: plintos aislados, a la más costosa: vigas de cimentación verificando mediante las consideraciones de diseño establecidas en el ACI 318-19, al considerar cargas excéntricas en las esquinas y bordes estructurales se permite visualizar el incremento en el costo y cambio de cimentación según la necesidad lo que permite llegar a las conclusiones expresadas en la presente investigación.

La geometría de los arquetipos planteados para la obtención de reacciones en la presente investigación está establecida en la tabla 1.

Tabla N. 1. Distancia entre ejes de estructuras modeladas

Arquetipos de pórticos de acero y hormigón armado				
Niveles	N.	Material constructivo	Longitud entre ejes	Grupos
3 niveles	1	Hormigón armado	4-5 (m)	G1
	2	Acero A36		
	3	Hormigón armado	5-7 (m)	G2
	4	Acero A36		
	5	Hormigón armado	7-9 (m)	G3
	6	Acero A36		
8 niveles	7	Hormigón armado	4-5 (m)	G1
	8	Acero A36		

	9	Hormigón armado	5-7 (m)	G2
	10	Acero A36		
	11	Hormigón armado	7-9 (m)	G3
	12	Acero A36		
12 niveles	13	Hormigón armado	4-5 (m)	G1
	14	Acero A36		
	15	Hormigón armado	5-7 (m)	G2
	16	Acero A36		
	17	Hormigón armado	7-9 (m)	G3
	18	Acero A36		

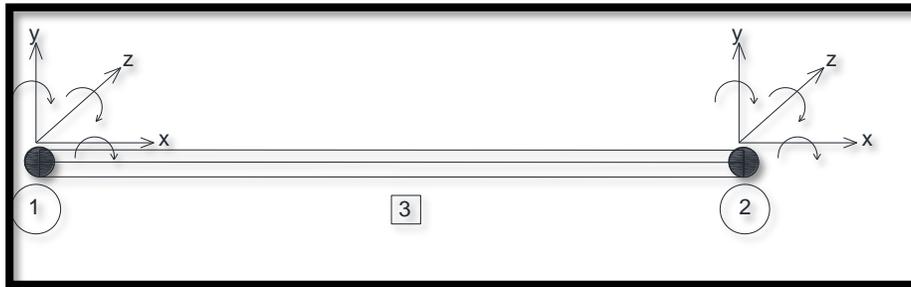
Materiales Y Métodos

Posterior a la visualización y experiencia basada en la práctica profesional se procede con la investigación por lo que se basa en la investigación modelaciones previas (Abril-Camino, Abril-Camino, Cadena, & Perez, 2023), materiales se puede considerar como la investigación previa de los autores, y de equipo se emplea un computador. Se define tres grupos por niveles o piso y tres alturas diferentes lo que establece un total de 18 arquetipos de los cuales se ha considerado cargas de servicio para la exportación al software de elementos finitos, considerando elementos tipo Shell thin y tipo frame.

Elementos frame

Son elementos estructurales tridimensionales empleados en la modelación y análisis estructural. Estos elementos contienen nodos de conexión, en sus extremos que representan los puntos de unión con otros elementos o restricciones. Cada nodo puede tener hasta seis grados de libertad, según los planos de análisis incluyendo desplazamientos y rotaciones. se caracterizan por tener una rigidez axial alta los tipos de elemento frame más comunes son: barra, pórtico, columna y viga 3D.

Figura N. 1. Elemento tipo frame en vista bidimensional



La figura 1 muestra una barra está considerado como 3 y los dos nodos numerados como elemento 1 y dos porque todo elemento tipo frame tendrá tres desplazamientos y tres rotaciones por nodo.

Elementos Shell thin

Permite modelar estructuras de láminas o superficies delgadas transmite cargas sobre el plano y perpendiculares al mismo a través de cargas normales, tiene un número de nodos según su geometría, su análisis es bi axial, presenta una rigidez alta a la flexión y se suele dividir en múltiples áreas a partir de un análisis más extenso permitiendo una mayor interacción entre nodos. Los elementos Shell thin tienen 6 grados de libertad por nodo, desplazamiento y rotación en cada eje dando un total de 36 GDL (Caliri, Ferreira, & Volnei, 2016).

Figura N. 2. Elemento tipo Shell thin con sus nodos existentes

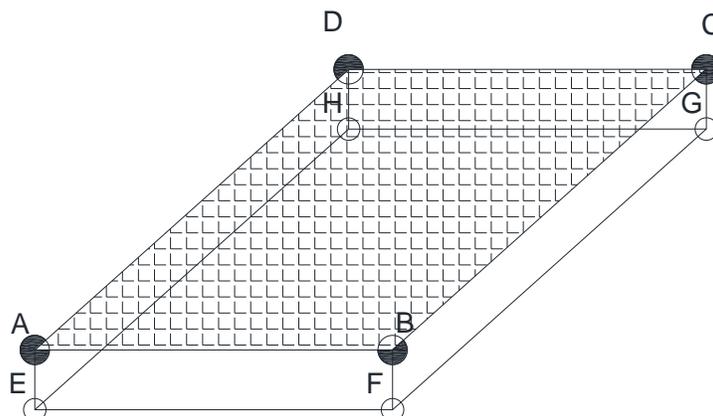
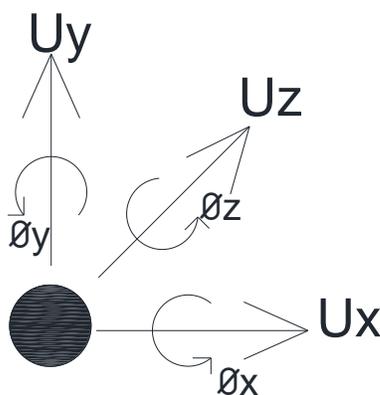


Figura N. 3. Grados de libertad por nodo en un elemento Shell thin.



La figura N.3 muestra los desplazamiento y giros que se pueden producir en un nodo Shell Thin, indicando 6 GDL por nodo, pudiendo se estos positivos y negativos

Tipos de cimentaciones y análisis previo de volúmenes de construcción

Según la localización de cargas

Desde el punto de vista de capacidad, las cimentaciones concéntricas tienen mayor capacidad que una cimentación excéntrica, si consideramos la misma sección; por lo que para tener la misma capacidad se deberá aumentar secciones y armado.

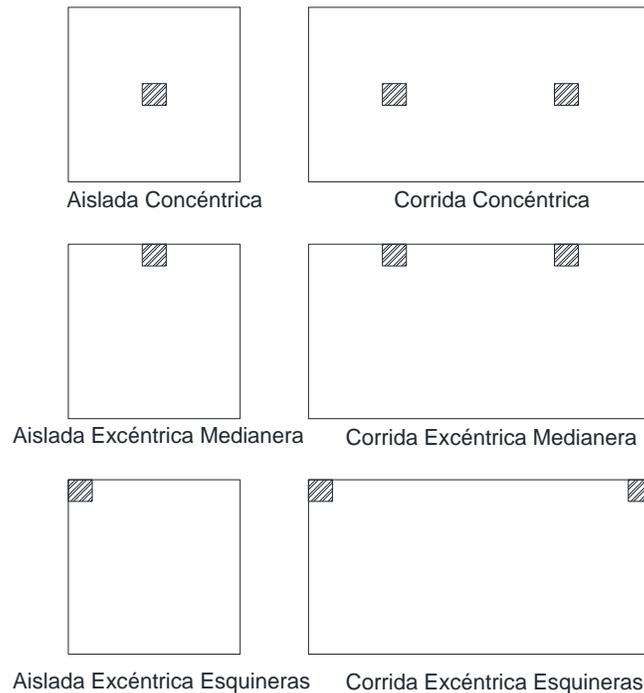
Dando como resultado que es preferible tener una cimentación concéntrica que excéntrica.

Al considerar el uso de cimentaciones excéntricas están limitadas a la implantación del proyecto, lo más económico desde el punto de vista constructivo es implementar secciones de menor dimensión. Por lo que una estructura sin adosamiento, aislada, es lo más económico referente a cimentaciones.

Braja Das, hace una diferenciación en la excentricidad en dos sentidos por lo que la cimentación excéntrica medianera tiene solo una excentricidad en un sentido, para considerar zapatas corridas concéntricas se establece como dos zapatas aisladas concéntricas, en las excéntricas esquineras es el ejemplo de una cimentación con excentricidad en los dos sentidos.

Las cimentaciones en la presente investigación corresponden a cimentaciones cargadas axialmente en sentido gravitacional y con momentos flectores bidireccionales, también se ha considerado el efecto del punzonamiento según las columnas en el caso de las estructuras de acero y pedestales sobre los cuales estarán las columnas metálicas en las estructuras de acero (Vanapalli, K., Oh, & Won-Taek, 2021).

La figura N. 4 muestra zapatas cargadas concéntrica y excéntricamente.

Figura N. 4. Elemento tipo frame en vista bidimensional

Según el tipo de cimentación

En las zapatas o plintos aislados constan de un refuerzo de acero en el inferior de la zapata, en forma bidireccional. En el caso de zapatas corridas, el refuerzo de acero va en la parte superior e inferior de la zapata igual de forma bidireccional, de la misma forma en losas de cimentación, en caso de que la altura de las losas supere los 91.44 cm o 36 pulg. Se requerirá de armadura de piel. En el caso de vigas de cimentación estas estas compuestas como su nombre lo indica por una viga y adicionalmente una losa, la viga estará armada acero a flexión longitudinal y refuerzo de cortante como estribos en la losa estará armada por acero bidireccional en el mismo según el espesor de la losa esta podrá tener o no refuerzo de piel al superar la altura de 36 pulg. Según lo dispuesto en 9.7.2.3 del ACI 318-14.

Por volúmenes de obra se puede deducir mediante una inspección visual que de menor a mayor volumen de obra están las siguientes cimentaciones superficiales: zapata aislada, zapata corrida, losa de cimentación y viga de cimentación, está presenta rubros adicionales con respecto a las anteriores pues requiere de encofrado para dar la forma a la cimentación.

La Figura N.5. Muestra los diferentes tipos de armado de las cimentaciones empleadas en la presente investigación.

Figura N. 5. Vista en elevación de diferentes tipos de armado de cimentación

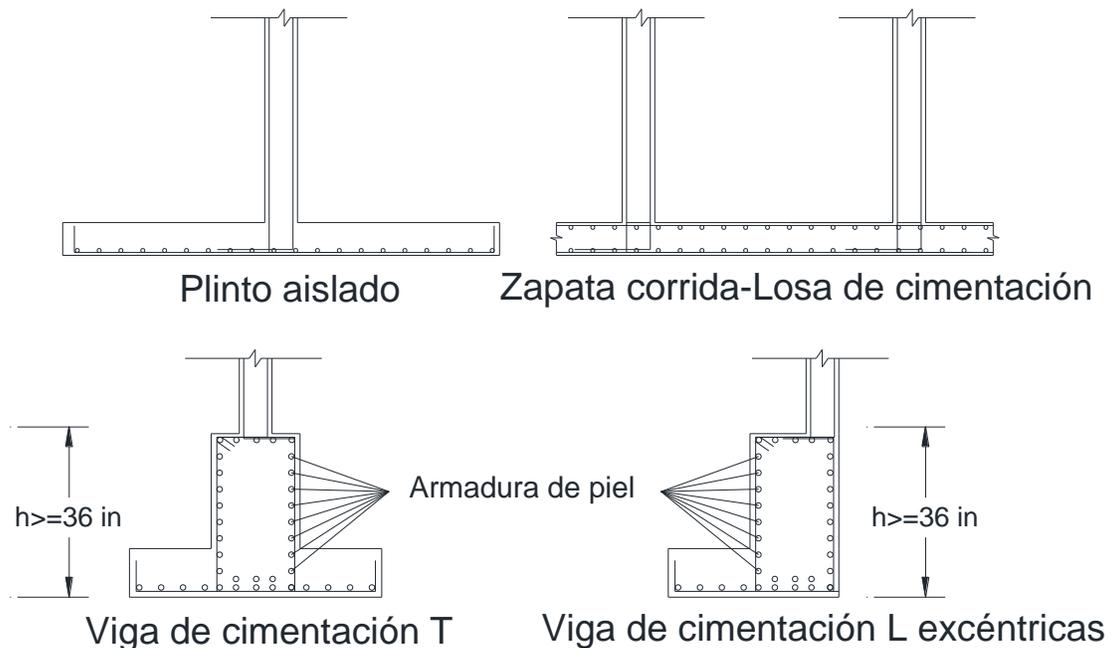
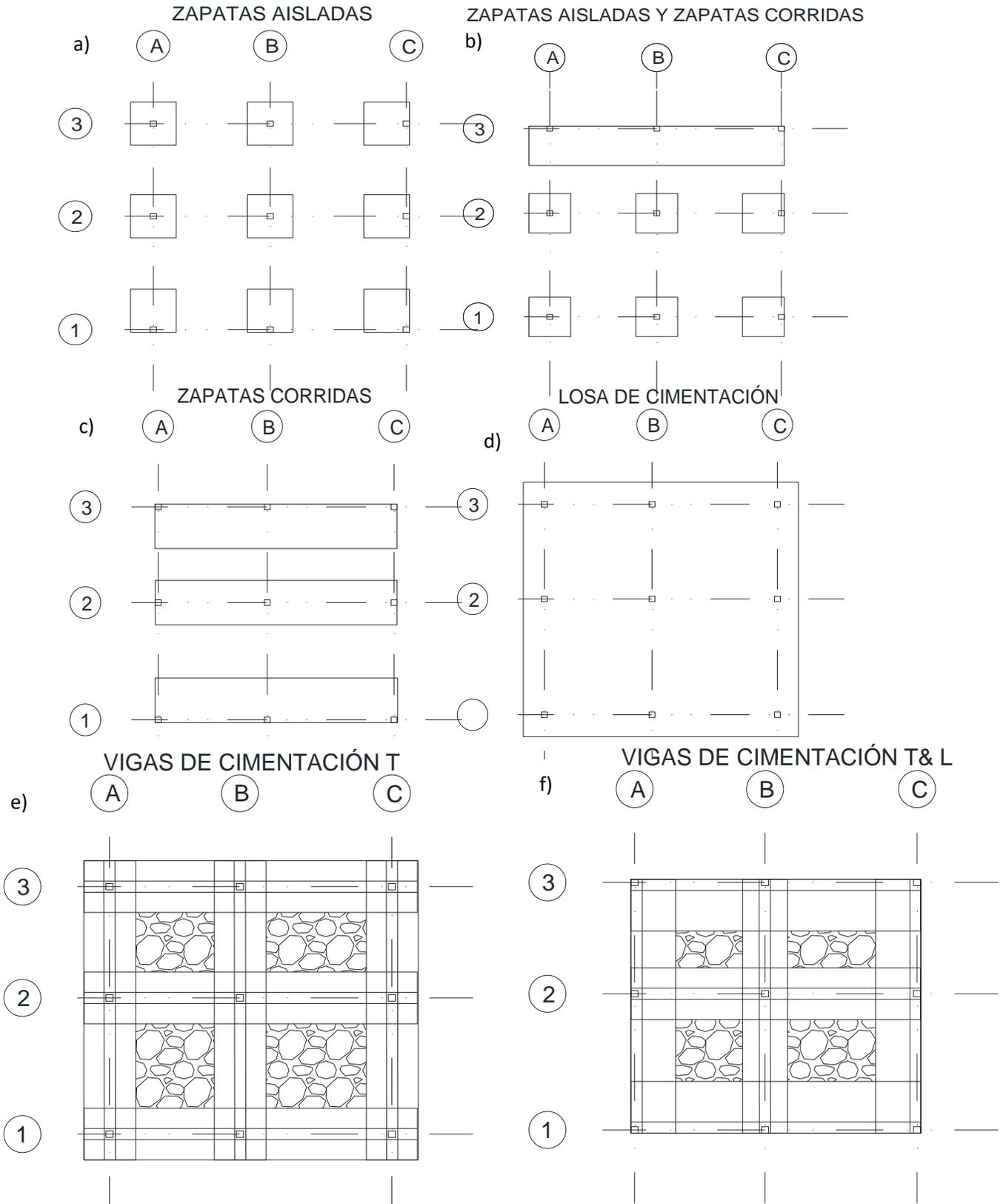


Figura N. 6. Vista en planta de cimentaciones superficiales



En la figura 6 se observa vista en planta de cimentaciones superficiales casos reales, el cuadro e) se muestra vigas de cimentación tipo T, f) cuando la carga es concéntrica y tipo L cuando es excéntrica

Consideraciones geotécnicas suelo y de material

Se define características de suelo para todos los 18 casos de estudio donde:

- Se tiene un desplante de 2.30 m de profundidad donde se obtiene el Q_{adm} .
- La capacidad portante del suelo corresponde Q_{adm} . A 14 Ton/m^2 sin presencia de nivel freático, lo cual permite no considerar drenajes (García-Torres & Phani Madabhushi, 2019).
- Se tiene una densidad de 1.75 kg/cm^3 ; Coeficiente de Balasto de 2.92 kg/m^3 (Lysandros, 2019).
- Mediante una estimación de la velocidad de la onda de corte al estar entre $360 \text{ m/s} > V_s > 180 \text{ m/s}$ se establece un suelo tipo D.
- El tipo de suelo es arena es suelta seca.
- Para todas las cimentaciones se ha considerado un hormigón con resistencia a la compresión de $f'_c = 240 \text{ kg/m}^2$
- El acero de refuerzo de las cimentaciones es el $f'_y = 4200 \text{ kg/m}^2$

Cargas empleadas

El área del arquetipo G1 corresponde a 125 m^2 por piso, le sigue el arquetipo G2 que tiene un área de 224 m^2 y finalmente el arquetipo G3 tiene un área de 405 m^2 por piso siendo este el mayor. se parte de un análisis clásico de cimentaciones considerando

cargas gravitacionales (Yepez-Piqueras & Víctor, 2020) y el peso propio (Auvinet & Pérez, 2016), según las recomendaciones de la NEC, (Secretaría de Gestión de Riesgos; Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Oficina de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Comisión Europea, 2016). Se considera como factores de seguridad la carga muerta considerando todo el peso que posee la estructura y elementos fijos, así como la carga viva nominal y máxima (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

La tabla 2 muestra las cargas consideradas para el análisis obtenidas como reacciones para el análisis del artículo en las dos columnas finales de la tabla se visualiza las dimensiones del pedestal actuantes sobre la cimentación.

Tabla N. 2. Cargas consideradas en el arquetipo G2 de 8 Niveles

8P Arquetipo G2 de Acero Estructura;					
LoadPat	Fgrav	Mx	My	XDim	YDim
Dead_ABOVE	38.0399	-0.8881	-0.00312	0.65	0.4
Live_ABOVE	15.0856	-0.78714	-0.02202	0.65	0.4
ACM_ABOVE	7.4034	-0.77195	-0.02019	0.65	0.4
Dead_ABOVE	21.9761	-0.45135	-0.10801	0.65	0.4
Live_ABOVE	7.4503	-0.39011	-0.04356	0.65	0.4
ACM_ABOVE	3.548	-0.38499	-0.03356	0.65	0.4
Dead_ABOVE	73.1763	-0.00209	0.06711	0.65	0.4
Live_ABOVE	32.0433	-0.00242	0.04099	0.65	0.4
ACM_ABOVE	15.8077	-0.00279	0.02582	0.65	0.4

Se visualiza las reacciones de carga axial, centrales esquineras y medianeras de los 18 arquetipos en el presente caso de estudio. En las Tablas N.3 y N.4.

Tabla N. 3. Carga Axial aplicada sobre la cimentación en arquetipos de H.A

Reacciones en arquetipos de hormigón armado										
Tipo	N. Pisos	Grupo	Pu. Dead	N. Pisos	Grupo	Pu. Dead	N. Pisos	Grupo	Pu. Dead	
Centrales	3	G1	35.4864	8	G1	100.9058	12	G1	170.1042	
Medianeras			19.6512			64.0539			119.1547	
Esquinas			11.6932			44.1506			88.8621	
Centrales		G2	73.7901		G2	205.9617		G2	368.6138	
Medianeras			42.8892			130.5636			247.836	
Esquinas			24.5449			85.1027			175.0086	
Centrales		G3	G3		140.2029	G3		400.2396	G3	665.1555
Medianeras					82.9686			252.5534		444.9842
Esquinas					46.8653			156.5418		297.0865

Tabla N. 4 Carga Axial aplicada sobre la cimentación en arquetipos de Acero

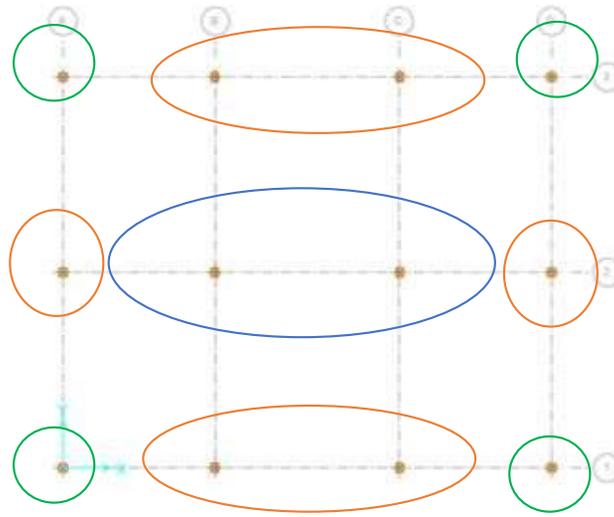
Reacciones en arquetipos de acero estructural A36										
Tipo	N. Pisos	Grupo	Pu. Dead	N. Pisos	Grupo	Pu. Dead	N. Pisos	Grupo	Pu. Dead	
Centrales	3	G1	15.9163	8	G1	40.273	12	G1	70.9179	
Medianeras			8.5874			22.8386			43.0161	
Esquinas			5.0206			14.3528			28.3798	
Centrales		G2	28.279		G2	73.1763		G2	109.3244	
Medianeras			14.0749			38.0399			59.802	
Esquinas			7.6103			21.9761			36.8918	
Centrales		G3	G3		52.7129	G3		141.4663	G3	208.1115
Medianeras					25.5575			71.6924		107.6742
Esquinas					13.2733			40.3053		63.4453

En el caso de columnas centrales son las que mayor carga gravitacional soportan puesto que el área de influencia es mayor seguido de las medianeras y la que menor carga influye son las cargas esquineras. Adicionalmente se visualiza que la carga de acero es considerablemente menor en relación a las cargas de hormigón armado, pese a que se mantiene el mismo número de pisos, y área esto se da por que las secciones de área bruta de acero son menores que las de hormigón armado. Esta premisa nos

permite pensar que las secciones de cimentaciones en arquetipos de hormigón armado serán mayores que en acero estructural.

Punto de aplicación de las cargas

Figura N. 7 Distribución de cargas según el punto de aplicación en la base



La figura 7 muestra las cargas según el punto de aplicación el hecho de que sean concéntricas o excéntricas dependerá de la ubicación de la zapata y esta estará limitada por condiciones de implantación en el terreno o arquitectura, la elipse azul corresponde a cargas centrales, las elipses naranjas a cargas medianeras y finalmente los círculos verdes a cargas esquineras.

Factores de influencia.

Partiendo del radio sobre el que actúa la carga:

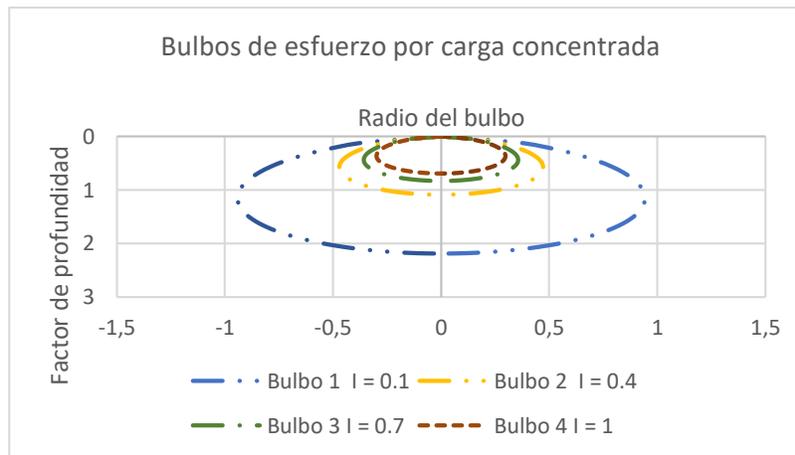
$$r = \sqrt{\frac{z^6}{\left(\frac{2\pi I_0}{3}\right)^{\frac{2}{5}}} - z^2}$$

Se busca obtener que el radio sea igual a cero, por lo que el factor de profundidad z .

$$z = \sqrt{\frac{3}{2\pi I_0}}$$

Donde I_0 , es el factor de Influencia, z es un factor profundidad y r el radio sobre el que actúa; la carga axial (Crespo, 2004).

Figura N. 8. Factores de influencia en cargas concentradas de cimentaciones superficiales



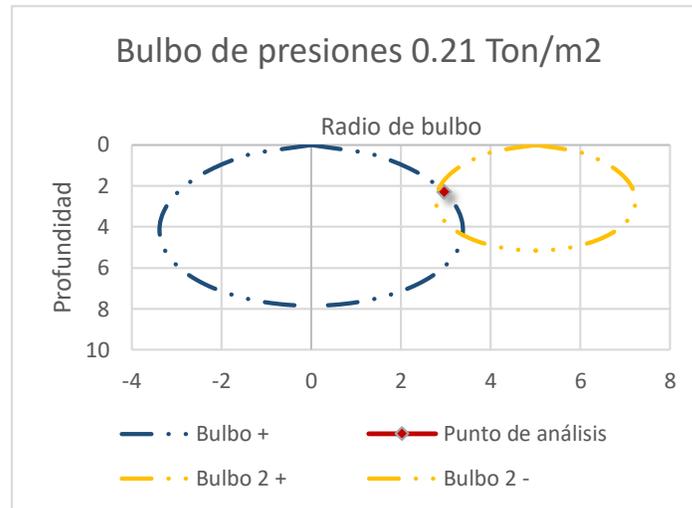
De la figura 8, se deduce que a un factor de profundidad de 2.25 la influencia de la carga es casi nula $I=0.1$, mientras la influencia sea mayor $I=1$, está estará a menor profundidad, pero y a una longitud menor con toda la influencia de la carga la misma se visualiza a un factor de profundidad de 0.7 en el eje de las X.

El bulbo de presiones permite interpretar el área y profundidad de la influencia de una carga se tomará como ejemplo las cargas de arquetipo G1 de hormigón armado de 3 pisos y el arquetipo G2 de 8 pisos de acero estructural.

Arquetipo G1, 3 pisos diseñado en hormigón armado. En base a la arquitectura se tiene una distancia entre ejes de 5 m. En el eje B1 se considera una zapata medianera con un desplante de 2.3 m, una carga axial de 19.65 Tonf. en la cimentación esquinera

con una longitud 2.1m de largo y 2.1 de ancho de y carga axial de 11.65 Tonf. y con una longitud 1.55 m de largo y 1.55 de ancho de y carga axial.

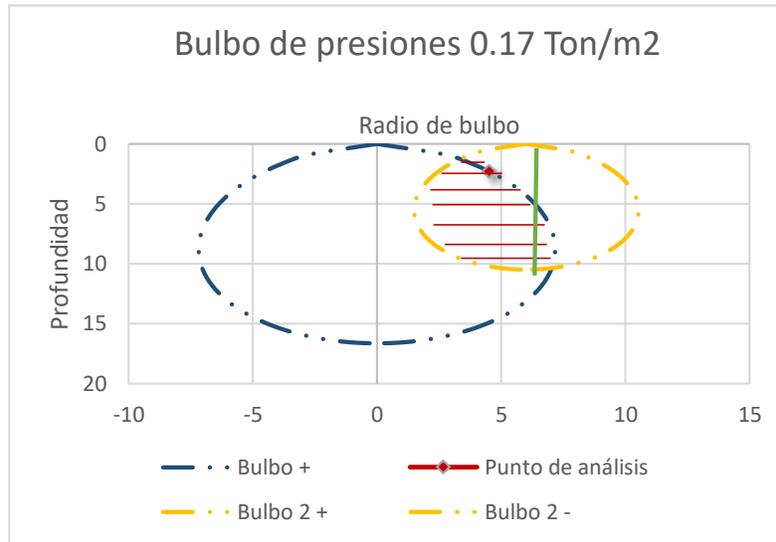
Figura N. 9. Caso de análisis de bulbo de presiones arquetipo G1, 3 pisos en hormigón armado



De la figura N.9, se analiza un punto en el radio de desplante de 2.3 m de profundidad. El área sombreada de rojo indica la intersección entre ambos bulbos cuando la intersección invade el 50% del bulbo junto a él se produce una suma de cargas en influencia comportándose como bulbos conjuntos y aumentando el esfuerzo de la zapata por lo que se debe cambiar de zapata aislada a zapata corrida con ese cambio se tiene una distribución más uniforme y menor presión en la zapata.

Arquetipo G2, 8 pisos diseñado en acero estructural. En base a la arquitectura se tiene una distancia entre ejes de 6 m. En el eje B2 se considera una zapata central con un desplante de 2.3 m, una carga axial de 73.18 Tonf. en la cimentación medianera con una longitud 3.2 m de largo y 3.2 m de ancho de y carga axial de 73.18 Tonf. y con una longitud 2.5 m de largo y 2.5 m de ancho de y carga axial.

Figura N. 10. Caso de análisis de bulbo de presiones arquetipo G2, 8 pisos en hormigón armado



De la figura 10, se analiza que el área sombreada supera el 50% del bulbo por lo que no se puede trabajar con una cimentación aislada esta debe ser corrida, para soportar el esfuerzo en Ton/m². La línea verde indica la mitad del bulbo de esfuerzos por lo que se debe ocupar zapatas corridas

Tras diversos análisis se determina que no existe bulbos de presión mayores al 50% si se tiene una distancia libre entre ejes de la cimentación mayor o igual a $L/3$.

$$\text{Si Longitud de eje libre} \geq \frac{L}{3} \rightarrow \text{Zapata Aislada}; \notin \text{ Zapata corrida}$$

En el caso de losas de zapatas corridas:

$$\text{Si } \frac{\text{Área libre de cimentación}}{\text{Área total de cimentación}} \geq 35\% \rightarrow \text{Zapata corrida}, \notin \text{ Losa de cimentación}$$

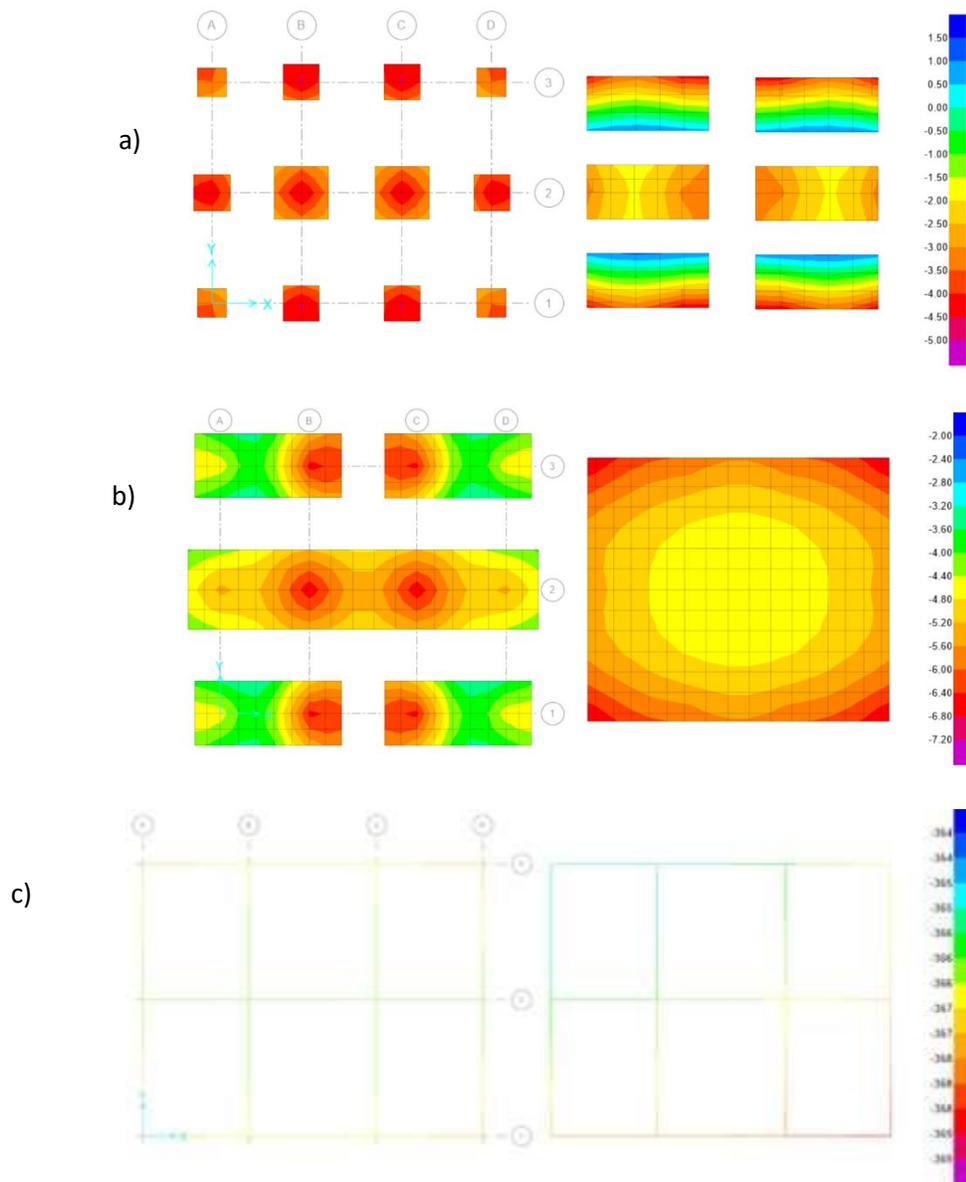
Dichas aseveraciones se han corroborado en la presente investigación adicional al bulbo de presiones mediante un software de elementos finitos mediante los 18 arquetipos.

Verificaciones de diseño

Partiendo del prediseño se verificará asentamientos máximos, punzonamiento por cortante, flexiones de esfuerzos (Gajo, Debiasi, & Zonta, 2013) y cuantía mínima de cada arquetipo, en un software de elementos finitos propio de cimentaciones.

Asentamientos máximos

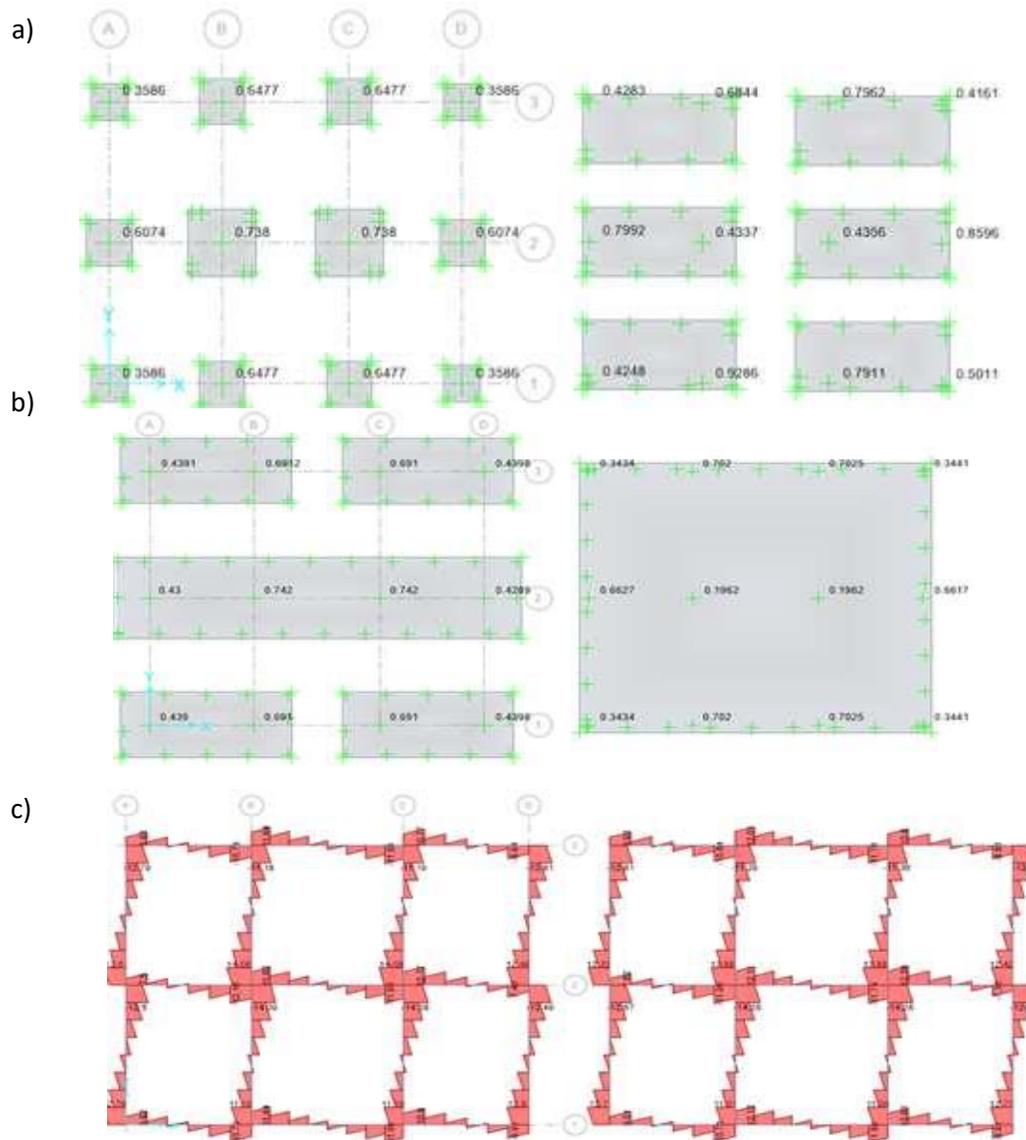
Figura N. 11. Desplazamientos máximos de las cimentaciones de tres arquetipos (mm)



Se debe identificar según el tipo de suelo sobre el cual se implantará la cimentación superficial y disponer de un análisis de penetración estándar Stándar Penetration Test, para poder ocupar un método con mayor precisión y determinar si se trata de un asentamiento por consolidación, elástico, inducidos (Hussein, et al., 2021), o inmediatos en el presente trabajo se toma más generalizadamente. Partiendo del tipo de la estructura y al tratarse de arena suelta se establece un asentamiento máximo para zapatas corridas, aisladas y losas de cimentación de 50 mm. En la figura 11 a) y b) se visualiza que ningún desplazamiento considerando un suelo que actúa sobre la cimentación netamente a compresión alcanza el asentamiento máximo requerido para este tipo de cimentación, en el caso de vigas de cimentación c), éstas deberán diseñarse a momento flector y cortante ya que soportan altas presiones y carga axial (Bahadori & Hasheminezhad, 2019).

Punzonamiento por cortante

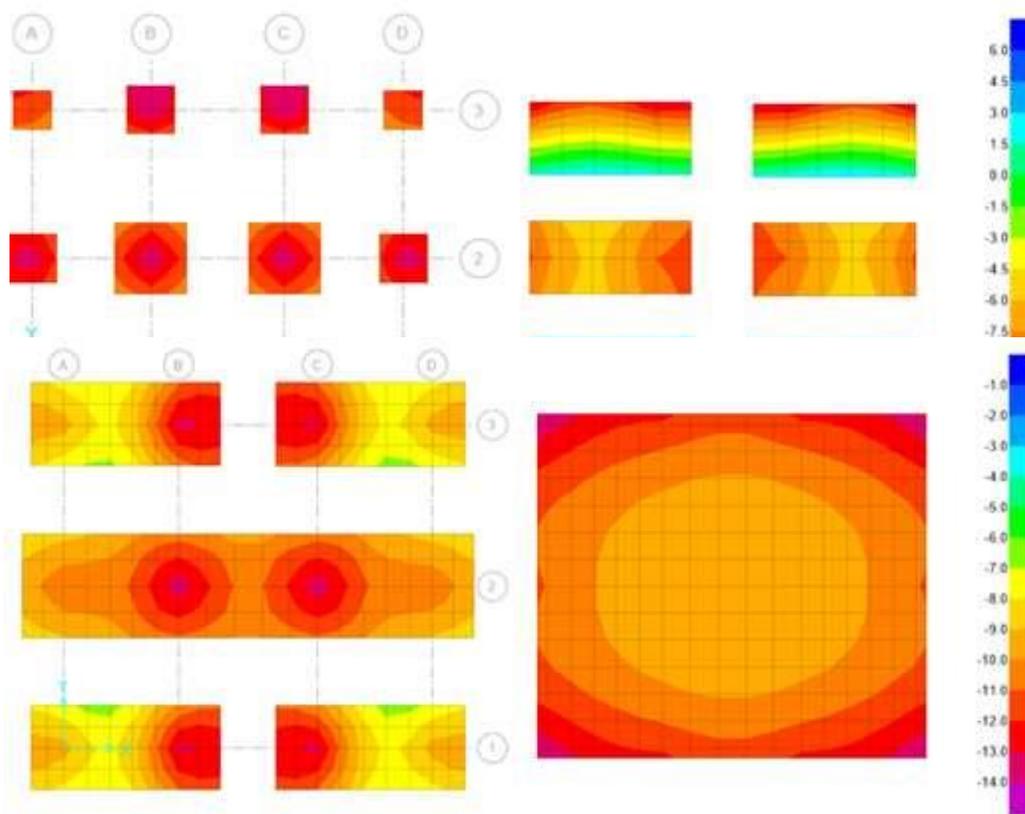
El radio de capacidad está dado por la demanda de cortante requerida en un perímetro específico/la capacidad del concreto comprimido junto al suelo teniendo que esta ser menor que la unidad para establecer un factor de seguridad adecuado, el software cálculo las cimentaciones tipo losa a y b figura 12, mediante el área de acción de la columna, sin embargo, para vigas de cimentación este factor no es considerado se recomienda establecer por debajo del Q_{adm} del suelo c) tal como se muestra en la figura 12 c).

Figura N. 12. Punching shear o punzonamiento por cortante de 3 arquetipos

El punzonamiento es uno de los factores imprescindibles en el análisis de una cimentación, si está llegase a fallar toda la estructura es propensa a fallar. Ninguno de los casos anteriores tiene un radio mayor a uno en a) y b) de la figura N. 12. En el caso de c) se debe dividir para el ancho de la viga de cimentación y esta ser menor que el Q_{adm} , no existe ningún valor mayor a 14 Ton/m², por lo que se trata de una cimentación que cumple con este requerimiento establecido.

Esfuerzos de presión de suelo.

Figura N. 13 Esfuerzos de presión obtenido en dos arquetipos



El cálculo de los esfuerzos está limitado para elementos tipo Shell, donde estos deben ser menor que el q_{adm} obtenido del estudio de suelos, se establece como soporte en la base del elemento finito tipo Shell las restricciones en U_x , U_y y R_z .

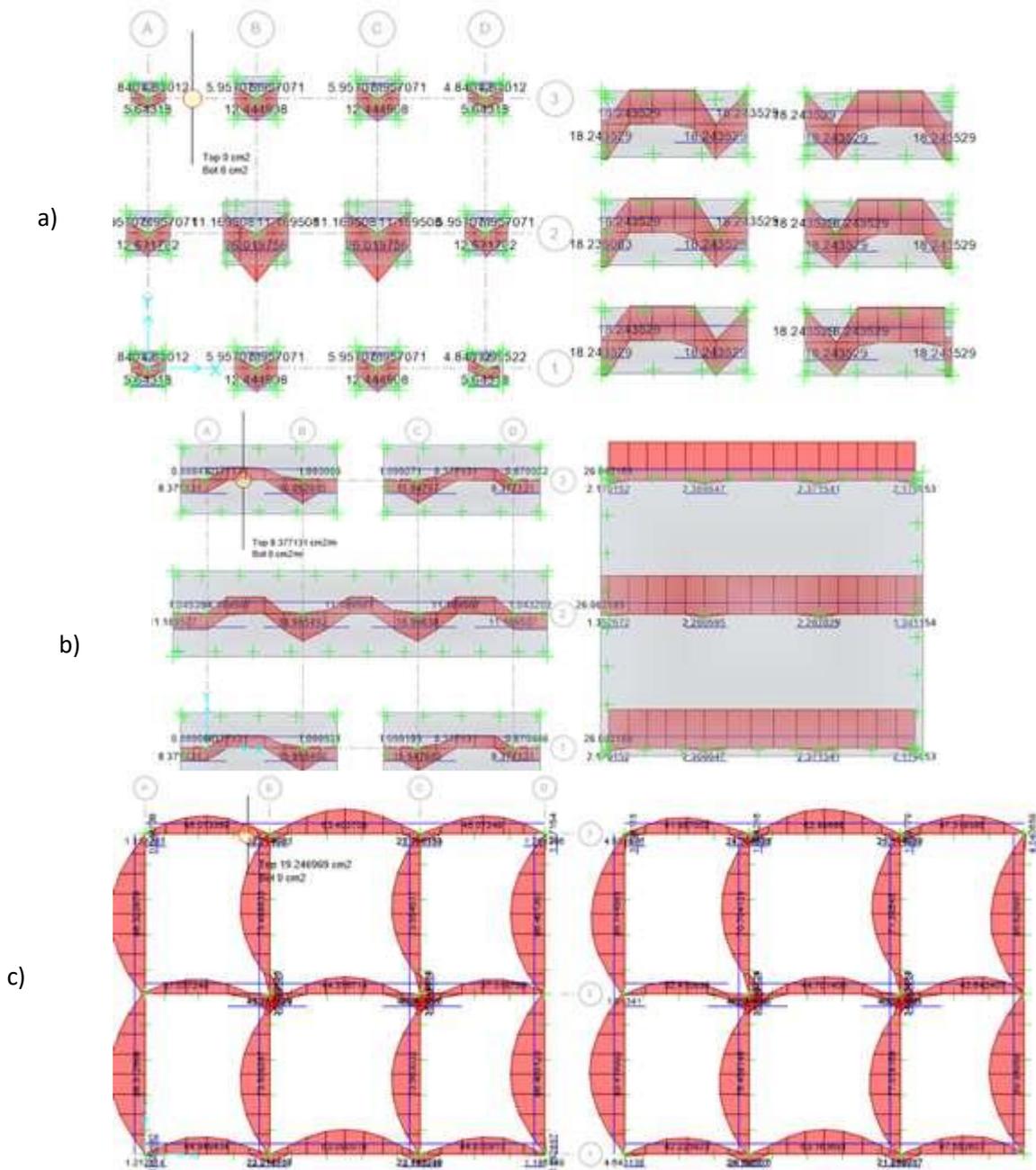
En el caso de análisis ningún elemento tipo Shell llega a 14 tonf/m² esto se consigue mediante un proceso iterativo, partiendo de un prediseño para cumplir con las solicitaciones de diseño.

La figura 13 muestra los esfuerzos o presiones de suelo de elementos tipos Shell mediante un análisis por el método de elementos finitos y considerando solo la

compresión del suelo mediante el módulo de Winkler considerando como un área suelta sin nivel freático.

Acero de refuerzo

Figura N. 14 Acero de refuerzo a flexión requeridos por tres arquetipos



En la figura 14 a) y b) se coloca franjas de largo y ancho para analizar la cuantía de acero en área determinada, otra metodología es a través de MEF, sin embargo, en franjas se impone el acero mínimo y se tiene valores más distribuidos a partir de la cuantía se considera el armado típico visible en la figura N. 5, se tiene la cuantía del acero en dirección X y Y, y superior e inferior. Para el análisis de las vigas de cimentación c) se trata de un elemento tipo frame y no es necesario la colocación de franjas de área o strips, envigas de cimentación se obtiene acero a flexión y cortante.

Secciones definitivas por arquetipo

Tabla N. 5. Secciones de cimentación obtenidas en arquetipos de H.A.

Arquetipo G1 Hormigón armado 3 pisos						
Concéntricas						
Tipo	Localización	N.	Dimensiones	Espesor	N. (u)	ϕ (mm)
Aislada	Central	2	2.4X2.4	e25	48	12
	Medianeras	6	1.6X1.6	e 20	25	12
	Esquinas	4	1.3X1.3	e 20	11	12
Excéntricas						
Combinada	Centrales	4	5.45x2.45	e 40	X:14; Y:18	12
	Med-Esq.	2	5.45x2.45	e 40	X:28; Y:25	12
Arquetipo G2 Hormigón armado 3 pisos						
Concéntricas						
Aislada	Central	2	3.3x3.3	e 40	35	18
	Medianeras	6	2.3x2.3	e 30	20	18
	Esquinas	4	1.75x1.75	e 20	13	18
Excéntricas						
Combinada	Central	2	6.96x3.3	e 60	X:15; Y:23	18
	Med-Esq.	1	3.8x16.6	e 60	X:11; Y:11	18
	Med-Esq.	1	16.48x4	e 65	X:11; Y:11	18
Arquetipo G3 Hormigón armado 3 pisos						
Concéntricas						
Aislada	Central	2	4.7X4.7	e 60	49	20
	Medianeras	4	3.35X3.35	e 40	32	20
	Medianeras	2	3.15X3.15	e 40	27	20
	Esquinas	4	2.3X2.3	e 35	14	20
Excéntricas						

Losa de Cim.	23.2X18.7		e 75	X:91; Y:113	20	
Arquetipo G1 Hormigón armado 8 pisos						
Concéntricas						
Tipo	Localización	N.	Dimensiones	Espesor	N. (u)	φ (mm)
Aislada + Mixta	Central	1	15x3.2	e 35	X:13; Y:40	16
	Medianeras	4	2.5x2.5	e 25	30	16
	Esquineras	4	1.85x1.85	e 20	30	16
Excéntricas						
Losa de Cim.	13.15x10.65		e 80	84	16	
Arquetipo G2 Hormigón armado 8 pisos						
Concéntricas						
Combinada o Mixta	Central	1	19.6x4.48	e 0.6	32	16
	Med-Esq.	4	8.23x3.6	e 0.45	59	16
Excéntricas						
Losa de Cim.	13.15x10.65		e 1.2	330	16	
Arquetipo G3 Hormigón armado 8 pisos						
Concéntricas						
Losa de Cim.	13.15x10.65		e 90	174	16	
Excéntricas						
Vigas Cime.	Central	2	T 7X5X1.2X1.7	68	20	
	Med-Esq.	4	T 6.5X1.7X4.5x1.2	64	20	
	Med-Esq.	1	L6.3*1.7X.4.5X1	49	20	
Arquetipo G1 Hormigón armado 12 pisos						
Concéntricas						
Losa de Cim.	13.15x10.65		e 90	141	12	
Excéntricas						
Vigas Cime.	Central	3	T3.5X1X4.2X0.8	33	20	
Vigas Cime.	Med-Esq.	4	L3*3X.4.3X1x0.7	31	20	
Arquetipo G2 Hormigón armado 12 pisos						
Concéntricas						
Losa de Cim.	21.3*19.3		e130	231	16&32	
Excéntricas						
Vigas Cime.	Central	3	T6x5x1.8x1	40	20	
Vigas Cime.	Med-Esq.	4	L6x5x1.8x1	42	20	
Arquetipo G3 Hormigón armado 12 pisos						
Excéntricas						
Vigas Cime.	Central	3	T6x5x1.8x1	40	20	
Vigas Cime.	Med-Esq.	4	L6x5x1.8x1	42	20	
Excéntricas						
Vigas Cime.	Central	3	T7.8X6.4X2.3X1.8	73	20	
Vigas Cime.	Med-Esq.	4	L7.8X6.4X2.3X1.8	85	20	

En la tabla 5 se visualiza las secciones y el tipo de cimentación de arquetipos de hormigón armado, así como una descripción breve del armado, se han empleado los 4 tipos de cimentaciones superficiales expuestas en el American Concrete Institute: zapatas aisladas, zapatas corridas o mixtas, losas de cimentación y vigas de cimentación que según previo análisis y en el análisis de precios unitarios están ordenadas del tipo de cimentación más económico al más costoso. Y esto se da no solo por el tema económico a carga axial y momentos biaxial flectores se requerirá mayor sección, cuando exista una distancia libre mayor o igual a $L/3$ en zapatas aisladas se debe requerir a zapatas corridas, o en caso de que las presiones de suelo sean mayor al Q_{adm} , en caso de que la relación del área libre desde los extremos de las cimentaciones esquineras con el área total de las cimentaciones corridas sea menor a al 35% de se requerirá una losa de cimentación y en caso de que la losa de cimentación ni no tenga un área libre para soportar las presiones de suelo se requerirá vigas de cimentación.

Se recomienda primero realizar un mejoramiento de suelo para aumentar la capacidad portante, pero en casos donde sea demasiada baja la capacidad portante y no se alcance a las presiones de suelo con losa de cimentación se deberá diseñar con vigas de cimentación, o se debe ya incluir cimentaciones profundas. Por lo que se recomienda realizar una comparativa entre costos de cimentaciones profundas y vigas de cimentación, pero pasado la tolerancia de cargas sobre la cimentación altas y Q_{adm} alto obligatoriamente se requerirá cimentaciones profundas.

Tabla N. 6. Secciones de cimentación obtenidas en arquetipos de Acero

Arquetipo G1 Acero estructural 3 pisos						
Concéntricas						
Tipo	Localización	N.	Dimensiones	Espesor	N. (u)	ϕ (mm)
Aislada	Central	2	1.85x1.85	e20	14	12
	Medianeras	6	1.35x1.35	e20	8	12
	Esquinas	4	1x1	e20	8	12
Excéntricas						
Combinada	Centrales	4	5.12x1.85	e20	X:7; Y:12	12
	Med-Esq.	2	5.075x1.9	e20	Y:4; X:12	12
Arquetipo G2 Acero estructural 3 pisos						
Concéntricas						
Aislada	Central	2	2.5X2.5	e30	16	12
	Medianeras	6	1.7X1.7	e20	14	12
	Esquinas	4	1.25X1.25	e20	8	12
Excéntricas						
Combinada	Central	2	6.5X2.5	e35	X:13; Y:13	12
	Med-Esq.	4	6.7X1.7	e35	X:12; Y:18	12
Arquetipo G3 Acero estructural 3 pisos						
Concéntricas						
Aislada	Central	2	3.2X3.2	e 0.35	49	12
	Medianeras	6	2.2X2.2	e 0.2	32	12
	Medianeras	4	1.55X1.55	e 0.2	27	12
Excéntricas						
Combinada	Central	1	10.2X3.25	e 0.35	X:13; Y:43	12
	Central	1	9.5X3.25	e 0.35	X:13; Y:43	12
	Med-Esq.	2	10.2X2.5	e 0.35	X:15; Y:43	12
	Med-Esq.	2	8.875X3.2	e 0.35	X:13; Y:38	12
Arquetipo G1 Acero estructural 8 pisos						
Concéntricas						
Aislada	Central	2	2.5x2.5	e30	17	12
	Medianeras	6	1.45x1.45	e 20	15	12
	Medianeras	4	1.85x1.85	e 20	9	12
Excéntricas						
Losa de Cim.	13x10.5			e 30	109	12
Arquetipo G2 Acero estructural 8 pisos						
Concéntricas						
Aislada + Mixta	Central	1	18.5x3.2	e 35	53	16
	Medianeras	4	2.5x2.5	e 25	19	16
	Esquinas	4	1.8x1.8	e 20	14	16
Excéntricas						
Losa de Cim.	16.65x14.4			e 45	148	12

Arquetipo G3 Acero estructural 8 pisos						
Concéntricas						
Aislada + Mixta	Central	1	26.1x5.35	e 50	30	12
	Medianeras	4	3.6x3.6	e 35	25	12
	Esquineras	4	2.95x2.95	e 20	179	12
Excéntricas						
Losa de Cim.	13.15x10.65			e 80	152	12
Arquetipo G1 Acero estructural 12 pisos						
Concéntricas						
Aislada + Mixta	Central	1	15x3.2	e 35	95	12
	Medianeras	4	2.5x2.5	e 25	27	12
	Esquineras	4	1.85x1.85	e 20	18	12
Excéntricas						
Losa de Cim.	16.8x14.6			e 45	152	12
Arquetipo G2 Acero estructural 12 pisos						
Concéntricas						
Aislada + Mixta	Central	1	18.85x3.9	e 45	126	12
	Medianeras	4	2.85x2.85	e 35	23	12
	Esquineras	4	2.2x2.2	e 25	20	12
Excéntricas						
Losa de Cim.	16.8x14.6			e 45	208	
Arquetipo G3 Acero estructural 12 pisos						
Concéntricas						
Aislada + Mixta	Central	1	26.1x5.75	e 0.75	154	12
	Medianeras	4	4.6x4.6	e 0.55	27	12
	Esquineras	4	2.8x2.8	e 0.45	19	12
Excéntricas						
Losa de Cim.	23.6x18.6			e 105	574	12

En la tabla N.6 se visualiza que existen menores secciones que en la tabla 5, y tampoco es necesario recurrir a vigas de cimentación, esto se debe a que el área bruta de las secciones de acero es menor al área bruta de las secciones de hormigón armado por lo que las reacciones son considerablemente menores, tal como se visualiza en las tablas 3 y 4. Adicionalmente en acero estructural es más común usar losas tipo deck compuestas para reducir el peso aun así se tiene las mismas áreas de construcción arquitectura y geometría entre cada arquetipo, pudiendo afirmar que las estructuras de acero son más ligeras que las estructuras de hormigón armado ambas sujetas a

consideraciones de diseño similares. Pese a que sean estructuras más ligeras tampoco quiere decir que la super estructura sea más económica, Abril-Camino realiza una comparativa en los costos de superestructuras de hormigón armado y acero estructural de PEM. Se recalca que los arquetipos analizados en acero y hormigón armado son pórticos especiales a omento pudiendo existir una optimización en acero principalmente, es decir se puede reducir el costo de la superestructura y cimentaciones optando por otro sistema estructural con arriostramientos.

Caracterización de áreas y arquetipos

Tabla N. 7. Área de construcción de arquetipos analizados

<i>Arquetipo</i>	<i>Niveles</i>	<i>Área de construcción</i>
G1	3	375
G2	3	672
G1	8	1000
G3	3	1215
G1	12	1500
G2	8	1792
G2	12	2688
G3	8	3240
G3	12	4860

En la tabla siete se ha ordenado las áreas de construcción de mayor a menor, donde se visualiza que el área es independiente de la longitud de vanos o número de pisos, puesto que se puede hacer una estructura de tres niveles con 100 m² por nivel, pero si se tiene un terreno de 500 m² y se decide aprovechar mediante previa aprobación arquitectónica esta será mayor que los tres niveles.

Análisis de Resultados

Comparativa de costos entre acero y hormigón.

Se ha considerado los costos directos influyentes en la construcción de las cimentaciones mediante el análisis de precios unitarios considerando, material, equipo, mano de obra los costos dados están actualizados al 2023. Mediante revistas de precios de la construcción. (Camara de la Industria de la construcción, 2023). A continuación, se presenta un resumen del costo final de las cimentaciones analizadas.

Tabla N. 8. Tipo y costo de cimentación por arquetipo considerando cargas excéntricas y concéntricas en H.A.

Estructura de hormigón armado							
PISOS	GRUPO	C. Concéntrica	Costo Total	C. Excéntrica	Costo Total	Diferencia	%
3	1	Aislada	\$ 1,862.22	Mixta	\$ 9,031.05	\$ 7,168.82	385%
	2	Aislada	\$ 5,061.99	Mixta	\$ 19,003.92	\$ 13,941.93	275%
	3	Aislada	\$ 13,739.50	Mixta	\$ 68,489.99	\$ 54,750.48	398%
8	1	Aisl + Mixta	\$ 8,722.73	Losa Ciment.	\$ 19,008.46	\$ 10,285.73	118%
	2	Aisl + Mixta	\$ 18,196.38	Losa Ciment.	\$ 47,799.98	\$ 29,603.60	163%
	3	Losa Ciment.	\$ 154,705.19	Vigas Ciment.	\$262,330.14	\$107,624.95	70%
12	1	Losa Ciment.	\$ 18,490.82	Vigas Ciment.	\$ 70,195.48	\$ 51,704.66	280%
	2	Losa Ciment.	\$92,632.1125	Vigas Ciment.	\$184,524.00	\$ 91,891.89	99%
	3	Vigas de Cim.	\$ 442,807.96	Vigas Ciment.	\$444,634.26	\$ 1,826.30	0%

Tabla N. 9 Tipo y costo de cimentación por arquetipo considerando cargas excéntricas y concéntricas en Acero.

ACERO ESTRUCTURAL							
PISOS	GRUPO	C. Concéntrica	Costo Total	C. Excéntrica	Costo Total	Diferencia	%
3	1	Aislada	\$ 837.95	Mixta	\$ 2,067.47	\$ 1,229.52	147%
	2	Aislada	\$ 1,595.27	Mixta	\$ 4,854.69	\$ 3,259.43	204%
	3	Aislada	\$ 2,737.85	Mixta	\$ 10,881.13	\$ 8,143.28	297%
8	1	Aisl + Mixta	\$ 1,841.86	Losa Ciment.	\$ 7,772.39	\$ 5,930.53	322%
	2	Aisl + Mixta	\$ 5,409.31	Losa Ciment.	\$ 13,830.44	\$ 8,421.13	156%
	3	Losa Ciment.	\$ 16,003.28	Vigas Ciment.	\$ 22,217.89	\$ 6,214.62	39%
12	1	Losa Ciment.	\$ 5,090.05	Vigas Ciment.	\$ 14,520.90	\$ 9,430.85	185%
	2	Losa Ciment.	\$ 13,922.66	Vigas Ciment.	\$ 15,381.53	\$ 1,458.87	10%
	3	Vigas de Cim.	\$ 27,669.23	Vigas Ciment.	\$ 73,050.86	\$ 45,381.64	164%

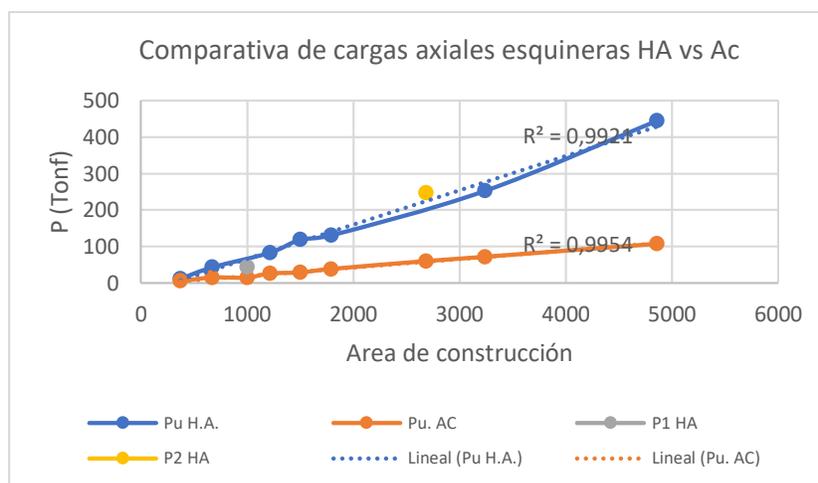
Existe un aumento de costo significativo al considerar las excentricidades esto se debe a que las secciones aumentan considerablemente al considerar excentricidades, por lo que es más económico y recomendable usar cimentaciones concéntricas, si la cimentación tiene excentricidad bidireccional (esquineras) (Moreno, Luévanos, López, & Medina, 2022) la sección es mayor que excentricidad unidireccional (medianeras). Al comparar las tablas 9 y tabla 8 se visualiza un considerable costo menor en cimentaciones de arquetipos de acero comparando con hormigón armado. La variación del costo en excentricidades y cimentaciones concéntricas se visualiza una variación de costos en ciertos casos del más del 100%.

Comparativa entre acero y hormigón

Comparativa de cargas axiales del material constructivo y área de construcción

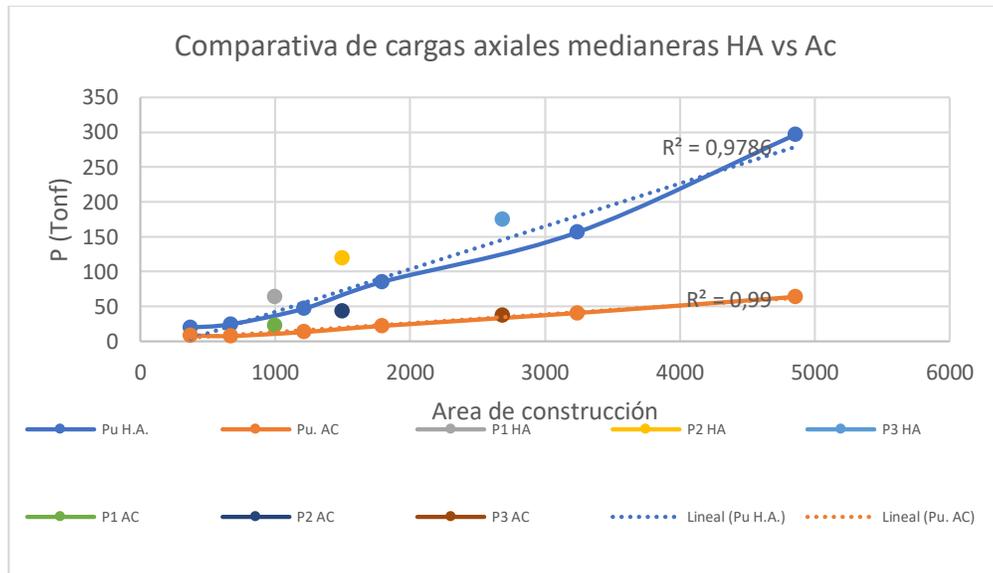
Se ha tomado las cargas axiales gravitacionales: medianeras, esquineras y centrales vs el área de construcción en acero estructural.

Figura N. 15 Relación Carga axial gravitacional esquinera con área de construcción



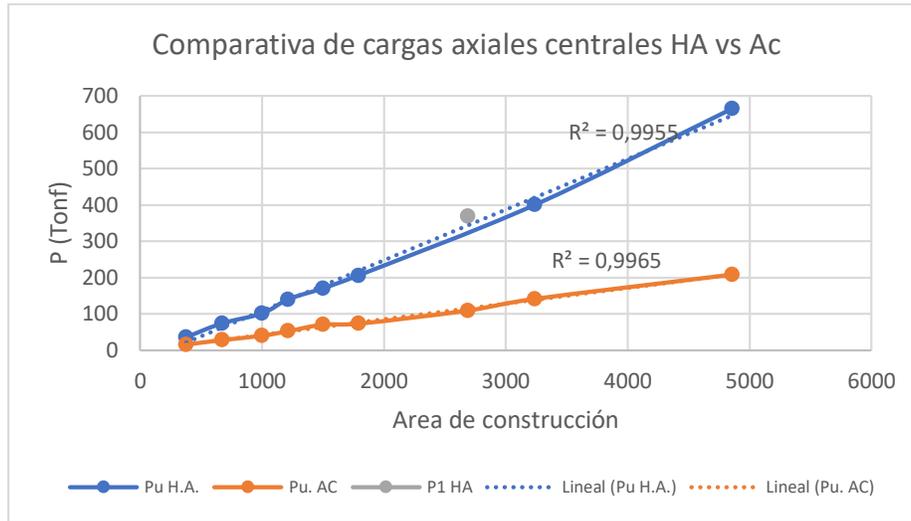
En la figura 15 se visualiza al considerar cargas esquineras las cuales a medida que incrementa el área estructural en hormigón se tiene un incremento lineal considerablemente mayor que en acero por lo que la pendiente es significativamente mayor en hormigón armado que en acero estructural.

Figura N. 16 Relación Carga axial gravitacional medianera con área de construcción



En la figura 16 se visualiza al considerar cargas medianeras las cuales a medida que incrementa el área estructural en hormigón se tiene un incremento lineal considerablemente mayor que en acero por lo que la pendiente es significativamente mayor en hormigón armado que en acero estructural.

Figura N. 17 Relación Carga axial gravitacional centrales con área de construcción



En la figura 17 se visualiza al considerar cargas centrales las cuales a medida que incrementa el área estructural en hormigón se tiene un incremento lineal considerablemente mayor que en acero por lo que la pendiente es significativamente mayor en hormigón armado que en acero estructural.

Figura N. 18 Relación Carga axial gravitacional medianera, central y esquinera con área de construcción

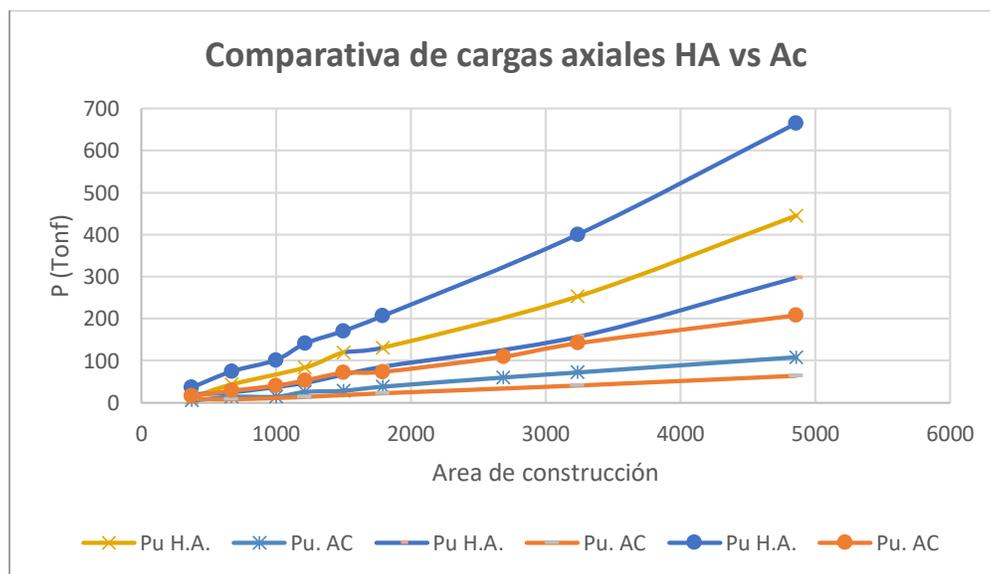
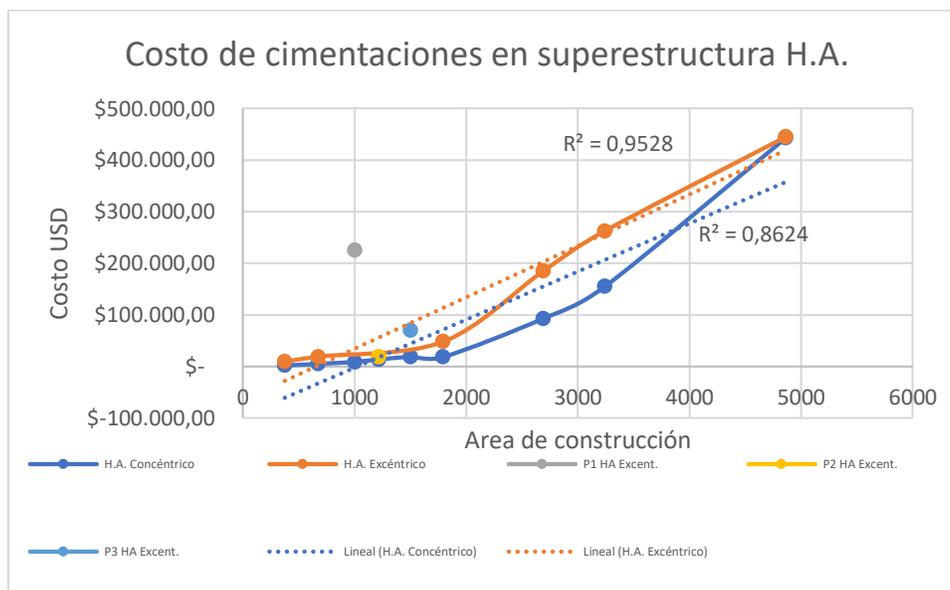


Figura N. 18. Dónde: H.A. Hormigón Armado; AC. Acero; E, Esquinas; M, Medianeras y C, Centrales. Se visualiza incluso que las cargas axiales de las cimentaciones centrales de acero en comparativa con las cimentaciones esquineras de hormigón armado son menores en magnitud, demandando las cimentaciones centrales mayor volumen de obra de cada superestructura con diferente material y las esquineras las menos demandantes en volumen de obra.

El acero al ser un material más ligero tiene menos variaciones en el incremento lineal de cargas. Y se han excluido menos datos que en hormigón armado.

Variación entre cimentaciones, costo concéntricas y excéntricas vs área de construcción en hormigón armado.

Figura N. 19 Relación Costo total de la cimentación concéntrica y excéntrica vs área de construcción en arquetipos de H.A.

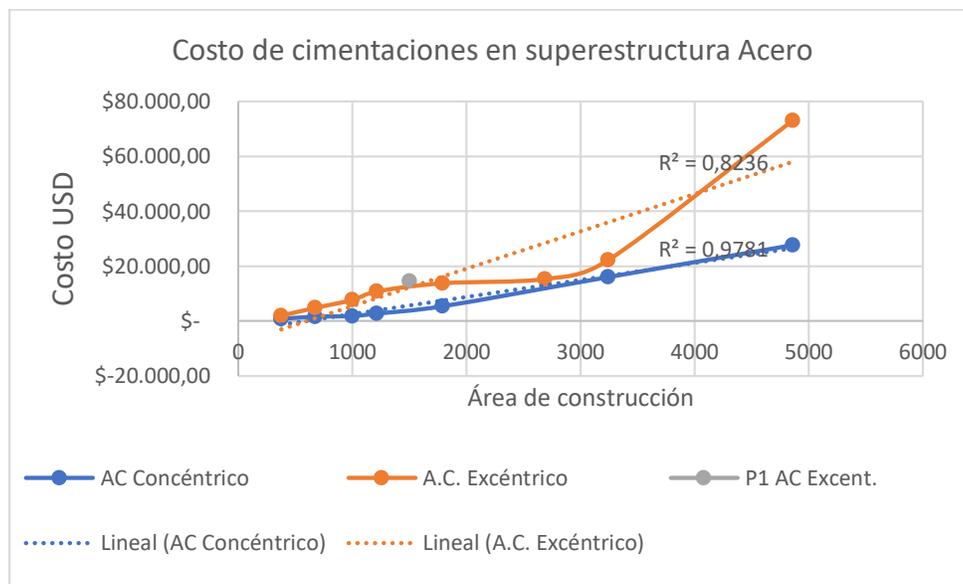


En la figura 19. Se visualiza un considerable costo menor en cimentaciones con cargas concéntricas esto en cimentaciones tipo losa: aislada combinada o mixta y losa de cimentación mientras que al llegar a vigas de cimentación la diferencia se minimiza

hasta llegar a casi equipararse entre vigas T y L, esto debido a la gran capacidad a cortante de las vigas de cimentación

Variación entre cimentaciones, costo concéntricas y excéntricas vs área de construcción en hormigón armado.

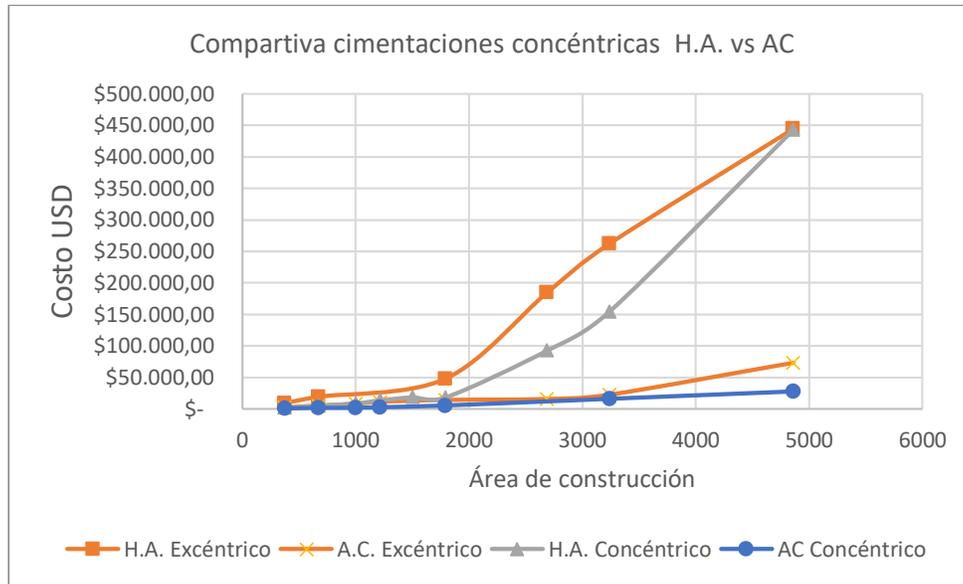
Figura N. 20 Relación Costo total de la cimentación concéntrica y excéntrica vs área de construcción en arquetipos de acero estructural



La figura 20 muestra que existe gran diferencia de costos entre cimentaciones de arquetipos de acero estructural concéntricas y excéntricas y a medida que aumenta el área aumentará en la diferencia de costos, esta premisa es aplicable mientras se considere cimentaciones de tipo losa.

Variación entre cimentaciones costo concéntricas y excéntricas de Hormigón armado vs Acero Estructural

Figura N. 21 Relación Costo total de la cimentación concéntrica vs área de construcción en arquetipos de acero estructural y hormigón armado.



La figura N.21 indica, incluso las cimentaciones excéntricas de arquetipos cuya súper estructura es de acero tienen un menor costo que las concéntricas de arquetipos de hormigón armado.

Conclusiones

- Mediante la presente investigación se ha corroborado la hipótesis de trabajo, visualizando un menor costo en cimentaciones de arquetipos de superestructuras de acero y un menor volumen de obra comparadas con en cimentaciones de arquetipos de superestructuras de hormigón armado.
- Se sugiere de ser posible ocupar zapatas concéntricas ya que estas brindan una mayor optimización de áreas relacionando área/capacidad y tienen un considerable costo menor en su construcción que cimentaciones con cargas

excéntricas indistintamente del material de construcción de la superestructura ya que consideran menores volúmenes de obra que las cimentaciones sometidas a cargas excéntricas.

- Se han determinado dos premisas semi empíricas en base a un análisis de bulbo de presiones y esfuerzos resultantes de suelo:

$$\text{Longitud de eje libre} \geq \frac{L}{3} \rightarrow \text{Zapata Aislada, } \notin \text{ Zapata corrida}$$

$$\frac{\text{Área libre de cimentación}}{\text{Área total de cimentación}} \geq 35\% \rightarrow \text{Zapata corrida, } \notin \text{ Losa de cimentación}$$

Las cuales se basan en los arquetipos analizados en el presente estudio, si bien es una premisa útil dichas formulaciones deberán ser corroboradas mediante investigaciones que sustenten dichas premisas.

- Las reacciones producen cargas menores en los arquetipos de acero estructural comparando con hormigón armado, por lo que las dimensiones, volúmenes de obra, tipos de cimentaciones y precio resultan considerablemente menores que las de arquetipos con superestructura de hormigón armado, esta conclusión es aplicable para edificios.
 - La presente investigación emplea arquetipos pórticos especiales a momento de acero y hormigón armado, sin diagonales rigidizadores por lo que se podría incluso bajar aún más el costo de las cimentaciones en arquetipos de acero estructural.
-

- Se recomienda analizar costos de las super estructuras de acero más optimizadas con un sistema estructural con diagonales rigidizadores y pórticos ordinarios, obtener las reacciones diseñar las cimentaciones y visualizar que construcción sería la más económica al considerar la super estructura e infra estructura (cimentaciones).
 - A medida que aumenta la distancia entre ejes, también aumentará la carga actuante por ende mediante los requerimientos de un análisis estructural deriva en secciones de cimentaciones mayores lo que concluye en secciones mayores a mayores distancias entre ejes.
 - Las cargas reactivas con mayor magnitud son las centrales por poseer área tributaria mayor por ende es donde se demandará cimentaciones con mayor dimensión, seguido de las cargas actuantes en puntos medianeros y las cargas actuantes en esquinas siendo las que menor magnitud tienen.
 - Si se quiere un costo más optimizado se puede mezclar tal como se ha hecho en la presente investigación con zapatas corridas o combinadas y zapatas aisladas. Así como hacer grupos según las cargas de diseño.
 - Un punzonamiento de cortante óptimo va de 0,40 a 0,70 el mismo también ayuda a reducir esfuerzos de suelo en las cimentaciones si el punzonamiento por cortante baja los valores de 0,40 la influencia o mejoramiento en los esfuerzos de suelo no influye.
 - En la presente investigación se consideró cargas excéntricas pegadas a los extremos de la cimentación, se recomienda analizar el efecto de una excentricidad sin que este pegada a los extremos es decir con “talón”.
-

- Se analizó las vigas de cimentación como elementos tipo frame se puede extender la investigación actual considerando como un elemento tipo Shell o sólido, dicho trabajo comprende un coste computacional mayor.

3. Referencias

- Abril-Camino, A., Abril-Camino, D., Cadena, C., & Perez, R. (2023). Comparativo técnico económico entre pórticos especiales a momento de hormigón armado y acero estructural empleando las normativas ACI 318 19, AISC 341 16, AISC 360 22 Y NEC SE DS 2015. *Ciencia Latina*, 7(2), 7458-7486. doi:https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5893
- Aguiar, R., & Ortiz, D. (2017). ANÁLISIS SÍSMICO DE UN EDIFICIO DE DOCE PISOS DE LA CIUDAD DE MANTA CONSIDERANDO INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA. *Revista Internacional de Ingeniería De Estructuras.*, 251-279. doi:<https://doi.org/10.24133/riie.v22i3.646>
- American Concrete Institute. (2019). *ACI 318*. Washintong: ACI.
- American Institute of Steel Construction. (2022). *AISC 360-16 Specification for Structural Steel Building*. Washintong: AISC.
- Auvinet, G., & Pérez, M. (2016). Terraplenes y bordos sobre suelos blandos. *XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, 1-17. doi:https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/27_XXVIII_Reunion_Nacional_de_Ingenieria_Geotecnica/45_XXVIII_Reunion_Nacional_de_Ingenieria_Geotecnica/102_Suelos_blandos/I1PEAM_1.pdf
- Bahadori, H., & Hasheminezhad, A. (2019). Seismic response of shallow foundations over liquefiable soils improved by deep soil mixing columns. *Computers and Geotechnics*, 251-273. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.02.019>
- Braja, M. D. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México: Hunura Servicios Editoriales.
- Caliri, M., Ferreira, A., & Volnei, A. (2016). A review on plate and shell theories for laminated and sandwich structures highlighting the Finite Element Method. *Composite Structures*, 63-77. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.036>
- Camara de la Industria de la construcción. (2023). *Revista Construcción*. Quito: CAMICON.
- Chagoyén, E., Negrín, A., Cabrera, M., López, L., & Padrón, N. (2009). Diseño Óptimo de Cimentaciones Superficiales Rectangulares Formulación. *Revista de la Construcción*, 8(2), 60-71. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619798006>
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Editorial Limusa S.A.

- Gajo, A., Debiasi, E., & Zonta, D. (2013). On the seismic response of shallow-buried rectangular structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 99-113. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.04.011>
- García-Galván, M., Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M., & Rivera-Mendoza, J. (2022). Un modelo general para zapatas rectangulares. Parte I: superficie óptima. *DYNA*, 89(221), 132-141. doi:<https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.100028>
- García-Torres, S. G.-T., & Phani Madabhushi, G. S. (2019). Performance of vertical drains in liquefaction mitigation under structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5849-5866. doi:<https://doi.org/10.1007/s10518-019-00717-x>
- Hussein, H. K., Jawad, I. T., Mahdi, B. O., Majeed, Z. H., Jafer, H. M., & Owaid, H. M. (2021). Skirted Foundation on Sandy Soil - A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 10, 478-485. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/lbtehaj-Jawad/publication/352768101_Skirted_Foundation_on_Sandy_Soil_-_A_Review/links/60d73f0c92851ca9448c5c79/Skirted-Foundation-on-Sandy-Soil-A-Review.pdf
- Ibáñez, L. O. (2017). Análisis de la influencia de la profundidad de cimentación en la disminución de asentamientos en losas de fundación combinadas con pilotes. *Obras y proyectos*, 42, 42-19. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132017000200042>
- Jawad, Z., & Shakir, R. (2021). Behavior of Foundation Rested on Geogrid-Reinforced Soil: A Review. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1-8.
- Luévanos, A., López, S., M., M., & Sandoval, R. (2020). An analytical model for the design of corner combined footings. *Revista ALCONPAT*, 317-335. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.432>
- Lysandros, P. (2019). The equivalent modulus of elasticity of layered soil mediums for designing shallow foundations with the Winkler spring hypothesis: A critical review. *Engineering Structures*, 201. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109452>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *NEC SE CG*. Quito: Presidencia del Ecuador.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *NEC SE DS*. Quito: Presidencia del Ecuador.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *NEC SE HM*. Quito: Presidencia del Ecuador.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda; Cámara de la Industria de la Construcción. (2015). *NEC SE GC*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Montes-Paramo, P., Luevanos-Rojas, A., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M., & Sandoval-Rivas, R. (2023). Área óptima para zapatas combinadas rectangulares asumiendo que la superficie de contacto con el suelo trabaja parcialmente a compresión. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 24(2), 1-15. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v24n2/2594-0732-iit-24-02-00004.pdf>
- Moreno, M., Luévanos, A., López, S., & Medina, M. (2022). Modelación matemática para zapatas combinadas de correa en esquina apoyadas sobre el terreno: Parte 1. *Computación y Sistemas*, 26(3), 1259–1272. doi:[doi:doi: 10.13053/CyS-26-3-4079](https://doi.org/10.13053/CyS-26-3-4079)

- Navarro C., S. (2022). *COLECCIÓN DE EJERCICIOS DE GEOTECNIA Y CIMENTACIONES*. Cartagena: Ediciones UPCT.
- Pasillas, Alberto, L. A., López, S., Medina, & Manuel. (2021). Un modelo optimizado para zapatas combinadas trapezoidales apoyadas sobre el terreno: Superficie óptima. *Acta Universitaria Multidisciplinary Scientific Journal*, 1-18. doi:<https://doi.org/10.15174/au.2020.2973>
- Secretaría de Gestión de Riesgos; Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Oficina de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Comisión Europea. (2016). *Guía práctica para la ejecución de estudios geotécnicos y trabajos de cimentación de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015*. Quito: Imprenta Activa.
- Taghvamanesh, S., & Ziaie Moayed, R. (2019). A Review on Bearing Capacity Factor N_y of Shallow. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation Foundations with Different Shapes*, 13(9), 593-604. Obtenido de publications.waset.org/10012191/pdf
- Vanapalli, K., S., Oh, & Won-Taek. (2021). Analytical and numerical methods for prediction of the the bearing capacity of shallow foundations in unsaturated soils. *Soils and Rocks*, 3(44), 1-18. doi:<https://doi.org/10.28927/SR.2021.066521>
- Villamil, S. (2008). Industrias, Puentes y Montajes en América Latina. *LEGIS S.A*, 1(5), 3.
- Yepez-Piqueras, & Víctor. (2020). *Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención* (Segunda ed.). Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.
-