



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS GEOTÉCNICO-ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN EMMEDUE
SOBRE UN SUELO COMPRESIBLE, APLICANDO MODELOS DE MEDIO
CONTINUO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieras Civiles

AUTORAS: María Augusta Vega Vega
Joselin Elizabeth Zamora Jiménez

TUTOR: Freddy Israel Rodríguez Badillo

Quito - Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotras, María Augusta Vega Vega con documento de identificación N° 1726621160 y Joselin Elizabeth Zamora Jiménez con documento de identificación N° 1718484072; manifestamos que:

Somos las autoras y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 01 de septiembre del 2022

Atentamente,



María Augusta Vega Vega
1726621160



Joselin Elizabeth Zamora Jiménez
1718484072

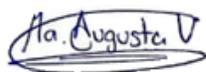
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotras, María Augusta Vega Vega con documento de identificación N° 1726621160 y Joselin Elizabeth Zamora Jiménez con documento de identificación N° 1718484072; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del Artículo Académico: “Análisis Geotécnico-estructural de una Edificación Emmedue sobre un Suelo Compresible, aplicando Modelos de Medio Continuo”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieras Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 01 de septiembre del 2022

Atentamente,



María Augusta Vega Vega

1726621160



Joselin Elizabeth Zamora Jiménez

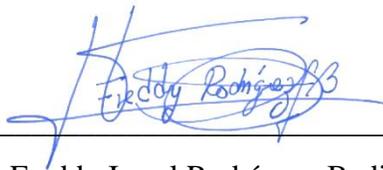
1718484072

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Israel Rodríguez Badillo con documento de identificación N° 1720094026, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS GEOTÉCNICO-ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN EMMEDUE SOBRE UN SUELO COMPRESIBLE, APLICANDO MODELOS DE MEDIO CONTINUO, realizado por María Augusta Vega Vega con documento de identificación N° 1726621160 y por Joselin Elizabeth Zamora Jiménez con documento de identificación N° 1718484072, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 01 de septiembre del 2022

Atentamente,



Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo, MSc.

1720094026

ANÁLISIS GEOTÉCNICO-ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN EMMEDUE SOBRE UN SUELO COMPRESIBLE, APLICANDO MODELOS DE MEDIO CONTINUO

GEOTECHNICAL-STRUCTURAL ANALYSIS OF AN EMMEDUE BUILDING AND COMPRESSIBLE SOIL, APPLYING CONTINUOUS MEDIUM MODELS

María Vega-Vega¹, Joselin Zamora-Jiménez²

Resumen

En esta investigación se analizó geotécnicamente-estructuralmente una edificación de dos pisos configurada con el sistema estructural Emmedue (muros portantes), cimentada sobre un suelo compresible sujeto a asentamientos diferenciales, usando el software MIDAS GTS NX (GTS NX), para la determinación de los asentamientos diferenciales y esfuerzos en los elementos estructurales.

Se configuró en GTS NX a través de elementos 2D (muros, losas y cubiertas) y 3D (losas de cimentación, suelos), con sus respectivas propiedades geomecánicas, y realizó el análisis acoplado y no acoplado del suelo-estructura.

En el análisis acoplado suelo-estructura se verificó tanto los asentamientos como los esfuerzos producto de cargas gravitatorias, sísmicas y adicionalmente el efecto de consolidación (asentamientos) como el incremento de los esfuerzos en los elementos estructurales.

En su defecto, el análisis no acoplado suelo-estructura, está en función del módulo de reacción de la subrasante que simula el comportamiento que tiene el suelo con respecto a la estructura, para identificar los asentamientos y esfuerzos en los elementos estructurales.

Finalmente usando la teoría de Von Mises se determinó los sitios de los elementos (muros, losa de entrepiso, cubierta y losa de cimentación) susceptibles de falla.

Palabras Clave: Muros portantes, acoplado, suelo, no acoplado, módulo de reacción de la subrasante.

Abstract

In this research, two-story building configured with the Emmedue structural system (load-bearing walls), footing on a compressible soil subject to differential settlements, was geotechnically-structurally analyzed, using the MIDAS GTS NX software (GTS NX), for the determination of the differential settlements and stresses in the structural elements.

It was configured in GTS NX through 2D elements (walls, slabs and roofs) and 3D (foundation slabs, soils), with their respective geomechanical properties, and performed the coupled and non-coupled analysis of the soil-structure.

The coupled soil-structure analysis, with settlements and the stress resulting from gravitational and seismic loads in addition to, the effect of consolidation (settlements) and the increase in stress on the structural elements were verified.

The uncoupled soil-structure analysis is a function of the subgrade reaction modulus that simulates the behavior of the soil with the respect structure, to identify the settlements and stresses in the structural elements.

Finally, using Von Mises theory was determined the sites of the elements (walls, slab, roof and foundation slab) were susceptible to failure.

Keywords: Load-bearing walls, couple, soil, not coupled, reaction module of the subgrade.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito Ecuador

² Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito Ecuador

Autoras para correspondencia: mvegav@est.ups.edu.ec
izamoraj@est.ups.edu.ec

1. Introducción

El sistema estructural Emmedue es el conjunto de muros portantes conformados por poliestireno expandido y malla electrosoldada cubierta de micro hormigón[1]. Se analizó edificaciones colindantes tipo residencial de dos plantas, emplazada sobre una losa de cimentación.

Del estudio de mecánica de suelos previamente realizado a este trabajo de investigación, se obtuvo la litología del subsuelo, usando información de las perforaciones SPT y resultados de los ensayos de laboratorio SUCS.

En GTS NX se modeló el suelo y la cimentación como elementos sólidos (arcilla plástica, arena arcillosa, roca lutita, 3D), la super estructura se modeló con elementos tipo Shell (2D) donde simula los muros de hormigón de espesor equivalente omitiendo la sección de poliestireno.

Los modelos constitutivos usados para el suelo son Cam Clay, Hardening Soil y Mohr Coulomb, y para la estructura (losa de cimentación y Emmedue) Von Mises.

Se realizó dos casos de análisis, un modelo acoplado entre suelo y estructura, considerando la interacción entre ellos; y el segundo caso pertenece al modelo no acoplado, donde se analizó la estructura con una condición que simula el suelo, a través de resortes cuya rigidez está definida por el módulo de reacción de la subrasante.

Los elementos 3D y 2D fueron evaluados por el método de los elementos finitos que, en GTS NX, consiste en la discretización del dominio de análisis en elementos y volúmenes con finitos grados de libertad[2], interconectados por puntos nodales de borde que transmiten las cargas y cuyas incógnitas serán sus desplazamientos [3], [4].

2. Materiales, métodos y metodología

2.1. Modelo estructural acoplado al suelo

El análisis acoplado simula el suelo y la estructura con todas sus características geomecánicas y mecánicas, respectivamente.

2.1.1. Configuración de la estructura modular

La estructura modular se configura en base a la geometría de la edificación.

2.1.1.1. Materiales y propiedades

La configuración del Emmedue se observa en la Figura 1.

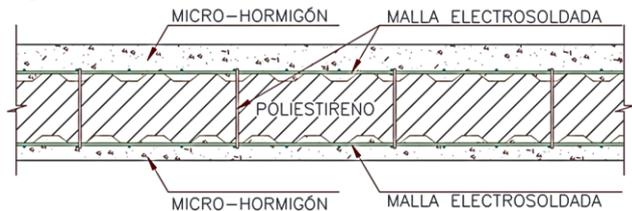


Figura 1. Panel Emmedue

En la losa y vigas de cimentación, el hormigón colocado es de $f'c=180\text{kgf/cm}^2$. Los muros, losas de entrepiso y cubiertas con un $f'c=210\text{kgf/cm}^2$.

En GTS NX, se definió el hormigón con características isotrópicas y modelo constitutivo Von Mises, se activó la opción estructural para todos aquellos materiales diferentes del suelo.

- El módulo de elasticidad del hormigón se determinó a través de la Ecuación (1),[5].

$$E = 15100\sqrt{f'c} \quad (1)$$

$f'c$ (T/m ²)	E (T/m ²)
2100	2188198
1800	2025878

- El módulo de elasticidad para el poliestireno es,[6]: $E_{\text{poliestireno}} = 283000 \frac{\text{T}}{\text{m}^2}$.
- El coeficiente de Poisson (ν), [6].

Material	ν
Hormigón	0.2

- El peso volumétrico (γ), [6].

Material	γ (T/m ³)
Hormigón	2.4

En GTS NX los muros, cubierta y losas de entrepiso se establecieron en base a propiedades tipo “Shell” como indica la Figura 2.

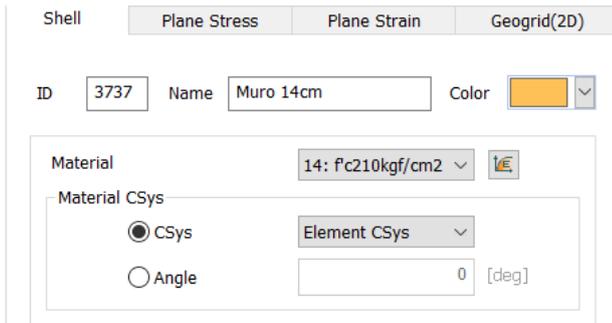


Figura 2. Propiedades 2D en GTS NX

En la Figura 3 se coloca el espesor total de hormigón sólido del muro de 14 cm cuyo valor corresponde a 0.075m, habilitando la opción de espesor uniforme, para los muros de 12 cm con $e=0.098m$, losa de entrepiso y cubierta con un $e=0.09m$.

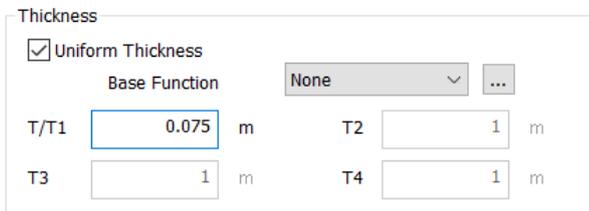


Figura 3. Ingreso de espesor de hormigón en muro de 14cm en GTS NX.

2.1.1.2. Geometría

Está compuesta por un bloque de cinco viviendas de dos plantas como se muestra en la Figura 4.

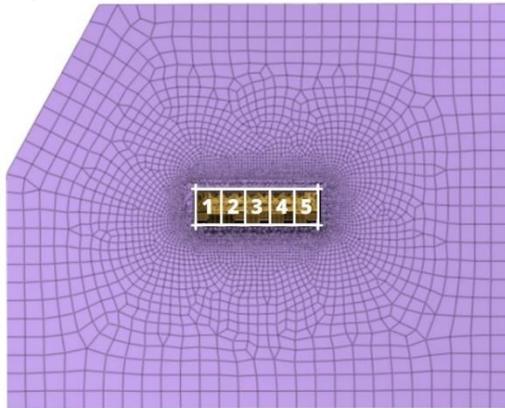


Figura 4. Numeración del bloque de viviendas

Su cimentación consta de: vigas de 20x35cm, con una losa de espesor de 10cm, cuyas luces se indican en la Figura 5.

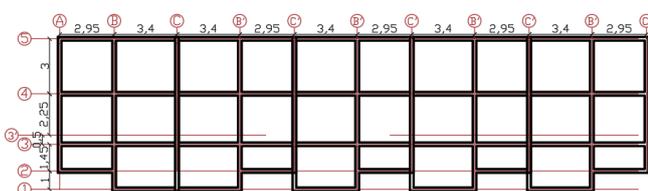


Figura 5. Cimentación del modelo estructural bloque de casas completo

En las Figuras 6.a. y 6.b. se esquematizan los muros de la siguiente manera: con líneas de color azul aquellos muros cuyo espesor es de 12cm y los rojos de 14cm.

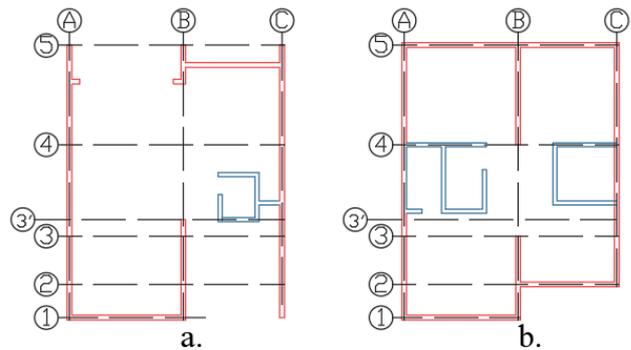


Figura 6. a) Planta N±0.00m; b) Planta N±2.625m

2.1.1.3. Mallado

La estructura se discretizó con un mallado híbrido de dimensiones próximas a 10cm, conformado por 185878 elementos en todo el bloque de viviendas como se observa en la Figura 7, teniendo en cuenta la conexión entre todos sus nodos para garantizar la transferencia de cargas entre elementos.

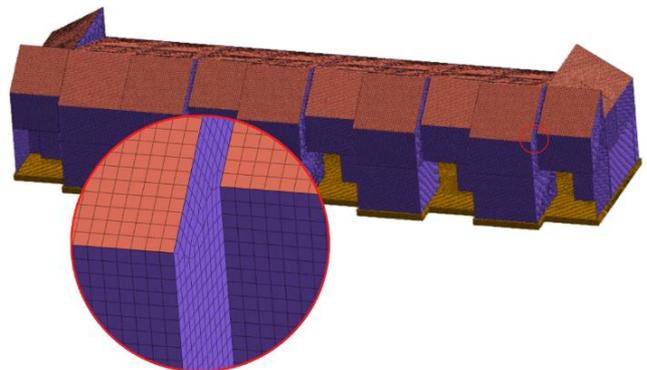


Figura 7. Mallado de las estructuras en GTS NX

2.1.1.4. Cargas gravitacionales (CG)

Cargas impuestas en la estructura ejercidas en dirección de la gravedad.

2.1.1.4.1. Carga Muerta (CM)

La normativa NEC-SE-CG[7] permite definir CM adicionales permanentes, que influyen en el peso total de la estructura, definidas en la Tabla 1.

Cargas	Valor (kgf/m ²)
Cerámica	0.16
Estucado	5.10
Instalaciones	20
Cubierta (teja toledo)	4.37

$$\text{CM de cubierta: } D_{\text{cub}} = 25 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{CM en entrepiso: } D_{\text{Ent}} = 29 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

2.1.1.4.2. Peso propio (PP)

Corresponde a la CM de la estructura según la geometría y características de los materiales, en GTS NX se lo introduce con la opción “Self Weight”, evidenciada en la Figura 8, dirigida al eje global Z, en dirección de la gravedad.

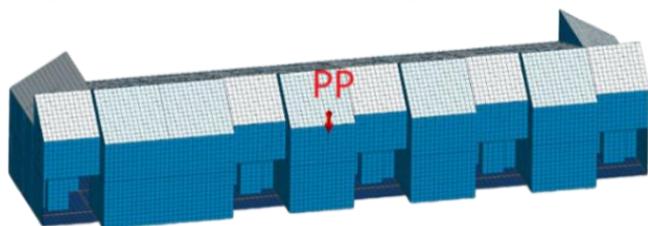


Figura 8. Representación del PP del conjunto estructural

2.1.1.4.3. Carga Viva (CV)

Cargas transitorias definidas según la ocupación de la estructura, extraídas de la normativa NEC-SE-CG[7], visualizadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Cargas Vivas

Cargas	Valor (kgf/m ²)
Residencial	203.9
Cubierta	71.38

2.1.1.4.4. Carga de Servicio

Son las CV+CM sin mayorar, transmitidas como cargas nodales en los elementos mallados de la estructura[8], se contempla en la Figura 9.

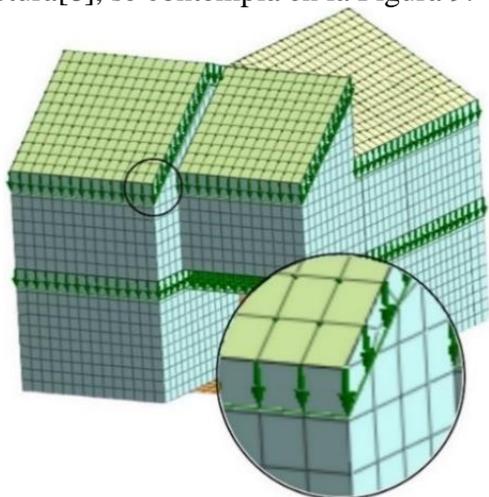


Figura 9. Cargas aplicadas en la estructura

2.1.2. Configuración de los estratos

Mediante la información de cinco pozos del ensayo SPT, y clasificación SUCS se generó la estratigrafía descrita a continuación:

2.1.2.1. Estrato 1

Es una arcilla de alta plasticidad (CH), con estructura laminar fina homogénea y profundidad promedio de 3.2m.

Evaluado con el modelo constitutivo Cam-Clay, los parámetros utilizados para este modelo se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros correlacionados para el modelo Cam-Clay

Símbolo	Valor
E_s	826T/m ²
ν	0.49
γ	1.84T/m ³
γ_{sat}	1.92T/m ³
k_0	0.96
OCR	3.20
λ	0.17
k	0.034
M	0.895
σ_p	9.41T/m ²
Kx, Ky, Kz	0.002445m/d
e_0	0.752

2.1.2.2. Estrato 2:

Estrato de profundidad promedio de 8.5m, de tipo arena arcillosa (SC) con estructura granular fina a gruesa poco homogénea. Se analizó con el modelo constitutivo Hardening Soil (small strain stiffness) los parámetros utilizados se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros correlacionados del modelo Hardening Soil

Símb.	Valor
ν	0.29
γ	1.73T/m ³
γ_{sat}	1.92T/m ³
E_{50}^{ref}	4503T/m ²
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	1981T/m ²
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	1492.27T/m ²
R_f	0.9
σ'_{ref}	100T/m ²
Φ	35.88°
k_0	0.414
ψ	5.88°
C'	3.505T/m ²
OCR	1
σ_p	7.37T/m ²

2.1.2.3. Estrato 3:

Estrato compuesto de lutitas y evaluado con el modelo Mohr Coulomb. Se utilizó los parámetros de la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros correlacionados del modelo Mohr Coulomb

<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
E_s	1501T/m ²
ν	0.19
γ	2.3T/m ³
γ_{sat}	2.22T/m ³
e_o	0.35
C_u	1900T/m ²
Φ	50°
Ψ	20°

2.1.2.4. Nivel Freático (NF)

Según la localidad del proyecto se encuentra a 3m de profundidad a partir del nivel de terreno (NT), como se presenta en la Figura 10.

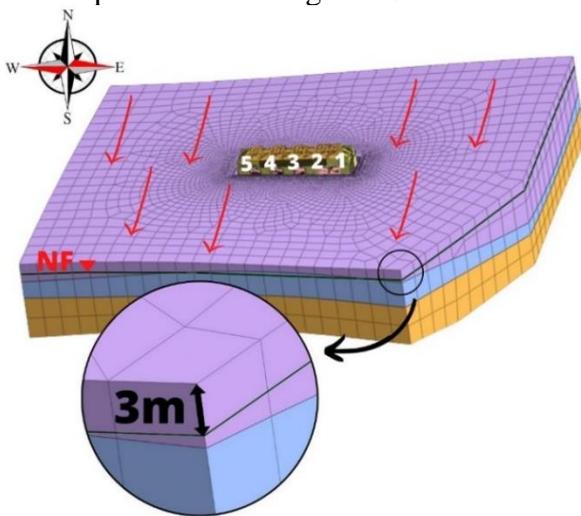


Figura 10. Ubicación del nivel freático

2.1.3. Mallado del suelo

El mallado del suelo posee dimensiones aproximadas de 10cm bajo el área de la cimentación, que va incrementando hasta el borde inferior del Estrato3 con un valor de 5m, como se indica en la Figura 11.

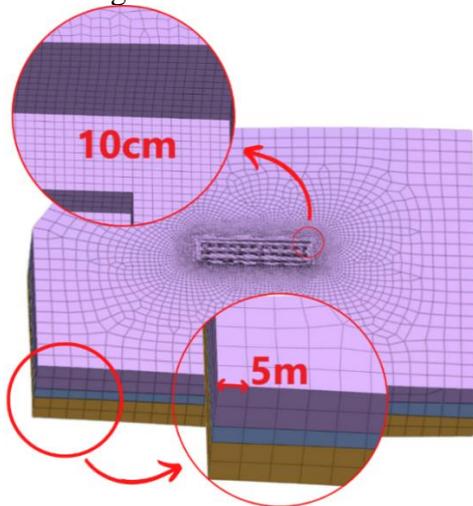


Figura 11. Mallado del suelo en una vista superior

El suelo se discretizó con un mallado híbrido donde: el Estrato 1 está conformado por 262988, el Estrato2 con 669 y el Estrato3 de 2594 elementos.

2.1.4. Condiciones de borde

El bloque de suelo modelado tiene restricciones en todos sus lados, excepto en el NT.

En las caras laterales de los estratos se restringió traslación en el eje X, Y; como indica la Figura 12.

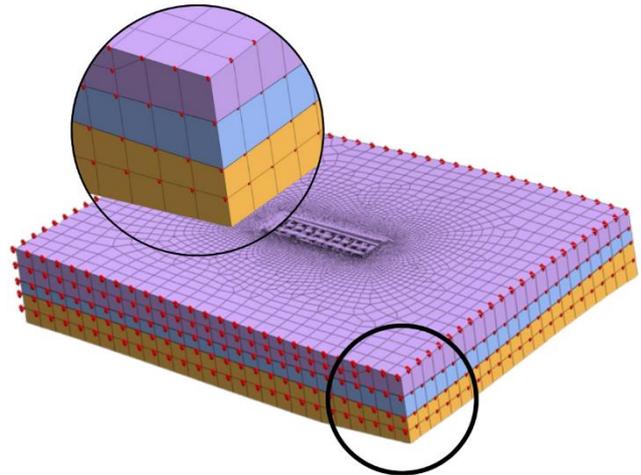


Figura 12. Visualización de las restricciones en los laterales del bloque de suelo

En la base del Estrato3 se restringió rotación en los ejes X, Y, Z y traslación en el eje X, Y, Z como indica la Figura 13.

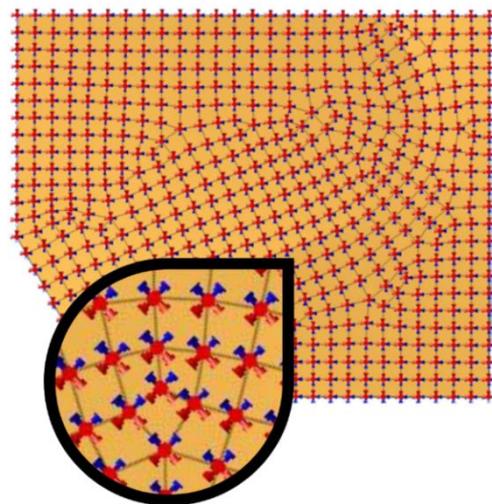


Figura 13. Visualización de las restricciones en la base del Estrato3

2.1.5. Casos de Análisis

Evaluaciones geotécnico-estructurales con el fin de determinar su comportamiento.

2.1.5.1. Análisis lineal estático (ALE)

Caso de análisis “Linear Static”, donde se colocó todas las cargas que intervienen en la estructura, incluyendo la condición de borde mencionada en el apartado 2.1.4., se habilitó en el control de análisis la eliminación de desplazamientos debido al peso propio del suelo.

2.1.5.2. Análisis lineal pseudo estático

Semejante al ALE, donde se añade el efecto de la excitación sísmica mediante fuerzas estáticas horizontales como una fracción del peso de la estructura, conocido como cortante basal. Ver Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros del cortante basal

Descripción	Valor
I	1
Sa	0.868g
ϕ_p	1
ϕ_e	1
R	3

El coeficiente sísmico corresponde es:

$$C = 0.2893$$

El cortante basal es:

$$V = 442.24Ton * 0.2893 = 127.94Ton$$

El periodo fundamental de vibración de la estructura se define en base a los parámetros de la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros del periodo fundamental

Descripción	Valor
C_t	0.0055
h_n	6.725m
α	0.75

El periodo fundamental es: $T=0.23s$

2.1.5.3. Eigen Values

Algoritmo de análisis aproximado que determina la máxima participación de la masa modal en un conjunto de formas modales para determinar los periodos de vibración característicos de la estructura[9].

2.1.5.4. Análisis dinámico modal espectral (ADME)

El sitio de estudio se encuentra en la ciudad de Loja, los parámetros sísmicos para la construcción del espectro de diseño elástico fueron extraídos de la NEC-SE-DS[10], presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros para el espectro diseño elástico

Descripción	Valor
Tipo de suelo	D
z	0.25
Fa	1.3
Fd	1.28
Fs	0.94
η	2.48
r	1

La aceleración espectral se define a través de los periodos de vibración principal, donde sus valores se los identifica en la Tabla 9.

Tabla 9. Periodos límites del espectro

Descripción	Valor
T_o	0.11s
T_C	0.604s
T_L	3.48s

En la Figura 14 se visualiza la aceleración espectral para un periodo de hasta 5 segundos.

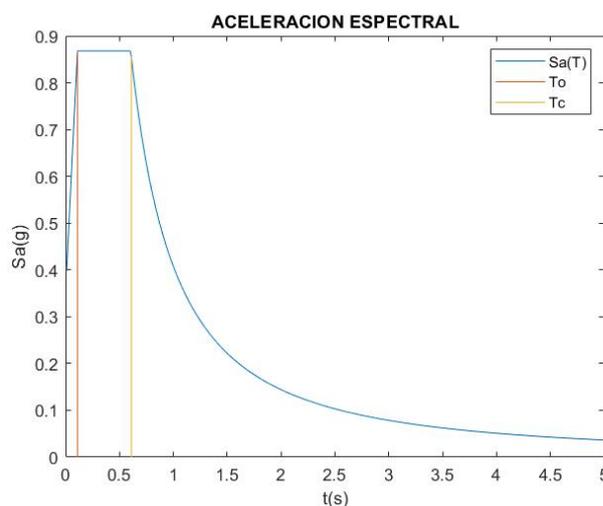


Figura 14. Aceleración espectral

2.2. Modelo estructural no acoplado al suelo

El modelo estructural no acoplado esquematiza el suelo a través de resortes[11].

2.2.1. Configuración de la estructura modular

La super-estructura y cimentación está definida en el apartado 2.1.1.

2.2.2. Condiciones de borde

En los nodos de la cimentación se colocaron resortes que fueron definidos según el módulo de la reacción de la subrasante como se indica en la Figura 15.

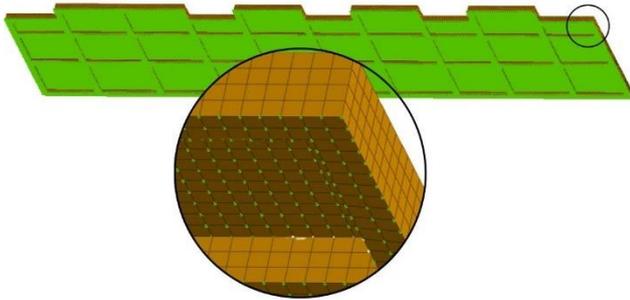


Figura 15. Resortes en la base de la cimentación

El módulo de la subrasante por unidad de volumen colocado en la parte inferior de la losa de cimentación se define a partir de los parámetros de la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros Ecuación de Vesic (aproximada)

Descripción	Valor
E_s	1414.62 T/m ²
B	8.2m
ν	0.49
k	227.02 T/m ³

El módulo de la subrasante en Z es:

$$K_z = 227.02 \text{ T/m}^3.$$

El módulo de la subrasante en los ejes X, Y es igual a 40000T/m³.

2.2.3. Casos de análisis

Se replica los casos de análisis del apartado 2.1.5.

2.3. Metodología

Es la base teórica y el proceso secuencial del desarrollo de los modelos numéricos.

2.3.1. MIDAS GTS NX

Es un software sistemático para el análisis de la interacción suelo-estructura en 2D y 3D[9].

2.3.1.1. Geometría

GTS NX permite graficar superficies [2D] y sólidos [3D][8], a partir de coordenadas absolutas y relativas que dependen del diseño arquitectónico.

2.3.1.2. Mallado

El mallado híbrido corresponde a un conjunto de elementos cuadriláteros y tetraédricos conectados por nodos adyacentes en forma de red, que poseen grados de libertad (desplazamientos y rotación) y una conexión adecuada, como se logra evidencia en la Figura 16. GTS NX realiza cálculos a partir de una matriz acoplada dependiente de los grados de libertad (GDL), mediante la aplicación del solucionador pre condicionado, que corresponde

a la reducción del número de interacciones para un análisis rápido independientemente del número de elementos[8].

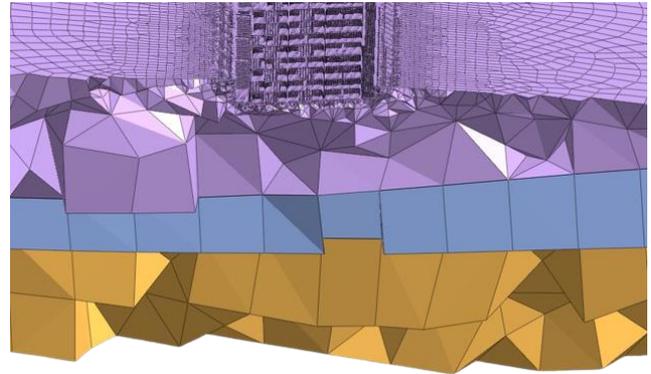


Figura 16. Mallado híbrido (cuadriláteros y tetraedros)

2.3.1.3. Condiciones de borde

En el caso del suelo simulado como resortes representa su rigidez y calcula tanto las reacciones como los asentamientos.

En el caso del suelo simulado como un sólido las condiciones de borde representan la continuidad en todos sus laterales y la base, dichas restricciones están a una distancia prudente donde los bulbos de presión no generan deformaciones a un costado de la cimentación.

2.3.1.4. Modelos Constitutivos

Simulan el comportamiento tenso-deformacional de un material a través de un análisis numérico[12].

Todos los parámetros utilizados en estos modelos se deben obtener a partir de los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, para efectos académicos, los parámetros faltantes se obtuvieron a partir de correlaciones.

2.3.1.4.1. Cam-Clay

El modelo Cam-Clay es ideal para suelos cohesivos, basada en la teoría del endurecimiento elastoplástico que, al aumentar la presión de consolidación crece la superficie de falla y simula el comportamiento del suelo rígido o blando[9].

Parámetros correlacionados para el modelo Cam-Clay fueron:

El módulo de elasticidad del suelo (E_s) se determinó a través de la Ecuación (2)[13].

$$E_s = 300 \cdot (N + 6) \quad (2)$$

El ángulo de fricción (ϕ) para suelos cohesivos se calculó con la Ecuación (3), esta

fórmula está en función del índice de plasticidad (IP), [14].

$$\phi = 39 - 11 \cdot \log IP \quad (3)$$

Para arcillas saturadas el valor del coeficiente de Poisson (ν) es 0.49.

El coeficiente de presión lateral (k_0) se determinó en función de ν cómo indica la Ecuación (4),[14].

$$k_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (4)$$

En función k_0 y ϕ está el grado de sobre consolidación (OCR), como se indica en la Ecuación (5),[14].

$$OCR = \left(\frac{k_0}{1 - \sin \phi} \right)^{\frac{1}{\sin \phi}} \quad (5)$$

La relación de vacíos (e_o) se estimó a partir de las relaciones fundamentales, y está en función de la gravedad específica (Gs), el peso específico del agua (γ_w) y el peso específico seco del suelo (γ_d) como se identifica en la Ecuación (6).

$$e_o = \left(\frac{Gs \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \right) \quad (6)$$

El índice de compresión (Cc) se determinó según la Ecuación (7), que está en función del IP[15].

$$Cc = \frac{IP}{74} \quad (7)$$

El índice de expansión (Cs) se calculó con la Ecuación (8), que está relacionado con el IP,[15].

$$Cs = \frac{IP}{370} \quad (8)$$

Los parámetros que definen el modelo Cam.Clay son:

La pendiente de la línea normalmente consolidada (λ) obtenida con Cc, según la Ecuación (9),[8].

$$\lambda = \frac{Cc}{2.303} \quad (9)$$

En base al Cs se obtiene la pendiente de la línea sobreconsolidada (k), según la Ecuación (10),[8].

$$k = \frac{Cs}{2.303} \quad (10)$$

La pendiente de la línea en estado crítico (M) se encuentra en función del ϕ , según la Ecuación (11),[8].

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad (11)$$

El esfuerzo vertical actual (σ_a) se calculó en el centro del estrato como indica la Ecuación (12).

$$\sigma_a = \gamma \cdot \frac{P_i}{2} \quad (12)$$

El esfuerzo de preconsolidación (σ_p) se lo determinó en función del OCR y σ_a , como muestra la Ecuación (13),[14].

$$\sigma_p = OCR \cdot \sigma_a \quad (13)$$

La conductividad hidráulica (K) se calculó con la expresión de la Ecuación (14).

$$K = \gamma_w \cdot m_v \cdot c_v \quad (14)$$

Dicha ecuación está en función del coeficiente de expansibilidad volumétrica (m_v), descrita en las Ecuación (15), el $\gamma_w = 1000T/m^3$ y el coeficiente de consolidación (c_v) de $0.004cm^2/s$, tomado a partir de la Figura 17,[16].

$$m_v = \frac{1}{Eedo} \quad (15)$$

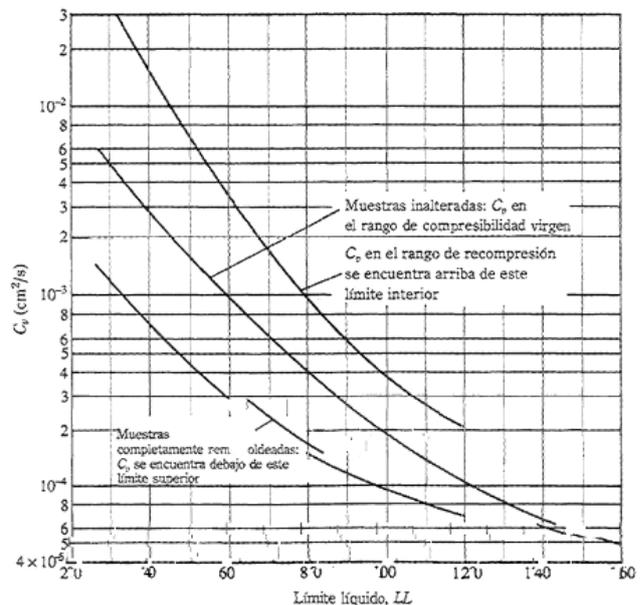


Figura 17. Rango de C_v [16]

2.3.1.4.2. Hardening Soil

Simula el comportamiento de suelos cohesivos o granulares (arenas), está en función del esfuerzo de pre-consolidación que se expande a causa de las deformaciones plásticas cuando se aplica presión al material[17].

Parámetros correlacionados para el modelo Hardening Soil:

La cohesión (c') se determinó según la Ecuación (16) y está en función de la resistencia al corte no drenado (S_u) anteriormente definido[14].

$$c' = 0.1 \cdot S_u \quad (16)$$

El valor de la resistencia al corte no drenado (C_u) se presenta en la Ecuación (17), está en función de N y la presión atmosférica (σ_{atm}),[14].

$$C_u = 0.29 \cdot N^{0.72} \cdot \sigma_{atm} \quad (17)$$

El ángulo de dilatancia (ψ) se calcula con la Ecuación (18), y está en función de ϕ , [14].

$$\psi \approx \phi - 30 \quad (18)$$

ϕ se determinó en función de N , según la Ecuación (19),[14].

$$\phi = 27.1 + 0.3 \cdot N - 0.00054 \cdot N^2 \quad (19)$$

Los parámetros que definen el modelo Hardening Soil son:

ν está en función de ϕ , como se observa en la Ecuación (20),[18].

$$\nu = \frac{1 - \sin \phi}{2 - \sin \phi} \quad (20)$$

El módulo elástico de referencia tangente en cargas edométricas (E_{oed}^{ref}) se encuentra en función del IP, como muestra la Ecuación (21),[18].

$$E_{oed}^{ref} = \frac{50000kPa}{IP} \quad (21)$$

El módulo elástico de referencia en descarga/recarga (E_{ur}^{ref}) se determinó según la Ecuación (22),[8].

$$E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref} \quad (22)$$

El E_{oed}^{ref} es igual al módulo elástico de referencia secante en ensayos triaxiales (E_{50}^{ref}), descrita en la Ecuación (23),[8].

$$E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref} \quad (23)$$

2.3.1.4.3. Mohr Coulomb

Es un modelo considerado elastoplástico perfecto donde la deformación es directamente proporcional al esfuerzo. Este modelo involucra un conjunto de funciones de fluencia que definen el límite entre el comportamiento elástico y plástico del material utilizado[17].

Parámetros correlacionados para el modelo Mohr Coulomb:

Para suelos granulares el (E_s) se determinó por la Ecuación (24),[13].

$$E_s = 320 \cdot (N + 15) \quad (24)$$

La cohesión típica de la lutita se encuentra en el rango de 30-350 kgf/cm² y el ángulo de fricción típico está entre 40-60°[19] (se escogieron valores promedios).

2.3.1.4.4. Von Mises (VM)

Teoría aplicada en materiales dúctiles donde se compara la energía de deformación producto del esfuerzo aplicado en un elemento con la energía de deformación producida por el esfuerzo de VM, si este último es superior al esfuerzo de fluencia se dice que el material llega a fallar y se calcula como indica la Ecuación (25), [20].

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)} \leq f'c \quad (25)$$

Donde:

- σ_{eq} =Tensor de esfuerzos equivalente
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ =Tensiones principales
- $f'c$ =Resistencia a la compresión del hormigón

2.3.2. Factor de seguridad

Factor que define la estabilidad de las estructuras mediante a relación entre el esfuerzo máximo tolerable y el esfuerzo aplicado descrito en la Ecuación (26),[21].

$$FS = \frac{T_f}{T_A} \quad (26)$$

Donde:

- T_F, T_A =Esfuerzo cortante último resistente y actuante

2.3.3. Casos de análisis

Proceso teórico para el análisis geotécnico-estructural de la edificación.

2.3.3.1. Sistema acoplado

Análisis cuyo objeto de estudio sea determinar sus diferentes comportamientos[22].

2.3.3.1.1. Análisis lineal estático

Método estático cuyo fin es analizar asentamientos producto de las cargas de servicio. Según la normativa NEC-SE-GC, para “estructuras con muros de carga de concreto o

mampostería” la deformación diferencial máxima se expresa en la Ecuación (27), donde L es la luz del vano[21].

$$\delta = \frac{L}{500} \quad (27)$$

2.3.3.1.2. Análisis lineal pseudo estático

Para la representación de la fuerza horizontal dinámica se utilizó la Ecuación (28), cuyos parámetros están definidos en la Tabla 11[10].

$$V = \frac{I \cdot Sa}{\phi_p \cdot \phi_e \cdot R} * W \quad (28)$$

Tabla 11.Parámetros del coeficiente sísmico

Descripción	Símbolo
Factor de importancia	I
Aceleración espectral	Sa
Factor de irregularidad en planta y elevación	ϕ_p, ϕ_e
Factor de reducción	R
Carga reactiva (<i>Peso propio</i> + D + 0.25L)	W

El tiempo que tarda gran parte de la masa de la estructura en dar un movimiento cíclico corresponde al periodo de fundamental (T), y se lo determinó según la Ecuación (29),[23].

$$T = C_t \cdot h_n^\alpha \quad (29)$$

Donde:

- T =Periodo de fundamental
- C_t =Coeficiente que depende del tipo de edificio
- h_n =Altura máxima de la estructura
- α =Impedancia del semi-espacio

2.3.3.1.3. Eigenvalues

Analiza los modos vibracionales, el periodo fundamental y la participación de la masa modal del suelo-estructura a la que está sometida a una excitación sísmica, estos factores son evaluados en función de la rigidez y la masa de la edificación, a partir del algoritmo matemático de Lanczos para la resolución de matrices tridiagonales de cantidad de elementos semejante a la matriz de valor propio[8], [9].

2.3.3.1.4. Análisis dinámico modal espectral

Determina fuerzas, desplazamientos de una edificación frente a excitaciones sísmicas. Se ingresa un espectro sísmico que produce modos de vibración, y estos se analizan individualmente, para determinar la respuesta global de la estructura[24].

Este caso se define a partir de la Ecuación (30).

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = Q \quad (30)$$

Donde:

- M, C, K =Matriz de masa y amortiguamiento y rigidez de la estructura, respectivamente.
- q, \dot{q} , \ddot{q} =Vector de desplazamiento, velocidad y aceleración en coordenadas generalizadas
- Q =Vector de cargas generalizadas.

El espectro de diseño elástico se define a partir de la normativa NEC-SE-DS[10], y se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12.Efectos sísmicos locales

Descripción	Símbolo
Tipo de suelo	A-B-C
Zonificación sísmica	D-E-F
Coeficientes	z
	Fa, Fd, Fs
Valor de razón	η
Factor usado en el espectro de diseño elástico	r

Se calcula los modos de vibración donde la masa participativa es superior al 90% de la masa estructural y los periodos límites del espectro según las fórmulas de la Tabla 13,[10].

Tabla 13.Periodos límites de vibración

Descripción	Fórmula
De aceleraciones que representa el sismo de diseño	$T_0 = 0.1 \cdot F_s \cdot \frac{Fd}{Fa}$
En el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño	$T_C = 0.55 \cdot F_s \cdot \frac{Fd}{Fa}$
Utilizado para la definición de espectro de respuesta en desplazamientos	$T_L = 2.4 \cdot Fd$

Y en base a los periodos la aceleración espectral según las ecuaciones presentadas en la Tabla 14,[10].

Tabla 14.Formulación para el espectro de diseño

Periodo	Aceleración espectral
$0 \leq T_0$	$Sa = z \cdot Fa \cdot \left(1 + (\eta - 1) \cdot \frac{T}{T_0}\right)$
$0 \leq T \leq T_C$	$Sa = \eta \cdot z \cdot Fa$
$T > T_C$	$Sa = \eta \cdot z \cdot Fa \cdot \left(\frac{T_C}{T}\right)^r$

2.3.3.1.5. Análisis por Consolidación

Asentamiento producido por la disminución del volumen de vacíos por una sobrecarga en un suelo

arcilloso saturado debido al drenaje del agua en un largo periodo de tiempo[25].

Los asentamientos por consolidación se pueden calcular en los modelos numéricos a partir de Ecuación diferencial (31)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v * \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (31)$$

Donde:

- u =Presión de poros en exceso.
- C_v =Coeficiente de consolidación
- Z =Profundidad de análisis

En $t=0$ el agua toma el 100% de la sobrecarga, conforme avanza el tiempo el agua descarga mientras que las partículas del suelo toman una parte de la sobrecarga, por lo que el proceso depende del tiempo y por lo tanto de la capacidad de drenaje que tiene el suelo.

2.3.3.2. Sistema no acoplado

Este análisis se basa en la hipótesis, donde la distribución de esfuerzos del suelo va a estar en función de la deformación producida por la cimentación[26].

Para establecer el CRDS es preciso realizar una media ponderada de los módulos de elasticidad de los estratos del suelo[25], según la Ecuación (32),[13].

$$E_s = \frac{\sum (E_{s_i} \cdot P_i)}{\sum P_i} \quad (32)$$

Donde:

- E_{s_i} =Modulo de elasticidad del suelo en cada estrato
- P_i =Profundidad del estrato

El CRDS se calculó en base a fórmula aproximada establecida por Vesic que se identifica en la Ecuación (33), sus parámetros se describen en la Tabla 15,[27].

$$k = \frac{E_s}{B \cdot (1 - \nu^2)} \quad (33)$$

Tabla 15.Parámetros Ecuación de Vesic (aproximada)

Descripción	Símbolo
Módulo de elasticidad equivalente del suelo	E_s
Ancho de la fundación	B

Los casos de análisis para este sistema se los define en los apartados 2.3.3.1.1. y 2.3.3.1.2.

3. Resultados y Discusión

La ubicación de los puntos de los elementos analizados se muestra en la Figura 18 (Las líneas de color negro representa la división de las casas).

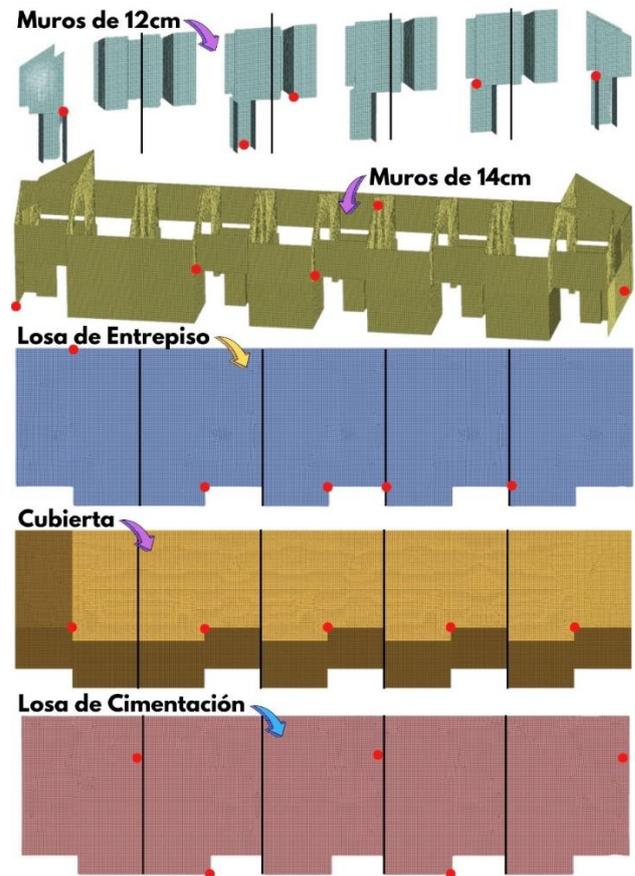


Figura 18.Puntos de elementos analizados

3.1. Modelo acoplado

3.1.1. Esfuerzos máximos de VM

3.1.1.1. Lineal estático (LE)

Los esfuerzos máximos determinados en los elementos que conforman la estructura se los identifica en la Tabla 16. Al comparar estos esfuerzos con el $f'c$ del hormigón, se evidencia que no existe proximidad a la falla.

Tabla 16.Esfuerzos máximos de VM, modelo acoplado lineal LE

Elemento	$\sigma(T/m^2)$				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	596.90	1195.88	512.87	667.73	190.14
Muro 12cm	380.79	47.92	89.56	107.45	86.87
Muro 14cm	97.16	181.67	154.02	16.89	210.92
Losa de entpiso	65.52	296.44	259.49	152.72	169.99
Cubierta	46.90	132.79	153.41	146.60	151.04

Se puede apreciar que el máximo valor de esfuerzo de VM, en el sistema estructural de las 5

casas se ubica en la cimentación de la casa 2, este valor no alcanza el 60% de la resistencia del material.

3.1.1.2. Dinámico modal espectral

Ante la acción sísmica de diseño se evidencia que la cimentación falla en la casa 2 con un incremento de esfuerzo de aproximadamente 450%, en la misma casa están concentrados los máximos esfuerzos en los elementos: muros de 14 y losa de entrepiso visto en la Tabla 17, también se puede comprobar que existe un incremento en los esfuerzos respecto al ALE. En la Figura 19 se observa las zonas de máximo esfuerzo en los muros.

Tabla 17. Esfuerzos máximos de VM, modelo acoplado DME

Elemento	$\sigma(T/m^2)$				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	275.54	5432.54	637.23	1242.10	402.32
Muro 12cm	940.18	524.57	653.95	824.92	1990.04
Muro 14cm	737.39	1468.83	1210.82	354.43	1178.14
Losa de entrepiso	526.75	1732.91	1394.48	1311.91	1081.58
Cubierta	496.60	497.90	501.90	379.99	469.72



Figura 19. Esfuerzos máximos VM

En base a los resultados anteriores el único elemento estructural que falla es la cimentación de la casa 2 según la teoría de VM.

3.1.1.3. Consolidación

El tiempo de finalización de la consolidación primaria determinado es de aproximadamente 4 años (asentamientos constantes), los esfuerzos de VM se incrementan debido a la existencia de asentamientos diferenciales bajo los muros, como se indican en la Tabla 18.

Tabla 18. Esfuerzos máximos de VM, modelo acoplado con consolidación

Elemento	$\sigma(T/m^2)$				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	1788.66	1689.16	2004.39	2739.65	919.08
Muro 12cm	1609.75	193.91	325.56	370.16	330.39
Muro 14cm	467.98	682.59	586.55	159.73	946.34
Losa de entrepiso	204.31	1191.76	1067.73	634.97	712.10
Cubierta	195.76	635.28	737.36	680.35	697.16

En la Figura 20, se logra visualizar los puntos donde falla la cimentación del bloque de casas, ya

que en esos sitios se presentaron los máximos asentamientos diferenciales.

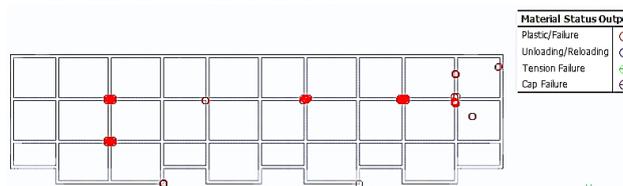


Figura 20. Sitios de plastificación en la cimentación por consolidación

3.1.1.4. Esfuerzos de VM finales

Pertencen al aporte de los esfuerzos de los escenarios de cargas gravitacionales (ALE), sísmicas (ADME) y efectos de consolidación. En la Tabla 19 se observó que los puntos de la cimentación correspondientes a las casas 2, 3 y 4 poseen problemas de falla, al igual que en los muros de e=12 cm de las casas 1 y 5. Los muros de e=14 cm no presentan problemas de falla, sin embargo, los correspondientes a las casas 2 y 5 tienen valores cercanos al f'_c , por lo que una variación de los asentamientos diferenciales en dichos puntos podría acarrear problemas de falla. Las losas de entrepiso de las casas 2 y 3 también llegan a fallar de acuerdo con la teoría de VM.

Tabla 19. Esfuerzos máximos final de VM

Elemento	$\sigma(T/m^2)$				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	1467.29	5925.83	2128.75	3314.03	1131.25
Muro 12cm	2169.14	670.56	889.95	1087.63	2233.56
Muro 14cm	1108.21	1969.76	1643.35	497.27	1913.57
Losa de entrepiso	665.54	2628.23	2202.72	1794.16	1623.70
Cubierta	645.46	1000.39	1085.85	913.74	1015.84

3.1.1.5. Factor de seguridad (FS)

Cuando el esfuerzo de VM es superior al f'_c del hormigón y el $FS < 1$, significa que el material falló o se encuentra en fluencia, es decir, se presentan daños permanentes.

Para el escenario ALE los FS se muestran en la Tabla 20, donde muestra que no entra en fluencia ningún elemento.

Tabla 20. Factor de seguridad caso de análisis: ALE

Elemento	FS				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	3.02	1.51	3.51	2.70	9.47
Muro 12cm	5.51	43.83	23.45	19.54	24.17
Muro 14cm	21.61	11.56	13.63	124.32	9.96
Losa de entrepiso	32.05	7.08	8.09	13.75	12.35
Cubierta	44.78	15.81	13.69	14.32	13.90

En la Tabla 21 se puede identificar los factores de seguridad respecto a los esfuerzos del ADME,

evidenciando la falla de la cimentación en la casa 2, en este análisis teóricamente ningún otro elemento de la estructura falla pese a tener FS cercanos a 1 para el muro de $e = 12$ cm de la casa 5.

Tabla 21.Factor de seguridad caso de ADME

Elemento	FS				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	6.53	0.33	2.82	1.45	4.47
Muro 12cm	2.23	4.00	3.21	2.55	1.06
Muro 14cm	2.85	1.43	1.73	5.93	1.78
Losa de entrepiso	3.99	1.21	1.51	1.60	1.94
Cubierta	4.23	4.22	4.18	5.53	4.47

En la Tabla 22 se puede comprobar que en el análisis de consolidación la cimentación de las casas 3 y 4 fallaron, además que, las casas 1 y 2 están en peligro inminente ya que a un pequeño incremento de esfuerzos se producirán fallas en el elemento.

Tabla 22.Factor de seguridad caso de análisis: Consolidación

Elemento	FS				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	1.01	1.07	0.90	0.66	1.96
Muro 12cm	1.30	10.83	6.45	5.67	6.36
Muro 14cm	4.49	3.08	3.58	13.15	2.22
Losa de entrepiso	10.28	1.76	1.97	3.31	2.95
Cubierta	10.73	3.31	2.85	3.09	3.01

En la Tabla 23 se aprecian los FS para un escenario cambiando de ADME (Cargas gravitacionales más sísmicas) y consolidación. Los elementos que poseen $FS < 1$ se identifican resaltados y por lo tanto fallan. De acuerdo a la teoría de VM se deben obtener FS de al menos 2.

Tabla 23.Factor de seguridad total

Elemento	FS				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	1.23	0.30	0.85	0.54	1.59
Muro 12cm	0.97	3.13	2.36	1.93	0.94
Muro 14cm	1.89	1.07	1.28	4.22	1.10
Losa de entrepiso	3.16	0.80	0.95	1.17	1.29
Cubierta	3.25	2.10	1.93	2.30	2.07

3.1.2. Deformaciones máximas

3.1.2.1. Lineal estático

De todos los muros analizados se ha escogido el que presenta los máximos asentamientos para evaluar los asentamientos diferenciales y compararlos con el máximo asentamiento diferencial permisible, según la NEC que es de 5.59 mm para una luz de 2.95m.

Coincidentalmente este muro se encuentra en la misma ubicación en todas las casas y se puede visualizar en la Figura 21.

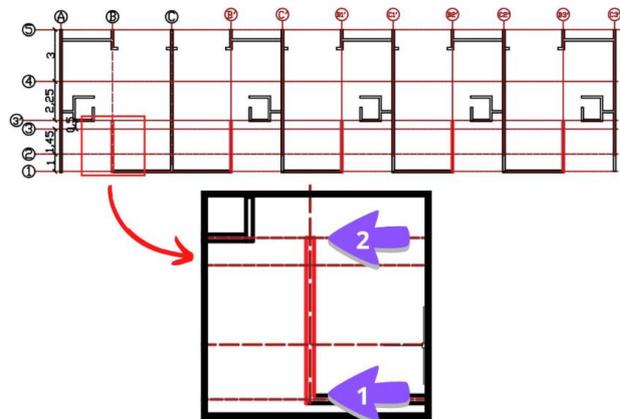


Figura 21.Muros con máxima deflexión

Estos muros están localizados en los ejes B, B1', B2', B3' y B4', que parten desde el eje 1 hasta el eje 3', sin embargo, no superan los asentamientos máximos admitidos, evidenciando que para este caso de análisis los asentamientos diferenciales son menores a 1 mm y la estructura trabaja correctamente, como indica la Tabla 24.

Tabla 24.Deformaciones máximas del modelo acoplado LE

	Se(mm)				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
	1	1.32	1.38	1.36	1.27
2	1.33	1.42	1.39	1.29	1.05
Δse	0.01	0.04	0.03	0.02	0.05

3.1.2.2. Consolidación

El subsuelo posee una capa de arcilla saturada que es drenada a través de un estrato permeable ayudado por el gradiente hidráulico que presenta un mayor nivel piezométrico en el sector norte y drena hacia el sur (Figura10), consecuentemente la estructura no tendrá un asentamiento uniforme por lo que generará fallas en la estructura, en general los asentamientos diferenciales son mayores a 6 mm. En la Tabla 25 se indican los resultados en mención, mientras que en la Figura 22.

Tabla 25.Deformaciones máximas del modelo acoplado con consolidación

	Se(mm)				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
1	633.41	632.41	632.46	633.82	635.84
2	639.52	638.77	639.18	640.43	642.22
Δse	6.11	6.36	6.71	6.61	6.38

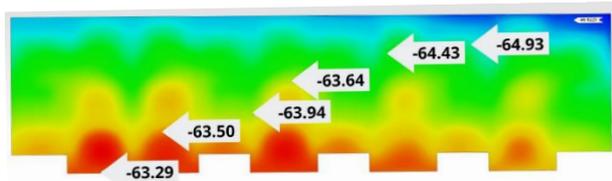


Figura 22. Asentamientos en cm por consolidación en la cimentación

3.1.2.3. Asentamientos Totales

En la Tabla 26 se muestran los asentamientos diferenciales totales (ALE más consolidación primaria) para el muro analizado, se puede concluir que todos los asentamientos diferenciales son mayores a 7 mm, lo que excede el límite permisible de la NEC 15 y en consecuencia se generarán fisuras en los muros analizados.

Tabla 26. Deformaciones máximas del modelo acoplado con consolidación

	Se(mm)				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Δ_{se} (LE)	0.01	0.04	0.03	0.02	0.05
Δ_{se} (Cons.)	6.11	6.36	6.71	6.61	6.38
Δ_{se}	6.12	6.40	6.74	6.63	6.43

3.1.3. Capacidad admisible

Los esfuerzos transmitidos de la cimentación al suelo son inferiores a 8 T/m^2 , mientras que $q_a = 10 \text{ T/m}^2$, por lo tanto la cimentación se comporta adecuadamente sin superar el esfuerzo máximo permitido del suelo. Ver en la Figura 23.

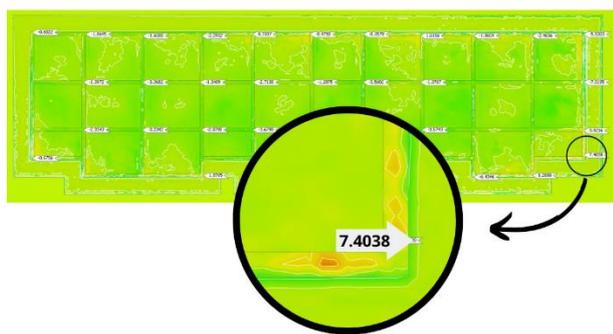


Figura 23. Esfuerzos en el suelo de cimentación.

3.1.4. Formas modales de vibración

Está vinculado con el factor de participación de masa sísmica, para cada forma modal. Los periodos de vibración de la Tabla 27 consideran el efecto e interacción del suelo y la estructura; estos son mayores al periodo fundamental de vibración de la estructura sola. Se evidenció que el modo 1 presenta un movimiento traslacional en

el sentido x y el modo 2 en el eje y, como se indica en las Figuras 24 y 25. Dichos modos se utilizaron en el caso de ADME para configurar el amortiguamiento de Rayleigh.

Tabla 27. Periodos de vibración del modelo acoplado

Modo	Masa modal efectiva(%)	Periodo fundamental(s)
1	35.86	1.44
2	28.54	1.39

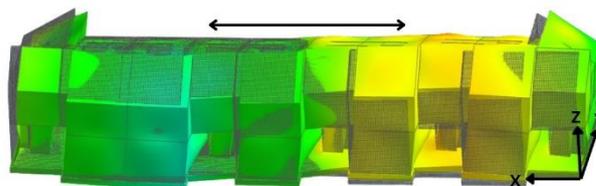


Figura 24. Movimiento traslacional en el eje X

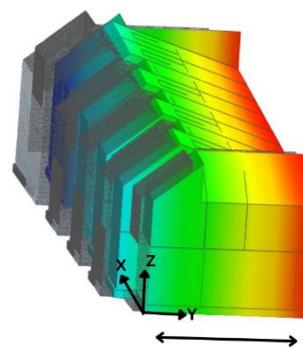


Figura 25. Movimiento traslacional en el eje Y

3.2. Sistema no acoplado

Se evidenció los siguientes resultados.

3.2.1. Esfuerzos máximos de Von Mises

3.2.1.1. Lineal estático

Como se evidencia en la Tabla 28, todos los elementos no llegan al 5% de la resistencia del material (f'_c) y los máximos esfuerzos se encuentran en las losas de entepiso.

Tabla 28. Esfuerzos máximos de VM, modelo no acoplado LE

Elemento	$\sigma(\text{T/m}^2)$				
	Casa 1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	57.45	6.12	51.13	6.31	21.25
Muro 12cm	242.63	25.04	44.09	47.62	64.59
Muro 14cm	108.05	72.59	73.13	25.82	16.87
Losa de entepiso	72.60	172.30	175.32	177.08	175.82
Cubierta	68.21	70.40	65.94	59.06	73.61

3.2.1.2. Dinámico modal espectral

Existen incrementos de esfuerzos con respecto al caso anterior en muchos elementos de la estructura, sin embargo, sus incrementos no son alarmantes, ya que no existe fallas de acuerdo a la teoría de VM. Ver Tabla 29 y Figura 26.

Tabla 29. Esfuerzos máximos de VM

Elemento	$\sigma(T/m^2)$				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	50.02	12.04	52.78	12.29	16.08
Muro 12cm	75.82	9.27	128.18	177.28	146.89
Muro 14cm	82.10	128.64	151.52	77.43	27.60
Losa de entepiso	57.02	197.67	197.87	190.09	142.14
Cubierta	125.35	115.92	86.87	88.47	108.40

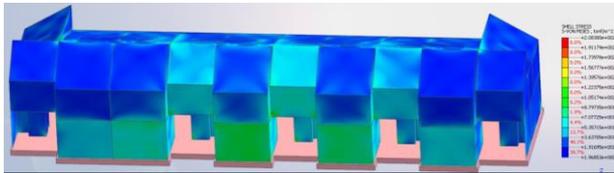


Figura 26. Esfuerzos máximos VM.

Las fuerzas sísmicas del ADME son aproximadamente el 86% del cortante basal del análisis lineal pseudoestático.

3.2.1.3. Factor de seguridad (FS)

Este factor tanto en para el ALE como el ADME se identificó en base a los esfuerzos VM del modelo no acoplado, donde se verifica que todos los valores calculados son mayores a 1, por ende, ninguno falla, como se indica las Tablas 30 y 31.

Tabla 30. Factor de seguridad caso de análisis: ALE

Elemento	FS				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	31.33	294.33	35.20	285.37	84.69
Muro 12cm	8.65	83.88	47.62	44.10	32.51
Muro 14cm	19.44	28.93	28.72	81.33	124.46
Losa de entepiso	28.93	12.19	11.98	11.86	11.94
Cubierta	30.79	29.83	31.85	35.56	28.53

Tabla 31. Factor de seguridad caso de análisis: ADME

Elemento	FS				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Cimentación	35.98	149.47	34.10	146.44	111.97
Muro 12cm	27.70	226.59	16.38	11.85	14.30
Muro 14cm	25.58	16.32	13.86	27.12	76.10
Losa de entepiso	36.83	10.62	10.61	11.05	14.77
Cubierta	16.75	18.12	24.18	23.74	19.37

Se hace notar que los FS son altos comparados con los resultados de los modelos acoplados.

3.2.2. Deformaciones máximas

3.2.2.1. Lineal estático

En la Tabla 32 se puede verificar que las deformaciones por vivienda no exceden el máximo permitido presentándose un promedio de 0.025mm, valor que en obra es imperceptible.

Tabla 32. Deformaciones máximas, modelo no acoplado

	LE				
	Se(mm)				
	Casa1	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
1	1.49	1.50	1.50	1.49	1.49
2	1.47	1.47	1.47	1.47	1.46
Δse	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03

El asentamiento total en los modelos no acoplados es igual a los obtenidos en el ALE dado que no se puede analizar asentamientos por consolidación primaria mediante el uso de la teoría de Winkler.

3.2.2.2. Formas modales de vibración

Los periodos de vibración de este modelo no superan el periodo fundamental calculado analíticamente (0.23s), el primer y segundo modo son traslacionales en el eje X e Y respectivamente, como se observa en la Tabla 33. y Figura 27 y 28. Estos valores se usaron para la configuración de los amortiguamientos en el ADME.

Tabla 33. Periodos de vibración del modelo acoplado

Modo	Masa modal efectiva (%)	Periodo fundamental(s)
3	48.07	0.10
6	46.48	0.05

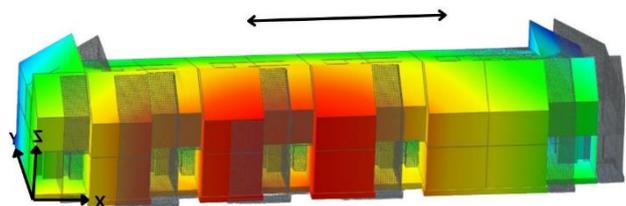


Figura 27. Movimiento traslacional en el eje X

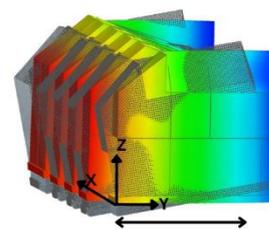


Figura 28. Movimiento traslacional en el eje Y

4. Conclusiones

Los datos geomecánicos de entrada fueron determinados de manera teórica (usando correlaciones para efectos académicos), para resultados próximos a la realidad, los parámetros a usar en los modelos constitutivos deben ser obtenidos a partir de ensayos de laboratorio (Consolidación para Cam-Clay y Triaxiales para Hardening Soil).

Comparando los asentamientos diferenciales y esfuerzos del modelo tanto acoplado como el no acoplado en el ALE, se evidencia que estos difieren entre sí debido a que en el primer modelo el suelo se idealiza como un medio continuo mallado en el cual los nodos transfieren los esfuerzos y deformaciones a los elementos adyacentes, es decir considera la interacción entre elementos a diferencia del segundo caso, que no considera interacción entre resortes ya que cada resorte trabaja individualmente sin contemplar los efectos de los resortes adyacentes.

En modelos no acoplados se determinan los esfuerzos en los elementos de la estructura (cubierta, muros y losa de entrepiso) y asentamientos elásticos en la cimentación producto de la carga de servicio, este análisis está limitado al uso de la teoría de Winkler el mismo que no permite considerar efectos de consolidación en el estrato compresible (CH saturada), mientras que un modelo acoplado permite evaluar los asentamientos elásticos, por consolidación y como consecuencia los incrementos de esfuerzos en los elementos estructurales derivados de los asentamientos de consolidación.

Se concluye que usando la teoría de Winkler en un modelo pseudo acoplado en un ALE y ADME ningún elemento del sistema estructural falla ya que presentan FS bastante altos, sin embargo, estos resultados no representan el comportamiento real de la estructura debido a las limitaciones de esta teoría por lo que en suelos susceptibles a asentamientos de consolidación se recomienda realizar modelos numéricos acoplados para evaluar la interacción entre suelo y estructura (incrementos de esfuerzos en elementos estructurales).

Los muros internos presentan mayor cantidad de asentamientos diferenciales (elásticos más consolidación) respecto a los externos, debido a la concentración de esfuerzos que se transmiten hacia la cimentación y la dirección del flujo del agua (Norte-Sur), los asentamientos por consolidación se encuentran en el orden de 60 cm para un periodo de 4 años (fin de consolidación primaria, con los datos estimados a partir de correlaciones), presentando deformaciones plásticas (considerado como falla) en gran parte de su cimentación. Se evidencia que el efecto de

los asentamientos diferenciales en la estructura es más crítico que los asentamientos totales dado que un desnivel en la cimentación genera un incremento de esfuerzos considerables en muros, losa de entrepiso y cubierta.

Las zonas con posibles problemas de fisuraciones por asentamientos diferenciales o falla por cortante se encuentran reflejados en la Figura 21 en la zona de color celeste y verde, en estos sitios se puede argumentar que como la cimentación es flexible la mejor opción es rigidizar el suelo con inyecciones de cemento y evitar los asentamientos futuros en esas zonas.

El modelo numérico por elementos finitos y considerando al suelo como medio continuo (GTS NX) posee la ventaja de introducir en los resultados los efectos de una potencia de estrato y NF variable, así como análisis complejos como consolidación y considera la influencia de geometrías complejas de cimentación, es decir, tanto de la losa como de las vigas de cimentación.

Se concluyó que en el análisis acoplado (ADME+consolidación) el material de los elementos que fallan corresponde a los muros de $e=12\text{cm}$ de la casa 1 y casa 5, la losa de entrepiso de la casa 2 y 3; este tipo de falla se logrará evidenciar como agrietamientos o fisuras visibles en los elementos analizados, sin embargo, no necesariamente representan el colapso de la estructura debido a que existen elementos redundantes que toman la carga de esos muros y losas.

El FS mínimo recomendado para evitar problemas de falla de acuerdo con la teoría de VM es 2, el rango de valores entre 1 y 2 del FS permite prevenir la falla del material ante variaciones de las cargas de servicio, deficiencia en la resistencia del material e incrementos de esfuerzos en los elementos estructurales debidos a la presencia de asentamientos diferenciales. Bajo esta premisa los elementos que no cumplen el FS mínimo recomendado son los muros de $e = 12\text{ cm}$ de la casa 4, muros de $e = 14\text{ cm}$ de la casa 1,2,3 y 5, al igual que la losa de entrepiso de la casa 4 y 5 con la cubierta de la casa 3, esta información será de utilidad en caso de querer reforzar una estructura existente.

De acuerdo a información de un estudio de mecánica de suelos precedente, la capacidad admisible del suelo es $q_a = 10 \text{ T/m}^2$ y los esfuerzos transmitidos de la cimentación al suelo están bajo las 8 T/m^2 , por lo que el comportamiento de la losa de cimentación es adecuada desde el punto de vista de la capacidad admisible del suelo sin embargo, no es adecuada para evitar asentamientos diferenciales excesivos, por lo que para este tipo de singularidades se recomienda el uso de losa de cimentación con micropilotes cimentados en un estrato más competente, en este caso en particular la arena arcillosa (SC) que no presenta problemas de consolidación.

Referencias

- [1] D. Ricardo and L. Calderón, "ANÁLISIS COMPARATIVO ESTRUCTURAL-ECONÓMICO SEGÚN EL CÓDIGO NEC2011 ENTRE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE MUROS PORTANTES DE HORMIGÓN ARMADO CON ALMA DE POLIESTIRENO Y MUROS DE ENCHAPE CON MALLA ELECTROSOLDADA, EN UNA ESTRUCTURA DE 4 PISOS PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL," Quito, Sep. 2016. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16811>
- [2] O. Cortez and M. Sotomayor, "APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y PROGRAMAS COMPUTACIONALES EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN GALPÓN PARA EL TALLER DE LA EMPRESA PROCOPET S.A.," Quito, Mar. 2007. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/330>
- [3] A. Bustamante-Hernan, "MODELAJE GEOTÉCNICO POR ELEMENTOS FINITOS Y COMPOBACIÓN INSTRUMENTAL DE LA EXACTITUD LOGRADA," La Paz, Feb. 2011. Accessed: Jul. 23, 2022. [Online]. Available: <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAS0664.pdf>
- [4] R. Ramos Wendehake, "INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA: COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO," Barcelona, Sep. 2017. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2117/117998>
- [5] Comité ACI 318, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19)*. Michigan-USA: AMERICAN CONCRETE INTITUTE, 2019.
- [6] B. Guaman, "Influencia de los sistemas de piso en el comportamiento estructural en edificaciones de 4, 8, y 12 pisos aporricadas de hormigón armado, ubicados en el Sector Norte de la ciudad de Quito," Quito, 2018. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/16701>
- [7] NEC-SE-CG, "CARGAS (NO SÍSMICAS)," Jan. 2015. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- [8] MIDASolft, "New eXperience of GeoTechnical analysis System User Manual," 2019.
- [9] MIDASolft, "Analysis Reference," 2019.
- [10] NEC-SE-DS, "PELIGRO SÍSMICO DISEÑO SISMO RESISTENTE," Jan. 2015. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-DS-Peligro-S%C3%ADsmico-parte-1.pdf>
- [11] G. Lamanna, "Cálculo del coeficiente de balasto (Módulo de Winkler)," *GeoStru*, Sep. 02, 2020.
- [12] O. González-Cueto, M. Herrera Suárez, C. E. Iglesias Coronel, and E. López Bravo, *Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el*

- método de elementos finitos, vol. 22, no. 3. Cuba: Centro de Mecanización Agropecuaria, 2013. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000300013&lang=es
- [13] J. E. Bowles, *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill, 1996.
- [14] J. Ameratunga, N. Sivakugan, and B. M. Das, “Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering,” India, 2016. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/13410>
- [15] J. Sanchez, “MODELACIÓN NUMÉRICA DE PILOTES SOMETIDOS A CARGA AXIAL PSEUDO – ESTÁTICA UTILIZANDO EL PROGRAMA MIDAS GTS NX,” Quito, Aug. 2021. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20747>
- [16] B. Das, “Principios de Ingeniería de Cimentaciones,” vol. Cuarta Edición, 2001.
- [17] A. Nieto, J. Camacho, and E. Ruiz, “PARAMETER DETERMINATION FOR THE ELASTO-PLASTIC MODELS MOHR-COULOMB AND HARDENING SOIL IN CLAY SOILS,” Medellín, Dec. 2009. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/63>
- [18] R. B. J. Brinkgreve, “Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering-application compress,” pp. 69–97, Jul. 2005.
- [19] L. I. Gonzalez, “INGENIERÍA GEOLÓGICA,” Madrid, 2002.
- [20] A. Pérez, “Criterio de von Mises,” *Mecapedia*, Jun. 23, 2014.
- [21] NEC-SE-GC, “GEOTÉCNIA Y CIMENTACIONES,” 2015.
- [22] C. Calle, “Análisis dinámico no lineal, de una estructura de hormigón armado fija en el suelo versus la misma estructura con aislamiento sísmico, frente a un sismo en la ciudad de Azogues, provincia del Cañar,” 2019, Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8806>
- [23] J. Agudelo, “Una sencilla regla para obtener el periodo fundamental de un edificio,” <https://estructurando.net/2022/04/20/una-sencilla-regla-obtener-periodo-fundamental-edificio/>, Apr. 20, 2022.
- [24] L. Jara and A. Tibanquiza, “Análisis dinámico lineal del edificio de la facultad de ingeniería en sistemas de la Escuela Politécnica Nacional aplicando los métodos: Modal Espectral y Tiempo Historia, mediante el uso de paquetes computacionales,” Quito, Apr. 2017. Accessed: Aug. 25, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17370>
- [25] B. Das, *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, Cuarta Edición. México, 2015.
- [26] J. Cortés, “Estudio exploratorio para la determinación del coeficiente de balasto a partir de ensayos en laboratorio para suelos cohesivos,” Costa Rica, Jul. 2010. Accessed: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6149/estudio_exploratorio_determinaci%C3%B3n_coeficiente_balasto.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [27] H. Donini and R. Orler, *Platas de hormigón armado. MODELOS DE CÁLCULO Y ASPECTOS CONSTRUCTIVOS*, Nobuko. Buenos Aires, 2015. Accessed: Aug. 17, 2022. [Online]. Available: feismo.com-plateas-de-hormigon-armado-pdf-pr_0097cea2cd573cd2e8f1cb80171ec906