

## CORRELACIÓN EN COSTOS DE UN DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN SUPERFICIAL RÍGIDA Y FLEXIBLE CONSIDERANDO LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

### CORRELATION IN COSTS OF A DESIGN OF A RIGID AND FLEXIBLE SURFACE CEMENTATION CONSIDERING THE ONE-DIMENSIONAL CONSOLIDATION

Sócrates Pedro Muñoz Pérez<sup>1</sup>



Recibido: 24/09/2020

Aprobado: 16/11/2020

#### Resumen

*El documento presenta una metodología de análisis geotécnico - estructural basado en las teorías elásticas y asimismo se calculó el incremento de costo del diseño de la estructura obtenida al emplear esta metodología. Se analizó una edificación de concreto reforzado de 6 niveles cimentada sobre un suelo arcilloso que originó asentamientos por consolidación unidimensional produciendo un nuevo análisis debido al incremento de las distorsiones en la estructura generando un diferencial de esfuerzo y aumento de los momentos en los elementos estructurales. El análisis de la estructura mostró que la energía de deformación de estos diferenciales de esfuerzos será disipada a través de los materiales que conforman los elementos estructurales de concreto reforzado. Se concluyó que aumentando la cuantía de acero estructural en 85.05% absorbería el incremento del momento producido por los asentamientos por consolidación unidimensional afectando de manera directa al costo del proyecto, pero reduciendo la probabilidad de generación de grietas en los elementos estructurales y el futuro colapso de la edificación.*

**Palabras clave:** consolidación unidimensional; asentamiento diferencial; Teoría de Boussinesq; Resistencia al corte; elementos finitos.

#### Abstract

*The document presents a geotechnical-structural analysis methodology based on elastic theories and the cost increase of the structure design obtained by using this methodology was also calculated. A 6-level reinforced concrete building founded on a clay soil that originated settlements due to one-dimensional consolidation was analyzed, producing a new analysis due to the increase in distortions in the structure generating a stress differential and increased moments in the structural elements. The analysis of the structure showed that the deformation energy of these stress differentials will be dissipated through the materials that make up the structural elements of reinforced concrete. It was concluded that increasing the amount of structural steel by 85.05% would absorb the increase in the moment produced by settlements due to one-dimensional consolidation, directly affecting the cost of the project, but reducing the probability of generation of cracks in the structural elements and the future collapse of the building.*

**Keywords:** one-dimensional consolidation; differential settlement; Boussinesq theory; Cut resistance; finite elements

---

<sup>1</sup> Maestro en Ciencias de la Tierra con mención en Geotecnia, Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, [msocrates@uss.edu.pe](mailto:msocrates@uss.edu.pe), <https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>

## I. INTRODUCCIÓN

El criterio de resistencia del suelo ha prevalecido en el tiempo. Se hace necesario estudiar siempre los asentamientos, criterio que no es contemplado y si no ha originado consecuencias mayores es porque los proyectistas consideran factores de seguridad muy elevados para el cálculo de la capacidad admisible del terreno, esta presión debe ser mayor a la transmitida por la cimentación al suelo para que se produzcan asentamientos tolerables a la estructura (Delgado Martínez & Quevedo Sotolongo, 2008; Díaz & Tomás, 2016). En general, las normativas de cálculo estructural sólo exigen determinar la capacidad admisible del suelo, realizando ensayos para establecer los parámetros geotécnicos tales como el ángulo de fricción y cohesión (Martínez Galván & Romo Organista, 2013). Los calculistas de edificaciones no han tenido en cuenta la necesidad de realizar ensayos de consolidación unidimensional para determinar los asentamientos del suelo, e incluir los resultados experimentales en sus modelos de cálculo estructural. Estos parámetros influyen en el diseño final de la estructura.

El análisis de una estructura enmarcada sin modelar su sistema de cimentación y su rigidez podría inducir a error a las fuerzas axiales, momentos debidos a la flexión y al asentamiento (Kavya Supriya & Ravi Kumar Reddy, 2019), dando más importancia al análisis de la superestructura con el módulo de elasticidad del concreto siendo está muy elevada en comparación al módulo de elasticidad del suelo donde las deformaciones sufridas en el concreto son pequeñas en comparación a las deformaciones producidas en el suelo (esto es debido a los cambios de rigidez en la interacción suelo - estructura), en general las estructuras enmarcadas se analizan considerando que sus bases son totalmente rígidas. Sin embargo, dependiendo de las rigideces relativas de la base del suelo y la superestructura, la base sufre deformaciones. En el diseño estructural, los diseñadores ignoran la respuesta de asentamiento de la estructura enmarcada (Koppula & Ravi Kumar Reddy, 2019).

Los asentamientos en una estructura pueden ocasionar patologías importantes e incluso su destrucción. Además el asentamiento diferencial causado por la irregularidad de las estructuras pueden provocar un aumento en el daño estructural, trayendo como consecuencia esfuerzos en las vigas principales de la estructura apareciendo fisuras las cuales se les deberá dar un continuo seguimiento ya que el aumento en tamaño y profundidad es reflejo de un incremento en el asentamiento ocasionando un colapso, también puede presentarse problemas en tuberías de gas y alcantarillado (Ozdemir & Tahir Nalbantcilar, 2016; Moya Andino, 2015; Wols, van Daal, & Van Thienen, 2013). Los requisitos de carga que cumplen con las indicaciones de código de diseño para edificaciones se basan en el comportamiento elástico con base fija de las estructuras sin considerar los efectos de interacción suelo-estructura. Este enfoque puede no ser apropiado, si sólo se considera la sísmica de los edificios y no se consideran el sistema suelo estructura. Su eficiencia reduce significativamente al aumentar la flexibilidad del suelo (Ganjavi & Hao, 2012), que conduce a deformaciones suplementarias bajo cargas estáticas o dinámicas resaltando la importancia de evaluar la distribución precisa de la presión de contacto en la interfaz para calcular las tensiones dentro de la masa del suelo (Guerdoh & Khalfallah, 2019).

La oscilación del nivel freático induce variaciones en la presión de poros del suelo (Molina Gómez, Bulla Cruz, Moreno Anselmi, Ruge, & Arévalo Daza, 2019), convirtiéndose en una variable de gran interés dada su alta incidencia en el fenómeno de asentamientos de las estructuras (Costa, Kok, & Korff, 2020). Si el nivel freático disminuye podría originar la consolidación del terreno generando fracturas y produciendo compresibilidad, porque el agua es expulsada de la masa de suelo ocasionando la disminución del volumen de los vacíos generando esfuerzos verticales y horizontales, éstas variaciones por compresibilidad y el fracturamiento por deformación diferencial es causado por la heterogeneidad mineralógica del material arcilloso (Yeh, Lo, Lin, & Ding, 2020).

Los modelos constitutivos empleados para simular el comportamiento del suelo compresible varían desde el elástico-plástico perfecto hasta los basados en la teoría del estado crítico que toma en cuenta la plastificación anisotrópica de las arcillas (Rodríguez Rebolledo, Auvinet Guichard, & Martínez Carvajal, 2015). Los modelos viscoplásticos elastoplásticos permiten interpretar el comportamiento de la arcilla blanda natural (Yin, 2011). La capacidad de carga y el asentamiento de los cimientos se determinan experimentalmente o por medio de modelos numéricos. basado en la mecánica de suelos convencional para suelos saturados según la relación esfuerzo vertical y asentamiento por medio del análisis de elementos finitos. (Oh & Vanapalli, 2011).

En la actualidad se usa herramientas informáticas para determinar la consolidación unidimensional, (Orozco Calderón & Equihua Anguiano, 2010) presentó la solución de Boussinesq para una poligonal cargada uniformemente. Esta solución fué mejorada por los mismos autores presentando una hoja de cálculo incluyendo el cálculo de asentamientos por consolidación (Orozco & Equihua, 2012). Es viable aplicar la teoría del medio isotrópico lineal deformable homogéneo para determinar la deformación de los cimientos, analizando la fórmula de Boussinesq. La presión de compactación se distribuye uniformemente en toda el área del fondo de la losa de cimentación (Veniamin , Andrey , & Andrey , 2018).

## II. MATERIALES Y METODOS

### *Ubicación de la zona de estudio*

La exploración geotécnica se realizó en la Urbanización Los Sauces ubicada en Pimentel – Chiclayo – Lambayeque (Perú), se excavaron tres calicatas a una profundidad promedio de 2.40m; de donde se extrajeron muestras alteradas e inalteradas, estas últimas se bañaron con parafina, se cubrieron con Street film para poder conservar su humedad hasta el laboratorio. La ubicación donde se llevó a cabo la exploración geotécnica se muestra en la Figura 1 en la Tabla 1 se muestran las coordenadas y altura respecto al nivel del mar de los puntos de exploración.

**Tabla 1.**  
*Coordenadas y altitud sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) de las calicatas.*

Punto de exploración	Coordenadas(UTM)	Altitud (m.s.n.m.)
P1	621886E; 9248998N	23
P2	621882E; 9249003N	23
P3	621879E; 9249006N	23



**Figura 1** Ubicación de los puntos de exploración geotécnica  
Fuente: Google Earth

El estudio de las propiedades elastoplásticas es valioso en el cálculo de las deformaciones elásticas y plásticas de un suelo sometidas por las cargas externas generadas (Hossne García, 2014). La presente investigación se basa en 04 teorías de elasticidad de la mecánica de suelos: (1)

teoría de la resistencia al corte, (2) teoría de la capacidad de carga, (3) teoría de la consolidación unidimensional y (4) teoría de Boussinesq.

**Teoría de la Resistencia al Corte:**

La resistencia del suelo puede atribuirse a dos mecanismos de materiales claramente diferentes: uno es su resistencia a la fricción y el otro es la resistencia cohesiva a lo largo del corte (Ishibashi & Hazarika, 2015). En 1773 Charles Auguste de Coulomb descubrió la resistencia al esfuerzo cortante a la fricción de las partículas sólidas de una masa de suelo (Reyes Ortiz, Camacho Tauta, & Morantes, 2013).

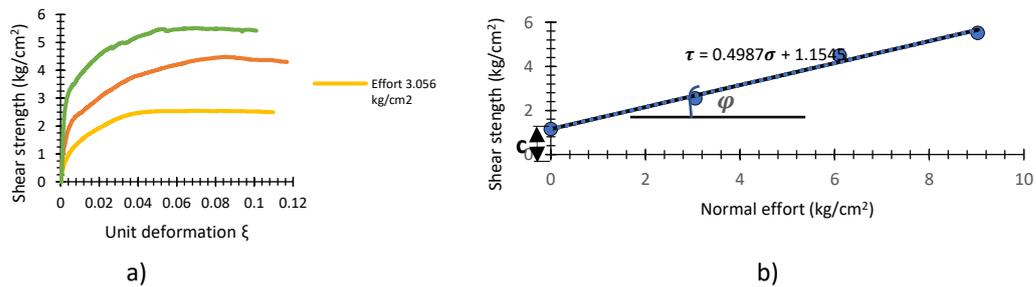
$$\tau = c' + \sigma' \tan(\varphi')$$

Ec. 1

Donde:

- $\tau$  : Máxima resistencia al corte en la falla
- $\sigma'$  : Esfuerzo normal efectivo al plano de corte
- $c'$  : Cohesión aparente
- $\varphi'$  : Ángulo de fricción interno por esfuerzo efectivo

Al momento de realizar la prueba de resistencia al corte es importante la correcta selección de la velocidad con que se va hacer el ensayo geotécnico (Builes Brand, 2014).



**Figura 2** Prueba de corte directo, a) Gráfico del esfuerzo – deformación unitaria de la prueba de corte directo, b) Envolvente de falla de Mohr Coulomb que representa la máxima resistencia al corte según la Teoría de Terzaghi  
Fuente: Propia de los autores



**Figura 3** a) Equipo para prueba de corte directo semi automático 27-WF2060 b) Caja de corte de 6cmx6cmX2.50cm para la prueba de corte directo  
Fuente: Propia del autor



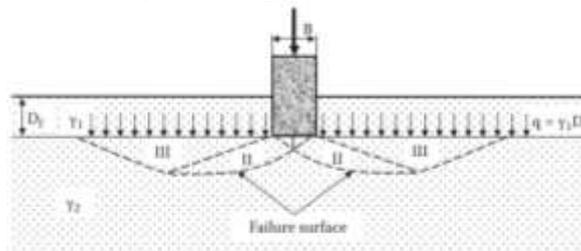
**Figura 4** Equipo para prueba de corte triaxial semi automático 29-WFD1A2 Autotriax2 de la Universidad Señor de Sipán – Chiclayo Perú

### ***Teoría de la Capacidad de carga:***

La capacidad de carga es la presión máxima que el suelo puede soportar en la cimentación. nivel sin fallas. Este es un parámetro de diseño clave para el diseño de cimientos y también para el diseño de muros de contención (Ishibashi & Hazarika, 2015).

Terzaghi en 1943 desarrolló una solución de capacidad de carga para una superficie superficial continua cimentación con un ancho de zapata B y una profundidad empotrada  $D_f$  bajo un terreno llano como se ve en la Figura 5 (Ishibashi & Hazarika, 2015)

Con el reemplazo del suelo arriba del fondo de la cimentación por una sobrecarga equivalente  $q$ , la base de la zapata tiene una superficie rugosa.



**Figura 5** Terzaghi's bearing capacity model  
Fuente: (Ishibashi & Hazarika, 2015)

Usando el análisis de equilibrio, Terzaghi expreso la capacidad de carga ultima en la forma

$$q_u = c \cdot N_c + q \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$q_u =$  Capacidad última

$c =$  Cohesión

$N_c, N_q$  y  $N_\gamma =$  Factores de capacidad de carga adimensionales que estan en función únicamente del ángulo de fricción

$q = \gamma \cdot D_f$

$\gamma =$  Peso específico seco

$D_f =$  Profundidad de desplante

$$N_c = \cot \phi \left[ \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \tan \phi}}{2 \cos^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)} - 1 \right] \quad \text{Ec. 3}$$

$$N_q = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \tan \phi}}{2 \cos^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad \text{Ec. 4}$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left( \frac{K_{py}}{\cos^2 \phi} - 1 \right) \tan \phi \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:  $K_{py}$  = coeficiente de empuje pasivo

### ***Teoría de la Consolidación Unidimensional:***

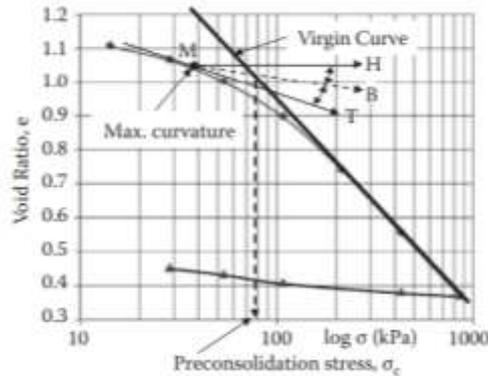
Los cimientos de suelos blandos son propensos a una gran deformación, un tiempo de asentamiento prolongado y difíciles de predecir bajo cargas repetidas a largo plazo. Con el objetivo de resolver este problema, la solución analítica de consolidación unidimensional de cimientos de suelo blando bajo cargas repetidas rectangulares y trapezoidales se resuelve con una teoría de consolidación dimensional de K. Terzaghi (Shi, Sun, & Shi, 2020).

Se requieren parámetros de compresibilidad precisos para el diseño de cimientos superficiales y el cálculo de asentamientos de edificios, en esta prueba, se miden las presiones de agua de poro en exceso y se obtienen datos continuos de carga-deformación que conducen a una mejor definición de la presión de fluencia o pasada del material (Zapata Medina, Galeano Parra, & Arboleda Monsalve, 2018)

En arcillas saturadas, la pérdida de agua del suelo se realiza después de un largo tiempo debido a la baja permeabilidad y la alta absorción de agua, Se generan asentamientos altos que se denominan “asentamientos por consolidación” (Soheil, Sina, Seyed Vahid, & Ali Shayan, 2018).

Los esfuerzos en suelos finos saturados varían en el tiempo haciendo que los asentamientos crezcan significativamente. Si el suelo donde se va a cimentar es arcilloso, se deben tomar medidas previas para mitigar asentamiento excesivos en la edificación. (Álvarez Deulofeu, Beira Fontaine, Cabrera-Castro, & Reyes Pérez, 2019)

Cualquier espécimen que se analizará proviene de una cierta profundidad en el sitio; por lo tanto, se ha sometido a una tensión de sobrecarga efectiva previa y esa tensión se ha relajado durante el proceso de muestreo. Por lo tanto, hace que la curva e-log  $\sigma$  del laboratorio sea diferente de la curva virgen. Al comienzo de una curva de carga, la tasa de compresión (reducción en e) es mucho menor que la de la curva virgen, y la curva se fusiona con la curva virgen con un valor  $\sigma$  más alto. La tensión en el punto de inflexión en la curva e-log  $\sigma$  es la tensión en la que el suelo ha experimentado previamente la máxima consolidación histórica en el campo. Este estrés se llama estrés previo a la consolidación (Ishibashi & Hazarika, 2015, pág. 182).



**Figura 6** Curva de compresibilidad volumétrica  
Fuente: (Ishibashi & Hazarika, 2015)

Se obtiene los siguiente coeficientes:

$C_c$  = coeficiente de compresión (pendiente de la curva de carga)

$$C_c = \frac{e_2 - e_1}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)} \quad \text{Ec. 6}$$

$C_s$  = coeficiente de hinchamiento (pendiente de la curva de descarga)

$$C_c = \frac{e_3 - e_4}{\log \sigma_3 - \log \sigma_4} = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_4}\right)} \quad \text{Ec. 7}$$

$\sigma'_c$  = presión de preconsolidación

El asentamiento por consolidación unidimensional está dada por la siguiente Ec.3:

$$S = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$H$  = Altura del estrato de arcilla de la figura N°05

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

$\Delta e$  = variación de la relación de vacíos ocasionada por la aplicación de la carga

$S$  = asentamiento por consolidación unidimensional

Para arcillas normalmente consolidadas (es decir  $\sigma'_0 = \sigma'_c$ )

$$\Delta e = C_c \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad \text{Ec.9}$$

$\sigma'_0$  = esfuerzo efectivo promedio del estrato de arcilla

$\Delta\sigma'$  = presión agregada (esta presión será calculada con la teoría de Boussinesq)

Al combinar las ecuaciones 8 y 9 se obtien:

$$S = C_c \frac{H}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad \text{Ec.10}$$

Para arcilla sobreconsolidada con  $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$

$$S = C_s \frac{H}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad \text{Ec.11}$$

Para arcilla sobreconsolidada , si  $\sigma'_0 < \sigma'_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$

$$S = C_s \frac{H}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0}\right) + C_c \frac{H}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c}\right) \quad \text{Ec.12}$$

El asentamiento es un factor muy importante en la construcción y la ingeniería de cimientos por lo que es necesario determinar el potencial de suelo en términos de cantidad y tipo de asentamientos (Soheil , Sina , Seyed Vahid , & Ali Shayan , 2018).

Todos los parámetros que se muestran en las ecuaciones 6 – 12 se determinan con el ensayo de consolidación a excepción del  $\Delta\sigma'$ , el cual se determina a través de la teoría de Boussinesq.

Teoría de Boussinesq:

Los suelos son estables bajo las tensiones de sobrecarga efectivas existentes. Sin embargo, cuando se colocan cargas adicionales en la superficie del suelo, como zapatas, tráfico cargas, etc., esas cargas adicionales aumentan las tensiones en la masa del suelo. Estas Las tensiones adicionales son las principales fuentes de asentamiento de suelos (Ishibashi & Hazarika, 2015).

Teniendo en cuenta que un suelo presenta un comportamiento no lineal, la teoría de la elasticidad se utiliza para el cálculo de asentamientos inmediatos en suelos finos saturados y suelos que presentan un comportamiento aproximadamente lineal en los límites de presiones de trabajo (Mánica, 2012).

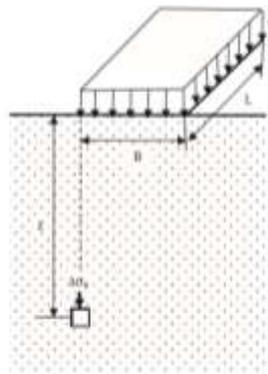
El cálculo de las presiones en una masa de suelo debido a las cargas de la cimentación es importante para describir el comportamiento probable de los cimientos. Este cálculo nos permitirá obtener la distribución de presiones a diferentes profundidades. La distribución de la presión de contacto de Boussinesq se aplica para calcular las tensiones en varios puntos utilizando la teoría elástica (Braja M. Das, 2012, pág. 223). Las soluciones de Boussinesq se utilizan ampliamente en la práctica para todos los tipos de masas de suelo para obtener el aumento de la tensión vertical de las cargas de cimentación, representa un importante paso en la comprensión del asentamiento elástico (Algin & Algin, 2009). En la presente investigación está considerando una edificación de 06 niveles donde la cimentación está constituida por una losa de hormigón armado cuya distribución de esfuerzos bajo una superficie rectangular uniformemente cargada por Boussinesq considera la distribución de esfuerzos verticales en un punto a una profundidad debajo del cimiento.

Según la teoría de Boussinesq el esfuerzo vertical producido por una carga vertical “w” distribuida en un área de dimensiones “x”, “y” a una profundidad z es igual a la detallada en la Ec. 13.

$$\sigma_z = \frac{w}{4\pi} \left( \frac{2xyz(x^2+y^2+z^2)^{1/2}}{z^2(x^2+y^2+z^2)+x^2y^2} \cdot \frac{x^2+y^2+2z^2}{x^2+y^2+z^2} + \text{ang } tg \left( \frac{2xyz(x^2+y^2+z^2)^{1/2}}{z^2(x^2+y^2+z^2)-x^2y^2} \right) \right) \quad \text{Ec.13}$$

Si :  $m = \frac{x}{z}$  y  $n = \frac{y}{z}$ , entonces

$$\sigma_z = \frac{w}{4\pi} \left( \frac{2mn(m^2+n^2+1)^{1/2}}{(m^2+n^2+1)+m^2n^2} \cdot \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} + \text{ang } tg \left( \frac{2mn(m^2+n^2+1)^{1/2}}{(m^2+n^2+1)-m^2n^2} \right) \right) \quad \text{Ec.14}$$



**Figura 7**  $\Delta\sigma_v$  debajo de la esquina de una zapata rectangular  
Fuente: (Ishibashi & Hazarika, 2015)

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### *Análisis Geotécnicos*

Para la realización de esta investigación, se extrajeron muestras alteradas e inalteradas de suelo y se le realizaron las pruebas de límites de consistencia y granulometría para clasificar los suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), también se le realizaron las pruebas de consolidación y de corte triaxial. En la tabla 2 se observa que los puntos de exploración N°01 y No. 03 presenta: suelos cohesivos, y el punto de exploración N° 02 presenta: arenas con presencia de arcillas. Así mismo se observa que la gravedad específica varía desde 2.67 hasta 2.74, el peso específico húmedo varía desde 2.047 gr/cm<sup>3</sup> hasta 2.102 gr/cm<sup>3</sup>, con porcentajes de humedad que oscila entre 36.20% hasta 50%.

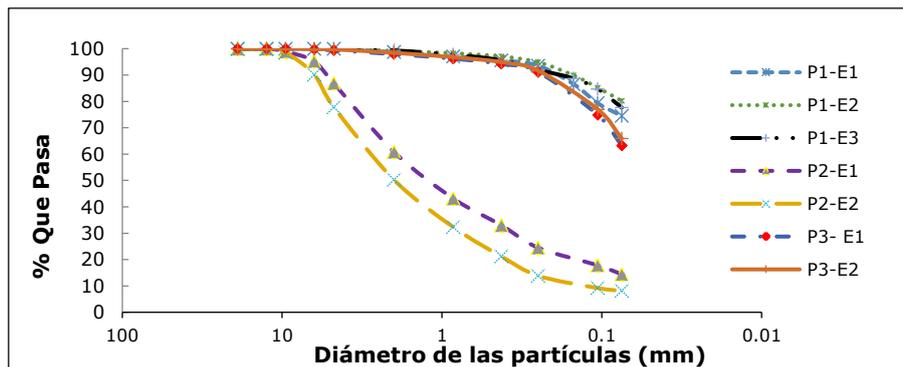
**Tabla 2.**

*Propiedades físicas de las muestras de suelo de los puntos de exploración N° 1, 02 y 03*

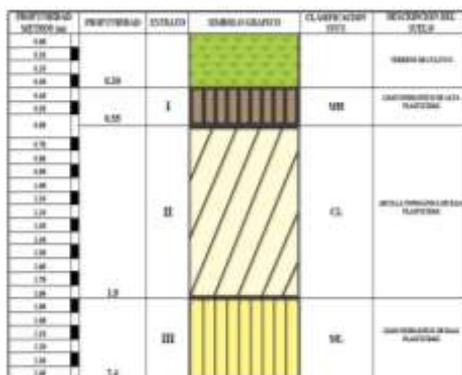
Propiedades	Unidad	Punto de Exploración N°01			Punto de Exploración N°02		Punto de Exploración N°03	
		E - 1	E - 2	E - 3	E - 1	E - 2	E - 1	E - 2
Gs	...	2.71			2.67		2.74	
LL	%	50.01	47.83	34.64	38.48	36.19	46.13	46.25
LP	%	28.61	22.88	31.16	15.31	14.03	18.62	18.62
IP	%	21.4	24.95	3.48	23.17	22.16	27.51	27.3
w	%	50.00	47.83	34.64	38.48	36.2	46.13	46.25
Gravel	%	0	0	0	13.11	22.16	0.64	0.27
Sand	%	25.53	19.82	22.36	72.46	69.73	36.14	33.82
Fine	%	74.47	80.18	77.64	14.43	8.11	63.22	65.91
D10	mm	-	-	-	-	0.1156	-	-
D30	mm	-	-	-	-	0.73564	-	-
D60	mm	-	-	-	-	2.7139	-	-
CU	...	-	-	-	-	23.47	-	-
CC	...	-	-	-	-	1.7249	-	-
S.U.C.S	...	MH	CL	ML	SC	SW - SC	CL	CL
Peso específico seco (método de la parafina)	gr/cm <sup>3</sup>	-	-	2.047	-	2.102	-	2.058

Fuente: Elaborado por el autor.

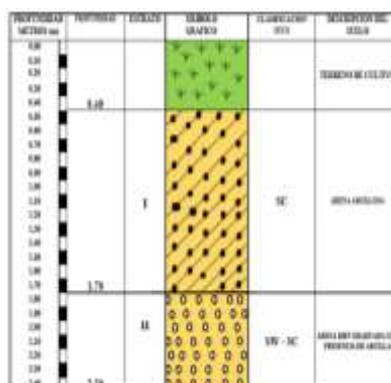
En la Figura 8 se muestra la representación de las curvas granulométricas de las muestras de suelo de los puntos de exploración 1, 2 y 3. El punto de exploración 1, presenta 3 estratos, el estrato I es un suelo MH que va desde 0.30m hasta los 0.55m de profundidad, el estrato II es un suelo CL que va desde 0.55m a 1.80m de profundidad y el estrato III es un suelo ML que va desde 1.80m hasta 2.40m de profundidad (Ver Figura N°9). El punto de exploración 2, presenta 2 estratos el estrato I es un suelo SC que va desde 0.40m hasta 1.70m de profundidad y el estrato II es un suelo SW-SC que va desde 1.70m hasta 2.40m de profundidad (Ver Figura N°10). El punto de exploración 3, presenta 2 estratos con una sola clasificación de suelos CL que va desde los 0.40m a 2.40m (Figure 11).



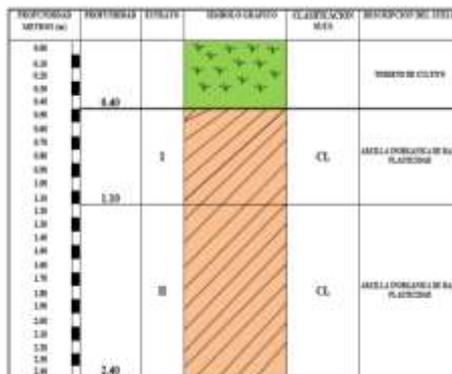
**Figura 8:** Curvas granulométricas de las muestras suelos en los puntos de exploración N°01, 02 y 03.  
Fuente: Elaborado por el autor.



**Figura 9:** Perfil estratigráfico del punto de exploración N°01.  
Fuente: Elaborado por el autor

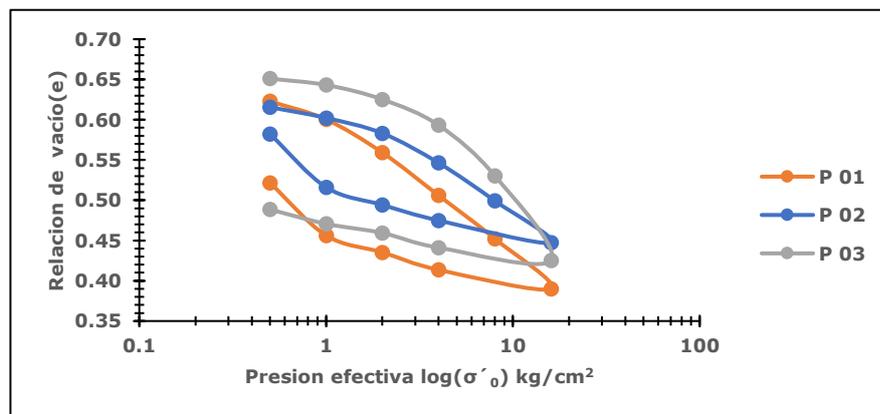


**Figura 10:** Perfil estratigráfico del punto de exploración N°02.  
Fuente: Elaborado por el autor.



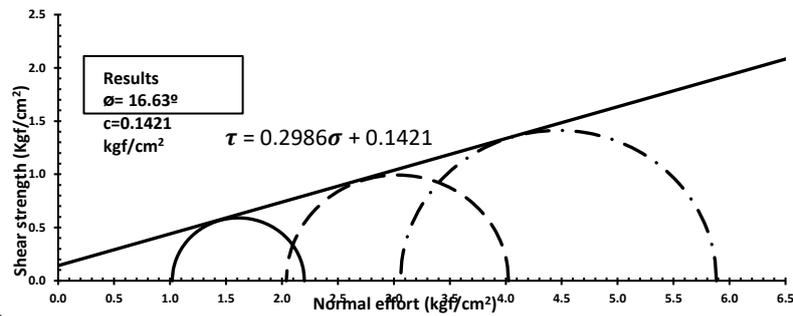
**Figura 11:** Perfil estratigráfico del punto de exploración N°03.  
Fuente: Elaborado por los autores.

En la Figura 12 se presentan las curvas de compresibilidad siguiendo el proceso de carga y descarga. Se observa que las pendientes de la curva de carga no son iguales sino similares, teniendo como un índice de compresión promedio de  $C_c=0.0186 \text{ cm}^2/\text{kg}$ , y en la curva de descarga las pendientes son muy similares con índice de hinchamiento promedio de  $C_s=0.049 \text{ cm}^2/\text{kg}$  tal como se puede apreciar en la tabla N°04, donde se muestran los resultados de los parámetros geotécnicos de los ensayos de consolidación unidimensional, de corte triaxial y la capacidad portante del suelo estudiado a una profundidad de 2.40m.

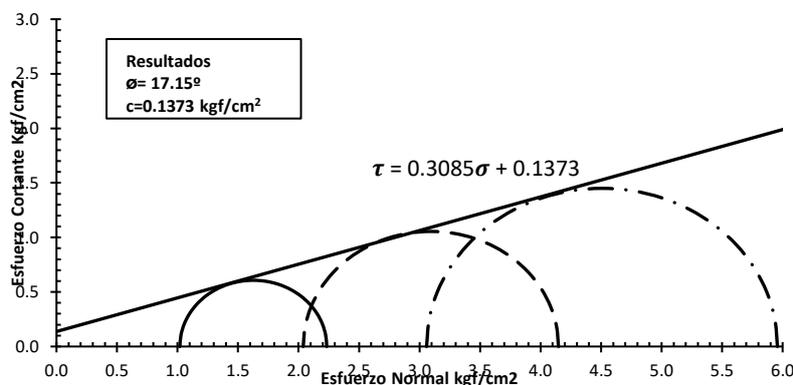


**Figura 12:** Gráficas de compresibilidad de los puntos de exploración 01, 02 y 03 de la zona de estudio.  
Fuente: Elaborado por el autor.

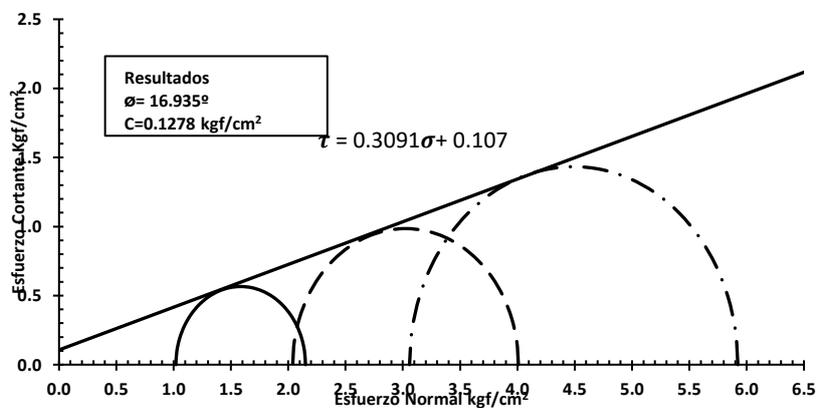
En la Figura 13, 14 y 15 se presentan las envolventes de Mohr Coulomb de los ensayos de corte triaxial realizadas en el laboratorio a las muestras extraídas de suelo en los puntos de exploración 1, 2 y 3, el punto de exploración 1 tiene un ángulo de fricción de  $16.63^\circ$  con una cohesión de  $0.1421 \text{ kg}/\text{cm}^2$ , el punto de exploración 2 tiene un ángulo de fricción de  $17.15^\circ$  con una cohesión de  $0.1373 \text{ kg}/\text{cm}^2$  y el punto de exploración 3 tiene un ángulo de fricción de  $16.935^\circ$  con una cohesión de  $0.1278 \text{ kg}/\text{cm}^2$ , (Ver Tabla 3).



**Figura 13:** Envolvente de Falla de Mohr Coulomb del Punto de Exploración N°01  
Fuente: Elaborado por los autores.



**Figura 14:** Envolvente de Falla de Mohr Coulomb del Punto de Exploración N°02.  
Fuente: Elaborado por el autor.



**Figura 15:** Envolvente de Falla de Mohr Coulomb del Punto de Exploración N°03.  
Fuente: Elaborado por el autor.

**Tabla 3.**

*Propiedades mecánicas de las muestras de suelo de los puntos de exploración N ° 1, 02 y 03*

Propiedades	Unidad	Punto de Exploración N°01	Punto de Exploración N°02	Punto de Exploración N°03
Ángulo de Fricción	°	16.626	17.145	17.176
Cohesión	kg/cm <sup>2</sup>	0.1421	0.1373	0.107
Nc	----	14.221	14.694	14.723
Nq	----	5.246	5.533	5.551
Nγ	----	2.047	2.239	2.243
Capacidad portante	kg/cm <sup>2</sup>	1.603	1.681	1.516

Presión de pre consolidación	kg/cm <sup>2</sup>	1.55	2.40	4.00
Presión de pre consolidación promedio	kg/cm <sup>2</sup>	2.65		
Módulo de elasticidad edométrico	kg/cm <sup>2</sup>	8.85	10.78	7.61
Módulo de elasticidad edométrico promedio	kg/cm <sup>2</sup>	9.08		
Coefficiente de compresión	cm <sup>2</sup> /kg	0.187	0.151	0.220
Coefficiente de compresión promedio	cm <sup>2</sup> /kg	0.186		
Coefficiente de hinchamiento	cm <sup>2</sup> /kg	0.053	0.055	0.038
Coefficiente de hinchamiento promedio		0.049		

Fuente: Elaborado por el autor.

### ***Análisis Estructural de la Super estructura y Cimentación***

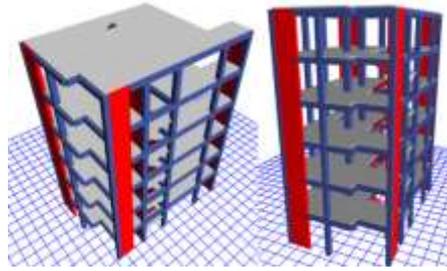
El análisis se ha realizado en una edificación que consta de 6 niveles, con techo horizontal de concreto armado. El sistema estructural de tipo dual: Columnas, Placas y Vigas de Concreto Armado en la Dirección YY, y XX. Los techos están conformados por la losa aligerada de 0.20m. Teniendo en cuenta la capacidad portante de 1.60 Kg/cm<sup>2</sup>, se hizo uso de platea de cimentación, según las solicitaciones de carga a las que estarán expuestas.

Se desarrolló un modelo tridimensional para realizar el análisis en condiciones de sismo. En dicho modelo los techos fueron representados por diafragmas rígidos con 3 grados de libertad. El proceso de análisis y diseño se realizó siguiendo el Reglamento Nacional de Edificaciones Peruano (R.N.E.). La metodología empleada para el diseño fue la de Resistencia. Además, en todos aquellos elementos con responsabilidad sísmica se realizó el diseño por capacidad. En la Figura 16 se muestra la distribución de las columnas y muros de corte en planta, indicando la separación de estos elementos estructurales y también se observa la renderización de la edificación estudiada. En la Figura 17 se presenta la elevación de la estructura y en la Figura 18 se muestra la vista en planta de la estructura estudiada. En la Figura 19 se presenta el espectro de respuesta sísmica usada para el análisis sismo resistente de la edificación y en la Figura 19 se observa los diagramas de momentos flectores y cortantes de la estructura en 3D sin considerar el asentamiento por consolidación. En la Figura 20 y 21 se visualiza el análisis de la cimentación con las cargas aplicadas sin considerar el asentamiento por consolidación.

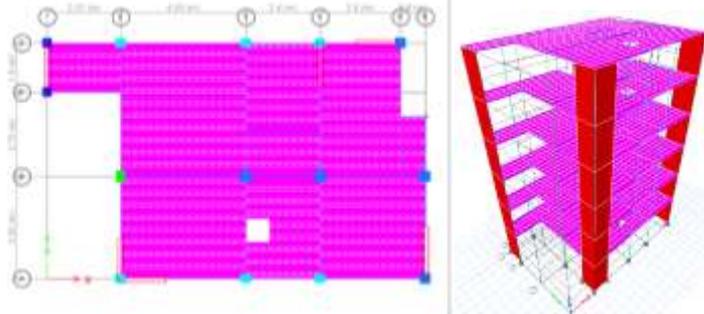


**Figura 16:** Plano de estructuración y renderización de la Edificación estudiada

Fuente: Elaborado por el autor



**Figura 17:** Estructuración en elevación de la Edificación estudiada  
Fuente: Elaborado por el autor



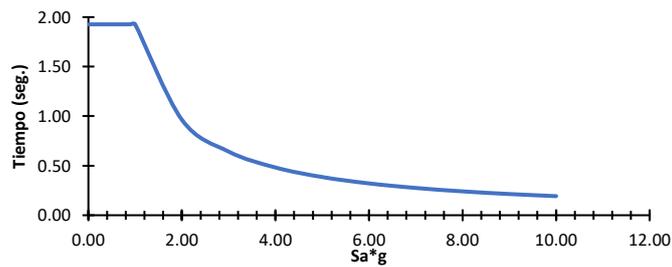
**Figura 18** Vista en Planta de la Estructura estudiada  
Fuente: Elaborado por el autor.

**Tabla 4.**

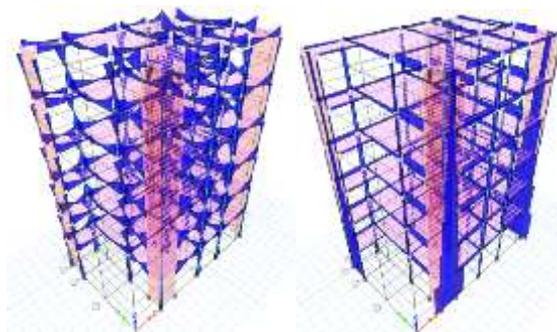
*Parámetros Sísmicos*

z	0.45
U	1
S	1.1
TP	1
TL	1.6
R	6.3
g	9.81

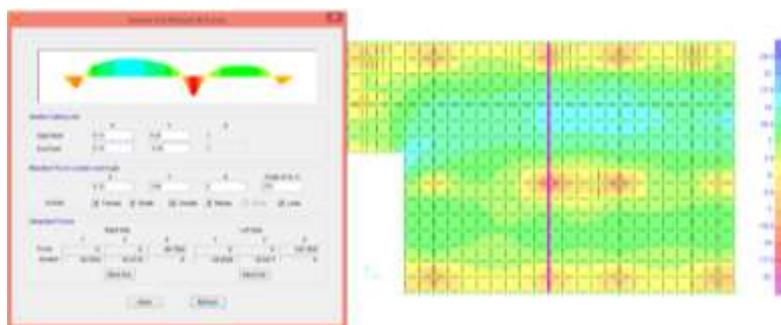
Fuente: Elaborado por el autor.



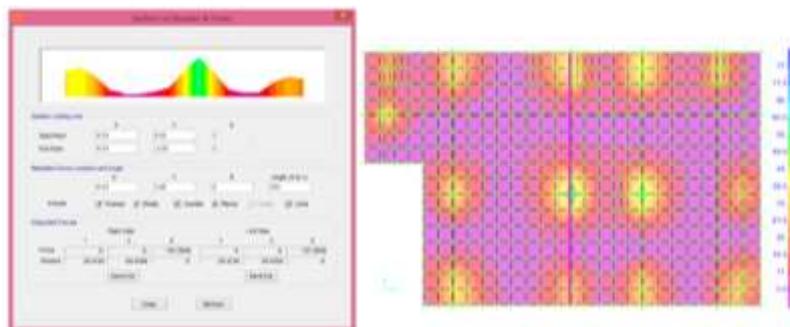
**Figura 19** Espectro de Respuesta Sísmica -  
Fuente: Elaborado por el autor.



**Figura 20** Diagrama de momentos y fuerzas cortantes en 3D sin asentamiento  
Fuente: Elaborado por el autor.



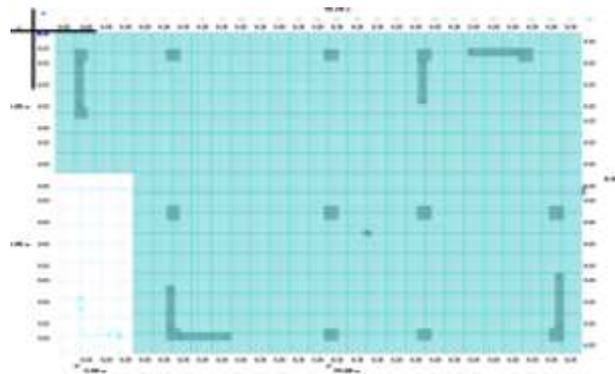
**Figura 21** Diagrama de momentos de la cimentación sin considerar asentamientos del Eje3  
Fuente: Elaborado por el autor.



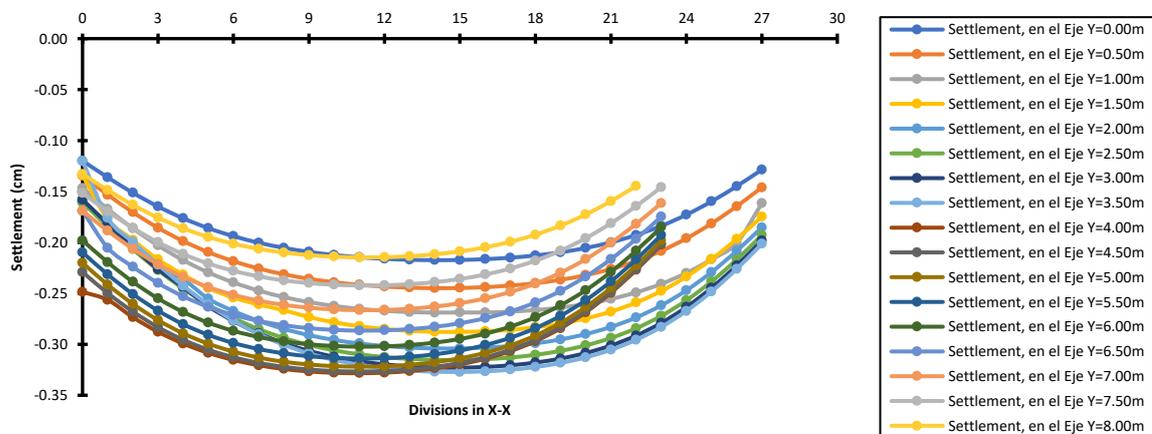
**Figura 22** Diagrama de cortantes de la cimentación sin considerar asentamientos del Eje3  
Fuente: Elaborado por el autor

### ***Cálculo de los asentamientos usando la Teoría de Boussinesq***

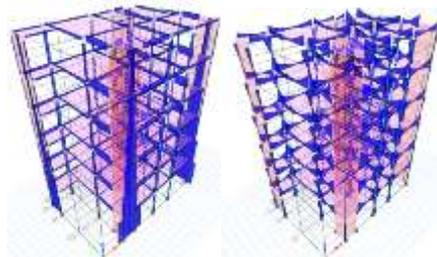
Se realizó el cálculo de asentamientos en la platea de Cimentación, para lo cual se dividió la losa en 27 partes en el eje X-X y 17 partes en el eje Y-Y, obteniendo distancias parciales de 0.50 m en el eje XX y 0.55m en el eje YY, en la cual para cada punto se calculó su asentamiento en función de las propiedades del suelo y geometría de la estructura. En la Figura 23 se presenta la distribución de los 476 puntos en la losa de cimentación cuyos asentamientos de los puntos mencionados se observa en la Figura 24, estos asentamientos varían desde 1.20mm hasta 3.28mm. En la Figura 25 los diagramas de momentos y cortantes considerando los asentamientos por consolidación, estos asentamientos se insertaron al pie de las columnas y muros de corte.



**Figura 23** División de 27 partes en el eje X de 0.50m y 17 partes en el Y de 0.55m  
Fuente: Elaborado por el autor.



**Figura 24.** Asentamiento de los 476 puntos de la edificación estudiada  
Fuente: Elaborado por el autor

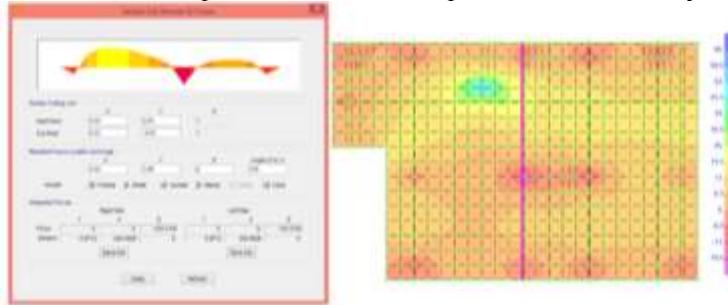


**Figura 25** Diagrama de momentos y fuerzas cortantes en 3D con asentamiento  
Fuente: Elaborado por el autor.

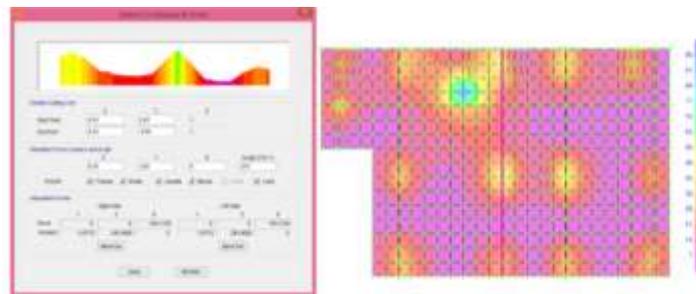
En la Figura 26 y 27 se presentan los diagramas de momentos y fuerzas cortantes en el eje 3-3 respectivamente de la losa de cimentación de la estructura analizada.

En la Tabla 5 se presenta la cantidad de materiales de concreto, acero de refuerzo y encofrado necesarios para poder construir la edificación producto del análisis estructural sin y con asentamiento por consolidación, donde el análisis arroja que el material que se incrementó para poder absorber los sobre esfuerzos producidos por los asentamientos diferenciales por consolidación es el acero de refuerzo, este incremento fue en 85.05%, tal como se observa en la Tabla 6.

En la Tabla 7 se presenta el costo diferenciado en nuevos soles de la estructura de concreto reforzado sin y con asentamiento siendo una diferencia de S/83,513.87, que representa un incremento de costo en un 31.26% del costo de la estructura si esta no hubiera sido analizada sin tener en cuenta los asentamientos por consolidación al pie de las columnas y muros de corte.



**Figura 26** Diagrama de momentos de la cimentación considerando asentamientos del Eje 3-3  
Fuente: Elaborado por el autor



**Figura 27** Diagrama de momentos de la cimentación considerando asentamientos del Eje 3-3  
Fuente: Elaborado por el autor

**Tabla 5.**

*Cantidad de concreto y acero de refuerzo usado en el diseño de la estructura estudiada sin y con asentamientos por consolidación*

Descripción de la partida	Sin asentamiento		Con asentamiento		Porcentaje diferenciado de los materiales del análisis con y sin asentamiento (%)
	Und.	Cantidad	Und.	Cantidad	
<b>Losa de cimentación</b>					
Concreto	m3	47.66	m3	47.66	0.00
Acero de refuerzo	kg	4383.5	kg	5799.29	32.30
<b>Columnas</b>					
Concreto	m3	22.36	m3	22.36	0.00
Encofrado	m2	64.39	m2	64.39	0.00
Acero de refuerzo	kg	4565.23	kg	12191.88	167.06
<b>Muros de corte</b>					
Concreto	m3	28.03	m3	28.03	0.00
Encofrado	m2	299.7	m2	299.7	0.00
Acero de refuerzo	kg	3889.63	kg	9668.62	148.57
<b>Vigas Peraltadas</b>					
Concreto	m3	43.88	m3	43.88	0.00
Encofrado	m2	247.14	m2	247.14	0.00
Acero de refuerzo	kg	6081.53	kg	10283.76	69.10
<b>Losa Aligerada</b>					
Concreto	m3	39.94	m3	39.94	0.00
Encofrado	m2	399.95	m2	399.95	0.00
Acero de refuerzo	kg	3448.04	kg	3448.04	0.00
Ladrillos para techo	Und.	6739	Und.	6739	0.00

Fuente: Elaborado por el autor.

**Tabla 6.**

*Resumen de las cantidades de los materiales de concreto, encofrado y acero de refuerzo sin y con asentamiento por consolidación*

Descripción de la partida	Sin asentamiento		Con asentamiento		Incremento del material (%)
	Und.	Cantidad	Und.	Cantidad	
Concreto	m3	181.87	m3	181.87	0.00
Encofrado	m2	1011.18	m2	1011.18	0.00
Acero de refuerzo	kg	22367.93	kg	41391.59	85.05
Ladrillos para techo e=0.20m	Und.	6739	Und.	6739	0.00

*Fuente: Elaborado por el autor.*

**Tabla 7..**

*Costo directo de construcción de las estructuras de concreto reforzado de la edificación estudiada sin y con asentamiento por consolidación*

Descripción de la partida	Costo Unitario (S/.)	Sin asentamiento			Con asentamiento		
		Un d.	Canti dad	Precio Parcial (S/.)	Un d.	Cantida d	Precio Parcial (S/.)
<b>Losa de cimentación</b>							
Concreto f'c=210	343.21	m3	47.66	16357.39	m3	47.66	16357.39
Acero de refuerzo	4.39	kg	4383.	19243.57	kg	5799.29	25458.88
<b>Columnas</b>							
Concreto	508.3	m3	22.36	11365.59	m3	22.36	11365.59
Encofrado	71.87	m2	64.39	4627.71	m2	64.39	4627.71
Acero de refuerzo	4.39	kg	4565.	20041.36	kg	12191.8	53522.35
<b>Muros de corte</b>							
Concreto	576.24	m3	28.03	16152.01	m3	28.03	16152.01
Encofrado	70.23	m2	299.7	21047.93	m2	299.7	21047.93
Acero de refuerzo	4.39	kg	3889.	17075.48	kg	9668.62	42445.24
<b>Vigas Peralgadas</b>							
Concreto	379.51	m3	43.88	16652.90	m3	43.88	16652.90
Encofrado	91.06	m2	247.1	22504.57	m2	247.14	22504.57
Acero de refuerzo	4.39	kg	6081.	26697.92	kg	10283.7	45145.71
<b>Losa Aligerada</b>							
Concreto	365.39	m3	39.94	14593.68	m3	39.94	14593.68
Encofrado	71.8	m2	399.9	28716.41	m2	399.95	28716.41
Acero de refuerzo	4.39	kg	3448.	15136.90	kg	3448.04	15136.90
Ladrillos para techo	2.51	Un	6739	16914.89	Un	6739	16914.89
Costo Directo S/.		267128.28			350642.15		
Diferencia de costos S/.		83513.87					
Incremento en el costo (%)		31.26					

*Fuente: Elaborado por el autor.*

#### IV. CONCLUSIONES

Los asentamientos producidos por consolidación unidimensional deben de ser considerados en el análisis de las estructuras de edificaciones para prevenir colapsos en la edificación y problemas en los conductos de gas e instalaciones de alcantarillado.

Se determinó que los asentamientos por consolidación oscilan entre 1.20 mm a 3.28 mm, a pesar que el asentamiento máximo tolerable es de 25 mm, se observó que estos asentamientos diferenciales ocasionaron sobre esfuerzos en la cimentación, vigas y columnas lo que se incrementó el área del acero de refuerzo para poder absorber la energía de deformación ocasionadas por las fuerzas aplicadas a la estructura.

Los asentamientos por consolidación siempre van a originar asentamientos diferenciales incrementándose el asentamiento en puntos más cercanos a la línea de acción de las cargas aplicadas en las estructuras y que por más pequeños que estos sean, debido a que son diferenciales van a ocasionar sobre esfuerzos en la cimentación, vigas y columnas en una edificación llevando a la estructura a la destrucción.

El incremento del acero de refuerzo fue de 85.05%, lo que incidió directamente en el aumento del costo de la construcción de la edificación considerando asentamientos por consolidación en el análisis estructural de la edificación, este aumento en costo fue en un 31.26% a nivel del casco estructural.

## V. REFERENCIAS

- Algin, H., & Algin, Z. (2009). Elastic settlements under linear surface pressures on rectangular areas. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33(8), 1087-1108. doi:10.1002/nag.757
- Álvarez Deulofeu, E., Beira Fontaine, E., Cabrera-Castro, P., & Reyes Pérez, O. (2019). Comparing geotechnical methods to assess primary consolidation settlements for raft foundations a. *Minería y Geología*, 35(4), 369-383.
- Braja M. Das. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones* (7ma ed.). (S. R. Cervantes Gonzales, O. A. Ramirez Rosas, Edits., & S. S. Edition, Trad.) México D.F., México D.F., México: Cengage Learning Latinoamerica.
- Builes Brand, M. (2014). Incidencia de la velocidad de aplicación de carga en la resistencia al corte no drenado de suelos residuales de anfibolita en el Valle de San Nicolás, Antioquia (Colombia). *Revista EIA*, 11(21), 89-97.
- Costa, A., Kok, S., & Korff, M. (2020). Systematic assessment of damage to buildings due to groundwater lowering-induced subsidence: Methodology for large scale application in the Netherlands. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 577-582. doi:10.5194/piahs-382-577-2020
- Delgado Martinez, D., & Quevedo Sotolongo, G. (2008). Determinación de la presión de preconsolidación de los suelos típicos de la región central de Cuba y su influencia en el cálculo de los asentamientos. *Ingeniería (Revista académica)*, 21-29.
- Díaz, E., & Tomás, R. (2016). Cálculo del asiento elástico tridimensional de cimentaciones de rigidez variable en terrenos con una capa rígida inclinada. *Informes de la Construcción*, 68(542), e144. doi:http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.039.
- Ganjavi, B., & Hao, H. (17 de June de 2012). A parametric study on the evaluation of ductility demand distribution in multi-degree-of-freedom systems considering soil-structure interaction effects. (ELSEVIER, Ed.) *Engineering Structures*, 43, 88 - 104. doi:10.1016/j.engstruct.2012.05.006

- Guerdouh, D., & Khalfallah, S. (2019). Efectos de la interacción suelo-estructura sobre el comportamiento sísmico de estructuras marco. *Revista de la construcción*, 18(2). doi:10.7764/rdlc.18.2.349
- Hossne García, A. (2014). Elastoplasticidad de un suelo franco arenoso de Sabana. *Saber*, 26(2), 153-167.
- Ishibashi, I., & Hazarika, H. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals and Applications*. (L. Taylor & Francis Group, Ed.)
- Kavya Supriya, A., & Ravi Kumar Reddy, C. (2019). Soil interaction of building frame resting on clayey soil: Effect of change of footing size. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(2), 4874-4879. doi:10.35940/ijrte.B3618.078219
- Koppula, M., & Ravi Kumar Reddy, C. (2019). Soil interaction of building frame resting on clayey soil: Effect of change of aspect ratio. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8, 2875-2881. doi:10.35940/ijrteB2149.078219
- Mánica, M. (2012). Distribución de asentamientos elásticos producidos por una configuración de carga superficial compleja. *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, (págs. 1-8). Cancún, Quintana Roo.
- Martínez Galván, S., & Romo Organista, M. (Julio-Septiembre de 2013). Capacidad de carga tridimensional de celdas estructuradas apoyadas en suelo cohesivo: método de análisis simplificado. *Ingeniería, investigación y Tecnología*, XIV (3), 399-412.
- Molina Gómez, F., Bulla Cruz, L., Moreno Anselmi, L., Ruge, J., & Arévalo Daza, C. (April de 2019). Assessment of groundwater level variations using multivariate statistical methods. *Ingeniería e Investigación*, 39(1), 36-42. doi:https://doi.org/10.15446/ing.investig.v39n1.71670
- Moya Andino, G. (2015). *Estudio y análisis del comportamiento estructural de cimentaciones superficiales por efectos de consolidación del suelo de fundación, según la metodología propuesta por la norma ecuatoriana de la construcción*. Universidad Técnica de Ambato - Ecuador.
- Oh, W., & Vanapalli, S. (2011). Modeling the applied vertical stress and settlement relationship of shallow foundations in saturated and unsaturated sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(3), 425-438.
- Orozco Calderón, M., & Equihua Anguiano. (2010). Fórmulas de Boussinesq para un triángulo rectángulo y programación de la solución de Damy y Casales en hoja de cálculo. *XVI Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Memorias. Acapulco, Guerrero. 1*, págs. 31-36. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Orozco, M., & Equihua, L. (2012). Utilización de la hoja de cálculo: cálculo, esfuerzos, subsuelos. *XVII Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Memorias. Cancún, Quintana Roo, México*. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.

- Ozdemir, A., & Tahir Nalbantcilar, M. (June de 2016). Potential Settlement Due to Seismic Effects in the Residential Area of Ilgin (Konya, Turkey). *Earth Sciences Research Journal*, 20(2). doi:http://dx.doi.org/10.15446/esrj.v20n2.50062
- Reyes Ortiz, Ó., Camacho Tauta, J., & Morantes, I. (01 de Julio de 2013). La teoría del estado crítico como herramienta para la interpretación de ensayos triaxiales en suelos cohesivos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13. doi:https://doi.org/10.18359/rcin.1323
- Rodríguez Rebolledo, J., Auvinet Guichard, G., & Martínez Carvajal, H. (April de 2015). Settlement analysis of friction piles in consolidating soft soils. *DYNA*, 82(192), 211-220. doi:https://doi.org/10.15446/dyna.v82n192.47752
- Shi, X., Sun, Y., & Shi, H. (2020). Deformation characteristics of soft soil foundation under long-term repeated loading. *Tumu yu Huanjing Gongcheng Xuebao/Journal of Civil and Environmental Engineering*, 42(2). doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.152
- Soheil , G., Sina , K., Seyed Vahid , M. S., & Ali Shayan , M. (2018). The Effect of Water's Cations on the Consolidation Settlement Process of Clay with Kaolinite. *ELSEVIER*. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.074
- Veniamin , I., Andrey , M., & Andrey , K. (2018). Calculating methodology of large base slabs: Compressible strata capacity and foundation settlement. *MATEC Web of Conferences* 196, 03002 (2018), 196, 8. doi:10.1051/mateconf/201819603002
- Wols, B., van Daal, K., & Van Thienen, P. (2013). Effects of climate change on drinking water distribution network integrity: Predicting pipe failure resulting from differential soil settlement. (C. 2. 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, Ed.) *Procedia Engineering*, 70, 1726-1734. doi:10.1016/j.proeng.2014.02.190
- Yeh, C., Lo, W., Lin, C., & Ding, C. (2020). Influence of pore water pressure change on consolidation behavior of saturated proelastic medium. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 375-379. doi:10.5194/piahs-382-375-2020
- Yin, Z. (2011). Elastic viscoplastic models for natural soft clay: review and development. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 33(9), 1357-1369.
- Zapata Medina, D., Galeano Parra, D., & Arboleda Monsalve, L. (2018). One-Dimensional Compressibility Behavior of Overconsolidated Bootlegger Cove Clays. *Geotechnical Special Publication*, 2018(GSP 295), 442-452. doi:10.1061/9780784481585.043