

**DISEÑO DE LOSA DE FUNDACIÓN PARA TALADRO DE PERFORACIÓN NABORS
RING 794**

Jorge Vargas Quintero
Gabriel Mancera Rodríguez

Tesis Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

Ingeniero Civil

Director
PhD Edison Osorio Bustamante

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Civil
Ingeniería Civil
Bogotá D.C, Colombia

2020

Nota de Aceptación.

Firma de los Jurados

Firma del Tutor

Bogotá D.C, Colombia. __ Noviembre de 2020.

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a Dios, por ser nuestra constante fuente de inspiración y darnos fuerza para continuar en este camino de obtener uno de los anhelos más deseados.

A nuestras familias, por su amor, esfuerzo y sacrificio en todos estos años. Gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta este punto y convertirnos en los profesionales que somos.

A cada una de las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Ha sido y será un orgullo y un privilegio pertenecer a la universidad Antonio Nariño.

"Hay una poderosa fuerza motriz dentro de cada ser humano que, una vez desatada, puede hacer que cualquier visión, sueño o deseo se haga realidad".

- Anthony Robbins-

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a la Universidad Antonio Nariño por ofrecernos conocimiento, discernimiento y soporte a lo largo de este camino con el propósito de conquistar nuestras metas. De la misma manera, deseamos expresar nuestros agradecimientos a la facultad de Ingeniería Civil e Ingeniería Ambiental quien siempre nos ofreció una constante retroalimentación y asesoría, a través de maravillosas personas las cuales nos ofrecieron guía para la realización de este proyecto.

¡Siempre estaremos agradecidos de por vida por pertenecer a esta gran Universidad!

RESUMEN

En el presente documento se enmarcó la necesidad de estudio de fundaciones para el taladro de perforación Nabors Ring 794, con el fin de proporcionar una tabla con detalles básicos de diseño para ser tenidos en cuenta al escoger una losa de fundación que pueda soportar las cargas del taladro y las cargas de operación del mismo cuando un pozo se encuentra en marcha, en condiciones previamente seleccionadas.

Al inicio del marco del documento se describe lo importante de la industria del petróleo y gas en términos económicos, y como han llegado cada vez a zonas geológicamente más complejas en donde debido a fallas geotécnicas se han presentado pérdidas y atrasos en los cronogramas de los proyectos. Lo anterior expuesto demanda un conocimiento general sobre el estudio de suelos, descritos en el documento como ensayos de resistencia al corte, SPT y módulo de Balasto para conocer la interacción suelo-estructura.

Posteriormente, teniendo la caracterización del suelo, se expone conceptos necesarios para el diseño de una losa de fundación, como Diseño a flexión, determinación del acero, y técnicas de construcción.

Finalmente se presenta nuestra propuesta con el método rígido convencional, que consiste en dejar las presiones del suelo uniformes, y de ahí se analizó el comportamiento de la losa de fundación con ayuda del software Robot Structural Analysis (*Licencia educativa*), con el fin de presentar una tabla con las características de diseño.

Palabras claves: Resistencia al Corte, SPT, módulo de Balasto, Raft Foundations, Shell.

ABSTRACT

This document outlined the need for a foundation study for the Nabors Ring 794 drilling rig, to provide a nomogram with basic design details to be taken into account when choosing a foundation slab that can withstand loads of the drill and operating loads when a well is running, under pre-selected conditions.

At the beginning of the document's framework, the importance of the oil and gas industry in economic terms is described, and how they have increasingly reached geologically more complex areas where, due to geotechnical failures, there have been losses and delays in project schedules. The aforementioned demands a general knowledge about the study of soils, described in the document as Shear Resistance Tests, SPT, and Ballast modulus to know the soil-structure interaction.

Subsequently, having the characterization of the soil, concepts necessary for the design of a foundation slab are exposed such as Bending design, determination of steel, construction techniques.

Finally, our proposal is presented with the conventional rigid method, which consists of leaving the ground pressures uniform, and from there the behavior of the foundation slab was analyzed with the help of the Robot Structural Analysis software (*Educational license*), to present the nomogram with characteristics of the design.

Keywords: Shear Strength, SPT, Ballast modulus, Raft Foundations, Shell.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	10
INTRODUCCIÓN	11
Antecedentes	11
Objetivo General	14
Objetivos específicos:	14
Formulación del problema	15
CONDICIONES GENERALES	16
Localización	16
Clima y precipitación	17
Aspectos Sísmicos.....	18
Tipo de perfil del suelo.....	19
Geología	20
Geología Regional.....	20
Caracterización de la Zona de Estudio	21
Clasificación	21
FICHA TECNICA TALADRO NABORS RIG 794	23
MARCO TEÓRICO.....	25

Resistencia al Corte.....	25
Correlación con ensayo SPT	25
Corrección por energía (n1).....	26
Corrección por confinamiento (sobrecarga)	27
Análisis de Capacidad de Corte – Suelo Natural	28
Losa de Cimentación.....	30
Requisitos para el Diseño de la Losa de Cimentación (Raft Foundation)	31
Módulo de Balasto	32
Diseño a flexión	33
Mecánica del concreto reforzado sujeto a flexión.....	33
Primera etapa concreto no agrietado.	34
Segunda etapa es con esfuerzos elásticos y concreto agrietado.	34
Tercera etapa de resistencia última.....	34
¿Cómo determinar Momento Último o Nominales de Flexión?	34
Método de Diseño por Resistencia	35
Determinación del Acero a Tensión	35
ESTADO DEL CONOCIMIENTO	37
Relación Suelo-Pilote-Estructural en el Análisis Sísmico en el Diseño de una Losa de Cimentación	42
Comportamiento de las Cimentaciones de Láminas Piramidales sobre Suelo Arenoso Reforzado	44
METODOLOGÍA.....	45
ANÁLISIS DE DISEÑO Y RESULTADOS.	47

Diagramas de diseño	47
Análisis de Diseño y resultados.	51
CONCLUSIÓN.....	55
DISCUSIÓN	56
Referencias bibliográficas.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propuestas para el factor de corrección por confinamiento del SPT. Fuente. ESTIMATIVOS DE PARAMETROS EFECTIVOS DE RESISTENCIA CON EL SPT	27
Tabla 2 Investigación y avances realizados.....	42
Tabla 3 APUS, INVIAS PUTUMAYO 2020.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización general del área de estudio. Sucumbios, Putumayo. Fuente: Google Earth 2020.....	17
Figura 2 Climograma Orito, Putumayo. Fuente. (Clima Puerto Asís: Temperatura, Climograma y Tabla Climática Para Puerto Asís - Climate-Data.Org, n.d.).....	18
Figura 3. Localización zona sísmica de Orito. Fuente NSR-10 (Titulo A, 2008) – Figura A.2.3.2	19

Figura 4. Mapa geológico regional del área de estudio. Tomado y modificado de la plancha geológica 465 Churuyaco. Servicio Geológico Colombiano, 2010. Fuente: Servicio Geológico Colombiano.....	21
Figura 5. Falla general por corte de una cimentación. Fuente. Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. (Braja, 2012)	29
Figura 6. Viga de Winkler1986. Fuente (Darío Aristizábal-Ochoa, n.d.)	32
Figura 7. Vigas de concreto simple y concreto reforzado, Fuente (Riveros, 2016)	33
Figure 8 Diagrama esfuerzo-deformación (Riveros, 2016)	35
Figura 9. Análisis de búsqueda, documentos por año. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus.....	38
Figura 10 Análisis de búsqueda, documentos por autor. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus. .	38
Figura 11 Análisis de búsqueda, documentos por organización. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus.	39
Figura 12 Análisis de búsqueda, documentos por país. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus. ...	39
Figura 13 Análisis de búsqueda, por tipos de documentos. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus.	40
Figura 14 Análisis de búsqueda, documentos por área de investigación. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus.	41
Figura 15. Análisis de búsqueda, documentos por promotor. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus	41
Figura 16 Diagrama de flujo para el diseño de la Losa de Cimentación, Fuente autores.....	46
Figura 17 Ilustración de carga de modelo en software, Fuente Autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa.....	47
Figura 18 Esfuerzos Internos, fuente (Villaroel, 2020)	48

Figura 19 Diagrama para la losa H 25 cm fuente Autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa.....	49
Figura 20 Diagrama para la losa = 30 cm, Fuente Autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa.....	50
Figura 21 Diagrama para la losa H 35cm, Fuente Autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa.....	50
Figura 22 Mapa de esfuerzos últimos, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa.....	51
Figura 23 Coeficiente de Balasto utilizado en el diseño. Fuente autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa.....	52
Figura 24 Nomograma. Fuente Autores.....	53

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Aa = coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva, para diseño.

Av = coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva, para diseño.

Fa = coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debida a los efectos de sitio, adimensional.

Fv = coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios, debida a los efectos de sitio, adimensional.

SPSI = interacción suelo-pilote-estructura

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La industria del petróleo y el gas se está desarrollando cada vez en entornos que geológicamente presentan mayores desafíos a las técnicas tradicionales de cimentación en la industria de hidrocarburos, desafiando los enfoques tradicionales. Una gran cantidad de reservas actuales de petróleo y gas en el mundo, incluidos algunos campos importantes en el Golfo de México, La Cuenca de Campos en La Costa de Brasil, La Bahía de China Bohai y La Llanura Amazónica Colombiana, están ubicadas en formaciones que involucran arenas geológicamente jóvenes no consolidadas, rocas suaves y débiles donde los granos están ligeramente cementados o incluso no unidos (*Monus et al, 1992*). Los principales problemas asociados con estas formaciones débiles son la inestabilidad de los terrenos donde se instalan los taladros de perforación y sus equipos de operación. La Costa del Golfo de EE. UU. Es una de las áreas donde los operadores de taladros de perforación experimentaron inmensos problemas en pozos petroleros, donde el colapsos de pozos es muy frecuente debido a la fractura y al movimiento del suelo, debido a las constantes vibraciones transmitidas del taladro al suelo, las cuales están plagadas de muchos trabajos adicionales y arreglos debido a la presencia de arenas no consolidadas y lutitas débiles (*Li, 1998*).

La inestabilidad del pozo se puede encontrar en cualquier etapa de la vida del mismo, incluyendo perforación, terminación, pruebas de flujo, producción y agotamiento. La inestabilidad de los suelos en pozos petroleros o de gas es una de las principales causas de las dificultades de perforación, lo que resulta en gastos sustanciales, pérdida de tiempo y no poder seguir el cronograma de trabajos y producción previamente establecidos, a veces incluso en la pérdida de parte o incluso la totalidad del pozo y daños en los taladros. Las opiniones de expertos pueden

variar en cuanto al valor de los equipos perdidos y el tiempo que surge directamente de la inestabilidad del suelo del proyecto que afecta el trabajo cotidiano, pero nadie podría cuestionar las millonarias pérdidas económicas que resultan por las fallas debido a una mala cimentación (*Dusseault, 1994*). En rocas blandas y débiles, los procesos de deformación, falla y flujo están dominados por respuestas de tensión-deformación no lineales, altas tasas de flujo de fluidos y cizallamiento acompañados de dilatación o contracción. Los problemas de estabilidad de suelos en pozos en estas formaciones tienen características diferentes, por lo tanto, se requieren nuevos enfoques y modelos (*NARANJO & SOTO, 2017*).

Se han aplicado muchas tecnologías innovadoras en la industria del petróleo y el gas para la instalación de torres de taladros petroleros, los cuales son instalados in situ. Una de las tecnologías es La cimentación *Raft*, este es un tipo de sistema de cimentación muy utilizado, también conocidos como Losa de Cimentación. La cimentación, es en realidad una losa de hormigón gruesa que descansa sobre una gran área de suelo reforzada con acero, que soporta columnas o muros, y transfiere cargas de la estructura al suelo. Por lo general, la losa de hormigón se extiende por toda el área de la estructura que sostiene (*Civiltoday, S.F*).

Recientemente, los avances tecnológicos han estado empujando el alcance de los pozos cada vez a una profundidad más amplia (*Xu, 2007*), debido a lo anterior existen en el mercado taladros más grandes. Los pozos de gran alcance y de gran inclinación deben permanecer abiertos durante períodos de tiempo prolongados, no solo durante el programa de perforación, sino también durante la vida útil de un yacimiento lo que genera la necesidad de cimentaciones duraderas; ejemplo: se perforó un pozo de 8.715 m de profundidad en roca cristalina en Alemania, y se observaron algunos tipos de inestabilidades en el suelo del proyecto como rupturas en las plataformas petroleras, zonas de lavado y secciones debajo del medidor, etc. (*Hoffers, Engeser, & Rischmuller, 1994*). En los

campos de Cusiana (Colombia), el campo de Pedernales (Venezuela), la cuenca de Alberta (Canadá), la cuenca de Tarim (China), ciertas áreas del mar de Noruega y la costa de Indonesia, se han reportado ciertas inestabilidades de pozos asociada con condiciones geológicas complejas y que en ocasiones como en Colombia, tienen un alto nivel sísmico, donde el régimen de estrés está controlado por una onda de falla activa (*Kassaras & Kapetanidis, 2018*). Por otra parte cuando se perforan pozos en formaciones naturalmente fracturadas, densidades altas de lodo permiten que el fluido de perforación penetre en fracturas, movilizandolos bloques rocosos e intensificando la deformación a causa de gases que se liberan (*Peng & Zhang, 2007*). Cuando esto ocurre la formación rocosa ya no está sujeta, ni unidos por el lodo, y los bloques desestabilizados pueden derrumbarse como resultado de la continua vibración de los taladros, provocando una falla en el terreno (*Addis, 2017*). En el momento que un taladro petrolero cruza una falla, el lodo puede invadir el plano de discontinuidad, además de las pérdidas de lodo, la penetración del fluido reduce el estrés normal e induce un desplazamiento a lo largo de los planos de grietas que podrían cortar el pozo y hacer perder la estabilidad de la torres de los taladros (*Maury & Zurdo, 1996*).

Las consecuencias pueden volverse catastróficas y podrían conducir a la pérdida parcial o incluso total de los pozos, creando la necesidad de perforar nuevos pozos, (*Maury & Zurdo, 1996*).

En la figura 1 se representa las diferentes estratos del suelo los cuales tienen un comportamiento diferente al ser sometidos a cargas.



Figura 1. Caracterización de suelos blandos. Fuente (EDAFOLOGIA. Lección 1. El Perfil Del Suelo y Sus Horizontes 2., n.d.)

Objetivo General

Determinar el comportamiento de una losa de cimentación con diferentes dimensiones para un taladro de perforación, donde se verifique un diseño de losa de fundación óptimo, y suficiente para cumplir con los trabajos de extracción de crudo, gas o agua. Con el fin de dar una información asertiva de las características de diseño, y las mejores recomendaciones en un diseño.

Objetivos específicos:

- Verificar que las dimensiones de losa propuestas sean diseñables y viables para el proyecto.
- Implementar una tabla multifuncional para determinar el grado de optimización del diseño.

- Demostrar de forma gráfica el comportamiento de las losas de cimentación siendo sometidas a las cargas del taladro de perforación y su plataforma.

Formulación del problema

Debido a las enormes cargas transmitidas por los taladros petroleros al suelo por el mismo peso de las plataformas y las vibraciones de onda de las perforaciones es necesario presentar alternativas para la estabilidad de las estructuras en yacimientos de petróleo, ya que se pueden presentar fallas en pozos incluso después de unos días de perforación.

Esto se debe a que la presión de poros antes de perforar en una formación de baja permeabilidad es muy alta en comparación con la de una formación de alta permeabilidad debido a que la presión de poros no puede disiparse tan fácilmente cuando entra en contacto con el lodo (*Zhang, Al-Bazali, Ong, & Sharma, 2006*). Además, para suelos blandos químicamente activos, el agua hace que el suelo se encuentre más saturado, lo que resulta en un cambio en las propiedades físicas de la roca. Los estudios experimentales muestran cambios en la fuerza en estratos de suelo jóvenes durante tales interacciones químicas que afectan las cimentaciones en pozos petroleros (*Zhang, Al-Bazali, Ong, & Sharma, 2006*).

Los efectos sobre las propiedades de la roca y la densidad crítica del peso del lodo debido a la temperatura también son muy importantes cuando se tienen en cuenta los cambios temporales o transitorios en las propiedades de la formación de rocas. En el pequeño análisis anterior, se puede ver que hay muchos parámetros que se tienen en cuenta al perforar en las formaciones de rocas suaves y suelos arenosos, y estos parámetros están cambiando con respecto al tiempo y los cambios climáticos. Muchos de estos atributos pueden ser controlados por el ser humano aplicando técnicas como la construcción losas de hormigón que bajo condiciones estudiadas pueden soportar

el cambio del clima y fallas en el suelo, además, debido a que son muchas las variables a tener en cuenta y cambios que suceden al mismo tiempo en excavaciones, para conseguir un tipo de suelo que pueda acoplar todos los cambios es un proceso problemático, y una solución óptima es muy compleja y la mayoría de las veces no es posible (*Sahraeian, Yamada, & Seki, 2019*).

El paso principal antes de perforar es proponer alternativas de operación en pozos. El objetivo principal del programa de pozos es perforar de manera segura sin enfrentar problemas de inestabilidad de suelos, como el colapso y la fractura de una pobre cimentación debido a las vibraciones y peso de los equipos y taladro en diferentes tipos de suelo. La resistencia de la cimentación debe diseñarse para estar dentro de la ventana operativa segura permitida. El efecto de interacción fisicoquímica-roca-fluido tiende a alterar el programa del pozo (*OilProduction, 2019*), y por esta razón es importante investigar el comportamiento losa de Cimentación en pozos.

CONDICIONES GENERALES

Localización

El área de estudio se localiza en el municipio de Orito, al occidente del departamento del Putumayo. Geográficamente, se encuentra ubicado en las coordenadas ($0^{\circ}28'57.80''N$ y $77^{\circ}10'13.6''O$), y presenta una altura promedio de 443 msnm. Región con reservas actuales de petróleo.

En la *Figura 2* se presenta la localización general del área de estudio (*Alcaldía de Orito, 2017*).

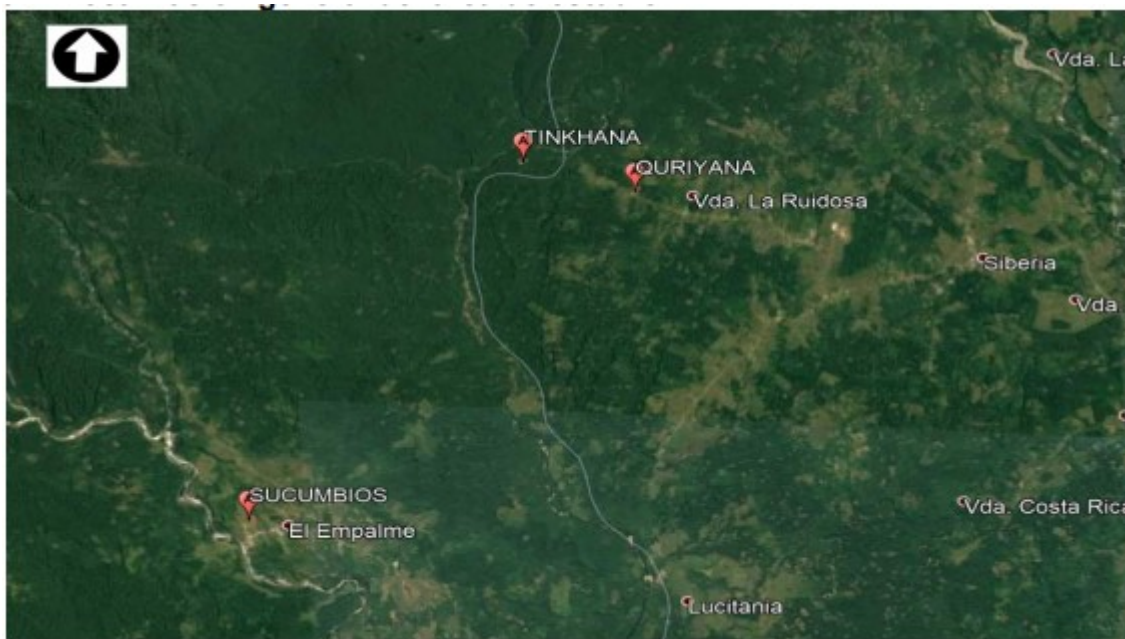


Figura 1. Localización general del área de estudio. Sucumbios, Putumayo. Fuente: Google Earth 2020

De acuerdo al planteamiento del proyecto, se tiene previsto la construcción de un (1) pozo nuevo en la locación existente. Nos centraremos en la losa de cimentación que soportara el taladro de perforación Nabors Rig 794.

Clima y precipitación

El clima de la zona es tropical, se presentan lluvias importantes durante todo el año. Según el sistema Köppen- Geiger se clasifica como Af (UC.CL, 2012). La temperatura media anual es 24.7°C, la precipitación media anual es de 3348 mm.

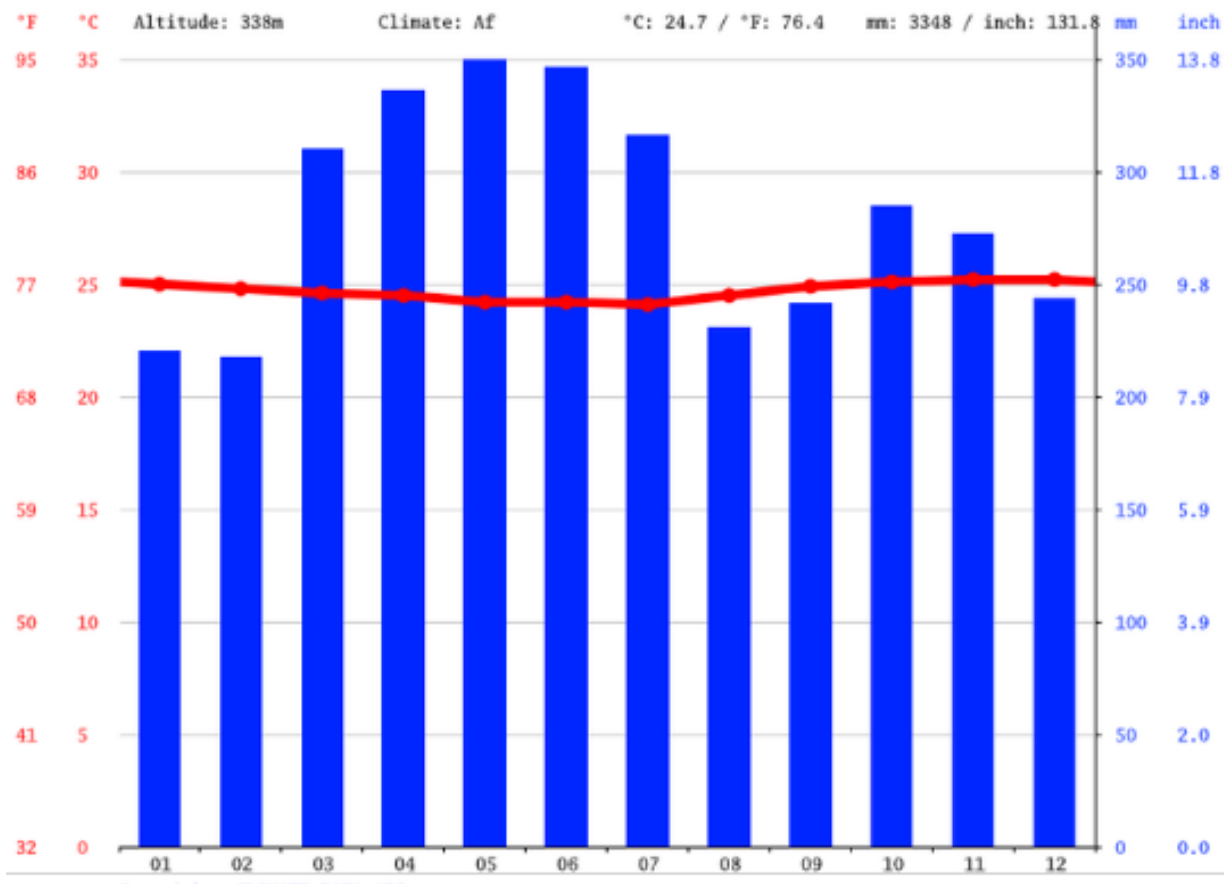


Figura 2 Climograma Orito, Putumayo. Fuente. (Clima Puerto Asís: Temperatura, Climograma y Tabla Climática Para Puerto Asís - Climate-Data.Org, n.d.)

Aspectos Sísmicos

Según las especificaciones del reglamento (*NSR 10, 2008*), el municipio de Orito pertenece a una zona de amenaza sísmica alta, con valores Aa de 0.30 y Av 0.25. Ver figura 3.

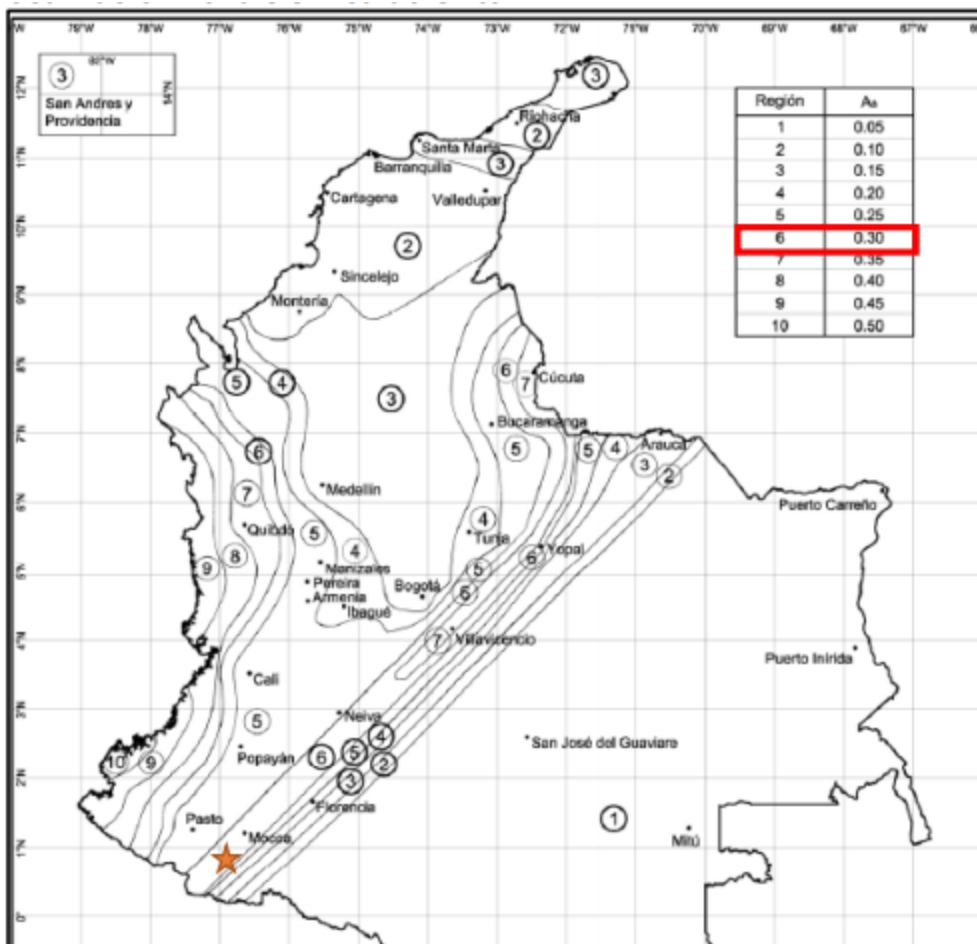


Figura 3. Localización zona sísmica de Orto. Fuente NSR-10 (Titulo A, 2008) – Figura A.2.3.2

Tipo de perfil del suelo

La clasificación del perfil del suelo que se va a suponer para este estudio y basados en la (NSR 10, 2008), es un Tipo de suelo D: Los cuales son perfiles de suelo rígido que cumplen con el criterio de velocidad de onda de cortante. $360\text{m/s} > \bar{V}_s \geq 180\text{ m/s}$; $50 > \bar{N} \geq 15$, o $100\text{ kPa} \left(\approx 1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) > \bar{S}_U \geq 50\text{ kPa} \left(\approx 0.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$.

Valores de Fa para D:

- $A_a \leq 0.1 = 1.6$
- $A_a \leq 0.2 = 1.4$
- $A_a \leq 0.3 = 1.3$

Valores de Fv para D:

- $A_v \leq 0.1 = 2.4$
- $A_v \leq 0.2 = 2.0$
- $A_v \leq 0.3 = 1.8$

Geología

Geología Regional

El área de nuestro proyecto se localiza al suroccidente del país, corresponde a una región muy compleja, tanto en la parte geológica como en los aspectos estratigráficos. En esta región confluyen las tres grandes cordilleras que constituyen el sistema montañoso andino en Colombia y de ella hacen parte accidentes geográficos como el Macizo Colombiano y el Nudo de Los Pastos (*Duque-Escobar, 2007*).

En la Figura 4 se muestra el mapa geológico del área de estudio. De acuerdo a la línea de refracción sísmica y con base en la información obtenida de la plancha geológica 465 Churuyaco (2000), se determina la presencia de depósitos de aluviones compuestos por gravas, arenas, limos y lodos (*INGEOMINAS, 2003*).

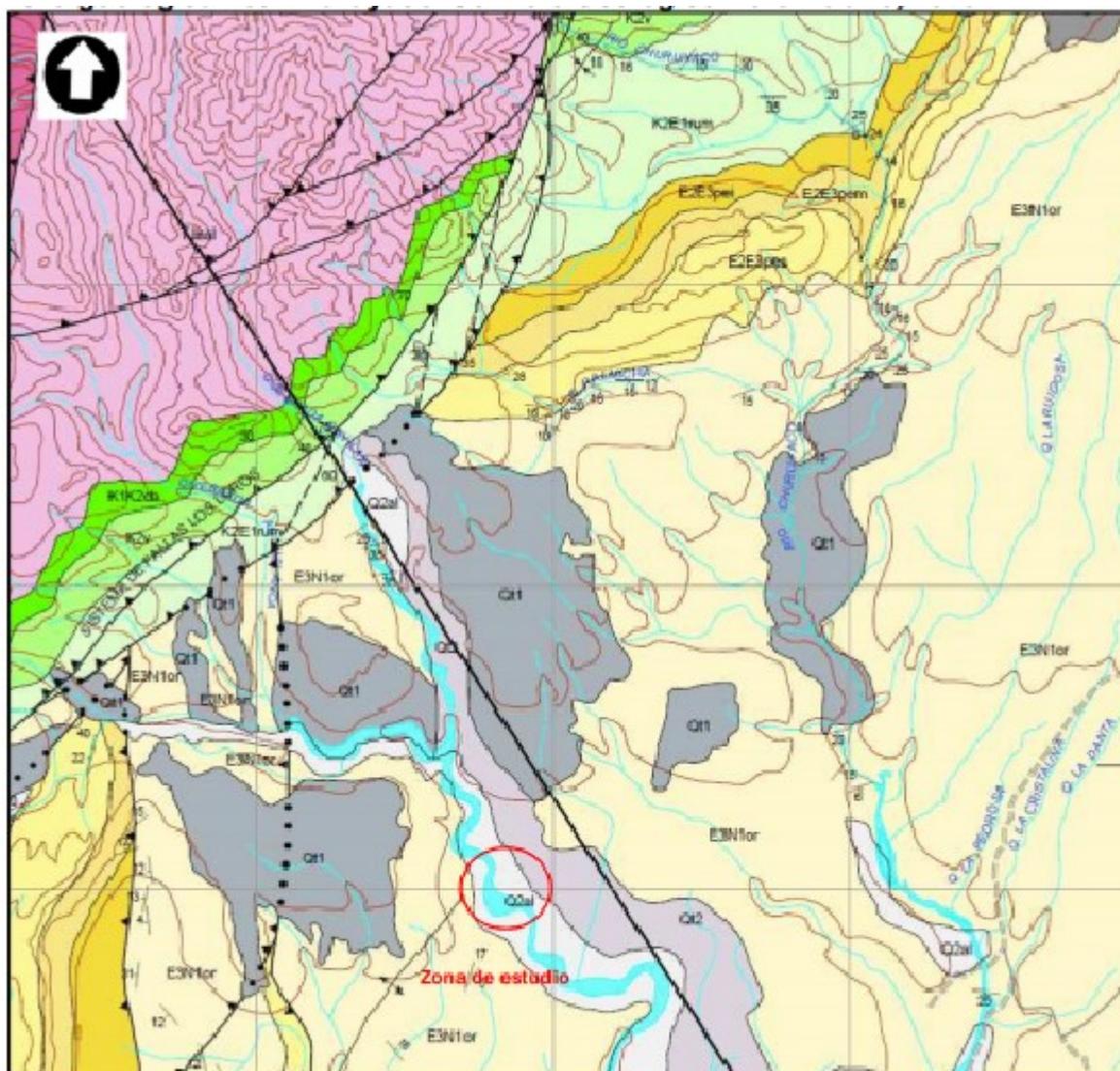


Figura 4. Mapa geológico regional del área de estudio. Tomado y modificado de la plancha geológica 465 Churuyaco. Servicio Geológico Colombiano, 2010. Fuente: Servicio Geológico Colombiano

Caracterización de la Zona de Estudio

Clasificación

Se reporta una humedad de alta a partir de los 0.5 metros de profundidad. La presencia de altos niveles freáticos en toda la locación se debe a las altas precipitaciones que se registran en la locación. Los materiales presentes en la zona corresponden a suelos granulares tipo arenas limosas

con gravas las cuales poseen grandes valores de permeabilidad facilitando el drenaje en toda el área de la locación (*Dirrección de Planificación de Putumayo, 2014*).

En cuanto a los límites de consistencia, se tiene registrado que el estrato superficial posee una pequeña fracción arcillosa. A partir de 1m de profundidad se puede apreciar la presencia de materiales granulares los cuales no poseen ningún tipo de plasticidad. El comportamiento mecánico de estos materiales es bueno desde el punto de vista de capacidad de soporte y asentamientos. El límite líquido varía entre 0 y 28% en las arcillas de alta plasticidad y el límite plástico entre 21 y 25%. El comportamiento de las arcillas es semi-sólido, lo cual corresponde a una compresibilidad media a alta, por lo que este tipo de suelos en épocas de invierno pueden presentar deformaciones importantes al someterse a aplicación de cargas (*Aysen A, 2002*)

FICHA TÉCNICA TALADRO NABORS RIG 794

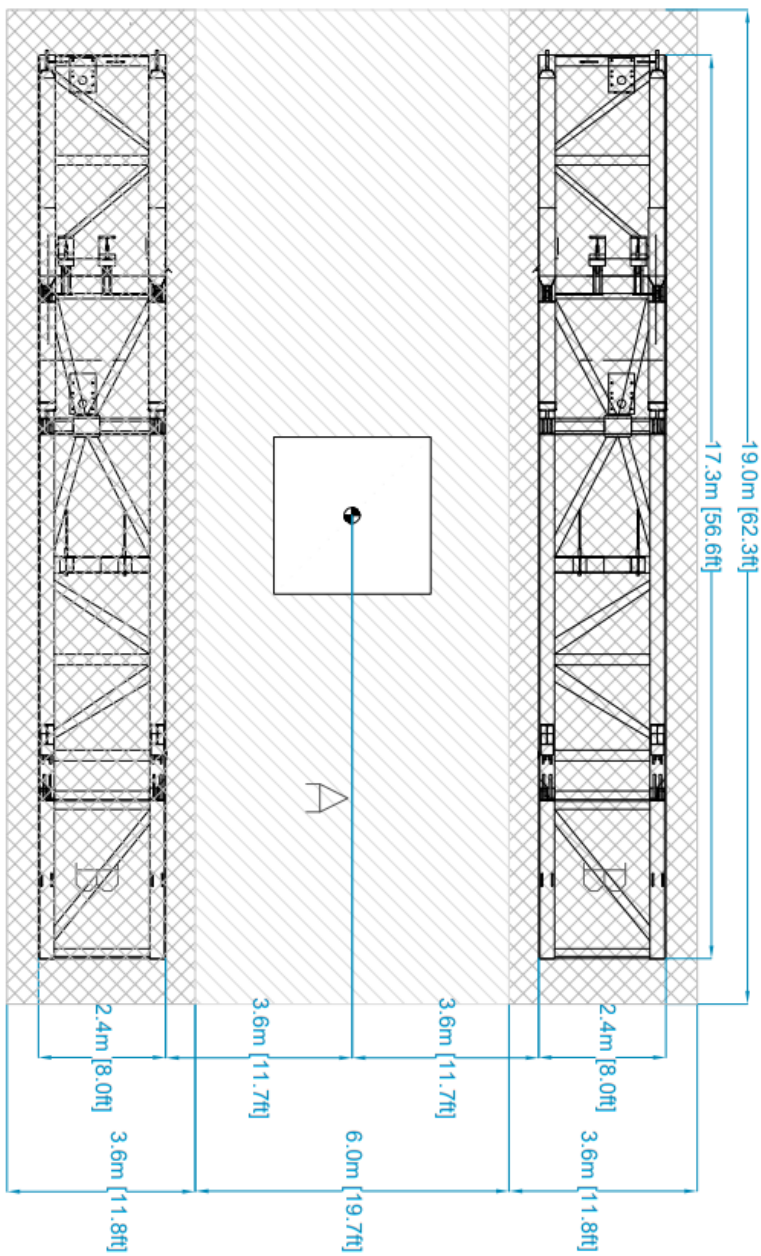
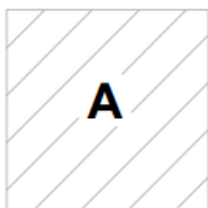
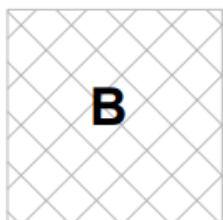


Figura 5, DataSheet (Nabors Industry. 2020) Nabors Drilling

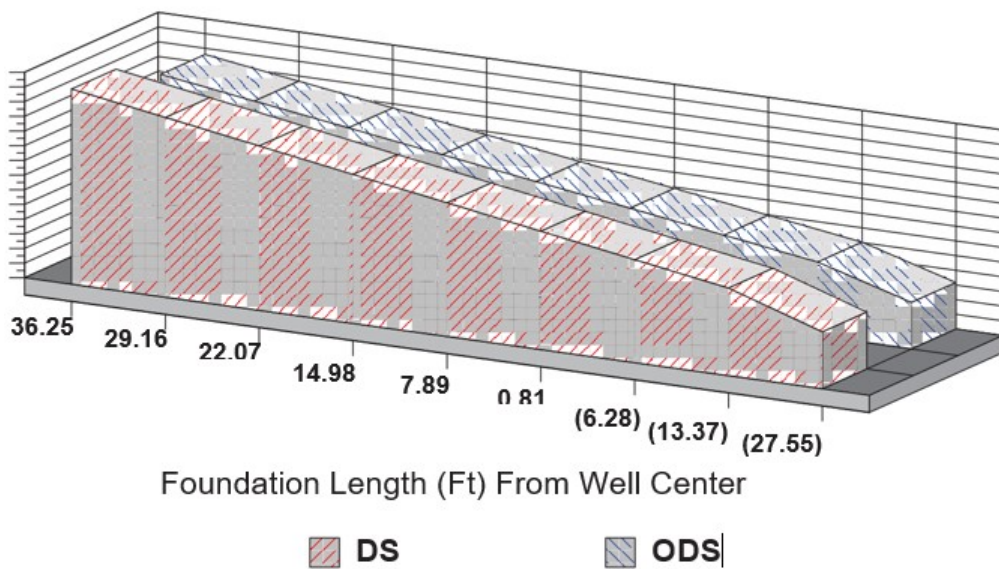
Requerimientos de cimentación:



1 T/m²
Carga viva.



28 T/m²
Carga de operación



Distancia desde el centro del pozo (origen)	Carga máxima de cimentación Max Tn / m ²
m	Elementos encontrados
11.04899965	26.001
8.887967716	25.162
6.726935785	24.831
4.565903854	21.544
2.404871923	21.014
0.246887992	19.471
1.914143939	15.010
4.07517587	15.000
8.397239731	14.841

Nota:

Estos cálculos se basan en las dimensiones reales de los patines de la torre del taladro *NABORS RIG794*, incluida en el data sheet.

MARCO TEÓRICO**Resistencia al Corte**

Para la conocer las medidas de resistencia al corte, es necesario tener los resultados de ensayos de compresión inconfiada, a partir de los cuales es posible conseguir la cohesión no drenada (C_u) y ensayos de corte directo en condiciones consolidadas no drenadas que nos da la información de las medidas de resistencia de los suelos. (*Braja, 2012*).

Correlación con ensayo SPT

Para conseguir las medidas de resistencia de los materiales que componen el perfil estratigráfico reconocido durante la etapa de exploración geotécnica, es necesario efectuar cálculos

con correlaciones matemáticas, que permiten obtener el ángulo de fricción por medio de los resultados del SPT (*arenas y materiales cohesivos*) (Braja, 2012). Teniendo en cuenta lo anterior, se debe proceder con la correlación del SPT con el fin de calcular el ángulo de fricción de los estratos encontrados en los sondeos realizados. De acuerdo a (Bowles, 1981) para efectuar las correcciones de los resultados del ensayo de penetración estándar (*SPT, N campo*) se requiere de la siguiente expresión general:

$$N_{CRR} = N * C_n * n_1 * n_2 * n_3 * n_4$$

En la cual:

- N_{CRR} Valor de N Corregido.
- N Valor de N de Campo.
- C_n Factor de corrección por confinamiento efectivo.
- n_1 Factor por energía del martillo ($0.45 < \eta_1 < 1$).
- n_2 Factor por longitud de la varilla ($0.75 < \eta_2 < 1$).
- n_3 Factor por revestimiento interno del tomamuestras ($0.8 < n_3 < 1$).
- n_4 Factor por diámetro de la perforación.

(Gonzalez, 1999)

Corrección por energía (n_1)

$$N_{e1} = N_{e2} * \left(\frac{e_2}{e_1}\right) = N_{60} = N_{45} \left(\frac{45}{60}\right) = 0.75N_{45}$$

(Gonzalez, 1999)

Corrección por confinamiento (sobrecarga)

El factor Corrección por confinamiento según (Gonzalez, 1999) se hace por medio del factor C_n , representado de la siguiente manera:

$$N_{corr} = N_1 = C_n * N$$

“Y se ha utilizado de forma estándar a un esfuerzo vertical de referencia $\sigma_{VR} = \frac{1kg}{cm^2} \approx 1 \text{ atmósfera} = \mathcal{P}_u$, como una función del parámetro R_s definido por:” (Gonzalez, 1999)

$$R_s = \frac{\sigma'_v}{\mathcal{P}_u}$$

“Se pueden encontrar diversas propuestas, entre las que se destacan las siguientes:

Propuestas para el factor de corrección por confinamiento del SPT” (Gonzalez, 1999).

En la tabla 1, se presenta según los autores enlistados las formas determinar el factor de corrección por confinamiento del SPT.

Tabla 1 Propuestas para el factor de corrección por confinamiento del SPT. Fuente. ESTIMATIVOS DE PARAMETROS EFECTIVOS DE RESISTENCIA CON EL SPT

Autor	Expresión
Peck	$C_n = \frac{\log\left(\frac{20}{R_s}\right)}{\log(20)}$
Seed	$C_n = 1 - 1.25 \log(R_s)$
Meyerhoff-Ishihara	$C_n = \left(\frac{1.70}{0.7 + R_s}\right)$
Liao&Witman	$C_n = \sqrt{\left(\frac{2}{R_s}\right)}$

Skempton	$C_n = \left(\frac{2}{1 + R_s} \right)$
González	$C_n = \log \left(\frac{10}{R_s} \right)$
Seed-Idriss (Marcuson)	$C_n = 1 - K \log(R_s)$ (K=1.41 para $R_s < 1$; K=0.92 para $R_s \geq 1$)
Zeevaert	$C_n = \frac{191.52}{(95.76 + \sigma'_{vo})}$
Schmertmann	$C_n = \frac{32.5}{(10.2 + 20.3 R_s)}$

Se trabaja con la propuesta planteada por Seed-Idriss (*Marcuson*). A continuación, se indican los valores de N corregido en función de una energía de referencia de 60%.

$$N_{60} = N_{45} \left(\frac{45}{60} \right) = 0.75 N_{45}$$

Para Colombia, y salvo mediciones al respecto (*p. ej. Villafañe et al, 1997*) se debe tomar $e=45\%$.

Según los factores de corrección propuestos en la tabla anterior, se presentan las fórmulas para el cálculo del ángulo de fricción.

Análisis de Capacidad de Corte – Suelo Natural

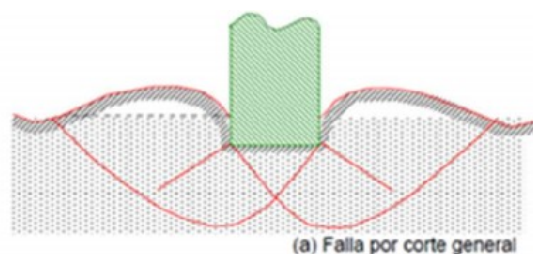
Las cimentaciones superficiales de la torre del taladro deben tener dos características principales:

- La cimentación debe ser aprueba contra la falla por corte general del suelo que lo soporta.
- La cimentación no debe ser sometida un asentamiento excesivo.

La carga a tener en cuenta por área unitaria de la cimentación por donde se presenta la falla de corte en el suelo es llamada capacidad de carga última. Basados en el análisis de la capacidad portante de los suelos de cimentación, constituye un problema complejo de falla por corte de estos, para su determinación se debe tener en cuenta entre otros los siguientes aspectos de la cimentación (Cueva, Rolly, Vargas, & Armando, 2018):

- Parámetros de resistencia del suelo de fundación.
- Profundidad del nivel de cimentación (profundidad de desplante).
- Base de la fundación y diseño estructural.
- Peso unitario del suelo de cimentación.

Para estimar la capacidad de carga última de cimentaciones se utiliza la siguiente expresión:



$$\sigma_u = c N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} F_{cc} + \sigma'_v N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} F_{qc} + 0,5 \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} F_{\gamma c}$$

$$\sigma_u = C * N_c * F_{cs} * F_{cd} * F_{ci} * F_{cc} + \gamma_1 * D_f * N_q * F_{qs} * F_{qd} * F_{qi} * F_{qc} + \frac{1}{2} \gamma * B * N_\gamma * F_{\gamma s} * F_{\gamma d} * F_{\gamma i} * F_{\gamma c}$$

Figura 6. Falla general por corte de una cimentación. Fuente. Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. (Braja, 2012)

Dónde:

C: Cohesión

N_c, N_q, N_γ : factores de capacidad portante

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$: Factores de Forma

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$: Factores de Profundidad

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$: Factores de Inclinación

$F_{cc}, F_{qc}, F_{\gamma c}$: Factores de Compresibilidad.

La estabilidad se garantiza al utilizar un factor de seguridad de 3, obteniendo de las expresiones el valor de carga máxima que soporta el suelo de fundación y la carga transmitida por las estructuras. Adicionalmente, se determinó el factor de seguridad según la carga por metro cuadrado que llegará al nivel del suelo, debido al taladro determinado. En la zona de estudio, el suelo natural tendría una capacidad de carga sin mejoramiento de 16.2 ton/m², insuficiente para soportar los esfuerzos aplicados por el taladro durante operación, por lo que se recomienda el mejoramiento mediante la instalación de matting boards y materiales granulares (*Braja, 2012*).

Losa de Cimentación

Una losa de cimentación es un sistema de losa de hormigón o una losa y viga de tamaño considerable, que soporta todas las cargas de la superestructura a través de paredes o columnas en dos o más filas y se apoya en la capa de suelo o roca. Una losa puede ser rectangular o circular. Cuando losa de cimentación está soportado por columnas en lugar de los materiales subyacentes, que se denomina como fundamento Losa apilada (*J.A, 2000*).

Las cimentaciones de hormigón son un tipo ideal de cimentación en varias condiciones, por ejemplo, suelo de baja capacidad de carga, cubierta de zapata extendida alrededor del 70% de la estructura, cargas de estructura elevadas, bolsas blandas o cavidades en el suelo hasta una

extensión desconocida, losa y suelo altamente compresible y se extiende a gran profundidad (*J.A, 2000*).

Hay ciertos requisitos que deben tenerse en cuenta durante la cimentación de la losa para producir un diseño adecuado, como una profundidad mínima de 0,50 m, una profundidad de excavación requerida de aproximadamente 2,5m, y una cubierta de varilla de 50 mm (*J.A, 2000*).

Requisitos para el Diseño de la Losa de Cimentación (Raft Foundation)

Los siguientes requisitos son tomas de (*Hamakareem, S.F*):

1. Los métodos de cálculo para el diseño de cimientos de alfombras se basarán en la última versión de los códigos y normativas aplicables.
2. según la norma ISO 1080, se debe utilizar una profundidad mínima de 0,50m para la losa de cimentación. Esto es necesario para garantizar que el suelo tenga una capacidad de carga segura que se asume en el diseño.
3. La profundidad de la losa de cimentación debe satisfacer los requisitos de corte.
4. La losa de cimentación debe colocarse debajo del nivel que no sea influenciado por el suelo. Las heladas también pueden poner en peligro la base si se coloca a muy poca profundidad.
5. Cuando la losa de cimentación se construye sobre arena, la profundidad mínima de la base es alrededor de 2,5 m por debajo de la superficie del suelo circundante. Si se considera una profundidad menor, los bordes de la losa se asientan aproximadamente más que el inferior debido a la falta de confinamiento de la arena.

Módulo de Balasto

Un tema entre mecánica de suelos y cimentaciones es el módulo de balasto o balastro, en donde se inicia a involucrar a la cimentación dentro de nuestros modelos de resistencia de suelo. Regularmente lo que se hacía era modelar estructuras y cimentaciones colocando el suelo como si fuera un apoyo empotrado, un apoyo infinitamente regido, lo que hace que la estructura sea casi totalmente divorciada del suelo, sin embargo, esta suposición no es completamente cierta, ya que el suelo es un material elástico. La propuesta actual consiste en considerar al suelo como unos muelles o resortes que tienen su propia rigidez (*Freiré Tellado, 1999*).



Figura 7. Viga de Winkler 1986. Fuente (*Darío Aristizábal-Ochoa, n.d.*)

De acuerdo a (*Winkler, 1986*), habla de convertir el suelo que está en contacto con la cimentación que soporta cargas de la estructura en unos resortes con una rigidez k . La base fundamental de esta teoría es la Ley de Hooke, la cual conocemos como $F = Kx$, la cual también en resistencia de materiales conocemos como $\sigma = E\varepsilon$, la cual comparte la misma base matemática para poder resolver problemas suelo-cimentación (*Braja, 2012*).

Para una cimentación podemos definir que $K_S = \frac{\sigma}{\delta}$, en donde:

K_S = Constante del resorte.

σ = Esfuerzo aplicado a la cimentación.

δ = Deformación del suelo.

Una vez contamos con el K_s , es necesario realizar un ajuste en función del suelo y tamaño de la cimentación (Braja, 2012).

Para suelos Arenosos

$$K = K_d * \left[\frac{(B+0.30)}{2B} \right]^2$$

Para suelos Cohesivos

$$K = k_d * \left[\frac{0.30}{B} \right]$$

En donde:

d = Diámetro de la Cimentación.

B = Dimensión menor de la Cimentación.

El modulo k , se elabora después de un estudio geotécnico elaborado por el personal idóneo para este tipo de análisis.

Diseño a flexión

Mecánica del concreto reforzado sujeto a flexión

Suponiendo que se tiene una viga de concreto con refuerzo de tensión sometida a una pequeña carga transversal que se incrementa gradualmente en magnitud hasta el momento de falla. Cuando esto sucede se observa que la viga pasa por 3 estados diferentes antes de que colapse (Riveros, 2016)

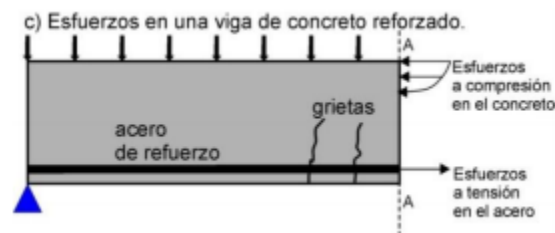


Figura 8. Vigas de concreto simple y concreto reforzado, Fuente (Riveros, 2016)

Primera etapa concreto no agrietado.

Las cargas son pequeñas y aceptables para la viga, cuando los esfuerzos de tensión son menores que el módulo de ruptura, la sección transversal total de la viga resiste a flexión, con compresión en un lado y tensión en el otro (*Riveros, 2016*).

Segunda etapa es con esfuerzos elásticos y concreto agrietado.

A medida que se incrementa la carga después de que el módulo de ruptura del concreto se ha superado, comienzan a crearse fisuras en la parte inferior de la viga (*Riveros, 2016*).

Una vez que el lado inferior de la viga se ha fisurado, da inicio a la segunda etapa, debido a que el concreto en la zona que ya se encuentra agrietada no puede resistir los esfuerzos de tensión, en este punto comienza a trabajar el acero (*Riveros, 2016*).

Esta segunda etapa continuara mientras los esfuerzos de compresión en las fibras superiores sean menores, aproximadamente la mitad de la resistencia del concreto a compresión y mientras el esfuerzo del acero sea menor que su límite elástico.

Tercera etapa de resistencia última.

La carga sigue creciendo todavía más, de modo que los esfuerzos de compresión resultan mayores que la mitad $f'c$. Las fisuras de tensión se mueven más hacia arriba, igual que lo hace el eje neutro y los esfuerzo de compresión en el concreto dejan de ser lineales. Ha este punto se supondrá que las varillas de refuerzo han cedido (*Riveros, 2016*).

¿Cómo determinar Momento Último o Nominales de Flexión?

Para realizar este análisis, se piensan que las varillas de refuerzo a tensión están trabajando a su punto de cadencia antes de que falle el concreto en el lado de compresión de la viga.

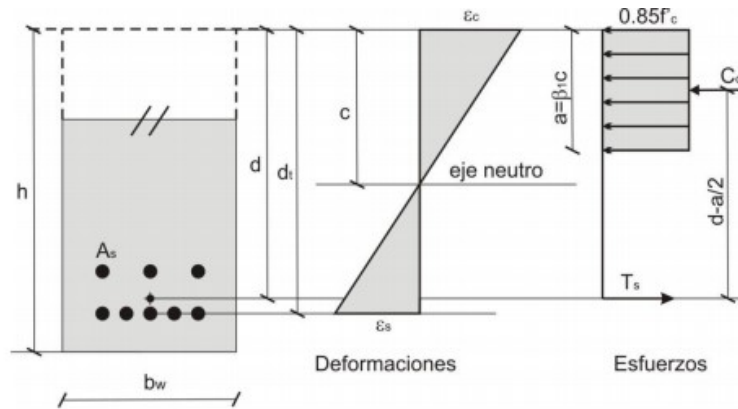


Figure 9 Diagrama esfuerzo-deformación (Riveros, 2016)

Y con ayuda de las siguientes formulas podemos conocer los momentos últimos.

$$1) T = A_s * F_y.$$

$$2) C = 0.85 f'_c ab.$$

$$3) 0.85 f'_c ab = A_s F_y.$$

$$4) a = \frac{(A_s F_y)}{0.85 f'_c b}.$$

$$5) M_n = T o C \left(d - \frac{a}{2} \right).$$

Método de Diseño por Resistencia

El método consiste en multiplicar las cargas actuantes muertas y vivas por ciertos factores de carga (equivalentes a factores de seguridad) los cuales se llaman cargas factorizadas. Los miembros se diseñan de modo que fallen justo bajo las cargas factorizadas (Riveros, 2016)

Determinación del Acero a Tensión

Para determinar la cantidad de acero necesario para una viga de secciones ya definidas que sea capaz de resistir cierto momento ultimo de diseño se cuentan con las siguientes formulas (Riveros, 2016)

Cuantía

Área de Refuerzo

$$a = \frac{A_s F_y}{0.85 f'_c b}$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd}$$

$$A_s = \rho bd$$

$$a = \frac{\rho bd F_y}{0.85 f'_c b}$$

Momento Nominal o Deflexión

$$M_n = T \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad ; \quad M_n = A_s F_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad : \quad \Phi M_n = \Phi A_s F_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad \rightarrow$$

$$\Phi M_n = \Phi A_s F_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad ; \quad \Phi M_n = \Phi \rho bd F_y \left(d - \frac{\frac{A_s F_y}{0.85 f'_c b}}{2} \right) \quad ; \quad \Phi M_n = \Phi \rho bd F_y \left(d - \left(\frac{\rho bd F_y}{1.7 f'_c} \right) \right)$$

$$\Phi M_n \geq \Phi M_u \quad ; \quad \Phi M_u = \Phi \rho bd^2 F_y \left(1 - \left(\frac{\rho bd F_y}{1.7 f'_c} \right) \right) \quad ; \quad \frac{M_u}{\Phi bd^2} = \Phi \rho F_y \left(1 - \left(\frac{\rho bd F_y}{1.7 f'_c} \right) \right)$$

$$\frac{M_u}{\Phi bd^2} = \Phi \rho F_y \left(1 - \left(\frac{\rho bd F_y}{1.7 f'_c} \right) \right) \quad ; \quad \frac{M_u}{\Phi bd^2} = \rho F_y - \frac{\rho^2 F_y^2}{1.7 f'_c} \quad ; \quad \frac{\rho^2 F_y^2}{1.7 f'_c} - \rho F_y + \frac{M_u}{\Phi bd^2} = 0$$

Resolvemos la Ecuación para hallar la cuantía.

$$\rho = \frac{-(-f_y) \sqrt{(-f_y)^2 - 4 \left(\frac{f_y^2}{1.7 f'_c} \right) \left(\frac{M_u}{\Phi bd^2} \right)}}{2 \left(\frac{f_y^2}{1.7 f'_c} \right)} \quad ; \quad \rho = \frac{-(-f_y) \sqrt{f_y^2 - 2 * \left(\frac{f_y^2}{0.85 f'_c} \right) \left(\frac{M_u}{\Phi bd^2} \right)}}{\left(\frac{f_y^2}{0.85 f'_c} \right)}$$

$$\rho = \frac{f_y}{0.85 f'_c} * \frac{1 - \sqrt{(-f_y)^2 - 4 \left(\frac{f_y^2}{0.85 f'_c} \right) \left(\frac{M_u}{\Phi bd^2} \right)}}{2 \left(\frac{f_y^2}{0.85 f'_c} \right)} \quad ; \quad \rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 M_u}{0.85 f'_c b d^2} \right)} \right)$$

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Con el aumento de la urbanización y proyectos de ingeniería en zonas cada vez más difíciles por su misma geografía y condiciones complejas del terreno, en las últimas tres décadas en todo el mundo se produjo un rápido aumento en el número de investigaciones científicas en el estudio de fundaciones y diseño de losas de cimentación.

El estudio de *“The piled raft system”* ha demostrado ser muy eficaz en condiciones extremas con problemas de subsuelo, para soportar todas las cargas verticales. Y ha sido en gran manera probada en países con condiciones sísmicas altas en donde soportan estructuras bastante fuertes y pesadas ((*No Title*), *n.d.*)

Los siguientes graficas explican cómo ha sido el crecimiento de la investigación, países líderes que han realizado avances en el tema, autores, entre otros graficas que muestran el tipo de investigaciones realizadas.

En la figura 10, se puede observar el crecimiento de la investigación en los últimos 10 años debido a la necesidad de optimizar y mejorar el comportamiento de las cimentaciones, Así mismo, en la *figura 12*, vemos el continuo interés de universidades en su mayoría asiáticas que lideran la investigación en ingeniería civil, en donde China destaca como el principal exponente en investigación de fundaciones

Documents by year

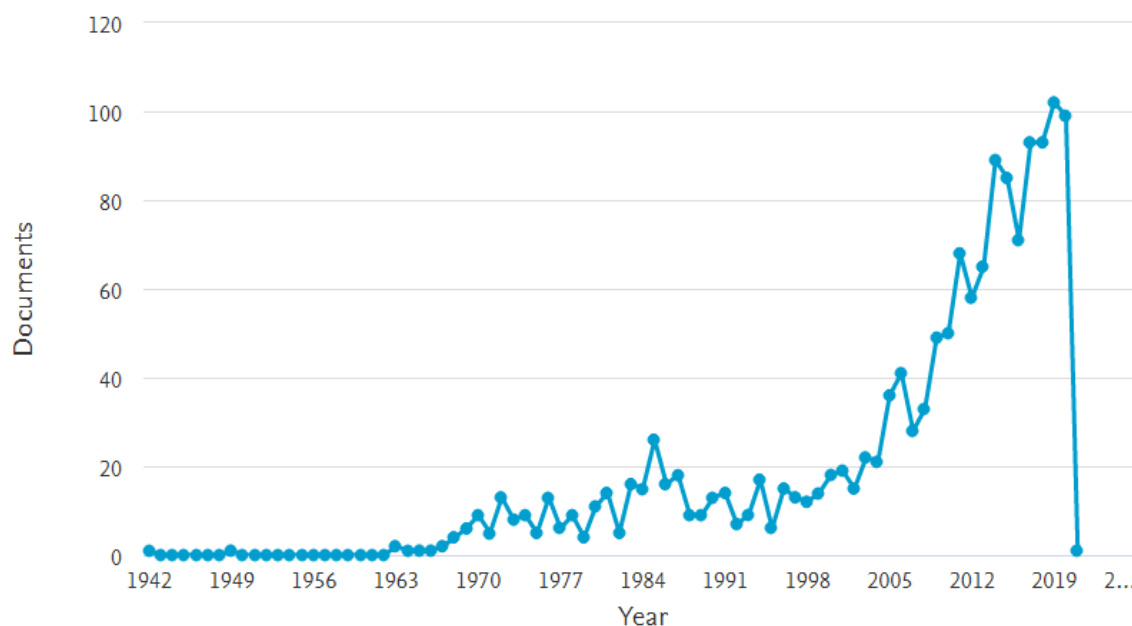


Figura 10. Análisis de búsqueda, documentos por año. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus

Documents by author

Compare the document counts for up to 15 authors.

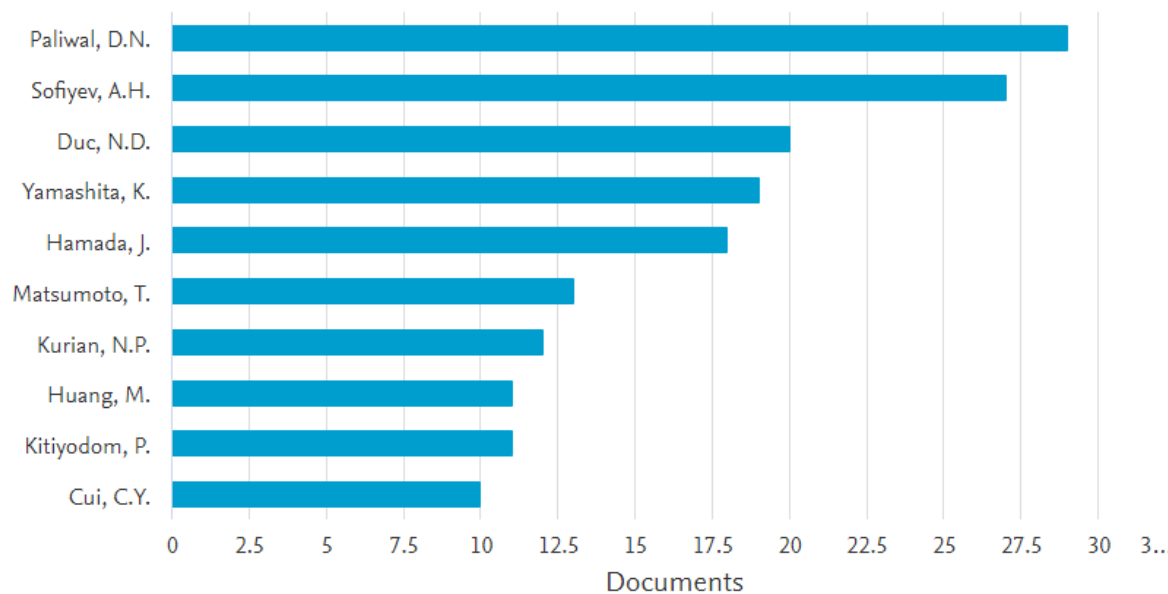


Figura 11 Análisis de búsqueda, documentos por autor. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus.

Documents by affiliation

Compare the document counts for up to 15 affiliations.

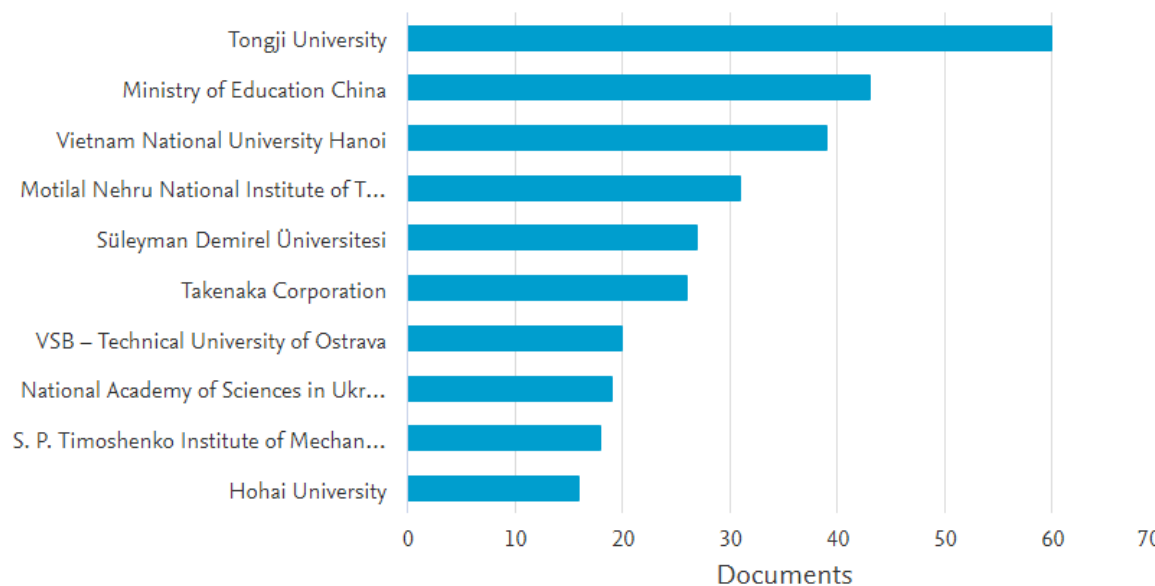


Figura 12 Análisis de búsqueda, documentos por organización. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus.

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

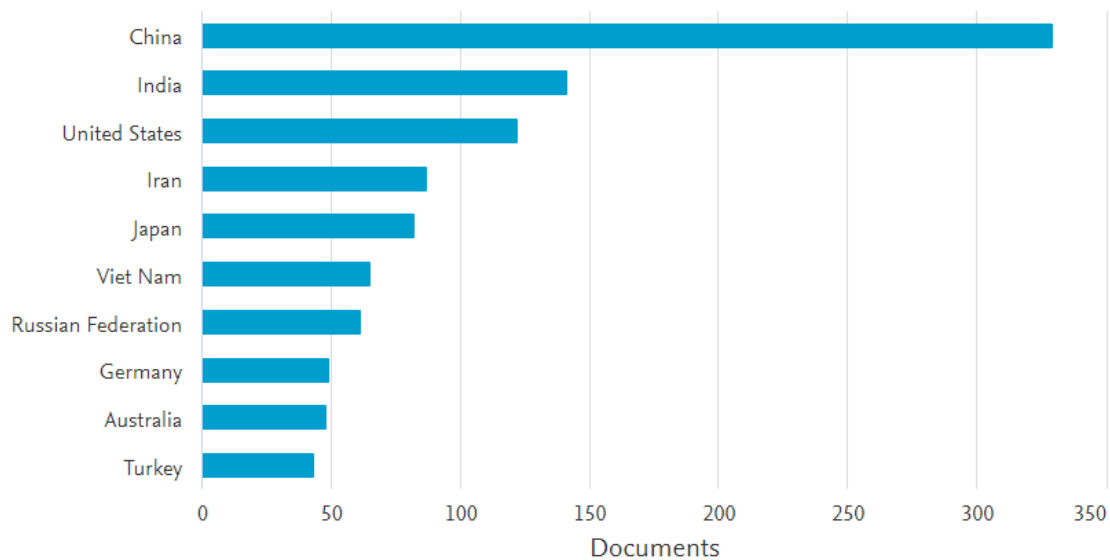


Figura 13 Análisis de búsqueda, documentos por país. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus.

En la figura 14, se identifica que la mayoría de literatura sobre fundaciones se encuentra en artículos científicos, seguido de comunicaciones de congresos. En la figura 15, se puede observar que el tema es multidisciplinar, donde ciencias de ingeniería, matemáticas, informática, física, entre otras intervienen para poder generar investigación acerca de fundaciones.

Finalmente se encuentra en la figura 16, los principales patrocinadores de investigación en el mundo, y avances en la ciencia de fundaciones, demostrando que es un tema de suma importancia a la hora de iniciar un proyecto de infraestructura.

Documents by type

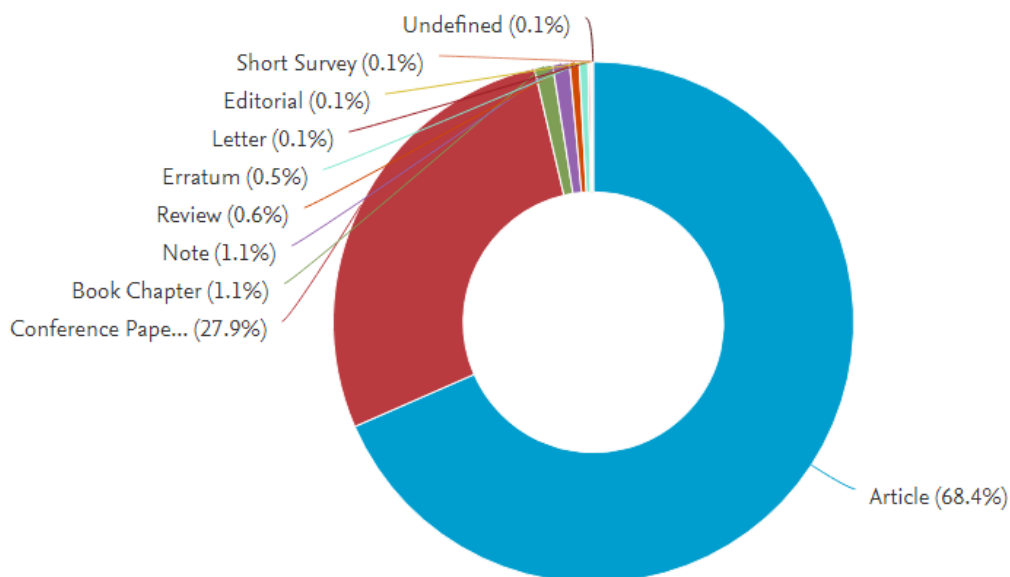


Figura 14 Análisis de búsqueda, por tipos de documentos. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus.

Documents by subject area

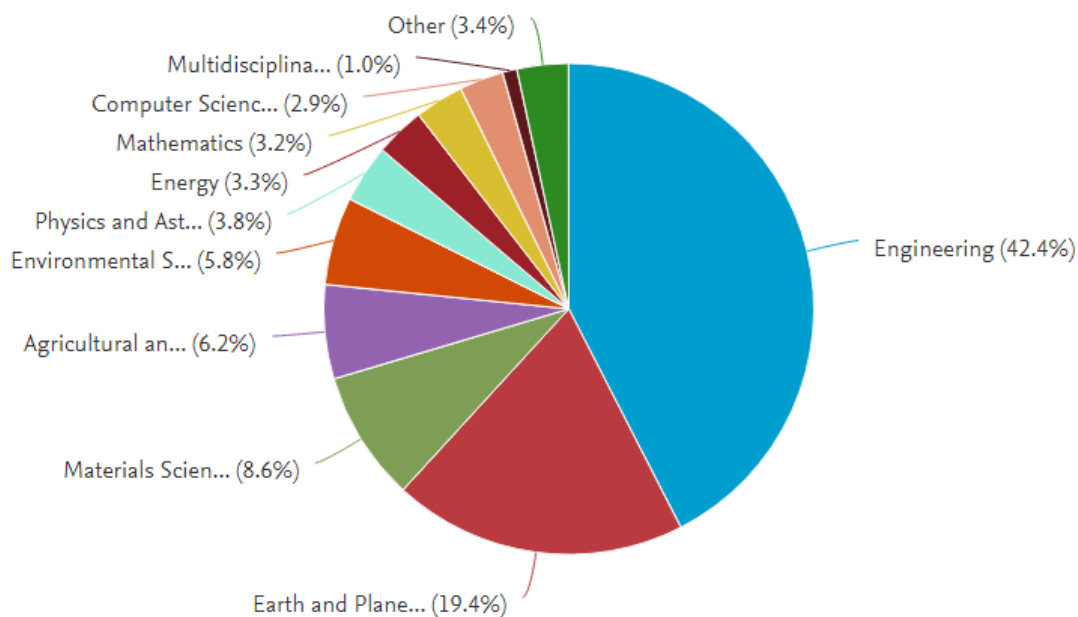


Figura 15 Análisis de búsqueda, documentos por área de investigación. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus.

Documents by funding sponsor

Compare the document counts for up to 15 funding sponsors.

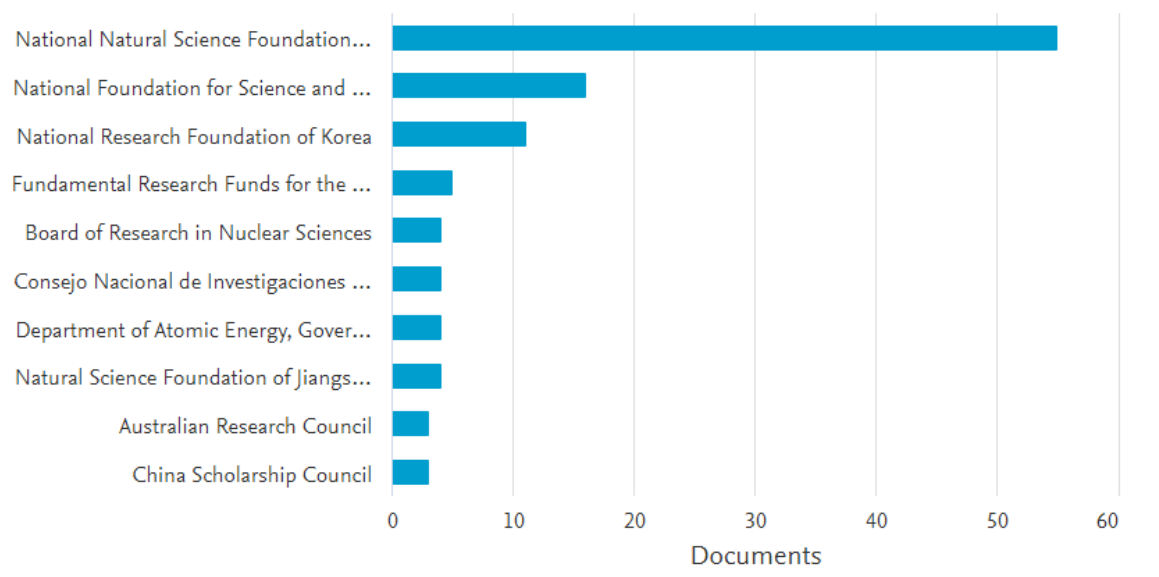


Figura 16. Análisis de búsqueda, documentos por promotor. Slab/Raft foundation. Fuente Scopus

Tabla 2 Investigación y avances realizados.

Palabra Clave	Citas
Raft Modeling, finite elements	(Chang et al., 2020; Fiedler & Koudelka, 2016; Hamad Sfoog et al., 2020; Molodin et al., 2019; Rabiei & Choobbasti, 2020; Ravichandran et al., 2020; Sert & Kılıç, 2016; Xie et al., 2020)
Slab/ Raft bearing, Shear Stress	(El Kamash et al., 2020; Hong et al., 2018; Kaneda, 2020; Ma & Chen, 2019; Mateckova et al., 2018; Qin et al., 2018; Ricker et al., 2017; Sharafkhah & Shooshpasha, 2020; Tabsh et al., 2020)
Slab/ Raft Materials	(Fattah et al., 2015; Gong et al., 2017; Ikonin & Sukhoterin, 2019; Osokin et al., 2019; Pronozin et al., 2019; Sert & Kılıç, 2016; Sharma et al., 2015; Zertsalov et al., 2019; Zhang et al., 2017)
Thermo-mechanical behavior	(Fang et al., 2020; Fu et al., 2020; Hadi et al., 2017; Hoa et al., 2019; Phuong et al., 2019)
Shells Reinforcement	(Bochkarev, 2018; Gusmão Filho & Amorim, 2018; Hassan et al., 2019; Hussain et al., 2018; Nam et al., 2018)
Slab testing and soil Behavior	(David et al., 2017; Hussein et al., 2020; Jilati et al., 2019; Kassem et al., 2018; Kong et al., 2019; Kumar et al., 2016; Liu, 2018)
Soil failure and Seismic forces	(Hung et al., 2020; Ma & Chen, 2019; Nelson et al., 2017; Pourfakhrian & Bayesteh, 2020; Rokonzaman et al., 2015; Shigeno & Yamashita, 2020)
Vertically Load and punching effect	(Chang et al., 2018, 2020; Hoang et al., 2020; Pechorskaya, 2019; Ricker et al., 2017; Sahraeian et al., 2020; Teng et al., 2016)

Relación Suelo-Pilote-Estructural en el Análisis Sísmico en el Diseño de una Losa de Cimentación

El problema de la interacción suelo-pilote-estructura (*SPSI*) en el análisis sísmico y el diseño de estructuras se han vuelto cada vez más importante, porque puede ser necesario construir estructuras en lugares con condiciones geotécnicas menos favorables, en regiones sísmicamente activas. El diseño optimizado de una base de pilotes con una distribución de pilotes no uniforme (como diferentes diámetros y espaciamientos de pilotes) también se ha utilizado ampliamente en

los últimos años para reducir costos y mejorar el rendimiento general de los sistemas de construcción. La distribución de la rigidez y las características dinámicas de una base Raft apilada, se modifican mediante el diseño de optimización, sin embargo, determinar la respuesta sísmica del SPSI es un proceso complejo que implica la interacción inercial entre la estructura y la base de la losa apilada, la interacción cinemática entre las pilas y el suelo, y la respuesta no lineal del suelo a un fuerte movimiento sísmico (*Xie et al., 2020*).

Los resultados teóricos han indicado que es necesario considerar la interacción suelo-estructura, particularmente para estructuras importantes, para considerar los efectos beneficiosos o perjudiciales sobre el desempeño estructural. Centrándose en los mecanismos de diferentes disposiciones de pilotes y considerando la interacción pilote-suelo-pilote bajo carga vertical con el objetivo de reducir los costos generales del proyecto y reducir el asentamiento diferencial (*Xie et al., 2020*).

La interacción SPSI se define como un fenómeno en el que la respuesta del suelo influye en el movimiento del pilote y la estructura y la respuesta estructural influye en el movimiento del suelo y los pilotes. Una mejor comprensión del movimiento real del suelo durante un terremoto es un desafío para el movimiento en campo libre, Y puede ayudar al ingeniero de diseño a evaluar el movimiento de entrada de la cimentación (*FIM*) y analizar los resultados. El diseño estático optimizado de la base de la losa pilotada influye en el movimiento del terremoto en la base de la estructura al alterar la interacción inercial y cinemática (*Xie et al., 2020*)

Comportamiento de las Cimentaciones de Láminas Piramidales sobre Suelo Arenoso

Reforzado

Shell Foundation (*Cimentación Shell*) ha sido considerada como la mejor base poco profunda para transferir cargas pesadas a suelos débiles debido a los altos valores de capacidad de carga, donde una base poco profunda convencional se somete a un asentamiento excesivo. Experimentalmente se realizó un trabajo para investigar el comportamiento de los cimientos Shell piramidal en comparación con una contraparte plana en suelos arenosos sueltos. Se fundieron cuatro tipos de cimientos rígidos de aluminio para este propósito; zapata plana y zapata de carcasa de dimensión (20×20 cm) y diferentes ángulos (20° , 30° y 45°) (*Hassan et al., 2019*).

En este tipo de zapatas se realizaron veintiocho ensayos de carga que se asentaron sobre la superficie de una capa de arena suelta con y sin refuerzo de geomalla. La lámina de geomalla se insertó dentro de la capa de arena (capas simples y dobles) debajo de la base de la zapata. La cimentación Shell sobre arena reforzada y no reforzada mostró una mayor capacidad de carga última que la de arena no reforzada para cimentaciones planas y las curvas de carga-asentamiento se modificaron claramente. Las cimentaciones Shell sobre suelo reforzado se pueden considerar como un buen método para aumentar la profundidad efectiva de la cimentación y disminuir el asentamiento resultante. La relación de capacidad portante (BCR) alcanza el 88,5% y el factor de reducción de asentamiento (SRF) alcanza el 37,3%, donde la BCR es la relación entre la capacidad portante de una cimentación que descansa sobre un suelo reforzado (q_R) y la que descansa sobre un suelo no reforzado (q) mientras que el SRF es la relación entre el asentamiento de un cimiento que descansa sobre suelo reforzado (SR) y el que descansa sobre suelo no reforzado (*Hassan et al., 2019*).

El trabajo experimental también fue verificado y analizado numéricamente utilizando el software ABAQUS tomando en consideración el efecto de diferentes densidades relativas (15%, 20%, 30%) sobre el asentamiento y la capacidad portante del suelo. El rango de mejora fue mayor a densidad relativa (15%), en comparación con los otros que reflejan la mejora en la condición suelta debido al efecto de caparazón. Esto confirma la premisa de que las Shells, tienen mejor reputación en suelos más débiles que necesitan una gran carga transferida a ellas (Hassan et al., 2019).

METODOLOGÍA

La metodología consistió en determinar cómo trabaja una losa tipo Shell, en dos direcciones, para esto fue necesario conocer el uso de la losa, para así, establecer las cargas (cargas muertas, cargas vivas y cargas de operación) las cuales fueron almacenadas en el software de trabajo. Conociendo las cargas y las combinaciones de diseño necesarias, se ingresaron las dimensiones de la losa. Para este trabajo consideramos 3 alturas diferentes, 25, 30 y 35.

Una vez almacenados todos los datos en el software generamos diagramas de máximos cortantes y momentos para conocer la capacidad de carga y determinar si cumplían con los requisitos mínimos de diseño. *Ver figura 17.*

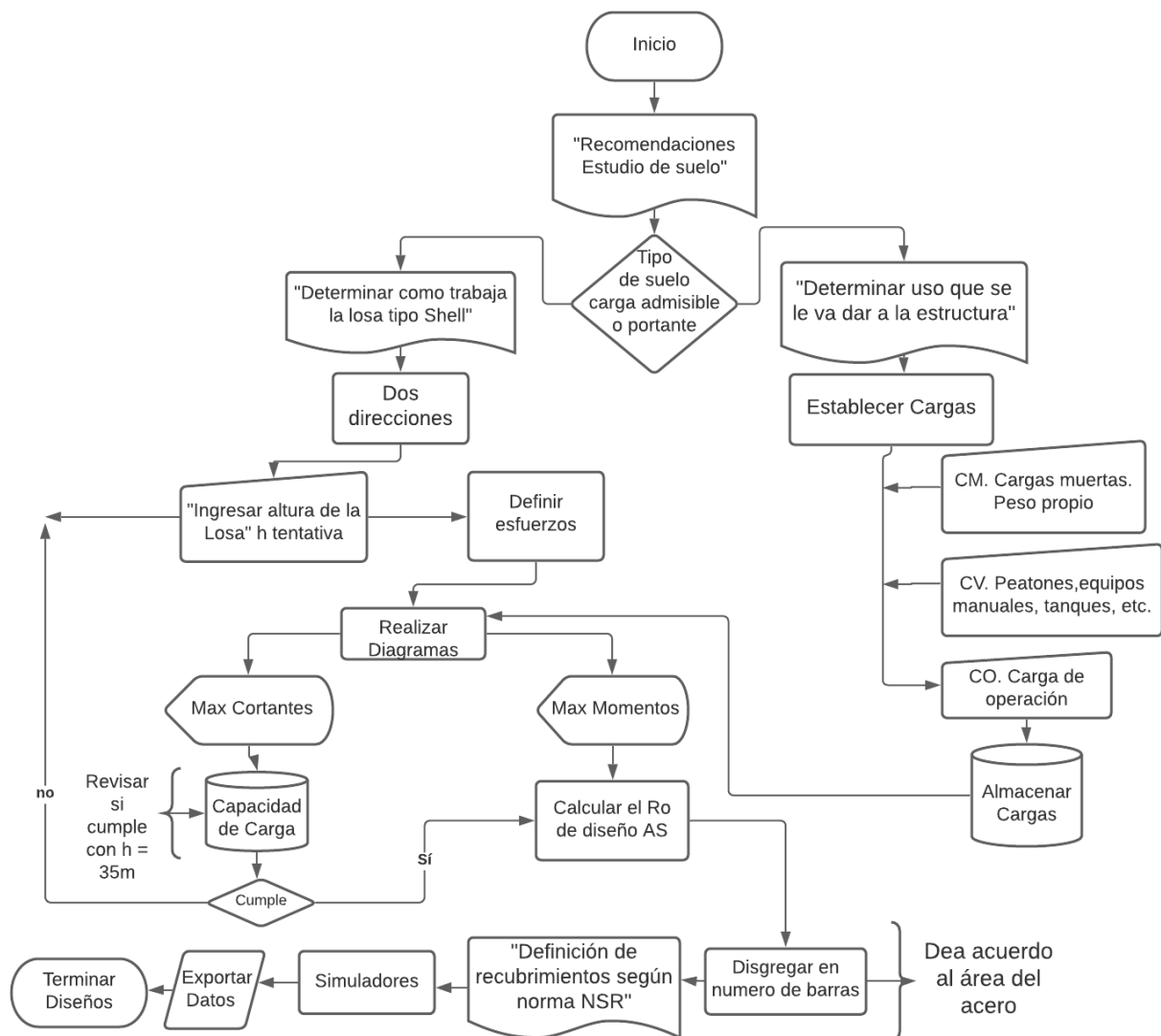


Figura 17 Diagrama de flujo para el diseño de la Losa de Cimentación, Fuente autores.

ANÁLISIS DE DISEÑO Y RESULTADOS.

Diagramas de diseño

Figura 18, Ejemplo de programa que no genera errores al correr el diseño por el método de flexión Simple.

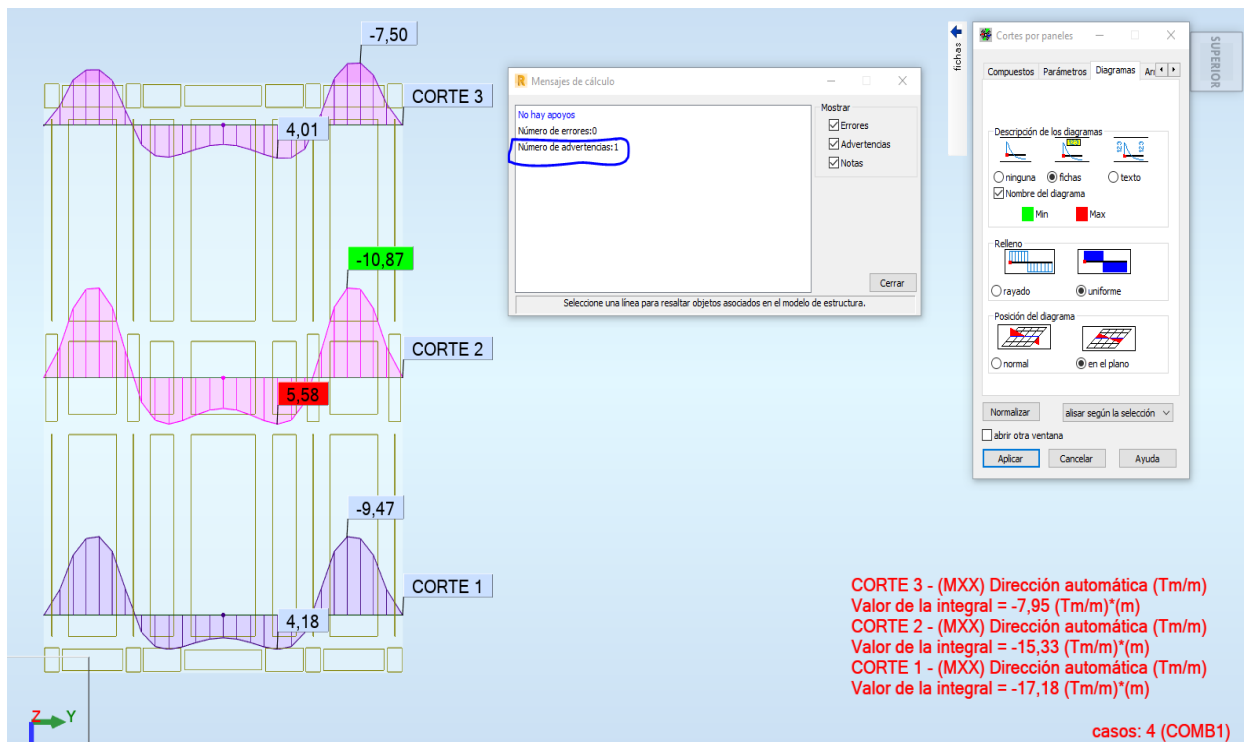


Figura 18 Ilustración de carga de modelo en software, Fuente Autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa

Esfuerzos internos

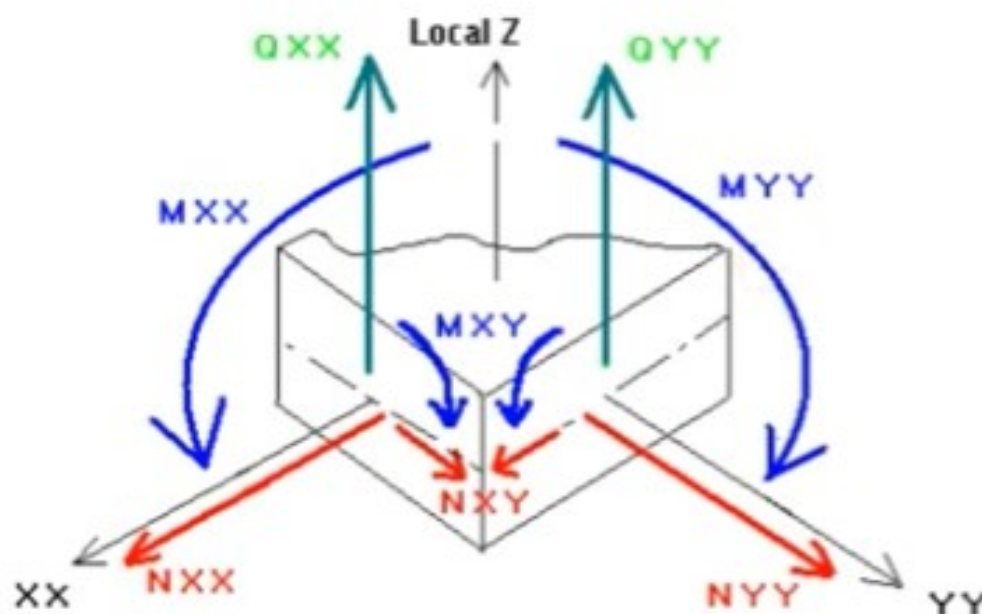


Figura 19 Esfuerzos Internos, fuente (Villaroel, 2020)

La convención de signos del software Robot Structural Analysis para los ejes locales X, Y, Z el momento xx (M_{XX}) es el momento que flexiona en el plano desde dirección Z hacia X, y lo mismo ocurre con la dirección MY local o momento yy (M_{YY}).

Como se evidencia en los diagramas anteriores de momentos el comportamiento del concreto reforzado con este de tipo de fibra corresponde a un diseño asequible en términos constructivos el cual se sabe que con aumento de altura (h) de la losa hechos que se muestra en los momentos máximos de cada diagrama aumenta su capacidad de resistir las cargas.

Dentro de las especificaciones se presentan valores de carga como peso propio ($m^3 \times \gamma_{\text{concreto}}$), carga viva (T/m^2), y carga de operación ($28T/m^2$) mediante método rígido convencional el cual asume una losa rígida que permite obtener presiones “uniformes” bajo el nivel de cimentación, el

diseño se hace por módulos de lo tipo (*Shell*) según el ancho de influencia venidos a partir de la data sheet que suministra el proveedor también para parámetros de elasticidad del suelo módulo de balasto (k) con un valor de 5000 T/m3 se considera para la elasticidad tangente con un porcentaje de 80% (k_x) 4000T/m3 y (k_y) 4000T/m3.

En las siguientes figuras 20, 21 y 22 se muestra los diagramas con los momentos últimos de cada diseño, donde se puede comprobar que cada diseño es cumple con los requerimientos necesarios para soportar el taladro Nabors Ring 794 en operación.

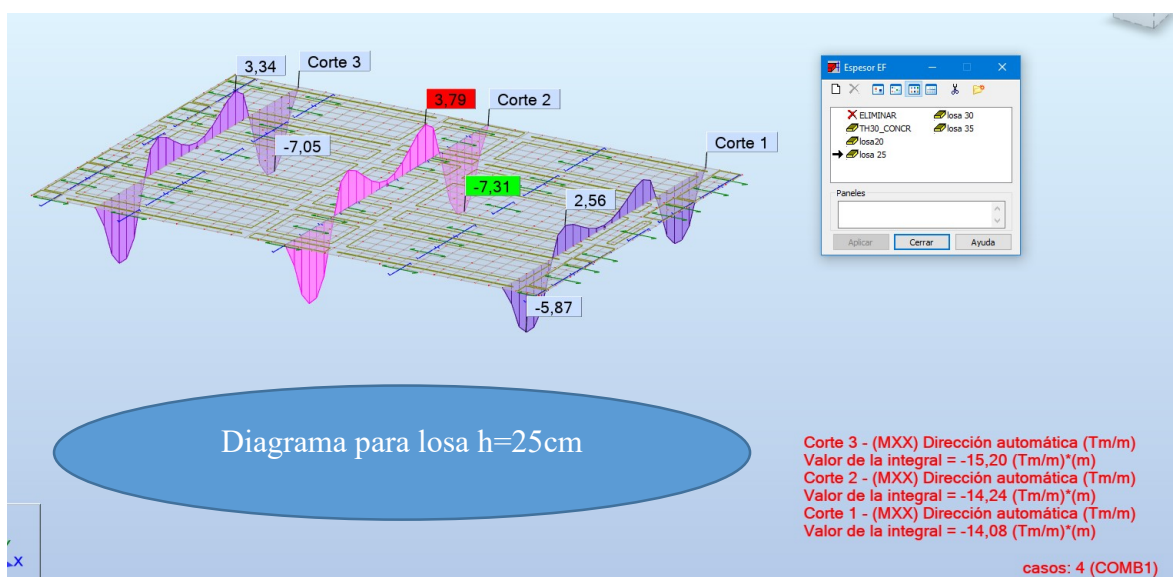


Figura 20 Diagrama para la losa h .25 cm fuente Autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa

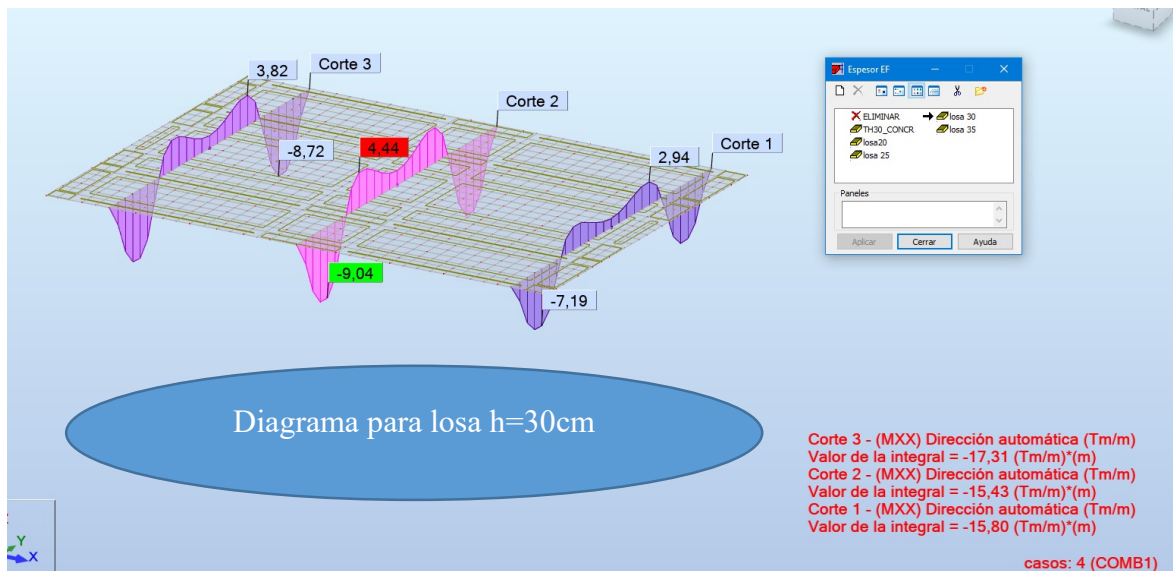


Figura 21 Diagrama para la losa h 30 cm, Fuente Autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa

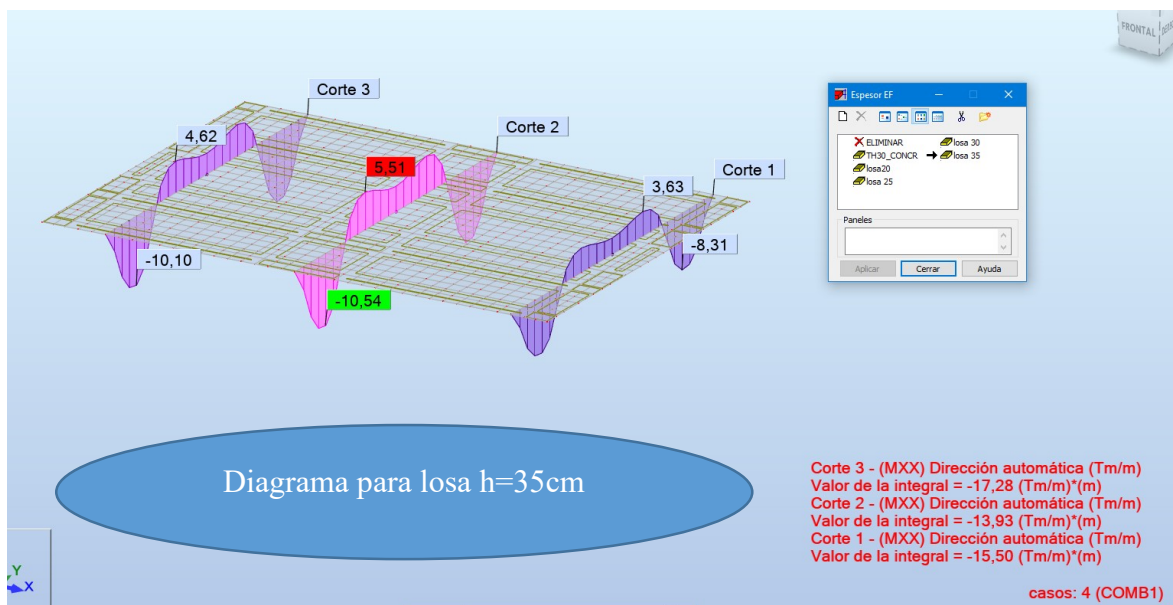


Figura 22 Diagrama para la losa h 35cm, Fuente Autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa

En la figura 23, se observa los esfuerzos últimos, donde el azul muestra donde se ubicaran los patines de la plataforma.

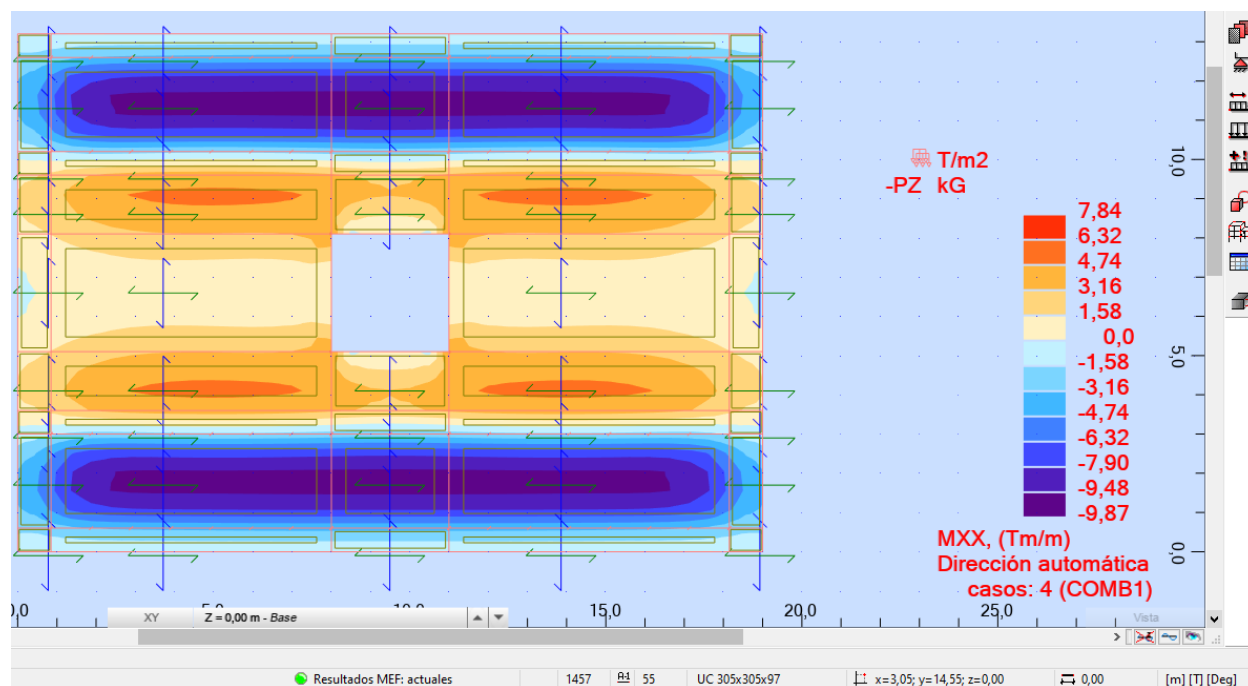


Figura 23 Mapa de esfuerzos últimos, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa

Análisis de Diseño y resultados.

Como se evidencia en los diagramas anteriores de momentos el comportamiento del concreto reforzado con este de tipo de fibra corresponde a un diseño asequible en términos constructivos el cual se sabe que con aumento de altura (h) de la losa hechos que se muestra en los momentos máximos de cada diagrama aumenta su capacidad de resistir las cargas.

Dentro de las especificaciones se presentan valores de carga como peso propio ($m^3 \times \gamma$), carga viva (T/m^2), y carga de operación ($28T/m^2$) mediante método rígido convencional el cual asume una losa rígida que permite obtener presiones “uniformes” bajo el nivel de cimentación, el diseño se hace por módulos de lo tipo (Shell) según el ancho de influencia venidos a partir de la data sheet que suministra el proveedor también para parámetros de elasticidad del suelo módulo

de balasto (k) con un valor de 5000 T/m³ se considera para la elasticidad tangente con un porcentaje de 80% (k_x) 4000T/m³ y (k_y) 4000T/m³. Ver figura 24.

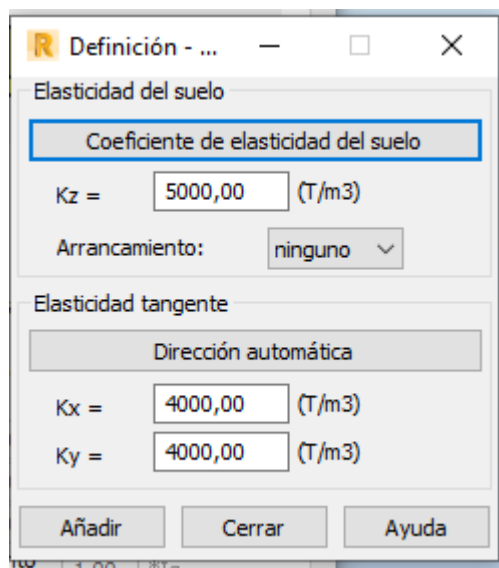


Figura 24 Coeficiente de Balasto utilizado en el diseño. Fuente autores, AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS licencia educativa

Por lo anterior se obtuvo resultados esperados para el armado de la losa que son conservadores, esto debido al aplique de combinación de carga que se hizo según (*Norma NSR 10*) que son cargas mayoradas para un factor de seguridad tanto al bloque en compresión como al bloque de tensión, donde los valores de resistencia se dividen; es importante que se resalten que los momentos nominales o capacidades de los elementos finitos se presentan en función de una deformación máxima permisible (o abertura de grieta máxima) que puede sufrir un elemento al ser sometido a cargas de flexión. En el caso de las recomendaciones y normas de diseño, se estableció 3.0mm, ya que, ante deformaciones mayores, el elemento, aunque pueda ser capaz de resistir las cargas últimas el cual este límite se presenta como un estado de falla, tal y como es el agrietamiento para el concreto normal y la deformación unitaria en compresión del concreto ($\epsilon=0.003$) y en tensión de acero ($\epsilon=0.0002$) en concreto reforzado convencional. Es por esto que los resultados se

comparan con la carga teórica necesaria para alcanzar el momento nominal de cada diseño el cual se obtuvo mediante análisis elástico de equilibrio de fuerzas.

Se comprueba que en los diseños para la capacidad de momento proveen de una buena estimación para la carga máxima, obteniendo resultados de carga ultima teóricas menores a las reales que finalmente demuestran que estos cálculos se encuentran del lado optimo, seguro y proporciona un buen uso de las capacidades últimas del material, al estar basados en parámetros y recomendaciones por normas.

	Cargas:				Resultados teóricos - disposiciones de las armaduras		Cuantitativo			
	Caso	Tipo	Lista	Valor	Lista de soluciones: Armado con barras	Peso total	Volumen del hormigon	Superficie de encotrado	Circumferencia de la losa	
Losa 25m	1	peso propio	9A31 33A54	PZ Menos	Solucion n.º Armaduras	Peso total	Superficie de los huecos	= 60,45 (m3)	= 241,80 (m2)	
	2	(EF) uniforme	10A15 19A31 33A45 49A54	PZ=-1,00(1/m2)						Diámetro / Pe
	3	(EF) uniforme	16A18 46A48	PZ=-28,00(T/m2)	1	-	4889,9			
	Combinacion/Componente ELU/4				Definicion	2	-	4931,03	Acero Grade 60 Peso total	= 6984,98 (Kg)
					1*1.20+(2+3)*1.60	3	-	4951,21		
Cálculos según la norma : ACI 318-11				Resistencia del concreto	4	-	5006,71	Densidad = 115,55 (kg/m3)	Diámetro medio = 12,7 (mm)	
Método de cálculo de la Flecha admisible : Analítica				3000 psi	5	-	5207,89			
Verificación del : 30 (mm)					21 Mpa	6	-	5253,38	Lista según diámetros:	
Tipo de cálculos : flexión simple				Resultados para la solución n.º 1 Zonas de armadura		7	-	5324,69		
								Diámetro	Longitud (m)	Peso total (kg)
							#4	7021,83	6984,98	
Losa 30m	Cargas:				Resultados teóricos - disposiciones de las armaduras		Cuantitativo			
	Caso	Tipo	Lista	Valor	Lista de soluciones: Armado con barras	Peso total	Volumen del hormigon	Superficie de encotrado	Circumferencia de la losa	
	1	peso propio	9A31 33A54	PZ Menos	Solucion n.º Armaduras	Peso total	Superficie de los huecos	= 72,54 (m3)	= 241,80 (m2)	
	2	(EF) uniforme	10A15 19A31 33A45 49A54	PZ=-1,00(T/m2)						Diámetro / Pe
	3	(EF) uniforme	16A18 46A48	PZ=-28,00(T/m2)	1	-	4544,99			
Combinacion/Componente ELU/4				Definicion	2	-	4638,55	Acero Grade 60 Peso total	= 6778,01 (kg)	
				1*1.20+(2+3)*1.60	3	-	4721,31			
Cálculos según la norma : ACI 318-11				Resistencia del concreto	4	-	4767,07	Densidad = 93,44 (kg/m3)	Diámetro medio = 14,0 (mm)	
Método de cálculo de la Flecha admisible : Analítica				3000 psi	5	-	5207,8			
Verificación del : 30 (mm)					21 Mpa	6	-	5253,56	Lista según diámetros:	
Tipo de cálculos : flexión simple				Resultados para la solución n.º 1 Zonas de armadura		7	-	5336,32		
								Diámetro	Longitud (m)	Peso total (kg)
							#4	3344,52	3326,97	
							#5	2220,31	3451,03	
Losa 35m	Cargas:				Resultados teóricos - disposiciones de las armaduras		Cuantitativo			
	Caso	Tipo	Lista	Valor	Lista de soluciones: Armado con barras	Peso total	Volumen del hormigon	Superficie de encotrado	Circumferencia de la losa	
	1	peso propio	9A31 33A54	PZ Menos	Solucion n.º Armaduras	Peso total	Superficie de los huecos	= 84,63 (m3)	= 241,80 (m2)	
	2	(EF) uniforme	10A15 19A31 33A45 49A54	PZ=-1,00(1/m2)						Diámetro / Pe
	3	(EF) uniforme	16A18 46A48	PZ=-28,00(1/m2)	1	-	4432,62			
Combinacion/Componente ELU/4				Definicion	2	-	4528,55	Acero Grade 60 Peso total	= 6319,05 (Kg)	
				1*1.20+(2+3)*1.60	3	-	4596,62			
Cálculos según la norma : ACI 318-11				Resistencia del concreto	4	-	4666,51	Densidad = 74,67 (kg/m3)	Diámetro medio = 12,7 (mm)	
Método de cálculo de la Flecha admisible : Analítica				3000 psi	5	-	4788,27			
Verificación del : 30 (mm)					21 Mpa	6	-	4926,23	Lista según diámetros:	
Tipo de cálculos : flexión simple				Resultados para la solución n.º 1 Zonas de armadura		7	-	5022,17		
								Diámetro	Longitud (m)	Peso total (kg)
							#4	6352,38	6319,05	

Figura 25 Tabla características de Losa. Fuente Autores

A continuación relacionamos el presupuesto para la construcción de cada una de las losas, para así identificar la más conveniente de acuerdo a costo beneficio.

Tabla 3 (APUS, INVIAS PUTUMAYO 2020)

ANALISIS DE PRESUPUESTO LOSA e=0,25m DE FUNDACIÓN PARA TALADRO NABORS 74,1							
CAPITULO/ACTIVIDAD/INSUMOS		ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS			PRESUPUESTO OBRA		
CODIGO	ACTIVIDAD	UND	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL	CANTIDAD	VALOR
CM003	CONCRETO CORRIENTE GRAVA 3000 PSI (21Mpa)	M3	60.45	356000.00	21520200		
AC003	ACERO GRADO 60 CORRUGADO	kg	6984.98	3294.00	23008524.1		
ENC005	TABLA BURDA EN MADERA ASSERRADO (0,30*0,03*3,00)	M2	241.8	12043.23	2912053.68		
					47440777.8		

ANALISIS DE PRESUPUESTO LOSA e=0,30m DE FUNDACIÓN PARA TALADRO NABORS 74,1							
CAPITULO/ACTIVIDAD/INSUMOS		ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS			PRESUPUESTO OBRA		
CODIGO	ACTIVIDAD	UND	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL	CANTIDAD	VALOR
CM003	CONCRETO CORRIENTE GRAVA 3000 PSI (21Mpa)	M3	72.54	356000.00	25824240		
AC003	ACERO GRADO 60 CORRUGADO	kg	6778.01	3294.00	22326764.9		
ENC005	TABLA BURDA EN MADERA ASSERRADO (0,30*0,03*3,00)	M2	241.8	12043.23	2912053.68		
					51063058.6		

ANALISIS DE PRESUPUESTO LOSA e=0,35m DE FUNDACIÓN PARA TALADRO NABORS 74,1							
CAPITULO/ACTIVIDAD/INSUMOS		ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS			PRESUPUESTO OBRA		
CODIGO	ACTIVIDAD	UND	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL	CANTIDAD	VALOR
CM003	CONCRETO CORRIENTE GRAVA 3000 PSI (21Mpa)	M3	84.63	356000.00	30128280		
AC003	ACERO GRADO 60 CORRUGADO	kg	6319.05	3294.00	20814950.7		
ENC005	TABLA BURDA EN MADERA ASSERRADO (0,30*0,03*3,00)	M2	241.8	12043.23	2912053.68		
					53855284.4		

De acuerdo al presupuesto, y teniendo en cuenta cuál de las opciones es más viable para ser construida, se escoge el presupuesto 2, losa de .30m.

CONCLUSIONES

1. Se utilizó métodos numéricos para los 3 diseños mediante software (Robot Structural Analysis) para definir los diseños de las losas de modo tal que sean funcionales.
2. Se concluye que para la losa de $h=.25m$ será más dispendioso el fraguado ya que la poca distancia que hay entre parrillas Inf. y Sup. es mínima y pueden quedar vacíos en el concreto,
3. La losa $h=.35m$ queda a una buena separación, no obstante ya se determina que se vuelve más rígida por la misma cantidad de material que se va a usar y también es mucho más costosa;
4. finalmente la losa $h=.30m$ es la más favorable ya que cumple con separación de parrillas y también tiene una muy buena relación entre beneficio/costo.
5. Se implementó una tabla con el fin de identificar parámetros de diseño para conocer cuantías mínimas.
6. Se comprobó que para el diseño de hormigón armado a flexión simple se podría disminuir en áreas de acero para mejor distribución de hierros y que directamente es proporcional a la altura de la losa (h).

DISCUSIÓN

Se sabe que en cada método se debe tener en cuenta las variables; las cargas, el grupo de uso y el suelo que va a hacer eficaz para el área de trabajo, la torre grúa y las personas encargadas de operar el taladro, se obtuvieron, datos cualitativos como cuantitativo, así como la inversión económica (dinero y tiempo) que supone todo el conjunto para cada objetivo del proyecto.

Los métodos tanto clásicos como el método rígido convencional requiera de un método resolutivo en ciertos problemas, teniendo en cuenta los factores principales, como el objeto del tabla final entregada.

La ventaja al obtener distintos diseños y variando la altura de la losa nos da una interpretación más asertiva a la hora de definir el mejor diseño para este tipo de estructuras también tendríamos la seguridad de hacer referencia a la capacidad de interpretación que se tienen en cada dato y resultado obtenido. En este caso, las funciones del programa Robot Structural Analysis Profesional permitió arrojar datos idóneos, las cuales permitió efectuar un diseño óptimo.

Referencias bibliográficas

- Addis, T. (2017). *The geology of geomechanics: petroleum geomechanical engineering in field development planning*. Geological Society London Special Publications Geomechanics and Geology.
- AGhobarah. (1999). *walls, Modelling of reinforced concrete structural*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029698000443>
- Alcaldía de Orito. (2017). *Alcaldía de Orito*. Retrieved from <http://www.orito-putumayo.gov.co/>
- Aysen A. (2002). *Mechanics Basic Concepts and Engineering Application*.
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de Laboratorios de Suelos en Ingeniería Civil*. McGRAW-HILL.
- Braja, M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones Séptima edición*. Cengage Learning.
- Civiltoday. (S.F). *Civil Engineering*. Retrieved from <https://civiltoday.com/geotechnical-engineering/foundation-engineering/167-raft-mat-foundation-use-types-construction>
- Cueva, B., Rolly, J., Vargas, D., & Armando, D. (2018, Noviembre). *Análisis de la capacidad de carga admisible de los suelos de cimentación del complejo arqueológico Chan Chan debido al ascenso del nivel freático*. Retrieved from https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/625746/Beltr%C3%A1n_CJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Dirrección de Planificación de Putumayo. (2014, NOVIEMBRE). *ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL CANTÓN PUTUMAYO, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS*. Retrieved from DIAGNOSTICO TERRITORIAL: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/ACTUALIZACION%20PDYOT%20CANTON%20PUTUMAYO%202014%20_15-11-2014.pdf
- Duque-Escobar, G. (2007). *Aspectos Geofísicos y Amenazas Naturales en los Andes de Colombia*. Retrieved from 1er Congreso Internacional de Desempeño Humano en Altura DESAFÍO DE LA POBLACIÓN DE LOS ANDES: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1599/1/andes-col.pdf>
- Dusseault, M. B. (1994). *Analysis of borehole stability. Computer Methods and Advances in Geomechanic*. Balkema .
- Elnashai, A., & Di Sarno, L. (2008). *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Hong Kong: Wiley & Sons, Ltd, Publications.
- Gómez, M. C. (2009, Diciembre 18). *La bonanza de caucho en el amazonas colombiano*. Retrieved from Agencia de Prensa Rural: <https://prensarural.org/spip/spip.php?article3426>
- Gonzalez, A. (1999). *ESTIMATIVOS DE PARAMETROS EFECTIVOS DE RESISTENCIA CON EL SPT*. Retrieved from ALVARO J. GONZALEZ G.: <http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/ESTIMATIVOS-DE-PARAMETROS-DE-RESISTENCIA-CON-SPT.pdf>
- Hamakareem, M. I. (S.F). *The Constructor*. Retrieved from Raft Foundation: <https://theconstructor.org/structural-engg/raft-foundation-design-requirements-applicability/3212/>
- Hoffers, B., Engeser, B., & Rischmuller, H. a. (1994). *Wellbore stability of a superdeep borehole in crystalline rock*. The KTB-Hauptbohrung, Germany: Balkema, Rotterdam.
- INGEOMINAS. (2003). *RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO REGIONAL DEL PAIS*. Retrieved from MEMORIA EXPLICATIVA por Alberto Núñez Tello: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024682/documento/pdf/0101246821101000.pdf>
- International Strategy for Disaster Reduction. (2010). Retrieved from <http://eird.org/americas/index-eng.html>
- INVIAS. (2012). *Normas y Especificaciones 2012 INVIAS*. Colombia.
- INVIAS; CORPOAMAZONIA. (2000). *ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA REMOCION EN MASA DE LAS LADERAS CIRCUNDANTES DEL VALLE DE SIBUNDOY*. CORPOAMAZONIA.
- J.A, H. (2000). *Design Applications of Raft Foundations*. ISBN 0 7277 2765 6: Thomas Telford.

- Kassaras, I., & Kapetanidis, V. (2018). *Resolving the Tectonic Stress by the Inversion of Earthquake Focal Mechanisms*. University of Athens:
https://www.researchgate.net/publication/325104183_Resolving_the_Tectonic_Stress_by_the_Inversion_of_Earthquake_Focal_Mechanisms_Application_in_the_Region_of_Greece_A_Tutorial.
- Li, X. C. (1998). *Thermoporoelastic analyses of inclined borehole*. SPEIISRM, Eurock'98, Norway.
- Made Sukrawaa. (2015). Earthquake response of RC infilled frame with wall openings. *Elsevier Ltd.*, 1. doi:10.1016/j.proeng.2015.11.118
- Maury, V., & Zurdo, C. (1996). *Maury, V., & Zurdo, C. (1996). Drilling-induced lateral shifts along pre-existing fractures: A common cause of drilling problems*. SPE Drilling & Completion.
- Monus et al, F. L. (1992). *Fracturing unconsolidated sand formations offshore Gulf of Mexcio*. 6th Annual Technical Conference and Exhibition, WasMngton DC.
- NARANJO, A., & SOTO, C. M. (2017). *EFECTO DE LOS PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EN EL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO DE YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS SENSIBLES A ESFUERZOS*. Medellin: Bol. cienc. tierra no.21.
- NSR 10. (2008). In *Titulo A* (pp. A-22). Bogota.
- OilProduction. (2019). *Diseño de la Perforacion de Pozos*. Retrieved from
<https://www.google.com/search?q=El+paso+principal+antes+de+perforar+es+dise%C3%B1ar+programas+de+operaci%C3%B3n+de+pozos.+El+objetivo+principal+del+programa+de+pozos+es+perforar+de+manera+segura+sin+enfrentar+problemas+de+inestabilidad+del+pozo%2C+como+el>
- Peng, S., & Zhang, J. (2007). *Engineering Geology for Underground Rocks*. China: Springer pag 162.
- R, S. Q., & Schmitt, S. R. (2014). *Effects of Formation anisotropy on borehole stress concentrations: Implications to drilling induced tensile fractures*. The University of Calgary.
- Riveros, C. A. (2016). *ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN*. Retrieved from
http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/moodle/pluginfile.php/265918/mod_resource/content/3/REIMPRESO%20ESTRUCTURAS%20HORMIG%C3%93N%202016.pdf
- Sahraeian, M. S., Yamada, J. T., & Seki, S. (2019, December 23). *A Few Critical Aspects to Rational Design of Piled Raft Foundation for Oil Storage Tanks*. Retrieved from
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-019-01152-0?shared-article-renderer>
- UC.CL. (2012). *CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KOPPEN*. Retrieved from
http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/Inicio/Paginas/Untitled-1.htm

- Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2009, Agosto). *CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA CUENCA CAGUÁN - PUTUMAYO*. Retrieved from <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/INFORME.pdf>
- Unperiodico UNAL. (Consultado 2019). *Unperiodico UNAL*. Retrieved from <http://historico.unperiodico.unal.edu.co/ediciones/100/09.html>
- Velandia, F., Melo, R. T., & Villegas, H. (2001). EL SISTEMA DE FALLAS DE ALGECIRAS HACIA EL SUROESTE DE COLOMBIA Y LA ACTUAL TRANSPRESIÓN DE LOS ANDES DEL NORTE. *Researchgate*.
- Villaroel, C. E. (2020, Abril). *ING Estructural -Mgst Estructural Universidad Catolica Boliviana*. Retrieved from Metodo Flexible, tutorial 2930 Youtube.
- Wrinkler. (1986).
- Xu, G. (2007). *Wellbore stability in geomechanics*. University of Nottingham: <https://core.ac.uk/download/pdf/33564722.pdf>.
- Zhang, J., Al-Bazali, Ong, S., & Sharma, M. (2006). *Maintaining the stability of deviated and horizontal wells*.
- (No Title). (n.d.). Retrieved September 30, 2020, from <https://www.ijert.org/research/a-study-on-piled-raft-foundation-state-of-art-IJERTV2IS80575.pdf>
- Bochkarev, S. A. (2018). Free Vibrations of a Cylindrical Shell Partially Resting on Elastic Foundation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 59(7), 1242–1250. <https://doi.org/10.1134/S0021894418070039>
- Chang, D.-W., Lien, H.-W., & Wang, T.-Y. (2020). Finite difference analysis for combined pile raft foundations under vertical loads. *16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2019*.
- Chang, D.-W., Lien, H.-W., & Wang, T. (2018). Finite difference analysis of vertically loaded raft foundation based on the plate theory with boundary concern. *Journal of GeoEngineering*, 13(3), 135–147.
- Clima Puerto Asís: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Puerto Asís - Climate-Data.org*. (n.d.). Retrieved November 1, 2020, from <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/putumayo/puerto-asis-49628/#climate-graph>
- Darío Aristizábal-Ochoa, J. (n.d.). ESTRUCTURAS DE VIGAS SOBRE SUELOS ELÁSTICOS DE RIGIDEZ VARIABLE BEAM STRUCTURES ON NONUNIFORM TWO-PARAMETER ELASTIC FOUNDATION. In *Accidentes e Infraestructura Civil* (Vol. 3, Issue 2).
- David, L., Pavlina, M., & Smirakova, M. (2017). Analysis of model foundation slab focused on strain gauge measurement. In *Key Engineering Materials* (Vol. 738). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.738.175>
- EDAFOLOGIA. Lección 1. El perfil del suelo y sus horizontes 2*. (n.d.). Retrieved November 1, 2020, from <http://www.edafologia.net/introeda/tema01/perfil2.htm>
- El Kamash, W., El Naggat, H., Nabil, M., & Ata, A. (2020). Optimizing the Unconnected Piled Raft Foundation for Soft Clay Soils: Numerical Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*,

- 24(4), 1095–1102. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0567-3>
- Fang, J., Kong, G., Kong, G., Meng, Y., Wang, L., & Yang, Q. (2020). Thermomechanical Behavior of Energy Piles and Interactions within Energy Pile-Raft Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002333](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002333)
- Fattah, M. Y., Waryosh, W. A., & Al-Hamdani, M. A. E. (2015). Investigation on the behavior of conical shell foundations composed of reactive powder concrete embedded on sandy soil. *Advances in Structural Engineering*, 18(11), 1859–1873. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.18.11.1859>
- Fiedler, J., & Koudelka, T. (2016). Numerical modeling of foundation slab with concentrated load. *Pollack Periodica*, 11(3), 119–129. <https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.11>
- Freiré Tellado, M. J. (1999). Precisiones para el empleo del método del módulo de balasto en edificación. *Informes de La Construcción*, 51(463), 23–35. <https://doi.org/10.3989/ic.1999.v51.i463.863>
- Fu, T., Wu, X., Xiao, Z., & Chen, Z. (2020). Thermoacoustic response of porous FGM cylindrical shell surround by elastic foundation subjected to nonlinear thermal loading. *Thin-Walled Structures*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106996>
- Gong, J., Cui, W., & Yuan, Y. (2017). Monolithic pouring of the foundation slab of the 632-m high Shanghai Tower. *Structural Concrete*, 18(3), 381–396. <https://doi.org/10.1002/suco.201600193>
- Gusmão Filho, J. A., & Amorim, W. M. (2018). Properties of deposits of shell for foundation. *ISRM International Symposium 2000, IS 2000*.
- Hadi, A., Ovesy, H. R., Shakhesi, S., & Fazilati, J. (2017). Large Amplitude Dynamic Analysis of FGM Cylindrical Shells on Nonlinear Elastic Foundation under Thermomechanical Loads. *International Journal of Applied Mechanics*, 9(7). <https://doi.org/10.1142/S1758825117501058>
- Hamad Sfoog, E., Lim Meng Siang, A. J., Albadri, W. M., Naji, N., Sy Yi, S., & Anak Guntor, N. A. (2020). Finite Element Modeling of Innovative Shallow Raft Foundation with Granular Pile Anchor System for Expansive Clays. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 713(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012050>
- Hassan, S. A., Al-Soud, M. S., & Mohammed, S. A. (2019). Behavior of Pyramidal Shell Foundations on Reinforced Sandy Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 2437–2452. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-00767-z>
- Hoa, L. K., Hoai, B. T. T., & Chan, D. Q. (2019). Nonlinear thermomechanical postbuckling analysis of ES-FGM truncated conical shells resting on elastic foundations. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(13), 1089–1103. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1430274>
- Hoang, L., Matsumoto, T., Dao, X. K., & Shimono, S. (2020). Experimental study on time-dependent behaviour of a vertically-loaded piled raft foundation model in soft clay. *16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2019*.
- Hong, Q., Yan, B., & Ma, T. (2018). The research of raft foundation anti-floating piles' performance and its impact on the raft foundation. *MATEC Web of Conferences*, 175. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817501038>
- Hung, N. H. Q., Komatsu, S., & Maekawa, K. (2020). High-cycle fatigue interaction between soil foundation and concrete slab under moving wheel-type loads. *Engineering Structures*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109931>

- Hussain, M., Naeem, M. N., & Isvandzibaei, M. R. (2018). Effect of Winkler and Pasternak elastic foundation on the vibration of rotating functionally graded material cylindrical shell. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(24), 4564–4577. <https://doi.org/10.1177/0954406217753459>
- Hussein, H. H., Karim, H. H., & Shlash, K. T. (2020). Analysis of piled raft foundation in sandy soil using full scale models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012102>
- Ikonin, S. V., & Sukhoterin, A. V. (2019). The effect of design on interaction of foundation slabs with the base. *Magazine of Civil Engineering*, 89(5), 141–155. <https://doi.org/10.18720/MCE.89.12>
- Jililati, M. N., Brown, V. L., & Tang, X. (2019). Comparative investigation of two design methods for slab-on-grade foundations subjected to concentrated loads. *ISEC 2019 - 10th International Structural Engineering and Construction Conference*. <https://doi.org/10.14455/isec.res.2019.45>
- Kaneda, K. (2020). Numerical analysis of mechanical factors influencing the bearing capacity of piled raft foundation on saturated overconsolidated clay. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 62). https://doi.org/10.1007/978-981-15-2184-3_4
- Kassem, E. M., Nashaat, A. E. S. W., & Essa, Tasneem, A. (2018). Analysis of pile-raft foundations non- rested and directly rested on soil. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(6), 1983–2006.
- Kong, G., Sun, G., Liu, H., & Li, J. (2019). Dynamic response of ballastless track XCC pile-raft foundation under train axle loads. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(3). <https://doi.org/10.1520/JTE20180032>
- Kumar, A., Choudhury, D., & Katzenbach, R. (2016). Effect of earthquake on combined pile-raft foundation. *International Journal of Geomechanics*, 16(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000637](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000637)
- Liu, M. (2018). Testing Method and Application of Foundation Settlement and Shell Deformation of Large Storage Tank | 大型储罐基础沉降及罐体变形检验方法及应用. *Petrochemical Equipment*, 47(4), 97–100. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2018.04.018>
- Ma, C.-M., & Chen, Y.-Y. (2019). Research on the differential settlements of mat foundations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 351(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/351/1/012018>
- Mateckova, P., Smirakova, M., & Litvan, D. (2018). Influence of various amount of steel fibers on load capacity and strain in model foundation slab. In *Key Engineering Materials: Vol. 761 KEM*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.761.159>
- Molodin, V. V., Gorlatov, M. S., & Zaika, S. M. (2019). Mathematical modeling technology of a foundation slab concreting on a frozen base. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 481(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/481/1/012016>
- Nam, V. H., Phuong, N. T., Van Minh, K., & Hieu, P. T. (2018). Nonlinear thermo-mechanical buckling and post-buckling of multilayer FGM cylindrical shell reinforced by spiral stiffeners surrounded by elastic foundation subjected to torsional loads. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 72, 393–406. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2018.06.005>
- Nelson, E. J., Chao, K. C., Nelson, J. D., & Overton, D. D. (2017). Lessons learned from foundation and slab failures on expansive soils. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000958](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000958)

- Osokin, A. I., Efimov, V. O., & Kondratieva, L. N. (2019). Specifics of engineering design of piled raft foundations in soft soils. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations - Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Tech*, 220–224. <https://doi.org/10.1201/9780429058882-43>
- Pechorskaya, S. A. (2019). Raft foundations design charts: Development and applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 675(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012014>
- Phuong, N. T., Nam, V. H., Trung, N. T., Duc, V. M., Van Loi, N., Thinh, N. D., & Tu, P. T. (2019). Thermomechanical postbuckling of functionally graded graphene-reinforced composite laminated toroidal shell segments surrounded by Pasternak's elastic foundation. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/0892705719870593>
- Pourfakhrian, L., & Bayesteh, H. (2020). Effect of slab stiffness on the geotechnical performance of energy piled-raft foundation under thermo-mechanical loads. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1812120>
- Pronozin, Y. A., Epifantseva, L. R., & Stepanov, M. A. (2019). Geotechnical monitoring of a residential building being erected on strip-shell foundations in “aquarel” housing complex in Tyumen. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 481(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/481/1/012017>
- Qin, X., Li, Y., Zhang, Z., & Lin, J. (2018). Experimental Research on Uplift Capacity of Concrete Independent Foundation Slab | 混凝土独立基础底板抗拔承载性能试验. *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*, 46(10). <https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2018.10.008>
- Rabiei, M., & Choobbasti, A. J. (2020). Innovative piled raft foundations design using artificial neural network. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(1), 138–146. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0585-8>
- Ravichandran, N., Phuyal, S., & Shrestha, S. (2020). Analytical and Numerical Investigation of Effectiveness of Ground Modification around Piled-Raft Foundation for Tall Wind Turbine in Weak Soil. *Geotechnical Special Publication, 2020-Febru(GSP 315)*, 572–581. <https://doi.org/10.1061/9780784482780.056>
- Ricker, M., Kueres, D., Randl, N., Häusler, F., & Hegger, J. (2017). New punching shear reinforcement systems: Flat slabs and foundations | Neuartige Durchstanzbewehrungssysteme: Flachdecken und Fundamente. *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*, 83(2), 88–89.
- Rokonuzzaman, M., Nahas, A. E., & Sakai, T. (2015). Experimental validation of a numerical model for the interaction of dip-slip normal fault ruptures, sand deposits, and raft foundations. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(3), 239–250. <https://doi.org/10.1179/1939787914Y.0000000057>
- Sahraeian, S. M. S., Takemura, J., Yamada, M., & Seki, S. (2020). A Few Critical Aspects to Rational Design of Piled Raft Foundation for Oil Storage Tanks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(2), 2117–2137. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01152-0>
- Sert, S., & Kılıç, A. N. (2016). Numerical investigation of different superstructure loading type effects in mat foundations. *International Journal of Civil Engineering*, 14(3), 171–180. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0013-6>
- Sharafkhan, M., & Shooshpasha, I. (2020). A laboratory study of the effect of piles asymmetric

- arrangement on the behavior of piled raft foundation in sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(2), 218–229.
<https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1427658>
- Sharma, V. J., Vasanvala, S. A., & Solanki, C. H. (2015). Study of cushioned composite piled raft foundation behaviour under seismic forces. *Australian Journal of Civil Engineering*, 13(1), 32–39. <https://doi.org/10.1080/14488353.2015.1092636>
- Shigeno, Y., & Yamashita, K. (2020). Seismic behavior of a piled raft foundation with grid-form DMWs considering post-peak softening of stabilized soil. *16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2019*.
- Tabsh, S. W., El-Emam, M., & Partazian, P. (2020). Numerically Based Parametric Analysis of Mat Foundations. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 25(2).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000476](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000476)
- Teng, Y., Shi, J., Gong, J., & Wang, S. (2016). Load transfer characteristic and raft structure control design of large thickness raft foundation under high-rise building complex. *Jianzhu Jieyou Xuebao/Journal of Building Structures*, 37(1), 97–106.
<https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2016.01.012>
- Titulo, A. (2008). NSR 10. *En Pgs A22 Bogota*.
- Xie, Y., Chi, S., & Wang, M. (2020). Influence of Variable Rigidity Design of Piled Raft Foundation on Seismic Performance of Buildings. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1780197>
- Zertsalov, M. G., Simutin, A. N., & Aleksandrov, A. V. (2019). Design-based justification of controlled compensation grouting during zpps-2 foundation slab mock-up lifting. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations - Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Tech*, 430–434. <https://doi.org/10.1201/9780429058882-82>
- Zhang, D. B., Zhang, Y., Cheng, T., & Yuana, J. Y. (2017). Soft foundation strengthening effect and structural optimization of a new cement fly-ash and gravel pile-slab structure. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 30(7), 955–963.
<https://doi.org/10.5829/ije.2017.30.07a.04>