



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Geotécnica

**ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN DE LOS MATERIALES DE PLATAFORMA
TERRESTRE Y EL SUELO NATURAL, POSTERIOR AL PROCESO DE PERFORACIÓN DE
CAMPOS PETROLÍFEROS, MUNICIPIO DE SAN ANDRÉS, DEPARTAMENTO DE PETÉN**

Ing. David Ricardo Palma Villanueva

Asesorado por Mtro. Ing. Carlos Armando de León Quiñonez

Guatemala, junio de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN DE LOS MATERIALES DE PLATAFORMA TERRESTRE Y EL SUELO NATURAL, POSTERIOR AL PROCESO DE PERFORACIÓN DE CAMPOS PETROLÍFEROS, MUNICIPIO DE SAN ANDRÉS, DEPARTAMENTO DE PETÉN

TRABAJO DE TESIS

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. DAVID RICARDO PALMA VILLANUEVA

ASESORADO POR MTRO. ING. CARLOS ARMANDO DE LEÓN QUIÑONEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, JUNIO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA DE TESIS

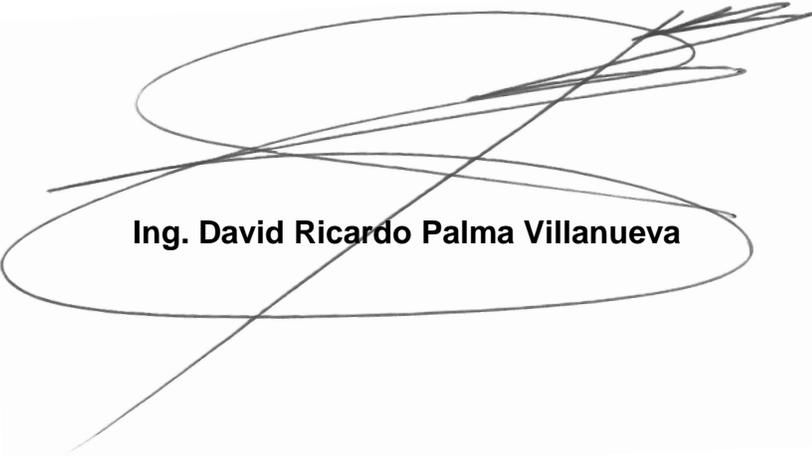
DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
DIRECTORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Ernesto Iván Marroquín Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN DE LOS MATERIALES DE PLATAFORMA TERRESTRE Y EL SUELO NATURAL, POSTERIOR AL PROCESO DE PERFORACIÓN DE CAMPOS PETROLÍFEROS, MUNICIPIO DE SAN ANDRÉS, DEPARTAMENTO DE PETÉN

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 16 de julio de 2019.



Ing. David Ricardo Palma Villanueva

LNG.DECANATO.OI.186.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Directora de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN DE LOS MATERIALES DE PLATAFORMA TERRESTRE Y EL SUELO NATURAL, POSTERIOR AL PROCESO DE PERFORACIÓN DE CAMPOS PETROLÍFEROS, MUNICIPIO DE SAN ANDRÉS, DEPARTAMENTO DE PETÉN**, presentado por: **Ing. David Ricardo Palma Villanueva**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, junio de 2024

JFGR/gaoc



Guatemala, junio de 2024

LNG.EEP.OI.186.2024

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN DE LOS MATERIALES DE PLATAFORMA TERRESTRE Y EL SUELO NATURAL, POSTERIOR AL PROCESO DE PERFORACIÓN DE CAMPOS PETROLÍFEROS, MUNICIPIO DE SAN ANDRÉS, DEPARTAMENTO DE PETÉN”

presentado por **Ing. David Ricardo Palma Villanueva** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 5 de noviembre de 2023

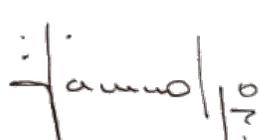
M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN DE LOS MATERIALES DE PLATAFORMA TERRESTRE Y EL SUELO NATURAL, POSTERIOR AL PROCESO DE PERFORACIÓN DE CAMPOS PETROLÍFEROS, MUNICIPIO DE SAN ANDRÉS, DEPARTAMENTO DE EL PETÉN** del estudiante **David Ricardo Palma Villanueva** quien se identifica con número de carné **200010441** del programa de Maestría En Ingeniería Geotecnica.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.




Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador
Maestría En Ingeniería Geotecnica
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



Guatemala, 25 de octubre del 2023

MSc. Inga Anabela Córdova
Directora, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TÉSIS DE GRADUACIÓN** del (la) alumno (a):

Carné: 2000 10441
Alumno: David Ricardo Palma Villanueva
Maestría: Ingeniería Geotécnica
Título de la Investigación: Análisis del proceso de consolidación de los materiales de plataforma terrestre y el suelo natural, posterior al proceso de perforación de campos petrolíferos, municipio de San Andrés, Departamento de El Petén.

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Así mismo, hago constar que la asesoría a la presente tesis de graduación fue ad honorem.

Sin otro particular



Carlos A. de León Quiñonez
Ingeniero Geólogo - Colegiado 4323
MSc. Evaluación y Control Ambiental

MSc. Ing. Carlos Armando De León Quiñonez
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la provisión, el entendimiento y la sabiduría para tomar las decisiones pertinentes en mi formación académica.
- Mis padres** Sori Haniel y Gloria Esperanza, por ser mi soporte y apoyo durante mi formación académica y profesional. Siempre un día a la vez.
- Mis hermanos** Sori Vinicio (q. e. p. d), Vivian Gerson (q. e. p. d.) y Allan Dennis, por ser el apoyo y ejemplo de superación.
- Mi esposa** Katelyn quien, con amor y paciencia, hemos construido en conjunto, un hogar con amor y la Gracia de Dios sobre nosotros.
- Mis hijos** José Javier, José Daniel y Diego José, a quienes insto con el ejemplo, a buscar el crecimiento y sabiduría, para alcanzar sus éxitos profesionales.
- Mis amigos** Por ser mi segunda familia y con quienes he compartido muchos años de alegrías y tristezas.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser cobijo y taller de formación de muchos profesionales, brindando la oportunidad de ser actores principales en la toma de decisión para nuestra Patria.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por los conocimientos adquiridos y a la guía de profesionales que me han formado durante la trayectoria.
Mtro. Carlos Armando de León Quiñonez	Por su profesionalismo, cátedra, asesoría y amistad, en la trayectoria y desarrollo del presente trabajo.
José Urrutia, supervisor de Workover	Destacado y muy querido Tool Pusher de Workover y campañas de perforación. Por su amistad, compañía y por compartir los conocimientos sobre perforación y montaje de pozos petroleros.
PERENCO Guatemala Limited	Por brindarme la oportunidad para mi desarrollo profesional y abrir las puertas como compañía internacional, en el desarrollo del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
OBJETIVOS	XIX
HIPÓTESIS	XXI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. ANTECEDENTES	1
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	7
2.1 Monografía del municipio de San Andrés	7
2.2 Descripción del sector	7
2.3 Localización.....	8
2.3.1. Geología regional y local	8
2.3.2. Geomorfología y tipos de suelos.....	9
2.3.3. Hidrología	13
3. PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS.....	15
3.1 Clasificación de pozos petroleros por su función	16
3.1.1. Pozos exploratorios	16
3.1.2. Pozos para evaluación de la formación	16
3.1.3. Pozos para desarrollo	17

3.2	Clasificación de pozos petroleros por su configuración	18
3.2.1.	Pozos verticales	18
3.2.2.	Pozos horizontales	19
3.2.3.	Pozos desviados	20
3.3	Completación de pozos petroleros	21
3.4	Intervención de pozos (Workover).....	22
3.5	Equipos para perforación de pozos petroleros	25
3.6	Definición	25
3.7	Torre de perforación.....	29
3.8	Subestructura.....	31
3.9	Análisis de esfuerzos actuantes sobre los equipos de perforación	32
3.10	Plataformas petroleras.	34
3.11	Riesgos en operaciones petroleras	36
3.12	Salud e higiene ocupacional en operaciones petroleras.....	37
3.13	Equipos de protección personal	38
3.14	Operaciones petroleras en Guatemala.....	40
4	MARCO METODOLÓGICO	43
4.1	Metodología de muestreo.....	43
4.1.1.	Tipo de muestreo	43
4.1.2.	Planificación de muestreos.....	44
4.1.3.	Definición y ubicación de muestreos	45
4.2	Definición de ensayos	45
4.3	Consolidación ASTM D 2435-90	47
4.4	Ensayo granulométrico ASTM D-6913-04	49
4.5	Límites de Atterberg AASHTO	50
4.6	Análisis de mapas regionales.....	51
4.7	Reconocimientos geológicos y geotécnicos de campo.....	53

4.8	Otras investigaciones realizadas en el Campo Petrolero.	53
5	INVESTIGACIÓN DE CAMPO	55
5.1	Proceso de muestreo.....	55
5.1.1.	Extracción de muestras	55
5.1.2.	Información de campo	58
5.1.3.	Descripción de estratos	58
5.1.4.	Caracterización de muestras	60
5.1.5.	Preparación y transporte de muestras al laboratorio.....	60
5.2	Ensayos de laboratorio	62
5.3	Resultados ensayo consolidación ASTM D2435-90.....	62
5.4	Resultados ensayo granulométrico ASTM D-6913-04	63
5.5	Resultados límites de Atterberg AASTHO T-89 y T-90	66
5.6	Análisis estratigráfico del suelo en puntos de muestreo.....	67
5.7	Análisis de los datos obtenidos.....	67
5.8	Cálculo de asentamientos.....	68
	CONCLUSIONES	77
	RECOMENDACIONES.....	79
	REFERENCIAS	81
	ANEXOS	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Mapa de Cuencas Hidrográficas a escala 1:50,000	14
Figura 2.	Esquemático de pozo vertical	19
Figura 3.	Esquemáticos de pozos horizontales	20
Figura 4.	Esquemáticos de pozos desviados	21
Figura 5.	Esquemático de un equipo de Workover básico	24
Figura 6.	Esquemática torre de perforación y componentes	26
Figura 7.	Fotografía del equipo de perforación CABOT 1200	30
Figura 8.	Fotografía de subestructura CABOT 1200	32
Figura 9.	Operaciones petroleras en Guatemala (1915–1983).....	41
Figura 10.	Operaciones petroleras en Guatemala (1983–2023).....	42
Figura 11.	Mapa fisiográfico de Guatemala.....	52
Figura 12.	ASTM D 6913-04 Calicata 1	64
Figura 13.	ASTM D 6913-04 Calicata 2.	65

TABLAS

Tabla 1.	Componentes de una torre de perforación	27
Tabla 2.	Estimación de pesos muertos CABOT 1200	33
Tabla 3.	Áreas mínimas de una plataforma terrestre de perforación...	35
Tabla 4.	Descripción de estratos, muestra Calicata 1	59
Tabla 5.	Descripción de estratos, muestra Calicata 2	59
Tabla 6.	Consolidación. Tabulación de datos de Calicatas	63
Tabla 7.	Resultados ensayos de consolidación Calicata 2.....	69

Tabla 8. Variación de l_c con m_1 y n_1 71

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
B	Ancho de cimentación de subestructura
S_c	Asentamiento por consolidación
cdf	Caballos de fuerza, por sus siglas en inglés HP
C_v	Coefficiente de consolidación vertical
Ø	Diámetro
σ'_v	Esfuerzo efectivo
Δσ'_v	Incremento promedio de la presión sobre el estrato
C_c	Índice de compresibilidad
C_s	Índice de expansibilidad
I.P.	Índice plástico
Kg	Kilogramo
L	Largo de cimentación de subestructura
lbs	Libras
L.L.	Límite líquido
L.P.	Límite plástico
m	Metros
m²	Metros cuadrados
m³	Metros cúbicos
ppm	Partes por millón
C_r	Pendiente de la curva de recompresión
γ	Peso específico del suelo húmedo
γ_d	Peso específico del suelo seco
e₀	Relación de vacíos

I_c

Valores de influencia

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales).
Asentamiento	Deformación vertical de una superficie por la aplicación de cargas.
Banco de materiales	Lugar autorizado para la extracción de materiales naturales, cuyas condiciones y características son satisfactorias para la construcción de estructuras temporales, accesos o plataformas terrestres.
Caliza	Roca calcárea formada fundamentalmente por carbonato cálcico de origen sedimentario.
Campo petrolero	Es un área constituida por pozos perforados de los cuales, a través de equipo de bombeo sumergible, se extrae un fluido, el cual está compuesto por petróleo y agua ácida.
Carbonato de calcio	Compuesto químico, de fórmula CaCO_3 , principal componente de minerales y rocas como la caliza; procedente del metamorfismo de calizas.

Completación de pozos	Conjunto de trabajos que se realizan en un pozo petrolero después de la perforación o durante la reparación, para dejarlos en condiciones de producir eficientemente los fluidos de la formación o destinarlos a otros usos, como inyección de agua o gas.
Equipo de fondo	Hace referencia a los equipos a instalarse en lo profundo de un pozo petrolero ya perforado, que generalmente consiste en Sistemas Sumergibles de Bombeo SPS, por sus siglas en inglés.
Equipo de perforación	Sistema mecánico o electromecánico, compuesto por una torre que soporta un conjunto de poleas y cables, permitiendo maniobras verticales y rotacionales de tuberías con aditamentos de herramientas de corte o inyección de fluidos de perforación.
Geociencias	Disciplina que se encarga de realizar los estudios de la dinámica del planeta Tierra, la manera en que está la estructura y su forma desde el punto de vista geológico.
Geología	Derivado de la Geociencia, está sujeta a realizar los estudios de la composición, forma, historia y consideraciones estructurales del globo terráqueo.

Ingeniería geotécnica	Es una rama de la ingeniería que analiza las propiedades físico-mecánicas e hidráulicas de los materiales que constituyen la Tierra y así encontrar su uso adecuado para obras e infraestructura.
Kárst	Formación originada por meteorización química de determinadas rocas compuestas por minerales solubles en agua, como la caliza, dolomía, yeso, entre otras.
Morfología	Estudia las formas del relieve terrestre, su origen y evolución.
OSHA	Institución llamada como Administración de Seguridad y Salud Ocupacional, por sus siglas en inglés, la cual promueve regulaciones para administrar sitios y condiciones seguras de trabajo, para prevención de lesiones laborales.
Petróleo	Es un fluido compuesto por hidrocarburos, con características únicas. Se caracteriza por tener un olor fuerte, de color negro y cuya densidad relativa es baja. Puede ser refinado para extraer combustibles y otros derivados volátiles útiles para el desarrollo e industria.
Plataforma terrestre	Superficie artificial construida con materiales locales o externos para crear un área adecuada para

circulación peatonal, vehicular y montaje de equipos para perforación de pozos petroleros.

Pozo petrolero

Es una perforación realizada en superficie hacia el yacimiento petrolero, previamente determinado por un programa de análisis geológico y de geociencias.

Rastrilleras

También conocido como “peines”, es un aditamento localizado en la Canasta del Enganchador de la torre de perforación, en donde, de forma ordenada, se coloca temporalmente cada sección de tubería extraída del pozo en perforación.

Relleno estructural

Proceso de colocación de material clasificado en capas de espesor controlado y realización de un proceso de compactación con equipos adecuados.

Servicios de Workover

Tienen por objeto aumentar la producción o reparar pozos existentes. Estos equipos se utilizan para sellar zonas agotadas en pozos existentes, abrir nuevas zonas productoras para aumentar la producción o bien activar zonas productoras mediante procesos de fracturación o acidificación.

Sulfato cálcico

Mineral de muy suave consistencia y de alta pureza, libre de metales pesados y otras sustancias contaminantes; su fórmula química es CaCO_4 .

Terreno detrítico	Terreno compuesto por detritos (restos, residuos, sedimentos).
Vadoso	Lugar poco profundo, con fondo firme por donde se puede atravesar fácilmente un curso de agua o un cuerpo hídrico.
Yacimiento petrolero	Es una zona con una acumulación natural de hidrocarburos en zonas del subsuelo con rocas porosas o fracturadas, cuyos flujos son retenidos por formaciones rocosas de bajo índice de permeabilidad.
Yacimiento lenticular	Una acumulación considerable de compuestos geológicos como el petróleo, la cual, implica una trampa geológica aislada con formaciones porosas capaces de almacenar hidrocarburos sobre capas impermeables o arcillosas.

RESUMEN

En el campo petrolífero Xan, no existe un compendio de información que permita determinar si durante una campaña de perforación existen asentamientos diferenciales que puedan afectar la integridad y seguridad del personal que labora en la plataforma de perforación, así como también, la integridad de los equipos mecánicos.

Se realizó esta investigación para determinar, a través de ensayos de laboratorios de suelos y los respectivos análisis de resultados, si existen asentamientos diferenciales en el suelo que soporta toda la carga dinámica y estática de la plataforma de perforación.

Dicho análisis comparativo se utilizó para elaborar recomendaciones en la mejora de los procesos de construcción de plataformas terrestres que puedan prevenir que los asentamientos diferenciales afecten la estabilidad e integridad del personal que trabaja en la plataforma de perforación, y el equipo propio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante los procesos perforación de pozos petroleros, los equipos generan presiones, esfuerzos y deformación sobre el suelo de la plataforma terrestre, creando condiciones inseguras para el personal que labora en la plataforma misma y para el propio equipo.

En el proceso de perforación de pozos petroleros, no existe un parámetro que determine la presencia de deformaciones por consolidación de materiales que yacen bajo la subestructura del equipo de perforación.

Dado que el suelo local se caracteriza por ser arcilloso, cohesivo, saturado y de alta plasticidad, éstas podrían representar asentamientos por consolidación al expulsar el agua intersticial que su estructura microscópica presenta, como consecuencia de los esfuerzos y cargas a los que pueda ser sometido (Das, 2015).

En la actualidad, no existe un parámetro que determine si el proceso desestabiliza o no el terreno, por lo cual se plantea la pregunta principal de la investigación:

¿Pueden afectar la estabilidad e integridad del equipo y personal de perforación de pozos petroleros, los asentamientos diferenciales derivados de la consolidación del suelo natural al someterlos a esfuerzos inducidos del proceso y maniobras durante la perforación?

Para encontrar la respuesta al cuestionamiento anterior, es necesario responder las preguntas secundarias:

- ¿Qué grado de consolidación y características físicas tiene el suelo natural que no ha sido sometido a esfuerzos por maniobras de perforación de pozos petroleros?
- ¿Qué grado de consolidación y características físicas tiene el suelo natural que ha sido sometido a esfuerzos por maniobras de perforación de pozos para explotación de petróleo?
- ¿Cuánto se deforma el suelo natural cuando es sometido a esfuerzos durante el proceso de perforación de pozos petroleros?
- ¿Tienen un efecto significativo estas deformaciones en la estabilidad de la plataforma terrestre de perforación y, por ende, en la integridad del personal involucrado y del equipo de perforación de pozos petroleros?

OBJETIVOS

General

Analizar el proceso de consolidación del suelo natural derivado de un proceso de perforación de pozos petroleros, cuando es sometido a esfuerzos dinámicos y estáticos.

Específicos

1. Definir las características físicas y el grado de consolidación del suelo natural que no ha sido sometido a esfuerzos por maniobras de perforación de pozos petroleros.
2. Obtener el grado de consolidación y llevar a cabo la caracterización física del suelo natural que ha sido sometido a los esfuerzos inducidos del proceso y maniobras de perforación de pozos petroleros.
3. Calcular la deformación del suelo natural cuando es sometido a esfuerzos durante el proceso de perforación de pozos petroleros.
4. Determinar si las deformaciones derivadas de la consolidación del suelo natural subyacente al equipo de perforación de pozos petroleros tienen efecto significativo sobre la integridad y estabilidad del mismo.

HIPÓTESIS

Las características del suelo en la zona del campo petrolero Xan se pueden consolidar y, como consecuencia, obtener deformaciones cuando son sometidos a esfuerzos por procesos mecánicos, específicamente, en la perforación de pozos petroleros.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Esta investigación tiene como base fundamental el método experimental, comparativo y deductivo de todas las variables físico-geológicas del suelo, con el objeto de analizar los resultados obtenidos para concluir y presentar recomendaciones pertinentes. Para realizar el proceso de manera ordenada y secuencial, se presenta esta investigación de acuerdo con las siguientes fases.

La fase 1 corresponde a todas las actividades preliminares de la investigación, las cuales se describen a continuación:

- Análisis de documentos o publicaciones existentes: la revisión de documentos técnicos y científicos son los trabajos iniciales que deben realizarse para tener referencias de características del lugar en estudio.
- Análisis de campo: se debe realizar una visita de campo que permita realizar la evaluación de las características de la zona para confirmar la información encontrada en los documentos o publicaciones existentes, de manera retrospectiva.
- Delimitación del área en estudio: de acuerdo con las características y programas de perforación, se procederá a determinar la plataforma terrestre del pozo perforado para que, de acuerdo con las características geológicas, se determinen las condiciones críticas con riesgo de asentamientos. Así también, se determinará la zona a realizarlo de acuerdo con las características geológicas del lugar para crear un parámetro estadístico para crear las condiciones críticas sobre las cuales

el proceso de perforación pueda presentar un mayor riesgo de asentamientos.

- Planificación de muestreos: se deberá considerar la programación y condiciones del pozo petrolero en el cual se realizará el muestreo para que el proceso no interrumpa con la operación de este; así también verificar las condiciones de Seguridad Industrial y Salud Ocupacional.

En la fase 2 se integran los resultados o datos obtenidos en el Trabajo de campo y los ensayos de laboratorio, para lo cual, se describe a continuación:

- Revisión y análisis de estudios estadísticos y de suelos del área en investigación.
- Determinación de resultados, caracterización y cálculo de deformaciones del suelo, por ensayos de laboratorio propuestos.
- El cálculo de deformaciones del suelo anteriormente mencionadas servirá para determinar aspectos como asentamientos por efectos de mecanización como resultado del proceso de perforación del pozo petrolero.
- Tabulación de registros de mediciones de campo y laboratorio.
- Construcción de gráficas de las diferentes variables tomadas.

En la fase 3 se desarrollarán los trabajos de elaboración y análisis correlacionar de la información:

- Interpretación de resultados y su correlación con la información y parámetros geotécnicos indicados en la investigación.
- Determinar si el suelo natural se consolida por efecto de los esfuerzos aplicados por el equipo de perforación de pozos petroleros, para realizar el comparativo contra un suelo consolidado naturalmente.
- Estimar las deformaciones derivadas de la consolidación del suelo al ser sometido a esfuerzos inducidos por el equipo de perforación, y su influencia en la estabilidad e integridad de este.
- Plantear las recomendaciones que sean requeridas para un proceso de construcción de plataformas terrestres de perforación en el Campo Petrolero Xan, con el objeto de eliminar el riesgo de inestabilidad por efecto de un asentamiento por consolidación.

INTRODUCCIÓN

El proceso de perforación de pozos petroleros presenta un reto para la ingeniería y la geología, en la cual ambas se deben tomar de decisiones basadas en criterios e información obtenida para alcanzar los objetivos propuestos para la perforación. Los equipos que ejecutan este proceso de perforación son de gran potencia y peso, con el objeto de alcanzar las profundidades en el subsuelo que permitan obtener el fluido de la formación geológica que lo contiene.

En la actualidad, no se han realizado investigaciones de los efectos de los esfuerzos aplicados por el equipo de perforación sobre la plataforma de perforación terrestre y el suelo natural en el campo petrolífero Xan, ubicado en el Departamento de Petén. Un efecto que es adverso para la estabilidad de equipos de perforación es el asentamiento diferencial en la subestructura, y se considera como parámetro cuantitativo para este efecto, el proceso de consolidación de los materiales y la caracterización del suelo, a través de ensayos e interpretación de resultados.

Con los resultados obtenidos, se realizó el análisis de las variables y su tabulación, y se concluyó sobre el efecto en el suelo, determinando su asentamiento por consolidación. Finalmente, se plantean recomendaciones para futuras campañas de perforación, y que sean considerados durante el proceso de construcción de plataformas terrestres. Esto es posible en el desarrollo de cinco capítulos que a continuación se describen:

El primer capítulo describe los aspectos generales de los suelos del sector a investigar, localización, geología regional, geomorfología e hidrología. En el

segundo capítulo se presentan las generalidades del proceso de perforación de pozos petroleros, equipos y alcances para la industria a nivel local. El tercer capítulo muestra un análisis metodológico y descriptivo del estudio, los ensayos a ejecutar, documentos técnicos y planificación de muestreos.

En el cuarto capítulo, se exponen las características geotécnicas del suelo y se entrelazan las investigaciones de campo con los ensayos propuestos de laboratorio, los cuales determinan los parámetros de consolidación del suelo natural y la estimación de los asentamientos, granulometría y límites de Atterberg para el índice de plasticidad.

El quinto y último capítulo se presentan los resultados obtenidos, a fin de realizar un comparativo de las muestras para realizar el análisis geotécnico y determinar si existen diferencias significativas por los efectos del proceso de perforación.

1. ANTECEDENTES

La exploración y explotación petrolera requiere de un análisis adecuado de la información que compone un yacimiento, que, a través de la Geociencia y su precedente, la Geología, la interpretan y dan un panorama claro de la geomorfología de este.

Kraus (1995) expone que “la búsqueda de petróleo y gas natural requiere conocimientos de geografía, geología y geofísica” (p. 75), ya que el mismo, suele encontrarse en diversos tipos de estructuras geológicas, tales como anticlinales, trampas por falla y domos salinos, cuyas ubicaciones cumplen con ciertas características de la topografía de la zona.

Dadas estas características previas que definen la programación del proceso de perforación, es importante considerar las condiciones de superficie para llevar el pozo petrolero a un término exitoso. En el caso del Campo Petrolífero Xan y su ubicación en una reserva natural protegida, es mandatorio que toda actividad exploratoria no dañe las condiciones de la zona, esto incluye, la estructura natural del suelo que lo constituye. Para ello, se debe planificar la construcción de plataformas terrestres para perforación con materiales foráneos.

Prizantzin (2007) establece que un modelo optimizado para cumplir con las necesidades requeridas para una campaña de perforación ocupa un área estimada de 10,000 metros cuadrados conformados por una capa de subbase y base granular con un porcentaje de compactación dentro de los parámetros constructivos.

Durante el proceso de perforación de pozos petroleros, los equipos que realizan las maniobras de instalación de tubería y bombas ESP a profundidades de hasta 7,000 pies por debajo del nivel del suelo, generan presiones considerables al suelo natural a través de la subestructura de la perforadora y para reducir estos efectos, se debe construir una plataforma terrestre con materiales no clasificados que se obtienen de bancos de materiales de préstamo (Vaides, 1984).

Así también, de acuerdo con la caracterización geológica, la región presenta terrenos detríticos, con poca estabilidad y zonas que presentan vados inundables en épocas lluviosas, Rodríguez (2000) describe que “estas características alcanzan un amplio desarrollo en los sedimentos ligados a dinámicas aluviales, asociados a los arroyos y principales cauces fluviales” (p. 67).

Las características físicas del suelo del área en estudio presentan una alta tasa de meteorización por ser un área cálida y húmeda. Esta humedad en la zona de estudio, derivada de las precipitaciones pluviales anuales que ascienden hasta los 1260.6 mm, determinan el grado de meteorización de los materiales existentes. (Rivera, 2018, p. 41)

Dado que las precipitaciones anuales en la zona de estudio son considerables, Das (2015) confirma en su investigación que, “cuando una capa de suelo saturado se somete a un aumento del esfuerzo, la presión del agua intersticial se incrementa repentinamente” (p. 183). Este incremento de presión provoca el drenaje del agua en una estructura de suelo y, por ende,

en un reacomodamiento de sus partículas, reduciendo su volumen y, en definitiva, se obtiene un asentamiento.

La intemperización de la roca caliza determina las características del suelo, por tanto, se conforma por materiales discontinuos o estratos con alta probabilidad de desplazamiento. Así también, Suárez (1998) en su publicación describe a la Caliza como una roca sedimentaria con alto porcentaje de carbonato de calcio, mayor al 50 %, que en condiciones originales es dura y compacta, pero que con la disolución del CaCO_3 presenta problemas geotécnicos.

En general, los suelos del Departamento del Petén están compuestos principalmente de arcilla de naturaleza plástica, con cambios volumétricos considerables y poco permeables, que se caracterizan por una topografía bastante plana desde 0 a 2.7 grados de inclinación, una altimetría de 50 a 103 msnm, con tramos de planicie inundable (Instituto Geográfico Militar, 1972).

Dadas las características del suelo local, la construcción de plataformas terrestres con materiales que permitan mejorar las condiciones, es de suma importancia para la estabilidad y seguridad del equipo de perforación, y de mayor relevancia, velar por la seguridad e integridad del personal involucrado.

Dicha estructura, por construirse, tiene por objeto reducir los efectos de los esfuerzos transmitidos y derivados del proceso sobre el suelo natural. Estos esfuerzos pueden provocar deslizamientos de las partículas que constituyen las arcillas locales y cambios volumétricos

en el suelo como consecuencia de la evacuación del líquido existente por la cantidad de lluvia o flujos subterráneos. (Velásquez, 2007, p. 8)

En la industria petrolera, ha suscitado casos en los que el equipo de perforación presenta asentamientos diferenciales en la subestructura, provocando la pérdida de verticalidad en la torre y, por ende, riesgos operativos y pérdidas económicas significativas para las compañías involucradas.

La plataforma terrestre en estudio se ubica dentro de la zona de explotación del Campo Petrolífero Xan, y fue parte del proceso en la campaña de perforación ejecutada entre mayo del 2018 y abril del 2019, con una perforadora CABOT 1200, que genera una carga muerta estimada de 1,350 toneladas, y sumado a ello la carga de presión dinámica, en el área de contorno del pozo petrolero, crea esfuerzos significativos. (Prizantzin, 2007, p. 72)

El equipo de perforación requiere de una superficie firme sobre la cual pueda transmitir los esfuerzos provocados por su propio peso y presiones laterales, como las del viento.

En referencia a lo anteriormente descrito, Campos (2008) indica:

Las capacidades de carga de las instalaciones modernas pueden variar desde 250,000 hasta 1,500,000 libras, un mástil típico puede soportar vientos aproximadamente de 100 a 130 millas por hora (160 a 210

kilómetros por hora) con los peines o Rastrilleras de la canasta del enganchador llenas de tubería. (p. 2)

“El asentamiento de suelos por consolidación está caracterizado por incrementar en función del factor, tiempo y fuerzas en un área determinada, condición que se presenta generalmente en suelos arcillosos saturados” (Velásquez, 2007, p. XXIII).

Das (2015) afirma: “Cuando una capa de arcilla compresible saturada se somete a un aumento del esfuerzo, el asentamiento elástico se produce inmediatamente” (p. 184). Por sus características microscópicas, las arcillas presentan una conductividad hidráulica menor, disipando por un largo periodo y gradualmente el exceso de presión de poro por la carga aplicada.

Por tanto, el cambio de volumen de la masa de suelos arcillosos puede continuar por un largo periodo de tiempo una vez que se haya presentado el asentamiento elástico. “El asentamiento causado por consolidación en arcilla puede ser varias veces mayor que el asentamiento elástico” (Das, 2015, p. 184).

Se considera como parámetro cuantificable el Proceso de Consolidación a través del Ensayo Normado ASTM D 2435-90, se procede a realizar un comparativo con una muestra que no ha sido sometida a las condiciones antes mencionadas. Así también, se realiza la caracterización del suelo en función de granulometrías ASTM D-422, pesos específicos ASTM C-127 y límites de Atterberg D-4318-05 para determinar un parámetro de control de muestras.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Monografía del municipio de San Andrés

El municipio de San Andrés, ubicado en el departamento del Petén, fue fundado en el año de 1820 y los orígenes de sus pobladores eran yucatecos y, por ende, en algunas regiones del mismo municipio aún se habla el idioma maya-itzá. Es considerado el municipio más grande a nivel nacional y del departamento de Petén.

Dada su extensión territorial, siendo el más grande del departamento, limita al norte con el estado mexicano de Campeche; al sur, con los municipios de San Benito, Flores y La Libertad; al este, con el municipio de San José; y finalmente, al oeste con el estado mexicano de Tabasco.

2.2 Descripción del sector

El municipio de San Andrés y su población están dedicados a la agricultura, estimando que el 80 % de su población dedica sus esfuerzos y economía en torno a esta actividad. Siendo el municipio con mayor extensión territorial y dada la topografía plana en su mayoría, permite que el desarrollo de la agricultura y ganadería sea la actividad con mayor participación de la población, y cuya economía permite extender sus negocios hacia las fronteras con México y sus Estados.

De acuerdo con el banco de marca del Instituto Geográfico Nacional, el municipio de San Andrés se encuentra en promedio a 150 m.s.n.m., por lo

cual, en la mayoría del territorio la temperatura máxima media es de 29.6 °C y una precipitación anual promedio de 1550 mm.

2.3 Localización

El municipio de San Andrés se localiza a 535 kilómetros de la ciudad de Guatemala. Se conduce hacia el municipio citado, a través de la CA-09 Norte hasta el kilómetro 245 en el cruce de La Ruidosa, del departamento de Izabal. En el cruce se continúa sobre la carretera centroamericana CA-13 hasta el municipio de Santa Ana, en cuya jurisdicción, se encuentra la intersección con la ruta departamental RD-PET-15. Se continúa hasta el municipio de La Libertad, en donde se encuentra la intersección con la ruta departamental RD-PET-13, y se conduce hacia la dirección noroeste, en dirección a la aldea El Naranjo-Frontera.

Una vez alcanzado este punto, se debe navegar el río El Naranjo a través de un ferry provisto por PERENCO Guatemala Limited para uso público en el sector. Una vez desembarcado en el lado opuesto a aldea El Naranjo, se continúa el trayecto de 60 kilómetros sobre carretera de terracería hacia el Parque Nacional Laguna del Tigre (PNLT), reserva protegida que es atravesada por esta misma carretera, en donde se aprecian humedales de gran importancia para la nación, llegando finalmente al Campamento Xan como punto final de la trayectoria.

2.3.1. Geología regional y local

Guatemala está localizado en la parte sur del sistema montañoso del Oeste de América del Norte. El conjunto montañoso que atraviesa el país se inicia en el Istmo de Tehuantepec, y por medio de Chiapas, México, Guatemala

misma y Honduras, para finalmente descansar en Nicaragua. Dada esta influencia montañosa, Guatemala está influenciada por todos los procesos geológicos que ha sido sometida dicha cadena.

La República de Guatemala tiene distinción en provincias claramente delimitadas, de acuerdo con el Instituto Geográfico Nacional (1972), se distinguen cuatro provincias geológicas, que se denominan a continuación: Planicie Costera del Pacífico, Tierras Volcánicas, Cordillera Central y Tierras Bajas de Petén. Es en esta última provincia geológica, donde se concentran los análisis de acuerdo con la localización geográfica del Campo Petrolero Xan.

2.3.2. Geomorfología y tipos de suelos

El Campo Petrolero Xan, al encontrarse ubicado sobre la una de las cuatro provincias Geológicas, la de las Tierras Bajas de Petén, es importante presentar sus características y génesis de los materiales constituyentes. Se presenta a continuación la caracterización de la zona en cuestión, según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2001):

13. Región Fisiográfica Plataforma Sedimentaria de Yucatán

Debido a su localización geográfica, la parte norte que constituye el departamento de Petén está relacionada fisiográficamente con la Península de Yucatán y, por ende, constituida por capas de rocas sedimentarias horizontales que datan del período del Cretácico Superior y del Eoceno. Existen depresiones topográficas que suman niveles topográficos en dirección Este, cuyo drenaje que no logra un

desarrollo o definición por la característica única de la roca caliza: su solubilidad. En la dirección opuesta, hacia el Oeste, se observan importantes reservas de agua que disminuyen en función de la distancia en la dirección en mención, que luego se conforman en ríos relacionados con fallas normales que definen el margen del área. (p. 92)

Para la zona de interés de esta investigación, se encuentra delimitada en la descripción que a continuación se presenta, según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2001):

13.1 Subregión planicies y llanuras aluviales San Pedro-Naachtún

Esta geoforma en particular se puede observar en la línea frontera con México y Guatemala, en el Norte y Oeste del departamento de El Petén. Compuesta de las superficies geográficas del río Chocop, río San Pedro, río Candelaria, río Escondido, río Paso de Caballos, Naachtún y río El Tintal. Las alturas de dicho relieve están entre los 100 y 200 metros lineales sobre el nivel del mar y posee un drenaje superficial meándrico debido a las pendientes del lugar. El material y su origen geológico, está compuesto por sedimentos y aluviones, también yeso, margas, calizas, dolomía y anhidrita en forma de estratos. La edad ésta estructura comprende del Cretácico superior, Terciario y Cuaternario.

a) Gran Paisaje: Planicie pantano lacustre El Tigre-Carmelita.

Ubicación y localización: Esta unidad incluye la parte Noroeste del Departamento de El Petén, desde el río Escondido al río Candelaria, límite con México.

Morfografía: Constituye áreas de terrenos planos con algunas ondulaciones debido a un paleo-relieve de pequeñas depresiones cerradas o úvalas, con pendientes < de 3% y alturas de 50 msnm a 100msnm. Se observan abundantes drenajes de ríos abandonados y pequeñas lagunas de forma alargada.

Tipo de roca: Conformada por aluviones de la Edad del Cuaternario y formaciones sedimentarias del Terciario. Los aluviones son rellenos de piezas fragmentadas líticos muy finos, dominantes en arcillas y limos. La parte del Grupo Petén que es la Formación Buena Vista, están formados en el piso por sedimentos del Eoceno. En general, dichos rellenos están formados por aportes fluviolacustres que suelen presentar fragmentos de roca caliza.

Morfogénesis: Esta unidad se conformó cercana a la costa carbonatada de Yucatán, derivada de arrecifes y fallas normales, con dirección Noreste a Sureste. Por lo que esta zona estuvo bajo el nivel

del mar, en un periodo considerable, y que influyó en el desarrollo moderado de superficies de karst, que desaparece en ciertas zonas. Un rasgo característico del karst, son las depresiones cerradas con paredes casi verticales, limitados por formas de arco y espolón, cuya definición es úvalas. Estas úvalas están íntimamente relacionadas a las diaclasas mayores como la Laguna del Tigre y el río Escondido; existen repetidas intercalaciones en la masa de formación cálcica que resultan en terrenos impermeables que favorecen la acumulación superficial de agua.

Morfocronología: La edad de estos depósitos se ubica en el espacio comprendido entre el Terciario inferior (Eoceno) y el Cuaternario reciente.

c) Gran Paisaje: Terrazas subrecientes de El Tigre-Línea Fronteriza-Carmelita

Ubicación y localización: Esta unidad no está constituida por un solo bloque, ya que está distribuida en la parte Norte del Petén, y alrededor de la Laguna del Tigre y río Candelaria.

Morfografía: Lo conforman áreas de terreno plano, con pendientes menores del 4%, y con elevaciones menores de 100 metros sobre el nivel del mar.

Tipo de roca: Formado por rellenos coluvio aluviales, de fracciones finas de arcilla y limo.

Morfogénesis: En general, son originados por rellenos que provienen de corrientes fluviales. Sin embargo, fue originalmente influenciada en sus etapas iniciales por efectos marinos. Muestran evidencia de suelos muy arcillosos a arenosos con contenido salino.

Morfocronología: La edad de estos depósitos corresponde al período del Cuaternario reciente. (p. 94)

2.3.3. Hidrología

El municipio de San Andrés está dividido en dos zonas geomorfológicas importantes, cuya influencia en el comportamiento de la hidrología local, determina así mismo las características de los cuerpos de agua: la zona de cordilleras y laderas en la parte sur y noreste; y la zona de planicies que conforman la parte noroeste. La zona de planicies antes descrita, está identificada en el Mapa de Cuencas Hidrográficas a Escala 1:50,000, República de Guatemala, Método de Pfafstetter (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, 2009). El cual localiza al municipio en la cuenca de la vertiente del Golfo de México, y ha asignado un código de cuenca, el número 944 y nivel 3, nombrada río San Pedro, la cual se presenta en la Figura 1.

Esta asignación de la cuenca río San Pedro le brinda las características a la zona de estudio, específicamente la formada en el Parque Nacional

3. PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS

La perforación del subsuelo para la apertura de un pozo petrolero es un proceso que requiere de la recopilación de información geológica y un análisis profundo de los resultados de la investigación e interpretación de estos. La elección del sitio deberá integrar aspectos importantes como la accesibilidad, análisis de riesgos, los análisis financieros y las solicitudes aprobadas por las entidades gubernamentales, que permiten determinar la coordenada sobre la cual se ubicará el pozo petrolero y, sobre todo, la profundidad a alcanzar en la formación.

A la entidad gubernamental, se deberá presentar la propuesta detallada de las operaciones que contiene el programa de perforación del pozo petrolero, su construcción y posterior taponamiento/ abandono, de manera que pueda aprobarse y proceder a la ejecución.

Dentro de la propuesta detallada que deberá ser autorizada, se establece el tipo de pozo acorde a su propósito de la perforación, los cuales pueden ser:

- Pozos exploratorios
- Pozos para evaluación de la formación
- Pozos para desarrollo

Una vez realizados los análisis técnicos, financieros y regulación de procesos ante la entidad gubernamental, se procede a elegir el equipo de

perforación adecuado y con las capacidades necesarias para alcanzar las profundidades del programa del pozo petrolero.

3.1 Clasificación de pozos petroleros por su función

Los pozos petroleros se pueden definir conforme al objetivo de la investigación y del plan de exploración a continuación, se describen:

3.1.1. Pozos exploratorios

Estos pozos son de gran importancia para confirmar valores geológicos y de la estructura de la formación, lo que permite recopilar información para análisis del experto y proceder con ajustes en su programa de perforación y con el diseño del pozo petrolero. Estos datos se obtienen de la recuperación de los recortes, núcleos de los estratos y registros eléctricos de las propiedades de la formación.

Conforme se alcanzan mayores profundidades, se obtienen valores confirmatorios y, por ende, se establece la presencia de hidrocarburos. La premisa y alcance de estos pozos es obtener la mayor cantidad de información a través del análisis de los materiales y su conformación, para la toma de decisiones del diseñador del pozo petrolero.

3.1.2. Pozos para evaluación de la formación

El programa de perforación de estos pozos tiene por objetivo definir una etapa intermedia entre la exploración y la producción de petróleo, para determinar el área y características de la formación geológica, así como

también las propiedades del mismo yacimiento y su influencia sobre el comportamiento y la producción de los pozos.

Estos pozos permiten más información que, en combinación y análisis de los pozos exploratorios, permiten un panorama más claro sobre la geología del área de interés, permitiendo mejoras en el diseño y programa del pozo para desarrollo, así como también su terminación al final del periodo de explotación. Pero más importante aún, es prevenir y reducir los daños al yacimiento, y obtener la mejor estimación de la producción petrolera en el periodo de la vida de este.

3.1.3. Pozos para desarrollo

Estos pozos son perforados para alcanzar el objetivo primordial de una campaña de exploración, que es permitir la producción del campo. Dentro de este tipo de pozos, se clasifican diferentes tipos:

- Pozos de producción: son los de mayor cantidad en un yacimiento y permite la optimización del pozo en su proceso de producción.
- Pozos de inyección: estos pozos permiten inyectar de vuelta a la formación, el agua resultante del procesamiento del petróleo en la planta de separadores, de manera que pueda mantener la presión de formación con el aporte de estos volúmenes de agua.
- Pozos de observación: permiten el monitoreo de las presiones de la formación, de manera que puedan ser ajustados y balanceados los pozos productores y de inyección, cada cual con su función hacia la formación.

3.2 Clasificación de pozos petroleros por su configuración

Los pozos petroleros pueden clasificarse de acuerdo con su configuración, y esta se determina como parte de la integración y análisis de la información geológica obtenida en los pozos exploratorios y de evaluación. Esta información, permite desarrollar el diseño de pozo en función de la formación del yacimiento, permitiendo definir la configuración más adecuada de los pozos para desarrollo.

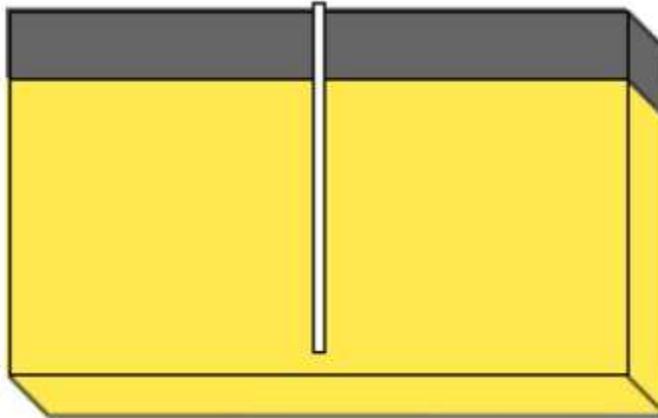
Las torres de perforación son los equipos que permitirán que los pozos petroleros puedan ser perforados, por lo que durante su proceso y en función del tipo de configuración del pozo, las plataformas terrestres serán sometidas a esfuerzos de compresión de los materiales que las constituyen, en especial, durante las maniobras de extracción de la sarta de perforación para incrementar las tuberías que conducen la broca o los equipos de limpieza de pozo conforme se avanza en el alcance de la profundidad de diseño. A continuación, se describen las configuraciones más comunes:

3.2.1. Pozos verticales

Es la configuración más común en la industria, sus costos de construcción son bajos y de menor riesgo, para el equipo y para la inversión de la compañía interesada. Posteriormente, en el proceso de desarrollo, sus costos de operación y mantenimiento son también bajos, permitiendo un diseño sencillo y la facilidad para futuros fracturamientos hidráulicos que permitan obtener la mayor cantidad de producto durante la vida útil del pozo. Es la elección de pozo ideal, para formaciones de espesor homogéneo, de acuerdo con las exploraciones.

Figura 2.

Esquemático de pozo vertical



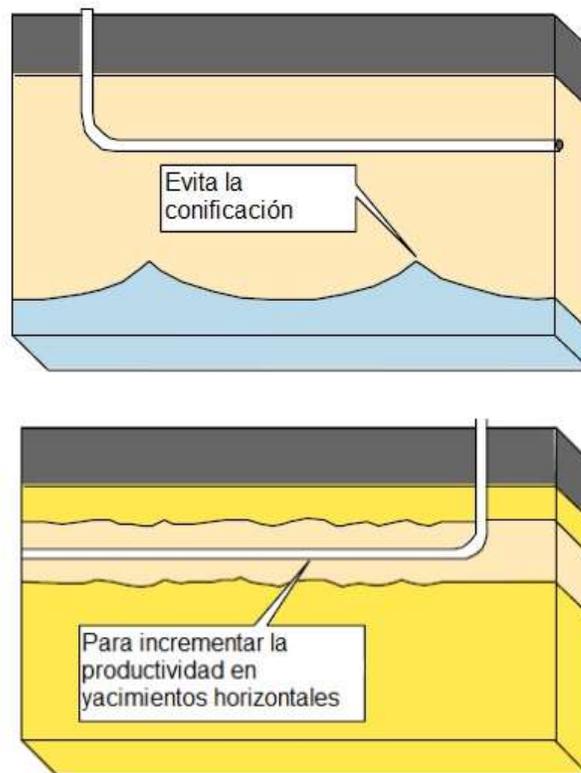
Nota. El gráfico muestra la configuración vertical del pozo petrolero, ideal para formaciones de espesor homogéneo. Obtenido de EADIC (2017). *Diseño de Pozos de Perforación*. (<https://eadic.com/blog/entrada/disenio-de-pozos-de-perforacion/>), consultado el 1 de septiembre de 2023. De dominio público.

3.2.2. Pozos horizontales

Esta configuración de pozos petroleros es elegida por razones primordiales del tipo de yacimiento, cuyos espesores son relativamente bajos, o bien, las columnas de aceite son de poco espesor y no hay barreras significativas a la permeabilidad vertical. Permite también reducir el riesgo de bajas en la productividad del pozo y para reducir la cantidad de pozos para desarrollo, reduciendo costos de inversión. Es ideal para yacimientos con fracturas verticales en donde se encuentran las reservas con menor restricción a la extracción. Es ideal para campos petroleros que se encuentran bajo zonas protegidas, como el caso del Campo Petrolero Xan, el cual en superficie está ubicado sobre el Parque Nacional Laguna del Tigre.

Figura 3.

Esquemáticos de pozos horizontales



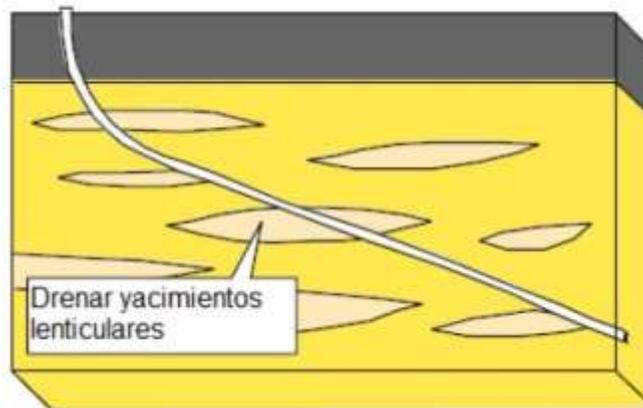
Nota. El gráfico muestra la configuración horizontal del pozo petrolero, ideal para yacimientos bajo zonas sensibles. Obtenido de EADIC (2017). *Diseño de Pozos de Perforación*. (<https://eadic.com/blog/entrada/diseño-de-pozos-de-perforación/>), consultado el 1 de septiembre de 2023. De dominio público.

3.2.3. Pozos desviados

Están íntimamente relacionados con los pozos horizontales, pero principalmente porque son elegidos para yacimientos de espesor mayor, pero con barreras de permeabilidad vertical, o bien, yacimientos aislados o lenticulares dentro de la formación, pero que generalmente presentan altos índices de productividad al estar concentrados sus volúmenes.

Figura 4.

Esquemáticos de pozos desviados



Nota. El gráfico muestra la configuración desviada del pozo petrolero, ideal para yacimientos lenticulares o aislados. Obtenido de EADIC (2017). *Diseño de Pozos de Perforación.* (<https://eadic.com/blog/entrada/disenio-de-pozos-de-perforacion/>), cconsultado el 1 de septiembre de 2023. De dominio público.

3.3 Completación de pozos petroleros

Es un proceso importante que debe ser definido en el diseño del pozo petrolero, y determinante para la productividad del mismo pozo. Es la interfase de comunicación entre el yacimiento, el pozo petrolero y los equipos de bombeo del producto.

El proceso de terminación del pozo, de acuerdo con el diseño de este, es realizado también con la torre de perforación, por lo que al igual que el proceso de perforación en función del tipo de pozo, somete a esfuerzos de compresión el material del cual está construida la plataforma terrestre. Dependiendo del tipo de terminación, pero en especial, la que requiere tubería de encamisado y/o tubería ranurada en la zona productora del yacimiento, somete a cargas considerables por cada pie que se instala.

La selección del tipo de completación, puede influir en la mayor productividad o el daño permanente al yacimiento, y los cuales se clasifican en:

- Terminación en agujero descubierto
- Terminación con agujero revestido
- Terminación con tubería ranurada no cementada
- Terminación sin tubería de producción (tubingless)

En general, este último proceso requiere de la intervención de la torre de perforación con una mayor cantidad de esfuerzos sobre la plataforma terrestre de perforación. Estos esfuerzos son derivados de la cantidad de viajes que realiza el equipo al extraer o insertar la sarta de perforación, generando presiones sobre el suelo de apoyo. Las descripciones de los equipos que intervienen en la terminación de pozos se detallan en la siguiente sección.

3.4 Intervención de pozos (Workover)

Este proceso generalmente se realiza cuando un pozo petrolero ya está en funciones y en proceso de explotación, sin embargo, es importante describirlo para dar a conocer el tipo de equipo e intervención sobre la plataforma terrestre, exponiendo la importancia de ésta y su integridad, para beneficio y seguridad de estos equipos con dimensiones considerables.

En general, y complementando los equipos que intervienen en los procesos antes descritos, se pueden describir dos clases de equipo adicionales para la ejecución de los trabajos en un pozo petrolero para efectos

de mantenimiento como productores, estos se fundamentan principalmente en su capacidad de carga:

- Equipos para intervención
- Equipos de servicio a pozos

En referencia a los equipos de Workover, estos permiten las intervenciones de mantenimiento y servicios de los pozos, y son equipos de considerables dimensiones y pesos. Los propósitos primordiales de este equipo son, extraer e insertar las varillas de bombeo, las tuberías de producción para mantenimiento de las bombas E.S.P. que forman parte de la sarta para tal fin y finalmente, para los procesos de estimulación de pozos a través de medios mecánicos o químicos. Un equipo para Workover, debe contar como mínimo con los siguientes elementos:

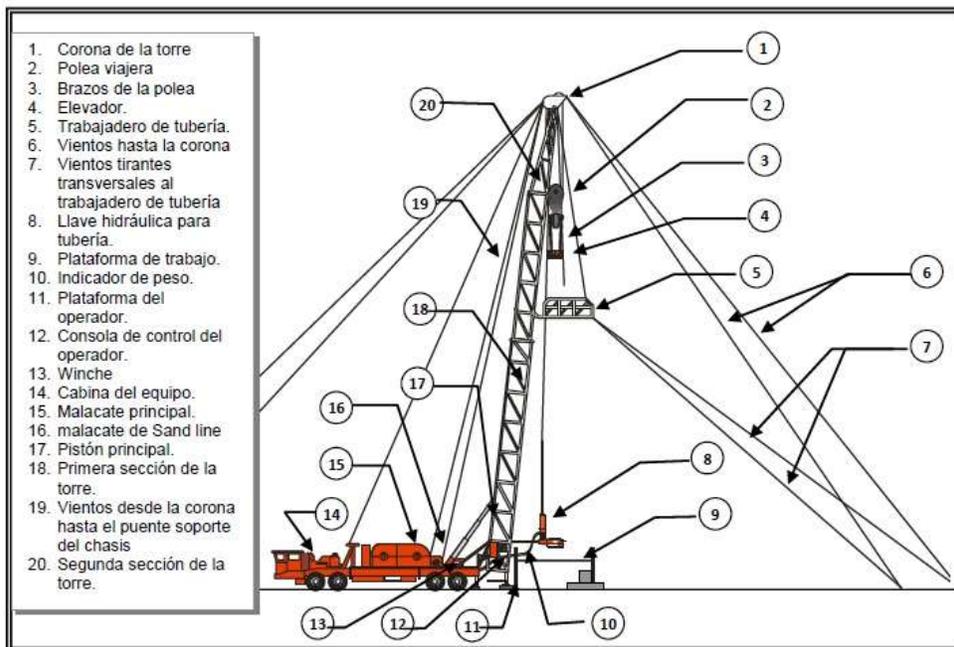
- Polea viajera: permite los recorridos ascendentes y descendentes mientras se extraen las tuberías o varillas dentro del agujero.
- Brazos: permite restringir momentáneamente, que las tuberías o varillas tengan recorridos ascendentes, mientras se enrosca o desenrosca las tuberías o varillas.
- Elevadores para tubería: es la herramienta que abraza el cuerpo de la tubería por debajo del acople y permite bajar o subir la sarta.
- Cuñas para tubería: este elemento soporta el peso total de la sarta de tubería que queda aún dentro del pozo, el cual traslada todo el peso de la misma hacia la boca del pozo y la plataforma terrestre de perforación. Las cargas de esta sarta de perforación y transmitidas hacia la

plataforma, pueden en promedio estar entre las 250,000 hasta 1,500,000 libras.

- Elevadores de tuberías: este elemento juega un papel importante para el equipo de Workover, ya que permite extraer o insertar la sarta de tuberías de bombeo. Al igual que las cuñas para tubería, descritas anteriormente, generan presiones críticas sobre el equipo de Workover y a su vez, hacia la plataforma terrestre de perforación.

Figura 5.

Esquemático de un equipo de Workover básico



Nota. Ejemplo de un equipo de Workover. Obtenido de la Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander (2015). *Operaciones de servicio a pozos y Workover* [Presentación de PowerPoint]. (Diapositiva 9).

De acuerdo con la Figura 5, en la cual se presentan los componentes básicos del equipo de Workover, el mismo podría integrar un peso total entre 40 y 50 toneladas.

3.5 Equipos para perforación de pozos petroleros

Los equipos de perforación están constituidos por diversas partes, de acuerdo con el programa de perforación diseñado, a continuación, se desarrolla lo relevante para los mismos.

3.6 Definición

El equipo de perforación, como se indicó en las secciones anteriores, permite que el proceso de exploración, evaluación y desarrollo de un pozo petrolero pueda ejecutarse sin interrupciones y cuyas capacidades deben ser preliminarmente evaluadas por el experto petrolero. Sus capacidades y características para ser elegida deben ser concordantes con el plan de perforación y diseño del pozo, y en muchos de los casos, estos planes o diseños se ven sujetos a la disponibilidad de equipo de perforación.

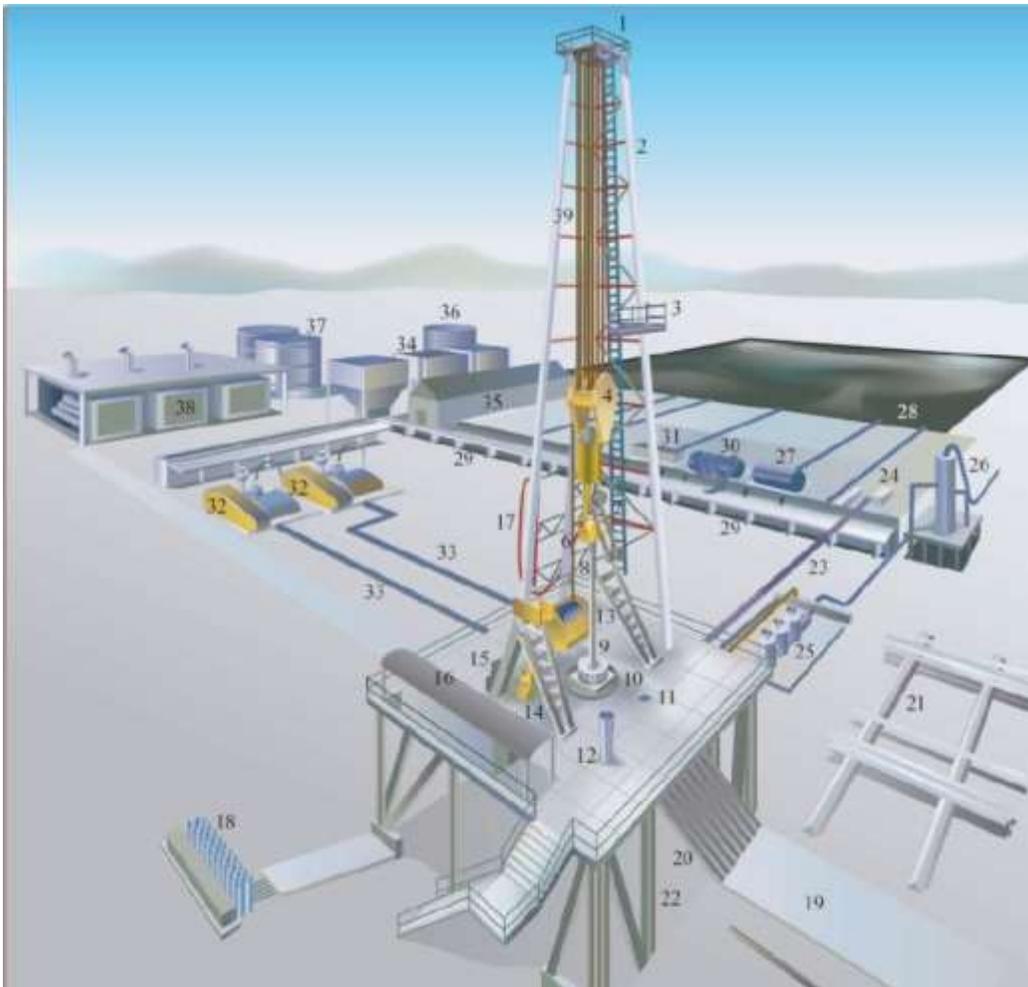
En el caso de Campo Xan y su contrato de operación petrolera bajo el número 2-85, otorga a Perenco Guatemala Limited como operador vigente, el disponer de los bienes del Estado, y para efectos del desarrollo de campañas de perforación, tiene a disposición de una perforadora CABOT 1200.

La perforadora CABOT 1200 fue construida para brindar hasta 1200 cdf o HP, con una capacidad de perforación de hasta 13,500 pies en un agujero de 5" de diámetro (\emptyset), pero en las operaciones de Campo Xan, las profundidades máximas alcanzadas han sido de hasta 7,000 pies.

El equipo antes citado, está constituido por tres componentes principales: la torre de perforación, la subestructura y equipos auxiliares. Se presenta a continuación, con mayor detalle en la Figura 6, un esquemático con los componentes de la torre de perforación:

Figura 6.

Esquemática torre de perforación y componentes



Nota. Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas. Volumen III: Sistemas básicos y procesos de los equipos de perforación. Obtenido de J. Herrera (2020). *Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas.* (p. 8) Universidad Politécnica de Madrid.

Tabla 1.*Componentes de una torre de perforación*

Número	Nombre
1	Bloque corona
2	Torre
3	Canasta o parrilla del enganchador
4	Bloque viajero
5	Gancho del bloque viajero
6	Swivel
7	Elevadores
8	Junta Kelly
9	Acople de Kelly
10	Mesa rotaria / Unión giratoria
11	Mouse hole
12	Rat hole
13	Malacate
14	Indicador de peso (dentro de la consola del perforador)
15	Consola del perforador
16	Caseta de trabajo (Doghouse)
17	Kelly hose

Continuación de la Tabla 1.

Número	Nombre
18	Unidad de acumulación de presión Koomey
19	Corredera de tuberías
20	Rampa de tuberías
21	Rack de tuberías
22	Subestructura
23	Línea de retorno de lodos/fluidos de perforación
24	Zaranda de lodos/fluidos de perforación
25	Válvulas múltiples
26	Separador de gases en lodos de perforación
27	Degasificador
28	Fosa de lodos de reserva
29	Fosa de lodos
30	Desarenador
31	Desalviador
32	Bombas de lodos de perforación

Continuación de la Tabla 1.

Número	Nombre
33	Líneas de descarga de lodos
34	Almacén de insumos para lodos/fluidos de perforación
35	Casa de control y registro de lodos
36	Tanques para almacenamiento de agua
37	Tanques para almacenaje de combustibles
38	Generadores y casa de máquinas
39	Línea de perforación

Nota. Detalle de los componentes de una torre de perforación. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.7 Torre de perforación

La torre de perforación es una estructura metálica con cuatro soportes de apoyo instalados sobre una base de configuración cuadrada llamada subestructura. La función principal de la torre es la de soportar los esfuerzos que generan las operaciones de extraer o insertar la sarta de tuberías dentro del pozo con dos componentes importantes: el conjunto de poleas y el bloque viajero. Estos elementos accionan a través de motores que brindan potencia suficiente hacia el malacate a través del cable de perforación, el bloque fijo o la corona.

A la torre de perforación, se adicionan las cargas de la parrilla o canasta del enganchador, la cual permite almacenar a un costado temporalmente todas las tuberías que son extraídas o insertadas de la sarta durante los viajes de las maniobras.

La torre, como se indica anteriormente, y para la CABOT 1200, soporta esfuerzos y cargas continuas durante todo el proceso de perforación y construcción del pozo petrolero, las cuales son transmitidas directamente hacia la Subestructura. La torre de perforación es de 127 pies de altura, totalmente erguida y preparada para su operación.

Figura 7.

Fotografía del equipo de perforación CABOT 1200



Nota. La fotografía muestra el equipo CABOT 1200 sobre la plataforma terrestre, con los componentes e infraestructura. Elaboración propia.

3.8 Subestructura

La torre de perforación se erige sobre la subestructura, la cual tiene dos funciones primordiales:

Recibir todas las cargas del piso de la instalación y cuyo diseño provee del espacio para maniobras del equipo y personal capacitado para la operación, y en su parte inferior, provee del espacio suficiente para resguardo y ubicación de los equipos que permiten el control y prevención de fugas del pozo en caso de un reventón.

Soportar los equipos pesados que permiten la manipulación de las tuberías, como el caso de la mesa rotaria de 735,000 lb de capacidad rotatoria y, además, todo el conjunto de segmentos de tuberías que se extraen temporalmente de la sarta de perforación, mientras se realizan las maniobras, cuya capacidad máxima para la CABOT 1200 es de hasta 400,000 lb. A su vez, todo el resto de la sarta de perforación que aún permanece colgando dentro del pozo petrolero, es sujetado a la subestructura a través de las cuñas de la mesa rotaria, trasladando todo ese peso adicional hacia dicha subestructura.

Figura 8.

Fotografía de subestructura CABOT 1200



Nota. La fotografía muestra la subestructura sobre la plataforma terrestre. Elaboración propia.

3.9 Análisis de esfuerzos actuantes sobre los equipos de perforación

De acuerdo con lo desarrollado en el apartado anterior, una torre de perforación para pozos petroleros implica una serie de esfuerzos derivados de las cargas propias del equipo y de los esfuerzos durante las maniobras de los programas de perforación o construcción del pozo.

Como se indicó anteriormente, las fuerzas involucradas sobre la torre son trasladadas por la subestructura hacia la plataforma terrestre de perforación. Entre las que se pueden identificar y que serán parte del análisis de resultados del capítulo 6, se enumeran a continuación:

- Peso propio del equipo de perforación.
- Peso propio de la subestructura.
- Peso de las tuberías almacenadas sobre la CABOT 1200, extraídas de la sarta de perforación.
- Peso de la sarta de perforación que cuelga dentro del pozo petrolero, sujetado a través de las cuñas de la mesa rotaria.

Estas serán las fuerzas por considerar en este análisis a realizar sobre el capítulo 5, para definir la influencia sobre la plataforma terrestre. Pero se presentan a continuación, en la Tabla 4, las referencias de pesos establecidos y descritos anteriormente de manera general:

Tabla 2.

Estimación de pesos muertos CABOT 1200

Elemento	Peso estimado en lbs
Malacate	75,000
Torre de perforación.	715,000
Subestructura	454,000
Bloque viajero	360,000
Mesa rotaria / Unión giratoria	300,000
Elevadores de tubería de perforación	350,000
Elevadores de lastra barrenas	100,000
Total	2,354,000

Nota. Estimación de pesos de los componentes de una torre de perforación. Elaboración propia, realizado con Excel.

Las plataformas terrestres de perforación se diseñan de acuerdo con las cargas muertas y vivas que soportarán durante un proceso de perforación de pozo petrolero, para efectos de esta investigación, se consideran aquellas cargas que tienen influencia directa sobre el suelo que yace bajo la Subestructura, las cuales se eligieron y plasmaron en la tabla anterior.

3.10 Plataformas petroleras

En cumplimiento del Contrato 2-85, la empresa a cargo de la operación y mantenimiento de Campo Petrolero Xan, debe realizar las gestiones administrativas ante el Ministerio de Energía y Minas una vez se hayan obtenidos los estudios de ingeniería. Estos estudios preliminares permiten obtener la suficiente información o recaudos, y están a cargo de la Gerencia de Perforación, quienes han desarrollado un plan completo de perforación, incluyendo el diseño y programa de construcción de la plataforma petrolera. Finalmente, el Ministerio emite dictamen al expediente para dar inicio al proceso.

Al final del proceso de planificación y obtener los dictámenes favorables, se inicia la etapa ejecutoria, se inicia la construcción de la locación. Este proceso estará a cargo de la Gerencia de Obra Civil de la compañía, e implica todas las etapas preliminares, de ejecución y conclusión de la plataforma. Entre las más importantes están el trazo topográfico, limpia y destronque y disposición de materia vegetal a un costado de la plataforma, el desplante de plataforma, acarreo de materiales foráneos al Parque Nacional Laguna El Tigre (los materiales son acarreados desde zonas de explotación de aldea El Naranjo), conformación y relleno controlado inicial y finalmente, la conformación, afinamiento y compactación de la superficie, de acuerdo con los niveles topográficos diseñados.

En la superficie, generalmente se clasifica en los bancos de explotación, un material con granulometría fina, pero esta condición y dado el origen del material, generalmente están constituidos por arcillas y limos, las cuales hacen relación con las edades de los materiales: poca meteorización.

Una plantilla general para cubrir con las necesidades de área para todos los equipos y servicios que se esquematizaron en la Figura 6, es una plataforma de 10,000 m². sin embargo, la elección del área mínima está en función del tamaño del equipo de perforación, tal y como se plantea en la siguiente tabla:

Tabla 3.

Áreas mínimas de una plataforma terrestre de perforación

Altura de la Torre y peso del equipo	Dimensiones mínimas de Instalación (m)
142 pies y 500 toneladas	60 x 90
127 a 147 pies y 400 toneladas	40 x 60
95 a 104 pies y 300 toneladas	60 x 90
101 pies y 200 toneladas	40 x 60

Nota. Estimaciones de áreas mínimas. Obtenido de M. Prizantzin (2007). *Diseño de Plataformas y Evaluación de fosas para la disposición de recortes provenientes de la perforación de pozos petroleros.* (p. 50) USAC. Facultad de Ingeniería.

Para constituir los accesos a la plataforma terrestre de perforación, estos deben diseñarse de acuerdo con el vehículo de carga H-10, y deberán estar sujetos a la planificación presentada, ya que estos no deberán interferir con zonas sensibles donde la fauna y flora de los humedales está protegida y en observación. En especial, de las aguas servidas que se producen del campamento y comedores del personal en turno, para ello, se incluyen fosas sépticas portátiles y pozos de infiltración para las aguas separadas.

Para los accesos y la plataforma terrestres de perforación, se hacen estimaciones de las cargas de diseño en base al vehículo de diseño HS-20 (AASHTO). Y en cumplimiento a dichas normativas, deben compactarse en capas a un mínimo de 90% de la densidad máxima, de acuerdo con AASHTO T 180, y la compactación durante este proceso, se comprueba en campo, mediante el método AASHTO T 191.

3.11 Riesgos en operaciones petroleras

Durante los procesos de perforación de pozos petroleros en plataformas terrestres, es latente el peligro de eventos que ponen en riesgo al personal que labora sobre la plataforma de la mesa rotativa, bajo la subestructura o en la altura de la torre. Estos riesgos pueden ser identificados como:

- Arremetida: este evento consiste en el desbordamiento de fluidos, gases, petróleo o agua subterránea, o bien, la mezcla de ellos, provenientes del hoyo del pozo en proceso de perforación. Este ocurre cuando la presión del fluido o lodo de perforación bombeado al interior del pozo es menor que la presión de la formación del yacimiento que en ese momento está siendo perforado. Este evento puede manifestarse

en un alza en el volumen del fluido en los tanques de lodos, la presión en la sarta y el espacio anular del pozo.

- **Reventón:** es una etapa desarrollada y descontrolada de una arremetida no detectada y controlada por los mecanismos de seguridad diseñados para contenerlos. Estos reventones tienen graves consecuencias, e incluso muertes, sobre el personal de turno en la perforación, así como también daños a la infraestructura de la torre e incluso la pérdida del pozo petrolero.
- **Incendio:** una vez transcurrida la etapa de un reventón, la fricción del fluido sobre circuitos eléctricos y, por ende, la electrostática puede provocar un incendio cuyas magnitudes y pérdidas podrían ser fatales. Contener un incendio de esta magnitud, requiere de grandes esfuerzos y costos para la compañía, incluyendo daños al medio ambiente, demandas internacionales e incluso, pérdida de confiabilidad en el mercado petrolero.

3.12 Salud e higiene ocupacional en operaciones petroleras

Para todo proceso existen riesgos, y en las operaciones petroleras el índice de riesgo puede incrementar en función de las actitudes y compromisos de cada uno de los participantes. Por ello, es importante que todo personal involucrado esté protegido con equipos mínimos y, sobre todo, capacitados para su correcto uso y operación de los dispositivos de seguridad.

Como primera herramienta de seguridad está la organización del personal y sus funciones como parte de una brigada de seguridad y respuesta inmediata, y como segunda herramienta de seguridad, el compromiso de cada

uno por velar por su seguridad y del resto del personal. La seguridad es responsabilidad de todos. Sin embargo, para dar seguimiento y confirmar que las normativas y procedimientos de seguridad se cumplan por el personal, el Gerente de Instalación Offshore (OIM, en inglés) en conjunto con el Residente de Seguridad Industrial, deben establecer los programas, auditorías y equipamiento necesario para resguardo del personal y las instalaciones del campo, designando a continuación los representantes de las brigadas en cada una de las zonas de labores. Estos lineamientos forman parte del programa de perforación, que preliminarmente fue autorizado por la autoridad gubernamental.

En una locación de un proceso de perforación de pozos petroleros, se definen, de manera interna, las cadenas de mandos y comunicación, y para ello, el enlace entre el OIM hacia las operaciones de la perforación de pozos, es el Company Man, quien es el responsable de la planificación, ejecución y supervisión de las operaciones en la plataforma terrestre, Workover y completamiento, respetando siempre las normas de seguridad y cuidado del medio ambiente.

3.13 Equipos de protección personal

Para que la operación de perforación de pozos sea segura, todo el personal deberá contar, como mínimo, con el siguiente equipo con certificación OSHA o ANZI:

- Protección auditiva: en zonas con valores de decibeles que puedan hacer perjuicio, como cuarto de máquinas o equipos de izaje.

- Protección de cabeza (cascos): en lugares con riesgo de caída de objetos; cuando haya exposición a shock eléctrico. Estos elementos deberán cumplir con las normas ANZI.
- Uniforme: las prendas que utilice el personal no deberán ser de tallas mayores, que permitan demasiada holgura como para quedar atrapados en equipos en movimiento. De preferencia, el uniforme deberá ser ignífugo. El uniforme deberá ser utilizado durante la manipulación de químicos, exposición al sol y zonas con riesgo de salpicaduras químicas o fuego.
- Calzado: para la protección de pies en cualquier operación dentro de la locación, se debe realizar con botas de puntera de acero o puntera de fibra de carbono.
- Protección ocular: para toda operación, el personal que ingresa a las zonas de riesgo deberá utilizar gafas protectoras. Las presentaciones pueden variar acorde a las condiciones de luz natural, pueden ser gafas oscuras, claras o ámbar.
- Respiradores: en la locación y previamente establecido en el plan de acción, se deberán identificar los lugares y ubicación de los equipos de autocontenido de 15 o 30 minutos; estos deberán ser de conocimiento, principalmente, de la cuadrilla de rescate, quienes ya tienen certificación validada por el OIM y el Residente de Seguridad Industrial. Las condiciones para tener preparado este equipo, serán en donde el riesgo de emanación de gases tóxicos o H₂S sea altamente probable.
- Arnés de seguridad: para quienes trabajan sobre la plataforma o en la parrilla o canasta del enganchador, deberá hacer uso de un arnés de seguridad con mínimo dos puntos de sujeción. Los trabajos de mantenimiento que requieran estar por encima de 1.50 m de altura del nivel seguro, deberán utilizar obligatoriamente este equipo.

- Monitor de H₂S: este monitor personal detecta presencia de ácido sulfhídrico en niveles de 0 – 20, 0 – 50 o 0 – 100, partes por millón (ppm), y en un amplio rango de temperaturas. Al momento de detectar partículas, emite una alarma de advertencia, o bien, si la persona sufre desmayo por intoxicación del gas, el sonido permite a la cuadrilla de rescate ubicar a la víctima y llevarla a un lugar seguro.

3.14 Operaciones petroleras en Guatemala

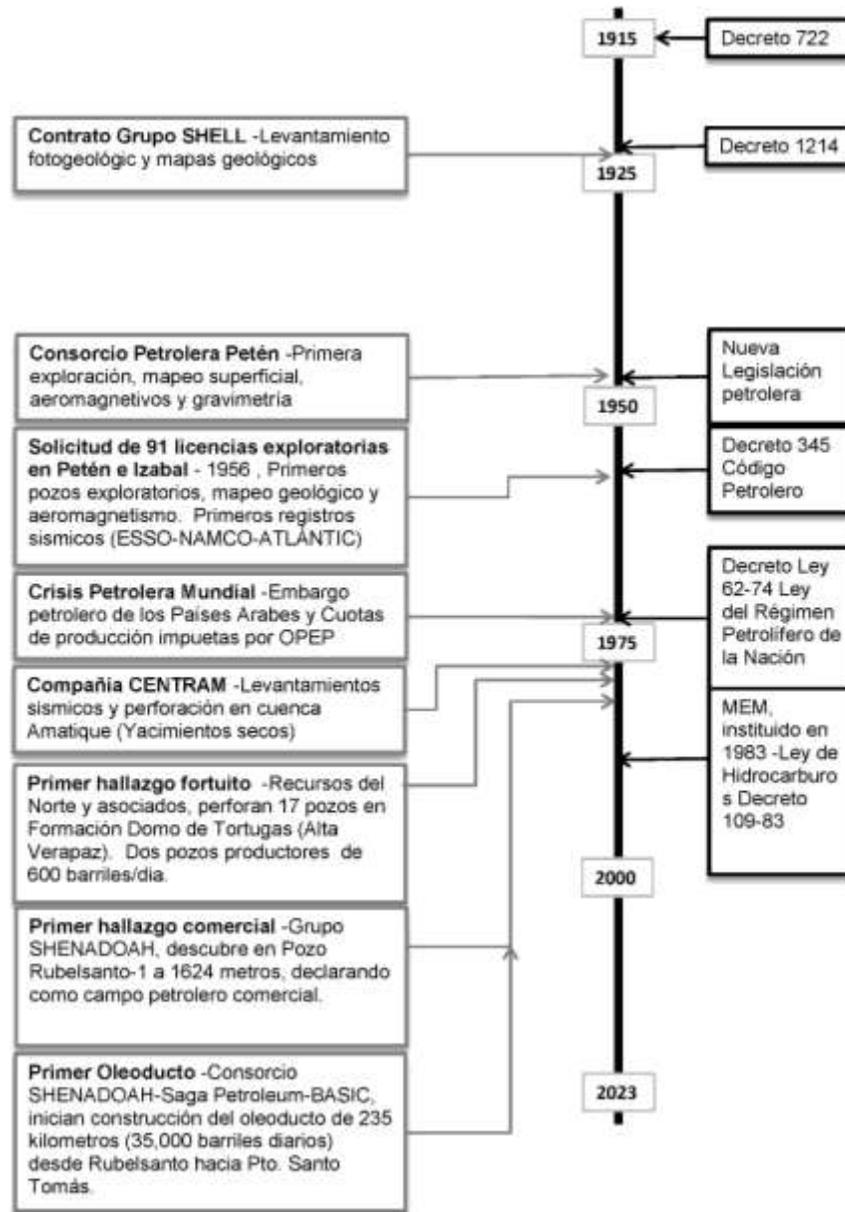
La actividad desarrollada para la industria del petróleo en Guatemala está por cumplir ya 100 años, no específicamente al desarrollo de campañas de perforación y explotación de pozos petroleros, sino más bien a la creación de las plataformas legales que permitieron las condiciones para que la actividad se gestara. Para ello, la regulación de la actividad se circunscribió a la sanción de las siguientes leyes:

- Decreto 722, del 20 de diciembre de 1915 (Manuel Estrada Cabrera).
- Decreto 1214, nueva Ley de Hidrocarburos, del 27 de mayo de 1922 (José María Orellana).
- Cambios a la legislación en 1944, provoca retiros de las compañías petroleras internacionales.
- Decreto 345 (Código del petróleo), publicado el 7 de julio de 1955.
- Decreto Ley 62-74, Ley del Régimen Petrolífero de la Nación, 1974.

Pero para conocer la cronología general de las actividades petroleras guatemaltecas, se presenta para referencia la Figura 9:

Figura 9.

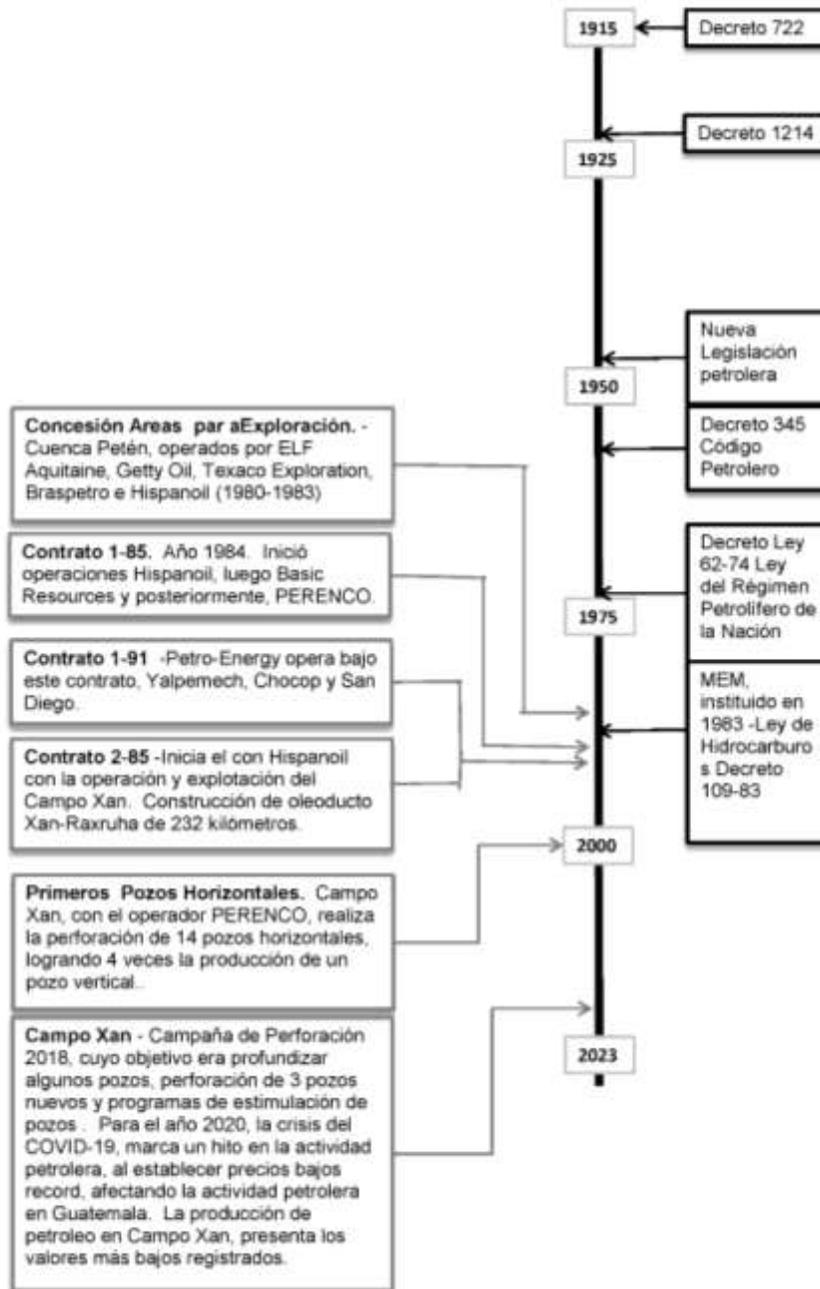
Operaciones petroleras en Guatemala (1915– 1983)



Nota: Extracto y cronología de las actividades petroleras en Guatemala. Elaboración propia, con datos obtenidos de: J. Lutín (2013). *Análisis Jurídico Mercantil sobre la actividad petrolera en Guatemala y su impacto en el ambiente.* (p. 83 -95) USAC. Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales. Realizado con Excel.

Figura 10.

Operaciones petroleras en Guatemala (1983–2023)



Nota: Extracto y cronología de las actividades petroleras en Guatemala. Elaboración propia, con datos obtenidos de: J. Lutín (2013). *Análisis Jurídico Mercantil sobre la actividad petrolera en Guatemala y su impacto en el ambiente.* (p. 83 -95) USAC. Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales. Realizado con Excel.

4 MARCO METODOLÓGICO

4.1 Metodología de muestreo

De acuerdo con lo requerido en la investigación, se debe realizar un análisis del tipo de muestreo y su metodología, para obtener posteriormente los resultados adecuados y, por ende, las conclusiones. Por ello, es importante definir los tipos de muestreo acordes al ensayo a realizar sobre la muestra de suelo por recopilar.

A continuación, se definen los aspectos conceptuales y de procedimiento para el muestreo a realizar.

4.1.1. Tipo de muestreo

Para efectos investigativos y de resultados de este documento, será elegido el muestreo inalterado en bloque, del cual se describe su procedimiento y recomendaciones para realizarlo.

La muestra inalterada, es un proceso de extracción que considera tomar muestras de material directamente de la matriz del suelo, y que procura conservar las características naturales de la matriz del suelo en las muestras. Ha sido cuestionado el apelativo de inalterado porque, en definitiva, el material de la muestra sufre leves alteraciones durante su corte, extracción, manipulación, encapsulado, transporte y manipulación en laboratorio.

El resultado obtenido del ensayo de laboratorio a realizar que cuantifique la resistencia del material en condiciones no favorables, por lo cual es requerido y mandatorio obtener las condiciones iniciales del suelo en el terreno (como lo son consolidación previa o saturación), existen la posibilidad remota de no verse alterado por la variación de la presión intersticial del suelo en la matriz, o bien, la descompresión inducida por la extracción de la muestra de la matriz en donde yace.

Sin embargo, para lograr replicar las condiciones del suelo en el proceso del ensayo y, por ende, sus comportamientos y resultados para efectos de esta investigación, se realizará un muestreo a través de una calicata para coleccionar una muestra inalterada a la profundidad de interés.

4.1.2. Planificación de muestreos

Los muestreos de material para efectos y alcances de esta investigación se planifican de tal manera que permita realizar un comparativo de dos muestras inalteradas descritas en el apartado anterior en la matriz de suelo de la plataforma terrestre de perforación.

Una vez procesadas las muestras inalteradas de material con los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, se determinará si las condiciones de esfuerzos transmitidos por la Subestructura de la torre de perforación inducen deformaciones sobre la plataforma terrestre de perforación, construida con los materiales de préstamo.

4.1.3. Definición y ubicación de muestreos

Las muestras deberán ser ubicadas en la plataforma terrestre de perforación y considerando las siguientes condiciones:

- Muestras inalteradas a la misma profundidad en referencia al nivel 0.00.
- La Muestra Calicata 1, se tomará en un punto alejado de la zona de influencia de los esfuerzos de la Subestructura de la torre de perforación hacia la plataforma terrestre de perforación.
- La Muestra Calicata 2, se tomará a un costado de la estructura del antepozo, justo donde la Subestructura de la torre de perforación ha trasladado esfuerzos hacia la plataforma terrestre de perforación.

4.2 Definición de ensayos

Luego de plantear el tipo de muestreo y la ubicación de los puntos propuestos para el alcance de esta investigación, se definen los ensayos a realizar a las dos muestras de material inalterado producto de las calicatas. A continuación, la conceptualización de los ensayos por realizar.

En referencia a la investigación, la consolidación de los materiales que constituyen la plataforma terrestre de perforación es el punto medular de la misma. La consolidación de los materiales es intrínseca en el momento en que están afectados al estar sujetos a cambios en las condiciones de esfuerzos y deformaciones respectivas, en función del tiempo en que interactúan, por tanto, la medida en que se deforman será un valor importante que determinar.

Adicional a lo anteriormente descrito, es importante caracterizar el material que está siendo sometido a los esfuerzos, deformaciones, en función del tiempo, y por ello, es importante conocer sus propiedades físicas reconociendo cómo está constituida su matriz (granos y partículas), así como también, su comportamiento mecánico al estar en contacto con humedad.

Cuando un depósito saturado es sometido a incrementos de esfuerzos por cargas externas, ocurre un incremento de la presión intersticial hasta alcanzar un excedente. Puesto que el agua contenida en la matriz del suelo no resiste al esfuerzo cortante, la presión neutra en su interior se elimina, creando un flujo del agua contenida hacia un punto con menor presión: al exterior de la matriz de suelo. Este flujo de las partículas de agua es medible en una velocidad permisible en función de la permeabilidad de la matriz del suelo. Bajo el concepto antes descrito, es importante conocer la caracterización del suelo y sus propiedades físicas-mecánicas.

En los suelos arcillosos, la permeabilidad es muy baja, por lo que el tiempo en el cual una particular de agua se traslada hacia una zona de presión más baja (exterior), es mayor, volviendo más lento el proceso de consolidación, permitiendo deformaciones de forma continua al estar siendo sometidos a esfuerzos. Al ser un suelo de permeabilidad muy baja, es importante, entonces, estimar y predecir el asentamiento total de una estructura y el tiempo (velocidad) al cual se produce el asentamiento estimado.

Es importante conocer otro fenómeno posterior a la disipación de las presiones intersticiales de los suelos finos, el cual sufre un acomodo de las partículas que constituyen la estructura del suelo, el cual es llamado consolidación secundaria. Este comportamiento del suelo es propio de un

material viscoso, como el de los suelos plásticos u orgánicos, por lo que no puede despreciarse y debe ser determinado a través de un ensayo.

Con los planteamientos anteriores, se definen los ensayos a realizar a las muestras inalteradas descritas en los apartados anteriores.

4.3 Consolidación ASTM D 2435-90

La prueba conocida como Método de Prueba Estándar para Propiedades de Consolidación Unidimensional de los suelos usando cargas en incremento, permite determinar la magnitud y tasa de consolidación de una matriz de suelo bajo condiciones de restricción lateral y con drenaje axial, mientras son aplicadas cargas en incremento sobre un área conocida del espécimen, generando un esfuerzo controlado.

El ensayo presenta dos métodos, el Método A, con incrementos de carga constantes en períodos de 24 horas o sus múltiplos, y el Método B, con lecturas de tiempo/deformación en todos y cada uno de los incrementos de carga aplicados. El método ASTM D 2435-90, es aplicable para suelos de grano fino cuya sedimentación ha sido naturalmente realizada por efectos del agua en sus poros.

Las mediciones se toman en el cambio de la altura del espécimen y estos datos son utilizados para determinar la relación entre el esfuerzo efectivo axial y la relación de vacíos o deformación, y en este sentido, las lecturas de deformación con el tiempo se toman durante un incremento, la tasa de consolidación es evaluada con el coeficiente de consolidación.

Con los valores obtenidos, se estima la magnitud y tasa de asentamiento total y diferencial de una estructura que somete a cargas y esfuerzos sobre el suelo de soporte, como es el caso de la subestructura de la torre de perforación. Permite validar que las cargas después del esfuerzo de preconsolidación y después de este valor, puedan estar a un nivel de esfuerzos suficientemente altos.

Estos métodos de determinación de la afectación del suelo sometido a esfuerzos están basados en la teoría de consolidación de Terzaghi para estimar el coeficiente de consolidación C_v .

Para comprender el proceso de consolidación, Terzaghi propuso una modelación mecánica, el cual consiste en una primera condición con un cilindro de sección conocida, con un pistón con fricción considerada como despreciable o nula, y en cuya estructura se identifica un pequeño orificio o perforación. En el interior del émbolo del pistón, se encuentra sujeto un resorte sin posibilidades de deformarse, por lo cual no ejerce fuerza alguna, y que además se encuentra embebido en un fluido; toda fuerza aplicada es soportada en su totalidad por el fluido antes citado.

En una segunda condición del mismo cilindro descrito, se abre entonces el pequeño orificio o perforación del cilindro, dando cabida a que el fluido pueda salir a la menor interferencia de fuerza aplicada sobre el émbolo, transmitiendo entonces la fuerza proporcional resultante hacia el resorte, permitiendo al flujo hacia el exterior a través del agujero u orificio. La velocidad a la cual se transfiere la carga del pistón hacia el resorte es función del diámetro del orificio y la viscosidad del fluido en el cual se encuentra embebido el resorte en cuestión.

Finalmente, el equilibrio del sistema se alcanza cuando la presión en el fluido es igual a la presión exterior, y el resorte sujeto al émbolo que recibe la carga, ha tomado la totalidad de la fuerza aplicada. Esta analogía, determina que la consolidación máxima se obtiene en cuanto ocurre la reducción de la relación de vacíos (e_0) y un incremento del esfuerzo efectivo (σ'_v), en analogía y de acuerdo con el modelo propuesto por Terzaghi, el fluido incomprensible (agua intersticial y/o gases) ha salido en su totalidad del émbolo a través del orificio (redes capilares de la matriz del suelo) y el resorte (partículas sólidas del suelo) ha tomado la totalidad de la fuerza aplicada.

4.4 Ensayo granulométrico ASTM D-6913-04

Es un ensayo complementario al anteriormente descrito y que puede brindar información importante referente al tamaño de las partículas del suelo en análisis. Este ensayo es aplicado con la finalidad de separar las partículas en intervalos de tamaño y determinar cuantitativamente la masa de las partículas en función de su tamaño o rango estipulado.

Una vez determinados los valores de participación de cada tamaño de partícula se combinan para determinar la distribución de estas, como una graduación de ellas. El método de prueba requiere de tamices con aberturas cuadradas y dimensiones controladas de acuerdo con las normativas, y estos están entre los rangos de 3 pulgadas (74 mm) y la abertura No. 200.

Determinar la graduación de un suelo, permite así también predecir la calidad y su comportamiento respecto a su interacción con esfuerzos o contacto con partículas de agua.

4.5 Límites de Atterberg AASHTO

Estos ensayos permiten caracterizar los materiales en función de las propiedades plásticas de suelos arcillosos o limosos, cuando están en contacto con humedad y pueden contenerla en los vacíos de la matriz del suelo. Estos valores pueden ser clasificados a continuación:

Límite líquido (L.L.): es el resultado porcentual de un suelo cuyo estado, debido al contenido de agua, modifica sus propiedades mecánicas para obtener un comportamiento fluido. Es definido como el contenido de agua suficiente para que, a través de los golpes del ensayo en la Copa de Casagrande, la apertura inducida por el ranurador permita el cierre de hasta 1.27 centímetros. Este valor porcentual determina la frontera de estado líquidos a estado de plástico.

La importancia de este dato es que permite en ocasiones estimar asentamientos de material por consolidación o predecir la máxima densidad de compactación de los suelos. Un dato importante es que el límite líquido es una dimensión de la resistencia del suelo al corte bajo un contenido determinado de humedad, y este valor incrementa a medida que el tamaño de los granos o partículas presentes disminuyen. Está normado bajo AASHTO T 89 y puede permitir, también, clasificar el tipo de suelo.

Límite plástico (L.P.): es el estado del suelo con un grado de endurecimiento, pero sin llegar a un estado semisólido, bajo un contenido de humedad por debajo del cual, el suelo aún se comporta como un material plástico. Es el límite de la humedad máxima que permite que el suelo pase a comportarse como un fluido viscoso. Este límite está definido por el porcentaje del contenido de agua que es suficiente para permitir que un cilindro de 3

milímetros de diámetro, al rodarse en la palma de la mano o una superficie lisa, presente agrietamientos en su estructura. Está normado bajo AASHTO T 90.

Índice de Plasticidad (I.P.): es un parámetro que permite estimar la cantidad de arcilla contenida en el suelo en análisis. En el caso de suelos con I.P. igual a cero, el suelo se clasifica como no plástico; un I.P. menor de 7, es indicio de un suelo de baja plasticidad; mientras el I.P. esté comprendido entre 7 y 17, indica un suelo medianamente plástico y finalmente, cuando un suelo presenta valores mayores a 17, es indicio de alta plasticidad.

4.6 Análisis de mapas regionales

Para las formaciones geológicas locales del Campo Xan, se identifica en el mapa de la Figura 11, que las plataformas de carbonatos los cuales, durante un período corto de tiempo y extensión después de la fase orogenia Laramídica, se depositaron sedimentos de origen clástico continental de la Formación Subinal del Eoceno.

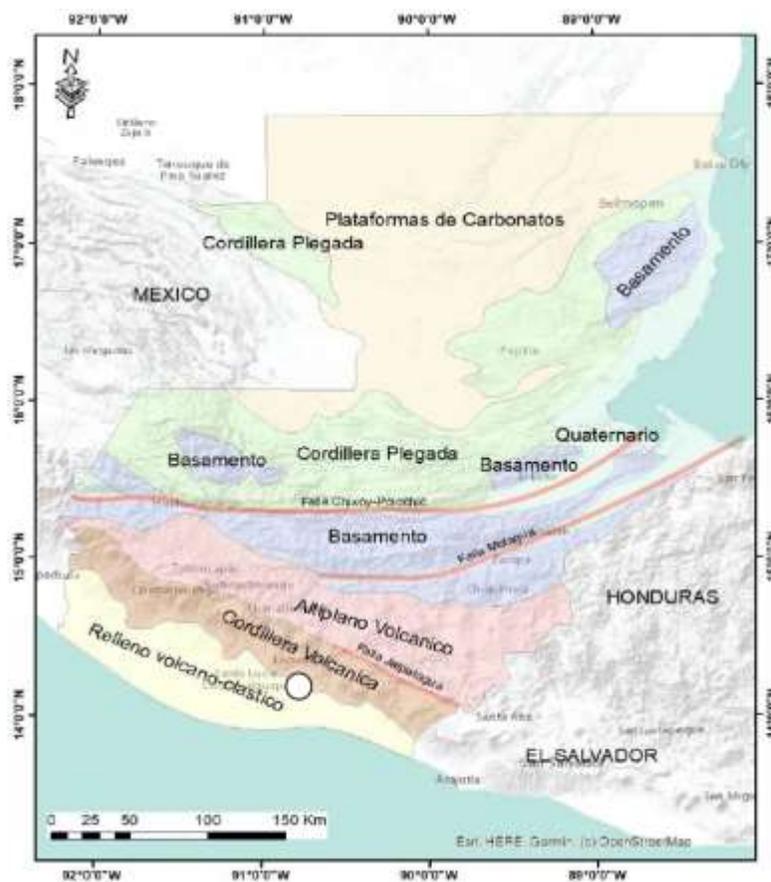
Por tanto, para el departamento de Petén y la zona norte donde se encuentra el campo petrolífero, los sedimentos del Terciario Tardío incluyen primordialmente rocas carbonáticas y clásticas, y como dato interesante e importante para acotar su origen, es que representan una transgresión marina sobre la mayor parte del Bloque Maya, cuyas formaciones son plenamente identificadas por los basamentos y cordilleras plegadas de la misma Figura 11.

Esta transgresión marina antes citada consiste en que los sedimentos de aguas marinas profundas descansan sobre los sedimentos característicos de aguas someras, esto como resultado de algún cambio brusco en las

características geológicas regionales como causa de eventos de gran magnitud. Dado lo anteriormente descrito, la región del Campo Petrolero Xan se caracteriza por presentar materiales finos y arcillosos, valores que serán definidos a través de los ensayos de laboratorio de suelos propuestos en la sección 4.2 de este capítulo.

Figura 11.

Mapa fisiográfico de Guatemala



Nota. Mapa fisiográfico de la zona norte de Guatemala, con plataformas de carbonatos. Obtenido de E. Marroquín (2021). *Caracterización de las unidades geológicas y parámetros geotécnicos para las cimentaciones especiales en la Avenida del Ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, Ciudad de Guatemala* [mapa]. (p. 14) USAC, Guatemala.

4.7 Reconocimientos geológicos y geotécnicos de campo

En la zona de la plataforma terrestre de perforación, las condiciones del terreno denotan zonas de humedales que oportunamente tuvieron niveles de agua considerables, pero que con el transcurso del tiempo fueron descendiendo los niveles de este. La topografía plana de la zona permite aún identificar estos vestigios de la presencia de niveles considerables. Estos cuerpos de agua permitieron la consolidación de suelos sedimentarios y capas de materia vegetal fósil, cuya procedencia es de los árboles que alguna vez poblaron la zona.

No se identifican indicios de falla u otras anomalías geotécnicas en el área, dado que el subsuelo y la topografía son similares en la mayor parte del Campo Petrolero Xan. La característica más relevante, es que es una zona inundable con poco o nula pendiente, reduciendo las probabilidades de corrimientos o movimientos geotécnicos considerables, como el caso contrario de zonas montañosas o con flujos de agua subterráneos que permitan esta condición de traslación de masas.

4.8 Otras investigaciones realizadas en el Campo Petrolero

A la fecha no se han realizado investigaciones similares en el campo Petrolero. Las investigaciones realizadas han sido a nivel geológico del subsuelo y para efectos de determinación y caracterización del yacimiento petrolero.

5 INVESTIGACIÓN DE CAMPO

5.1 Proceso de muestreo

Se procede a realizar el proceso de muestreo de acuerdo con los lineamientos presentados en el capítulo 4 de la presente investigación, siguiendo los procedimientos que se describen a continuación.

5.1.1. Extracción de muestras

Este proceso es uno de los más importantes y que requieren de una preparación previa a efectos de contrarrestar daños, y cumplir el objetivo al no alterar la condición del material. Para ello, se preparan los siguientes elementos antes de proceder al corte y extracción de las muestras:

- Bandeja metálica de 2 pies de ancho y 3 pies de largo.
- Parafina en bloque
- Tela de algodón
- Caja cúbica de madera de 0.60 metros por lado, dejando la parte superior sin ajustar, para permitir la introducción de la muestra.

Para efectos investigativos y de resultados de este documento, se elige el muestreo inalterado en bloque, del cual se describe su procedimiento y recomendaciones para su correcta extracción del estrato en investigación:

Excavación de calicata: este proceso es el habitual para cualquier muestreo de material, y consiste en la excavación de un pozo de

aproximadamente 0.70 m de ancho, 0.70 m de largo y la profundidad de interés a investigar. En el caso de esta investigación, se elige la profundidad de 1.25 m del nivel de referencia de la plataforma terrestre de perforación, para obtener una pared libre de la calicata que coincida con la proximidad donde la Subestructura de la torre de perforación ha transmitido sus cargas. La muestra se toma a 0.85 m del nivel de referencia antes citado.

Tallado del cubo de material: a la profundidad elegida en referencia a la plataforma, se talla en la cara expuesta de la calicata, un cubo de material con las dimensiones suficientes para obtener la mayor cantidad de material para procesar acorde a los ensayos a elegir. Para tal efecto, se procede a tallar un cubo de 0.45 m por lado, de manera que se pueda obtener un volumen aproximado de 0.1 m³ de material.

Sellado de muestra: una vez tallado el cubo en los laterales y parte superior de la muestra, se procede a preparar parafina en trozos regulares dentro de una bandeja metálica, y se coloca sobre una fuente de calor en una zona aislada del pozo petrolero. Una vez que esté fluida la parafina por el calor inducido, se procede a verter sobre las 5 caras del cubo; la cara inferior del cubo aún permanece en contacto con la matriz del material de la plataforma terrestre de perforación y dentro de la cavidad excavada en la pared de la calicata. Se aplica una primera capa de parafina líquida, y a continuación, se colocan trozos de tela blanca en bandas ligadas con la misma parafina; se ajustan tres capas sobre las caras libres del cubo.

Corte de muestra y extracción de la calicata: con la protección del cubo indicada anteriormente, se procede a realizar el último corte, el cual corresponde a la base del cubo que aún permanece en contacto con la matriz del suelo. En este momento, es recomendable preparar la bandeja metálica

expuesta a fuente de calor, con la parafina en su interior, para acondicionarlo a fase líquida como un proceso anticipado a la etapa que continúa.

El corte de la cara inferior del cubo, se recomienda hacerlo con un excedente por debajo del mismo, el cual podría ser de 5 a 8 cms. adicionales, esto con el objetivo de conservar la matriz del suelo y prevenir pérdidas de humedad natural en la cara expuesta. Una vez realizado el corte, con el apoyo de dos personas que asistan a la maniobra, se levanta el cubo y se coloca sobre un trozo de tela limpio al nivel de la plataforma terrestre de perforación, pero con la cara superior del cubo ya protegida con la parafina, haciendo contacto con el saco.

Corte de excedente en cara inferior: ya realizada la operación anterior, se procede a tallar la parte inferior removiendo los 5 u 8 cms. adicionales de material. Como se ha anticipado la preparación de la tela y la parafina recomendado en el número 4, se realiza el sello de la superficie, procurando adherirlo a las otras caras del cubo, de manera que esta sea asegurada para prevenir desprendimiento de la parafina durante su preparación y transporte de muestras hacia el laboratorio.

Traslado de muestra hacia una zona de resguardo: colocado el último sello de las muestras, se coloca la caja de madera próxima al área donde se realizó el último sello de parafina, y donde la muestra yace sobre la tela limpia. Se toman los extremos de la tela con el apoyo de dos personas y se levanta la muestra lentamente, para luego dentro de la caja de madera, cuidadosamente se introduce la misma dentro de la caja. La tela limpia sirve de apoyo para evitar que las manos de las personas queden atrapadas entre la caja y la muestra, y prevenir daños al sello de parafina.

Traslado de la caja de madera: mientras se realiza la etapa de relevamiento de información de campo, se trasladan las cajas de madera que contienen las muestras selladas hacia una zona de resguardo, alejada de los rayos solares, para prevenir que las altas temperaturas puedan afectar la humedad contenida de las muestras o afectar la parafina por efecto del calor inducido.

5.1.2. Información de campo

Una vez completo el proceso anterior, y principalmente, resguardando las muestras del efecto de los rayos solares, es importante realizar una inspección dentro de la calicata, para realizar análisis preliminares y recabar características importantes que sean considerables para efectos de informes geotécnicos. Se procede a continuación:

5.1.3. Descripción de estratos

Dentro de la calicata, se recopilan y anotan todas las características de los estratos observados en los laterales de las calicatas. En este sentido, es importante anotar en la libreta de campo, toda aquella característica que pueda describir cada uno de los estratos de suelo identificado, por ejemplo, color de la matriz de suelo, tipo de grano y tamaño de partículas identificadas. Es importante utilizar las terminologías del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el cual permite identificar de acuerdo a características físicas predeterminadas en el propio sistema para obtener una clara identificación de los estratos.

A continuación, se integran las tablas con la información recopilada en campo y observadas dentro de las calicatas:

Tabla 4.*Descripción de estratos, muestra Calicata 1*

Estrato	De (m)	A (m)	Tipo	Descripción	Código Muestra
1	0	1.00	Material de Préstamo	Arcilla limosa con grava de cantos de diámetro máximo de 9 cm	<i>“Muestra Calicata 1” a una profundidad de 0.85 m.</i>
2	1.00	1.25	Suelo Natural	Arcilla color café	N.A.

Nota. Descripción de estratos (N.A., “No Aplica”). Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 5.*Descripción de estratos, muestra Calicata 2*

Estrato	De (m)	A (m)	Tipo	Descripción	Código Muestra
1	0	1.00	Material de Préstamo	Arcilla limosa con grava de cantos de diámetro máximo de 10 cm	<i>“Muestra Calicata 1” a una profundidad de 0.85 m.</i>
2	1.00	1.25	Suelo Natural	Arcilla color café	N.A.

Nota. Descripción de estratos (N.A., “No Aplica”). Elaboración propia, realizado con Excel.

5.1.4. Caracterización de muestras

Las muestras identificadas como Muestra Calicata 1 y Muestra Calicata 2, presentan características comunes dado a que ambas proceden de la misma profundidad de excavación y que pertenecen al mismo estrato. El estrato donde fueron recopiladas corresponde a la plataforma terrestre de perforación, la cual fue construida con el mismo material procedente del banco de préstamo de aldea El Naranjo-Frontera.

Estos bancos de préstamos localizados poseen características homogéneas en su origen, se observa que corresponden a materiales sedimentarios de origen calcáreo con muy poca meteorización, por lo que son materiales relativamente jóvenes y con características de alta plasticidad dado los sedimentos que los componen en la matriz del suelo.

Una característica importante, es su alta capacidad de retener humedad, dada la estructura y origen. Durante los procesos constructivos de la plataforma terrestre de perforación durante épocas lluviosas, se observó que el material retiene la humedad que absorben volviéndose inestables y deformables ante la inducción de esfuerzos.

Es por ello, que es necesario analizar sus propiedades físico-mecánicas a través de los ensayos descritos en el Capítulo 4, y que, a continuación, se presentan los resultados correspondientes.

5.1.5. Preparación y transporte de muestras al laboratorio

Una vez concluido el proceso de la descripción de los estratos y su caracterización, es importante concluir el proceso de transporte de las

muestras extraídas, a lo cual se procede a preparar las cajas de madera que contienen las muestras inalteradas que han sido extraídas.

Se coloca sobre la tapadera de madera de la caja, la identificación de las muestras y los datos generales de la investigación a desarrollar para que, cuando sean entregadas en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, pueda generar un correcto registro y resguardo de esta. Es importante agregar también una nota que indique que son objetos frágiles para que el personal pueda trasladarla o manipularla durante el transporte, de manera segura y con las consideraciones del caso.

En los espacios libres entre las paredes de las cajas de madera y las fases del cubo de material, se inserta papel periódico hasta llenar la mayor parte de este espacio, con el objetivo de prevenir que el cubo de material golpee contra las caras interiores de la caja de madera. Esta acción preventiva es importante para el caso en particular, dado que el traslado de las muestras se realizará en el transporte que se programa semanalmente a través de la Bodega General del Campo Xan.

Este transporte deberá trasladar las muestras a través de los 60 kilómetros de camino de terracería que comprende desde Campo Xan hasta la aldea Naranjo-Frontera, cuyas condiciones de transitabilidad son críticas al ser un tramo con poco o nulo mantenimiento de terracería.

Las muestras son trasladadas en este mismo transporte hacia la Ciudad de Guatemala, en la Bodega Central de PERENCO Guatemala Limited ubicados en avenida Hincapié de la zona 13. Una vez hayan arribado a este destino, se trasladarán en vehículo particular hacia el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Ciudad Universitaria, para ser entregadas

a la Sección de Mecánica de Suelos y Asfaltos, en donde se gestiona la orden de trabajo correspondiente.

5.2 Ensayos de laboratorio

Según lo establecido en el Capítulo 4, se determinaron los ensayos de laboratorio que permiten obtener los datos de las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de suelo, mismos datos que permitirán definir los aspectos conclusivos de esta investigación. Se presentan a continuación los resultados de laboratorio realizados:

5.3 Resultados Ensayo Consolidación ASTM D2435-90

Se obtienen los resultados de laboratorio por parte del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, cuyos informes se presentan en el Anexo 1 del presente.

En estos Anexos, cabe destacar dos valores que nos permitirán determinar si existe una consolidación por efecto de la carga aplicada por la torre de perforación durante el proceso, sobre la plataforma terrestre de perforación. Estos valores se integran a continuación para obtener el panorama general del comportamiento del suelo de la plataforma terrestre, en función de las calicatas descritas en el apartado 4.1.3.

Tabla 6.

Consolidación. Tabulación de datos de Calicatas

Calicata	Relación de vacíos (e_0)	Esfuerzo Efectivo (σ'_v, kg/cm²)
1	0.762	0.156
2	0.725	0.159

Nota. La tabla muestra los valores extraídos de los Informes No. 0115 S.S.A. y No. 0120 S.S.A. Elaboración propia, realizado con Excel.

Como se observa en la Tabla 8, los resultados referenciados en los informes No. 0115 S.S.A. y el No. 0120 S.S.A. del Anexo 2 y 3, se confirma que el efecto de la carga inducida por la torre de perforación ha provocado una reducción de la relación de vacíos (e_0) y un incremento del esfuerzo efectivo (σ'_v), confirmando con ello que el suelo de la plataforma terrestre de perforación se consolida por efecto de los esfuerzos inducidos de la torre de perforación.

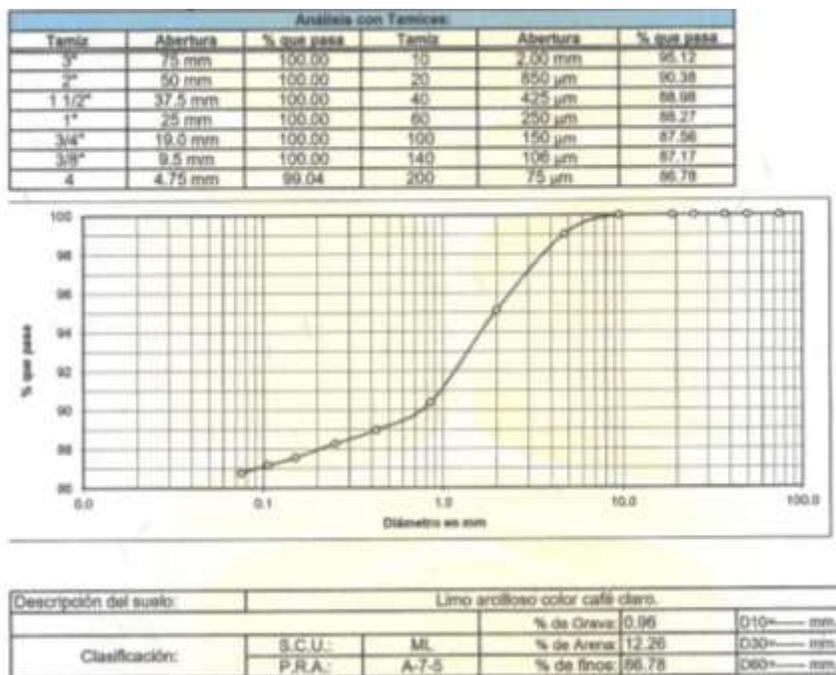
5.4 Resultados ensayo granulométrico ASTM D-6913-04

En referencia a los ensayos granulométricos y sus resultados integrados en los informes No. 0113 S.S.A y el No. 0117 S.S.A., integrados en el Anexo 5 y 6, tanto para la Calicata 1 y la Calicata 2, se confirma que el material de ambas muestras pasa el 100% del tamiz 3" hasta el tamiz 3/8", comenzando a retener un mínimo porcentaje a partir del tamiz No. 4, hasta el tamiz 200, el cual pasa para ambos casos un 88.78 % y un 92.27 %, respectivamente para la Muestra Calicata 1 y Muestra Calicata 2.

Estos resultados son un indicio de que el material de préstamo con el cual se construyó la plataforma terrestre de perforación es un material fino. Esta propiedad física del material propicia la consolidación de los materiales, ya que, en suelos finos, la permeabilidad es considerablemente baja, afectando el flujo de agua en referencia a la velocidad, haciendo más lento el proceso de traslado o flujo de las partículas de agua o gas dentro de la matriz del suelo, a lo cual la disipación del exceso de presión neutra es muy lenta. En consecuencia, el suelo puede continuar deformándose en función del tiempo al continuar aplicando cargas o esfuerzos sobre el mismo. Se presentan a continuación las gráficas del Ensayo Granulométrico ASTM D6913-04 de las Calicatas 1 y 2.

Figura 12.

ASTM D 6913-04 Calicata 1

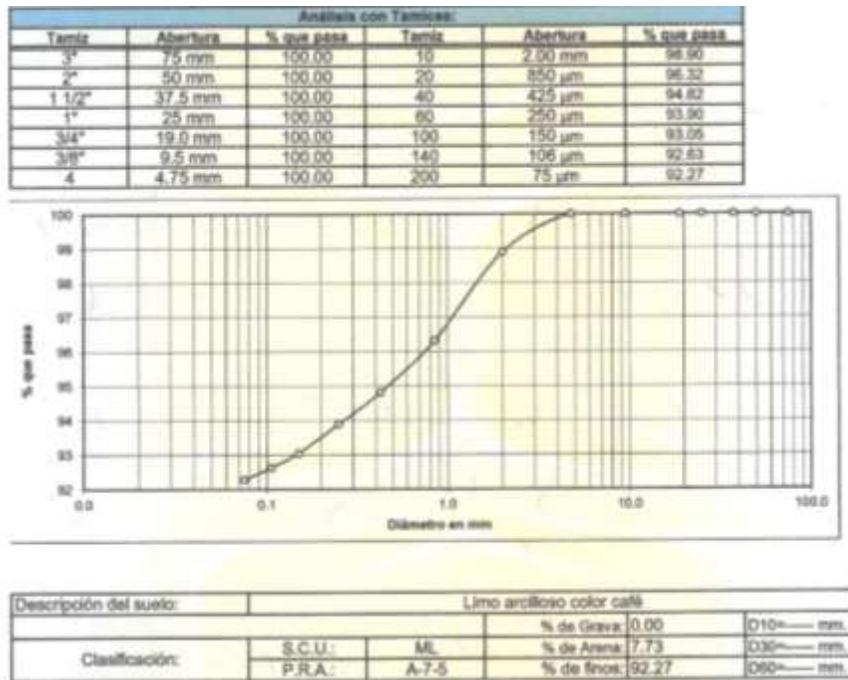


Nota. Extracto de Informe No. 0113. S.S.A. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería. (2020). *Resultados ensayo granulometría Calicata 1.* (No. 19184) USAC.

Como indica en el extracto del informe presentado en la figura anterior, el porcentaje de finos asciende a un total de 86.78 %, confirmando que la consolidación de estos materiales está directamente relacionada con las características finas del material.

Figura 13.

ASTM D 6913-04 Calicata 2.



Nota. Extracto del Informe No. 0117. S.S.A. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2020). *Resultados de ensayo granulometría Calicata 2.* (No. 19189) USAC.

Como se observa en el extracto del informe presentado en la figura anterior, el porcentaje de finos asciende a un total de 92.27 %, confirmando que la consolidación de estos materiales está directamente relacionada con las características finas del material.

5.5 Resultados límites de Atterberg AASTHO T-89 y T-90

En el Anexo 7 y 8, se integran los resultados de laboratorio para determinar los límites de Atterberg para ambas muestras, determinando las características del material en estudio. De acuerdo con los resultados obtenidos, el suelo de ambas muestras presenta un Índice Plástico (I.P.) de 12 % para la Muestra de la Calicata 1 y un Índice Plástico (I.P.) de 11.7 % para la Muestra de la Calicata 2, confirmando que los materiales son arcillosos.

Esta condición de plasticidad en el suelo no permite una correcta permeabilidad de las partículas de agua o gas, para que puedan eventualmente trasladarse en el menor tiempo posible, generando una baja velocidad del flujo y, por ende, un proceso lento de disipación del exceso de presión neutra.

Dado lo anterior, la consecuencia de ello es que el suelo puede continuar en un proceso de deformación por un periodo indefinido, media vez sea sometido a esfuerzos o cargas. El proceso de consolidación es aplicable para todos los suelos, pero es de suma importancia analizarlo en aquellos suelos con baja permeabilidad.

Otro fenómeno importante posterior a la disipación de las presiones intersticiales de suelos arcillosos es la continua deformación o compresión del material, como un efecto del reajuste en la misma estructura. Este fenómeno se denomina Consolidación Secundaria, y está sujeto a las propiedades elastoplásticas y del comportamiento viscoso del material, tal como el caso de los materiales muy plásticos u orgánicos, cuya contribución a la compresión final es relevante y no debe despreciarse.

5.6 Análisis estratigráfico del suelo en puntos de muestreo

Referente a la conformación de los estratos, y dado que la plataforma terrestre de perforación tiene un espesor máximo de 1.20 m, se determinó que los ensayos de laboratorio se realizarían solamente para esta capa de material, dado que, de acuerdo con las políticas ambientales, no se permite realizar excavaciones más profundas, a excepción de los pozos petroleros y los antepozos. Por ello, las plataformas petroleras son sustentadas sobre la cara limpia del terreno natural, sin requerir remover material de corte para soportar.

Se analiza el suelo natural y dado que las condiciones de ensayos de laboratorio para consolidación unidimensional requieren de un punto de referencia para determinar la consolidación de la capa superior, se replicaría esta condición con la capa de arcillas que constituyen la superficie del terreno natural.

Otro aspecto que determinó que la investigación se enfocara en el material de préstamo que constituye la plataforma terrestre de perforación, fue determinar que el suelo natural, al ser altamente plástico, presentará, en definitiva, altos valores de consolidación, por lo que será un factor que no se determinará para las respectivas conclusiones.

5.7 Análisis de los datos obtenidos

En referencia a los resultados de Consolidación ASTM D 2435-90 presentados en la Tabla 8 del presente capítulo, la reducción de la relación de vacíos (e_0) y un incremento del esfuerzo efectivo (σ'_v), para las dos muestras de material provenientes de la misma capa de relleno con material de

préstamo, confirma que los esfuerzos descritos en la sección 3.7 del presente trabajo de investigación y que son inducidos por todas las maniobras de la torre de perforación, confirma con ello que el suelo de la plataforma terrestre de perforación se consolida.

Otro dato importante que aporta información valiosa es el hecho de que los resultados de laboratorio y la caracterización de la granulometría, la cual para ambas muestras es muy similar y por ende, comparable en su influencia sobre el efecto de consolidación del suelo. Un suelo, al ser más fino, permite baja permeabilidad y reducción de la velocidad del flujo de las partículas de agua o gas, y finalmente, la disipación del exceso de presión neutra es proporcional a la velocidad de permeabilidad.

5.8 Cálculo de asentamientos

El proceso de consolidación de suelos es universal para todos los suelos, pero es importante analizarlo y determinarlo para los suelos clasificados por su baja permeabilidad, como lo son los arcillosos. Es importante predecir el asentamiento total de la estructura.

Por tanto, en esta sección se estimará en base a la metodología de cálculo de Casagrande, y considerando la condición del material de la plataforma terrestre que fue analizada con los resultados de laboratorio, clasificando al mismo como una arcilla. Es importante establecer que el asentamiento por consolidación a calcular está basado en el hecho de que la torre de perforación actúa con esfuerzos sobre la misma, y su respectiva subestructura actúa como una cimentación.

Con base en lo anteriormente establecido, se inician las estimaciones de los valores a calcular, sobre la muestra de material de la Calicata 2, muestra que fue sometida a los esfuerzos trasladados por la subestructura y de la cual presentó una reducción de relación de vacíos (e_0) y un incremento del esfuerzo efectivo (σ'_v), respecto a los resultados de la muestra de la Calicata 1. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

Es importante identificar los valores a utilizar para efectos de cálculo, los cuales son: $\gamma = 1.87 \text{ g/cm}^3$ ($1,870 \text{ kg/m}^3$), $e_0 = 0.725$ (adimensional), $C_s = 0.0241$ (adimensional) y $C_c = 0.168$ (adimensional). Con estos valores identificados, se debe entonces calcular el asentamiento por consolidación con ecuación:

$$S_c = \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_v + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_v}$$

Tabla 7.

Resultados ensayos de consolidación Calicata 2

Parámetro	Resultados
Gravedad Específica	2.55
Humedad (%)	27.1
γ (g/cm^3)	1.87
γ_d (g/cm^3)	1.48
σ'_v (kg/cm^2)	0.159
e_0	0.725
σ'_p (kg/cm^2)	0.90
C_s	0.0241
C_c	0.168

Nota. Extracto del Informe No. 0120. S.S.A. de la Muestra Número 2 (Calicata 2) plasmado en Excel. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2020). *Resultados de ensayo de consolidación unidimensional de los suelos, Calicata 2.* (No. 19192). Ingeniería, USAC.

En la fórmula de cálculo del asentamiento por consolidación, se identifican valores que se pueden establecer, como lo es el espesor de la capa de la arcilla (HC), pero el incremento promedio de la presión sobre el estrato de suelo arcilloso causada por efecto de la cimentación ($\Delta\sigma'_v$) debe ser estimada con base en la ecuación:

$$\Delta\sigma'_v = \frac{1}{6}(\Delta\sigma'_{vt} + 4\Delta\sigma'_{vm} + \Delta\sigma'_{vb})$$

De acuerdo con B. Das, (2015) el incremento de presión $\Delta\sigma'_v$ sobre el estrato de material con características plásticas plenamente identificadas, no es constante en función de la profundidad a la cual se haga el respectivo análisis, estos valores podrán decrecer con el incremento de la profundidad medida desde el fondo de la cimentación, por tanto, la ecuación anterior permite encontrar ese valor de incremento de presión de una partícula de suelo bajo un esquema de presión transmitida a través de una cimentación con dimensiones dadas.

En la ecuación anterior, se identifican las variables de acuerdo con las siguientes descripciones:

$\Delta\sigma'_v$ = incremento de presión arriba del estrato de arcilla causado por la transmisión de cargas de la torre de perforación a través de la subestructura.

$\Delta\sigma'_{vm}$ = incremento de presión en medio del estrato de arcilla causado por la transmisión de cargas de la torre de perforación a través de la subestructura.

$\Delta\sigma'_{vb}$ = incremento de presión en el fondo del estrato de arcilla causado por la transmisión de cargas de la torre de perforación a través de la subestructura.

Para estimar los valores requeridos en la ecuación, se deben considerar las dimensiones de la base de la subestructura para determinar los valores m_1 y n_1 , y a su vez, estos valores determinan la variación de I_c ; dichos valores deben ser consultados en la tabla 4.3, página 227 de la bibliografía Principios de Ingeniería de Cimentaciones (Das, 2001):

Tabla 8.

Variación de I_c con m_1 y n_1

		m_1									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n_1											
0.20		0.994	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997
0.40		0.960	0.976	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977
0.60		0.892	0.932	0.936	0.936	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937
0.80		0.800	0.870	0.878	0.880	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881
1.00		0.701	0.800	0.814	0.817	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818
1.40		0.522	0.658	0.685	0.692	0.694	0.695	0.695	0.696	0.696	0.696
1.60		0.449	0.593	0.627	0.636	0.639	0.640	0.641	0.641	0.641	0.641
1.80		0.388	0.534	0.573	0.585	0.590	0.591	0.592	0.592	0.593	0.593
2.00		0.336	0.481	0.525	0.540	0.545	0.547	0.548	0.549	0.549	0.549

Nota. Valores n_1 y m_1 para cálculo. Elaboración propia con datos obtenidos de: B. Das (2001). *Extracto de Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. (pág. 227). Editorial CENGAGE Learning. Realizado con Excel.

Los valores de m_1 y n_1 se estiman en función de los valores geométricos de la cimentación, con las siguientes ecuaciones:

$$m_1 = \frac{L}{B}$$

$$n_1 = \frac{z}{\left(\frac{B}{2}\right)}$$

Por tanto, y considerando las dimensiones de la base de la Subestructura presentada en la Figura 8 del capítulo 3, como $B = 6.0$ metros y $L = 6.0$ metros, y una profundidad de capa de material de $z = 0.85$ metros, se estiman los valores:

$$m_1 = 1$$

$$n_1 = 0.28$$

Estos valores se consultan en la Tabla 10, antes citada, obteniendo un valor promedio de I_C de 0.977; dado que los valores de referencia para n_1 están para 0.20 y 0.40, por lo que se estima para m_1 un promedio de los valores indicados, entre 0.994 y 0.960.

Con el factor definido, se debe estimar el esfuerzo actuante sobre la capa de suelo en análisis, y para ello, se determina el valor q_0 , el cual es el esfuerzo que genera la torre de perforación y que transmite hacia el suelo sobre el cual está cimentado. En la Tabla 4 del Capítulo 3, se estima el peso total del equipo y con el área conocida de 36 m^2 de la base de la subestructura, se estima un esfuerzo q_0 de acuerdo con la ecuación:

$$q_0 = \frac{F}{A}$$

$$q_0 = \frac{1059300}{36}$$

$$q_0 = 29,425 \text{ Kg/m}^2$$

Con este valor estimado, se calcula el incremento promedio de la presión sobre el estrato de suelo arcilloso causada por efecto de la subestructura ($\Delta\sigma'_{vt}$) de acuerdo con la ecuación:

$$\Delta\sigma'_{vt} = q_0 I_c$$

$$\Delta\sigma'_{vt} = (0.997)(29,425)$$

$$\Delta\sigma'_{vt} = 28,748.23 \text{ Kg/m}^2$$

Para estimar la variación de los esfuerzos sobre la capa, se utiliza la ecuación:

$$\Delta\sigma'_v = \frac{1}{6}(\Delta\sigma'_{vt} + 4\Delta\sigma'_{vm} + \Delta\sigma'_{vb})$$

Donde los valores $\Delta\sigma'_{vm}$ y $\Delta\sigma'_{vb}$ son considerados iguales a cero para el caso en análisis, dado que no existen capas de material adicionales por encima de la capa de la plataforma terrestre de perforación que estén generando esfuerzos. Por tanto, se calcula como se indica a continuación:

$$\Delta\sigma'_v = \frac{1}{6}(28,748.23)$$

$$\Delta\sigma'_v = 4,791.37 \text{ Kg/m}^2$$

Por último, se debe estimar el valor σ'_{vf} , la cual es la Presión Final Actuante sobre el estrato en análisis de acuerdo con la ecuación:

$$\sigma'_{vf} = \sigma'_v + \Delta\sigma'_v$$

El valor σ'_v se toma de los resultados de laboratorio de la Tabla 9 presentada anteriormente.

$$\sigma'_v = 1,590 + 4791.37$$

$$\sigma'_v = 6,381.37 \text{ Kg/m}^2$$

Para hacer uso de la ecuación que permite calcular el Asentamiento por Consolidación (S_c), se debe cumplir con la premisa de las arcillas preconsolidadas que cumpla con la condición:

$$\sigma'_{vf} < \sigma'_p$$

Donde σ'_p se toma de los resultados de laboratorio de la Tabla 9 presentada anteriormente, resultando así:

$$6,381.37 \text{ Kg/m}^2 < 9,000 \text{ Kg/m}^2$$

Cumpliendo con la condición antes descrita, se procede a calcular el valor de Asentamiento por Consolidación (S_c) con la ecuación ya citada anteriormente:

$$S_c = \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_v + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_v}$$

$$S_c = \frac{(0.0241)(0.85)}{1 + 0.725} \log \frac{1,590 + 4,791.37}{1,590}$$

$$S_c = 0.00716 \text{ metros}$$

$$S_c = 7.16 \text{ milímetros}$$

La estructura de la torre de perforación de pozos petroleros y los esfuerzos inducidos por las maniobras y peso propio del equipo, presentan un asentamiento por consolidación del material de la plataforma terrestre de perforación de 7.16 milímetros, en referencia a la subestructura de este.

CONCLUSIONES

1. El material de préstamo utilizado para la construcción de plataformas es de origen arcilloso, al obtener Índices Plásticos (I.P.) de 12 % y 11.7 %, respectivamente. Esta condición hará que el suelo continúe deformándose a lo largo del tiempo bajo la aplicación de cargas.
2. El material, al estar sometido a cargas exteriores, presentará una reducción significativa de la Relación de Vacíos (e_0) y un incremento en el Esfuerzo Efectivo (σ'_v), siendo estos valores referenciales para determinar que el suelo se ha consolidado por efectos de las cargas inducidas.
3. Se obtuvo una reducción del 0.052 % de la Relación de Vacíos (e_0) y un incremento del 0.02 % del Esfuerzo Efectivo (σ'_v), confirmando que el material presenta una reestructuración de sus partículas permitiendo deformaciones volumétricas.
4. Se estimó un asentamiento por Consolidación (S_c) de 7.16 milímetros del suelo subyacente a la torre de perforación, dado que presenta una retención mayor de agua dentro de sus poros, condición que permite una consolidación continua a lo largo del tiempo.
5. El asentamiento por consolidación estimado no es significativo para la integridad del equipo de perforación de pozos petroleros, dado el tipo de estructura móvil y que cuenta con mecanismos de ajuste de la verticalidad.

RECOMENDACIONES

1. Las plataformas terrestres de perforación para pozos petroleros pueden ser construidas con material de préstamo con altos índices de plasticidad, una vez que el proceso constructivo garantice, las compactaciones y densidades máximas del material, reduciendo la Relación de Vacíos (e_0) y el incremento en el Esfuerzo Efectivo (σ'_v).
2. En el prediseño de la plataforma terrestre de perforación, deberán contemplar drenajes superficiales para el adecuado control de agua de escorrentía a fin de prevenir la saturación del material. Se recomienda realizar un levantamiento topográfico de las zonas aledañas al trazo de la plataforma terrestre de perforación, de manera que pueda identificarse el punto topográfico más bajo y con ello, dirigir hacia este, las aguas de lluvia que puedan saturar los materiales de préstamo. Se recomienda construir cunetas con trazos topográficos y porcentajes de pendientes adecuados que permitan el flujo del agua de escorrentía.
3. Los espesores no deben ser menores a 0.80 metros para prevenir que los esfuerzos inducidos por la Torre de Perforación puedan deformar el suelo nativo, el cual es altamente plástico y deformable.
4. Durante la ejecución del programa de perforación del pozo petrolero, es conveniente realizar inspecciones de la verticalidad de la torre de perforación y la integridad de la subestructura.

REFERENCIAS

- Campos, E. (2008). *Normas Principales de Operación y Mantenimiento de Equipos de Perforación y Workover*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0481_M.pdf
- Crespo, C. (1996). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Editorial LIMUSA. <https://books.google.com.pe/books?id=Db2SQbBHVPQC&lpg=PA4&pg=PA11#v=onepage&q&f=false>
- Das, B. (2001). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. Editorial Thomson Learning.
- Das, B. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Editorial CENGAGE Learning.
- Instituto Geográfico Militar. (1972). *Laguna El Tigre / IGM*. Instituto Geográfico Militar.
- Instituto Geográfico Nacional. (1972). *Atlas Nacional de Guatemala*. Guatemala. Biblioteca Instituto Guatemalteco de Turismo.
- Kraus, R. (1995). *Prospección, Perforación y Producción de Petróleo y Gas Natural*. Editorial Organización Internacional del Trabajo.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2001). *Mapa Fisiográfico-Geomorfológico de la República de Guatemala*.
<https://www.maga.gob.gt/download/fisiografia.pdf>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2009). *Mapa de Cuencas Hidrográficas a Escala 1:50,000, República de Guatemala, Método de Pfafstetter (Primera aproximación)*.
<https://www.maga.gob.gt/download/cuencas-hidro.pdf>

Prizantzin, M. (2007). *Diseño de Plataformas y Evaluación de Fosas para la Disposición de Recortes Provenientes de la Perforación de Pozos Petroleros* [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Rivera, P. (2018). *Resumen Meteorológico 2017, Resultados del Sistema Meteorológico del ICC*. Guatemala: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2023/03/101.pdf>

Rodríguez, J. (2000). *Propiedades Geotécnicas de los Suelos de Madrid*. *Revista de Obra Públicas*, 3,405, 1-20.
<https://www.scribd.com/doc/252116725/Propiedades-geotecnicas-de-los-suelos-de-Madrid>

Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Ingeniería de Suelos Ltda.
[https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/662_19MemExPI_373_Las_Acacias/Documento/pdf/Anexo1_InveRecoBibl/Su%C3%A1rez%20\(1998\).%](https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/662_19MemExPI_373_Las_Acacias/Documento/pdf/Anexo1_InveRecoBibl/Su%C3%A1rez%20(1998).%20)

[20Deslizamientos%20y%20estabilidad%20de%20taludes%20en%20zonas%20tropicales.pdf](#)

Tello, L. (2014). *Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos Mediante Pruebas de Laboratorio para Estimar el Asentamiento Elástico*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3813_C.pdf

Vaides, V. (1984). *Estudios de Indicios de Petróleo durante la Perforación del Pozo*. [Tesis de pregrado, Técnico en Geología, Centro Universitario de Nororiente, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Velásquez, D. (2007). *Guía Práctica para Cálculo de Asentamientos por Consolidación, en Suelos Saturados*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2804_C.pdf

ANEXOS

Anexo 1.

Resultados Calicata 1 ensayo ASTM D-2435



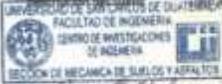
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. 0116. S.S.A. G.T.: 40.264 No. **19188**

Interesado: David Ricardo Palma Villanueva.
 Proyecto: Proyecto de Tesis "Análisis del Proceso de Consolidación de los Materiales de Plataforma Terrestre y el Suelo Natural, Posterior al Proceso de Perforación de Campos Petrolíferos"
 Ubicación: San Andrés Petén.
 Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS Norma: ASTM D-2435
 Fecha: 13 de agosto de 2020. Calicata No.: 1 Profundidad: 0.85 m.

RESULTADOS		
ENSAYO No.	1	
Muestra No.	1	
Profundidad (m)	0.85	
Gravedad Específica	2.57	
Humedad (%)	26.40	
γ (g/cm ³)	1.84	
γ_d (g/cm ³)	1.44	
e'_v (kg/cm ²)	0.156	
e_u	0.762	
σ'_v (kg/cm ²)	1.00	
C_c	-0.014	
C_u	0.167	
C_c (m ² /N)	0.1 (kg/cm ²)	9.05E-08
	0.3 (kg/cm ²)	2.85E-07
	0.7 (kg/cm ²)	7.13E-07
	1.38 (kg/cm ²)	5.70E-07
	1.90 (kg/cm ²)	4.56E-07
	3.50 (kg/cm ²)	4.80E-07
	6.70 (kg/cm ²)	3.04E-07
13.1 (kg/cm ²)	8.29E-07	



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Vo.Bo.:



Ing. Yelma Mariela Cano Morales
DIRECTORA USAC

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Andrés Bello, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono: (018) 2412 y 2416-8121. Fax: (018) 2412 8000 146, 8050 y 8022
Página web: <http://www.usac.edu.gt>

Nota. Informe No. 0116. S.S.A. de la Muestra Calicata 1. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2019). *Resultados de ensayo de consolidación de suelos de calicata 1.* Facultad de Ingeniería. USAC.

Anexo 2.

Curva de Compresibilidad Calicata 1 ASTM D-2435



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



No. 19187

INFORME No. 0115 S.S.A.

D.T.: 40,264

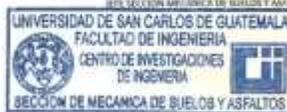
Interesado: David Ricardo Palma Villanueva.
Proyecto: Protocolo de Tesis "Análisis del Proceso de Consolidación de los Materiales de Plataforma Terrestre y el Suelo Natural, Posterior al Proceso de Perforación de Campos Petrolíferos"
Ubicación: San Andrés Petén.
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS
Norma: AASHTO T-216, ASTM D-2435.
Fecha: 19 de agosto de 2020. Calicata No.: 1 Profundidad: 0.85 m.



Descripción del Suelo: Lirio arcilloso color café claro.

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Vo.Bo.:
Inga. Taina Marroja Cano Morales
DIRECTORA CN/USAC



FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Salazar, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Placa 2418-8000 Exts. 86263 y 86262
Página web: <http://oi.usac.edu.gt>

Nota. Informe No. 0115. S.S.A. de la Muestra Calicata 1. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2019). Gráfica de curva de compresibilidad ensayo de consolidación de suelos de calicata 1. Facultad de Ingeniería. USAC.

Anexo 3.

Resultados Calicata 2 ensayo ASTM D-2435



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. 0120 S.S.A.

O.T.: 40,264

No. 19192

Interesado: David Ricardo Palma Villanueva.

Proyecto: Protocolo de Tesis "Análisis del Proceso de Consolidación de los Materiales de Plataforma Terrestre y el Suelo Natural, Posterior al Proceso de Perforación de Campos Petrolíferos"

Ubicación: San Andrés Petén.

Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: 19 de agosto de 2020.

Calicata No.: 2

Profundidad: 0.85 m.

RESULTADOS		
ENSAYO No.	2	
Muestra No.	2	
Profundidad (m)	0.85	
Gravedad Específica	2.55	
Humedad (%)	27.1	
w (g/cm ³)	1.87	
w_d (g/cm ³)	1.48	
σ'_v (kg/cm ²)	0.159	
e_v	0.725	
σ'_p (kg/cm ²)	0.90	
C_c	0.0241	
C_u	0.168	
C_v (m ² /s)	0.1 (kg/cm ²)	9.05E-08
	0.3 (kg/cm ²)	2.85E-07
	0.7 (kg/cm ²)	7.12E-07
	1.10 (kg/cm ²)	5.70E-07
	1.90 (kg/cm ²)	4.56E-07
	3.50 (kg/cm ²)	4.80E-07
	6.70 (kg/cm ²)	3.26E-07
	13.1 (kg/cm ²)	8.29E-07

Descripción del Suelo: Limo arcilloso color café



Vo.Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CI/USAC



FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Beltrán, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121, Planta 2416-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Nota. Informe No. 0120. S.S.A. de la Muestra Calicata 2. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2019). Resultados de ensayo de consolidación de suelos de calicata 1. Facultad de Ingeniería. USAC.

Anexo 4.

Curva de Compresibilidad Calicata 2 ASTM D-2435



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

No. 19191

INFORME No. 0119 S.S.A.

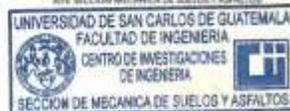
Q.T.: 40,264

Interesado: David Ricardo Palma Villanueva.
Proyecto: Protocolo de Tesis "Análisis del Proceso de Consolidación de los Materiales de Plataforma Terrestre y el Suelo Natural, Posterior al Proceso de Perforación de Campos Petroíferos".
Ubicación: San Andrés Petén.
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS
Norma: AASHTO T-216, ASTM D-2435.
Fecha: 19 de agosto de 2020. **Calicata No.:** 2 **Profundidad:** 0,85 m.



Descripción del suelo: Limo arcilloso color café

Omar E. Méndez M.
Ing. Omar Enrique Méndez Méndez
SITE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS



Ve.Bo.:

Ings. Taima Mariela Cano Infante
DIRECTORA CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Battraens, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-8113 y 2418-8121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Nota. Informe No. 0119. S.S.A. de la Muestra Calicata 2. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2019). Gráfica de curva de compresibilidad ensayo de consolidación de suelos de calicata 2. Facultad de Ingeniería. USAC.

Anexo 5.

Resultados Calicata 1 Ensayo ASTM D6913-04



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



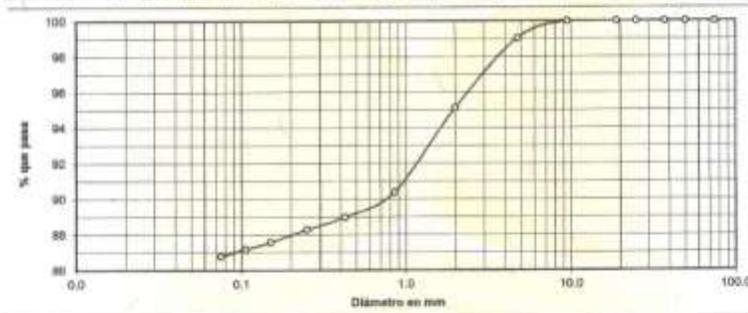
INFORME No. 0113 S.S.A.

O.T. No. 40,264

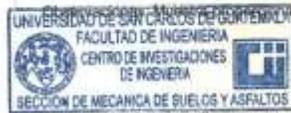
No. 19184

Interesado: David Ricardo Palma Villanueva.
 Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico con tamices sin lavado previo.
 Norma: ASTM D6913-04, AASHTO T-27.
 Proyecto: Protocolo de Tests "Análisis del Proceso de Consolidación de los Materiales de Plataforma Terrestre y el Suelo Natural, Posterior al Proceso de Perforación de Campos Petrolíferos"
 Ubicación: San Andres Petén.
 Fecha: 19 de agosto de 2020. Calicata No.: 1 Profundidad: 0.85 m.

Análisis con Tamices:					
Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100.00	10	2.00 mm	86.12
2"	50 mm	100.00	20	850 µm	90.38
1 1/2"	37.5 mm	100.00	40	425 µm	88.98
1"	25 mm	100.00	60	250 µm	88.27
3/4"	19.0 mm	100.00	100	150 µm	87.96
3/8"	9.5 mm	100.00	140	106 µm	87.17
4	4.75 mm	99.04	200	75 µm	86.78



Descripción del suelo:	Limo arcilloso color café claro.			
Clasificación:	S.C.U.:	ML	% de Grava:	0.96
	P.R.A.:	A-7-5	% de Arena:	12.26
			% de limos:	86.78
			D10	mm.
			D30	mm.
			D60	mm.



Ing. Omar Enrique Melarano Méndez
JEFE SECCION MECANICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Atentamente,

Vo.Bo.



Ing. Taina Marcela Cano Morales
DIRECTORA CIUSAC

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Beltrán, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Ext. 86253 y 86252
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Nota. Informe No. 0113. S.S.A. de la Muestra Calicata 1. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2019). *Gráfica de curva de ensayo granulométrico de material de la calicata 1.* Facultad de Ingeniería. USAC.

Anexo 6.

Resultados Calicata 2 Ensayo ASTM D6913-04



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME No. 0117 S.S.A.

O.T. No. 40,264

No. 19189

Interesado: David Ricardo Palma Villanueva.

Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico con tamices sin lavado previo.

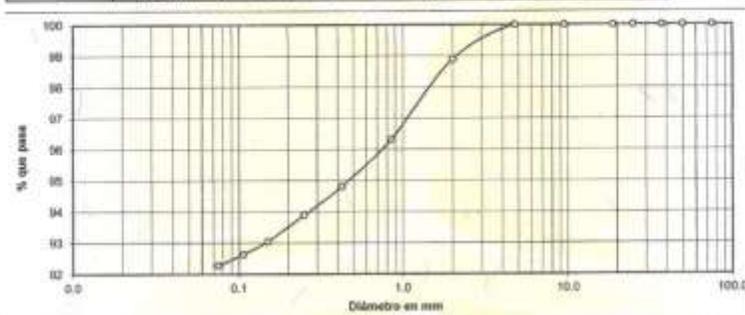
Norma: ASTM D6913-04, AASHTO T-27,

Proyecto: Protocolo de Tesis "Análisis del Proceso de Consolidación de los Materiales de Plataforma Terrestre y el Suelo Natural, Posterior al Proceso de Perforación de Campos Petrolíferos"

Ubicación: San Andres Petón.

Fecha: 19 de agosto de 2020. Calicata No.: 2 Profundidad: 0.85 m.

Análisis con Tamices:					
Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100.00	10	2.00 mm	95.90
2"	50 mm	100.00	20	850 µm	96.32
1 1/2"	37.5 mm	100.00	40	425 µm	94.82
1"	25 mm	100.00	60	250 µm	93.90
3/4"	19.0 mm	100.00	100	150 µm	93.05
3/8"	9.5 mm	100.00	140	106 µm	92.63
4	4.75 mm	100.00	200	75 µm	92.27



Descripción del suelo:	Limo arcilloso color café				
Clasificación:	S.C.U.:	ML	% de Grava:	0.00	D10= mm.
	P.R.A.:	A-7-5	% de Arena:	7.73	D30= mm.
			% de finos:	92.27	D60= mm.



Ing. Omar Enrique Mediano Mendez
JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Atentamente,

Vo.Bo.



Ing. Telma Mariela Cano Morales
DIRECTORA CIUSAC

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Ballarona, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-0110 y 2418-9121, Planta 2418-8000 Ext. 86253 y 86252
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Nota. Informe No. 0117. S.S.A. de la Muestra Calicata 2. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2019). Gráfica de curva de ensayo granulométrico de material de la calicata 2. Facultad de Ingeniería. USAC.

Anexo 7.

Resultados Calicata 1 Ensayo AASHTO T-89 y T-90



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

No. 19185

INFORME No. 0114 S.S.A.

O.T.: 40,204

Interesado: David Ricardo Palma Villaseva.

Proyecto: Protocolo de Tesis "Análisis del Proceso de Consolidación de los Materiales de Plataforma Terrestre y el Suelo Natural, Posterior al Proceso de Perforación de Campos Petrolíferos"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: San Andrés Petén.

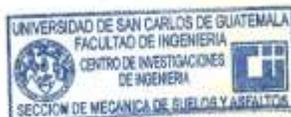
FECHA: 19 de agosto de 2020.

RESULTADOS:					
MUESTRA No.	Calicata No.:	L.L. (%)	L.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1, profundidad 0.85 m.	44.7	12.0	ML	Limo arcilloso color café claro.

(*) CLASIFICACION SEGUN CARTA DE PLASTICIDAD

(*) CLASIFICACION SEGUN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.



Ing. César Enrique Medrano Méndez
JEFE SECCION MECANICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Atentamente,

Vo.Bo.

Ing. Teima Mariana Cano Morales
DIRECTORA CIUSAC



FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Beltrán, Ciudad Universitaria zona 12.
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Ext. 86253 y 86252
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Nota. Informe No. 0114. S.S.A. de la Muestra Calicata 1. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2019). *Resultados de ensayo Límites de Atterberg de material de la calicata 1.* Facultad de Ingeniería. USAC.

Anexo 8.

Resultados Calicata 2 AASHTO T-89 y T-90



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

No. 19190

INFORME No. 0118 S.S.A.

O.T.: 40,264

Interesado: David Ricardo Palma Villaseva.

Proyecto: Protocolo de Tesis "Análisis del Proceso de Consolidación de los Materiales de Plataforma Terrestre y el Suelo Natural, Posterior al Proceso de Perforación de Campos Petrolíferos"

Asunto: ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: San Andrés Petén.

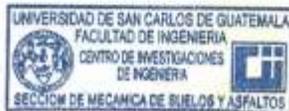
FECHA: 19 de agosto de 2020.

RESULTADOS:					
MUESTRA No.	Calicata No.:	L.L. (%)	L.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
2	2, profundidad 0.85 m.	44.8	11.7	ML	Limo arcilloso color café

(*) CLASIFICACION SEGUN CARTA DE PLASTICIDAD

(*) CLASIFICACION SEGUN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.



Ing. César Enrique Méndez Méndez
JEFE SECCION MECANICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Atentamente,

Vo.Bo.

Ing. Tetina Marcela Cano Morales
DIRECTORA USAC



FACULTAD DE INGENIERIA - USAC
Edificio Emilio Beltrán, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono dentro 2418-0115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Ext. 86253 y 86252
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Nota. Informe No. 0118. S.S.A. de la Muestra Calicata 2. Obtenido del Centro de Investigación de Ingeniería (2019). *Resultados de ensayo Límites de Atterberg de material de la calicata 2.* Facultad de Ingeniería. USAC.