



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE OAXACA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

TESIS

COMPARATIVA DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR CON DIFERENTES EQUIPOS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CONSTRUCCIÓN

PRESENTA:

Rene García Sagal

DIRIGIDA POR:

M.I. Cuauhtémoc Rafael Hernández Sibaja

COMITÉ REVISOR:

M.C. Luis Alberto Martínez Santiago

M.C. Silvia Olivia Ramírez Martínez



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Oaxaca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Oaxaca de Juárez, Oax., 07/noviembre/2024

ASUNTO: Acuerdo para impresión.

DR. MARCO ANTONIO SÁNCHEZ MEDINA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E

Por medio de la presente, los integrantes del Comité Tutorial de la tesis titulada "COMPARATIVA DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR CON DIFERENTES EQUIPOS" presentada por el C. **RENÉ GARCÍA SAGAL** con No. de control M22161597, hacemos constar que el estudiante ha atendido todas las recomendaciones emitidas por este comité. Así mismo, confirmamos que la tesis cumple con los requisitos establecidos tanto en contenido como en presentación. En virtud de ello, emitimos el dictamen de

A P R O B A D A

Solicitamos, por lo tanto, la emisión de los oficios de autorización de impresión de la tesis con el fin de que el estudiante pueda proceder con los trámites necesarios para la obtención de grado.

A T E N T A M E N T E

El Comité Tutorial:

Nombre completo

Designación

Firma

M.I. CUAUHTÉMOC RAFAEL HERNÁNDEZ SIBAJA

Director de Tesis

M.C. LUIS ALBERTO MARTÍNEZ SANTIAGO

Asesor

M.C. SILVIA OLIVIA RAMÍREZ MARTÍNEZ

Asesor





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



Instituto Tecnológico de Oaxaca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Oaxaca de Juárez, Oax., 08/11/2024

OFICIO: DEPI/761/2024

ASUNTO: Autorización de impresión de tesis

C. RENÉ GARCÍA SAGAL
ESTUDIANTE DEL PROGRAMA DE
MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN
PRESENTE.

De acuerdo con las disposiciones para la Operación de Estudios de Posgrado e Investigación del Tecnológico Nacional de México, dependiente de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo con respecto a su Tesis para obtener el grado de Maestro en Construcción, cuyo título es: "COMPARATIVA DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR CON DIFERENTES EQUIPOS".

Los abajo firmantes de la Comisión Revisora le concedemos la Autorización para que proceda a la Impresión de la misma.

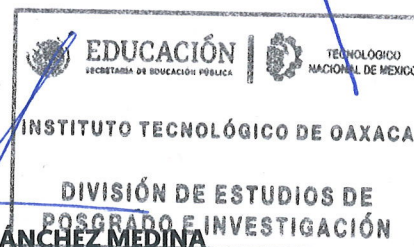
ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Tecnología Propia e Independencia Económica"

M.I. CUAUHTÉMOC RAFAEL HERNÁNDEZ SIBAJA
DIRECTOR

M.C. LUIS ALBERTO MARTÍNEZ SANTIAGO
ASESOR

M.C. SILVIA OLIVIA RAMÍREZ MARTÍNEZ
ASESOR



Vo.Bo.
DR. MARCO ANTONJO SÁNCHEZ MEDINA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Av. Ing. Víctor Bravo Ahuja No. 125 Esquina Calzada Tecnológico, C.P. 68030.
E-mail: posgrado@itoaxaca.mx www.oaxaca.tecnm.mx





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



Instituto Tecnológico de Oaxaca
Dirección

Oaxaca de Juárez, Oax., 08/noviembre/2024

Oficio No. DEPI/MC-762/2024

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

ING. HUITZILÍ DÍAZ JAIMES
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ESCOLARES.
PRESENTE

Por este medio, comunico a usted que de acuerdo con las disposiciones establecidas en los Lineamientos para la operación de estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México, dependiente de la Secretaría de Educación Pública, el C. RENÉ GARCÍA SAGAL con número de control M22161597, ha cumplido con todas las recomendaciones que el Comité Revisor hizo respecto a su tesis cuyo título es "COMPARATIVA DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR CON DIFERENTES EQUIPOS", para obtener el grado de Maestro en Construcción

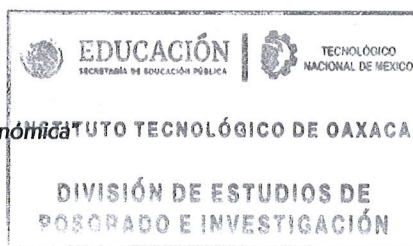
Por lo anterior, la División a mi cargo le concede la autorización para que proceda el trámite correspondiente y la impresión de la misma.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Tecnología Propia e Independencia Económica"

DR. MARCO ANTONIO SÁNCHEZ MEDINA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



LICENCIA DE USO OTORGADA POR René García Sagal, de nacionalidad **mexicana** mayor de edad, con domicilio ubicado en c. Reforma 18 B Col. Real del Puente, Xochitepec Mor. en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **Comparativa de la Prueba de Penetración Estándar con Diferentes Equipos** en adelante **“LA OBRA”** quien para todos los fines del presente documento se denominará **“EL AUTOR Y/O EL TITULAR”**, a favor del Instituto Tecnológico de Oaxaca del Tecnológico Nacional de México, la cual se registrá por las cláusulas siguientes:

PRIMERA – OBJETO: **“EL AUTOR Y/O TITULAR”**, mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de Oaxaca del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **“LA OBRA”**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://repositorionacionalcti.mx>).

SEGUNDA - TERRITORIO: La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

TERCERA - ALCANCE: La presente licencia contempla la autorización para formato uso de **“LA OBRA”** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse. En medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar, conocido o por conocerse.

CUARTA – EXCLUSIVIDAD: La presente licencia de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico de Oaxaca; por lo tanto, **“EL AUTOR Y/O TITULAR”** conserva los derechos patrimoniales y morales de **“LA OBRA”**, objeto del presente documento.

QUINTA – CRÉDITOS: El Instituto de Oaxaca y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **“AUTOR Y/O TITULAR”** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **“LA OBRA”**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

SEXTA – AUTORÍA: **“EL AUTOR Y/O TITULAR”** manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **“LA OBRA”** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable.

Dado en la Ciudad de Oaxaca, Oaxaca, a los XX días del mes de 21 de noviembre de 2024.

“EL AUTOR Y/O TITULAR”

“EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE OAXACA”

ING. RENE GARCIA SAGAL
SSC/RDC/MASM/SORM

M.C. SILVIA SANTIAGO CRUZ



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE OAXACA
DIRECCIÓN



Agradecimiento.

A todos y cada uno de mis maestros de la Maestría en construcción, del instituto tecnológico de Oaxaca, por sus enseñanzas, y un reconocimiento especial, al Maestro Cuauhtémoc Rafael Hernández Sibaja, al Maestro Luis Alberto Martínez Santiago, a la Maestra Silvia Olivia Ramírez Martínez, gracias.

Reconocimiento.

A mi esposa, Mercedes Rosalía, a mis hijos Rene y Karen, Ernesto y Verónica, a mis nietos, Carlos, Renata, Mauro. Al gran apoyo de mis hermanas, Guadalupe, Marcela, y Laura. Con un especial recuerdo a mis seres queridos, que partieron, Paco, Martin, Yesica, Paty. Es para ustedes.

A los pilares de este proyecto, Álvaro y María Elena. Gracias por siempre.

a todos quienes hicieron posible este trabajo.

ÍNDICE

Capítulo 1.- Introducción	3
1.1.- Antecedentes	4
1.2.- Planteamiento del problema	5
1.3.- Justificación	6
1.4.- Objetivo general	7
Capítulo 2.- Marco teórico	8
2.1.- Ingeniería geotecnia	8
2.2.- Origen de los depósitos del suelo, tamaño y forma	11
2.3.- Importancia de las propiedades de los suelos	15
2.4.- Clasificación de suelos.....	22
2.5.- Esfuerzo en una masa de suelo.....	29
2.6.- Exploración del subsuelo	35
2.7.- Cimentaciones poco profundas: Capacidad de carga	40
2.8.- Prueba de penetración estándar (STP)	46
2.9.- Normatividad de la prueba	49

Capítulo 3.- Proyecto. Desarrollo. Propuesta	52
3.1.- Resultados de la prueba	78
Capítulo 4.- Conclusiones y recomendaciones	80
Fuentes de consulta	84
Tablas.....	86

RESUMEN

La prueba de penetración estándar (STP) es una herramienta fundamental en la ingeniería geotécnica, utilizada para evaluar las características del suelo y determinar su capacidad portante. Sin embargo, se analiza una notable variabilidad de los resultados obtenidos, aun cuando las pruebas se realizan en áreas con características regionales muy parecidas. Esta variación no solo plantea dudas sobre la fiabilidad de las mediciones, sino que también puede tener consecuencias significativas en el diseño y la construcción. La heterogeneidad del suelo es, sin duda, uno de los factores más influyentes en el resultado de la (STP), es importante indicar que uno de los resultados que influye significativamente, es la transferencia de energía en los equipos que se utilizan en la prueba. Es por esta razón, que este trabajo, se centra en el análisis de esta transferencia, para comparar resultados y poder obtener datos más apegados al tipo de suelo con equipos diferentes. Así como la importancia de la calibración de los equipos.

ABSTRACT

The Standard Penetration Test (SPT) is a fundamental tool in geotechnical engineering, used to evaluate soil characteristics and determine its bearing capacity. However, a notable variability in the results obtained has been observed, even when tests are conducted in areas with very similar regional characteristics. This variation not only raises concerns about the reliability of the measurements but can also have significant implications for design and construction. Soil heterogeneity is undoubtedly one of the most influential factors affecting SPT results. It is also important to highlight that energy transfer efficiency in the testing equipment significantly impacts the outcomes. For this reason, this presentation focuses on analyzing this energy transfer to compare results and obtain data that better correspond to the soil type when using different equipment. Additionally, it emphasizes the importance of equipment calibration, as it plays a critical role in ensuring accurate energy transfer.

Capítulo 1. Introducción.

A lo largo de la historia, el ser humano ha experimentado un desarrollo notable en diversas áreas, destacando especialmente el crecimiento tecnológico que ha impulsado a la sociedad hacia adelante. Sin embargo, el progreso en el ámbito de la construcción ha estado marcado por grandes altibajos, influenciado tanto por las condiciones naturales como por la capacidad de la humanidad para llevar al límite su entorno. Este fenómeno puede ser analizado desde diferentes perspectivas, comenzando con aspectos fundamentales como la autoconstrucción y abarcando obras que requieren estudios preliminares exhaustivos. Estos estudios son esenciales para maximizar el uso eficiente de los materiales y asegurar la estabilidad de grandes superestructuras.

En la actualidad, a pesar de los avances tecnológicos, se ha desvalorado la importancia de los estudios geotécnicos, lo que ha contribuido a generar problemas significativos en diversas construcciones. En muchos casos, se delegan responsabilidades a personas sin una comprensión adecuada del comportamiento estructural, lo que puede resultar en consecuencias desfavorables. A lo largo de la historia, ha sido testigo de grandes obras construidas sin antecedentes de estudios sobre el suelo, basándose únicamente en enfoques empíricos o en experiencias acumuladas de otros lugares. Aunque algunas de estas obras han perdurado en el tiempo, muchas han sucumbido a los efectos del tiempo y la naturaleza. La historia ofrece un legado impresionante a través de monumentos en civilizaciones como Egipto, China, Grecia y México. Los grandes desafíos enfrentados en la construcción de estas obras han llevado a la necesidad de realizar estudios que se basan en un enfoque científico. Hoy en día, ingenieros e investigadores analizan metódicamente el comportamiento de los suelos dentro del ámbito de la geotecnia. Un punto importante en este campo fue establecido por el Dr. Karl Terzaghi, quien proporcionó las bases técnico-científicas para el estudio de los suelos, elevando el conocimiento a un nivel fundamental para toda construcción y reconociendo estos estudios posteriormente como la plataforma de la geotecnia y esta a su vez como una rama de la ingeniería civil.

Para los propósitos de esta presentación, se busca analizar la importancia de la transferencia de energía en prueba de penetración estándar (STP), como un estudio preliminar trascendental en cualquier proyecto de construcción. Asimismo, se presentarán comparativas que utilicen diferentes equipos, lo que nos permitirá determinar la opción más efectiva en relación con los resultados de la prueba, haciendo énfasis en equipos muy rudimentarios,

hasta los equipos más actuales, y poniendo en contexto los resultados de la energía de transferencia en las pruebas, que es el objetivo principal. De la misma forma, plantear los métodos de exploración para ejecutar los ensayos. Es importante señalar que el estudio geotécnico frecuentemente es ignorado, ya sea por razones económicas o por falta de conocimiento especialmente en el ámbito de la autoconstrucción. Este último aspecto es vital, ya que una adecuada planificación económica y de sustentabilidad puede contribuir a una inversión más efectiva en cualquier obra, asegurando una durabilidad que, con el tiempo, se traducirá en una mejor calidad de vida para las personas. A través de esta prueba, podremos determinar la capacidad portante del suelo, garantizando que cada diseño cumpla con los estándares de seguridad necesarios. Esto es esencial en todos y cada uno de los procesos constructivos, ya que un diseño bien fundamentado no solo asegura la estabilidad de la estructura, sino que también protege la vida y bienestar de sus ocupantes. El problema que se ha vislumbrado es que, en la autoconstrucción, pasa de largo este tema, porque no se contempla en los presupuestos, y tomando muchas omisiones, desde las fundaciones de la estructura; por lo que se plantea, dar conocimiento y divulgación a las construcciones más vulnerables para hacerlas con apego a las normas de cada región.¹

1.1. Antecedentes.

A principios del siglo pasado, constituye la época, que se da un reconocimiento, real a la mecánica de suelos, como un área de investigación dentro de la ingeniería, por parte del Dr. Karl Terzaghi, en base a sus estudios y a su aportación del libro; Mecánica de suelos, donde presenta una nueva filosofía relativa al suelo como material, y dejando asentado, como tratar las propiedades mecánicas de los suelos, bajo diversas cargas y condiciones. Con investigaciones posteriores ayudaron al mejoramiento de muchos métodos existentes, con aspectos técnicos de ciencias como la mecánica y la hidráulica, estableciendo condiciones a los problemas en las cimentaciones, proporcionando conocimientos y herramientas para realizar trabajos más eficientes técnicamente, mediante análisis y pruebas en los materiales que se emplean. Con un conocimiento técnico más pleno, para responder a los desafíos en la aplicación de la mecánica de suelos en las cimentaciones. Posteriormente se incorporó la terminología de ingeniería geotecnia teniendo una apertura, mucho más amplia para las ciencias geológicas y la mecánica de suelos, para efectuar en los estudios, las condiciones

¹ Crespo, (2004), Mecánica, pp.13-14.

del subsuelo, para cuando se diseña estructuras considerables, y esto presentando dos características que se conjugan básicamente, seguridad y economía. ²

A medida que las investigaciones aumentaron, el desarrollo de la mecánica de suelos se fue haciendo evidente, ya que los resultados de pruebas en laboratorios así se vieron, sin embargo, las muestras que se obtenían para su estudio, se analizaron que sus resultados podrían dar conclusiones erróneas, a no ser que las muestras de los terrenos fueran inalteradas, es decir que sus propiedades en toda su complejidad se mantuvieran tal como se extraían. Esto origino una reorganización en su estudio, con la consiguiente necesidad de obtener nuevos métodos de perforación, sondeos y manejo de muestras. También dada la gran variedad de suelos, con los que se trata, su estudio debería ir acompañado de un sistema apropiado de clasificación de los mismos, que llevara por color, olor, textura, así como por su distribución de tamaños y conformación granulométrica, posteriormente a medida que el conocimiento de las propiedades fueron mejor conocidas, se desarrollaron propiedades mecánicas que facilitaron su conocimiento, dando paso a una comprensión de la plasticidad de los suelos finos, y conformándolo como un sistema unificado de suelos. En forma simultánea se analizan las estratigrafías del terreno, para revisar las capas homogéneas que se tuvieran, pero la realidad fue distinta ya que se encontró la heterogeneidad, y con ello modificar criterios aplicados de forma empírica en las construcciones. Ante esta realidad, los estudios posteriores cambiaron el modo de analizar el suelo en pocos años. Desde un punto más racional, la forma de plantear los problemas ha evolucionado, permitiendo realizarse analíticamente todas las pruebas que han presentado. ³

1.2. Planteamiento del problema.

Al abordar el tema de los condicionantes, nos centramos fundamentalmente en las limitantes que este estudio ha identificado. Las variables que condicionan la transferencia de energía son claramente visibles y están directamente relacionadas con la diversidad de equipos utilizados. Por un lado, el uso de equipos rústicos puede impactar significativamente en la eficiencia de la transferencia; por otro, los equipos más mecanizados también pueden enfrentar retos similares si no reciben el mantenimiento adecuado.

² Crespo (2004), Mecánica, pp. 16-17.

³ Juárez (2005), Mecánica, pp. 29-31.

Es de destacar que la antigüedad de los implementos y la falta de un mantenimiento periódico pueden llevar a un aumento en la fricción de sus componentes. Este desgaste se traduce en una disminución notable en los resultados de las pruebas, afectando la eficiencia general del sistema. En el caso de los equipos automatizados, la situación es igualmente importante: un mantenimiento adecuado es esencial para garantizar que estos sistemas operen de manera óptima. La interrelación entre el estado de los equipos y la eficiencia de la transferencia de energía subraya la necesidad de establecer protocolos de mantenimiento preventivo y correctivo que no solo prolonguen la vida útil de los equipos, sino que también mejoren los resultados obtenidos. En este contexto, la propuesta es desarrollar un enfoque integral que contemple la calibración de los equipos, así como la implementación de estrategias de mantenimiento que aseguren una transferencia de energía más efectiva y confiable.⁴

1.3. Justificación.

Dada la complejidad del problema y la variedad de factores que influyen en los resultados de las STP, es fundamental buscar soluciones que permitan mejorar la consistencia y fiabilidad de las mediciones. Una de las propuestas, es mejorar la transferencia de energía a través de la calibración de los equipos, para una mejor obtención de datos, derivado de los golpes con que se realiza la penetración. Ya que se ha observado que los equipos impactan con diferente fuerza, al momento de realizar la prueba, por fricciones en los componentes, ya sea por uso o por un deficiente mantenimiento en el equipo, la energía con que impacta presenta variaciones significativas. Los resultados obtenidos demuestran que un deficiente equipo nos entrega información no confiable y de forma directa afecta las correlaciones que se llevan a cabo. Básicamente este es el punto inicial, para el trabajo de las comparativas de los equipos. La utilidad de la información obtenida permite proponer mejoras en el uso de los equipos, y la tecnología actual nos proporcionara la posibilidad de alternativas mucho más costosas, pero más efectiva es la implementación de equipos de medición, como sensores de energía y dispositivos de monitoreo que proporcionen datos en tiempo real durante las pruebas. Estas herramientas pueden ayudar a estandarizar la ejecución, independientemente de si las pruebas son realizadas de manera manual o mecánica. Además, la calibración regular de los equipos utilizados y la estandarización de los procedimientos son pasos fundamentales para reducir la variabilidad en los resultados. La creación de protocolos claros y específicos para la

⁴ Rojas (2021), <https://www.youtube>.

realización de las pruebas, que incluyan recomendaciones sobre la cantidad de energía a aplicar, podrían también contribuir a una mayor coherencia en los resultados. La variabilidad de equipos de pruebas de penetración estándar, nos lleva a analizar, la forma de que se unifiquen las formas de los equipos, aunque no es una tarea simple, ya que cada región tiene sus propias necesidades, pero se deben sentar las bases para una mejora de resultados, al hacerlo, se podrá reducir la disparidad en los mismos, lo que beneficiará enormemente, proporcionando datos más precisos y fiables para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura.

En observaciones de varias pruebas se ha visto que el problema, incide de inicio con utilizar tablas numéricas de apoyo, para calcular la transferencia de energía, y esto, es un aspecto decisivo en el que se evidencian diferencias significativas debido a la diversidad de equipos utilizados. Aunque existen correlaciones que permiten llegar a resultados consistentes, es importante destacar que en diversas regiones se aplica un enfoque basado en porcentajes para estos cálculos. Es relevante considerar que incluso en países con alta tecnología, este método sigue siendo común, lo que no necesariamente implica que sea inadecuado. Sin embargo, se considera que la precisión en la medición y el análisis de la transferencia de energía podría mejorarse notablemente. En este sentido, se propone un enfoque que combine tanto la metodología porcentual como técnicas más avanzadas, a fin de obtener un diagnóstico más certero y ajustado a la realidad del contexto en el que se aplica. Al centrar la atención en este punto crítico, de la transferencia de energía, se busca no solo entender las dinámicas actuales, sino también establecer las bases para futuras optimizaciones y una gestión más eficiente.

1.4. Objetivo general.

Comparar la prueba de penetración estándar en diferentes equipos, a través del análisis de transferencia de energía, empleado en cada uno de ellos.

Capítulo 2. Marco teórico.

2.1. Ingeniería geotecnia.

La Ingeniería geotécnica, se centra en la aplicación de principios de ingeniería civil al manejo de los materiales térreos de la corteza terrestre. Esta disciplina es fundamental en el ámbito de la construcción y el desarrollo de infraestructuras, ya que proporciona un entendimiento importante sobre cómo los suelos y rocas interactúan con las estructuras que sobre ellos se edifican. A diferencia de otras ramas de la ingeniería, la ingeniería geotécnica se ocupa principalmente de estudiar los materiales naturales que se encuentran en o cerca de la superficie terrestre, es decir, los suelos y las rocas.

Desde una perspectiva ingenieril, el suelo se define como un conjunto de partículas minerales, materia orgánica y sedimentos que se depositan sobre un lecho de roca. Este aglomerado presenta características específicas que lo hacen susceptible a la disgregación y la erosión. Por el contrario, las rocas exhiben una notable resistencia gracias a su cohesión interna, que se debe a las fuerzas moleculares que mantienen unidas a sus partículas minerales. Esta diferencia fundamental entre suelo y roca es fundamental para la práctica de la ingeniería geotécnica, ya que influye en el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones de carga y ambiente.

Dentro de la ingeniería geotécnica, existen diferentes ramas que abordan aspectos específicos del estudio de suelos y rocas. La mecánica de suelos es una de estas ramas, y se centra en la investigación de las propiedades mecánicas de los suelos, aplicando principios fundamentales de la mecánica, como la cinemática y la dinámica. Esta área de estudio es esencial para entender cómo los suelos responden a las cargas, ya sean estáticas o dinámicas, que se les apliquen durante la construcción de infraestructuras. Por otro lado, la mecánica de rocas se ocupa de las propiedades mecánicas de las rocas, abordando tanto el lecho rocoso como otros tipos de formaciones rocosas. En ambas disciplinas, es vital comprender cómo se comportan estos materiales en condiciones variadas, lo que implica un estudio riguroso y a menudo empírico.

Uno de los aspectos más interesantes de la ingeniería geotécnica es su naturaleza empírica. A menudo se considera que esta disciplina se asemeja más a un arte que a una ciencia exacta. Esta percepción se debe a que los suelos y las rocas son materiales naturales que presentan variaciones significativas en sus propiedades, incluso en distancias cortas. Por ejemplo, en

una masa de suelo, se pueden encontrar diferencias en la composición, la compactación y la capacidad de carga en puntos separados por solo unos pocos centímetros. Esta heterogeneidad hace que los ingenieros geotécnicos deban realizar estudios detallados y pruebas in situ para obtener datos precisos sobre el comportamiento del suelo.⁵

Además de ser heterogéneos, los suelos también presentan propiedades no lineales, lo que implica que la relación entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones que experimentan no sigue una línea recta. Esto complica aún más el análisis, ya que las propiedades del suelo pueden variar bajo diferentes condiciones de carga. Por otro lado, la anisotropía es otra característica importante de los suelos; esto significa que sus propiedades pueden cambiar según la dirección en la que se midan. Esta complejidad requiere un enfoque que integre conocimientos de geología, física y mecánica de materiales.

El avance de la geotecnia también ha estado relacionado con el desarrollo de tecnologías de exploración del suelo, que han permitido a los ingenieros obtener datos más precisos sobre las condiciones del subsuelo. Métodos como la perforación, los sondeos, y el uso de instrumentos de monitoreo han sido importantes para la recolección de información. Esta revolución en la obtención de datos ha llevado a una mejora significativa en la capacidad de análisis, permitiendo el diseño de proyectos más seguros y sostenibles.

La ingeniería geotecnia se enfrenta a una serie de complejidades debido a la naturaleza variable de los suelos y rocas. Estos materiales naturales pueden exhibir variaciones significativas en cortas distancias, influenciadas por factores como la formación geológica, la historia de deposición y la actividad tectónica. Las propiedades de los suelos, como su densidad, cohesión y permeabilidad, pueden cambiar drásticamente, lo que añade una capa de complejidad al diseño y la construcción de estructuras. La experiencia, el juicio y la intuición de los especialistas, son determinantes para interpretar datos geotécnicos y tomar decisiones informadas en el diseño. Uno de los desafíos más importantes en la ingeniería geotécnica es la evaluación de la estabilidad de taludes y la prevención de deslizamientos de tierra. La identificación de zonas potencialmente inestables es esencial para evitar fallas catastróficas que pueden poner en peligro vidas y propiedades.

La innovación tecnológica ha transformado la forma en que se llevan a cabo estos estudios. Métodos como, la geofísica y la modelación numérica permiten obtener datos más precisos y

⁵ Holtz, (2016), Introduction, pp.1-2.

realizar simulaciones que ayudan a prever el comportamiento del suelo ante diversas condiciones de carga. Estas herramientas han mejorado significativamente la capacidad para diseñar estructuras más seguras y adaptadas a las características del terreno.

Asimismo, la sostenibilidad se ha convertido en un aspecto importante. Con el crecimiento de la urbanización, los diseñadores deben considerar el impacto ambiental de sus proyectos. La selección de técnicas de construcción que minimicen la alteración del terreno y la implementación de sistemas de drenaje eficaces son ejemplos de cómo se pueden integrar prácticas sostenibles en la ingeniería geotécnica. La interrelación entre la teoría y la práctica en esta disciplina destaca la necesidad de un enfoque integral que considere tanto los principios científicos como las variaciones naturales del terreno. Los proyectos geotécnicos modernos buscan no solo cumplir con los requisitos estructurales, sino también mitigar su impacto en el medio ambiente. La conservación del agua, el control de la erosión y la minimización de desechos son consideraciones clave en el diseño de nuevas infraestructuras.

Parte importante es garantizar que las cimentaciones, muros de contención, túneles y otras estructuras subterráneas se diseñen de manera adecuada. Esto implica realizar estudios y análisis de estabilidad que proporcionen información crítica para el proceso de diseño. La ingeniería geotécnica, al ser un campo multidisciplinario, exige un enfoque colaborativo donde ingenieros, geólogos y ambientalistas trabajen juntos para desarrollar soluciones que no solo sean funcionales, sino que también respeten y preserven el entorno natural.

La ingeniería geotécnica es una disciplina muy importante dentro de la ingeniería civil, desempeñando un papel fundamental en la seguridad y eficiencia de las construcciones. Su evolución histórica, junto con el avance de tecnologías y un enfoque hacia la sostenibilidad, continúa transformando la construcción moderna. Al abordar los desafíos del suelo con rigor científico y una perspectiva responsable, los ingenieros geotécnicos están en la primera línea de la creación de infraestructuras seguras y sostenibles para las generaciones futuras.

Los suelos poseen una memoria notable, lo que significa que tienen la capacidad de recordar las condiciones anteriores a las que han sido sometidos. Esta característica no solo influye en su comportamiento actual, sino que también puede afectar futuras intervenciones de ingeniería. Comprender esta memoria es fundamental para los ingenieros geotécnicos,

quienes deben considerar el historial del suelo al diseñar estructuras que sean seguras y duraderas.⁶

2.2. Origen de los depósitos del suelo, tamaño y forma.

La formación del suelo comienza con la meteorización de las rocas, que puede dividirse en; meteorización física y esto inicia con la descomposición mecánica de las rocas sin alterar su composición química. Factores como la congelación y descongelación, la expansión y contracción térmica, y la acción de raíces de plantas contribuye a este proceso. En cuanto a la meteorización química se refiere a la transformación química de los minerales en las rocas. Esto puede incluir reacciones como la disolución de minerales solubles, la hidrólisis de feldespatos a arcillas, y la oxidación de minerales ferrosos. Y se tiene también la meteorización biológica, en la cual los organismos como microorganismos, plantas y animales afectan la meteorización mediante la secreción de ácidos o la alteración física de las rocas. Una vez que las rocas se han descompuesto en partículas más pequeñas, estas son transportadas por ríos y corrientes que son arrastradas a lo largo de su recorrido, depositándolas en áreas de menor energía como llanuras aluviales. En regiones áridas, el viento puede transportar partículas finas a grandes distancias, contribuyendo a la formación de suelos en áreas desérticas.

Un papel importante en el movimiento del material lo es la gravedad a lo largo de pendientes, donde el material se desliza y se acumula en lugares más bajos. Dentro de los factores que influyen en la formación del suelo, está el clima, que es un factor más influyente en la formación del suelo. Las precipitaciones, la temperatura y la humedad afectan, lo anterior analizado en climas cálidos y húmedos que favorecen la meteorización química, mientras que en climas fríos y secos favorecen la meteorización física. Las características del suelo, la combinación de temperatura y humedad determina el tipo de vegetación, que a su vez influye en la composición orgánica del suelo.

Las propiedades físicas del suelo están profundamente influenciadas por varios factores, entre los cuales destacan el tamaño, la forma y la composición química de los granos que lo conforman. Comprender cómo estos elementos interactúan es fundamental para estudiar la salud y la fertilidad del suelo. Para ello, es esencial familiarizarse con los diferentes tipos de rocas que componen la corteza terrestre, ya que estas rocas son la fuente primaria de los minerales que se descomponen y se convierten en los granos del suelo.

⁶ Sociedad, (2016), portal, p. 1.

Las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas aportan variaciones en la textura y en las propiedades químicas del suelo. Por ejemplo, las rocas ígneas, como el granito, tienden a producir suelos más gruesos y menos fértiles, mientras que las rocas sedimentarias pueden dar lugar a suelos más ricos en nutrientes. Además, la forma y el tamaño de los granos afectan la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, así como su permeabilidad y aireación. Las rocas ígneas se forman a través del proceso de enfriamiento y solidificación del magma, que es el material fundido procedente del manto de la tierra. Este magma puede ser expulsado a la superficie durante erupciones volcánicas o a través de fisuras en la corteza terrestre. Cuando el magma emerge, puede enfriarse rápidamente al entrar en contacto con el aire o el agua, dando lugar a lo que se conoce como rocas ígneas extrusivas o volcánicas, como el basalto.

Sin embargo, no todo el magma alcanza la superficie. Parte de él se enfría lentamente bajo la corteza, formando rocas ígneas intrusivas o plutónicas, como el granito. Este enfriamiento lento permite que los cristales minerales se desarrollen de manera más grande y visible, lo que da a estas rocas una textura característica.

Su mineralogía y estructura afectan directamente la calidad del suelo, así como su capacidad para retener agua y nutrientes. Además, al descomponerse, estas rocas liberan minerales esenciales que contribuyen a la fertilidad del suelo, lo que las convierte en un componente clave en los ecosistemas terrestres.

La meteorización, o intemperismo, es el proceso natural mediante el cual las rocas se descomponen en fragmentos más pequeños a través de procesos mecánicos y químicos. Este fenómeno es fundamental para la formación del suelo y la transformación del paisaje terrestre.

La meteorización mecánica, por un lado, se produce sin alterar la composición química de las rocas. Este tipo de meteorización puede ser provocado por la expansión y contracción de las rocas debido a los ciclos de calentamiento y enfriamiento. A medida que las temperaturas fluctúan, el calor provoca que las rocas se expandan y el frío las contraiga. Con el tiempo, este ciclo de dilatación y contracción lleva a la desintegración de las rocas en fragmentos más pequeños.

Uno de los procesos más notables dentro de la meteorización mecánica es la acción del agua. Cuando el agua se filtra en los poros y fisuras de las rocas, sufre cambios de temperatura. Cuando las temperaturas bajan, el agua se congela y se expande, ejerciendo una presión

considerable en las paredes de las fisuras. Esta presión es suficiente para fracturar incluso rocas de gran tamaño.

Además de la congelación, otros agentes físicos contribuyen a la meteorización mecánica. Los glaciares, al moverse lentamente sobre el paisaje, desgastan y descomponen las rocas en su trayectoria. El viento, por su parte, puede erosionar las superficies rocosas a través del transporte de partículas que impactan contra ellas. El agua de los arroyos y ríos, así como las olas del mar, también juegan un papel importante en este proceso, desgastando las rocas a medida que fluyen o golpean las costas.⁷

Es importante entender que, en la meteorización mecánica, las rocas se fragmentan en piezas más pequeñas sin que su composición química cambie. Este proceso proporciona el material necesario para la meteorización química, donde los minerales pueden reaccionar y alterarse, contribuyendo a la formación de suelo fértil.

Los depósitos de grava, arena, limo y arcilla, resultantes de los procesos de meteorización, son elementos clave en la formación de rocas sedimentarias. A medida que estos sedimentos se acumulan, pueden ser compactados bajo la presión de sobrecarga ejercida por capas superiores de material. Este proceso de compactación, junto con la acción de agentes cementantes, es fundamental para la formación de rocas sedimentarias.

Los agentes cementantes, que pueden incluir minerales como el óxido de hierro, la calcita, la dolomita y el cuarzo, son generalmente transportados en solución por el agua subterránea. A medida que el agua fluye a través de los sedimentos, se disuelven y llevan consigo estos minerales, que luego se depositan en los espacios intersticiales entre las partículas de sedimento. Este proceso de cementación es esencial, ya que permite que las partículas se unan firmemente, transformándose en una roca consolidada.

Las rocas formadas de esta manera se conocen como rocas sedimentarias detríticas. Estas rocas son clasificadas en función del tamaño de los granos que las componen. Por ejemplo, las rocas que predominan en partículas de grava se denominan conglomerados, mientras que aquellas formadas principalmente por arena son conocidas como areniscas. Las formaciones de limo y arcilla dan lugar a rocas como la lutita. Sirven como reservorios de agua subterránea y son fuente de recursos como arena y grava, utilizados en la construcción. La formación de

⁷ Juárez, (2005), Mecánica, pp. 34-36.

rocas sedimentarias detríticas a partir de depósitos de meteorización y su cementación por minerales transportados en agua subterránea son procesos fundamentales en la geotecnia.

Los materiales parentales proporcionan los minerales que forman el suelo. Diferentes tipos de roca (ígneas, sedimentarias y metamórficas) dan lugar a suelos con diferentes propiedades químicas y físicas. La topografía afecta el drenaje y la erosión, las pendientes pronunciadas pueden facilitar la erosión, mientras que las áreas planas pueden acumular sedimentos. Como ya se mencionó el drenaje, es un factor importante, ya que en áreas de alta precipitación pueden ser más propensos a la saturación y la formación de suelos arcillosos, mientras que suelos en pendientes pueden ser más arenosos y bien drenados. Otro factor importante es la actividad biológica, incluyendo plantas, animales y microorganismos, es fundamental para la formación del suelo, la descomposición de materia orgánica contribuyente a la fertilidad del suelo. Las raíces de las plantas, ayudan a crear poros en el suelo, mejorando la aireación y el drenaje. Es esencial en la formación del suelo, el tiempo; la evolución de un suelo puede llevar miles de años y depende de cómo interactúan los factores en el proceso.⁸

Es fundamental reconocer que los suelos no son entidades fijas, sino que están en un constante ciclo de formación y transformación. Este proceso dinámico implica una serie de cambios que pueden ser tanto naturales como inducidos por la actividad humana. La regeneración del suelo es uno de los aspectos más fascinantes de su naturaleza, ya que puede llevarse a cabo a través de procesos biológicos y geológicos. Por ejemplo, la acumulación de materia orgánica, resultado de la descomposición de plantas y organismos, contribuye significativamente a la fertilidad del suelo. La actividad biológica, juega un papel fundamental en la mejora de la estructura del suelo y en el ciclo de nutrientes.

Sin embargo, la transformación del suelo no siempre es positiva. La degradación provocada por actividades humanas, como la agricultura intensiva, la deforestación y la urbanización, puede tener consecuencias devastadoras. Estas prácticas a menudo llevan a la erosión del suelo, donde la capa superficial fértil es arrastrada por el viento o el agua, reduciendo la calidad y la productividad del suelo.

Comprender el origen y la formación del suelo es determinante en diversas aplicaciones, especialmente en geotecnia e ingeniería civil. En este último ámbito, el conocimiento de las propiedades del suelo es fundamental para el diseño de cimientos y estructuras. Cada tipo de

⁸ Juárez, (2005), Mecánica, pp. 38-39.

suelo presenta características específicas, como su densidad, cohesión y capacidad de carga, que influyen directamente en la estabilidad de las edificaciones. Un análisis geotécnico adecuado no solo proporciona información vital para el diseño, sino que también ayuda a prevenir fallos estructurales que podrían tener consecuencias graves. La importancia de este análisis se hace evidente en casos de fallos en infraestructuras, donde una evaluación insuficiente de las condiciones del suelo ha llevado a colapsos o deslizamientos. Por lo tanto, invertir en estudios geotécnicos rigurosos es esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de las construcciones.

Además de su relevancia en la construcción, una gestión adecuada del suelo es esencial para la conservación de ecosistemas y la mitigación de problemas como la erosión y la desertificación. Los suelos son sistemas dinámicos que requieren un enfoque consciente y responsable tanto en su estudio como en su gestión. La interrelación entre la salud del suelo y la sostenibilidad ambiental debe ser un principio guía en la planificación y desarrollo de proyectos en ingeniería.⁹

2.3. Importancia de las propiedades de los suelos.

En el estudio de los suelos, se identifican tres fases principales: la sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida está compuesta por partículas minerales del suelo, incluyendo la capa sólida adsorbida, que juega un papel importante en las interacciones del suelo con el agua y los nutrientes. La fase líquida está formada principalmente por agua, aunque también pueden encontrarse otros líquidos en menor proporción. Por otro lado, la fase gaseosa se compone mayormente de aire, pero puede contener otros gases como sulfuros y dióxido de carbono, que pueden influir en las propiedades del suelo. Además, es importante mencionar la capa viscosa de agua adsorbida, que presenta propiedades intermedias entre la fase sólida y la líquida. Esta capa suele incluirse en la fase líquida, dado que es susceptible de desaparecer cuando el suelo es sometido a un fuerte proceso de evaporación o secado. En general, la fase líquida y gaseosa del suelo se consideran parte del volumen de vacíos, mientras que la fase sólida se refiere al volumen de los sólidos presentes en la muestra.

⁹ Das, (2013), Fundamentos, pp.16-28.

Un suelo se considera totalmente saturado cuando todos sus vacíos están completamente ocupados por agua. En este caso, el suelo presenta solo dos fases: la sólida y la líquida. Muchos suelos que se encuentran por debajo del nivel freático son completamente saturados. Además, es común que algunos de estos suelos contengan materia orgánica en diversas formas y cantidades. En su mayoría, en los suelos de turba, la materia orgánica predomina y consiste en residuos vegetales parcialmente descompuestos. Aunque el contenido de materia orgánica y las capas adsorbidas son aspectos fundamentales para entender las propiedades mecánicas del suelo, no es necesario considerarlos al medir los pesos y volúmenes relativos de las tres fases principales. La influencia de estos elementos se tiene en cuenta más fácilmente en etapas posteriores del estudio de las propiedades del suelo.

En los laboratorios de mecánica de suelos, se pueden determinar con facilidad el peso de las muestras húmedas, el peso de las muestras secadas al horno y el peso específico relativo de los suelos. Sin embargo, estas magnitudes no son las únicas que requieren cálculo; es fundamental establecer relaciones sencillas y prácticas que permitan medir otras propiedades en función de estas variables. Las relaciones volumétricas y gravimétricas son de suma importancia para la aplicación rápida y efectiva de la teoría, y su dominio es considerado indispensable.

Para desarrollar las relaciones de peso–volumen, separamos las tres fases, es decir. Sólido, agua, y aire. Por lo tanto, el volumen total de una muestra de suelo, se puede expresar:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$$

V_s = volumen de sólidos del suelo

V_v = volumen de vacíos

V_w = volumen de agua en los vacíos

V_a = volumen de aire en los vacíos

Uno de los puntos importantes, en la mecánica de suelos es la definición del peso de los sólidos, es decir, el peso del suelo seco obtenido tras la eliminación de la fase líquida. Esto surge debido a que la película de agua adsorbida no se evapora completamente durante el

secado en horno a temperaturas prácticas. Convencionalmente, se resuelve en mecánica de suelos definiendo el estado seco de un suelo como aquel que se obtiene después de someter la muestra a un proceso de evaporación en un horno a temperaturas que oscilan entre 105° C y 110° C. Este procedimiento debe realizarse durante un periodo suficiente para alcanzar el peso constante, lo cual generalmente se logra en un rango de 18 a 24 horas.¹⁰

En geotecnia se relacionan el peso de las distintas fases con sus volúmenes correspondientes, por medio del concepto de peso específico, es decir de la relación entre el peso de la sustancia y su volumen.

γ_σ = peso específico del agua destilada, a 4° C de temperatura y a la presión atmosférica correspondiente al nivel del mar.

γ_a = peso específico del agua en las condiciones reales de trabajo.

γ_m = peso específico de la masa del suelo.

γ_s = peso específico de la fase sólida.

El peso específico relativo se define como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua, a 4° C, destilada y sujeta a una atmosfera de presión.

Las relaciones fundamentales son importantes para el manejo de las propiedades del suelo: relación de vacíos o índice de poros, es una relación entre el volumen de vacíos y los sólidos.

$$e = \frac{v_v}{v_s}$$

En la práctica se encuentran valores menores a 0.25 (arenas finas), ni mayores a 15, en el caso de las arcillas.

La porosidad está en razón del volumen de vacíos al volumen total:

$$\eta = \frac{v_v}{v}$$

¹⁰ Das, Fundamentos, pp.49 y 50.

Grado de saturación:

$$S = \frac{V_x}{V_v}$$

las relaciones de peso son contenido de humedad y el peso unitario:

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

peso unitario, es peso del suelo por unidad de volumen:

$$\gamma = \frac{w}{v}$$

En la naturaleza la humedad de suelos, varía entre límites muy amplios, por esta razón los laboratorios de mecánica, forman un enlace fundamental para el análisis de los suelos¹¹.

Existen ciertos tipos de suelos que, al ser remoldeados y modificar su contenido de agua si es necesario, adquieren una consistencia característica conocida como plasticidad. Esta propiedad ha sido observada principalmente en las arcillas, dentro del ámbito de la geotecnia. La plasticidad, en este contexto, es una propiedad tan evidente que históricamente se ha utilizado para clasificar los suelos de manera descriptiva. Sin embargo, a medida que avanzaron los estudios, se descubrió que la plasticidad está estrechamente relacionada con las propiedades físico-químicas que determinan el comportamiento mecánico de estos materiales, lo que llevó a considerarla una propiedad de interés científico y técnico. Así, la plasticidad dejó de ser simplemente una característica descriptiva y se convirtió en un aspecto clave en el estudio del comportamiento de los suelos bajo diferentes condiciones.

Para clasificar un material como plástico en lugar de elástico, es importante considerar dos aspectos: primero, los antecedentes previos de esfuerzos y deformaciones, y segundo, la razón de variación de los esfuerzos. El primer aspecto se refiere a los puntos de fluencia en los que el material cambia su comportamiento. Cuando el esfuerzo se mantiene dentro de ciertos límites de tensión y compresión, el material sigue un comportamiento elástico, pero si los esfuerzos superan estos límites, puede comenzar a endurecerse por deformación progresiva,

¹¹ Juárez, (2005), Mecánica, pp. 51-55.

lo que afecta los valores de los puntos de fluencia. Además, la segunda condición para que un material sea considerado plástico es que la razón de variación de los esfuerzos no disminuya en el punto de fluencia de tensión ni aumente en el de compresión. En el campo de la geotecnia, el concepto de plasticidad se introdujo inicialmente como una idea sencilla y descriptiva, pero con el tiempo se ha ido fundamentando sobre principios más sólidos, basados en relaciones de esfuerzo y deformación.

Se han definido cuatro estados básicos de comportamiento del suelo, que dependen de su contenido de humedad: Estado sólido, en este estado, el suelo se comporta como un sólido quebradizo. Las partículas están firmemente unidas, y el suelo es difícil de deformar. Este estado se presenta cuando el contenido de humedad es muy bajo. Las propiedades físicas de los suelos en este estado permiten que mantengan su forma y volumen.

El estado semisólido es al incrementar el contenido de humedad, el suelo comienza a perder parte de su rigidez, y se encuentra en un estado semisólido. En esta etapa, el suelo todavía retiene cierta cohesión, pero puede deformarse bajo presión. Este estado se caracteriza por una mayor plasticidad en comparación con el estado sólido.

En estado plástico es con un aumento adicional en el contenido de humedad, el suelo alcanza el estado plástico, en el cual puede ser moldeado y deformado sin romperse. En este estado, las partículas de suelo están lo suficientemente separadas para permitir el flujo de agua entre ellas, lo que facilita una mayor flexibilidad y manejabilidad del material.¹²

En cuanto al estado líquido, al llegar a un contenido de humedad muy alto, el suelo se comporta como un líquido. En este estado, el suelo y el agua fluyen juntos, lo que significa que la cohesión entre las partículas es prácticamente nula. Este comportamiento es crítico en situaciones donde se requiere el drenaje o la estabilidad de suelos en condiciones de alta humedad. Para cuantificar estos estados, Atterberg introdujo tres límites, conocidos como límites de Atterberg, que marcan las transiciones entre los diferentes estados de consistencia:

Límite de contracción, este límite define el contenido de humedad en el cual el suelo transita del estado sólido al semisólido. Es el punto en que el suelo empieza a experimentar un cambio notable en su comportamiento, lo que puede influir en la manera en que se trabaja y se compacta.

¹² Crespo, (2004), Mecánica, pp. 69 -71.

Límite plástico, este límite marca la transición entre el estado semisólido y el estado plástico. En este punto, el suelo es capaz de deformarse plásticamente, lo que significa que puede ser moldeado sin romperse. Este límite es fundamental para determinar la capacidad de trabajo del suelo en aplicaciones de construcción.

En cuanto al límite líquido, este límite define el contenido de humedad en el que el suelo transita del estado plástico al líquido. En este estado, las propiedades mecánicas del suelo cambian drásticamente, volviéndolo susceptible a la erosión y a la pérdida de soporte estructural. La comprensión de la consistencia del suelo es vital no solo para la ingeniería, sino también gestión de recursos naturales. Los límites de Atterberg, proporciona una base para comprender y predecir el comportamiento del suelo bajo diversas condiciones de humedad.¹³

Los límites líquido y plástico son parámetros fundamentales en la caracterización de suelos cohesivos, y su determinación se lleva a cabo a través de pruebas de laboratorio relativamente sencillas. Estos límites proporcionan información esencial sobre el comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de humedad. Las pruebas de límites líquido y plástico han sido ampliamente utilizadas para correlacionar varios parámetros físicos del suelo, así como para su identificación y clasificación. La importancia de estos límites radica en su capacidad para predecir el comportamiento mecánico del suelo, lo que permite diseñar estructuras más seguras.

El conocimiento de los límites líquido y plástico permite evaluar la capacidad de carga del suelo, su comportamiento ante cambios de humedad, y su susceptibilidad a la erosión y al deslizamiento. Además, la clasificación correcta de los suelos es importante en la toma de decisiones sobre el tipo de cimentación que se debe emplear en un proyecto, la necesidad de mejorar el suelo, y el diseño de sistemas de drenaje adecuados.

Además de su uso en la clasificación de suelos, se tienen consideraciones adicionales a los límites líquido y plástico también son indicativos de otros comportamientos del suelo, como su capacidad para retener agua y su plasticidad. La plasticidad del suelo afecta su trabajo y compactación en proyectos de construcción, donde su manejo inadecuado puede resultar en fallas estructurales.

¹³ Das, (2013), Fundamentos, pp. 64 – 67.

Los límites de Atterberg, incluyendo el límite líquido y el límite plástico, se integran en un enfoque más amplio para la caracterización del suelo. Esto incluye pruebas adicionales como la determinación de la densidad, la resistencia al corte, y la compresibilidad, las cuales, combinadas con la información de los límites de Atterberg, proporcionan un panorama integral de las propiedades del suelo.

A través de pruebas de laboratorio accesibles, estos límites ofrecen información valiosa que permite evaluar el comportamiento de los suelos en diversas condiciones. La investigación de Casagrande y la carta de plasticidad resultante han proporcionado un marco fundamental para esta evaluación.¹⁴

Los experimentos realizados por científicos como Atterberg y Terzaghi han demostrado que la plasticidad de los suelos se debe, en gran medida, a la carga eléctrica de las partículas laminares del suelo, que generan campos eléctricos similares a los de un condensador. Estos campos influyen en las moléculas bipolares del agua, modificando las interacciones entre las partículas del suelo. En los suelos plásticos, el espesor de las capas de agua que interactúan con las partículas es grande, lo que tiene un efecto significativo en su plasticidad. Siguiendo esta línea de investigación, Goldschmidt desarrolló la hipótesis de que, si se emplearan líquidos bipolares en lugar de agua, también podrían producirse suelos plásticos, mientras que los líquidos monopoles no generarían este efecto. Este fenómeno se ha observado claramente en los laboratorios. Además, se ha constatado que las partículas equidimensionales, con una relación área-volumen pequeña, y por tanto con una baja actividad eléctrica superficial, no son capaces de formar suelos plásticos, sin importar su tamaño u otras características.¹⁵

¹⁴ Das, (2013), Fundamentos, pp. 72-75.

¹⁵ Juárez, (2005), Mecánica, pp. 123 – 127.

2.4. Clasificación de suelos.

El sistema de clasificación de suelos se fundamenta en varios criterios esenciales que permiten una adecuada identificación de los diferentes tipos de materiales presentes en una muestra. En primer lugar, el tamaño de grano es importante. Como los es la grava, la que se define como la fracción que logra pasar a través de un tamiz de 75 mm pero que queda retenida en el tamiz número 10. Por otro lado, la arena se clasifica aquella fracción que pasa el tamiz número 10 y es retenida en el tamiz 200. En el caso de limos y arcillas, se consideran fracciones que pasan el tamiz 200, es decir partículas más finas. Otro criterio importante es la plasticidad del suelo. El termino limoso, se utiliza para describir las fracciones finas que poseen un índice de plasticidad de 10 o menos, lo que indica una menor capacidad de deformación. En cambio, las arcillas, presentan un índice de plasticidad de 11 o más que sugiere una mayor plasticidad y una mayor capacidad de retener agua y deformarse bajo carga. Es importante tener en cuenta la presencia de cantos, que son partículas de tamaño superior a 75 mm estos materiales no se consideran dentro de la porción de la muestra de suelo que se clasifica, ya que su tamaño excede el rango de interés para esta evaluación.¹⁶

El sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.) es una metodología ampliamente utilizada en geotecnia para clasificar suelos en grupos que presentan intervalos de propiedades mecánicas e hidráulicas similares. Esta clasificación se basa en conceptos fundamentales que permiten entender cómo las características físicas del suelo influyen en su comportamiento y desempeño en diversas aplicaciones.

Los suelos están compuestos por un conjunto diverso de partículas que varían significativamente en tamaño, abarcando desde los grandes cantos rodados, que pueden tener más de 15 cm de diámetro, hasta las partículas de arcilla coloidal, que son más pequeñas de 2 micras. Estas partículas más diminutas son a menudo invisibles a simple vista y requieren el uso de un microscopio electrónico para su observación. La diversidad de tamaños de partículas en el suelo incluye varias categorías intermedias:

Gravas; son partículas con un tamaño que varía entre 2 mm y 15 cm. suelen ser más angulares y tienen un alto nivel de permeabilidad, lo que las hace ideales para aplicaciones de drenaje.

¹⁶ Das, (2013), Fundamentos, pp. 80-85.

Arenas, estas partículas, que oscilan entre 0.075 mm y 2 mm, tienen un tamaño que permite una buena aireación y drenaje, aunque su capacidad de retención de agua es limitada.

Limos presentan tamaños que van de 0.002 mm a 0.075 mm, los limos tienen una textura más fina y son más cohesivos que las arenas, lo que les permite retener más agua.

Arcillas mantienen partículas de menos de 0.002 mm que presentan características plásticas. Estas partículas son importantes en la formación de suelos cohesivos y pueden retener grandes cantidades de agua, lo que afecta su comportamiento mecánico.¹⁷

Las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos resultan de la interacción entre sus partículas. Esta interacción es influenciada por varios factores, entre los que destacan:

Granulometría que presenta la distribución y proporción de diferentes tamaños de partículas dentro de una muestra de suelo determinan su comportamiento físico. Por ejemplo, un suelo con una alta proporción de partículas finas, como arcillas y limos, tiende a ser más cohesivo y menos permeable que un suelo dominado por partículas más grandes, como gravas y arenas.

La cantidad de material para una descripción e identificación adecuada del suelo, es necesaria ya que esto permite realizar pruebas y análisis que sean representativos de las condiciones del estrato completo. Observaciones visuales, se debe prestar atención a las características visuales del suelo, como color, textura y estructura. Estos aspectos pueden proporcionar información valiosa sobre el tipo de suelo y sus propiedades. La clasificación de suelos es un proceso importante en la ingeniería, ya que influye en el diseño de estructuras, el manejo del agua y la estabilidad del terreno. Conocer el tipo de suelo presente en un área permite tomar decisiones informadas sobre el tipo de cimentación que se debe emplear, la necesidad de tratamientos para mejorar las propiedades del suelo, y las estrategias de drenaje adecuadas.

La forma de las partículas que componen la masa de un suelo es tan importante como la distribución de sus tamaños, ya que influye de manera significativa en las propiedades físicas del suelo. Sin embargo, a menudo se presta menos atención a esta característica, principalmente porque la medición de la forma de las partículas es más compleja y requiere técnicas más sofisticadas. La forma de las partículas se puede clasificar en tres categorías principales: voluminosa, escamosa, nodulosa.

¹⁷ Rojas, (2020), caso de estudio, <https://www.portacivil.com>

La forma de las partículas voluminosas tiene un impacto significativo en diversas propiedades físicas del suelo. Por ejemplo, influye en los radios anulares máximos y mínimos, así como en parámetros importantes como la resistencia al corte y la compresibilidad del suelo. Estas propiedades son esenciales para la evaluación del comportamiento mecánico del suelo en aplicaciones de ingeniería.

Las partículas escamosas, por su parte, se caracterizan por una baja esfericidad, con valores que generalmente son de 0.01 o menos. Este tipo de partículas está predominantemente compuesto por minerales de arcilla. Su forma delgada y aplanada puede influir en la cohesión del suelo y en su capacidad para retener agua, así como en la forma en que interactúan con otros tipos de partículas durante procesos de compactación y estabilidad.

Las partículas nodulosas son menos comunes en comparación con las voluminosas y escamosas. Este tipo de partículas suele encontrarse en suelos específicos, como ciertos depósitos de coral o en arcillas de atapulgita. Las partículas nodulosas pueden influir en la estructura del suelo, afectando su porosidad y permeabilidad, así como su comportamiento frente a la erosión.¹⁸

La consistencia del suelo es un aspecto decisivo, en la ingeniería geotécnica, ya que determina cómo un suelo se comporta bajo diversas condiciones de humedad. En particular, la presencia de minerales de arcilla en suelos de grano fino confiere a estos suelos una capacidad de cohesión notable. Esta cohesión permite que el suelo se pueda manipular y remover cuando hay cierta humedad, sin que se desmorone ni pierda su integridad estructural. Esta propiedad se debe a la película de agua que se adsorbe y rodea las partículas de arcilla, creando una interacción que permite que las partículas se mantengan unidas. Además de su uso en la clasificación de suelos, se tienen consideraciones adicionales a los límites líquido y plástico también son indicativos de otros comportamientos del suelo, como su capacidad para retener agua y su plasticidad. A través de pruebas de laboratorio accesibles, estos límites ofrecen información valiosa que permite evaluar el comportamiento de los suelos en diversas condiciones.¹⁹ Suelos jóvenes pueden carecer de la complejidad de las que tienen suelos más antiguos. Por todo lo referido anteriormente es importante, clasificar los suelos, y esto se determina en función de sus propiedades tanto físicas como químicas. Por lo que se considera

¹⁸ Das, (2013), Fundamentos, p. 46.

¹⁹ Das, (2013), Fundamentos, pp. 72-75.

conocer este tipo de material. Los suelos arenosos, son materiales con granos gruesos que tienen buena permeabilidad y baja retención de agua.

Los suelos arcillosos, se caracterizan por tener partículas muy finas que retienen agua y nutrientes, pero tienen baja permeabilidad, pueden ser problemáticos para la construcción si no se manejan adecuadamente. Otro gran grupo lo forman los suelos limosos, que tienen formación tanto de suelos arenosos como arcillosos, son fértiles y retienen agua sin volverse demasiados compactos. La clasificación también puede incluir suelos orgánicos, que son ricos en materia orgánica, y suelos salinos, que contienen altos niveles de sales.

La clasificación de suelos es trascendental en la ingeniería geotécnica, ya que ayuda a predecir el comportamiento del suelo bajo diversas condiciones de carga, así como su aptitud para diferentes tipos de construcción y cimentación, su importancia es fundamental, para entender sus propiedades mecánicas, de estas se podrían mencionar las siguientes, en suelos gruesos; como son las arenas, las cuales presentan tamaños de 0.075 y 4.75 mm. Suelen ser bien drenados y tienen buena capacidad de carga. La grava, presenta tamaños mayores a 4.75 mm. Excelente drenaje y alta capacidad de soporte. En suelos finos, encontramos a los limos, los cuales presentan tamaños entre 0.002 mm. Y 0.0075 mm. tienen características intermedias entre arena y arcilla. Las arcillas son partículas menores de 0.002 mm. presentan plasticidad, cohesión y capacidad de retención de agua.

Los suelos no cohesivos básicamente son la grava bien graduada, buena capacidad de carga y drenaje. Arena bien graduada, presenta buena distribución de tamaños, lo que facilita el drenaje y la estabilidad. Es importante señalar que la composición mineral afecta la estabilidad y la interacción del suelo con el agua. Y en esto último señalado, se encuentran los suelos silicosos, compuestos de principalmente de cuarzo, son menos susceptibles a la erosión y tienden a tener una buena estabilidad. Los suelos arcillosos, contienen minerales como caolinita y montmorillonita, que afectan sus propiedades de plasticidad y compresión. De acuerdo a su plasticidad, nos refiere a la capacidad del suelo para deformarse sin romperse, esto es clave para entender como el suelo reaccionara bajo carga. Lo anterior lo mencionaremos como suelos plásticos, que suelen ser arcillosos, se deforman fácilmente cuando se humedecen. Los no plásticos, típicamente arenas y gravas, son más frágiles y no soportan deformaciones significativas. Un punto importante mencionar es según comportamiento; de estos tenemos suelos consolidables, como arcillas que experimentan cambios significativos de volumen cuando se aplican cargas, lo que puede provocar

asentamientos en estructuras. Los suelos no consolidables, son aquellos que mantienen su volumen bajo carga, como arenas y gravas, que ofrecen mayor estabilidad a estructuras.

La clasificación de suelos gruesos es un proceso esencial en la ingeniería geotécnica y en estudios de suelos, que permite determinar la conveniencia del suelo para diversas aplicaciones. A continuación, se detallan los criterios y métodos para clasificar suelos gruesos, tomando en cuenta diferentes propiedades físicas y mecánicas.

La clasificación Inicial, se considera si más del 50% de las partículas de la muestra son mayores que la malla N°4, se clasifica el suelo como grava. En caso contrario, si este porcentaje es igual o menor al 50%, el suelo se clasifica como arena. Esta clasificación inicial es fundamental, ya que establece la base para un análisis más detallado.

Para estimación las partículas finas es vital también estimar su porcentaje de partículas, es decir, aquellas que son menores que la malla n°200. Este paso ayuda a comprender mejor la composición del suelo y su comportamiento.

La clasificación esta función de la composición de finos, si el porcentaje de partículas menores que la malla N°200 varía entre el 15% y el 50%, se clasifica el suelo como grava o arena arcillosa o limosa, según la naturaleza de los finos. Este paso es claro, para determinar las propiedades mecánicas del suelo.²⁰

Graduación de gravas y arenas, se toman las muestras clasificadas como gravas y arenas limpias, es necesario estimar su graduación. Si la muestra contiene partículas de todos los tamaños y se observan cantidades apreciables de tamaños grandes e intermedios, se puede clasificar como grava o arena limpia bien graduada. La graduación se refiere a la distribución de tamaños de partículas y afecta directamente la estabilidad y compresión del suelo.

La identificación de los finos como limosos o arcillosos debe realizarse siguiendo un procedimiento específico. Esto es fundamental, ya que la presencia de finos puede influir en la plasticidad y en la compacidad del suelo.

La clasificación con símbolos, se deberá considerar doble, si el porcentaje de finos se estima entre el 5% y el 15%, se debe proceder como se indicó anteriormente y asignar un símbolo doble a la clasificación. Por ejemplo, una grava bien graduada con contenido arcilloso se

²⁰ Rojas, (2020), caso de estudio, <https://www.portacivil.com>

clasificaría como g w, g c, lo que proporciona información más detallada sobre la composición del suelo. La clasificación de suelos gruesos no solo se basa en el tamaño de las partículas, sino también en otras características que afectan su comportamiento y aplicación.

El color es un indicador clave en la identificación de suelos, especialmente para su clasificación según su origen geológico. Debe registrarse el color de las muestras húmedas, y en caso de que existan variaciones significativas en los estratos, se debe describir adecuadamente. La presencia de olores distintivos, especialmente en suelos orgánicos, puede indicar características importantes sobre la materia orgánica presente. Si las muestras son secas, el olor puede recuperarse mediante el calentamiento o humedecimiento de la muestra. La descripción de las condiciones de humedad del suelo -ya sea húmedo, seco o saturado- también es fundamental para comprender su comportamiento mecánico.²¹

La identificación en campo de suelos con problemas especiales es fundamental, ya que está estrechamente relacionada con el reconocimiento de problemas de asentamientos significativos. Estos problemas pueden surgir debido a la degradación de la fracción orgánica de los suelos, así como a la presencia de suelos que no son recomendables como soporte para cimentaciones estructurales. La actividad de la materia orgánica en los suelos puede influir de manera significativa en sus propiedades geológicas, comparándose en muchos aspectos con la actividad de los minerales de arcilla. Los suelos orgánicos, que contienen un alto porcentaje de materia orgánica, se componen de material vegetal en descomposición y residuos sólidos orgánicos. Un ejemplo típico de estos suelos es la turba (pt), que se caracteriza por su color oscuro, olor característico, textura esponjosa y una alta compresibilidad, lo que los hace fácilmente identificables en el campo.

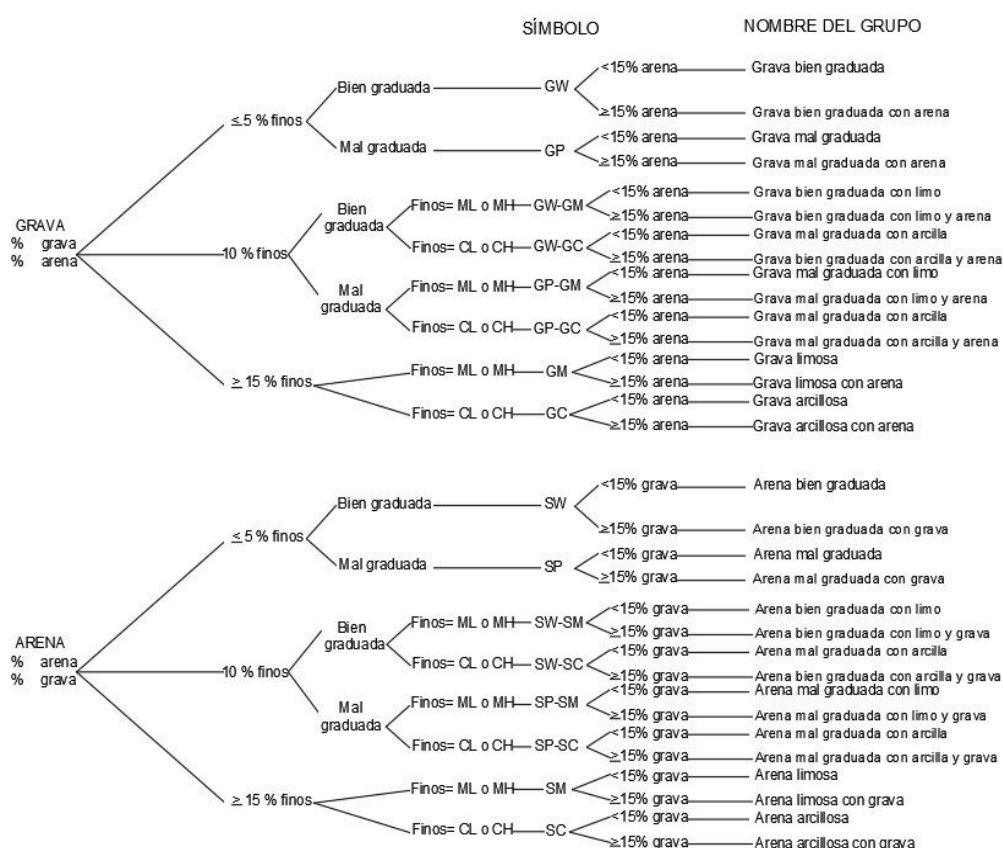
Los suelos expansivos, por otro lado, son principalmente arcillas cuya composición mineral incluye la montmorillonita. Esta mineralogía se forma a partir de una capa de aluminio entre dos capas de sílice, con enlaces débiles que permiten la penetración de moléculas de agua en su estructura reticular. Estos suelos son más comunes en regiones donde la evapotranspiración excede las precipitaciones.

Los suelos dispersivos son aquellos que tienden a flocular en presencia de agua, lo que provoca la pérdida de partículas de arcilla con una alta concentración de sales disueltas. Cuando los flóculos se separan, quedan partículas más pequeñas que son fácilmente

²¹ CFE. (2008), Manuales, pp.2-5.

arrastradas por el agua, lo que puede llevar a la erosión interna de estos suelos. Este fenómeno puede comprometer la estabilidad de estructuras y aumentar el riesgo de fallos en el terreno. Los suelos colapsables son reconocidos por su estructura abierta y suelta, que los hace estables en estado seco debido a la ligera cementación provocada por cristales de sulfatos o partículas más finas que llenan los poros. La inestabilidad de estos suelos se asocia frecuentemente a cambios en la humedad, lo que puede desencadenar procesos de colapso en laderas y terrenos inestables.²²

Diagrama 1. clasificación de suelos.



Fuente: CFE. Manuales geotecnia.

En cuanto a los principales tipos de suelos, se deben de considerar aspectos básicos, como son sus características, formación, propiedades y usos. En el caso de las arenas, se tiene que su composición oscila entre 0.05 mm y 2 mm. tiene una textura gruesa y permiten un excelente

²² CFE, (2008), Manuales, pp. 18-32.

drenaje y aireación, pero retienen poca agua y nutrientes, su formación es a partir de la descomposición de rocas y minerales en climas áridos o semiáridos, además son fácilmente erosionables si no se gestionan adecuadamente. Para el caso de suelos limosos, ofrecen una textura más suave, tienen una buena capacidad de retención de agua y nutrientes, y son más fáciles de trabajar, así como tener una buena capacidad de drenaje.²³

2.5. Esfuerzo en una masa de suelo.

Los suelos son sistemas multifase que presentan una estructura compleja y heterogénea. En un volumen dado de suelo, las partículas sólidas se distribuyen de forma aleatoria, y los espacios vacíos entre ellas forman una red continua que está ocupada por agua, aire o una combinación de ambos. Estos espacios vacíos son fundamentales para entender el comportamiento del suelo en diversas condiciones de carga. La estructura del suelo y la distribución de sus componentes influyen las propiedades mecánicas del material, tales como su compresibilidad, su capacidad de carga y su respuesta a diferentes tipos de esfuerzos.

La complejidad de los suelos como sistemas multifase plantea importantes desafíos al intentar analizar problemas típicos en ingeniería geotécnica, como la compresibilidad del suelo, la fuerza de sustentación de los cimientos, la estabilidad de los terraplenes y la presión lateral en las estructuras de retención de tierra. En este sentido, uno de los aspectos clave es comprender cómo se distribuye el esfuerzo a lo largo de una sección transversal del perfil del suelo, es decir, cómo se transmite la carga aplicada sobre el suelo y cómo esta carga se reparte entre los diferentes componentes del sistema suelo-agua-aire.

Para abordar estas cuestiones, es necesario determinar qué fracción del esfuerzo normal a una profundidad dada es transmitido por el agua intersticial y qué fracción corresponde al esqueleto sólido del suelo, es decir, a las partículas que se encuentran en contacto entre sí. Este fenómeno es fundamental para entender el comportamiento de un suelo bajo carga y se conoce como el concepto de esfuerzo efectivo. En términos sencillos, el esfuerzo efectivo es la parte del esfuerzo total que se transmite a través del esqueleto sólido del suelo, mientras

²³Juárez, (2005), Mecánica, pp. 149 – 151.

que el esfuerzo no efectivo es el que se transmite a través del agua en los poros. Este concepto es fundamental para comprender cómo el suelo responderá a cargas externas, especialmente en situaciones donde el agua en los poros juega un papel importante, como en suelos saturados o parcialmente saturados.

Cuando se construye una cimentación, se generan cambios en el suelo que se encuentra debajo de la estructura. El esfuerzo en el suelo bajo los cimientos experimenta un aumento, lo que afecta su capacidad de soporte y su estabilidad. Este aumento del esfuerzo es un fenómeno común en la ingeniería y se debe al peso de la estructura y las cargas que se le aplican. El esfuerzo neto en el suelo, que es el esfuerzo total menos el esfuerzo debido al agua intersticial, generalmente aumenta debido a la carga transmitida por la cimentación.

El aumento del esfuerzo neto depende de varios factores, entre los cuales se destacan: la carga aplicada sobre la cimentación, la profundidad a la que se mide el esfuerzo y las propiedades mecánicas del suelo, tales como su compresibilidad y su resistencia al corte. Para poder estimar con precisión el comportamiento del suelo bajo la cimentación, es necesario contar con modelos que permitan calcular el incremento del esfuerzo neto vertical en el suelo, lo cual se logra utilizando teorías de elasticidad. A pesar de que los suelos naturales no se comportan de manera completamente elástica, ni son isotrópicos ni homogéneos, las aproximaciones basadas en la elasticidad son ampliamente utilizadas en la práctica debido a que proporcionan resultados bastante confiables para los casos más comunes en ingeniería geotécnica.

El incremento del esfuerzo vertical causado por la aplicación de cargas sobre una cimentación puede ser modelado de diversas maneras, siendo una de las más comunes la teoría de la elasticidad en un medio continuo. Esta teoría permite calcular cómo se distribuye el esfuerzo en el suelo en función de las características geométricas de la cimentación (tamaño, forma, tipo de carga) y las propiedades del suelo, como su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson. A través de estas herramientas, se puede estimar y también se puede predecir, cómo reaccionará el suelo ante una carga vertical, lo que es esencial para el diseño de cimentaciones seguras y eficientes.

Aunque los depósitos naturales de suelo no son materiales perfectamente elásticos ni homogéneos, los cálculos realizados con base en la teoría de elasticidad ofrecen una buena aproximación para muchos casos prácticos. En suelos no elásticos, las deformaciones pueden ser mayores de las previstas por los modelos elásticos, pero estos enfoques aún son útiles,

especialmente cuando se cuenta con suficiente información sobre las propiedades del suelo, como sus características de compresión y su comportamiento no lineal bajo carga. Adicionalmente, los especialistas deben tener en cuenta que el comportamiento del suelo puede variar significativamente dependiendo de su tipo. Suelos como la arcilla, la arena y el limo tienen respuestas muy diferentes a las cargas aplicadas debido a sus distintas propiedades de compactación, permeabilidad y cohesión. Por ejemplo, en suelos arcillosos saturados, la presión del agua intersticial puede jugar un papel importante en la distribución del esfuerzo, lo que hace que el esfuerzo efectivo y el esfuerzo total sean bastante distintos en comparación con suelos más secos o más granulares. El análisis del esfuerzo en una masa de suelos es fundamental para resolver problemas geotécnicos y estructurales. Para ello, es necesario entender cómo se distribuyen las cargas en el suelo y cómo interactúan sus componentes sólidos y líquidos. El concepto de esfuerzo efectivo es clave en este contexto, ya que permite estimar el comportamiento del suelo ante la aplicación de cargas y su respuesta a la construcción de cimentaciones. Aunque las teorías de elasticidad no son perfectas, siguen siendo una herramienta invaluable, permitiendo una aproximación precisa y práctica al comportamiento de los suelos bajo diferentes condiciones de carga.

Se presenta la siguiente formula de lo anterior.

$$\sigma = H \gamma_w + (H_A - H) \gamma_{sat}$$

Donde:

γ_w = peso unitario del agua

γ_{sat} = peso unitario saturado del suelo

H = altura del nivel freático desde la parte superior de la columna de suelo

H_A = distancia entre el punto A y el nivel freático

El esfuerzo total, σ indicado, se puede dividir en dos componentes principales:

Esfuerzo transmitido por el agua, esta parte del esfuerzo total es transportada por el agua que ocupa los espacios vacíos continuos dentro del suelo. Este esfuerzo actúa de manera uniforme en todas las direcciones, ya que el agua en los poros se comporta como un fluido incomprensible, transmitiendo presión isotrópica (que posee las mismas propiedades en todas las direcciones).²⁴

Esfuerzo transmitido por los sólidos, en este punto la otra parte del esfuerzo total es absorbida por los sólidos del suelo en los puntos de contacto entre las partículas. En este caso, las fuerzas de contacto entre las partículas sólidas transmiten el esfuerzo, que es generalmente en diferentes direcciones del espacio, debido a la estructura granular del suelo. La suma de las componentes verticales de las fuerzas desarrolladas en estos puntos de contacto, por unidad de área de sección transversal de la masa de suelo, constituye lo que se conoce como esfuerzo efectivo. Este esfuerzo efectivo es fundamental para evaluar el comportamiento del suelo bajo carga, ya que refleja la contribución real de los sólidos a la resistencia del suelo y su capacidad de soporte.

Esfuerzos en suelos saturados con filtración, cuando el agua se filtra a través de una masa de suelo, el esfuerzo efectivo en cualquier punto puede variar respecto al caso estático, ya que puede aumentar o disminuir dependiendo de la dirección de la filtración. Filtración ascendente, se ejemplifica cuando, una capa de suelo granular se encuentra en un tanque, y la filtración es provocada por el suministro constante de agua a través de una válvula situada en la parte inferior del tanque. A medida que el agua asciende, se genera una pérdida de carga entre los niveles entre dos puntos, denotada como (h) . En este caso, el esfuerzo total en cualquier punto del suelo se determina por el peso del suelo y del agua que se encuentra por encima de él. La presencia de filtración modifica este esfuerzo total, afectando directamente el esfuerzo efectivo entre los dos puntos, lo que es claro para entender cómo la dinámica del flujo de agua influye en las propiedades mecánicas del suelo.²⁵

La interacción entre el suelo y las estructuras de cimentación, como los pilotes, es un aspecto fundamental en la ingeniería geotécnica. Este estudio se enfoca en el esfuerzo ejercido por la filtración descendente y las oscilaciones en los suelos, fenómenos que pueden tener un impacto significativo en la estabilidad y el comportamiento de las estructuras subterráneas, especialmente cuando se enfrentan a cargas dinámicas o condiciones de flujo subterráneo.

²⁴ Juárez, (1973), Mecánica II, pp. 9-12.

²⁵ Das, (2013), Fundamentos, pp. 155 – 156.

Además, se analizarán conceptos relacionados con el esfuerzo vertical en suelos bajo cargas puntuales y uniformemente distribuidas, utilizando soluciones de modelos clásicos como los desarrollados por Terzaghi y Boussinesq.

La filtración descendente se refiere al movimiento de agua que se infiltra a través del suelo debido a diferencias de presión, típicamente causadas por la presencia de una fuente de agua o un gradiente hidráulico. En contextos de cimentación profunda, como los pilotes, esta filtración puede inducir un esfuerzo adicional en la masa de suelo circundante. El flujo de agua en las capas permeables puede generar un cambio en la distribución de presiones en el suelo, lo que a su vez puede afectar la estabilidad de las estructuras.

En particular, la filtración subterránea es una de las causas más importantes de las oscilaciones del suelo en el lado de aguas abajo de los pilotes. Estas oscilaciones, que se deben al paso del agua a través del terreno, pueden causar movimientos indeseados en el suelo y afectar la capacidad de carga de los pilotes. Terzaghi, en sus investigaciones sobre el comportamiento del suelo, identificó que las oscilaciones generalmente ocurren dentro de una distancia equivalente a $d/2$ de los pilotes, donde d , es la profundidad de empotramiento de los pilotes en la capa permeable. Este fenómeno es fundamental para la estabilidad de las estructuras, ya que las oscilaciones del suelo pueden generar fuerzas adicionales sobre los pilotes o incluso provocar la falla de la estructura si no se controlan adecuadamente. Así, comprender cómo la filtración subterránea interactúa con los pilotes es esencial para diseñar estructuras que puedan resistir estos movimientos y evitar posibles fallas.

Las oscilaciones de los suelos cerca de los pilotes son un fenómeno dinámico que puede presentarse cuando el flujo de agua subterránea atraviesa las capas permeables del terreno, afectando tanto la distribución de esfuerzos como la estabilidad del sistema de cimentación. Estos movimientos no sólo están relacionados con la velocidad del flujo, sino también con las propiedades del suelo, como su permeabilidad y su capacidad para transmitir las cargas.

En estudios experimentales y modelados numéricos, se ha observado que las oscilaciones son más notorias en las proximidades inmediatas de los pilotes, especialmente cuando la capa permeable está sometida a un fuerte gradiente hidráulico. Esto se debe a que el flujo de agua puede crear una presión negativa en el suelo, que genera desplazamientos y oscilaciones. Como resultado, se pueden generar esfuerzos fluctuantes en el suelo circundante, que pueden tener un impacto considerable en la estabilidad de la cimentación y los pilotes.

El cálculo de los esfuerzos en un medio de suelo es un aspecto esencial para el diseño geotécnico. Boussinesq resolvió el problema de los esfuerzos generados en un medio elástico e isotrópico debido a una carga puntual aplicada en la superficie de un medio infinito. Esta solución es fundamental para analizar cómo se distribuyen los esfuerzos en el suelo, especialmente cuando se enfrenta a cargas concentradas, como las que se aplican sobre las cimentaciones de pilotes.

El esfuerzo vertical σ_z causado por una carga puntual en un medio elástico puede ser expresado mediante la solución de Boussinesq. La fórmula es la siguiente:

$$\sigma_z = \frac{3 P}{2 \pi r^2} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right)$$

Donde:

P = es la carga aplicada,

r = es la distancia radial desde el punto de aplicación de la carga,

z = es la profundidad en el suelo desde la carga.

Esta expresión describe cómo los esfuerzos verticales se distribuyen radialmente alrededor de la carga puntual y disminuyen conforme aumenta la distancia desde el punto de aplicación. Este concepto es clave para evaluar cómo las cargas aplicadas sobre los pilotes afectan al suelo circundante, especialmente en capas profundas.

Otro caso relevante es el cálculo del esfuerzo vertical en suelos bajo una carga distribuida uniformemente en un área circular. Este tipo de carga es común en cimentaciones de gran tamaño, como las zapatas o losas de cimentación. En este caso, el esfuerzo vertical σ_z también puede ser calculado utilizando la teoría de Boussinesq, adaptada para una carga distribuida.

La fórmula para un área circular cargada de forma uniforme es:

$$\sigma_z = \frac{P}{2 \pi r^2} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right)$$

Donde (p), es la carga total distribuida sobre el área circular de radio (r), y (z) es la profundidad desde la superficie de aplicación. Este enfoque es útil para analizar la distribución de esfuerzos en suelos bajo cargas distribuidas, y es fundamental para el diseño de cimentaciones extensas que operan bajo cargas uniformemente distribuidas. El estudio del esfuerzo en una masa de suelos bajo diferentes condiciones de carga y filtración es esencial para el diseño de cimentaciones y la prevención de fallas estructurales. Fenómenos como la filtración descendente y las oscilaciones inducidas por el flujo de agua pueden tener un impacto significativo en la estabilidad de las estructuras de pilotes. La solución de Boussinesq para el esfuerzo vertical, tanto en el caso de cargas puntuales como distribuidas, proporciona los datos para entender cómo las cargas afectan a los suelos y cómo se puede diseñar de manera eficiente para mitigar posibles fallas.²⁶

2.6.- Exploración del subsuelo.

La exploración del suelo es un componente fundamental en la planificación y ejecución de proyectos de ingeniería y geotecnia. A través de ella, se busca obtener un entendimiento detallado del terreno, lo que es fundamental para el diseño seguro y eficiente de cimentaciones, estructuras y obras de infraestructura. Los objetivos principales son; determinar la estratigrafía, buscar identificar las diferentes capas de materiales en el subsuelo, como suelos y rocas, junto con sus características específicas (color, textura, estructura). Esta información es vital para prever el comportamiento del terreno bajo carga. De la misma manera nos permite determinar las propiedades como la cohesión, el ángulo de fricción interna, la densidad, la compacidad, y la permeabilidad. Esta información nos ayuda a predecir como el suelo reaccionara bajo condiciones de carga y humedad. Para garantizar que las cimentaciones pueden soportar el peso de la estructura sin fallar. Lo anterior implica análisis de capacidad de carga a través de métodos empíricos y pruebas de carga. También nos permite detectar problemas potenciales, como localizar suelos problemáticos, en el caso de

²⁶ Das, (2013), Fundamentos, pp. 157 – 164.

suelos expansivos, que pueden dilatarse o contraerse, suelos colapsables que pueden perder volumen al saturarse, o rellenos sanitarios que no pueden ser confiables.

El programa de exploración geotécnica tiene como objetivo proporcionar información detallada sobre las condiciones estratigráficas del sitio en estudio, y se estructura en tres etapas fundamentales. La primera etapa, conocida como estudios preliminares, se centra en la identificación y definición inicial de los posibles problemas geotécnicos del área. En esta fase, se realizará un análisis exhaustivo de la información existente sobre las características geotécnicas del sitio. Esto incluye la revisión de estudios anteriores, mapas geológicos y cualquier dato relevante que pueda aportar al entendimiento del entorno. Adicionalmente, se llevarán a cabo visitas de reconocimiento del sitio, permitiendo observar las condiciones in situ y recoger información valiosa sobre el terreno. La segunda etapa implica la recopilación de información adicional necesaria para sustentar la investigación de detalle que se llevará a cabo en la tercera fase. Esta recopilación incluirá no solo datos geológicos, sino también información sobre el uso del suelo, la historia geotécnica de la zona y cualquier factor ambiental que pueda influir en el proyecto.

Finalmente, la tercera etapa consiste en una investigación de detalle que abarca la realización de sondeos y pruebas tanto de campo como de laboratorio. Esta fase es decisiva, ya que los resultados obtenidos permitirán un análisis más preciso de las condiciones del terreno y facilitarán la toma de decisiones informadas en relación con el diseño y la construcción de la obra. Los estudios preliminares son esenciales para establecer una base sólida para la exploración geotécnica. Durante esta etapa, se busca no solo identificar problemas potenciales, sino también determinar los lugares más adecuados para la construcción de la obra. Esto se logra a través de un análisis meticuloso de las condiciones geotécnicas de la zona, así como mediante la recopilación de observaciones directas en el sitio. El objetivo es contar con un diagnóstico preliminar que guíe las siguientes fases del estudio, garantizando así una intervención adecuada y eficiente en el desarrollo del proyecto.²⁷ El objetivo principal de la exploración de subsuelo es obtener los datos necesarios para, determinar las propiedades mecánicas del suelo, Como la resistencia, la compresibilidad, la cohesión, la fricción, entre otras, evaluar la capacidad de carga. Establecer la resistencia del terreno para soportar las cargas que la estructura impondrá sobre él, garantizando que no ocurran asentamientos excesivos ni fallos estructurales, identificar la presencia de agua subterránea.

²⁷ CFE, (2008), Manuales, pp. 33-34.

Conocer el nivel freático y las características hidrogeológicas del área, lo cual es importante para el diseño de cimentaciones y el control de la humedad en el subsuelo. Determinar los riesgos geotécnicos, como deslizamientos de tierra, expansividad del suelo, licuefacción durante sismos, entre otros. Establecer el tipo de cimentación adecuado, dependiendo de las características del terreno, se seleccionará el tipo de cimentación más eficiente y seguro (superficial o profunda).

La exploración de subsuelo incluye diversas técnicas, que varían según el tipo de proyecto, el tamaño del área a investigar y las condiciones del terreno. Los métodos más comunes incluyen:

Sondeos de perforación, son sondeos donde principalmente es utilizada para obtener muestras representativas del suelo. Consisten en perforar el terreno a diferentes profundidades con el objetivo de extraer muestras del suelo y obtener información sobre su composición, resistencia y otras propiedades.

Sondeo a percusión, se utiliza un equipo que golpea el terreno para romper las capas superficiales. Es más económico y rápido, pero menos preciso que otros métodos.

Sondeo rotatorio, consiste en un sistema de perforación rotatorio que permite obtener muestras más limpias y detalladas del suelo, lo que resulta útil para obtener una visión más clara de la estratigrafía del subsuelo.

Sondeo de cono (CPT), el penetrómetro de cono es una técnica de investigación geotécnica que mide la resistencia del suelo a medida que un cono metálico es forzado a penetrar en el suelo. Es útil para determinar la resistencia al corte y la capacidad de carga del terreno.

Pruebas in situ, son pruebas que se realizan directamente en el lugar de exploración, lo que permite obtener datos en tiempo real sobre el comportamiento del suelo bajo condiciones de carga. Entre las más comunes se encuentran:

Prueba de penetración estándar; durante el sondeo, se utiliza un tubo de muestreo que se introduce en el suelo mediante golpes de un martillo. Este método permite medir la resistencia del suelo en función de la cantidad de golpes necesarios para penetrar una distancia determinada. Prueba de carga en placa se aplica una carga sobre una placa de acero situada sobre el terreno y se mide el asentamiento que ocurre en respuesta a esa carga. Esta prueba ayuda a determinar la capacidad de carga del suelo. Pruebas de permeabilidad, determinan

la capacidad del suelo para transmitir agua, lo cual es esencial para proyectos en los que el drenaje o el control de aguas subterráneas son factores críticos.

Geofísica de subsuelo, este sondeo permite obtener información sobre el subsuelo sin necesidad de perforar. Utiliza diversas técnicas de medición física, como la resistividad eléctrica, el perfil de ondas sísmicas o la refracción sísmica, para obtener información indirecta sobre las propiedades del suelo.²⁸

El estudio geotécnico es un proceso sistemático de recopilación de información relevante sobre diversos aspectos del área de interés, incluyendo topografía, geología y el comportamiento de estructuras existentes en terrenos adyacentes al proyecto. Este primer paso es trascendente, ya que proporciona una base sólida para las evaluaciones posteriores. Es fundamental reunir una variedad de documentos y datos, tales como planos topográficos, geológicos y edafológicos, así como cartas que indiquen el uso potencial del subsuelo. Además, se deben incluir informes sobre la estratigrafía de la región y las características estructurales de las edificaciones cercanas. Esta información permite construir un panorama detallado de las condiciones del terreno y su interacción con las estructuras construidas.

Una vez recopilada, la información será objeto de un análisis minucioso. Este estudio preliminar tiene como objetivo identificar las condiciones geotécnicas predominantes en el sitio de estudio, así como posibles limitaciones que puedan surgir durante el desarrollo del proyecto. A través de esta etapa, se busca no solo comprender el contexto geotécnico del área, sino también sentar las bases para las fases siguientes del estudio, garantizando que todas las decisiones futuras estén fundamentadas en un conocimiento sólido y detallado del terreno.

Durante el reconocimiento de campo, se busca obtener información clave sobre varios aspectos del sitio. Esto incluye evaluar la accesibilidad del área, así como la disponibilidad de recursos humanos y materiales necesarios para la ejecución del proyecto. Además, se busca conocer el entorno geológico general, identificar estructuras geológicas relevantes como fallas, fracturas, fisuras y rellenos, y clasificar los suelos superficiales presentes en el terreno. Es igualmente importante estudiar la geomorfología del sitio, los procesos erosivos que puedan estar ocurriendo y el tipo de drenaje superficial y subterráneo. El espesor del suelo también será medido, ya que esta información es esencial para una adecuada interpretación

²⁸ Juárez, (2005), Mecánica, pp. 615 – 623.

geotécnica. Con los datos recopilados durante el reconocimiento, se podrá proponer y/o revisar el programa de exploración geotécnica, asegurando que las futuras fases del estudio estén alineadas con las condiciones reales del terreno y las necesidades específicas del proyecto. Este enfoque sistemático no solo optimiza los recursos utilizados, sino que también contribuye a la toma de decisiones más informadas y acertadas en el desarrollo de la obra.

Los estudios detallados para un proyecto deben llevarse a cabo principalmente durante la etapa de exploración. Sin embargo, su aplicación no se limita exclusivamente a esta fase de la investigación del sitio. Es fundamental que se considere la implementación de las técnicas que se describen más adelante y que se fundamenten en la información obtenida durante la investigación preliminar. De este modo, estos estudios resultan valiosos no solo en la etapa de anteproyecto, sino también durante las fases de construcción y operación de la obra. En términos generales, los procedimientos para el estudio detallado de un sitio se clasifican en dos categorías principales: métodos indirectos y métodos directos. La exploración geotécnica debe llevarse a cabo bajo la dirección de personal calificado en la planificación y ejecución de estos trabajos. Su responsabilidad es organizar las actividades y recopilar la información necesaria para definir de manera confiable las características del subsuelo. La profundidad a la que deben realizarse los sondeos varía según las características de la obra y las condiciones específicas de cada sitio. Un criterio complementario a considerar es llevar los sondeos hasta el punto en el que el incremento de esfuerzos verticales sea del 10 por ciento respecto al esfuerzo vertical inicial, a menos que se encuentre roca. Antes de iniciar los trabajos, el ingeniero supervisor debe informarse sobre el tipo de estructura que se construirá, las condiciones geológicas del área y los tipos de suelos que es probable encontrar en el sitio. Este conocimiento le permitirá evaluar si la información que está obteniendo es adecuada; si no lo es, deberá proponer ajustes a las técnicas de muestreo y al programa de trabajo. A continuación, se presentan las principales actividades que debe llevar a cabo durante la supervisión de campo:

- 1).- Determinar el tipo de muestreador a utilizar en cada etapa del sondeo, basándose en la información proporcionada.
- 2).- Definir la frecuencia de toma de muestras. En general, el muestreo debe ser casi continuo en los primeros metros y en los estratos poco uniformes que se consideren problemáticos. Se puede reducir la cantidad de muestras en estratos más uniformes y a mayores profundidades.

3).- Supervisar y evaluar la calidad del lodo de perforación.

4).- Clasificar los suelos y rocas.

5).- Elaborar un perfil estratigráfico preliminar del sondeo, basándose en la clasificación de las muestras de acuerdo con la técnica de perforación utilizada.

De lo anterior se han implementado métodos de exploración que nos permiten tener un enfoque más preciso en los trabajos de campo, como, por ejemplo, sondeos a cielo abierto. En ciertos casos, es posible aprovechar las excavaciones de acceso para extraer muestras de suelo, ya sean inalteradas o alteradas. Estas excavaciones también permiten observar directamente la estratigrafía y los materiales del sitio, lo que resulta fundamental para una evaluación geotécnica adecuada. Los pozos a cielo abierto son una técnica comúnmente utilizada en este contexto. Por lo general, su profundidad no excede los 10 metros y se excavan en secciones cuadradas de 1.5 metros de lado. Esta forma de excavación es especialmente útil para obtener muestras representativas de las capas de suelo y para realizar observaciones directas del estrato geológico. Sin embargo, es importante considerar que los pozos excavados en materiales poco estables requieren medidas de seguridad, como el ademe con marcos estructurales de madera, para evitar colapsos.²⁹

2.7. Cimentaciones poco profundas: Capacidad de carga.

En ingeniería geotecnia, la cimentación es uno de los componentes fundamentales de cualquier estructura. Se refiere a la parte más baja de una edificación, encargada de transferir la carga de la estructura al suelo sobre el que se asienta. La cimentación desempeña un papel importante en garantizar la estabilidad, seguridad y durabilidad de la estructura, ya que una cimentación deficiente puede llevar a asentamientos desmesurados, fisuras o incluso el colapso total de la construcción. Un diseño adecuado de la cimentación no solo debe garantizar la distribución eficiente de las cargas, sino también evitar que el suelo debajo de ella sea sobrecargado, lo que podría causar fallos en el mismo.

²⁹ CFE, (2008), Manuales, pp. 35- 38.

El factor principal de la cimentación es transferir el peso de la estructura (cargas muertas, cargas vivas, fuerzas sísmicas, entre otras) hacia el suelo de manera controlada. Esta transferencia debe hacerse de tal forma que no se sobrepasen las capacidades de carga del suelo, lo que podría llevar a un asentamiento excesivo o a un fallo por corte del terreno. El fallo por corte se produce cuando el suelo debajo de la cimentación se desliza o se fractura debido a la carga que soporta, lo que compromete la estabilidad de la estructura.³⁰

El diseño de la cimentación requiere una evaluación exhaustiva de la capacidad de carga del suelo, que depende de factores como la composición del suelo, su compactación, su profundidad y su comportamiento ante diferentes tipos de carga. Además, se deben tener en cuenta las condiciones hidrológicas y sísmicas del área para garantizar que la cimentación responda adecuadamente bajo diferentes condiciones de carga y entorno. Las cimentaciones poco profundas son aquellas que se encuentran a una pequeña profundidad respecto al nivel de la superficie del terreno. Por lo general, estas cimentaciones tienen una razón de profundidad de empotramiento con respecto a su ancho menor a 4, lo que las hace prácticas y económicas para estructuras de cargas moderadas y suelos relativamente firmes. Dentro de esta categoría, se incluyen principalmente:

Zapata corrida, es una cimentación que se extiende a lo largo de una pared o columna de carga, distribuyendo el peso de la estructura sobre una mayor área de terreno. Esto ayuda a reducir la presión sobre el suelo y prevenir fallos por corte o asentamientos excesivos. Las zapatas corridas son especialmente útiles en terrenos homogéneos y cuando se trata de edificaciones con paredes continuas o muros de carga.

Losa de cimentación, este tipo de cimentación son más grandes y están diseñadas para distribuir cargas sobre un área extensa. Son especialmente útiles en terrenos con baja capacidad de carga, donde la distribución del peso de la estructura necesita ser más amplia para evitar el sobreesfuerzo del suelo. En vez de usar zapatas individuales, la losa cubre toda el área bajo la estructura, creando una plataforma estable. Esta opción es más costosa que las zapatas corridas, pero ofrece una solución eficiente en suelos débiles.

Capacidad de carga del suelo; es uno de los factores más importantes en el diseño de cimentaciones ya que representa la capacidad de carga hacia el suelo. Esta capacidad se refiere a la máxima carga que el suelo puede soportar sin que se produzca un fallo en la

³⁰ Juárez, (1973), Mecánica II, p. 229,232,233.

estructura, como asentamientos excesivos o desplazamientos laterales. El análisis de la capacidad de carga se basa en varios principios de mecánica de suelos, y se determina principalmente en dos etapas:

Capacidad última de carga, se refiere a la máxima presión que se puede aplicar sobre el suelo antes de que ocurra un fallo por corte. Este fallo se produce cuando el suelo no puede resistir más la carga aplicada y comienza a deslizarse o fracturarse. La capacidad última de carga se calcula utilizando teorías y fórmulas que consideran las características del suelo, como su cohesión, ángulo de fricción interna, y la forma de la cimentación.

Capacidad de carga admisible, es la carga máxima que se puede aplicar al suelo de forma segura durante la vida útil de la estructura, teniendo en cuenta un factor de seguridad. El factor de seguridad es un coeficiente que se aplica para tener en cuenta las incertidumbres y variaciones en las propiedades del suelo y en las condiciones de carga. En general, los factores de seguridad son de aproximadamente 2 a 3 veces la capacidad última de carga, dependiendo de las condiciones del suelo y del tipo de estructura.

Métodos de cálculo de la capacidad de carga. Existen diversos métodos para estimar la capacidad de carga de una cimentación poco profunda, los cuales se basan en la teoría de la mecánica de suelos y la experiencia empírica. De lo anterior se detallan algunos de los métodos más comunes.

Método de Terzaghi y Peck, este es uno de los métodos más tradicionales y ampliamente utilizados para calcular la capacidad de carga de cimentaciones superficiales. Se basa en una fórmula que considera el tipo de suelo, la forma de la cimentación y la profundidad de la misma:

$$Q_{ult} = c' N_q A + \gamma q N_{\gamma} A$$

Donde:

Q_{ult} es la capacidad de carga última de la cimentación.

c' es la cohesión efectiva del suelo.

γ es el peso específico del suelo.

A es el área de la cimentación.

N_q y N_{γ} son factores de capacidad de carga dependientes de la forma de la cimentación

y el tipo de suelo.

q es la presión de la cimentación a nivel del fondo.

Este método se basa en el concepto de que la capacidad de carga última es la suma de las resistencias del suelo superficial a la compresión (proporcionadas por la cohesión del suelo) y la resistencia al deslizamiento en la base de la cimentación (debida a la fricción).

El método de Meyerhof es una mejora del anterior, que considera la influencia de la forma de la cimentación y la resistencia del suelo a diferentes profundidades. En lugar de una fórmula simple, este método utiliza una serie de factores de corrección para diferentes tipos de cimentaciones (zapatas aisladas, zapatas corridas, losas) y para suelos con diferentes comportamientos.

La ecuación para el cálculo de la capacidad de carga última es:

$$Q_{ult} = c' N_q A + \gamma q N_{\gamma} A + q' N_q A$$

Este método se considera más preciso que el de Terzaghi y Peck, especialmente cuando el terreno presenta una mayor variabilidad estratigráfica.³¹

Método de prueba de carga en sitio (ensayo de placa), este método consiste en aplicar una carga controlada sobre una placa colocada en el suelo a la profundidad de la cimentación, midiendo el asentamiento que se produce. La capacidad de carga se determina al observar el comportamiento de los asentamientos bajo diferentes cargas. Este tipo de prueba es muy útil cuando se tiene incertidumbre sobre las propiedades del suelo o cuando se desea verificar los resultados de los cálculos. Sin embargo, tiene limitaciones en cuanto al costo y el tiempo de ejecución.

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de penetración estándar (SPT) o pruebas de penetración continua (CPT) permiten estimar la resistencia del suelo a la penetración, lo que ayuda a predecir la capacidad de carga. Aunque estos métodos no dan una cifra directa de la

³¹ Juárez, (1973), Mecánica II, pp. 269, 271.

capacidad de carga, pueden proporcionar datos de resistencia al corte y otras propiedades que permiten el cálculo de la capacidad de carga de la cimentación.

Tipos de fallos en cimentaciones poco profundas, puede ocurrir si el suelo no es capaz de soportar las cargas impuestas, los fallos más comunes son.

Fallos por deslizamiento lateral: Ocurre cuando la cimentación se desliza lateralmente a través del suelo bajo la acción de cargas horizontales. Esto puede suceder si el suelo no tiene suficiente resistencia para resistir las fuerzas horizontales.

Asentamientos excesivos, un asentamiento excesivo ocurre cuando la cimentación se hunde más de lo esperado debido a la compresión del suelo debajo de la cimentación. Esto puede ser un problema si el asentamiento afecta a la estabilidad de la estructura o crea grietas.

Fallo por cizalladura, este tipo de fallo se produce cuando la tensión en el suelo alcanza un nivel tal que el suelo falla por cizalladura. Puede ocurrir debido a la sobrecarga de la cimentación o a una mala distribución de la carga.

Licuefacción, en suelos saturados, especialmente en zonas sísmicas, el aumento de la presión de poro bajo cargas dinámicas puede causar un colapso temporal de la estructura del suelo, resultando en una pérdida de capacidad de carga.

Consideremos una cimentación continua, que descansa sobre la superficie de un suelo denso de arena o suelo cohesivo rígido. Cuando se aplica una carga de forma gradual sobre la cimentación, el asentamiento de la misma aumentará progresivamente. A medida que la carga aumenta, el asentamiento de la cimentación también lo hace, hasta llegar a un punto crítico.

En un momento determinado, cuando la carga por unidad de área alcanza un valor crítico (q_u), se puede producir una falla repentina del suelo que soporta la cimentación. Esta superficie de falla en el suelo se extiende hasta la superficie del terreno. La carga por unidad de superficie (q_u) que provoca este tipo de falla se denomina capacidad última de carga de la cimentación. En este contexto, la falla que ocurre en el suelo se clasifica como una falla general de corte.

En el caso de una cimentación que descansa sobre un suelo de arena densa o un suelo cohesivo rígido, la falla del suelo ocurre rápidamente cuando se alcanza la capacidad última

de carga. Ya que, el asentamiento aumenta de manera pronunciada, indicando que el suelo ya no es capaz de soportar la carga sin experimentar un deslizamiento o fractura.

Esta falla general de corte se caracteriza por un desplazamiento repentino del suelo que provoca un colapso inmediato de la cimentación. En este tipo de falla, la distribución de las tensiones en el suelo es tan alta que la resistencia al corte del suelo se ve superada, lo que provoca que se deslice una superficie de corte que se extiende hasta la superficie del terreno.

Cuando la cimentación se encuentra sobre suelos de compactación media, como arenas o arcillas de mediana compactación, el comportamiento es algo diferente. A medida que se aumenta la carga sobre la cimentación, el asentamiento sigue aumentando de manera progresiva, pero en este caso la superficie de falla no se extiende instantáneamente hasta la superficie del terreno. En lugar de esto, la superficie de falla se propaga gradualmente desde la cimentación hacia afuera, con líneas continuas indicando la propagación de la falla en el suelo.

Cuando la carga por unidad de área alcanza un valor específico (q_u (1)), se producen sacudidas bruscas en la cimentación, lo que indica que la capacidad del suelo para soportar más carga ha alcanzado un límite crítico. La superficie de falla aún no ha alcanzado la superficie del terreno, pero el comportamiento del suelo comienza a volverse no lineal y el asentamiento se vuelve mucho más pronunciado.

En este escenario, la capacidad última de carga sigue siendo el valor crítico (q_u), pero el comportamiento del suelo después de este punto muestra un aumento exponencial del asentamiento. A medida que la carga sigue aumentando, el suelo experimenta una falla local que, aunque aún no afecta a toda la superficie de la cimentación, genera un asentamiento acelerado. Esta falla se denomina falla de corte local.

Falla por punzonamiento en suelos sueltos. Por otro lado, si la cimentación está sobre un suelo muy suelto, la carga-asentamiento tendrá un comportamiento distinto. En este caso, la superficie de falla en el suelo no se extiende hasta la superficie del terreno, ya que el suelo no es lo suficientemente cohesivo para generar un deslizamiento generalizado. Sin embargo, más allá de la carga máxima de falla, (q_u), la carga-asentamiento se vuelve casi lineal, lo que indica que un aumento en la carga produce un aumento drástico en el asentamiento de la cimentación. Este tipo de falla es conocido como falla por punzonamiento, y se produce cuando la cimentación empuja el suelo hacia abajo, generando una deformación localizada en

la base de la cimentación. En este tipo de suelo, aunque la capacidad de carga última es alcanzada, el modo de fallo no implica un colapso generalizado, sino un punzonamiento local bajo la cimentación.³²

2.8. Prueba de penetración estándar (STP).

El equipo de prueba de penetración estándar, conocido comúnmente como (SPT, standard penetration test), es ampliamente utilizado en la ingeniería geotécnica para evaluar las características del suelo y su capacidad de carga. Este equipo ofrece varias ventajas y que deben considerarse en función de las necesidades del proyecto. Su simplicidad de uso, permite tener más oportunidad en el equipo está diseñado para ser operado con facilidad, lo que permite que ingenieros y técnicos realicen pruebas sin necesidad de una capacitación extensa. Esto facilita la implementación de pruebas en el campo, especialmente en proyectos donde el tiempo es un factor crítico. Los costos, en comparación con otros métodos de investigación de suelos que requieren tecnología avanzada o equipos electrónicos, el (SPT) es generalmente más económico. Esto lo convierte en una opción atractiva para proyectos con presupuestos limitados. La portabilidad, muchos modelos de equipos de SPT son compactos y ligeros, lo que facilita su transporte y configuración en diferentes sitios de trabajo. Esto es especialmente útil en entornos remotos o en proyectos donde el acceso puede ser difícil.

Una de las principales ventajas del (SPT) es la capacidad de obtener resultados en tiempo real. Esto permite tomar decisiones rápidas basadas en los datos obtenidos, lo que puede acelerar el proceso de diseño y construcción. Aunque la prueba proporciona información valiosa, su precisión puede ser menor en comparación con equipos más avanzados o automatizados. Esto es especialmente relevante en suelos heterogéneos o en condiciones complejas donde se requiere un análisis más detallado. La calidad de los resultados obtenidos puede depender significativamente de la habilidad y experiencia del operador. Diferencias en la técnica de perforación, manejo del equipo y la interpretación de los resultados pueden introducir variabilidad y sesgo en los datos.³³

³² Das, (2013), Fundamentos, pp. 478 - 479.

³³ Kseres, (2007) Ensayo, pp.5-7.

La prueba, puede no ser adecuado para ciertos tipos de suelos, como aquellos que son muy compactos, cohesivos o inestables. En tales casos, puede ser necesario recurrir a métodos de prueba alternativos, como la penetración dinámica o métodos de perforación más sofisticados. Con el tiempo y el uso continuo, los componentes mecánicos del equipo pueden desgastarse, lo que podría afectar la precisión y confiabilidad de las pruebas. Es importante realizar un mantenimiento regular y verificar el estado del equipo antes de cada uso. Al evaluar el uso de un equipo de prueba de penetración estándar, es fundamental considerar estos factores en función de las necesidades específicas del proyecto, el tipo de suelo, y el contexto del trabajo. Una adecuada planificación y selección del método de prueba asegurará que se obtengan datos representativos y útiles para el análisis geotécnico. El equipo de prueba de penetración estándar, es útil hasta profundidades de aproximadamente 10 a 20 metros, aunque esta capacidad puede variar en función de varios factores. La profundidad efectiva puede verse influenciada por, la composición y la estructura del suelo, ya que juegan un papel fundamental en la capacidad de penetración del equipo. Suelos blandos, como arenas y limos, generalmente permiten una penetración más sencilla. En contraste, suelos compactos o cohesivos, como arcillas duras o rocas, pueden limitar la profundidad de la prueba, haciendo necesario el uso de métodos alternativos. Otros factores que inciden, pueden ser el nivel freático, la presencia de materiales inusuales, y la compactación del terreno, pueden afectar la eficacia de la prueba, por ejemplo, en terrenos saturados, la resistencia del suelo puede cambiar, lo que influye en la precisión de los resultados.

La calidad del equipo también es determinante. Existen variaciones en el diseño y capacidad del equipo que pueden influir en su efectividad a diferentes profundidades. Equipos más avanzados o especializados pueden permitir la penetración a mayores profundidades y bajo condiciones más difíciles. A medida que se perfora a mayores profundidades, es fundamental tener en cuenta que la precisión y representatividad de los resultados pueden verse comprometidas. Las principales consideraciones incluyen, variabilidad en profundidades mayores, es más probable encontrar variaciones en las propiedades del suelo. Esta heterogeneidad puede dificultar la interpretación de los datos y la representatividad de las muestras obtenidas. A mayores profundidades, el peso de las capas de suelo superiores puede influir en la resistencia al avance de la prueba, lo que podría llevar a una subestimación o sobreestimación de la resistencia del suelo.

El (STP) está diseñado para evaluar principalmente suelos no cohesivos. En suelos muy cohesivos o en rocosos, los métodos de perforación alternativos, como la perforación rotativa

o el uso de sondas especiales, pueden ser más apropiados para obtener datos confiables. Existen métodos alternativos en casos donde el (STP) puede no ser adecuado, se recomienda considerar métodos de perforación más especializados, tales como. Perforación rotativa, permite una penetración más profunda y es útil en formaciones rocosas o suelos difíciles.

Una de las contribuciones más significativas de la prueba, es la capacidad para identificar la estratificación del suelo en el sitio de estudio. A través del análisis de los diferentes valores de N, obtenidos a diversas profundidades, los ingenieros pueden inferir la composición estratigráfica del terreno. Es decir, pueden conocer las capas de suelo que existen debajo de la superficie, su espesor, su densidad y su resistencia. Esta información es decisiva, ya que cada capa del terreno puede tener propiedades diferentes, lo que influye en el comportamiento de la cimentación y en el comportamiento general de la estructura en su totalidad.

Al conocer la estratificación del suelo, se pueden diseñar cimentaciones más precisas y eficaces, adecuadas a las características del terreno en cada nivel de profundidad. Además, pueden prever cómo se comportará el suelo en condiciones de carga, y anticipar problemas como asentamientos diferenciales, desplazamientos laterales o incluso fallas en el terreno. Con esta información, se pueden elegir las técnicas de cimentación más adecuadas, como pilotes, losas, zapatas o cimientos profundos, y garantizar la estabilidad de la estructura a lo largo del tiempo.³⁴

Además del martillo de caída, el equipo de (SPT) puede incluir dispositivos de elevación, que pueden ser manuales, mecánicos o automáticos. Estos dispositivos son esenciales para manejar el martillo de manera precisa y garantizar la eficiencia del proceso. El control preciso de la cantidad de energía utilizada y el registro exacto de los golpes proporcionan datos fiables para las interpretaciones geotécnicas.

Los resultados de la prueba, se expresan en términos del número de golpes necesarios para penetrar una distancia de 30 cm del suelo. Este número, conocido como valor N, es fundamental, ya que se utiliza para estimar diversas propiedades del suelo, entre ellas su capacidad de carga. El valor N, también permite clasificar el tipo de suelo presente en el sitio de estudio. Por ejemplo, suelos con valores N, altos indican materiales más densos y resistentes, como arenas consolidadas o arcillas duras, mientras que valores N, bajos suelen

³⁴ Rojas (2021), <https://www.youtube>.

señalar suelos más blandos o suelos con un alto contenido de agua, lo que podría indicar una baja capacidad de carga y posibles problemas de estabilidad.³⁵

La interpretación de los valores N, también permite identificar posibles zonas problemáticas en el terreno, como capas de suelo que puedan ser fácilmente deformables o inestables, lo que afectaría la estabilidad de la estructura proyectada. Estos resultados son utilizados no solo para determinar la capacidad de carga, sino también para prever el comportamiento del terreno bajo cargas dinámicas, como las generadas por terremotos, tráfico pesado o maquinarias industriales. Una de las principales ventajas de la prueba de penetración estándar es su bajo costo en comparación con otras pruebas geotécnicas más complejas, lo que la convierte en una opción accesible para la mayoría de los proyectos. Además, puede proporcionar resultados inmediatos, lo que facilita la toma de decisiones en el sitio de construcción. A pesar de ser una técnica sencilla, la (SPT) ofrece una gran cantidad de información útil sobre la resistencia y las características del suelo.

La prueba de penetración estándar, podemos obtener muestras alteradas. Es importante señalar, que existen más formas de obtener la información, y están en función de la tecnología. Ya que los diferentes tipos de exploración, nos conducen a presentar diseños de cimentaciones que resistan las cargas aplicadas y los movimientos del terreno, minimizar los riesgos, identificando los problemas potenciales, antes de que se conviertan en fallas costosas. Y enfocar siempre en todos los ámbitos, el cumplimiento normativo, con las regulaciones locales y estándares de construcción.³⁶

2.9. Normatividad de la prueba.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX – C- 431-2021. Este Proyecto de Norma Mexicana establece la obtención de muestra alterada e inalterada como sigue:

Método de muestreo, conocido como penetración estándar (SPE o SPT, por sus siglas en inglés), para el hincado de un muestreador de tubo liso y/o tubo partido para obtener una muestra representativa alterada de suelo y una medida de la resistencia del suelo a la

³⁵ CFE, (2013), Exploración, pp. 1 – 5.

³⁶ Rojas, (2020), <https://www.youtube>.

penetración del muestreador. Método de muestreo, mediante el empleo de tubos de pared delgada para obtener una muestra representativa inalterada de suelo.³⁷

El ensayo de penetración estándar (SPT) es uno de los métodos más utilizados para la evaluación de la resistencia de suelos, especialmente en contextos de ingeniería geotécnica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que su aplicación no es universal y presenta limitaciones significativas. En particular, esta prueba es más adecuada para suelos arenosos, donde su capacidad para proporcionar información útil sobre la resistencia y compacidad es óptima. En contraste, su uso en suelos arcillosos blandos, ha demostrado ser inapropiado en la mayoría de los casos. Esto se debe a las características particulares de estos suelos, que pueden alterar los resultados del ensayo y llevar a interpretaciones erróneas si no se manejan con el debido cuidado. Cuando se utiliza en suelos arcillosos, la única justificación válida puede ser la obtención de muestras alteradas, que permiten realizar identificación y clasificación, así como la determinación de propiedades índice. Sin embargo, para cualquier análisis estructural o de diseño que dependa de la resistencia del suelo, es fundamental considerar otros métodos de evaluación más adecuados para este tipo de materiales.

La adecuada elección del método, así como el cumplimiento riguroso de los procedimientos estandarizados, son fundamentales para obtener resultados que sean verdaderamente útiles y confiables. La interpretación de los datos derivados de esta prueba debe hacerse con un entendimiento claro de sus limitaciones, especialmente en suelos arcillosos, donde la dinámica del material puede influir significativamente en los resultados. Por lo tanto, siempre que se utilice el (SPT), es recomendable complementar sus resultados con otras metodologías de análisis que permitan una evaluación más completa del comportamiento del suelo.

En cuanto la normativa (ASTM, American Society for Testing and Materials), el valor N, que se reporta en este ensayo representa la resistencia a la penetración del suelo. Este valor se expresa en términos del número de golpes, lo que permite una evaluación cuantitativa de la capacidad de carga y otras propiedades del suelo. La comparación de los resultados obtenidos de los diferentes equipos nos permitirá no solo validar la eficacia de cada uno, sino también comprender mejor cómo las distintas metodologías de hincado influyen en la precisión de las mediciones de resistencia del suelo. Esto, a su vez, proporcionará información valiosa para la

³⁷ DOF, (2021), Norma, p. 1.

optimización de técnicas de evaluación geotécnica en proyectos de construcción y otras aplicaciones relacionadas.³⁸

³⁸ Rojas, (2020), <https://www.youtube>.

Capítulo 3.- Proyecto. Desarrollo. Propuesta.

Proyecto.

En un contexto regional, se realizaron pruebas de penetración estándar, en el estado de Oaxaca, con el propósito de realizar exploraciones geotécnicas para obtener parámetros de resistencia de los suelos, para fines de diseño de cimentaciones para el proyecto de edificación, en el área de valles centrales.

Macro localización.



Fuente, [www. biblicad.com](http://www.biblicad.com) 2022.

En forma simultánea se realizaron comparativas en las mismas pruebas con el propósito principal de desarrollar porcentajes de la prueba para conocer la transferencia de energía, en tres equipos diferentes, un equipo manual, uno mecánico, y uno más automático, ya que se tienen valores estimados para determinar el porcentaje, de acuerdo a la ASTM.

Considerando lo anterior como el valor regulado y aprobado por la normatividad, se ha visto que estos valores de energía, difieren por el equipo utilizado, llevando, a que los resultados difieren, y como consecuencia el resultado está en función directa del método desarrollado, pero también se ha revisado que varios equipos no se encuentran calibrados o dependen de los procesos usados en campo. En el primer trabajo realizado en forma, manual, se realizó con el apoyo de trabajos de excavación a cielo abierto, y con ello iniciar la primera prueba.

La segunda prueba se realizó con el apoyo mecánico, de un malacate, comúnmente conocido como cabeza de gato, por sus características, para sujetar y manipular la soga, a la polea y el martinete. El tercer equipo fue un sistema automático, que se desarrolló más limpio en termino de número de gente para ejecutar el ensaye. Con este equipo el ritmo de golpeo es constante, la altura siempre es la misma, la verticalidad, está asegurada. En términos de calidad es por mucho mejor. De forma paralela a estas pruebas, se implementaron objetivos para obtener resultados de propiedades, índice.³⁹

El procedimiento estándar de la (SPT) se llevó a cabo siguiendo una serie de pasos que se han estandarizado a nivel internacional, lo que garantiza su fiabilidad y precisión. La prueba comienza con la preparación del sitio y la instalación del equipo adecuado. El lugar seleccionado para realizar la prueba debe ser representativo del terreno que se está evaluando, y es común realizar una perforación inicial para introducir el tubo de muestreo en el suelo. El tubo es generalmente de 2 pulgadas de diámetro y puede tener longitudes variables, pero las más comunes son tramos de 1.5 metros. Los implementos con que se dispusieron en la prueba se componen de la siguiente manera; un martinete que debe de tener el peso de 63.5 kg. una guía para permitir la caída, un tubo partido muestreador o cuchara media caña, que permite sacar la muestra de una forma fácil, barras de perforación, así como un malacate, comúnmente llamado cabeza de gato, que permite tomar la soga, pasarlo por la polea, y un tripie, así como herramienta menor, que consiste en llaves para asegurar las barras roscadas (llaves inglesas). El inicio de esta prueba, es mediante el izado de la tubería y el muestreador, a una altura de 76 cm. Los cuales están divididos en tres tramos de 15 cm de los cuales, los primeros 15, no se contemplan, por los disturbios que se tienen, en el momento de la caída, y solo se toman en cuenta los 30 cm restantes. Una vez conocido el valor de N, que es el indicador de la resistencia del suelo. En la prueba estándar, se obtienen básicamente muestras alteradas, que nos permiten conocer las propiedades, índice, (contenidos de

³⁹ Rojas, (2020), <https://www.youtube>

humedad, granulometría, y contenido de finos). las cuales nos facilitan clasificar e identificar los suelos y estimar sus propiedades mecánicas.

La elección del método de muestreo es decisiva, para asegurar que las muestras obtenidas sean representativas del terreno, cada método tiene sus ventajas y se elige según el tipo de suelo y la profundidad requerida, una vez obtenida, se realizan diversos ensayos en laboratorio para evaluar sus propiedades, como, por ejemplo; granulometría, límite de plasticidad y líquido, ensaye de compresión uniaxial y triaxial. Es importante evaluar el suelo ante condiciones estáticas y dinámicas, lo anterior en referencia a la capacidad de carga ante la respuesta a fuerzas como sismos o vibraciones, así como condiciones geológicas locales, esto bajo condiciones y antecedentes regionales. La interpretación de los datos obtenidos es esencial para el diseño de estructuras. Del análisis geotécnico nos proporcionara información para el diseño de fundaciones, modelado de asentamientos, prever posibles problemas a largo plazo.⁴⁰

La estratigrafía del sitio, es fundamental entender la disposición vertical de los diferentes estratos de suelo presentes. Esto incluye identificar las capas, su grosor y la secuencia en la que se encuentran, lo que permitirá anticipar su comportamiento ante cargas. Clasificación geotécnica de los suelos, cada estrato de suelo debe ser clasificado según sus características geotécnicas. Esto incluye determinar si se trata de suelos cohesivos, no cohesivos, granulares, entre otros, lo cual es fundamental para el análisis de estabilidad y el diseño de estructuras.

Compacidad relativa o consistencia, es importante evaluar la compacidad relativa o la consistencia de cada tipo de suelo identificado en el perfil estratigráfico. Esto ayuda a entender la capacidad de soporte de los suelos y su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga. Propiedades mecánicas, se deben determinar varias propiedades mecánicas de los suelos en cada estrato, tales como:

Resistencia al esfuerzo cortante. esta propiedad es vital para evaluar la capacidad del suelo para soportar cargas sin fallar. La compacidad son indicadores de la densidad del suelo y su capacidad para resistir deformaciones. Permeabilidad, comprender la velocidad a la que el agua puede moverse a través del suelo es determinante para el diseño de sistemas de drenaje y para la evaluación de la estabilidad de taludes. Rigidez y compresibilidad, Estos parámetros

⁴⁰ Crespo, (2004), Mecánica, pp. 43-60.

determinan cómo los suelos se deforman bajo carga y su capacidad de recuperar su forma original.

Los métodos indirectos son herramientas valiosas en la etapa de reconocimiento preliminar de una zona, especialmente cuando se necesita obtener una orientación general o datos aproximados sobre la estratigrafía, las discontinuidades y las condiciones geológicas generales del sitio. Estos métodos permiten realizar una evaluación inicial sin la necesidad de realizar excavaciones o perforaciones extensivas, lo que ahorra tiempo y recursos. El trabajo se centra de inicio con excavaciones a cielo abierto, para conocer la estratigrafía (foto 1), la cual se lleva a cabo, por medio de una retroexcavadora a una profundidad de 2.0 m. y a partir de esto poder realizar la primera prueba con equipo manual.

Foto 1. Excavación a cielo abierto



Fuente: Sismaxtor- www.youtube.com/@sismaxtor

Esta técnica puede ser útil en situaciones específicas donde la geología lo permita, pero no es la opción más práctica en la mayoría de los casos. Por otro lado, las zanjas se utilizan principalmente para estudios geotécnicos que abordan problemas cuya influencia es superficial. Estas excavaciones son menos profundas y permiten un acceso rápido a las capas superiores del suelo. Sin embargo, su aplicación está limitada a situaciones donde no se requiere un estudio más profundo de la estratigrafía. Cuando se excavan pozos a cielo abierto por debajo del nivel freático, es esencial instalar un sistema de bombeo para extraer el agua acumulada, lo que garantiza la seguridad y la viabilidad de los trabajos de campo.

Foto 2. Excavación a cielo abierto



Fuente: Sismaxtor- www.youtube.com/@sismaxtor

Este sistema es recomendable para mantener un ambiente de trabajo seco y facilitar el acceso a las muestras (foto 2). Esta técnica de excavación es aplicable a todos los tipos de suelo, aunque es más eficiente en suelos cohesivos, donde la estabilidad es generalmente mayor. En suelos granulares, en cambio, pueden surgir mayores dificultades debido a su tendencia a colapsar o a su inestabilidad durante la excavación, lo que requiere un manejo más cuidadoso y posiblemente técnicas adicionales de soporte.⁴¹

Durante la exploración del subsuelo, es fundamental obtener muestras de suelo que sean representativas de las condiciones geotécnicas del área. Existen dos tipos principales de muestras que se pueden recolectar: muestras alteradas y muestras no alteradas.

Las muestras alteradas son aquellas que han sido modificadas en alguna medida durante el proceso de recolección. A pesar de esta alteración, estas muestras pueden ser utilizadas en diversas pruebas de laboratorio, siempre que se mantenga su representatividad.

⁴¹ CFE, (2008), Manuales, pp. 39-42.

Es importante destacar que, debido a los cambios que sufren durante la recolección, las muestras alteradas no son adecuadas para pruebas que requieren condiciones inalteradas, como la consolidación, la conductividad hidráulica o las pruebas de resistencia al corte. Para estos ensayos, es imprescindible utilizar muestras no alteradas.

Las muestras no alteradas se obtienen de manera que se minimice cualquier perturbación en la estructura del suelo. Este tipo de muestras es esencial para obtener resultados precisos en las pruebas mencionadas anteriormente. El procedimiento más común para la recolección de estas muestras es a través del uso de tubos de pared delgada, que permiten extraer el suelo sin alterarlo significativamente. Estos tubos se insertan en el suelo y se extraen con el material intacto, lo que garantiza que la muestra conserve sus características originales.

La correcta recolección de muestras de suelo es un paso crítico en la exploración geotécnica y debe realizarse con atención y precisión. La elección entre muestras alteradas y no alteradas depende del tipo de ensayos que se deseen realizar, y es esencial seguir procedimientos estandarizados para asegurar la validez de los resultados obtenidos en el laboratorio. Además, la calidad de las muestras influye directamente en el análisis subsiguiente, afectando la interpretación de los datos y, por ende, las decisiones de diseño. Por lo tanto, es fundamental que, en la recolección de muestras, el personal esté debidamente capacitado y comprendan la importancia de cada tipo de muestreo. Un enfoque metódico y riguroso no solo garantiza la representatividad de las muestras, sino que también minimiza el riesgo de errores que podrían comprometer la viabilidad del proyecto. En última instancia, un muestreo adecuado contribuye a obtener buenos resultados.⁴²

Al finalizar un programa de muestreo del suelo, es fundamental someter tanto el suelo como las muestras de roca recolectadas en el campo a una observación visual minuciosa y a las pruebas de laboratorio adecuadas. Una vez que se ha recopilado toda la información necesaria, se elabora un informe detallado de la exploración del suelo. Este documento es esencial tanto para el equipo de diseño como para servir de referencia durante los trabajos de construcción. La estructura y el contenido del informe pueden variar en función de la naturaleza del proyecto. Sin embargo, es importante que cada informe incluya los siguientes elementos fundamentales. El alcance de la Investigación, debe definir claramente los objetivos

⁴² Das, (2013), Fundamentos, p. 293.

de la exploración y los métodos empleados, proporcionando un contexto sobre lo que se espera lograr con el estudio.

La descripción de la estructura propuesta debe incluir detalles sobre la estructura para la cual se ha realizado la exploración del subsuelo, especificando su tipo, uso y dimensiones. Una Descripción del sitio, esta debe abordar la ubicación geográfica del sitio, incluyendo información sobre las estructuras existentes, cualquier característica única del entorno que pueda influir en el proyecto. Una configuración del sitio se debe ofrecer un análisis geológico del área, destacando las formaciones presentes, su composición y cualquier información relevante sobre la estabilidad del terreno. En los detalles del campo de exploración es esencial indicar el número de perforaciones realizadas, la profundidad alcanzada en cada perforación, el tipo de métodos de perforación utilizados, y cualquier otro aspecto técnico relevante.

En la descripción general de las condiciones del subsuelo aquí se deben resumir las condiciones encontradas, basándose en las muestras de suelo y los resultados de las pruebas de laboratorio. Esto incluye la resistencia a la penetración estándar, así como otras pruebas relevantes. Las condiciones de la capa freática es importante documentar la profundidad de la capa freática y su variabilidad, ya que esto puede afectar el diseño de la cimentación. Las recomendaciones de cimentación deben incluir el tipo de cimentación recomendada, la capacidad de carga admisible del suelo, y cualquier procedimiento especial de construcción que pueda ser necesario. También se deben considerar alternativas de diseño de cimentaciones y analizarlas en función de los datos obtenidos. Las conclusiones y limitaciones de las investigaciones, deben resumir los hallazgos más importantes de la exploración, y se deben señalar las limitaciones del estudio, como las condiciones no observadas o las variaciones geológicas que no se pudieron evaluar completamente. Además de estos elementos textuales, se debe de adjuntar, mapa de ubicación del sitio que proporcione una visión general del área de estudio y su contexto geográfico.

Los resultados de las pruebas de laboratorio presenten los datos obtenidos en las pruebas realizadas a las muestras, incluyendo gráficos y tablas que resuman la información. Presentaciones gráficas especiales esto puede incluir diagramas geológicos, secciones transversales del suelo, o cualquier otra ilustración que aporte claridad a los hallazgos. Es importante que los informes sean bien estructurados y documentados. Un informe detallado y preciso no solo facilitará la toma de decisiones durante la fase de diseño, sino que también será una herramienta valiosa para abordar problemas de cimentación que puedan surgir

durante la construcción. Al proporcionar un análisis exhaustivo de las condiciones del subsuelo y recomendaciones fundamentadas, se garantiza una base sólida para el desarrollo seguro y eficiente de cualquier proyecto de construcción. información necesaria para mitigar riesgos y optimizar el rendimiento estructural a largo plazo.⁴³

Foto 3. Muestras inalteradas



Fuente: www.geoest.com

La obtención de muestras de suelo (foto 3). es un aspecto fundamental en la ingeniería geotécnica que requiere una atención meticulosa a los detalles y un enfoque sistemático. La correcta realización de este proceso no solo asegura datos confiables para el diseño de estructuras, sino que también ayuda a mitigar riesgos asociados con el comportamiento del suelo. Un muestreo efectivo no solo garantiza la calidad de la información obtenida, sino que también minimiza los riesgos asociados con el comportamiento del suelo en el sitio de estudio. Existen dos tipos principales de muestras de suelo: alteradas e inalteradas. Muestras alteradas estas muestras son aquellas que han sufrido cambios en su estructura y propiedades durante el proceso de extracción. Son comúnmente obtenidas mediante sondeos a cielo abierto, donde se excavan secciones del suelo que, aunque útiles para ciertos ensayos, pueden no reflejar las condiciones naturales del material.

⁴³ Das, (2003), Fundamentos, pp. 326 y 327.

Muestras inalteradas, son aquellas que se extraen de tal manera que se preservan sus características originales. Para obtener muestras inalteradas, es fundamental seguir un proceso riguroso que incluye el uso de materiales específicos para su protección, asegurando que no se alteren por la exposición al ambiente. Este tipo de muestreo es crítico para ensayos que requieren un conocimiento preciso de las propiedades del suelo, como la resistencia al corte o la consolidación. Uno de los desafíos más comunes en el muestreo de suelos es asegurar que la profundidad de las muestras sea la adecuada. A menudo, se comete el error de limitar el muestreo solo a las profundidades donde se prevé que se desplantara una cimentación. Sin embargo, el comportamiento del suelo puede presentar riesgos significativos en capas más profundas, donde se encuentran condiciones geotécnicas diferentes.

Para abordar esto, es esencial realizar perforaciones a profundidad suficiente, utilizando métodos adecuados como, barrenas manuales, Son herramientas que permiten llegar a estratos más profundos y obtener información valiosa sobre la composición del suelo. Tubos Shelby, diseñados para la obtención de muestras inalteradas, estos tubos permiten la extracción de cilindros de suelo con mínima perturbación. La profundidad a la que se debe realizar el muestreo depende de varios factores, incluyendo el tipo de suelo encontrado, las condiciones del sitio, y el peso y tipo de estructura que se está considerando. Las decisiones deben basarse en un análisis previo de las condiciones geológicas del área. Registro de datos es fundamental llevar un registro meticuloso de los espesores y tipos de materiales encontrados durante el muestreo. Esto incluye identificar capas de arena, arcilla, limo y mezclas, lo que permitirá crear un perfil geotécnico del sitio. Un perfil detallado es esencial para comprender cómo se comportará el suelo bajo carga y para prever posibles problemas en el futuro.

Para llevar a cabo un muestreo efectivo, se debe desarrollar un programa de exploración bien definido. Este programa debe incluir, estudios preliminares, Incluir un análisis inicial del área, revisando mapas geológicos y estudios anteriores para establecer una base de conocimiento en Campo esta fase permite conocer el entorno e identificar suelos superficiales, así como características relevantes como rellenos, drenaje superficial y posibles fallas geológicas.⁴⁴

⁴⁴ Crespo, (2004), Mecánica, pp. 31-38.

Foto 4. muestra alterada



Fuente: Exploración, 2020 <https://www.youtube>.

El procedimiento se realiza con una perforación hasta una profundidad deseada, generalmente utilizando una perforadora de barrena. El tubo de muestro se colca en la parte inferior del orificio (foto 4), asegurándose de que esté alineado correctamente. Una vez realizado estos trabajos previos, se deja caer el martinete sobre el émbolo en la parte superior del tubo de muestro, se registra el número de golpes necesarios para que el tubo penetre los primeros 15 cm y enseguida los siguientes 30 cm. El número de golpes necesario para completar la penetración de 30 cm anotando como el valor n . es frecuente que la prueba se repita en diferentes profundidades para obtener un perfil del suelo.

El valor de N , es indicador de la densidad del suelo; valores de N , bajos (menos de 5) sugieren suelos blandos o sueltos, mientras que valores altos (más de 30) indican suelos densos y resistentes. Este valor se utiliza en diversas fórmulas y estándares de diseño para evaluar la capacidad de carga y el comportamiento del suelo.

La prueba tiene varias aplicaciones dentro de la geotecnia, como, por ejemplo, para el diseño de cimentaciones, ya sean pilotes, zapatas, o losas. La resistencia del suelo medida, ayuda a determinar el tipo de cimentación más adecuado para un proyecto específico. La prueba nos proporciona información sobre capas del suelo, permitiendo identificar la composición, color, condición y características de cada estrato. Esta información es importante para proyectos que requieren excavaciones profundas o que están en áreas con suelos problemáticos. En

zonas propensas a terremotos, la prueba es esencial para la posible licuación del suelo y otros efectos sísmicos. Los resultados ayudan a establecer medidas preventivas en el diseño de estructuras. La información obtenida puede ser utilizada para evaluar la capacidad del suelo por contener contaminantes, así como planificar sitios contaminados. A pesar de su amplia utilización, la prueba presenta ciertas limitaciones.

El proceso de penetración puede alterar las propiedades naturales del suelo, especialmente en suelos cohesivos y finos, esto puede llevar a una subestimación de la resistencia real del suelo. La prueba puede ser influenciada por factores como la técnica de perforación, la variabilidad del suelo y la experiencia del operador, lo que puede resultar en un rango amplio de valores n , en un mismo sitio. La interpretación de los resultados debe hacerse con precaución y en el contexto de otros datos geotécnicos, ya que un solo valor N , puede no ser suficiente para caracterizar completamente el comportamiento del suelo. La prueba de penetración estándar es una herramienta esencial en la ingeniería geotécnica, que proporciona datos fundamentales para el diseño y la construcción de estructuras seguras. Su metodología relativamente sencilla y su capacidad para ofrecer información valiosa sobre las propiedades del suelo la convierten en una técnica ampliamente utilizada en investigaciones geotécnicas. Sin embargo, complementar la (STP) con otros métodos de prueba y análisis para obtener un perfil más completo y preciso del terreno, garantizando así la seguridad y la efectividad de las estructuras construidas sobre él.⁴⁵ Otras ventajas del ensaye, es que al ser un dispositivo de toma muestras, permite observar el terreno en que se ha realizado la prueba en una identificación visual inmediata, así como determinar la humedad de los suelos.

Es importante señalar que existen correlaciones para suelos cohesivos, aunque el ensayo puede no ser tan fiable debido a la rápida disipación de los incrementos de presión intersticial generados durante la prueba. Sin embargo, este criterio se ha debatido y hoy se acepta que los resultados pueden ser igualmente válidos en suelos cohesivos. Independientemente de la validez de las correlaciones, el golpeo obtenido es un dato valioso para la caracterización y el diseño geotécnico. Un factor importante de señalar, es la influencia de la profundidad, ya que se ha observado, la penetración en arenas depende de la resistencia del terreno, y a su vez está relacionada con el ángulo de rozamiento y el índice de densidad.⁴⁶

⁴⁵ Das, (2013), Fundamentos, pp.293-296.

⁴⁶ Das, (2013), Fundamentos, p.299.

Desarrollo.

El análisis de la transferencia de energía en la prueba de penetración estándar es fundamental para garantizar la precisión en la caracterización del suelo. Las variaciones en los resultados entre diferentes equipos utilizados pueden proporcionar información valiosa sobre su eficiencia y las condiciones del terreno, a medida que se realizan pruebas, por esta razón es importante aplicar correcciones adecuadas y evaluar cada variable que pueda influir en la transferencia de energía. La investigación nos permitirá no solo entender mejor las propiedades del suelo, sino también optimizar los métodos de ensayo. Para obtener un valor representativo de la resistencia del suelo, este valor deber de ajustarse a una energía del 60 por ciento, generando así un valor de N_{60} . Este ajuste se realiza utilizando la formula:

$$N_{60} = C_B \times C_S \times C_x \times \left(\frac{E R_F \times N_{st} P}{60} \right)$$

Donde:

$E R_F$ = eficiencia del martillo

C_B = corrección por diámetro del orificio

C_S = corrección por muestreador (cuchara de Tersaghi)

C_R = corrección por largo de barra

La parte más crítica de este proceso es la eficiencia del martillo, ya que esta afecta directamente la transferencia de energía. La eficiencia se puede analizar a partir de la energía de caída libre, que se refleja en los componentes del martinete, incluyendo su peso, la gravedad y la altura de caída utilizada durante la prueba. Esta caída del martillo es un aspecto clave en la transferencia de energía. La cual la podemos obtener de los principios de la energía cinética, y mediante su fórmula utilizando la siguiente relación:

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Donde para nuestro análisis, consideramos los siguientes valores:

Aceleración de la gravedad: $g = 9.81 \text{ m} / \text{s}^2$

Altura de caída: $h = 0.76 \text{ m}$

Peso del martillo: $w = 63.5 \text{ kg}$

La energía de caída se calcula como:

$$E_i = w \times h = 63.5 \times 9.81 = 622.9 \text{ N} \cdot \text{m (Joules)} \times 0.76 = 473.4$$

La energía la podemos encontrar como: 473 Nm (caída libre).

Esto implica que la energía disponible al momento del impacto es de aproximadamente 622.9 Joules. Sin embargo, la energía efectiva que realmente se transfiere al suelo es considerablemente menor debido a varios factores de fricción que se presentan, tales como la fricción en la soga, en la polea y la forma en que se desarrolla el golpeo. Además, factores humanos y deficiencias en los equipos pueden contribuir a la reducción de la energía transferida. Para analizar la eficiencia del hincado del equipo, se puede establecer la relación:

$$ER_F = \frac{E_i}{\text{Energía de caída l.}}$$

ER_F = energía de referencia

E_i = energía de hincado del equipo

Esto nos permite evaluar el porcentaje de energía que se pierde durante el proceso de hincado. Si un equipo presenta una baja eficiencia, digamos alrededor del 45% al 48%

respecto a los 473 nm. el resultado tendría que en algún lugar se fricciona mucho, y como consecuencia golpea despacio, por lo tanto, el número de golpes para hincar es diferente, por la energía entregada.⁴⁷

Por lo tanto, es fundamental que todo equipo utilizado para las pruebas sea sometido a un proceso de corrección que debe reflejarse en un 60 por ciento. Esta cifra se basa en una correlación establecida a partir de investigaciones previas y esta normalizada a través de la (ASTM, American Society for Testing and Materials), específicamente bajo el método de prueba estándar para la medición de energía en penetrómetros dinámicos. Esta normativa nos permite establecer y aplicar la siguiente formula:

$$N_{60} = N_{STP} \left(\frac{E_{RF}}{60} \right)$$

Es importante destacar que la misma normatividad también ofrece la posibilidad de estimar el valor de corrección en función del equipo que se utilice. Sin embargo, en la actualidad, existen dispositivos avanzados que permiten medir la energía de acuerdo con las especificaciones normativas. Estos instrumentos son capaces de determinar la calibración de la energía entregada durante la prueba, lo cual puede llevarse a cabo de manera continua a diferentes profundidades o simplemente registrar al inicio de la evaluación. Esto garantiza una mayor precisión y fiabilidad en los resultados obtenidos, lo cual es determinante para asegurar la calidad y validez de los datos recopilados en los ensayos. Por lo anteriormente descrito la transferencia de energía en la prueba, es un aspecto importante que influye en la calidad de los datos obtenidos y su interpretación, un enfoque consciente de la energía involucrada, junto a la aplicación de análisis matemáticos, así como una evaluación real de la eficiencia de energía, permitirá obtener datos más precisos y fundamentados. Es importante señalar que no siempre se tiene oportunidad de tener un dispositivo para registrar la energía, por lo que se cuenta con tablas que nos permiten evaluar con estos datos, pero también los resultados difieren por el lugar y equipos empleados, en relación a esto último se presenta a manera de ejemplo las siguientes tablas de apoyo para estimar el valor de energía. De acuerdo a la ASTM D-4633-16 (Estándar Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers). Se toma el valor de la tabla 1, que es la eficiencia del martillo tipo rosca con un valor de 63.5% para evaluar la prueba de forma manual y mecánica. Y para el equipo automático se tomó el valor de 81.4%. las correcciones de orificio, muestreador, y largo de barra, se tomaron de las

⁴⁷ García, (2013), Prueba, pp. 5 - 6.

tablas 2,3, y 4. Para de esta forma obtener el valor de N_{60} , corregido, para los números de golpes en campo y aplicados a cada intervalo de 30 cm.

ERF = eficiencia del martillo. ASTM D-4633-16.

Martillo	Rosca	seguridad	automático
Eficiencia promedio	63.5 %	70.2%	81.4%
Factor corrección	1.06	1.17	1.36
Rango de valores	0.5 – 1.0	0.7 – 1.2	0.8 – 1.67

-Tabla 1, Rojas, (2020), <https://www.youtube->

C_b =Corrección diámetro perforación

C_b

(Diam. Orificio)

Diámetro	C_b
60-120	1.0
150	1.05
200	1.15

-Tabla 2, Rojas, (2020), <https://www.youtube->

Corrección muestreador

(muestreador)

C_s

	C_s
M. estándar	1.0

-Tabla 3 Rojas, (2020), <https://www.youtube->

Longitud de varilla

Cr

(varilla)

longitud	Cr
>10	1.0
6-10	0.95
4-6	0.85
0-4	0.75

-Tabla 4, Rojas, (2020), <https://www.youtube->

Propuesta.

El planteamiento de este trabajo se concentrará en llevar a cabo pruebas de penetración con equipos diferentes, con el objetivo de realizar comparativas que nos permitan identificar las variaciones en sus resultados. En cada uno de estos equipos, el factor clave que se analiza es la transferencia de energía durante el hincado del muestreador. Esta evaluación es fundamental, ya que se espera que las diferencias en el diseño y funcionamiento de los equipos influya en la eficacia de la penetración en el suelo. Para este estudio se ha seleccionado tres tipos de equipos: uno opera de manera manual, otro que utiliza un equipo mecánico y tercero que funciona de manera automática. La elección de estos equipos nos permitirá observar de cerca como sus características específicas afectan la eficiencia y precisión de las pruebas de penetración. El ensayo (STP) es un procedimiento estandarizado que parte de la medición de la resistencia del suelo a través del número total de golpes requerido para hincar el muestreador a una profundidad de 45 cm. Es importante destacar que, para este ensayo, los primeros 15 cm de penetración no son considerados en los resultados, ya que esta zona suele estar afectada por disturbios provocados durante el golpeo inicial. Por lo tanto, los resultados relevantes se calcularán a partir del número de golpes necesarios para penetrar los siguientes 30. De acuerdo a la normativa (ASTM) el valor N, que se reporta en este ensayo representa la resistencia a la penetración del suelo. Este valor se expresa en términos del número de golpes, lo que permite una evaluación cuantitativa de la capacidad de carga y otras propiedades del suelo. ⁴⁸

⁴⁸ Rojas, (2020), <https://www.youtube->

La comparación de los resultados obtenidos de los equipos permitirá no solo validar la eficacia de cada uno, sino también comprender mejor como las distintas metodologías de hincado influyen en la precisión de las mediciones de resistencia. Estos a su vez, proporcionara información valiosa para la optimización de técnicas de evaluación geotécnica en proyectos de construcción y otras aplicaciones relacionadas con el estudio del subsuelo. Como ya se mencionó, un martillo en buen estado y adecuadamente ajustado garantizan una transferencia más eficiente, si el equipo esta desgastado o dañado, la energía puede disiparse, lo que resulta en mediciones no confiables, en este mismo contexto a medida que se penetra más profundo, la resistencia del suelo puede variar, lo que afecta la energía que se necesita para elaborar la prueba, ya que se debe de mantener el cuidado de la colocación del tubo de muestreo.

Foto 5. Prueba con equipo manual.



Fuente: Rojas, (2020), <https://www.youtube>.

Foto 6. Prueba con equipo manual.



Fuente: Rojas, (2020), <https://www.youtube>.

Es de mucha importancia, considerar que no solo es el resultado, como dato final, los procesos inciden en forma directa (fotos 5,6), ya que las fricciones que provoca un equipo afectan desde la verticalidad, la cantidad de gente que requiere izar el martillo, una soga desgastada, o bien la polea con problemas, determina que la energía no es la misma, la altura de caída puede variar. En un proceso de ensaye con más tiempo, el factor humano también determina cambios. En las imágenes presentadas se lleva a cabo la prueba, con un mayor número de gente, dando margen a que el ritmo de golpe, no sea el mismo, así como las líneas que se marcan a cada 15 cm. Una variación, que incide en la transferencia de energía, ya que no es la misma, al inicio del ensaye, derivado por la fuerza, y rotación de personal.⁴⁹

⁴⁹ Rojas, (2020), <https://www.youtube>.

prueba con equipo mecánico.



Foto.7. Fuente: R. García.



Foto.8. Fuente: R. García.

La ejecución de la prueba, con ensaye mecánico, se realiza de una forma más limpia, en relación al número de gente. En las imágenes (7,8), se observa el proceso; pero la caída, de altura de 76 cm. Depende del operador. Y el ritmo de golpeo, mejora, por el malacate utilizado en este proceso. En esta prueba, se debe dar seguimiento, a la polea y sogá, que se emplea, y mantener, lubricado el malacate al inicio de los trabajos.



Foto.9. Fuente: R. García.



Foto.10. Fuente: R. García.

Los equipos mecánicos (fotos 9,10) nos permiten tener un trabajo más limpio en relación con el trabajo manual, en esto último; previos trabajos de excavación a cielo abierto que permiten un margen de maniobra mucho mayor, y donde se pueden visualizar la estratigrafía física del terreno a ensayar, en este tipo de trabajo, se debe prestar atención al mantenimiento del motor y los componentes mecánicos durante la operación, ya que requieren un seguimiento continuo para garantizar su optimo rendimiento.

Foto 11. Equipo automático



Fuente. Rojas, (2020), <https://www.youtube>.

Foto 12. Equipo perforación.



Fuente: Rojas, (2020), <https://www.youtube>.

En el caso de los equipos automáticos, los ensayos que se realizan son considerablemente más limpios en términos de la cantidad de personal involucrado. Esto no solo minimiza el riesgo de error humano, sino que también reduce la exposición de los operarios. Además, estos sistemas automatizados permiten garantizar una caída más controlada, lo que es fundamental para obtener resultados precisos y consistentes.

El ritmo de golpeo de los equipos automáticos se puede regular de manera exacta, lo que asegura que cada ensayo se realice bajo las mismas condiciones. Esto contribuye a una mayor homogeneidad en los resultados obtenidos. La altura de la caída se mantiene constante, lo que elimina variaciones que podrían afectar la calidad final. Asimismo, la verticalidad del golpeo está garantizada, lo que resulta en una mayor precisión en las pruebas.

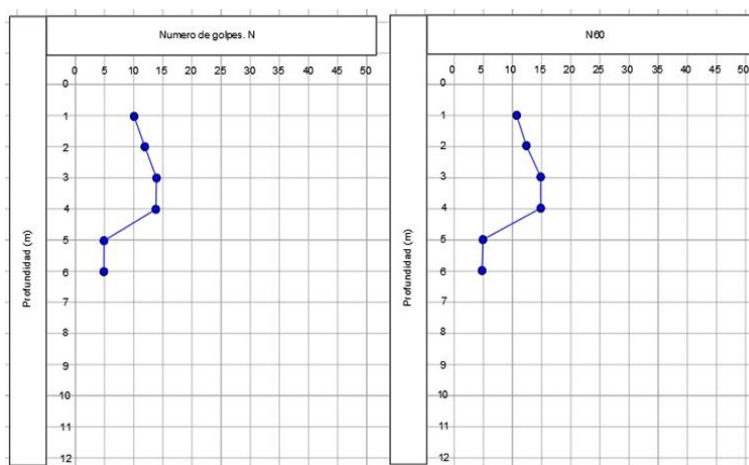
En términos de calidad, la automatización asegura que los estándares se cumplan de manera más estricta. Esto es especialmente importante, ya que cualquier variación puede tener repercusiones significativas.

Sin embargo, es importante considerar que el costo de implementar y mantener estos sistemas automáticos puede ser considerable. La inversión inicial y los gastos operativos pueden impactar en el presupuesto, lo que puede ser un factor decisivo en la elección entre equipos automáticos y manuales.

Con todos estos antecedentes, presento el proceso de las pruebas ejecutadas, realizadas para obtener la resistencia a la penetración N, del trabajo en forma manual, y con su respectiva gráfica, corregida, para tener en contexto la comparación con el equipo mecánico y automático.

En la siguiente grafica 1, se presentan los datos de campo, y las correcciones de la prueba, dando los valores muy cercanos entre estos resultados, lo que nos indica que la resistencia a la penetración aun con el N60, presenta un comportamiento similar, lo que nos indica que la eficiencia del martillo (tabla 1), del 63.5% es acorde, por el trabajo manual. Es importante considerar, que el dato de eficiencia, a medida, que se profundiza la prueba, debe de disminuir esta energía, por el comportamiento registrado en la gráfica. En base a los datos obtenidos, se observó que la dureza del suelo incrementa a mayor profundidad, lo cual es consistente con la hipótesis de que el material se vuelve más compacto y resistente a medida que se excava más profundamente. Sin embargo, para verificar que esta tendencia se mantenga en línea con las condiciones reales del terreno, es recomendable solicitar los informes de mecánica de suelos. Estos informes permitirán corroborar si los registros gráficos obtenidos son coherentes con los análisis de laboratorio y las condiciones geotécnicas del sitio.

Grafica – prueba 1-

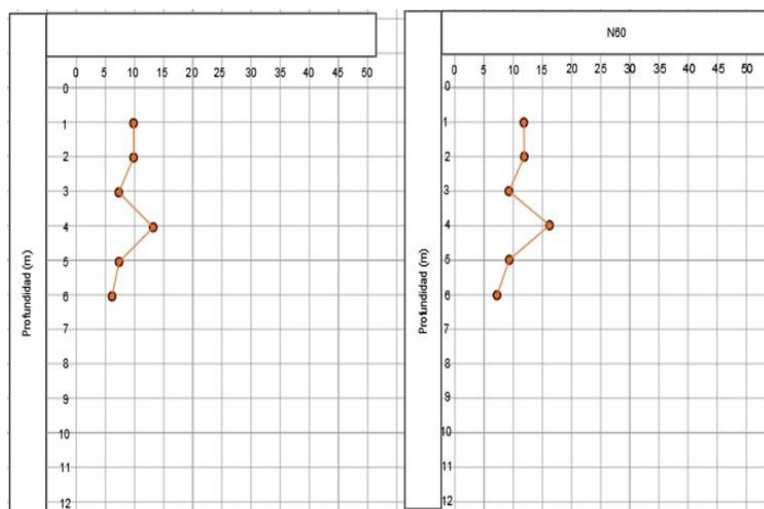


Ensayo No 1. (correcciones a N₆₀)

Sondeo	N	Sondeo	N60
1	10	1	14
2	12	2	16
3	14	3	17
4	14	4	17
5	6	5	8
6	6	6	9

Para el ensaye 2. Se realizo, utilizando una eficiencia (tabla 1), del 70.2% ya que es con equipo mecánico y su energía difiere. Aunque la prueba, se llevó a cabo, en un área muy cercana, (30 m), las muestras varían, y esto se analiza, por la heterogeneidad del subsuelo, ya que las condiciones del equipo, son mucho mejores. Los registros de campo indican que en el segundo punto el material es más denso y compacto, con características cercanas a una arcilla, lo que podría explicar las diferencias en los resultados obtenidos.

Grafica – prueba 2-

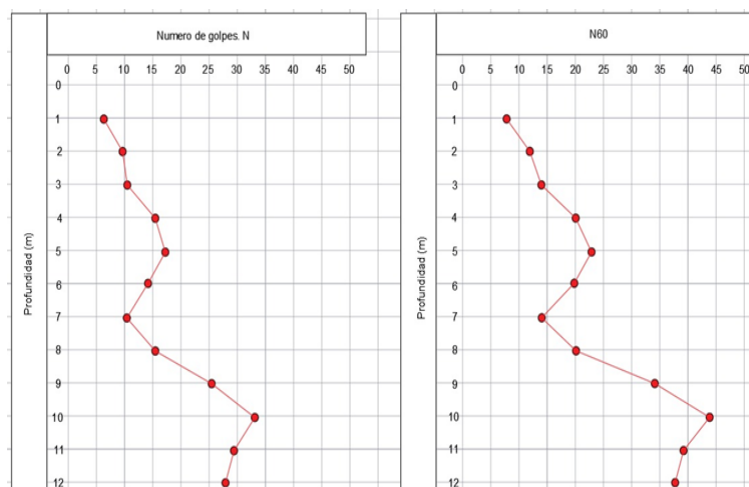


Ensayo No 2. (correcciones a N₆₀)

Sondeo	N	Sondeo	N60
1	12	1	14
2	12	2	14
3	10	3	12
4	15	4	17
5	10	5	12
6	8	6	9.0

Para el ensaye 3, se utilizó una eficiencia del 81.4%, ya que es un equipo automatizado, y se analiza un trabajo mucho más eficiente, más limpio, por el número de personal, y es de considerar que se realizó en escenarios diferentes, desde que su energía de entrega, es mucho mejor, como ya se indicó, el ritmo de golpe es uniforme, y la energía es más constante hasta el término de la prueba. la verticalidad esta más garantizada, se reduce la fricción en los componentes del equipo.

Grafica – prueba 3-



Ensaye No 3. (correcciones a N60)

Sondeo	N	Sondeo	N60
1	8	1	11.0
2	11	2	15.0
3	13	3	18.0
4	17	4	23.0
5	19	5	26.0
6	16	6	22.0
7	12	7	16.0
8	17	8	23.0
9	27	9	36.0
10	34	10	46.0
11	31	11	42.0
12	30	12	40.0

La variabilidad de los resultados puede atribuirse en gran medida al equipo utilizado, que representa un punto de quiebre en la realización de la prueba. la energía aplicada en cada ensayo influye directamente en los resultados obtenidos. Al inicio de las pruebas, es común que los resultados sean bastante similares, lo cual se debe a que las zonas de menor resistencia del suelo, tiendan a coincidir en los perfiles explorados.

Sin embargo, esta similitud puede cambiar notablemente a medida que se desarrolla las pruebas a mayores profundidades, donde la heterogeneidad del suelo se hace más evidente. El número de golpes requerido en campo es un dato determinante para establecer comparativas efectivas, incluso antes de realizar ajustes en los datos. Es importante señalar que la fiabilidad de la información recopilada depende en gran medida del personal encargado de la ejecución. Por lo tanto, los datos obtenidos de los ensayos de penetración, va más allá del simple conteo de golpes; también exige una comprensión exhaustiva de las características del suelo y un enfoque cuidadoso. La integración de una metodología adecuada, una documentación minuciosa de los ensayos, permitirá generar resultados significativos. En relación a la norma técnica complementaria, indica en forma directa su lineamiento, teniendo el siguiente comentario.

Es importante que los ensayos (SPT) se realicen siguiendo estrictamente los procedimientos estandarizados, que abarcan tanto las dimensiones de las herramientas como su correcta ejecución. Para optimizar la precisión de los resultados, se recomienda el uso de equipos mecanizados, ya que esto ayuda a minimizar la influencia del operador en el proceso. En el caso de utilizar equipos automatizados, es indispensable corregir el conteo del número de golpes, teniendo en cuenta la energía realmente entregada por el equipo durante la prueba. Por otro lado, si el ensayo se realiza de manera manual, se puede utilizar el conteo convencional de golpes, conocido como N. Esto se debe a que, al operar manualmente, se estima que se entrega aproximadamente el 60% de la energía nominal máxima que se esperaría en un ensayo estándar. Esta consideración es clave para garantizar la consistencia y la fiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos de penetración estándar.⁵⁰

⁵⁰ Rojas, (2020), caso de estudio, <https://www.portacivil.com>

3.1.- Resultados de la prueba.

Resultados de la prueba con comparativa de ensayos, se presentan los valores obtenidos de las pruebas realizadas con tres equipos diferentes, los cuales han permitido establecer diversas comparaciones sobre las características del terreno analizado. A continuación, se detallan los datos más relevantes de cada uno de los ensayos:

Prueba no.1 – Ensayo con equipo manual

En la primera prueba, realizada con un equipo manual, se registró el número de golpes ejecutados durante el primer sondeo. Los datos obtenidos muestran una tendencia en el valor corregido de N_{60} , superior al registrado en la prueba de campo. Esta diferencia indica que, en comparación con los valores obtenidos en el terreno, la resistencia medida con el equipo manual tiende a ser mayor.

Prueba no.2 – Comparación a 30 metros de distancia con equipo mecánico

La segunda prueba se realizó en la misma área geográfica, pero con una separación de 30 metros entre el punto de muestreo original y el nuevo punto de prueba. Los resultados obtenidos en esta ocasión muestran una tendencia similar a la observada en la primera prueba, aunque con ciertas variaciones.

En este caso, la correlación de los valores corregidos de N_{60} presenta diferencias notables entre los dos puntos de muestreo. Este comportamiento sugiere que el suelo no es homogéneo en la zona de prueba.

Prueba no.3-automático.

En cuanto al equipo automatizado, sus valores son un poco más altos con respecto a los ejecutados en forma manual y mecánica, lo anterior mostrando una gran mejoría, y la tendencia de N_{60} corregido, indica que las correlaciones son muy parecidas, lo que nos lleva como resultado que la comparativa, radica básicamente en el tipo de equipo utilizado, ya que la transferencia de energía, está más calibrada, así como garantizando la verticalidad, y la caída del equipo, no dependen de los operadores. Con estos datos, verificamos que la

transferencia de energía, es el punto comparativo más representativo, para valorar en diferentes equipos utilizados.

A partir de los datos obtenidos de ambas pruebas, se puede concluir que la variabilidad en la composición y características del suelo en la zona estudiada es significativa. Los resultados indican que los suelos no presentan una homogeneidad suficiente como para establecer un valor único de resistencia en todos los puntos muestreados. En consecuencia, se sugiere adoptar un valor medio de los resultados obtenidos en ambos puntos de prueba, con el objetivo de establecer una estimación más representativa de la capacidad de carga de los suelos en la zona. Y se presenta la tabla 5. Para establecer comparativa.

Cuadro comparativo.

Sistema	Profundidad m	Energía ASTM D-4633- 16.	** Energía (Das) **	N60 promedio / Astm	N60 promedio (Das)
Manual	6.0	63.50	60.0	13.0	10.0
Mecánico	6.0	70.20	67.0	13.0	12.0
Automático	12.0	81.40	78.0	27.0	25.0

Tabla 5, R. García.

Las variaciones de energía, marcan la tendencia en los valores de comparación, con el equipo que se utilice, en esta revisión así nos indica. Y en razón proporcional al N60. es importante señalar, que las investigaciones al respecto, nos enseñan, que, en el proceso de la prueba, siempre presentan variaciones muy marcadas, por la resistencia del terreno, por lo que es la necesidad, de tener el equipo utilizado, en constante calibración. La tecnología actual, es de gran ayuda y en esto último, se complementa para la continua utilización de los equipos. Esto representa ir con el avance de la ciencia, en bien de resultados confiables.

Capítulo 4.- Conclusiones y recomendaciones.

La comparativa, contempla un análisis, de la transferencia de energía, un aspecto decisivo en el que se evidencian diferencias significativas debido a la diversidad de equipos utilizados. Es relevante considerar que incluso en países con alta tecnología, este método sigue siendo común, lo que no necesariamente implica que sea inadecuado. Sin embargo, creemos que la precisión en la medición y el análisis de la transferencia de energía podría mejorarse notablemente.

En este sentido, se establece un enfoque que combine tanto la metodología porcentual como técnicas más avanzadas, a fin de obtener un diagnóstico más certero y ajustado a la realidad del contexto en el que se aplica. Al centrar trabajo, en este punto crítico de la transferencia de energía, se busca no solo entender las dinámicas actuales, sino también establecer las bases para futuras optimizaciones y una gestión más eficiente.

Al abordar el tema de los condicionantes, fundamentalmente en las limitantes que este estudio ha identificado. Las variables que condicionan la transferencia de energía son claramente visibles y están directamente relacionadas con la diversidad de equipos utilizados. Por un lado, el uso de equipos rústicos puede impactar significativamente en la eficiencia de la transferencia; por otro, los equipos más mecanizados también pueden enfrentar retos similares si no reciben el mantenimiento adecuado.

La diversidad de los equipos utilizados en la (STP). Cada uno con características únicas de diseño, incide directamente en la fuerza aplicada durante la prueba. Esta variación en la energía de impacto provoca diferencias en la resistencia medida y, por ende, en el número de golpes necesarios para alcanzar una profundidad determinada. En este sentido, resulta evidente que no todos los equipos ofrecen resultados comparables, lo que puede llevar a una interpretación errónea de las condiciones del terreno si no se tiene en cuenta la calibración y el mantenimiento de los instrumentos.

Al calcular el número de golpes requeridos para alcanzar una profundidad específica (N_{60}), a menudo se hace referencia a tablas que correlacionan estos valores, sin embargo, estas tablas deben utilizarse con precaución, ya que su eficacia depende de que el equipo utilizado esté debidamente calibrado. Un aspecto fundamental es que el equipo refleje adecuadamente el

valor de N_{60} ; por tanto, la falta de mantenimiento, incluso en equipos automatizados, puede dar lugar a un desgaste que afecte directamente los resultados de las pruebas.

La prueba se realiza a diferentes profundidades, lo que permite identificar capas con características y propiedades diversas. Este conocimiento es esencial para evaluar la variabilidad del terreno y diseñar soluciones adecuadas.

Asimismo, la prueba, ayuda a identificar riesgos geotécnicos, como la licuefacción en suelos saturados. Por ejemplo, si se detectan capas susceptibles a licuefacción, se pueden implementar técnicas de reforzamiento del terreno o modificar el diseño de las cimentaciones para reducir el riesgo.

Es importante señalar que, dependiendo del modelo de equipo utilizado, la transferencia de energía debe ser optimizada para maximizar la eficacia de la prueba. La relación directa y proporcional entre la energía transferida por el martillo y los resultados obtenidos resalta la necesidad de elegir cuidadosamente el equipo de ensayo. Al hacerlo, se asegura que los datos recopilados sean representativos y útiles para la toma de decisiones en el diseño geotécnico.

Una de las ventajas más sobresalientes es su facilidad de uso. Está analizado para ser operado sin la necesidad de contar con un equipo altamente especializado o formación compleja. Esto permite implementar pruebas de manera rápida y efectiva, algo particularmente valioso en proyectos de campo donde los plazos son ajustados y el tiempo es un recurso crítico. Esta simplicidad también significa que se puede utilizar en una amplia variedad de escenarios. En comparación con otros métodos de investigación de suelos, como los ensayos de penetración con equipos electrónicos avanzados o los métodos de prueba basados en sensores automatizados, el (STP) es generalmente más económico.

Recomendaciones.

A pesar de sus múltiples ventajas, su uso, no está exento de limitaciones. Es importante entender sus desventajas y cómo estas pueden influir en la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos. Al ser un método manual o semiautomático, puede presentar una menor precisión en comparación con equipos más avanzados o automatizados, especialmente en condiciones geotécnicas complejas. Los suelos con una composición variable, cambios en la estratigrafía, o características inestables pueden generar datos que no reflejan con exactitud

las propiedades del suelo, lo que puede llevar a errores en el análisis y, en consecuencia, a decisiones incorrectas durante la fase de diseño de un proyecto.

La calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos, dependen en gran medida de la experiencia y habilidad. Factores como la técnica de perforación, el manejo adecuado del equipo y la interpretación correcta de las muestras son fundamentales para asegurar que los datos sean precisos y válidos. No siempre es adecuado para suelos cohesivos o inestables, como arcillas blandas, suelos saturados o aquellos con alta compacidad. En estos casos, la resistencia al avance de la penetración puede no ser representativa de las condiciones reales del suelo, lo que requiere recurrir a métodos alternativos. El uso de estos métodos puede proporcionar una mayor precisión en la evaluación de suelos con características inusuales o difíciles. A medida que el equipo se utiliza con frecuencia, sus componentes mecánicos pueden desgastarse, lo que podría afectar la precisión de las mediciones y la fiabilidad de los resultados. El mantenimiento regular y la calibración de los equipos son esenciales para garantizar su buen funcionamiento y la calidad de los datos obtenidos. Ignorar este aspecto puede conducir a la obtención de resultados incorrectos, con consecuencias negativas en el diseño y la ejecución de las obras.

La interpretación de los resultados obtenidos no debe tomarse de manera aislada. Varios factores deben ser considerados para garantizar que los datos sean representativos y útiles para el diseño de proyectos geotécnicos.

El análisis de los resultados obtenidos, debe considerar que la resistencia del suelo no es constante a lo largo del perfil, y que factores como la humedad, la densidad, la compactación y la estructura interna del suelo pueden variar en función de la profundidad y las condiciones locales. Para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos, es recomendable validarlos con ensayos de laboratorio. La comparación con métodos más avanzados, como la determinación de la densidad de los suelos mediante ensayos de compactación o análisis de muestras de núcleo, puede revelar inconsistencias en los datos que requieren una revisión más detallada o la aplicación de técnicas adicionales para obtener resultados más precisos.

Para maximizar la efectividad y asegurar la calidad de los resultados, es fundamental adoptar algunas prácticas recomendadas en su operación y mantenimiento. Mantener los equipos calibrados es esencial para obtener resultados consistentes y precisos. La calibración periódica asegura que las mediciones realizadas durante las pruebas sean confiables y estén dentro de los estándares establecidos para cada tipo de ensayo. Además, la calibración

contribuye a la durabilidad de los equipos, evitando desgastes prematuros o fallos operativos que puedan afectar la precisión de los datos obtenidos.

La formación continua de los operadores y el personal técnico es un aspecto clave para asegurar que se utilice de manera adecuada. Interpretar correctamente los resultados y aplicar los métodos adecuados para garantizar la validez de los datos obtenidos.

A pesar de que la prueba, sigue siendo una opción económica, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de métodos complementarios que pueden optimizar la precisión de los resultados. El uso de tecnologías más avanzadas en combinación con el (STP) puede mejorar la fiabilidad de los datos sin incurrir en un aumento significativo de los costos.

Fuentes de consulta.

Robert D. Holtz, William D. Kovacs, Thomas C. Sheahan. An Introduction to Geotechnical Engineering, Second Edition.

Braja M. Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, cuarta edición. Publicado: Cengage learning 2013.

Jeffrey Kseres, Ensayo de penetración normal (STP) y muestreo de suelos con tubo partido. Instituto Nacional de Vías. I.N.V.E. -111-07.

Portal de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. 2016.

Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico Rodríguez, Mecánica de suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tomo I. Limusa 2005.

Juan Carlos Rojas Vidovic, Ejercicio Comparativo de Ensaye STP. Primer ciclo de conferencias de geomecánica, 2020. Universidad de Valparaíso, Chile. <https://www.youtube.com/watch?v=ZjUWzjnNg&t=4338s>.

Juan Carlos Rojas Vidovic, caso de estudio SPT vs CPT. Del libro a la práctica, (8 abril 2020) cursosportacivil, <https://www.portacivil.com>

Juan Carlos Rojas Vidovic, Obtención de parámetros de diseño a partir de SPT. 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=SxVNH5CDNow&t=2611s> Universidad de Valparaíso, Chile.

Exploración geotecnia STP 1 <https://www.youtube.com/watch?v=9pHCmRaxEyg&t=1155s> 10 noviembre 2020. Universidad Veracruzana.

Geotecnia estructural, www.geoest.com Monterrey Nuevo León.

Carlos Crespo Villalaz, Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Quinta Edición. Limusa 2004.

Comisión Federal Electricidad, Manuales de Diseño de Obras Civiles. Geotecnia 2008.

Comisión Federal de Electricidad, Exploración Directa con Obtención de Muestras del Suelo Prueba de Penetración Estándar. 2013.

Carlos García Romero, Prueba de Penetración Estándar. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, (ESIAZ). Unidad profesional Zacatenco. 2013.

Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico Rodríguez, Mecánica de Suelos, Fundamentos de Mecánica de Suelos, Tomo II. Limusa 1973.

Diario Oficial de la Federación, PROY-NMX-C-431-ONNCCE-2021.

Tablas.

Tabla 1. (ERF) eficiencia del martillo. Juan Carlos Rojas Vidovic, Ejercicio Comparativo de Ensaye STP. Primer ciclo de conferencias de geomecánica, 2020.Universidad de Valparaíso, Chile. <https://www.youtube.com/watch?v=ZjUWzjnNg&t=4338s>.

Tabla 2. (ERF) Corrección diámetro perforación. Juan Carlos Rojas Vidovic, Ejercicio Comparativo de Ensaye STP. Primer ciclo de conferencias de geomecánica, 2020.Universidad de Valparaíso, Chile. <https://www.youtube.com/watch?v=ZjUWzjnNg&t=4338s>.

Tabla 3. Corrección muestreador. Juan Carlos Rojas Vidovic, Ejercicio Comparativo de Ensaye STP. Primer ciclo de conferencias de geomecánica, 2020.Universidad de Valparaíso, Chile. <https://www.youtube.com/watch?v=ZjUWzjnNg&t=4338s>.

Tabla 4 Longitud de varilla Juan Carlos Rojas Vidovic, Ejercicio Comparativo de Ensaye STP. Primer ciclo de conferencias de geomecánica, 2020.Universidad de Valparaíso, Chile. <https://www.youtube.com/watch?v=ZjUWzjnNg&t=4338s>.

Tabla 5. Comparativa de las pruebas. R.G.