UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA

METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR GRADOS DE COMPACTACIÓN EN TEST FILL PARA TERRAPLENES DE PRESA CON GEOMATERIALES A CARACTERIZAR - ANTAPITE, HUANCAVELICA 2024

TESIS

Presentada por:

Bach. Eder Manacés Quispe Isidro

ORCID: 0000-0003-0468-4297

Asesor:

Dr. Samuel Huaquisto Cáceres

ORCID: 0000-0002-9294-6359

Para Obtener el Grado Académico de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA

Tesis

METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR GRADOS DE COMPACTACIÓN EN TEST FILL PARA TERRAPLENES DE PRESA CON GEOMATERIALES A CARACTERIZAR - ANTAPITE, HUANCAVELICA 2024

Presentado por:

Bach. Eder Manacés Quispe Isidro

Tesis sustentada y aprobada el 09 de abril 2026; ante el siguiente jurado examinador:

PRESIDENTE: Dr. Pedro Valerio MAQUERA CRUZ

SECRETARIO: Dr. Martin PAUCARA ROJAS

VOCAL: Mtro. Alfonso Oswaldo FLORES MELLO

ASESOR: Dr. Samuel HUAQUISTO CÁCERES

DECLARACION JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Eder Manacés Quispe Iisdro, en calidad de egresado de la Maestría en Ingeniería Civil con mención en Geotecnia, de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado (a) con DNI 43965777.

Soy autor de la tesis titulada:

"METODOLOGIAS PARA DETERMINAR GRADOS DE COMPACTACIÓN EN TEST FILL PARA TERRAPLENES DE PRESA CON GEOMATERIALES A CARACTERIZAR – ANTAPITE, HUANCAVELICA 2024", con asesor: Dr. Samuel Huaquisto Cáceres.

DECLARO BAJO JURAMENTO

Ser el único autor del texto, entregado para obtener el grado académico de MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN En Geotecnia, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para la obtención de un grado académico, en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

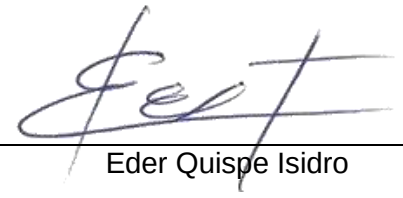
Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 4 % de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

Por último, declaro que, para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades que de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo

declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello, en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento. De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que, de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y fecha: Tacna, 09 de abril de 2026



Eder Quispe Isidro

DNI: 43965777

DEDICATORIA

Gracias a DIOS por guiar mi sendero en esta lucha. A mi madre por su incasable lucha, a mi padre y hermana Flor que siempre lo recordamos por la eternidad. También a mi Ariana y Antonella que son una alegría inmensa que lo tengo en mi corazón. Y a toda mi familia. Sobre todo, a mí, y que el limite lo pone uno mismo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Privada de Tacna, a mi asesor y a todas aquellas personas quienes me apoyaron e impulsaron de manera incondicional y contribuyeron en la realización de esta tesis.

INDICE DE CONTENIDO

DECLARACION JURADA DE ORIGINALIDAD ii

DEDICATORIA iv

AGRADECIMIENTOS v

INDICE DE CONTENIDO vi

INDICE DE TABLAS ix

RESUMEN xii

ABSTRACT xiii

INTRODUCCIÓN xiv

1. CAPITULO I: EL PROBLEMA 1

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.2. Formulación del problema 2

1.2.1. Interrogante principal 2

1.2.2. Interrogantes secundarias 3

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 5

1.4.1. Objetivo general 5

1.4.2. Objetivos específicos 5

2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO 6

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO 6

2.2. BASES TEÓRICOS CIENTÍFICO 14

2.2.1. Geomateriales 14

2.2.2. Grados de compactación 20

2.2.3. Metodologías (de compactación de control de compactación). 25

2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTO 33

3. CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO 36

3.1. HIPÓTESIS 36

3.1.1. Hipótesis general 36
3.1.2. Hipótesis especifica..... 36
3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES 36
3.2.1. Identificación de la variable independiente 36
3.2.2. Identificación de la variable dependiente 37
3.2.3. Variables intervinientes 37
3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN 37
3.4. NIVEL DE INVESTIGACIÓN..... 37
3.5. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 37
3.6. ÁMBITO Y TIEMPO SOCIAL DE LA INVESTIGACIÓN..... 38
3.7. POBLACIÓN Y MUESTRA..... 38
3.7.1. Unidad de estudio...... 38
3.7.2. Población..... 38
3.7.3. Muestra 38
3.8. PROCEDIMIENTO, TÉCNICA E INSTRUMENTOS 39
3.8.1. Procedimiento 39
3.8.2. Técnicas..... 40
3.8.3. Instrumentos..... 40
4. CAPITULO IV: RESULTADOS 42
4.1. DESCRIPCION DE LOS TRABAJOS DE CAMPO 42
4.1.1. Recursos, equipos y materiales a utilizar: 42
4.1.2. Ubicación y descripción general del área de estudio 42
4.1.3. Diseño o esquema para el test fill..... 43
4.1.4. Construcción del test fill 45
4.1.5. Sectorización del test fill para la compactación..... 46
4.1.6. Compactación del terraplén de prueba Test Fill...... 47
4.1.7. Prueba de densidad por el método reemplazo de agua ASTM D-5030. 48
4.1.8. Pruebas estándar en laboratorio..... 49
4.2. DISEÑO DE LA PRESENTACION DE LOS RESULTADOS..... 50
4.3. RESULTADOS..... 51

4.3.1. Caracterización de los geomateriales 51
4.3.2. Determinación de los grados de compactación. 59
4.3.3. Metodologías 65
4.4. PRUEBA ESTADISTICA 73
4.4.1. Enfoque estadístico adoptado 73
4.4.2. Prueba de normalidad y homogeneidad. 73
4.4.3. Análisis descriptivo variable geomateriales 79
4.4.4. Análisis de regresión no lineal para la predicción de variable grados de compactación 81
4.5. COMPROBACION DE HIPOTESIS 87
4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 89
CONCLUSIONES 94
RECOMENDACIONES 96
REFERENCIAS 99
ANEXO: 104
APÉNDICE 111
Matriz de consistencia del proyecto de investigación 111

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ecuación de correlación 31
Tabla 2 Tabla estructurada del diseño de la presentación de resultados. 50
Tabla 3 Resultados de contenido de humedad. 52
Tabla 4 Resultado de caracterización del geomaterial. 53
Tabla 5 Resultados del Análisis Granulometrico por tamizado. 54
Tabla 6 Resultados de Limites de Atterberg. 56
Tabla 7 Resultados de Gravedad Especifica y Absorción. 57
Tabla 8 Resultados de ensayo de Proctor Estándar en laboratorio. 57
Tabla 9 Resultados de Proctor Estándar corregidos por sobretamaño. 59
Tabla 11 Resultados de Máxima Densidad del Test Fill 61
Tabla 13 Resultado de Deformación Vertical y Ciclos de Compactación. 62
Tabla 14 Datos para el cálculo del FCC por un ciclo y área tributaria. 64
Tabla 15 Resultado de grados de compactación en función de las densidades y N° de ciclos compactados. 66
Tabla 16 Resultados relación entre número de ciclos y grados de compactación. 67
Tabla 17 Resultado de relación de grados de compactación en función de la deformación vertical 68
Tabla 18 Resultados de grados de compactación con relación al tiempo. 69
Tabla 19 Resumen estadístico de geomateriales 80

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 **Ensayo de asentamiento** 12
Figura 2 **Grupos en geomateriales** 16
Figura 3 **Curva granulométrica de la arena fina** 16
Figura 4 **Equipos para la prueba de Proctor estándar** 19
Figura 5 **Presa de enrocamiento con losa de concreto o asfalto (cimentación rígida)** 19
Figura 6 **Resumen de aportes de diferentes autores estudiados sobre la influencia de la fracción gruesa.** 25
Figura 7 **Ejemplo prueba de modulo en laboratorio y campo. (a) en laboratorio. (b) croquis de prueba. (c) prueba de campo.** 27
Figura 8 **Correlación entre la MDS y el OCH para ensayos de compactación Proctor estándar.** 30
Figura 9 **Representación esquemática de la variación progresiva de la humedad en subrasante después de la compactación** 32
Figura 10 **Sectorización para la compactación de la prueba Panel Test.** 43
Figura 11 Curva granulométrica del geomaterial. 55
Figura 12 Curva de compactación Proctor estándar. 58
Figura 13 Dispersión de los ensayos de Proctor corregido y promedio 60
Figura 14 Número de ciclos de compactación con relación a su densidad obtenida. 61
Figura 15 Numero de ciclos con relación al espesor de capa compactada. 63
Figura 16 Numero de ciclos de compactación con su relación al tiempo empleado. 65
Figura 17 Grados de compactación en función de las densidades. 66
Figura 18 Relación número de ciclos de y grados de compactación. 67
Figura 19 Gráfico de deformación vertical con relación a los grados de compactación 68
Figura 20 Grados de compactación con relación a tiempo en minutos. 69
Figura 21 Formato de registro método de reemplazo de agua 71
Figura 22 Formato de registro control de compactación mediante ciclos, deformación y tiempo 72
Figura 23 Grafica de prueba de normalidad de geomateriales. 74
Figura 24 Grafica prueba de normalidad 75
Figura 25 Grafica de prueba de las pruebas de normalidad de las pruebas de campo. 78
Figura 26 Pruebas de homocedasticidad y correlaciones para grados de compactación y N° de ciclos 76
Figura 27 Prueba estadística de Spearman para deformación. 79
Figura 28 Prueba estadística de Spearman grados de compactación - tiempo. 79
Figura 29 Grafica de análisis de regresión No Lineal para N° de ciclos y grados de compactación. 83
Figura 30 Grafica de análisis de regresión No Lineal para deformación vertical y grados de compactación. 85
Figura 31 Grafica de análisis de regresión No Lineal para tiempo (FCC) y grados de compactación. 87

RESUMEN

La construcción de presas de tierra, especialmente aquellas que utilizan geomateriales de gran tamaño provenientes de desmonte de mina, presenta un desafío crítico en la ingeniería geotécnica, ya que las metodologías de compactación y control de calidad convencionales resultan insuficientes para materiales con partículas de hasta 20 pulgadas. Esta investigación aborda directamente esta problemática, proponiendo y validando metodologías para determinar los grados de compactación en una prueba de campo a gran escala denominado Test Fill, utilizando geomaterilaes.

La investigación se realizó a trávez de un enfoque cuantitativo experimental, combinando una caracterización geotécnica del material y análisis estadístico. Se empleo herramientas estadísticas descriptivas para evaluar la variabilidad de la caracterización del geomaterial. Se realizo análisis de regresión no lineal para modelar la relación entre el grado de compactación y los INDICADORES parámetros clave, como numero de ciclos de compactación, deformación vertical (método topográfico) y el factor contante de compactación tiempo (FCC).

Los resultados demuestran la existencia de correlaciones fuertes y estadísticamente significativas entre el Grado de Compactación y los parámetros operativos, a pesar de la heterocedasticidad inherente a los datos de campo. Como principal contribución, se establecieron modelos matemáticos no lineales de tipo potencial altamente predictivos. Estos modelos permiten **predecir con precisión** el grado de compactación alcanzado, ofreciendo una alternativa robusta y eficiente a las pruebas de control de calidad in-situ, que consumen tiempo y recursos.

En conclusión, este estudio no solo valida la viabilidad de utilizar geomateriales de gran tamaño en la construcción de terraplenes de presas y otros, sino que también proporciona una herramienta fundamental en la práctica ingenieril. Al establecer correlación directa entre la energía de compactación y el grado de densificación, esta investigación permite **optimizar los parámetros de compactación** en tiempo real, mejorando la seguridad, eficiencia en proyectos de infraestructura geotécnica a gran escala.

PALABRAS CLAVE: Grados de compactación, Geomateriales Test Fill, Presas

ABSTRACT

The construction of earth dams, especially those using large geomaterials from mine clearance, presents a critical challenge in geotechnical engineering, as conventional compaction and quality control methodologies are insufficient for materials with particles up to 20 inches in size. This research directly addresses this issue by proposing and validating methodologies to determine compaction degrees in a large-scale field test called Test Fill, using geomaterials.

The research was conducted using an experimental quantitative approach, combining geotechnical characterisation of the material and statistical analysis. Descriptive statistical tools were used to evaluate the variability of the geomaterial characterisation. Non-linear regression analysis was performed to model the relationship between the degree of compaction and key parameters, such as number of compaction cycles, vertical deformation (topographic method) and the constant compaction time factor (CCTF).

The results demonstrate the existence of strong and statistically significant correlations between the degree of compaction and the operational parameters, despite the heteroscedasticity inherent in the field data. As a major contribution, highly predictive nonlinear potential-type mathematical models were established. These models enable accurate prediction of the degree of compaction achieved, offering a robust and efficient alternative to time-consuming and resource-intensive in-situ quality control tests.

In conclusion, this study not only validates the feasibility of using large-sized geomaterials in the construction of dam embankments and other structures, but also provides a fundamental tool for engineering practice. By establishing a direct correlation between compaction energy and the degree of densification, this research enables the optimisation of compaction parameters in real time, improving safety and efficiency in large-scale geotechnical infrastructure projects.

KEYWORDS: Degrees of compaction, geomaterials Test Fill, dams.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de infraestructuras y la necesidad de gestionar de manera sostenible los subproductos de la industria minera han impulsado el uso de geomateriales de gran tamaño, provenientes de desmontes, en la construcción de megaestructuras como presas. Sin embargo, este enfoque presenta un desafío crítico: las metodologías convencionales de control de compactación diseñadas para materiales de granos menor a 3 pulgadas resultan ineficaces para el caso de partículas mayor a 3 pulgadas. La presente investigación aborda este caso, proponiendo y validando métodos robustos para determinar el grado de compactación en un terraplén de prueba (**Test Fill**), utilizando geomateriales caracterizados de Antapite, Huancavelica.

El objetivo principal es determinar metodologías para determinar distintos grados de compactación a través de modelos matemáticos predictivos que correlacionen la densidad de compactación alcanzada con parámetros operacionales clave, como el número de ciclos de compactación, la deformación vertical y el factor constante de compactación tiempo (FCC). Mediante un enfoque experimental y cuantitativo, el estudio combina la caracterización geotécnica del material con un análisis estadístico. Este enfoque permite no solo comprender las propiedades inherentes del geomaterial, sino también modelar el comportamiento de la densificación bajo la aplicación de energía vibratoria, incluso frente a la variabilidad intrínseca de los datos de campo.

La estructura de esta investigación se ha organizado en cinco capítulos. El **Capítulo I** se presenta el problema de investigación, su justificación y los objetivos. El **Capítulo II** detalla el marco teórico y la revisión de la literatura, abordando los principios de compactación, las propiedades de los geomateriales y las bases del análisis estadístico. El **Capítulo III** describe marco metodológico y el procedimiento de recolección de datos. En el **Capítulo IV** se exponen los resultados de los análisis estadísticos descriptivos y de regresión. Finalmente, el **Capítulo V** presenta las discusiones, conclusiones derivadas de los hallazgos y las recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la ingeniería geotécnica.

CAPITULO I: EL PROBLEMA

1.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La construcción de tierra para almacenamiento de agua como para contención de relaves de minería, representan un desafío geotécnico complejo debido a la necesidad de garantizar la estabilidad y seguridad de dichas estructuras durante toda su vida. A nivel mundial, existen miles de presas muchas de ellas construidos con geomateriales diversos y expuestas a factores que pueden comprometer su integridad, como la variabilidad de los materiales, los procesos de compactación inadecuada y la falta rigurosa de control de calidad.

En el caso de las presas en minería, la situación se torna aún más crítica debido a la presencia de geomateriales de gran tamaño, como desmonte de mina, relaves de arena cicloneada y relaves filtrados que requieren metodologías de compactación y controles de calidad específicas. Estos materiales, a menudo heterogéneos y con propiedades geotécnicas muy variables, plantean desafíos para lograr una compactación uniforme y eficiente, lo que puede aumentar el riesgo de filtraciones, asentamientos diferenciales y fallas en la estructura de la presa.

Si bien existen metodologías de compactación estandarizadas, como el ensayo Proctor, estas se centran principalmente en suelos finos (partículas menores a 3 pulgadas de diámetro) y pueden no ser adecuadas para geomateriales de gran tamaño (hasta 20 pulgadas de diámetro). Además, como indica [1] este método proporciona información precisa pero esta metodología tiene desventajas al aplicar en el campo puede presentar dificultades, como la variabilidad de las condiciones de construcción, falta de equipos de compactación adecuados y la necesidad de realizar pruebas de control de calidad acorde al tipo de geomaterial consumiendo tiempo y recurso.

Según la Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura (FAO), existen más de 14,000 mil presas en el mundo, incluyendo las de relave minero, cuyo número exacto se desconoce, pero se estima que supera los 30,000 a nivel global según la web industrialALL. El Perú cuentas con 176 minas

metálicas según OSINERGMIN, pero el número de presas o depósitos de relaves es incierto, lo que evidencia la necesidad de mejorar la gestión y el control de estas estructuras a su vez que se han construido presas con desecho, es decir con el mimo material relave.

Entonces, para la construcción de presas pueden usarse diversos materiales como indica Brawner (1979) que da varios ejemplos de construcción de presas de relaves utilizando desmontes mineros y tierras naturales. Cualquier desmonte de mina usado en la construcción de una presa de relaves debe estar libre del riesgo potencial de adsorción desorción y recuperación (ARD).

Los materiales (geomateriales) de desmontera de mina son de mayor tamaño para el relleno, donde OSINERMING indica que no se realizan las pruebas de control y que a su vez una adecuada compactación se logra con espesores en capas horizontales de aproximadamente 1 m de espesor sometidas con un promedio de 5 pasadas de camiones cargados (> 120 Ton de capacidad) sobre la superficie completa de cada capa.

La falta de metodologías de compactación y control de calidad adaptadas a geomateriales de gran tamaño en presas de relave pueden tener consecuencias graves, como la ruptura de terraplén, la liberación de relaves tóxicos al ambiente y la afectación de comunidades y el ecosistema. Por tanto, es fundamental investigar y desarrollar metodologías que permitan determinar grados de compactación óptimo para estos materiales, considerando sus propiedades, el tipo de presa y normativas vigentes.

Silva (2015) dice que es esencial entender las variables que influyen en el comportamiento del suelo de la mejor manera posible, así como concebir modelos matemáticos capaces de representar y predecir con precisión el comportamiento en campo de las estructuras geotécnicas.

1.2.Formulación del problema

1.2.1. Interrogante principal

¿Como se determinan las metodologías para grados de compactación para terraplenes de presa con geomateriales a caracterizar?

1.2.2. Interrogantes secundarias

¿Cuáles son las características geotécnicas del geomaterial que influyen en su uso para terraplenes de presa?

¿Cuáles son las metodologías medibles y reproducibles para determinar los grados de compactación en test fill para terraplenes de presa?

¿Cómo se obtener las densidades a distintos ciclos de compactación utilizando la norma ASTM D-5030 para calcular los grados de compactación?

¿Cómo se manifiesta las deformaciones verticales en el terraplén del test fill a medida que se incrementan los ciclos de compactación?

¿Cómo se determina a partir los ciclos de compactación el factor constante de compactación necesario para obtener grados de compactación necesario?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se enfoca en la necesidad critica de optimizar las metodologías para determinar grados de compactación en pruebas de test fill para terraplenes de presa, especialmente en el contexto de presas para almacenamiento de relaves. La variabilidad y el gran tamaño de los geomateriales utilizados en estas estructuras demandan un enfoque innovador y preciso, superando las limitaciones de las metodologías convencionales.

La relevancia y la necesidad de terraplenes, particularmente en minería, enfrenta desafíos únicos por la heterogeneidad de geomateriales (suelos, rocas, desmonte, etc) de hasta 20 pulgadas de tamaño. A su vez las técnicas de compactación convencionales (ASTM D-1557 y ASTM D698) son insuficientes para la variabilidad de materiales de gran tamaño, que tradicionalmente son rechazados. La compactación inadecuada conduce a inestabilidad, filtraciones y asentamientos, poniendo en peligro la integridad de la presa y el entorno. OSINERGMIN destaca la importancia de la compactación para la resistencia sísmica en presas de relave, debiendo estas ser compactadas por lo menos al 90% a 95% en base a una prueba de laboratorio. Alguna de las limitaciones es que no se tiene en las metodologías estandarizadas para determinar grados de compactación en terraplenes con geomateriales de gran tamaño. En cuanto a rodillos vibratorios;

su frecuencia y amplitud de vibración se mantienen constantes y el operario elige la velocidad del rodillo. Un número determinado de pasadas y una velocidad, frecuencia de vibración y amplitud del rodillo [1].

También de acuerdo a la Autoridad Nacional de Agua (ANA) en el Perú se cuenta con un total de 743 presas para distintos usos, 113 de estas específicamente son para almacenamiento de relaves, así mismas estas, están construidas con material de relave.

Con la presente investigación se pretende desarrollar y establecer metodologías optimizadas y validadas para determinar con precisión el grado de compactación en pruebas de test fill, considerando como base los ciclos de compactación, deformación vertical (métodos topográficos) y factores constantes de compactación tiempo e implementar metodologías de control para la compactación. Indicado lo anterior, es la intención de mejorar la seguridad de las presas, minimizando riesgos y costos a largo plazo, proporcionando herramientas valiosas para la práctica ingenieril en la construcción de terraplenes de presa, permitiendo la aceptación de compactación en asentamiento y densificación esperado. Añadir también la eficiencia constructiva, reduciendo plazos de ejecución y disminución de tiempos de inspección y pruebas de control de calidad.

La investigación pretende aportar conocimientos avanzados en compactación con geomateriales, contribuyendo hacia la evolución de normativas y estándares, generar datos empíricos robustos para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas, la determinación de los parámetros de compactación del suelo en un laboratorio es un paso crucial para controlar la compactación en el campo de movimientos de tierra como presas y terraplenes [2]. Socialmente proteger comunidades aguas debajo de posibles desastres por fallas de presas, garantizando seguridad y bienestar como en la operación de las presas, previniendo impactos negativos en las comunidades circundantes. Reducir costos de mantenimiento y reparación de presas mediante una compactación optima, previniendo perdidas económicas derivadas de fallas estructurales y desastres asociados, asegurando la estabilidad de la estructura a través del tiempo. Prevenir la contaminación de aguas subterráneas, degradación del suelo por filtraciones y

erosión. En relación a los rellenos de espesores convencionales menores a 30 cm, la investigación pretende dar alternativas de control a los rellenos compactados de espesores de capas mayores a 30 cm en movimiento de tierras.

Mencionar también que los recrecimientos de presas en la minería se dan, debido a que el vaso (de la presa) ha alcanzado su nivel de almacenamiento (borde libre) con agua y desechos (relave), esto se ejecuta para seguir operando.

El proyecto de investigación consiste en determinar metodologías para grados de compactación en base a terraplenes de test fill para presa con geomateriales (compuesto de suelos y rocas hasta un tamaño máximo de 20 pulgadas), el cual satisfaga también la aceptación de compactación en asentamiento y densificación. Por consiguiente, se pretende implementar nuevas metodologías de control para la compactación.

1.4.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Determinar las metodologías para grados de compactación en test fill para terraplenes de presa con geomateriales a caracterizar – Antapite – Huancavelica 2024.

1.4.2. Objetivos específicos

Caracterizar geotécnicamente los geomateriales para terraplenes de presa para su uso.

Determinar los grados de compactación mediante las distintas metodologías medibles y reproducibles.

Obtener mediante la aplicación de la norma ASTM D-5030 las densidades a distintos ciclos de compactación en test fill para su determinación del grado del grado de compactación.

Obtener la deformación vertical en el terraplén del test fill en los ciclos de compactación.

Determinar, de los ciclos de compactación en test fill el factor constante de compactación tiempo (FCC) para obtener grados de compactación necesario.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

En una investigación sobre la relación de espesores de terraplén y el número de pasadas de rodillo se ha demostrado una relación inversamente proporcional entre el espesor de la capa de terraplén y la densidad del suelo compactado. A mayor espesor, menor densidad obtenida, evidenciando la disipación de energía de compactación con la profundidad. Se observó que, independientemente del número de pasadas del rodillo de 12 toneladas (2, 4 o 6), los espesores de capa superiores a 0.45 m no alcanzaron las densidades requeridas para cumplir con el grado de compactación mínimo especificado, mientras que espesores menores, especialmente a 15 y 30 cm, sí lograron densidades adecuadas con un número suficiente de pasadas. También indicar que, a mayor número de pasadas, mayor densidad promedio obtenida. Específicamente, observó un incremento en la densidad promedio desde 2.03 gr/cm³ con 2 pasadas, hasta 2.16 gr/cm³ con 4 pasadas, y 2.29 gr/cm³ con 6 pasadas. En todas las franjas, las densidades más altas que encontraron cerca de la superficie, mientras que las más bajas registraron a una profundidad de 1.00 metro. Indicar también que se pueden determinar combinaciones específicas de espesor de capa y número de pasadas del rodillo de 12 toneladas para alcanzar la densificación requerida en terraplenes, utilizando geomateriales. Establecieron las siguientes combinaciones óptimas: 2 pasadas para espesores de 15 a 30 cm, 4 pasadas para espesores de 30 a 45 cm, y 6 pasadas para espesores de 45 a 60 cm. Estas combinaciones les permitieron cumplir con las especificaciones de construcción de carreteras aplicadas a terraplenes. Y como recomendación sugieren expandir la investigación mediante la comparación de métodos de densidad in situ utilizando diversos métodos, con el fin de optimizar el control de compactación en campo. Además, se sugiere realizar pruebas con un mayor número de pasadas de rodillo para evaluar el comportamiento de la densidad máxima seca ante compactaciones intensivas [3].

También en otra investigación denominada, Metodología para determinar densidades máxima y mínima en suelos granulares gruesos a partir de ensayos de

laboratorio de escala reducida se indica que la incertidumbre de la densidad relativa de los geomateriales (suelos granulares gruesos y enrocados) es una constante en proyectos. Esto se debe a la frecuente insuficiencia de recursos destinados a los ensayos necesarios para estimar dicho parámetro. Los rangos de densidades en materiales gruesos, realizo una recopilación de aproximadamente 150 datos provenientes de publicaciones técnica y congresos. El análisis de estos datos revelo que un mayor coeficiente de uniformidad (Cu) se asocia con una disminución de vacíos en los valores de densidad. Este procesamiento permitió proponer una metodología para la estimación de índices de vacíos, utilizando curvas homotéticas para la extrapolación de relación de vacíos. Esta alternativa de caracterización geotécnica proporciona una estimación inicial del grado de compactación en geomateriles lo cual resulta fundamental para el diseño de presas de tierra. En el análisis de geomateriales, la forma de las partículas (esfericidad y angularidad), no fue considerada por limitaciones del estudio. Estos parámetros son de importancia, sugiere su investigación futura [4].

Por otra parte, en la investigación titulada Densidades Mínima y Máxima en Materiales Granulares Gruesos - Resultados Preliminares de un programa de ensayos en ejecución, este estudio se centró en correlacionar los rangos de densidades en Materiales Granulares Gruesos (MGG), definidos como aquellos con partículas mayores a 75 mm, resaltando la importancia de la curva granulométrica completa para evaluar la compactación. Se determinó que las correlaciones tradicionales de índices de vacíos (emin y emax) con coeficientes de uniformidad (Cu) no son precisas para MGG debido a su macrogranulometría. Por ello, se realizó un programa preliminar de ensayos de densidades mínimas y máximas según las normas ASTM D4253 y ASTM D4254 (en laboratorio), buscando extrapolar emin y emax en MGG. Se propusieron dos métodos de extrapolación: el de granulometría paralela o curvas homotéticas, aplicable a MGG con Cu < 10, y el de granulometrías escaladas de manera potencial, recomendado para materiales bien graduados. Aunque los resultados preliminares son prometedores, se requieren estudios experimentales adicionales para validar la efectividad de estos métodos en la caracterización y compactación de MGG [5].

También indicar que, sobre Modelo de óptimos de parámetros de compactación de rocosos argilíticos en presas de tierra, dicho estudio desarrolló un modelo matemático para optimizar el proceso de la compactación de suelos rocosos argilíticos, considerando la influencia de la fracción gruesa mayor a 19.1mm en presas de tierra en Cuba, crucial para la seguridad y vida útil de estas estructuras. El modelo, validado en la obtención de parámetros de compactación en tres etapas laboratorio, terraplenes de prueba y presas reales (validar modelo), incorpora la fracción gruesa del suelo (> a 19.1 mm), mejorando la precisión en la predicción de la compactación. Esto permite usar eficientemente los suelos locales, reduce impactos ambientales y asegura la calidad en la construcción de presas de tierra [6].

En ese mismo sentido se tiene la investigación, Desarrollo de metodología de compactación y procedimientos de control de calidad para terraplenes de escollera a gran escala. Aquí presenta la metodología de compactación y procedimientos de control de calidad desarrollados para cumplir con los requisitos de desempeño funcional de los terraplenes de relleno de roca. La necesidad de una metodología de compactación innovadora fue necesaria debido a una multitud de factores; a) la variabilidad geológica de los materiales de relleno producidos en excavaciones masivas de roca, b) el uso de compactadores de impacto de alta energía (HEIC), c) un cronograma de construcción muy exigente que dictó la optimización del espesor de los materiales colocados y d) requisitos funcionales muy exigentes asociados con el desempeño de las instalaciones críticas de infraestructura de petróleo y gas. La presencia concurrente de estas condiciones hizo que las metodologías de compactación tradicionales fueran prácticamente insuficientes. Para calibrar el método propuesto, se construyó y monitoreó una serie de terraplenes de prueba utilizando diferentes materiales de roca, espesores de elevación y equipos de compactación. Los ensayos también se complementaron con pruebas a gran escala para la calibración de la densidad y la deformabilidad. Además, se realizó un monitoreo continuo como parte de los procedimientos de control de calidad durante la construcción. La aplicación exitosa y la efectividad de la metodología seguida se verificaron aún más mediante el uso de pruebas in situ

convencionales, así como múltiples pruebas geofísicas que validaron aún más la metodología de construcción postulada [7].

Por otra parte, se tiene, procedimientos de interpolacion en el calculo de asentamientos sobre suelos granulares usando el método de Schmertmann, este estudio evaluó la precisión del método de Schmertmann (1978) para calcular asentamientos en suelos granulares, utilizando herramientas computacionales geotécnicas. Se encontró que la interpolación lineal del método subestima las deformaciones verticales en zapatas rectangulares, especialmente en relaciones L/B mayores a 2. Se propuso una interpolación logarítmica, similar a la de Terzaghi, Peck y Mesri, con un factor de corrección de 0.8, para mejorar la precisión. El gráfico del factor de influencia de la deformación unitaria (Iz) del método de Schmertmann fue validado en su forma, pero se observaron diferencias en los vértices y su variación con la relación L/B. Se destaca la importancia de modelos constitutivos de suelo corroborados con ensayos de laboratorio, como el Hardening Soil Model, para obtener resultados confiables. Aunque el estudio se realizó en una arena limosa densa (preconsolidada), se sugiere que el método de Schmertmann puede extenderse a estos suelos si el módulo de elasticidad se basa en ensayos de laboratorio. Se proponen estudios futuros para analizar perfiles de suelo típicos, la influencia del nivel freático, múltiples zapatas, la rugosidad suelo-estructura y los factores de corrección del método [8].

Igualmente, en los parámetros geotécnicos del suelo efectos y consideraciones, señala la compactación en terraplenes no típicos multicapa mediante pruebas de campo in situ, revelando que la compactación de capas sucesivas influye significativamente en la compactación adicional de las capas subyacentes. Se desarrolló un modelo estadístico que cuantifica este efecto, demostrando que no es necesario alcanzar el 100% de compactación en cada capa individual. Se propone el uso de relaciones empíricas para evaluar el estado final del terraplén, optimizando el control de calidad y reconociendo la influencia de múltiples factores en la compactación como tipo de material (geomaterial), decisiones del contratista, etc [9].

Por otro lado, las pruebas de control de calidad de la construcción son fundamentales para garantizar que los rellenos compactados se coloquen correctamente. Un elemento en la implementación exitosa de la colocación de relleno compactado es la asignación apropiada de valores óptimos de humedad-densidad para los diferentes tipos de materiales de relleno encontrados durante la construcción. Durante décadas, la Oficina de Recuperación de los Estados Unidos (USBR) ha adquirido datos de pruebas de humedad-densidad de laboratorio para una variedad de tipos de materiales de los 17 estados occidentales en los que opera la USBR. Se realiza una comparación entre los datos óptimos de humedad-densidad publicados por la USBR con los resultados de pruebas de laboratorio obtenidos a partir de años de pruebas de control de calidad de rellenos compactados en proyectos comerciales en toda el área metropolitana de Denver. Se presentan curvas de contenido de humedad óptimo-densidad seca máxima que brindan una representación visual de la variabilidad en los datos que se puede anticipar para cada tipo de suelo evaluado. Estos datos brindan confirmación de la base de datos de la USBR y se pueden usar para estimar valores apropiados de contenido de humedad-densidad seca, evaluar la validez de los resultados de pruebas de compactación de laboratorio obtenidos, así como evaluar el estado de compactación del material de relleno en el lugar [10].

De acuerdo con los ensayos en laboratorio, el análisis de tensión-deformación en la muestra de suelo durante ensayos de laboratorio, durante la determinación de la resistencia y la compresibilidad del suelo en laboratorio por medio de diferentes aparatos, el suelo se carga de forma diferente. Esto influye en la distribución de la tensión y deformación en un espécimen. Ciertos factores no son evaluados durante la interpretación de los resultados. El método de elementos finitos muestra también que, durante las pruebas triaxiales, edométricos y de corte directo la distribución de la tensión y la deformación en la muestra no es uniforme. Se determinó para las arenas que la componente horizontal de la tensión en el centro de la sección transversal es significativamente menor que en los bordes. Si se conoce la distribución real de la tensión y la deformación en la muestra, es posible

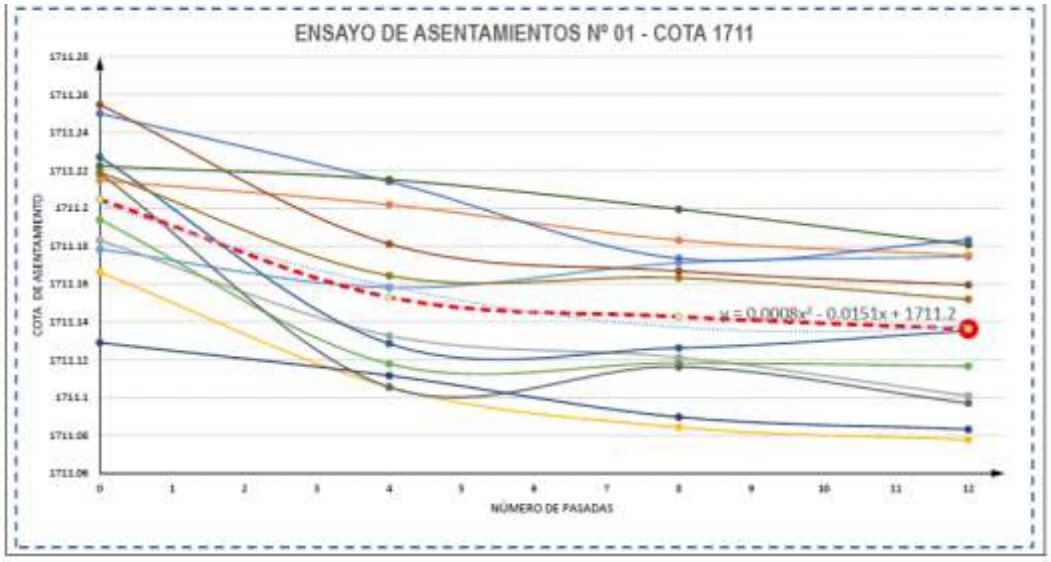
determinar la resistencia del suelo y la deformación del suelo de forma más precisa o valorar la influencia de diferentes factores en las propiedades del suelo [11].

De igual importancia el Numero de ciclos patron a nivel de capa de afirmado para obtener el optimo grado de compactacion, utilizando metodos: cono de arena y densimetro nuclear; en el acceso principal a Conga en Cajamarca en el año 2015 se centró en el control de asentamientos en diques construidos sobre suelos blandos. Se calcularon los asentamientos inmediatos, por consolidación primaria y secundaria, comparándolos con mediciones topográficas de campo y valores de diseño. Se describen los procesos de cálculo de asentamientos y procedimientos constructivos del dique. Se recopilaron datos de ensayos geotécnicos para caracterizar los estratos y se realizaron cálculos con Excel. Las mediciones topográficas, usando GPS diferencial y nivel topográfico, se efectuaron durante cinco meses. Se concluye sobre la comparación de asentamientos calculados, medidos y de diseño, proyectando el tiempo para el asentamiento total [12].

Entre tanto en la tesis de Análisis del diseño y proceso constructivo de un enrocado utilizando desmontes para la construcción de una presa de relaves-mina La Bonita en Arequipa indica que en la presa de relaves, se implementó un sistema de monitoreo topográfico para controlar las deformaciones verticales, específicamente los asentamientos diferenciales. Se establecieron hitos de control en terreno estable, enlazados a referencias del proyecto y señales del Instituto Geográfico Nacional, para servir de base al monitoreo. El monitoreo inicial se realizaría semanalmente, ajustando la frecuencia según las tendencias observadas y la evaluación del ingeniero geotécnico. También realizaron ensayos de asentamiento, como el control de calidad de la construcción del dique, resultando una variación máxima de asentamiento de 20 cm y un promedio de 8 cm en 6 ciclos de compactación siendo este un diferencial de milímetros. Además del control topográfico, se realizaría una evaluación geotécnica integral de la instrumentación y ensayos. Por último, la construcción de la presa se llevó a cabo utilizando material de préstamo extraído de canteras ubicadas en la proximidad del área de la presa. Este material, destinado a los rellenos, fue compactado mediante el uso de un rodillo liso vibratorio de 12 toneladas, un equipo que proporciona una energía de

compactación significativa para materiales gruesos. La compactación se realizó en capas sucesivas, con espesores que oscilaron entre 0.4 y 0.6 metros, asegurando así una compactación uniforme en toda la estructura. El proceso constructivo se extendió desde el nivel de cimentación hasta el nivel de coronación, siguiendo las especificaciones técnicas establecidas por el proyectista. La granulometría del material utilizado abarcó un amplio rango de tamaños, desde rocas y bolos de hasta 1000 mm, hasta partículas finas como arenas, limos y arcillas de 0.05 mm. Esta gradación amplia y continua, observada en la curva granulométrica, es comparable con la de presas construidas con desmonte en diversas partes del mundo, lo que sugiere una distribución de tamaños óptima para la estabilidad de la presa [13].

Figura 1
Ensayo de asentamiento



Nota. De [14]. Ensayo de asentamiento por número de pasadas

Por otra parte, se presenta una revisión histórica de la compactación del suelo enfocado carreteras, destacando la evolución de las pruebas de laboratorio como el Proctor y el CBR. Se subraya la importancia de la uniformidad en la compactación para prevenir fallos prematuros en pavimentos, impulsando la adopción de la compactación inteligente. Se discute la capacidad actual para predecir el comportamiento del suelo compactado, identificando limitaciones y proponiendo el uso de superficies compactadas tridimensionales para mejorar la

interpretación. Se enfatiza la necesidad de avances teóricos en la respuesta de suelos compactados a cargas cíclicas y en la medición y control del grado de saturación para desarrollar rodillos 'inteligentes' que compacten según especificaciones de rendimiento [14].

Ademas, el estudio Modelos predictivos para para estimar las propiedades de suelos compactados desarrollo metodologías empíricas para predecir el peso seco específico máximo y el contenido de humedad óptimo en suelos compactados, utilizando datos de ensayos Proctor normal. Se evaluaron correlaciones entre parámetros de compactación y propiedades geotécnicas, identificando influencias clave como el límite de plasticidad, el porcentaje de finos y el peso específico de los granos. Se propusieron ecuaciones matemáticas como metodologías predictivas, demostrando su precisión en la validación con datos de la presa de Umari, superando a otras metodologías empíricas existentes. Sin embargo, se observaron limitaciones en la predicción de humedades extremas, lo que sugiere la necesidad de mejoras en las metodologías. Se concluye que estas metodologías son adecuadas para fases preliminares de proyectos, pero se recomienda precaución en proyectos ejecutivos. Se proponen futuras investigaciones para perfeccionar las metodologías, expandir su aplicabilidad a diferentes energías de compactación y tipos de suelo, y explorar el uso de metodologías basadas en redes neuronales artificiales [15].

También como indica la investigación Numero de ciclos patron a nivel de capa de afirmado para obtener el optimo grado de compactacion, utilizando metodos en su investigación “Número de ciclos patrón a nivel de capa de afirmado para obtener el óptimo grado de compactación, utilizando métodos: cono de arena y densímetro nuclear; en el acceso principal a conga” en la actualidad Cajamarca no cuenta con parámetros propios que les permitan controlar la compactación en función al número de “ciclos” necesarios que debe ejecutar con un equipo compactador en obra, por lo cual el estudio fue realizado para determinar y obtener de los ensayos de densidad de campo, valores que se identifican como los más representativos, apoyándose en normas nacionales e internacionales. Para la ejecución seleccionó un tramo de prueba, de 3 kilómetros, sobre el cual, una vez colocada la capa uniforme con espesor de 150 mm de material de afirmado, se

realizaron los ensayos de control de compactación, utilizando los métodos: Densímetro Nuclear ASTM D2922 – MTC E 124 y Cono de arena ASTM D1556 – MTC E 117. Determinando el grado de compactación en los diferentes ciclos desde 2 ciclos hasta 7 ciclos. De estos resultados obtenidos con los métodos de densidad de campo, determinó que con 6 ciclos pasados con el rodillo liso vibratorio de 10 ton. obteniéndose el óptimo grado de compactación del 95% Proctor estándar ASTM D 698 – MTC E 116 en la capa de afirmado; especifica las EG – 2013 en su acápite Requerimiento de Construcción: 301.E.21 Aceptación de los Trabajos (e. Compactación) [12].

Por otra parte sobre Criterios sobre la compactación de suelos y el control de calidad de terraplenes el control de calidad de un terraplén se traduce en el control de compactación diario en obra, basado en alcanzar un grado de compactación un determinado "grado de compactación", con la energía seleccionada en un rango de humedad preestablecida [16].

Por último se tiene algunas consideraciones de Diseño de presa de relaves alpamarca y el uso de materiales de mina como cuerpo de presa, en este estudio exploró la viabilidad de utilizar desmonte de mina (geomateial) , un subproducto de la actividad minera sin valor comercial disponible y cumple que cumple similares funciones que una grava, como material de construcción en el cuerpo de una presa de relaves. Se consideraron aspectos de diseño como análisis estático-pseudoestático y de estabilidad, utilizando el método de Bishop modificado. Los parámetros de resistencia del desmonte se estimaron a partir de estudios previos, adoptando un ángulo de fricción de 39° debido a su mineralogía. La imposibilidad de realizar ensayos de corte a escala natural debido al gran tamaño del material fue una limitación. Los resultados de los análisis y modelamientos mostraron que el uso de desmonte de mina al 100% cumple con los criterios mínimos de seguridad recomendados por el US ARMY, configurando una estabilidad adecuada [17].

2.2. BASES TEÓRICOS CIENTÍFICO

2.2.1. Geomateriales

a. Tamaño y distribución de las partículas

El tamaño de las partículas del suelo varía ampliamente, clasificándose generalmente como grava, arena, limo o arcilla. Diversas organizaciones han establecido límites de tamaño para describir los suelos, siendo el Sistema Unificado (adoptado por ASTM) el más aceptado actualmente. Las gravas son fragmentos de roca, las arenas predominan en cuarzo y feldespato, los limos son fracciones microscópicas de cuarzo y minerales micáceos, y las arcillas son partículas laminares microscópicas de minerales de arcilla. Las arcillas se definen por su tamaño (<0.002 mm o <0.005 mm) y plasticidad, diferenciándose de otras partículas finas que no necesariamente contienen minerales de arcilla [18]. Por otra parte [19] describe la caracterización geotécnica de materiales granulares gruesos (geomateriale), como suelos de grano muy grueso, rellenos de roca y rocas de desecho de minería incluido finos. Estos materiales son complejos debido a su amplia gama de tamaños de partículas y diferentes orígenes geológicos. El documento clasifica los materiales granulares gruesos en dos grupos principales: sedimentarios (afectados por procesos geológicos) y pilas de roca (no afectados por procesos geológicos). También analiza el método de gradación paralela para escalar las propiedades geotécnicas de estos materiales y destaca la importancia de considerar factores como la forma de las partículas, la resistencia y la rotura. El documento concluye con recomendaciones para el uso del método de gradación paralela y enfatiza la necesidad de una caracterización cuidadosa debido a la complejidad de los materiales granulares gruesos.

Como lo define [20] un geomaterial es cualquier material de origen geológico como rocas y suelo (combinación y/o mezcla de suelos y rocas). Esta definición debe ampliarse para incluir materiales artificiales obtenidos mediante la reprocesamiento de los materiales originales de origen geológico.

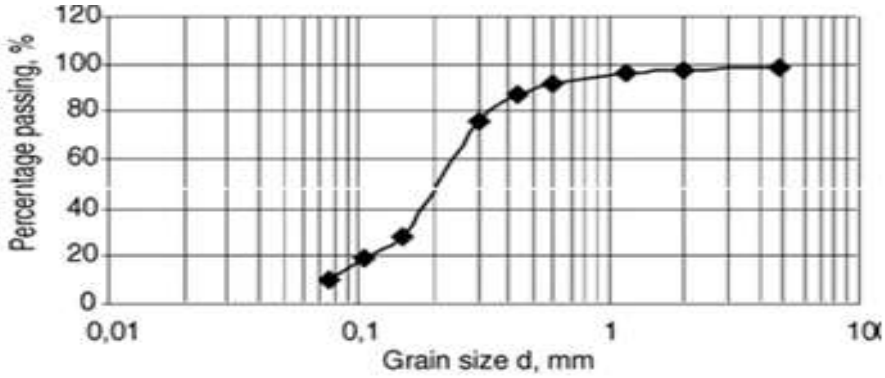
Figura 2
Grupos en geomateriales

Nota. De [20]. Procedencia y proceso de geomateriales.

b. Ensayo de Propiedades físicas y mecánicas del suelo

Para caracterizar y clasificar el tipo de suelo [11] uso el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) en arena mal gradada (SP-SM), en ella caracteriza sus propiedades físicas de acuerdo a la distribución granulométrica como se aprecia en la Fig.1.

Figura 3
Curva granulométrica de la arena fina



Nota. De [11]. Gradación de curva granulométrica de la arena fina

c. Relaciones humedad-densidad-resistencia-energía para geomateriales compactados.

Las pruebas de compactación de laboratorio con Proctor y mesa vibratoria se utilizan comúnmente para determinar las relaciones humedad-densidad-energía de compactación para suelos y, por lo general, se limitan a una o dos curvas de energía de compactación. Sin embargo, no proporcionan parámetros de resistencia al corte o rigidez que se utilizan comúnmente en el diseño y con especificaciones basadas en el rendimiento. (ASTM)

d. Clasificación de la muestra

Ejecutar una clasificación global de una muestra (macro-granulometria, in situ), obteniendo la curva granulométrica, densidad, estas en campo y posteriormente en laboratorio su determinación de la gravedad especifica (Gs), indicados por [4].

e. Ábacos de granulometría

En la praxis, al caracterizar los materiales MGG de origen natural “canteras por ejemplo” estas contienen gradación variable, estas presentando diámetros efectivos variables, pero que a su vez poseen también similitud en sus tamaños máximos y mínimos. Donde es posible alcanzar densidades mayores en función de su granulometría [5].

f. Presas de materiales compactados

En su investigación [21] indica que hasta hace un poco más de una década era usual exigir la colocación de capas hasta 30cm, y compactadas con un tractor D-8 en muchas presas en México, posteriormente especificaron la compactación de los enrocamientos, aun cuando contengan fragmentos hasta 60cm de diámetro, teniendo una colocación de enrocamiento por volteo, con capas de espesores hasta 5.0m, también indican que la disposición de materiales con tamaños hasta 30cm en la presa se compacte con rodillo de vibratorio de 10 ton.

g. Sistema de clasificación AASHTO

Este sistema de clasificación de suelos fue desarrollado en 1929 como el Sistema de Clasificación de Administración de Carreteras. Con la actual versión propuesta por la Comisión de Clasificación de Materiales para los Tipos de

Carreteras Subrasantes y Granulares de la Junta de Investigación de Carreteras en 1945 (Norma ASTM D-3282; método AASHTO M145). El sistema de clasificación AASHTO utilizado actualmente De acuerdo con este sistema el suelo se clasifica en siete grupos principales: A-1 a A-7. Los suelos que clasifican en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz número 200. Los suelos donde más de 35% pasa a través del tamiz número 200 se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 [18].

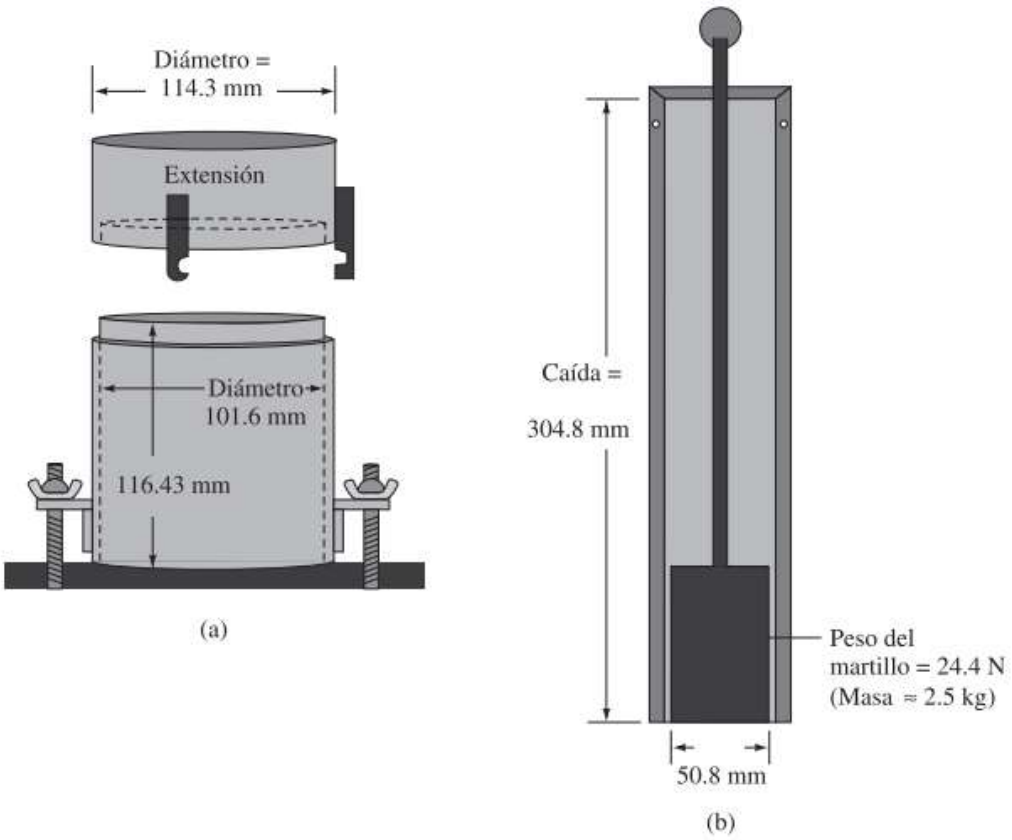
h. Sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS)

El sistema propuesto por Casagrande en 1948, en la actualidad es ampliamente utilizado por los ingenieros (ASTM D-2487). Este sistema presenta una tabla y clasifica los suelos en dos grandes categorías. Los suelos de grano grueso (gravas y arenas) con menos del 50% que pasa el tamiz N°200 y suelos de grano fino (Limo, arcilla y orgánicos) con más del 50% pasante el tamiz N°200 [18].

i. Proctor estándar

La prueba proctor, la muestra de suelo se compacta en un molde normado (fig. 9a), durante la prueba de laboratorio el suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego se compacta en tres capas iguales con el martillo (fig. 9b) que entrega 25 golpes a cada capa [18].

Figura 4
Equipos para la prueba de Proctor estándar

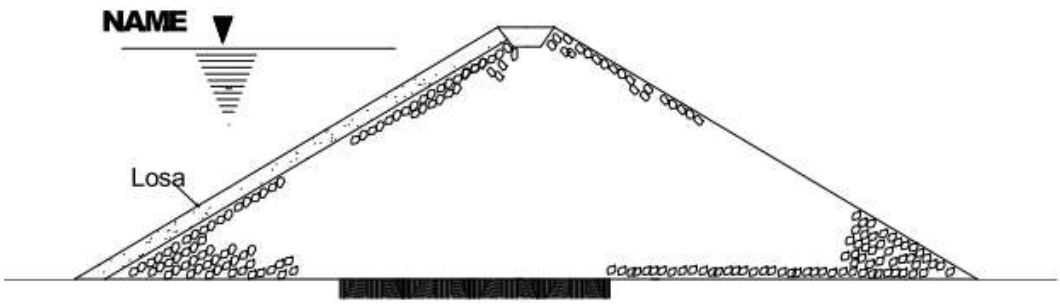


Nota. De [18]. Esquema para los aparatos del equipo proctor.

j. Presa de enrocamiento

Las masa de roca este tipo de presas es voluminosa indica [21] facilita la construcción, además es costructible en cualquier condición climática.

Figura 5
Presa de enrocamiento con losa de concreto o asfalto (cimentación rígida)



Nota. De [21]

k. Tamaño y distribución de las partículas

La composición de un suelo se define por la diversidad de tamaños y formas de sus partículas, que varían desde tamaños microscópicos hasta fragmentos de roca de varios centímetros. La granulometría, o textura, se determina mediante el análisis de tamizado, que separa las partículas en rangos de tamaño, revelando la proporción de cada fracción en el suelo. Un suelo bien gradado, con una distribución uniforme de tamaños, muestra una curva granulométrica suave y continua, indicando una mezcla equilibrada de partículas. Por el contrario, un suelo mal gradado, con predominancia o ausencia de ciertos tamaños, presenta una curva irregular. Los suelos uniformes, compuestos por partículas de tamaño similar, tienden a ser más porosos y menos resistentes. Además del tamaño, la forma de las partículas influye en las propiedades mecánicas del suelo. Las partículas angulares en suelos gruesos mejoran la trabazón y la resistencia al desplazamiento, en comparación con las partículas redondeadas. En suelos finos, la forma laminar de los coloides intensifica las propiedades electroquímicas y la plasticidad, lo que afecta significativamente el comportamiento del suelo [21].

l. Caracterización geotécnica de desechos de roca minera

El comportamiento geotécnico global de la roca estéril se rige por las propiedades índice como características granulares, como la distribución granulométrica, las formas de los granos, gravedad especifica (Gs), límites de consistencia. Dando resultado de materiales bien gradados que contenían grava, arena, limo y arcilla, caracterizándose como “angulares y muy angulares”. La resistencia al corte de la roca estéril es idéntica a la de los materiales granulares sueltos [22].

2.2.2.Grados de compactación

a. Compactación de campo y grado de compactación

Tanto la compactación de campo y laboratorio está en función de la humedad, peso específico seco y energía de compactación, esta última en campo depende del tipo de suelo, humedad, numero de pasadas y características del equipo de compactación, por último, el espesor de capa. Sin embargo, en campo la energía de compactación no puede ser cuantificada como si es posible en laboratorio con la

energía dinámica del Proctor ya que en campo es una energía estática por vibración. Es por ello que para controlar la compactación en campo se recurre al parámetro que relaciona el peso específico seco de campo con el de laboratorio del proctor correspondiente usado como patrón. A este parámetro se le denomina "Grado de compactación", se muestra en la siguiente ecuación (x).

$$G_C = \frac{\gamma_{d-terraplen\ (campo)}}{\gamma_{d-max\ (laboratorio)}} \ldots. \ (X)$$

Al igual que los conceptos de "humedad óptima" y "peso específico seco máximo", el "grado de compactación" requiere referirlo a un patrón de laboratorio en este caso proctor estándar o modificado [16].

b. Objetivos de la compactación.

La compactación es un medio para lograr un fin, en este caso mejorar las propiedades mecánicas de los suelos. La compactación es un método de mejoramiento de suelos. Los procedimientos y equipos para la compactación son similares para diversas infraestructuras, lo que difieren en el caso para una explanación para carretera o aeropuerto es alcanzar alta resistencia a la deformación y corte mientras que para una presa de tierra es alcázar la flexibilidad y baja permeabilidad [16].

c. Control de compactación

Para este control se requiere determinar el contenido de agua y peso volumétrico seco en el terraplén. Solo así es posible controlar las propiedades mecánicas in situ y su relación con el diseño. El método de control consiste en compactar especímenes de los acopios del terraplén para obtener su relación humedad-densidad, y comparar los resultados de ambas series de prueba con lo especificado. El grado de compactación del suelo en el terraplén puede obtenerse a partir de los control de los pesos volumétricos y control de humedad obtenidos in situ y patrones de laboratorio [23].

d. Material para espaldones de presa

No existen especificaciones claras referidas a que calidad de roca y que granulometría deben emplearse en la construcción de una determinada presa, indica que han utilizado rocas de baja calidad y resistencia en ocasiones algunas con éxitof,

especifica un uso granulometrico con hasta el 50% de tamaños menores a 25mm y un porcentaje máximo hasta el 5% de finos, con la finalidad de que el cuerpo tenga permeabilidad mayor al 10^{-3}cm/s. pueden usar rocas sanas de hasta 1m y en la proximidad de los paramentos de hasta 2m. Las condiciones o parámetros para la compactación, recomienda realizar terraplenes de ensayo (test fill) [24].

e. Método de compactación (vibración)

La compactación es un proceso esencial en ingeniería geotécnica de los geomateriales, cuyo objetivo principal es aumentar la densificación del suelo o capa granular, reduciendo el volumen de vacíos y, consecuentemente, mejorando sus propiedades mecánicas y estabilidad. Este proceso se logra mediante la aplicación de energía mecánica, que reorganiza las partículas, eliminando el aire de los vacíos y permitiendo un empaquetamiento más denso en las capas. Dentro de los diversos métodos de compactación, la compactación por vibración se destaca como una técnica particularmente efectiva para suelos granulares y materiales cohesivos de baja plasticidad, ofreciendo ventajas distintivas sobre métodos estáticos o de impacto puro. La compactación por vibración es el proceso de densificación de un material mediante la aplicación de fuerzas dinámicas oscilatorias (vibraciones). A diferencia de la compactación estática (que aplica una carga constante) o la compactación por impacto (que aplica golpes discretos), la vibración induce una resonancia en las partículas del material. Este mecanismo vibratorio, a menudo combinado con una carga estática o dinámica adicional, provoca los siguientes efectos clave: Reducción de la Fricción Intergranular (La vibración transitoria y repetitiva reduce temporalmente las fuerzas de fricción entre las partículas. Esto permite que las partículas se reorganicen más libremente y se deslicen a posiciones más estables y densas con menor resistencia), Reorientación de Partículas (Las oscilaciones facilitan la reorientación de las partículas irregulares o alargadas hacia una configuración más compacta, maximizando el número de puntos de contacto y minimizando los vacíos) y Expulsión de Aire y Agua si esta saturado (La vibración puede ayudar a expulsar el aire atrapado entre las partículas. En materiales saturados, también puede generar una licuefacción temporal que facilita la densificación) [18].

f. Compactibilidad de los suelos

Una de las preguntas que se debe responderse el ingeniero geotécnico, un depósito de suelo con que método de compactación se puede mejorar y en que grado. Mitchell (1982) identifico suelos con estrato granulometrico adecuado con contenido de finos inferior al 10% puede compactarse por métodos vibratorios y de impacto teniendo en cuenta un gran numero ensayos de análisis granulometrico para su evaluación geotécnica. El proceso de compactación vibratorio debe adaptarse a la obra y requisitos de densificación, como: El equipo (sonda, vibrador), proceso de compactación (cuadricula, espaciado, frecuencia de vibración) y control y seguimiento del proceso (producción, verificación de densificación) [25].

g. Pedraplenes de prueba (Test fill)

En obras importantes, cuando existen dudas sobre la bondad de los materiales que van a emplearse en la estructura, o es necesario elegir el equipo de compactación más adecuada, se realizan terraplenes de prueba (Test fill) reproduciendo las condiciones de trabajo especificado (granulometría, espesor de capa, humedad y numero de pasadas del compactador). Mediante muestreos se determinan el peso volumétrico, rotura de partículas, granulometría después de la compactación, contenido de humedad. Esta prueba es de mucho interés para los ingenieros para la elaboración de especificaciones para la construcción de enrocamiento [23].

h. Energía de compactación a utilizar (parámetros de compactación)

La energía de compactación está en función a qué objetivos se requiera llegar para mejorar las propiedades mecánicas del suelo, los intereses los “carreteros” (terraplenes resistentes) y “preseros” (priorizan la flexibilidad y permeabilidad). Con lo anterior los aspectos a tener en cuenta, seleccionar el tipo de material a compactar, granulometría, humedad natural, energía de compactación. Entonces para infraestructuras de trasporte se utilizan la energía a nivel de laboratorio correspondiente a la prueba Proctor modificado; mientras que para presas y diques de contención es variable dependiendo su configuración estructural la cual recomienda utilizar la energía de laboratorio de compactación de la prueba Proctor estándar [16].

i. Influencia de la fracción gruesa

Es conocida la influencia de la fracción gruesa sobre los parámetros de compactación (partículas mayores al tamiz N°4 dirigida al incremento que se produce pesos específicos secos del suelo compactado, **aspecto que no refleja el Ensayo de Proctor Estándar.** Aquí la investigación presenta una revisión de distintos autores referente a lo indicado que se muestra en la Tabla X. la cual las ecuaciones 3 y 4 es un aporte del autor a la corrección, a escala de laboratorio, de los parámetros de compactación de los rocosos argiliticos obtenidos mediante el ensayo de Proctor Estándar. Además, el diseño experimental consistió en tres etapas, siendo esta la obtención de parámetros de compactación a escala de laboratorio, obtención de parámetros a escala de campo en terraplenes de pruebas con un compactador de 30 ton. y obtención de parámetros de compactación a escala de campo en los terraplenes de las presas como validación definitiva del modelo propuesto [6].

Figura 6
Resumen de aportes de diferentes autores estudiados sobre la influencia de la fracción gruesa.

Autor	Definición
Akroyd (1957)	$$\gamma dmáx_c = \frac{(100-X)\gamma dmáx + 0{,}9GsX}{100} \quad (1)$$ $$\omega o_c = \frac{100-X}{100} \times \omega o \quad (2)$$ Donde: γdmáxc: peso específico seco máximo corregido (g/cm3) γdmáx: peso específico seco máximo obtenido del Ensayo Próctor Estándar (g/cm^3) Gs: peso específico del material (g/cm^3) X: porcentaje de fracción gruesa mayor de 19,1 mm que se excluye del Ensayo Próctor Estándar (%) 0,9: coeficiente que considera la variación que introduce en los resultados el porcentaje de grueso mayor del tamiz 19,1 mm ωo c: humedad óptima corregida (%). ωo: humedad óptima obtenida del Ensayo Próctor Estándar (%)
Armas y Horta (1987)	Expone que el peso específico seco máximo del material crece poco cuando el contenido de gravas (mayor del tamiz No. 4) es menor que un 30 %, crece hasta un máximo entre el 30 % y el 60 % y cuando es mayor del 60 % decrece y propone coeficientes de corrección estandarizados para el peso específico seco y la humedad obtenidos del Ensayo Próctor Estándar con hasta un 40 % de fracción gruesa mayor del tamiz No. 4
Hernández (2002, 2005)	Obtuvo resultados en terraplenes con esquistos, margas, serpentinitas y argilitas que le permitieron concluir que la fracción mayor de 19,1 mm es la que produce el incremento de los pesos específicos secos y que la misma presenta porcentajes de humedad que incrementan las humedades de compactación, obteniéndose en el campo valores más bajos de pesos específicos secos que los corregidos empleando el coeficiente de 0,90 de Akroyd. Consecuentemente modificaron las ecuaciones 1 y 2, validando en la práctica las siguientes: $$\gamma dmáx_c = \frac{(100-X)\gamma dmáx + \gamma gX}{100} \quad (3)$$ $$\omega o_c = \frac{100-X}{100} \times \omega o + \frac{\omega gX}{100} \quad (4)$$ Donde: γg: peso específico volumétrico de la fracción gruesa mayor de 19,1 mm (%) ωg: humedad de la fracción gruesa mayor de 19,1 mm (%)

Nota. De [6]

2.2.3.Metodologías (de compactación de control de compactación).

a. Método de ensayo de control de calidad (CC)

Los métodos de ensayo de control más habitual durante la construcción de terraplenes consisten en la realización de pruebas de ensayos puntuales, utilizados de forma sistemática o estadística. Dichas pruebas incluyen la prueba estática de carga de placa, difractómetro de caída de peso (modulo), densímetro nuclear, globo de agua y la prueba cono de arena, métodos normalizados y resultados comparables entre si. Estos proporcionan información relativamente precisa, con inconvenientes como mediciones con porcentaje mínimo de volumen, requiere una pausa en la construcción para la prueba y problemas de seguridad debido a la presencia de personas y/o equipos en movimiento [1].

a. Métodos compactación

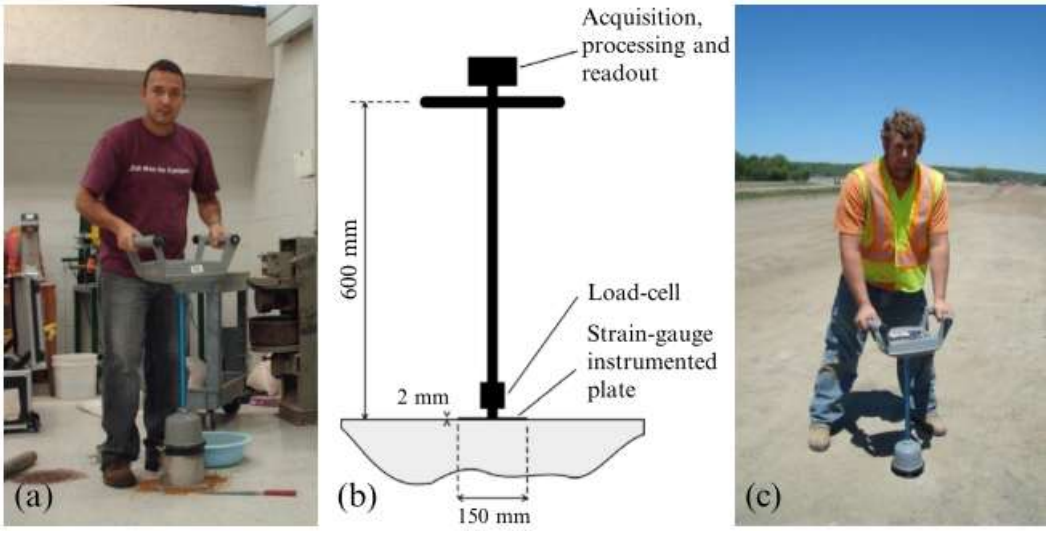
La tecnología de medición de control continuo de la compactación (CCC) se inició en 1970 para uso en rodillos vibradores de material granular, se miden continuamente la aceleración del tambor del rodillo y se calculan un valor a partir de la señal de aceleración (acelerómetro) utilizando dos enfoques distintos, una para calcular una relación armónicos de frecuencia para un tiempo establecido y otra para calcular la rigidez del suelo o modulo elástico basándose en un modelo de interacción tabor-suelo y otros supuestos. El sistema proporción un control automático de retroalimentación para la amplitud y frecuencia de vibración del rodillo. a este sistema se denomina compactación inteligente (IC) siendo una técnica de control y ensayo in situ. los sistemas de control del equipo utilizan esta información para optimizar la compactación y la actividad. Los rodillos vibratorios equipados con sistema de posicionamiento global (GPS), utilizan amplitudes altas frecuencias bajas para compactar suelos blandos y llegar a zonas mas profundas, mientras que para suelos rígidos y poco profundos utilizan amplitudes bajas y frecuencias altas. Este proceso garantiza una evaluación instantánea en la zona que se está compactando. La información de compactación es en tiempo real en la cabina del operador. Se utilizan procedimientos de calibración para correlación del sistema con un módulo o densidad del material in situ mediante otros ensayos. Con este sistema se pueden establecer curvas de compactación, ensayos in situ e indicar las pasadas optimas del rodillo. [1].

b. El módulo del suelo como criterio de control de la compactación.

La utilización del módulo del suelo como una metodología de control para la compactación puede aplicarse de forma similar a como se utiliza actualmente para la densidad seca. Esta metodología mediante el módulo de compactación que debe alcanzarse en el campo se establece mediante ensayos de laboratorio. Se realizan ensayos Proctor modificado o Proctor estándar y a partir de las curvas de compactación se determina el contenido de humedad óptimo, así como la densidad seca máxima. Al mismo tiempo y para cada prueba Proctor, se realizan pruebas de módulo para obtener el módulo del suelo de laboratorio. La figura 8 muestra un ejemplo de un dispositivo de medición de módulo que puede aplicarse en el laboratorio y en el campo. El resultado de estos ensayos Proctor es una curva de módulo BCD frente al contenido de agua, así como una curva de densidad seca frente al contenido de agua. En la obra, el valor objetivo del módulo BCD se verifica mediante ensayos BCD y el contenido de agua se verifica independientemente mediante ensayos de campo (por ejemplo, humedometro en campo) [1].

Figura 7

Ejemplo prueba de modulo en laboratorio y campo. (a) en laboratorio. (b) croquis de prueba. (c) prueba de campo.



Nota. De [1]

c. Relaciones entre mediciones de compactación in situ e integradas con rodillos para suelos granulares.

Para evaluar el valor del medidor de compactación y las tecnologías de compactación integradas con rodillos de potencia de accionamiento de la máquina, se realizó un estudio de campo con 30m de prueba con cinco materiales granulares. Franjas de prueba se compactaron con un prototipo de rodillo vibratorio de tambor liso CS-533E y se analizaron diversos parámetros de compactación mediante métodos in situ (ejem. densidad humedad, método nuclear, penetrómetro de cono dinámico, pruebas de placa de carga, etc.). Para caracterizar la interacción entre el rodillo y el suelo, las pruebas de suelo se centraron en la medición de los parámetros de compactación de la capa de compactación, a una profundidad no superior a 300 mm las pruebas experimentales de cinco franjas de prueba proporcionaron datos de los rodillos y mediciones in situ para varias etapas de compactación, que se utilizaron para realizar análisis de regresión estadística. Se investigaron las relaciones entre los datos de las tecnologías de compactación integradas en rodillos, prestando especial atención a la variación relativa observada para cada sistema de medición. El promedio estadístico mitigó la variabilidad de las mediciones e indico resultados estadísticamente significativos. (R^2>0.9) Relaciones entre mediciones de compactación in situ e integradas con rodillos. Esta investigación demuestra técnicas de análisis estadístico para las cuales se pueden desarrollar procedimientos de calibración utilizando tecnologías de compactación integrada con rodillos [26].

d. Numero de ciclos de compactación

El número de ciclos de compactación, comúnmente denominado número de pasadas, es un parámetro fundamental en la ingeniería de compactación, tanto en laboratorio como en campo. Representa la cantidad de veces que una carga o energía de compactación se aplica sobre una misma área o volumen de material. En el contexto de la compactación vibratoria, un ciclo o pasada se refiere a cada aplicación de la carga dinámica generada por el equipo vibratorio sobre el punto de interés del material. El número de ciclos (ida y vuelta) es una medida directa de la energía acumulada de compactación aplicada al material. Cada pasada contribuye a la densificación del suelo al inducir una reorganización adicional de las partículas y la expulsión de vacíos. La relación entre el número de pasadas y la densidad alcanzada es no lineal: Incremento Inicial de Densidad (Las primeras pasadas

suelen producir los aumentos más significativos en la densidad del material, ya que las partículas se reacomodan rápidamente desde un estado suelto a uno más denso), Densificación Decreciente (A medida que el número de pasadas aumenta, el incremento incremental en la densidad tiende a disminuir progresivamente. Esto se debe a que el material se vuelve más denso, las partículas están más estrechamente empaquetadas y la resistencia al reacomodo aumenta) y Densidad Óptima o Asintótica (Eventualmente, se alcanza una densidad máxima (o una densidad asintótica) más allá de la cual pasadas adicionales tienen poco o ningún efecto práctico en la densificación. Continuar compactando más allá de este punto es ineficiente y puede incluso causar pulverización de partículas en algunos materiales).

e. Auscultación de presas

[27] indica la eficiencia de los sistemas de control de movimiento a través de métodos topográficos, adaptados a cada una de las 70 presas menciona. La tecnología en el mercado a introducido a un sistema complementario de control de movimientos en la presa y cantera. Estos sistemas están constituidos por estación total automática, prismas especiales, software de control y monitorización de datos estas obtienen coordenadas absolutas instantáneas de forma que por diferencias con las coordenadas anteriores se pueden determinar los movimientos de los mismos.

f. Ciclos de compactación

Este parámetro es el más empleado en nuestro medio para controlar la compactación de un suelo y consiste en relacionar el peso unitario seco del suelo compactado en obra, con el máximo peso unitario seco obtenido en el laboratorio empleando el mismo material.

g. Grados de compactación

Es la pasada que realiza el compactador en ir y volver a su posición inicial en un área determinada y en un periodo de tiempo, una vez finalizado el ciclo, vuelve a empezar.

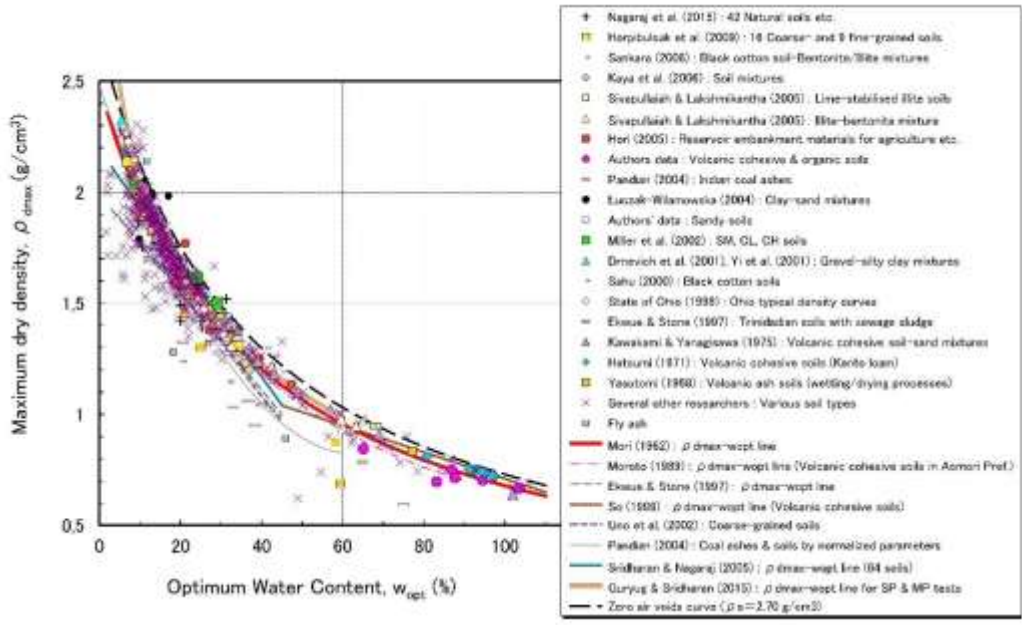
$$GC = \frac{peso\ volumetrico\ seco\ de\ la\ prueba\ en\ terreno}{peso\ volumetrico\ maximo\ de\ laboratorio} \times 100 \ldots (1)$$

Alcance general de las características de compactación de suelos mediante pruebas de laboratorio. La compactación del suelo es la manera de elevar su

densidad y a la vez variación de sus características físico-mecánicas de determinados suelos. La evaluación de los parámetros como la máxima densidad seca máxima (DMS), compactación en laboratorio, y el óptimo contenido de agua (OCH), es muy importante el control de compactación en los rellenos estructurales. Se indica que se ha revisado superior a 400 publicaciones tanto como ensayos de laboratorios actuales para generalizar correlaciones entre la DMS, el OCH, límite plástico, grado óptimo de saturación y el grado de compactación. La investigación confirma correlaciones viables entre la densidad seca máxima frente al contenido óptimo de agua, la MDS frente al límite plástico y entre el OCH trazado frente al límite plástico. La correlación entre el grado óptimo de saturación y el OCH muestra que el OCH es menor para los suelos con mayor densidad seca máxima. En ese sentido, con un COH menor al 40%, la relación entre el grado óptimo de saturación y el OCH depende en gran medida del tipo de material y su tamaño de las partículas. El estudio abarca variedad de tipos de material, diversos niveles de energía de compactación así como métodos y operadores de todo el mundo, indicado en su investigación por [28].

Figura 8

Correlación entre la MDS y el OCH para ensayos de compactación Proctor estándar.



Nota. [28]

Tabla 1
Ecuación de correlación

Secuencia	Autor(s)	Correlación	Tipo de suelo/name
1	Moroto (1989)	$\rho_{dmax}=\frac{1}{0.117OCH+0.37(}$ R=0.93	Suelos cohesivos volcánicos en la prefectura de Prefectura de Aomori, Japón
2	Ekwue and Stone (1997)	$\rho_{dmax=1.989-0.022O(}$ n=48, R=0.98	Suelos de Trinidad incorporando lodos de depuradora
3	So (1999)	$\rho_{dmax=1.31-0.006OCI}$ n=43, R=0.97	Suelo cohesivo volcánico suelo (Kanto marga)
4	Uno et al. (2002)	$\rho_{dmax}=\frac{\{25*2.7^{(-0.0216(}}{9.8}$	Suelo granulares
5	Sridharan y Nagaraj (2005)	$\rho_{dmax}=\frac{\{0.23\left(93.3-\frac{OCH}{0.92}\right.}{9.8}$ n=71, R=0.95	Suelo de grano fino
6	Gurtug y Sri-dharan (2015)	$\rho_{dmax}=\frac{\{25*2.7^{(-0.0216(}}{9.8}$	Suelo de grano fino (proctor modificado y estandar)

Nota. [28]

La Tabla 1 muestra ecuaciones de correlación para la MDS y el OCH en pruebas de compactación Proctor estándar y modificado (n: número de puntos de datos, R: coeficiente de correlación de correlación), propuestas por Spagnoli & Shimobe, (2020).

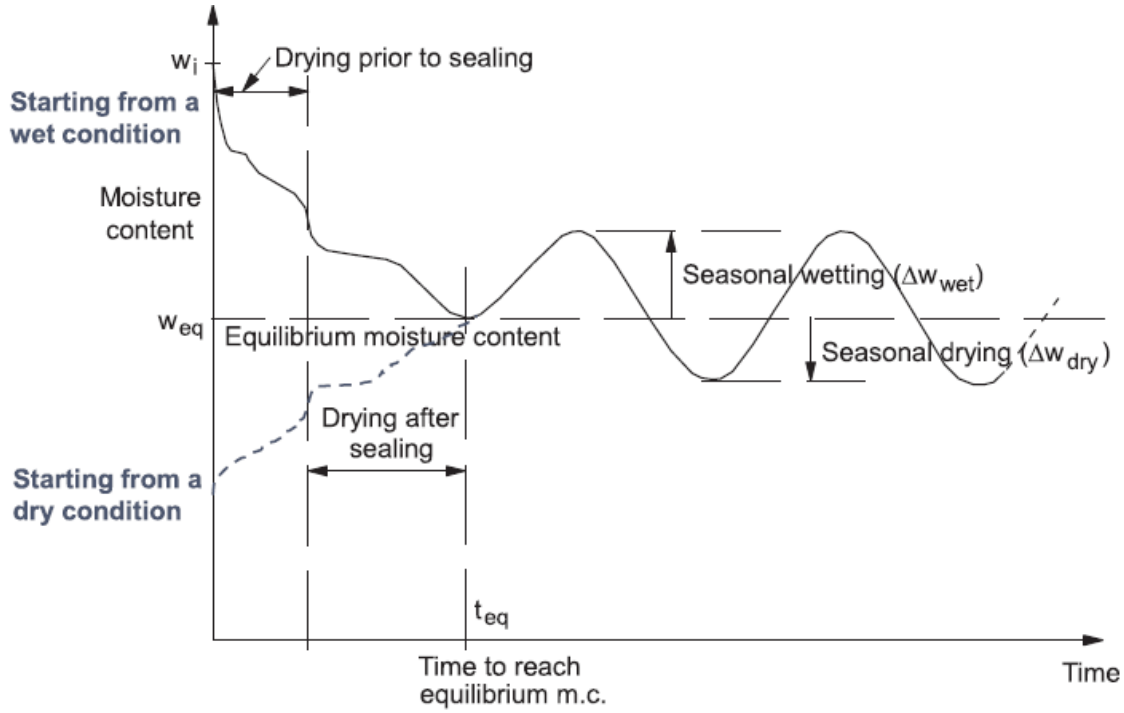
Especificaciones para compactación en campo, la adecuada especificación para compactación es de vital importancia para el proceso de compactación. En ella se indica los requisitos mínimos a tener en cuenta como: el tipo de material, su procesamiento, densidad a la que debe alcanzar, grado de compactación. Por ejemplo, con los ensayos de laboratorio de MDS y el OCH cuando se quiere llegar a un 95% de la MDS, ya se Proctor modificado o estándar de acuerdo a la especificación como típicos en construcción. Sin embargo, puede ser necesario especificar una vez terminado cierta capa, que dicha capa cuente con un grado de saturación y que este en función de la MDS, puesto que si se cuenta con un grado

de saturación elevada puede generar saturación debido a una sobrecompactacion, pues la densidad también está en función al contenido de humedad al momento de compactarse. Esto puede ser indeseable su aceptación según Kodikara et al. (2018)

Comportamiento típico de los rellenos compactados después de haber compactado un relleno, la humedad puede variar con el tiempo tal como se aprecia en la figura 9 Considera que existe una succión de suelo de equilibrio que es termodinámicamente aplicable a la capa en función de las capas próximas, en caso esté presente el nivel freático, también la interacción atmosférica y clima local. Las variaciones de humedad dará lugar también a variaciones en las propiedades del suelo con respecto a la compactación repercutiendo en los elementos estructurales sobre ella mencionados por [14].

Figura 9

Representación esquemática de la variación progresiva de la humedad en subrasante después de la compactación.



Nota. [14]

h. Compactación de suelos

La compactación es un proceso por el cual se consigue que el suelo expulse aire de sus poros, así las partículas se reordenan como una estructura más

densificada, con muy escasa o mínima contenido de agua. Para obtener un relleno compactado que forme una masa resistente y poco deformable. Si se densifica un suelo en condiciones idénticas, pero variando su contenido de humedad se obtendrá una densidad máxima a una determinada humedad, construyendo una curva de densificación debido a la energía de compactación aplicada. Compactaciones con mayor energía, se obtiene curvas con mayor densidad, siempre en cuando también ligeramente se disminuya la humedad [29].

i. Compactación de suelos

La pregunta de un ingeniero geotécnico es si un depósito de suelo puede mejorarse con métodos dinámicos (compactación vibratoria o por impacto) o no, y en qué grado. Mitchell (1982) identificó los tipos de suelo adecuados en función de la distribución granulométrica e indicó que la mayoría de los suelos de grano grueso con un "contenido de finos" (cantidad de partículas inferiores a 0,06 mm, tamiz nº 200) inferior al 10% pueden compactarse mediante métodos vibratorios y de impacto. Sin embargo, la evaluación de la compactación basada en las curvas granulométricas del análisis granulométrico tiene la desventaja de que, para obtener una imagen realista de las condiciones geotécnicas, se requiere un gran número de muestras de suelo y de análisis granulométricos, mayor de lo que suele considerarse justificable para un proyecto rutinario de cimentación [30].

2.3.DEFINICIÓN DE CONCEPTO

a. Geomaterial

Es cualquier material de origen geológico como rocas y suelo. Este término se debe ampliarse para incluir los materiales artificiales obtenidos mediante reprocesamiento de los materiales originales de origen geológico (ejemplo: material constituyente los terraplenes por la construcción de carreteras, etc.). [20]

b. Presas homogéneas

Cuando en las inmediaciones de la cerrada, en las zonas de préstamo, existe un único mate- rial, relativamente impermeable (por ejemplo, con permeabilidad inferior a 10^{-5} cm/sg), normalmente la opción más ventajosa suele ser construir una presa de la tipología denominada “homogénea”. Esta tipología homogénea tiene la

gran ventaja de adaptarse mejor que otras alternativas a la presencia de cimientos débiles o poco resistentes. En general, para su ejecución, suelen ser preferibles materiales con granulometría amplia (desde bolos a arcillas, pero bien graduados), ya que presentan menos problemas frente a problemas de erosión interna y tienen una menor deformabilidad [31].

c. Presas de enrocamiento.

Las masas de roca en estas presas son voluminosas comparadas con el corazón impermeable. Este puede ocupar la parte central o bien ser inclinada hacia aguas abajo. Se prefiere dicha forma por su facilidad de construcción. La roca se puede colocar en época de lluvia y nieve [23].

d. Gravedad especifica (Gs)

El peso específico este definido como la relación entre la unidad del peso de un material y la unidad de peso del agua. La gravedad específica de los sólidos del suelo es a menudo necesaria para diversos cálculos en la mecánica del suelo. Se determina con precisión en el laboratorio. Ciertos valores oscilan en un rango de 2,6 a 2,9 gr/cm^3 [32].

e. Comprensibilidad

La compresibilidad se define como la resistencia a la disminución de volumen cuando el suelo se somete a carga mecánica. Así, se describe por la forma de la curva tensión-deformación [33].

f. Granulometría

Las propiedades mecánicas de un cuerpo granular dependen de la forma y rugosidad de los granos y de la composición granulométrica, además

g. Análisis granulométrico por tamizado

El análisis por tamizado consiste en agitar un conjunto de tamices normalizadas con distintas aberturas. Se usa un agitador mecánico para obtener granos de distintos tamaños en el laboratorio [32].

h. Pedraplén de prueba (test fill)

En obras importante, cuando existen dudas sobre la bondad de los materiales que van a emplearse en la estructura, o es necesario elegir el equipo de compactación más adecuada, se realizan terraplenes de prueba reproduciendo las

condiciones de trabajo especificado (granulometría, espesor de capa, humedecimiento y numero de pasadas del compactador). Mediante muestreos se determinan el peso volumétrico, rotura de partículas (granulometría después de la compactación), segregación del material, influencia de la cantidad de agua en el peso volumétrico. Lo anterior demuestra el interés que se tiene en esta pruebas de para su posterior especificación para la construcción [23].

i. Proceso de compactación

El proceso de compactación requiere la elección siguientes parámetros como: Distancia entre puntos de compactación, Frecuencia de vibración, Penetración y extracción de la sonda, Duración de la compactación [30].

j. Forma de partículas

La forma de partículas presentes en una masa de suelo es tan importante como la distribución de las partículas porque tiene una influencia significativa en las propiedades físicas de un determinado suelo [32].

k. Monitoreo e instrumentación.

Es imperativo verificar que la consolidación procede como se postula en el diseño. Por lo tanto, la verticalidad de un proyecto debe combinarse siempre con un programa de instrumentación para controlar el proceso de la consolidación en términos de asentamiento durante el proceso de construcción [25].

l. Compactibilidad

La compactación es la diferencia entre la densidad aparente inicial y la densidad aparente máxima a la que un suelo puede ser compactado por una cantidad de energía determinada con un contenido de agua definido [33].

CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO

3.1. HIPÓTESIS

3.1.1. Hipótesis general

Las metodologías para determinar grados de compactación en test fill para terraplenes de presa con geomateriales a caracterizar – Antapite – Huancavelica 2024, es mediante las pruebas de densidad, deformaciones verticales, factor constante y número de ciclos de compactación.

3.1.2. Hipótesis especifica

a. La caracterización geotécnica índice del geomaterial en terraplenes de presa determinan su clasificación y uso

b. Los grados de compactación se pueden determinar mediante las distintas metodologías que son medibles y reproducibles.

c. La aplicación de la norma ASTM D-5030 proporciona una metodología precisa y reproducible para obtener las densidades del suelo a diferentes ciclos de compactación en test fill, lo que permite una determinación confiable del grado de compactación en comparación con otras metodologías.

d. La obtención de deformaciones verticales en el terraplén durante los ciclos de compactación se obtiene mediante la integración de controles y métodos topográficos para determinar una metodología efectiva de grados de compactación.

e. El grado de compactación de un suelo en terraplenes aumenta de forma directamente proporcional con el número de ciclos de compactación, donde se obtiene un factor constante de compactación tiempo (FCC) a partir del área y tiempo empleado por ciclo de compactación y este representa una metodología para obtener grados de compactación, y obtener un grado de compactación requerido.

3.2.OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.2.1.Identificación de la variable independiente

a. Geomateriales

b. Metodología

3.2.2.Identificación de la variable dependiente

a. Grado de compactación.

3.2.3.Variables intervinientes

a. Velocidad de compactación.
b. Capacidad del rodillo compactador
c. Espesor de capa

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según su enfoque: **Cuantitativo**, ya que se basa en la medición numérica de razón.

Como considera [34] el enfoque cuantitativo porque "utiliza la recolección de datos y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis". Adicionalmente, según dichos autores "tiene que ver con la medición y el uso de magnitudes" entre otros.

3.4. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Aplicativo y correlacional, se relacionará las variables para medir su similitud y/o deferencia.

La investigación es aplicada por cuanto como indica [35] "se busca resolver un problema"

3.5. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Según su diseño: Experimental, debido a que se va a manipular variables.

Esta investigación se desarrolla en un nivel explicativo, buscando determinar las causas de las variaciones en el grado de compactación en función de los ciclos de compactación y las propiedades del suelo, aunque también incluye un componente descriptivo para caracterizar los geomateriales y un componente correlacional para analizar las relaciones entre las variables [35].

3.6. ÁMBITO Y TIEMPO SOCIAL DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio se realizó en el emplazamiento de la Unidad Minera Antapite, en el año 2024. Ubicado en el departamento de Huancavelica, provincia de Huaytará y distrito de Ocoyo a una altitud que va entre 3350 a 3380 m.s.n.m.

3.7. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.7.1. Unidad de estudio.

Unas secciones tridimensionales representativas dentro del terraplén de prueba (test fill) con ubicación específica a conveniencia en caracterizada por un volumen especifico de geomaterial compactado bajo condiciones controladas de energía y numero de ciclos, donde se realizan las mediciones de densidad, humedad y deformación para evaluar una metodología de compactación y que sirve como elemento básico para extrapolar los resultados a secciones análogas en otros terraplenes.

3.7.2. Población

El terraplén de prueba (test fill) de 35m. x 6m x 1.2m completo con 252 m^3 de geomateril en Antapite, Huancavelica, en su totalidad, concebido como un modelo a gran escala controla de un terraplén de presa real, diseñado para investigar y optimizar metodologías de compactación aplicables, con ajustes, a otros terraplenes de presa que compartan características esenciales en la naturaleza y propiedades de los geomateriales utilizados.

3.7.3.Muestra

Un conjunto de volúmenes discretos de geomaterial compactado, ubicados estratégicamente dentro del terraplén de prueba, seleccionados mediante un diseño de muestreo espacial para capturar la variabilidad en la respuesta de la compactación (densidad, humedad, deformaciones) a las metodologías evaluadas, buscando representar el comportamiento del terraplén en su conjunto y, por extensión, predecir el comportamiento de secciones correspondientes en otros terraplenes similares.

3.8.PROCEDIMIENTO, TÉCNICA E INSTRUMENTOS

3.8.1.Procedimiento

a. Caracterización geotécnica del geomaterial

La obtención de muestras del geomaterial de las zonas de préstamo en la Desmontera Huinchulla – Antapite. Ensayos para determinar las propiedades índices del geomaterial. Clasificación de suelos según los sistemas de clasificación geotécnica (SUCS y AASHTO).

b. Compactación en laboratorio

Realizar los ensayos de Proctor para determinar la curva de compactación del suelo. Corrección de los resultados del ensayo de Proctor para considerar la influencia de la fracción gruesa (corrección por sobretamaño). Análisis de los resultados para obtener los parámetros de compactación óptimos.

c. Procedimiento de la construcción del terraplén de prueba test fill y obtención de información, datos en la compactación del test fill:

Preparación de terreno, levantamiento topográfico con estación total de precisión de 2", construcción del terraplén test fill y dimensionamiento pre-establecidas. Sectorización física en el terraplén para la compactación de los distintos ciclos. Proceso de colocación y cuadricula de puntos 4 puntos de control topográfico con piedras de canto rodado ovalados y pintados en cada sector del terraplén para la deformación vertical. Levantamientos topográficos de puntos con precisión milimétrica previo a la compactación. Proceso de compactación con rodillo liso vibratorio de 20 Ton a una velocidad de 3.5 km/h, espesor de 100 cm, hasta los 10 ciclos o etapas, registro de levantamiento topográfico con precisión milimétrica después de cada ciclo de compactación para estimar la deformación vertical por diferencia de elevaciones. Finalizada la compactación ejecución de la prueba de densidad por el método reemplazo de agua con una repetición en cada sector o ciclo compactado. Muestreo del material extraído de la prueba de densidad para caracterización del geomaterial.

d. Análisis de datos

Generación de los registros de los datos obtenidos en la prueba Test Fill. Análisis estadístico de los datos obtenidos en laboratorio y test fill. Relación entre

los parámetros de compactación y las propiedades geomaterial. Desarrollo o evaluación de las metodologías para determinar los grados de compactación.

Las técnicas usadas serán mediante fichas (formatos) para su registro.

3.8.2. Técnicas

Las técnicas para muestreo son aleatorio simple, muestreo estratificado y muestreo sistemático para la obtención de muestras del geomaterial, siendo estas:

Técnica de extracción de muestras: Que consiste en sondeos directos para la extracción de muestras.

Técnica de ensayos de laboratorio: Permite mostrar los resultados de laboratorio, bajo estándares normados de la ASTM, tales como ensayo de proctor estándar, análisis granulometrico, contenido de humedad, límites de consistencia, gravedad específica y absorción.

Técnica observacional: Se trata de un método científico, que posibilita el estudio de los comportamientos perceptibles, asegurando un registro y cuantificación adecuada, donde se usa la herramienta principal que es la ficha observacional.

Técnica de medición en campo: realizando ensayo de densidad de campo por el método de reemplazo por agua, levantamiento topográfico para medir la deformación vertical, control del tiempo en la compactación de un área específica y conteo de los números de ciclos de compactación (pasadas)

Técnicas de procesamiento y análisis de datos: Se utilizo un análisis estadístico descriptiva (media, desviación estándar). Los datos recopilados serán organizados en tablas, utilizando el software Microsoft Excel con la cual también se usó para el análisis e interpretación de los datos, análisis de regresión para establecer correlaciones, análisis de varianza ANOVA, modelo matemático y para la presentación de los resultados se empleó Microsoft Office Profesional 2021.

3.8.3. Instrumentos

Instrumento metodológico validado según la norma ASTM fue estructurada y lógica. Se usaron fichas técnicas: Documento en donde se registraron los datos requeridos después de realizar la prueba de campo. Fichas de registro de datos: Se usaron formatos de registro de datos obtenidos.

Para los instrumentos físicos se tiene herramientas de muestreo como pico, pala, bolsas, costales, plumón, pizarra. Los equipos de laboratorio para Proctor (balanza, molde, pisón, horno, etc.), tamices para ensayo de análisis granulometrico, Limites de consistencia (copa Casagrande, horno, balanza, vidrio esmerilado, espátula, tara, etc.), gravedad específica y absorción (balanza, horno, mesa para gravedad, etc.). Para los equipos para compactación del terraplén de prueba: Volquetes, rodillo de 20 ton, tractor sobre oruga, cisterna de agua.

Para obtención de datos de deformación vertical: estación total, prisma, trípode, cinta métrica, cronometro etc. Para la prueba de densidad en terraplén: Anillo circular metálico, regla metálica, membrana plástica de 3 micras, balanza, termómetro, humedometro Speedy. El software: hoja de cálculo Excel, minitab 18.

Figura 10

Equipos de laboratorio de suelos

Nota. Se muestra equipos usados en laboratorio de obra

Figura 11

Equipos de laboratorio empleados en la investigacion

Nota. Se muestra equipos de para límites de consistencia

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1. DESCRIPCION DE LOS TRABAJOS DE CAMPO

4.1.1. Recursos, equipos y materiales a utilizar:

En cuanto a los recursos de personal se tuvo un ingeniero de control de calidad (investigador), dos técnicos de laboratorio de suelos, tres asistentes de laboratorio, un ingeniero de seguridad, topógrafo, asistente de topógrafo y ocho operadores de equipos. Todos los involucrados participaran en distintas etapas de la prueba.

Con relación a los equipos menores y de línea amarilla se usó tractor sobre-oruga Cat D-6T, rodillo liso vibratorio Hamm 19.8t (toneladas), excavadora Cat X8, tres camion volquetes de 15 m^3, cisterna de agua y camioneta Pick Up 4x4. Todo ello fue usado en toda la etapa de la prueba.

Con relación a los equipos de topografía se uso una estación total, prisma circular leica, mini-prisma circular leica, trípode, wincha de 8 m, wincha de 50 m.

En lo que respecta a los equipos de laboratorio se tiene anillo circular de 2.8 m de diámetro, regla de calibración, termómetro digital, balanza digital de 150 kg, tamiz de 3 pulgadas, wincha metálica de 3 m, pizarra acrílica, plumones, etc.

Adicionalmente para la prueba se usaron materiales como cilindros, Blades de 18 litros, sacos, escobillón, pico, pala, barreta, plumones, tablero de apuntes.

Por último, el material (geomaterial) utilizado para el test fill la clasificación SUCS esta descrito con la caracterización GW procedente de la “Desmontera Huinchulla”

4.1.2. Ubicación y descripción general del área de estudio

La localización del test fill está ubicado en las siguientes coordenadas Este: 492224.0, Norte: 8454191.0 y Elevación: 3299.0 MSNM en la plataforma del acceso margen derecha de vaso del dique principal, esta ubicación se tomó por criterios horizontalidad que presenta el lugar y la cercanía de la desmontera del geomaterial. Las características del terreno se indica que es una topografía muy ondulada en todo el emplazamiento, teniéndose un área plana para la prueba test

fill. La ubicación de la prueba está muy cercana entre la presa y la desmontera (0.5 Km).

Figura 12
Ubicación del área de influencia del estudio.

Nota: imagen extraída de Google Eart.

4.1.3. Diseño o esquema para el test fill

Las dimensiones del test fill se tomó con el criterio de a conveniencia y es como sigue, largo 36.50 m., ancho 2.50 m. altura 1.20 m con material conformado antes de la compactación.

Figura 13
Sectorización para la compactación de la prueba Test Fill.

Nota. Sectorización para los ciclos (elaboración propia).

Los geomateriales utilizados caracterizados previamente son menores a 18 pulgadas (como criterio la disponibilidad del material y especificado en la ingeniería de detalle), según la clasificación SUCS (Sistema de clasificación Unificada de Suelos) considerado como grava bien gradada, con mezcla de grava y arena con poco o nada de finos (GW), la cual se ubica en la periferia de la presa de relaves a unos 3 km de distancia que fueron trasladados en camiones volquete de 15 m^3 de capacidad.

Figura 14
Ensayo de análisis granulometrico de geomaterial

Nota: Se visualiza la granulometría del geomaterial menor a 3 pulgadas.

Figura 15
Ensayo de en laboratorio para caracterización de geomaterial.

Nota. Se aprecia materia para ensayo de contenido de humedad del material grueso

4.1.4.Construcción del test fill

La construcción es como sigue:

a. Se le indica al área técnica (topografía) establecer puntos control base de referencia de apoyo para el control topográfico del test fill.

Figura 16
Preparación de terreno para test fill

Nota. Se aprecia trabajos topográfico y preparación de fundación con tractor.

b. El área de técnica (topografía) realiza el trazo y replanteo del área designada.

c. Topografía levanta el área de la superficie, se evalúa las pendientes y desniveles de la superficie.

Figura 17
Fundación preparada para el test fill.

Nota. Se aprecia trazo y replanteo topográfico de superficie a trabajar el tedt fill

d. Topografía coloca las alturas correspondientes (corte-relleno) de superficie de fundación para terraplén de prueba.

e. Tractor sobre-orugas realiza el corte y relleno de la fundación.
f. Previa verificación de topografía (elevaciones) se realiza riego de la superficie de fundación con tanque cisterna de agua.
g. Se realiza la compactación correspondiente con rodillo vibratorio de 20Ton la superficie de fundación a una velocidad de 3.5 km/h.
h. Se realiza el replanteo topográfico final y levantamiento de la fundación con yeso y pinturas spray.
i. Se acumula el material acopiado el área de estudio previamente humectado con camiones volquete de 15 m^3, para un espesor aproximado de 1200 mm.

Figura 18
Extendido de material del test fill con tractor sobre oruga

Nota. Se aprecia material sobre fundación extendida con tractor sobre-oruga

j. Se colocan plantillas (niveles topográficos) referenciales.
k. Se extiende y conforma una capa aproximadamente de 1200 mm de espesor con tractor sobre-oruga Cat D-6, realizando controles de espesor.

4.1.5. Sectorización del test fill para la compactación

a. Se delimitaron físicamente el área en nueve (09) sectores de 3.0 m x 5.0 m, cada una de ellas representa un incremento control espacial de un determinado ciclo compactado que además facilita la medición y pruebas.

Figura 19
Fundación presentada para el test fill

Nota. Cuadriculado para levantamiento de puntos en la fundación de Test Fill

b. Se colocaron cuatro plantillas topográficas con piedra ovalada pintada en cada sector para control del asentamiento vertical por cada ciclo compactado.
c. Previo a la compactación se levantó topográficamente las cotas de cada plantilla.

4.1.6. Compactación del terraplén de prueba Test Fill.

a. La capa inicial sin compactar (extendido y conformado) es de un espesor promedio aproximado de capa de 1200mm.
b. Se inicia la compactación del primer ciclo (ida y vuelta) hasta el sector nueve (09), una vez concluida el ciclo se realiza el levantamiento altimétrico de las plantillas para posteriormente procesar el asentamiento. Se cubre el sector con manta para mantener la humedad y posteriormente realizar el ensayo de densidad.

Figura 20
Panorámico del Test Fill aguas abajo de la presa principal

Nota. Se aprecia la compactación del test fill con rodillo vibratorio de 20 ton.

c. El mismo proceso anterior se realiza para cada ciclo de compactación y para cada sector, hasta finalizar la etapa con el ultimo sector.

Figura 21
Compactación de los N° de ciclos del Test Fill

Nota. Terraplén del Tes Fill, se puede aprecia el asentamiento con respecto al borde.

d. Se obtiene un espesor promedio final y asentamiento o deformación vertical

4.1.7. Prueba de densidad por el método reemplazo de agua ASTM D-5030.

Las pruebas se realizaron en la parte central de cada sector para uniformizar la ubicación y debido a que es la que abarca la rola del rodillo en su totalidad:

a. Seguidamente se ejecuta la prueba de densidad para cada en cada sector de acuerdo a lo indicado en la norma de la ASTM D-5030.

Figura 22
Pruebas de densidad de acuerdo a la ASTM D-5030.

Nota. Los hoyos que se aprecia es producto posterior a la prueba de densidad

b. De cada sector se obtienen la totalidad del material de la prueba de densidad para realizar la granulometría en campo y una porción de muestreo representativo se llevó en sacos etiquetados para pruebas estándar en laboratorio.

Figura 23
Panorámico del terraplén de prueba.

Nota. Proceso de recolección de datos de cada prueba de densidad de cada sector.

4.1.8. Pruebas estándar en laboratorio

En laboratorio se realizaron pruebas estándar con cada material obtenido de la prueba de densidad en campo de cada sector las cuales son lo que se menciona a continuación:

a. Contenido de humedad ASTM D-2216
b. Análisis granulometrico ASTM D-6913 menores a 3 pulgadas.

Figura 24
Caracterización del geomaterial In-Situ

Nota. Se aprecia la gradación del geomaterial con el material extraído de la densidad.

c. Límites de Atterberg ASTM D-4318
d. Gravedad específica y absorción del agregado grueso ASTM C-127
e. Proctor estándar ASTM D-698

4.2.DISEÑO DE LA PRESENTACION DE LOS RESULTADOS

Los resultados serán son presentados en función de los objetivos específicos e indicadores; como se muestra en la tabla estructurada 2 considerando el desarrollo de la siguiente estructura y/o secuencia:

a. Geomateriales
b. Grados de compactación
c. Metodología.

Tabla 2
Tabla estructurada del diseño de la presentación de resultados.

Objetivos específicos	Variables	Indicadores
Caracterizar geotécnicamente los geomateriales para terraplenes de presa para su uso	Geomateriales	Contenido de humedad ASTM D-2216 Análisis granulometrico ASTM D-6913 límites de Atterberg ASTM D-4318 Gravedad Especifica y absorción ASTM C-127

		Proctor estándar ASTM D-698
Determinar los grados de compactación mediante las distintas metodologías medibles y reproducibles.	Grados de compactación	Densidad máxima seca Proctor Densidades del test fill Deformación vertical Factor constante de compactación (FCC)
Obtener mediante la aplicación de la norma ASTM D-5030 las densidades a distintos ciclos de compactación en test fill para su determinación del grado de compactación.	Metodologías (metodología de aceptación de la compactación)	Densidad ASTM D-5030
obtener las deformaciones verticales en el terraplén del test fill en los ciclos de compactación.		Deformación vertical mediante métodos topográficos
Determinar, de los ciclos de compactación el factor constante (FCC) para obtener grados de compactación necesario.		Fc: Factor constante de compactación (mediante un tiempo dado, área y velocidad constante del equipo compactador)

Nota. Estructura para la presentación de resultados (Elaboración propia).

4.3.RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de la investigación, estructurados en función de las variables de estudio y sus indicadores clave, tal como se definió en la matriz de consistencia (Tabla 1). Los hallazgos cuantitativos y cualitativos se presentan a continuación, sentando las bases para el analisis estadístico en el capítulo V.

4.3.1.Caracterización de los geomateriales

En esta sección se describe las propiedades geotécnicas del geomaterial de relleno estructural (clasificado como GW), proveniente de la cantera denominado “Desmontera Huinchulla”. Fundamentales para comprender su comportamiento bajo condiciones de compactación.

a. Contenido de humedad (ASTM D-2216).

El ensayo de contenido de humedad mide la cantidad de agua presente en una muestra de suelo, generalmente se expresa como porcentaje en relación con la masa seca del suelo. Su finalidad es determinar la cantidad de agua en un material para interpretar su trabajabilidad y propiedades. Se presenta resultados obtenidos

de la cantera “Desmontera Huinchulla” (DH) y del material extraído de las pruebas de densidad del Test Fill (TF), los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 3, mostrando que los valores desde 5.7% a 7.0% con una tolerancia de ± 1.5%.

Tabla 3
Resultados de contenido de humedad.

Óptimo contenido de humedad (%)					
N° DE CAPA	CÓDIGO DE REGISTRO	Cont. de humedad (%)	Límite inferior humedad (%)	Óptimo contenido de humedad (%)	Límite superior humedad (%)
1	PT-CH01	6.50	4.00	5.50	7.00
2	PT-CH02	5.70	4.00	5.50	7.00
3	PT-CH03	7.00	4.00	5.50	7.00
4	PT-CH04	7.00	4.00	5.50	7.00
5	-	0.00	4.00	5.50	7.00
6	PT-CH05	6.10	4.00	5.50	7.00
7	-	0.00	4.00	5.50	7.00
8	PT-CH06	5.70	4.00	5.50	7.00
9	-	0.00	4.00	5.50	7.00
10	PT-CH07	5.70	4.00	5.50	7.00
11	-	0.00	4.00	5.50	7.00
12	PT-CH08	6.20	4.00	5.50	7.00
13	-	0.00	4.00	5.50	7.00
14	PT-CH09	6.30	4.00	5.50	7.00
15	PT-CH10	6.30	4.00	5.50	7.00
16	PT-CH11	5.79	4.00	5.50	7.00
17	PT-CH12	5.79	4.00	5.50	7.00
18	-	0.00	4.00	5.50	7.00
19	DH-CH13	6.90	4.00	5.50	7.00
20	-	0.00	4.00	5.50	7.00
21	DH-CH14	6.00	4.00	5.50	7.00
22	-	0.00	4.00	5.50	7.00
23	DH-CH15	6.50	4.00	5.50	7.00
24	-	0.00	4.00	5.50	7.00
25	DH-CH16	6.85	4.00	5.50	7.00

Nota. Resumen de registro de contenido de humedad (elaboración propia).

b. Análisis granulometrico por tamizado (ASTM D- 6913).

Este ensayo en un procedimiento que determina la distribución de tamaños de partículas mediante la separación por tamices estandarizados a una muestra representativa, generalmente de suelos granulares. La finalidad principal es clasificar el material de acuerdo a la normativa y comprender sus características geotécnicas. Se presenta los resultados obtenidos en porcentajes retenidos al material de la cantera y terraplén de prueba test fill en la tabla 4 y en la figura 12 se aprecia las curvas granulométricas. Adicionalmente, Tabla 4 se presenta la descripción en porcentajes de roca, boloneria, grava, arena y finos. En base a estos resultados, el material se clasifica como grava bien gradada con mezcla de grava y

arena y poco o nada de finos (GW) según SUCS, y A-1-a (0) de acuerdo con la AASHTO.

Tabla 4
Resultado de caracterización del geomaterial.

N° de registro	Bloques o roca	Boloneria	Grava	Arena	pasa tamiz N° 200	CLASIFICACION			Coeficiente o parámetros	
	%	%	%	%	%	SUCS	AASHTO	IG	Cc	Cu
PT-GR01	4.00	21	62	12	1	GW	A-1-a	0	1.17	13.96
PT-GR02	5.40	23	62	7	3	GW	A-1-a	0	1.44	11.85
PT-GR03	7.40	23	62	6	2	GW	A-1-a	0	1.35	10.17
PT-GR04	3.80	43	46	5	2	GW	A-1-a	0	0.99	15.53
PT-GR05	1.60	35	46	13	4	GW	A-1-a	0	2.03	41.75
PT-GR06	2.30	29	54	10	4	GW	A-1-a	0	2.98	37.2
PT-GR07	2.30	29	56	8	5	GW	A-1-a	0	3.35	24.19
PT-GR08	2.30	29	57	7	4	GW	A-1-a	0	2.59	22.75
PT-GR09	2.20	36	50	7	4	GW	A-1-a	0	2.67	24.49
DH-GR10	2.30	29	46	16	7	GW	A-1-a	0	3.55	87.01
DH-GR11	6.10	30	55	5	3	GW	A-1-a	0	1.16	11.14
DH-GR12	3.10	33	53	8	3	GW	A-1-a	0	1.43	15.54
DH-GR13	7.60	38	51	3	1	GP	A-1-a	0	0.89	11.26
DH-GR14	3.10	33	45	14	5	GP	A-1-a	0	1.84	36.31
DH-GR15	8.80	51	36	3	1	GP	A-1-a	0	0.96	20.79

Nota. El índice de grupo (IG) para todo resulta 0 (Elaboración propia)

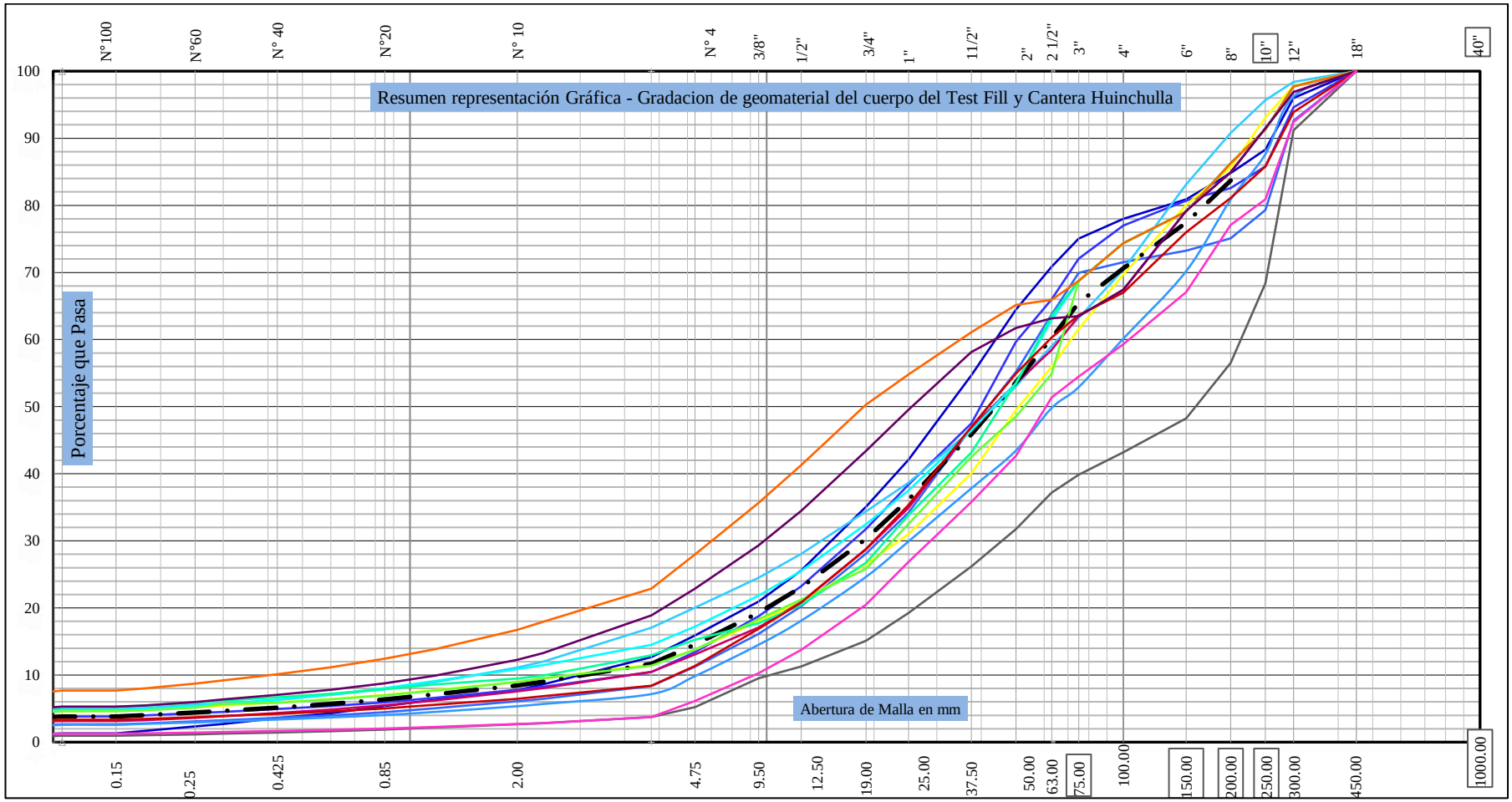
Tabla 5

Resultados del Análisis Granulometrico por tamizado.

N° de registro	Análisis Granulometrico - % que pasa Tamiz																											
	450	300	250	200	150	100	75	63	50	37.5	25	19	12.5	9.5	6.3	4.75	2.36	2.0	1.18	0.85	0.6	0.425	0.3	0.25	0.18	0.150	0.106	0.075
	18"	12"	10"	8"	6"	4"	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	N°4	N°8	N°10	N°16	N°20	N°30	N°40	N°50	N°60	N°80	N°100	N°140	N°200
PT-GR01	100	96	88	85	81	78	75	71	65	55	42	35	26	21	16	13	9	8	6	5	4	4	3	2	2	1	1	1
PT-GR02	100	95	86	83	81	77	72	66	60	47	38	32	23	19	13	10	8	8	7	6	5	5	5	4	4	4	4	3
PT-GR03	100	93	79	75	73	72	70	64	55	47	34	28	20	16	11	8	6	6	5	4	4	4	3	3	3	3	3	2
PT-GR04	100	96	88	81	70	60	53	50	43	38	30	25	18	15	10	7	6	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3	2
PT-GR05	100	98	96	91	83	70	63	59	53	47	39	34	28	25	20	17	12	11	9	8	7	6	6	6	5	5	5	4
PT-GR06	100	98	91	86	79	74	69	63	54	46	37	32	25	22	17	14	11	11	9	8	7	6	6	5	5	5	5	4
PT-GR07	100	98	91	86	79	74	69	64	54	43	34	27	20	18	15	13	10	9	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5
PT-GR08	100	98	91	86	79	74	69	55	49	43	33	26	21	18	14	11	10	9	8	7	6	6	6	5	5	5	5	4
PT-GR09	100	98	93	86	80	70	62	56	49	40	31	27	21	18	14	12	10	9	8	7	6	6	5	5	5	5	5	4
DH-GR10	100	98	91	86	79	74	69	66	65	61	55	50	41	36	28	23	18	17	14	12	11	10	9	9	8	8	8	7
DH-GR11	100	94	86	81	76	67	64	60	55	47	35	29	21	17	11	8	7	6	6	5	5	4	4	4	3	3	3	3
DH-GR12	100	97	92	85	79	67	64	58	53	47	35	29	21	17	13	10	8	8	6	6	5	4	4	4	3	3	3	3
DH-GR13	100	92	81	77	67	59	54	51	43	36	27	20	14	10	6	4	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
DH-GR14	100	97	92	85	79	67	64	63	62	58	50	43	34	29	23	19	13	12	10	9	8	7	6	6	5	5	5	5
DH-GR15	100	91	68	57	48	43	40	37	32	26	19	15	11	10	5	4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1

Nota. Resumen de resultados de Análisis Granulometrico (elaboración propia).

Figura 25
Curva granulométrica del geomaterial.



Nota. Resumen de curvas del Análisis Granulometrico (elaboración propia).

c. Límites de Atterberg (ASTM D-4318)

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio, donde se determinan la consistencia del suelo en diferentes contenidos de humedad (en suelos limosos y arcillosos). Estos límites, tanto el líquido como el plástico permiten entender la transición entre los estados sólido, plástico y liquido del suelo. Estos resultados se presentan en la Tabla 6. Es importante precisar que de acuerdo a los porcentajes poco o nada de finos

(<50% pasa tamiz N°200) indicado en el análisis granulometrico, de acuerdo con la tabla SUCS (ASTM D-2487), este ensayo no sería estrictamente necesario para suelos gruesos. No obstante, se realizó con el objetivo de verificar el grado de practicidad y la variabilidad inherente del geomaterial para el presente estudio.

Tabla 6

Resultados de Limites de Atterberg.

N° de registro	LIMITES DE ATTERBERG		
	LL	PL	IP
PT-GR01	24	17	7
PT-GR02	25	19	6
PT-GR03	23	18	5
PT-GR04	27	20	7
PT-GR05	27	19	8
PT-GR06	26	18	8
PT-GR07	26	17	9
PT-GR08	24	18	6
PT-GR09	25	18	7
DH-GR10	27	20	7
DH-GR11	26	17	9
DH-GR12	23	18	5
DH-GR13	23	16	7
DH-GR14	23	16	7.00
DH-GR15	23	16	7.00

Nota. Resultado resumen de los límites de consistencia (elaboración propia).

d. Gravedad específica y absorción (ASTM C-127).

Estos ensayos determinan la densidad y capacidad de absorción de agua de un material de suelo determinado previamente. Estos valores son esenciales para realizar correcciones en los cálculos de densidad en una capa compactada. Se presenta los valores de la gravedad específica y absorción obtenidos de quince evaluaciones realizadas de la muestra representativa que se muestra en la tabla 7.

Este ensayo fue realizado material retenido en el tamiz de 1½" de diámetro. Se tiene una media en Ge de 2.61 g/cm³.

Tabla 7
Resultados de Gravedad Especifica y Absorción.

N° de registro	Gravedad especifica	
	Peso Especifico	Absorción
PT-GR01	2.61	0.94
PT-GR02	2.61	1.05
PT-GR03	2.64	1.19
PT-GR04	2.56	2.30
PT-GR0	2.61	1.15
PT-GR06	2.56	1.78
PT-GR07	2.65	1.20
PT-GR08	2.65	1.20
PT-GR09	2.65	1.20
DH-GR10	2.60	1.35
DH-GR11	2.58	1.59
DH-GR12	2.51	3.04
DH-GR1	2.65	1.20
DH-GR14	2.65	1.20
DH-GR15	2.60	1.06

Nota. Resumen de resultados de Gravedad Especifica (elaboración propia).

e. Proctor estándar (ASTM D-698).

El ensayo de proctor estándar es un método de compactación de suelos en laboratorio en la cual se determina la relación entre contenido de humedad y la densidad seca de un suelo al compactar con una energía de compactación estándar. La finalidad principal es identificar la humedad optima de compactación y la densidad máxima que puede lograrse.

Se realizaron quince ensayos de Proctor estándar (ASTM D-698): seis de cantera y nueve del con el material de proveniente de la extracción de muestras de la densidad del Test Fill. La tabla 8 se aprecia los resultados del ensayo y en la Figura 12 muestra la curva de compactación consolidada que representa el conjunto de estos quince ensayos.

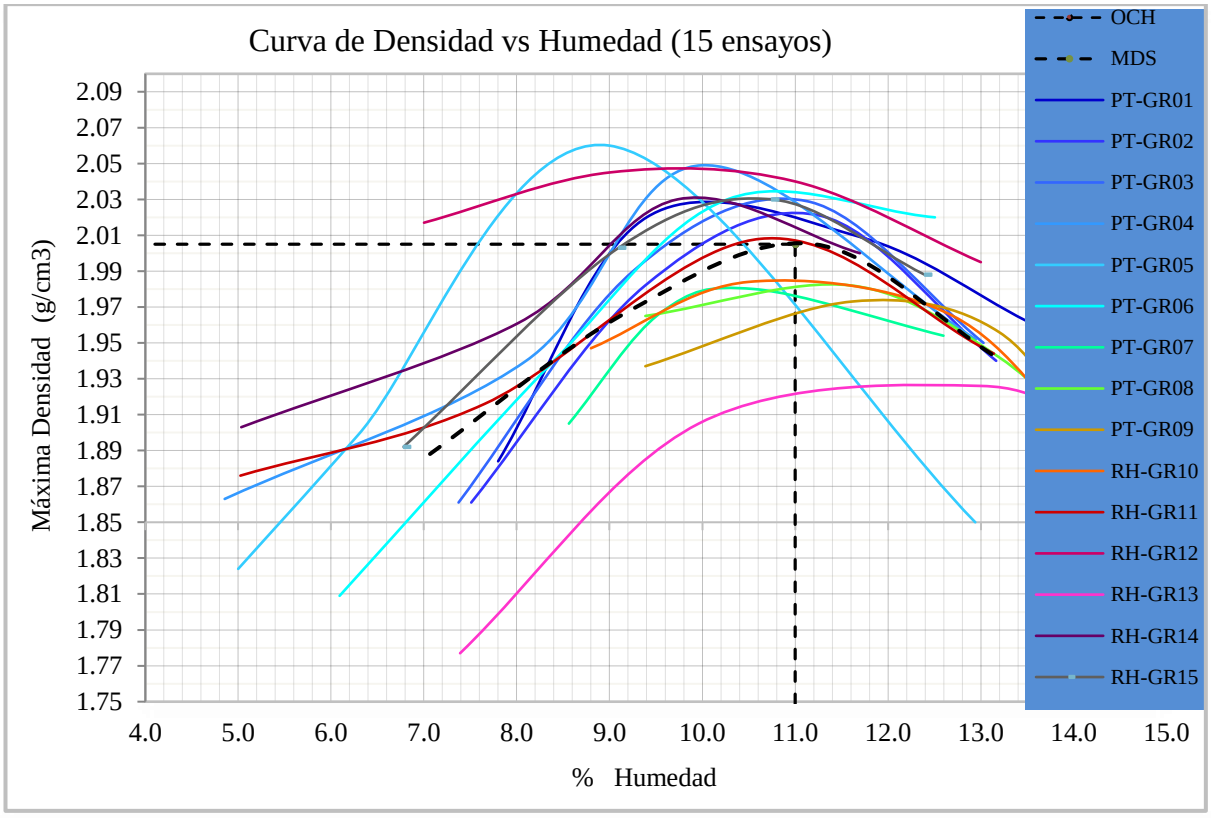
Tabla 8
Resultados de ensayo de Proctor Estándar en laboratorio.

Item	Resultados sin corregir	
N° de registro	MDS g/cm³	OCH %
PT-GR01	2.04	11.10
PT-GR02	2.02	10.90

PT-GR03	2.03	10.80
PT-GR04	2.01	10.00
PT-GR05	2.01	8.90
PT-GR06	2.03	11.70
PT-GR07	1.99	11.00
PT-GR08	1.99	11.00
PT-GR09	1.98	11.50
RH-GR10	1.99	11.00
RH-GR11	1.98	10.80
RH-GR12	2.05	9.70
RH-GR13	1.94	12.10
RH-GR14	2.01	11.00
RH-GR15	2.03	10.50
Xp (media)	2.00	10.80

Nota. Resultados del ensayo de Proctor estándar corregido, sin corrección y media (elaboración propia).

Figura 26
Curva de compactación Proctor estándar.



Nota. Resumen de resultados curva de compactación proctor (elaboración propia).

De los resultados del ensayo de Proctor estándar ASTM D-698 corregido se tiene una media de optimo contenido de humedad (OCH) de 5.16% y máxima densidad seca (MDS) de 2.36 g/cm³. es fundamental señalar que este resultado es considerando los materiales retenidos en el tamiz 3/4" ya que estos influyen en los ya que son en gran proporción, debido a ellos se realiza la corrección.

4.3.2.Determinación de los grados de compactación.

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas de compactación en campo realizadas en el test fill, incluyendo mediciones densidad, deformación y el registro de factor constante de compactación tiempo (datos de tiempo, velocidad, área).

a. Densidad Seca Máxima Proctor Corregidos en laboratorio (ASTM D-698).

Las consideraciones de los sobretamaños (partículas gruesas > a ¾") en este método de ensayo es para realizar las correcciones de la densidad de la muestra compactada, se recomienda para la corrección para muestras de más de 5% hasta 30% de sobretamaño. La presencia de sobretamaño puede afectar la densidad de la muestra compactada. La corrección asegura que la densidad seca sea la misma que la que se obtendría si se utiliza solo material que pasa por el tamiz ¾".

La Tabla 9 presenta los valores de los resultados de las máximas densidades secas sin corregir y corregidos, considerando el porcentaje de material sobredimensionado indicados en el análisis granulometrico. Estos resultados de máximas densidades y óptimos de humedad son referenciales para la investigación, ya que, para las metodologías de aceptación, se priorizaron los resultados de densidades obtenidas directamente del Test Fill.

Tabla 9

Resultados de Proctor Estándar corregidos por sobretamaño.

Item	**Resultados**			
	Sin corregir		Corregidos	
N° de registro	MDS (g/cm³)	OCH (%)	MDS (g/cm³)	OCH %
PT-GR01	2.04	11.10	2.35	5.70
PT-GR02	2.02	10.90	2.35	5.90
PT-GR03	2.03	10.80	2.38	6.30
PT-GR04	2.01	10.00	2.38	4.70
PT-GR05	2.01	8.90	2.36	4.70
PT-GR06	2.03	11.70	2.35	5.60
PT-GR07	1.99	11.00	2.42	4.40
PT-GR08	1.99	11.00	2.42	4.30

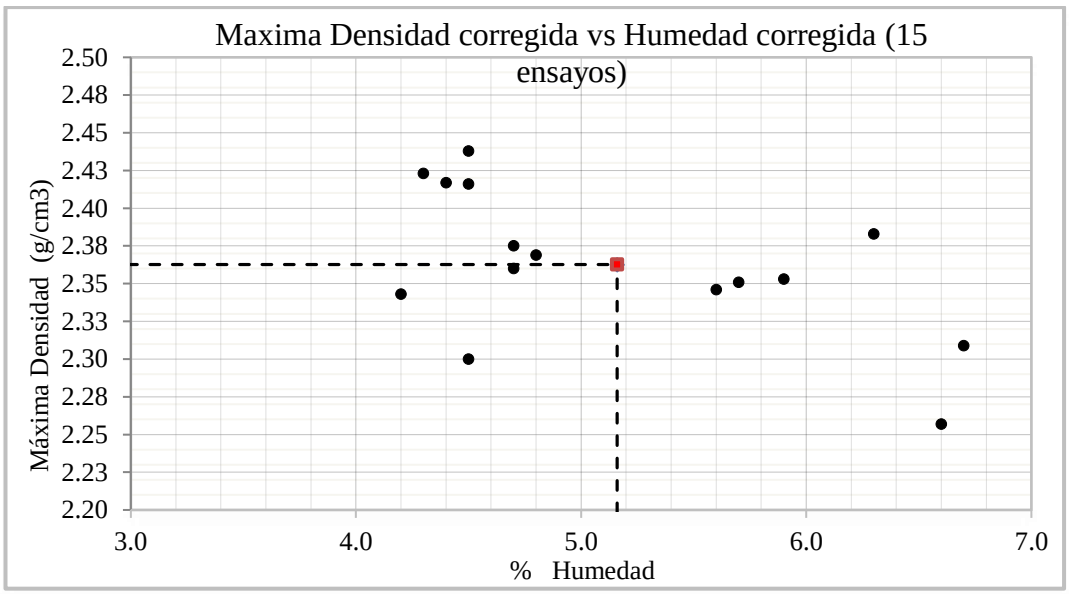
PT-GR09	1.98	11.50	2.42	4.50
DH-GR10	1.99	11.00	2.26	6.60
DH-GR11	1.98	10.80	2.37	4.80
DH-GR12	2.05	9.70	2.34	4.20
DH-GR13	1.94	12.10	2.30	4.50
DH-GR14	2.01	11.00	2.31	6.70
DH-GR15	2.03	10.50	2.44	4.50
n	15.00	15.00	15.00	15.00
S	30.08	162.00	35.44	77.40
Xp (media)	2.01	10.80	2.36	5.16
Mínimo	1.94	8.90	2.26	4.20
Máximo	2.05	12.10	2.44	6.70
Des. Estándar	0.03	0.79	0.05	0.88
varianza	0.00	0.63	0.00	0.78
Coef. De variación	1.45	7.34	2.10	17.08

Nota. Resultado de la máxima densidad seca y humedad del Proctor estándar

La Figura 13 representa gráficamente los valores del ensayo de Proctor estándar corregido, tomando en cuenta el porcentaje de sobretamaños. La media de esta densidad máxima corregida es de 2.36 g/cm³ y una humedad de 5.16 %.

Figura 27

Dispersión de los ensayos de Proctor corregido y promedio



Nota. Dispersión de puntos de la máxima densidad corregida (elaboración propia)

b. Densidades relativas del Test Fill (ASTM D-5030).

El método de remplazo por agua, es un método para determinar la densidad natural del suelo in situ. Se utiliza para medir la densidad de suelos y rocas. El fin

es evaluar la compacidad del suelo en campo, es fundamental para la estabilidad de la estructura y la planificación de obras. Se realizaron nueve (09) determinaciones de densidad en cada ciclo o etapas de compactación. Los resultados, que muestran valores ascendentes de densidad en función del número de ciclos,. Así mismo, la Figura 14 y la Tabla 11 representa gráficamente los resultados.

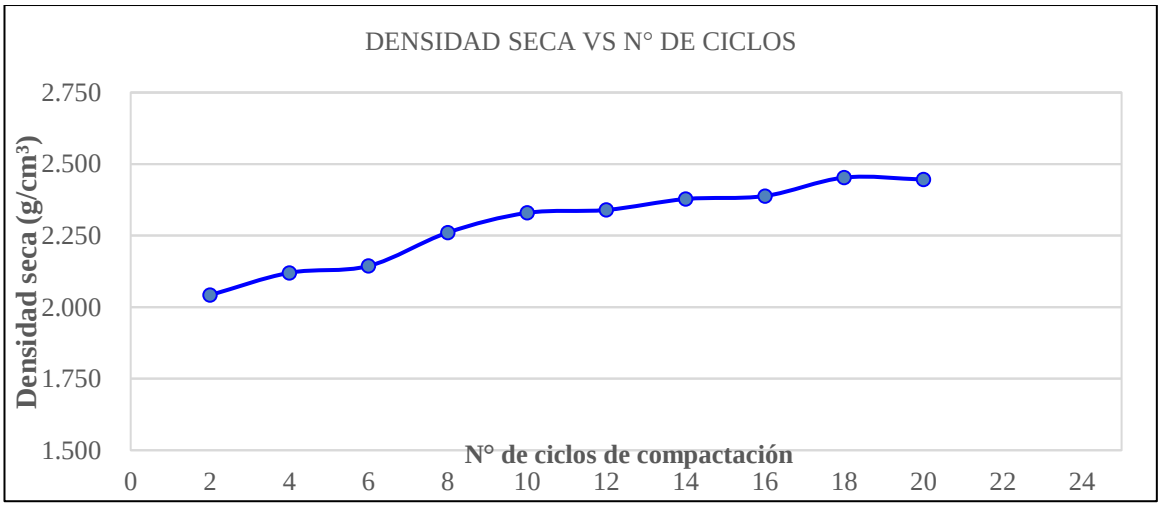
En la siguiente tabla 11 se presenta los resultados y en grafico 14 se observa como el grado de compactación evoluciona con los ciclos. Los resultados, representando el incremento de las densidades en función del número de ciclos de compactación y presentando una línea de tendencia ascendente. La Máxima Densidad relativa del Test Fill (MDTF) estimada es de 2.446 g/cm³.

Tabla 10
Resultados de Máxima Densidad del Test Fill

Nº Registro	PT-GR00	PT-GR01	PT-GR02	PT-GR03	PT-GR04	PT-GR05	PT-GR06	PT-GR07	PT-GR08	PT-GR09
Nº Ciclos	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Densidad húmeda	2.138	2.221	2.245	2.358	2.439	2.448	2.494	2.510	2.577	2.566
Densidad seca	2.042	2.120	2.144	2.261	2.329	2.340	2.378	2.388	2.453	2.446

Nota. Resumen de resultados de la prueba Test Fill (elaboración propia)

Figura 28
Número de ciclos de compactación con relación a su densidad obtenida.



Nota. Gráfico de resultados densidad con N° de ciclos (elaboración propia).

c. Deformación vertical por método topográfico.

El control de deformaciones verticales mediante métodos topográficos se realiza a través de la medición de diferencias de nivel (altimetría) en ella se hace seguimiento de cambios de altura en puntos preestablecidos. Esto permite evaluar el comportamiento y tomar decisiones informadas.

La deformación vertical fue medida en cada etapa y ciclo de compactación, utilizando cuatro puntos de control en cada sector del test fill, El espesor inicial de la capa conformada por el tractor sobre-oruga fue de aproximadamente 1200 mm. Se obtuvo una deformación vertical promedio de 135 mm a los 20 ciclos de compactación. Los datos topográficos procesados se presentan en la tabla 13, y la Figura 16 ilustra la deformación en función del número de ciclos, incluyendo la ecuación de tendencia potencial para fines de extrapolación.

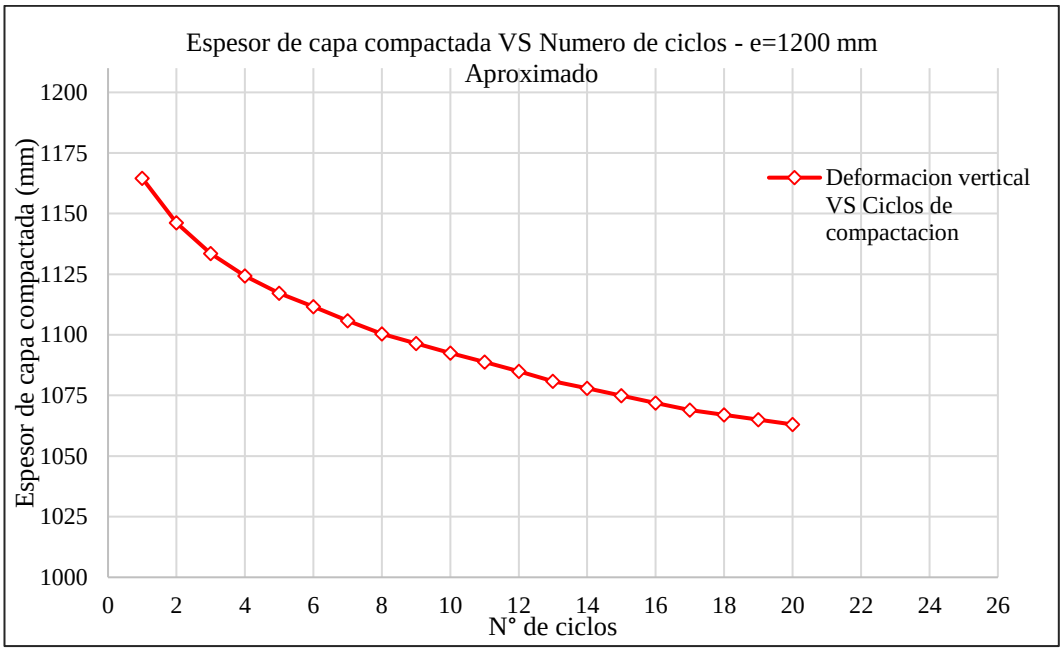
Tabla 11

Resultado de Deformación Vertical y Ciclos de Compactación.

DEFORMACION VERTICAL (mm) VS CICLOS DE COMPACTACIÓN																					
N° de ciclos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Deformación promedio (mm)	0	35	18	13	9	7	6	6	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	2	2	2
Espesor de capa (mm)	1200	1165	1146	1134	1124	1117	1112	1106	1100	1096	1092	1089	1085	1081	1078	1075	1072	1069	1067	1065	1063

Nota. Resumen de resultados de N° de ciclos, deformación vertica y espesor de capa obtenido (elaboración propia)

Figura 29
Numero de ciclos con relación al espesor de capa compactada.



Nota. Grafica de la curva de compactación N° de ciclos y espesor de capa obtenido (elaboración propia).

Dada Grafico de la deformación vertical anterior se puede visualizar una tendencia de asentamiento a estabilizarse en la curva, presentando inicialmente una apreciable disminución en el espesor de la capa.

d. Factor constante de compactación tiempo (FCC).

Para la obtención del FCC durante el proceso de compactación del test fill, se llevó un registro sistemático de los parámetros operativos de cada etapa. Estos datos incluyeron las dimensiones del Test Fill, el área de la prueba, la velocidad de compactación preestablecida del rodillo, y su capacidad. A partir de esta información, se desarrolló un **Factor Constante de Compactación tiempo (FCC)**, el cual representa un valor numérico unitario que permite cuantificar la energía de compactación aplicada por unidad de área en un tiempo determinado. Este factor es fundamental para estandarizar el proceso de compactación y se relaciona directamente con los grados de compactación alcanzados, así como con la densidad del material y la deformación vertical observada. La derivación del FCC se basa en la relación entre el tiempo efectivo de compactación y el área compactada por ciclo.

A partir de los datos registrados de tiempo de compactación y el area efectiva por un ciclo, la derivación matemática del Factor Constante de Compactación tiempo (FCC). Se determina mediante la siguiente relación:

$$FCC = \frac{t\ (\text{min})}{A\ (m^2)}$$

Donde:

FCC = Factor constante de compactación tiempo (min/m²)

t = tiempo empleado en recorrer la doble longitud o ciclo del terraplén de prueba (min)

A = doble longitud del Test Fill o terraplén de prueba multiplicado por el ancho tributario efectivo de la rola del rodillo (m²).

La Tabla 14 y la figura 16 los datos necesarios y el tiempo empleado en cada etapa y ciclos de compactación.

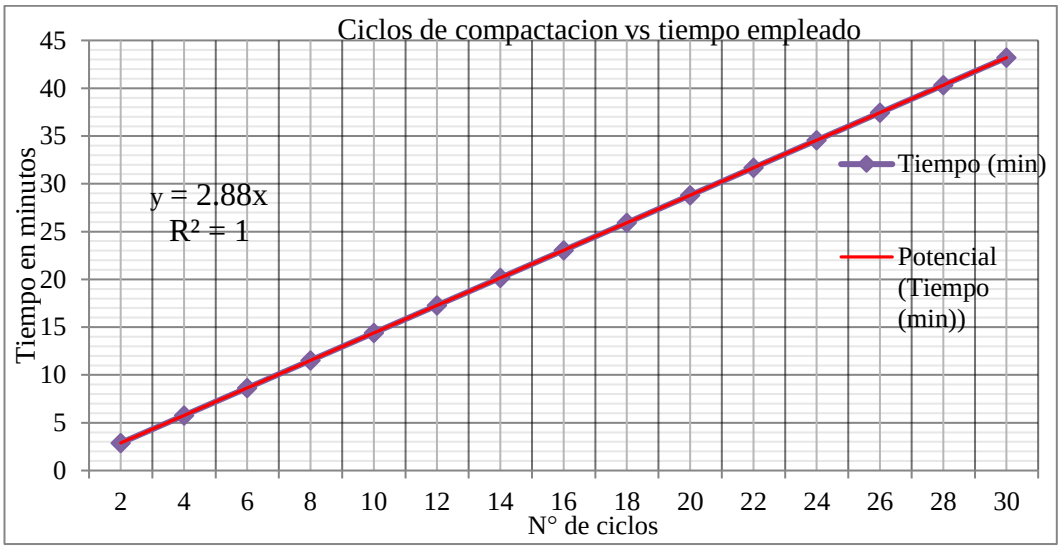
Tabla 12

Datos para el cálculo del FCC por un ciclo y área tributaria.

Datos del terraplén de prueba test fill recopilada para factor constante de compactación tiempo (FCC)																
Longitud (m)						36.0					Ancho (m)			2.05		
Velocidad (km/h)					3.0	Velocidad (m/min)								50.0		
Tiempo empleado para 1 ciclo en minutos (ida y vuelta)														1.44		
Área de prueba (m²):														73.8		
Factor constante de compactación tiempo (FCC) en **min/m²**														**0.01951**		
N° de ciclos	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
Tiempo (min)	**2.9**	**5.8**	**8.6**	**11.5**	**14.4**	**17.3**	**20.2**	**23.0**	**25.9**	**28.8**	**31.7**	**34.6**	**37.4**	**40.3**	**43.2**	
FCC	**0.01951**															

Nota. Detalle de datos para la obtención del FCC (elaboración propia).

Figura 30
Numero de ciclos de compactación con su relación al tiempo empleado.



Nota. Resultado de compactación N° de ciclos y tiempo (elaboración propia).

El FCC obtenido para un determinado número de ciclos de compactación en el test fill permite **replicar y escalar la metodología de compactación**. Con este factor, es posible estimar el tiempo de compactación necesario (t) para un área (A) requerida en el proyecto, garantizando condiciones de compactación similares a las optimizadas en el test fill. De esta manera que, el FCC facilita la programación de los trabajos y la consecución de un determinado grado de compactación requerido, estableciendo una relación directa entre el tiempo de operación y los resultados de compactación. El valor de FCC, junto con el número de ciclos de compactación, la densidad alcanzada y la deformación vertical, se relacionan con el grado de compactación (variable Y) en el análisis estadístico para determinar su influencia y predictibilidad.

4.3.3.Metodologías

En esta sección presenta los resultados que fundamentan las metodologías propuestas para la aceptación de la compactación, basándos en la relación de las densidades, deformaciones y el factor constante de compactación tiempo con el grado de compactación alcanzado. El enfoque principal es la relación de la máxima densidad seca relativa obtenida en el Test Fill con los grados de compactación.

a. Densidad ASTM D-5030

Se estableció la relación entre la densidad relativa del test fill y el grado de compactación alcanzado, considerando la máxima densidad seca del Test Fill como el 100% de compactación.

Esta relación se procesó en una hoja de cálculo Excel y se visualiza en la Figura 17.

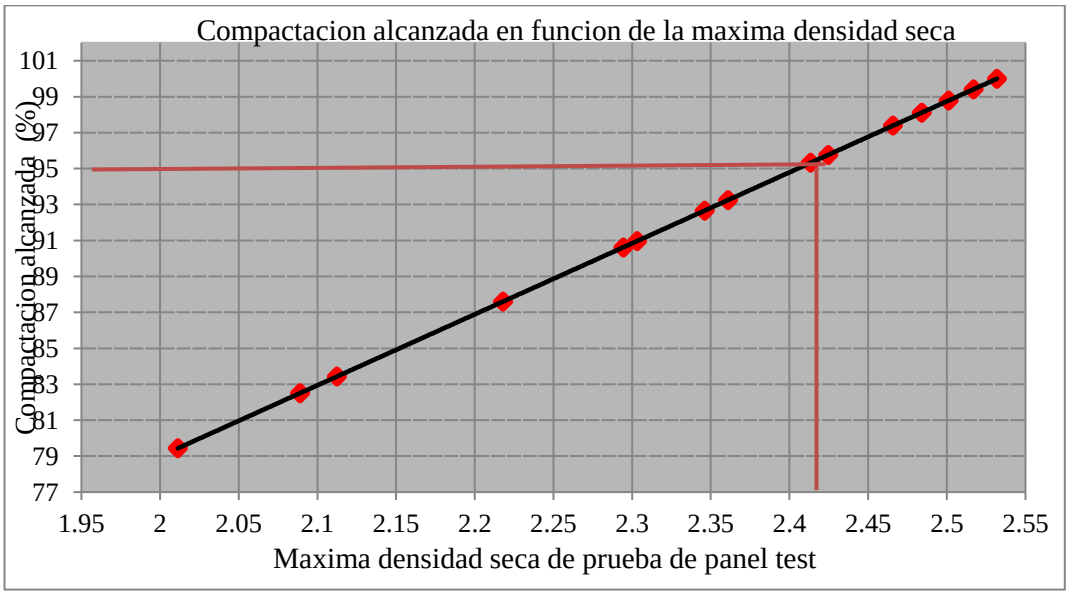
Grados de compactación en función de las densidades y numero de ciclos compactados.

Tabla 13
Resultado de grados de compactación en función de las densidades y N° de ciclos compactados.

N° de ciclos	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Densidad de Test Fill	2.011	2.089	2.112	2.218	2.294	2.303	2.346	2.361	2.425	2.4	2.466	2.484	2.501	2.517	2.532
% de compactación alcanzado	79.4	82.5	83.4	87.6	90.6	91.0	92.7	93.2	95.8	95.3	97.4	98.1	98.8	99.4	100.0

Nota. Las densidades están en gr/cm³ (elaboración propia).

Figura 31
Grados de compactación en función de las densidades.



Nota. Compactación alcanzada en función de la densidad (elaboración propia).

b. Numero de ciclos de compactación

A partir de la máxima densidad seca del test fill, se analizó y relaciono el número de ciclos de compactación con los grados de compactación. La Figura 18 y la Tabla 16 muestra que, a medida que se incrementa el número de ciclos, el grado de compactación tiende a aumentar debido a la densificación de la capa del terraplén de prueba. Se presenta además la ecuación de tendencia para estimar un determinado grado de compactación requerido.

Tabla 14

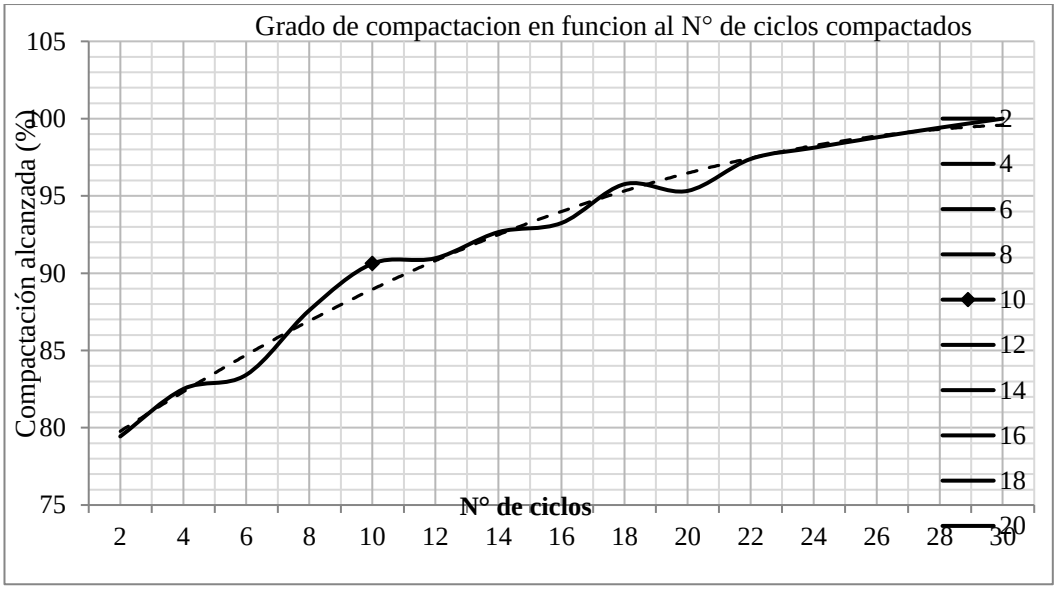
Resultados relación entre número de ciclos y grados de compactación.

N° de ciclos	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Densidad de Test Fill	2.011	2.089	2.112	2.218	2.294	2.303	2.346	2.361	2.425	2.4	2.466	2.484	2.501	2.517	2.532
% de compactación alcanzado	79.4	82.5	83.4	87.6	90.6	91.0	92.7	93.2	95.8	95.3	97.4	98.1	98.8	99.4	100.0

Nota. Las densidades del Test Fill están en gr/cm³ (elaboración propia).

Figura 32

Relación número de ciclos de y grados de compactación.



Nota. Gráfico de grados de compactación y porcentaje alcanzado (elaboración propia).

c. Deformación vertical

Se investigo la relación entre la deformación vertical del terraplén y el grado de compactación, estableciendo criterios de aceptación basados en el asentamiento observado.

La gráfica Nº17 ilustra esta relación vinculando el número de ciclos con los grados de compactación. Con los resultados de la Tabla Nº17 se resalta que esta metodología para la aceptación se basa en la deformación evaluada en campo obteniéndose grados de compactación hasta el 100% y la deformación vertical de aproximadamente 1 mm con tendencia a seguir descendiendo.

Tabla 15

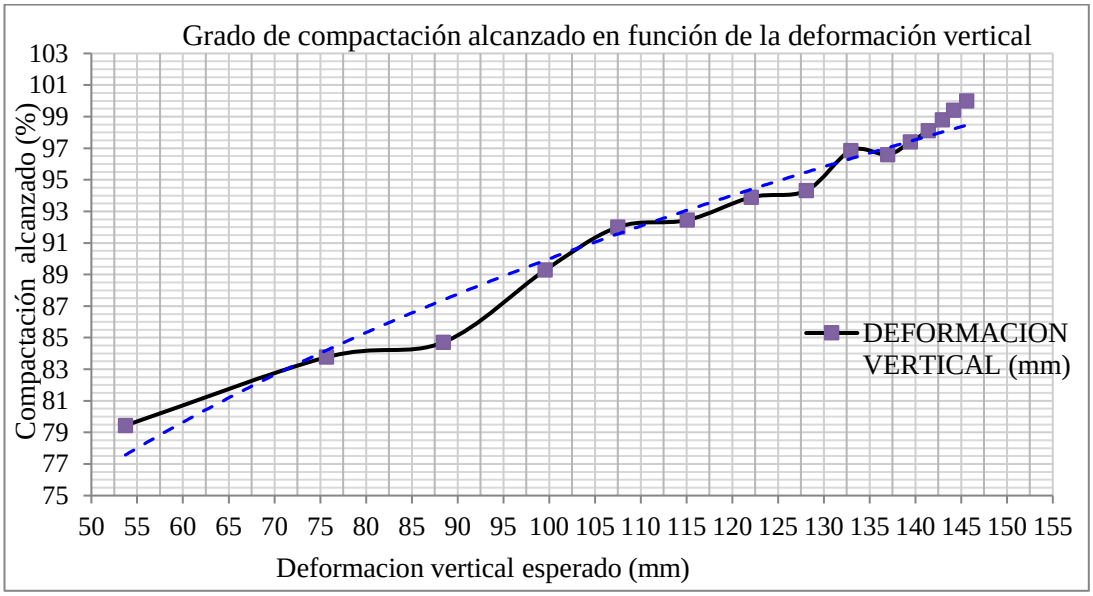
Resultado de relación de grados de compactación en función de la deformación vertical.

Deformación (mm)	54	22	13	11	8	8	7	6	5	4	2	2	2	1	1
Densidad de TF (g/cm³)	2.011	2.089	2.112	2.218	2.294	2.303	2.346	2.361	2.425	2.4	2.466	2.484	2.501	2.517	2.532
Compactación alcanzada (%)	79.4	82.5	83.4	87.6	90.6	91.0	92.7	93.2	95.8	95.3	97.4	98.1	98.8	99.4	100.0

Nota. Las densidades están en gr/cm³ (elaboración propia).

Figura 33

Gráfico de deformación vertical con relación a los grados de compactación.



Nota. Gráfico de resultado de elaboración propia.

d. Factor constante de compactación tiempo (FCC).

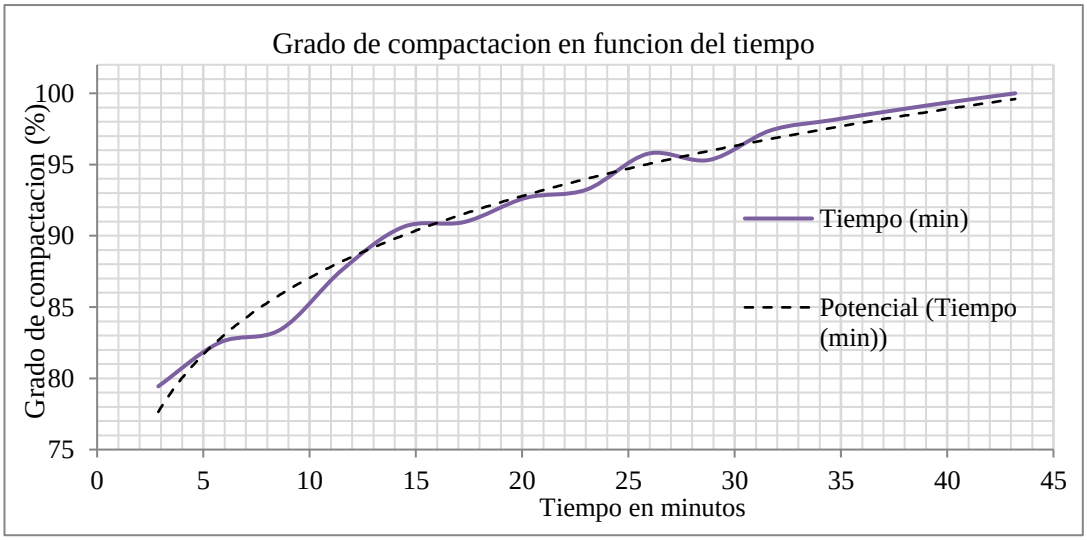
Se evaluó la relación entre el Factor Constante de Compactación **tiempo (FCC)** y el grado de compactación alcanzado. Este análisis es fundamental para **establecer una metodología de control de compactación basada en el tiempo de operación**, permitiendo estimar el tiempo de compactación requerido para alcanzar un grado de compactación objetivo en el área a compactar. A partir del FCC. La tabla N°19 presenta los valores obtenidos de FCC en cada ciclo y su correspondiente grado de compactación, la Figura 20 presenta esta relación tiempo y grados de compactación.

Tabla 16
Resultados de grados de compactación con relación al tiempo.

Tiempo (min)	**2.9**	**5.8**	**8.6**	**11.5**	**14.4**	**17.3**	**20.2**	**23.0**	**25.9**	**28.8**	**31.7**	**34.6**	**37.4**	**40.3**	**43.2**
Densidad de TF	2.011	2.089	2.112	2.218	2.294	2.303	2.346	2.361	2.425	2.4	2.466	2.484	2.501	2.517	2.532
Compactación alcanzada (%)	79.4	82.5	83.4	87.6	90.6	91.0	92.7	93.2	95.8	95.3	97.4	98.1	98.8	99.4	100.0

Nota. En los resultados las densidades del TF entá en gr/cm³ (elaboración propia)

Figura 34
Grados de compactación con relación a tiempo en minutos.



Nota. Grafica de grados de compactación en función del tiempo (elaboración propia).

Como resultado de la determinación de las relaciones anteriores, se propone un formato de registro como metodología para el control y la aceptación de la compactación en campo, integrando los criterios de densidad, deformación y ciclos.

e. Propuesta de formatos de registro para el control de compactación

A partir de que surge de los resultados se muestra la materialización de estas metodologías en una herramienta practica y es parte de la metodología que se propone.

Como parte de las metodologías propuestas para el control y la aceptación de la compactación en terraplenes de presa con geomateriales, y basándose en la interrelación entre las propiedades del material y el Grado de Compactación, se desarrolló un formato de registro diseñado para facilitar la recopilación y seguimiento de datos en campo. Este formato busca integrar los parámetros clave medidos in situ para una evaluación eficiente del cumplimiento de los Grados de Compactación requeridos y a su vez ser un documento de respaldo técnico.

La Figura 21 presenta el formato de registro propuesto.

Figura 35

Formato de registro método de reemplazo de agua

IMAGEN DE LA CONSTRUCTORA	DENSIDAD DE CAMPO CONTROL DE COMPACTACIÓN IN SITU - METODO POR REEMPLAZO DE AGUA - ASTM D5030	PCQ-GEM-03.R07 Rev.0 Fecha:
Cliente:	Proyecto: PRUEBA DE TEST FILL	Páginas:_____/ ___

LABORATORIO DE SUELOS			
CANTERA :		N° REGISTRO :	
UBICACIÓN :		FECHA DE ENSAYO :	
REALIZADO POR :		HORA :	

N° de capa:	Cota :		Correlativo :
Progresiva:			Pagina :
Nº de ciclos :		Ciclos	Turno : Dia
Espesor compactado aproximado :		cm	
Numero de pruebas en la capa :			

Tramo Liberado	Progresiva Inicial		Ubicación de prueba	ESTE	
	Progresiva Final			NORTE	

DATOS DE LA MUESTRA							
01	Masa del agua de nivelación	(gr)					
02	Masa del agua del hoyo + marco	(gr)					
03	Temperatura del agua	(°C)					
04	Peso especifico del agua	(gr/cm3)					
05	Volumen de agua en el marco	(cm3)					
06	Volumen agua en el hoyo + marco	(cm3)					
07	Volumen neto en el hoyo	(cm3)					
08	Masa húmeda del suelo extraído	(gr)					
09	Masa húmeda partículas sobredimensionadas	(gr)					
10	Masa húmeda de fracción de control	(gr)					
11	Peso específico de partículas sobredimensio	(gr/cm3)					
12	Humedad de fracción de control	(%)					
13	Humedad de partículas sobrediemnsionadas	(%)					
14	Volumen de partículas sobredimensionadas	(cm3)					
15	Volumen de fracción de control	(cm3)					
CÁLCULOS DEL ENSAYO							
16	Densidad húmeda de la fracción de control	(gr/cm3)					
17	Densidad seca de la fracción de control	(gr/cm3)					
18	Masa seca de la fracción de control	(gr)					
19	Masa seca de partículas sobredimensionadas	(gr)					
20	Masa seca de la muestra total	(gr)					
21	% de partículas sobredimensionadas	(%)					
22	Densidad húmeda de la muestra total	(gr/cm3)					
RESULTADOS DE PRUEBA							
23	Humedad de la muestra total	(%)					
24	Densidad seca de la muestra total	(gr/cm3)					
25	% de compactación (13/19)*100	(%)					

DATOS Y CARACTERISTICAS FÍSICAS DEL MATERIAL			
% Mínimo de compactación especificado		Nº REPORTE PANEL TEST	
Max. Densidad Seca de Panel Test		Material Color	
Óptimo contenido de humedad			

Observacion:

Elaborado:	Revisado:	Aprobado:	Aprobado:
Nombre:	Nombre:	Nombre:	Nombre:
Firma:	Firma:	Firma:	Firma:
Fecha:	Fecha:	Fecha:	Fecha:

Nota. Formato para registro de prueba de compactación en campo por el método de reemplazo de agua (elaboración propia).

Figura 36

Formato de registro control de compactación mediante ciclos, deformación y tiempo

IMAGEN O LOGO DE LA CONTRATISTA	**REGISTRO DE CONTROL DE CALIDAD**	**ID del Doc.:** QC-PC-0003-F02
	CONTROL DE COMPACTACIÓN MEDIANTE N° DE CICLOS DE COMPACTACIÓN y/o TIEMPO y/o DEFORMACION VERTICAL	**Revisión:** 1
		Fecha:

PROYECTO:	**CLIENTE:**
ÁREA:	**Nº REPORTE:**
UBICACIÓN/ ESTRUCTURA:	**FECHA:**
DESCRIPCIÓN:	**PLANO REF.:**

Ítem	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA A INSPECCIONAR	Conforme	No Conforme	N/A
1	Superficie y/o plataforma nivelada y compactada previamente.			
2	Colocacion de plantillas preliminares con topografia previa al acopio de material de acuerdo al espesor.			
3	La humedad del material es la optima o está dentro de los limites para la colocación de la capa de material.			
4	La capa de material se encuentra libre de material segregado (gruesos y/o finos), cumple con los límites permisibles de acuerdo a los planos de construcción y EE.TT. (se retiro material de sobretamaño)			
5	Colocación, extendido y conformacion del material de manera correcta (no presenta olas).			
6	Colocación de plantillas para nivelacion y levantamiento de cotas para control topografico de asiento.			
7	Compactacion con rodillo > a 18 Toneladas			
8	Compactacion de plataforma de acuerdo a ciclos establecidos previamente			
9	Levantamiento topografico de plantillas, de acuerdoal numero de ciclos despues de la compactación.			
10	Cantidad de ciclos de compactación para el area especificada			

DATOS DE LA CAPA DE RELLENO A COMPACTAR :

N° de capa :		
Area de la capa a compactar :		m2
Cota superior :		msnm
Cota inferior :		msnm
Maxima densidad seca del Panel Test :		gr/cm3
Optimo contenido de humedad (OCH) :		%
N° de ciclos especificado :		
Grado de compactacion especificado :		%
Velocidad constante del rodillo :		km/h

DESCRIPCION DE RESULTADOS DE COMPACTACION :

Factor constante de compactacion (FCC) :		
Tiempo establecido para a compactar :	:	h:min
HR Inicial del rodillo :		h:min
HR Final de rodillo :		h:min
Total de horas :		h:min
Asentamiento minimo esperado :		mm
Asentamiento obtenido :		mm
Aceptacion de la capa:	SI	NO

CONTROL DE DEFORMACION VERTICAL METODO TOPOGRAFICO (informacion proporcionada por topografia) :

Ubicación / Ptos esquema de Plano	Progresivas, Cotas Previo y Posterior a la Compactación			
	Previo a la compactación		Posterior a la compactacion	
	Progresiva	COTA	COTA	Asentamiento Δ (mm)
01				
02				
03				
04				
05				
06				
07				
08				
09				
10				
Promedio :				

Esquema :

Topografia : _____

Topografia : _____

COMENTARIOS / OBSERVACIONES

Elaborado:	Revisado:	Aprobado:	Cliente :
Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____
Firma: _____	Firma: _____	Firma: _____	Firma: _____
Fecha: _____	Fecha: _____	Fecha: _____	Fecha: _____

Nota. Formato de registro para control de compactación por métodos topográficos y otros (elaboración propia).

Este instrumento permite documentar los parámetros críticos de compactación en cada capa o panel de prueba, incluyendo:

a. Datos generales de la prueba, capa, proyecto, etc.
b. Características del equipo y proceso de compactación.
c. Mediciones de densidad y grado de compactación.
d. Mediciones de deformación vertical (métodos topográficos).
e. Observaciones y comentarios adicionales.

Finalmente, estos registros son un resultado tangible, funcional y documentable de la investigación. Con esto se demuestra como el análisis estadístico se tiene que traducir en unas metodologías de campo aplicable.

4.4.PRUEBA ESTADISTICA

La prueba estadística permite validar los hallazgos y establecer la significancia de los resultados. La estadística permite generalizar las observaciones y determinar diferencias o relaciones. En esta sección presenta el análisis estadístico de los resultados obtenidos en la sección anterior, con el objetivo de validar las relaciones observadas, cuantificar su magnitud y desarrollar modelos predictivos para determinar metodologías óptimas de compactación. Se utilizará un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. Se presenta la aplicación de métodos estadísticos para validar y profundizar en las relaciones observadas en el capítulo anterior. El análisis estadístico se basa en los objetivos específicos de la investigación.

4.4.1. Enfoque estadístico adoptado

a. Tipo de investigación: La investigación es de naturaleza cuantitativa y se utilizó un enfoque experimental/cuasiexperimental.

b. Software estadístico: El software o herramienta utilizado en el análisis de datos se realizó con Microsoft Excel y el MiniTab.

c. Nivel de la confianza/Significancia: A continuación, se presenta los niveles de confianza.

4.4.2. Prueba de normalidad y homogeneidad.

a. Prueba de Normalidad

Se presenta el análisis para la variable geomateriales.

El Cc y IP muestran medias relativamente bajas a intermedias y, a pesar de cierta variabilidad, sus pruebas de normalidad (con p-valores cercanos o ligeramente superiores a 0.05) sugiere que sus datos podrían considerarse distribuidos normalmente. Sin embargo, la cercania de p-valores al umbral de 0.05 invita a la precaución y a una posible revisión visual de la distribución.

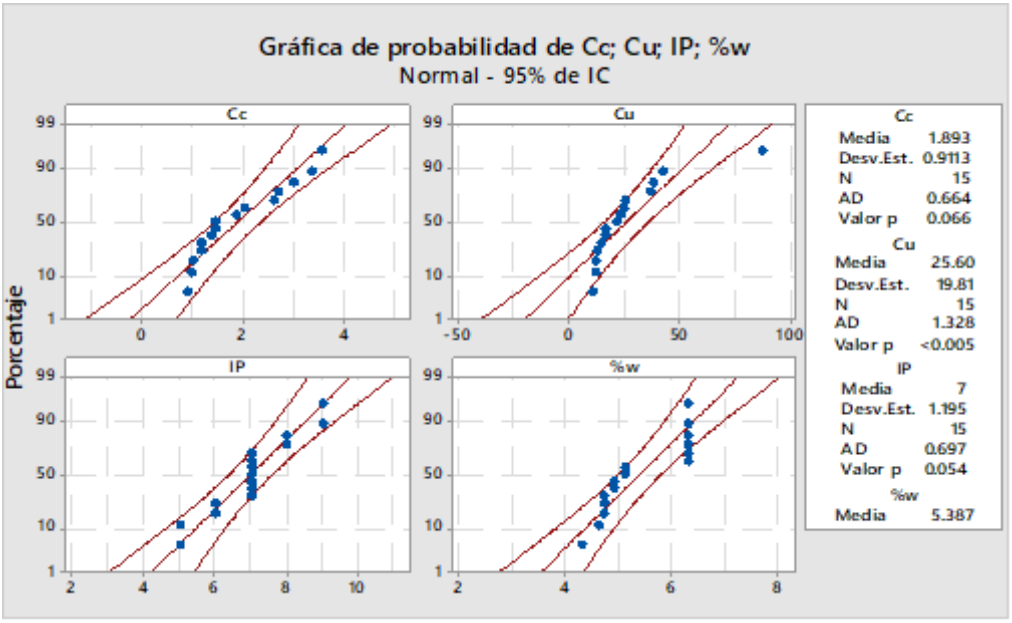
Cu se destaca por tener media mas alta y, lo más importante, una variabilidad extremadamente alta (des. Estándar). Su prueba de normalidad con valor p muy bajo (<0.005) indica claramente que los datos de Cu no siguen una distribución normal.

Para la humedad (%W), solo se presenta la media, por lo que no se puede inferir nada sobre su distribución o normalidad.

Entonces Cc y IP pueden proceder a con las pruebas estadísticas paramétricas si se asume la normalidad. Para Cu, definitivamente se deberían considerar pruebas estadísticas no paramétricas o transformaciones de datos debido a la clara falta de normalidad y la alta variabilidad.

Figura 37

Grafica de prueba de normalidad de geomateriales.



Nota. Resultado del programa MiniTab (elaboración propia).

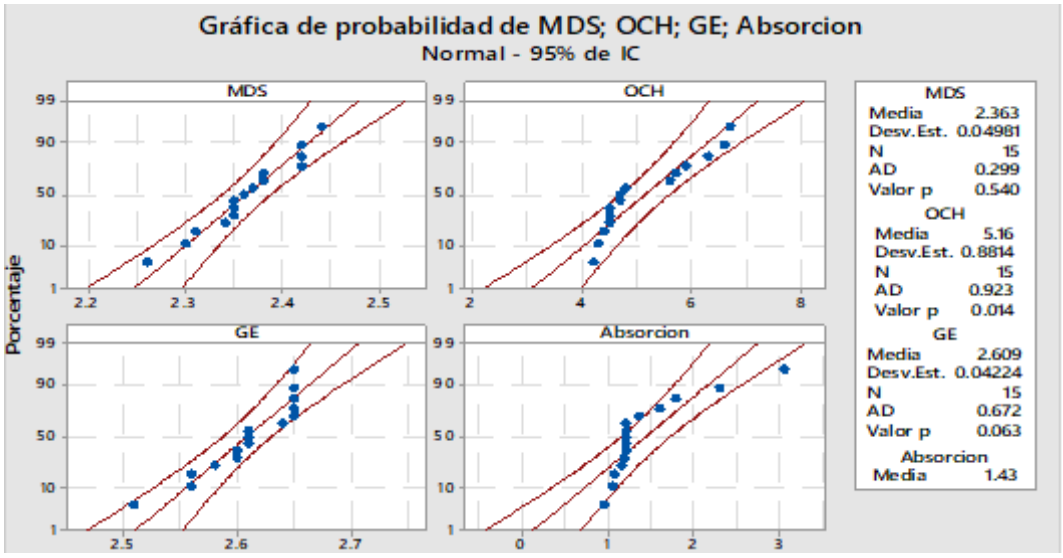
En el grafico N°38 siguiente el análisis estadístico comparo cuatro categorías de datos: MDS, OCH, GE y Absorción, cada una con 15 observaciones.

Estas categorías MDS y GE mostraron un comportamiento similar en términos de distribución y variabilidad, presentando medias relativamente bajas (2.363 para MDS y 2.609 para GE), esto indica que los datos dentro de estas categorías están muy agrupados alrededor de sus medias, mostrando una variabilidad mínima. Además, las pruebas de normalidad (valor p de 0.54 para MDS y 0.063 para GE) sugiere que los datos en ambas categorías siguen una distribución normal, esto permite el uso de pruebas estadísticas paramétricas.

Por otra parte, la categoría OCH y Absorción mostraron una distribución y variabilidad distinta, teniendo una media más alta (5.16) y una desviación estándar considerable mayor (0.8814), indicando una mayor dispersión de datos. Lo más relevante es que el valor p de su prueba de normalidad (0.014) es menor a 0.05, lo que significa que los datos de OCH no se distribuyen normalmente.

Finalmente, la categoría de absorción presento la media más baja (1.43) y una desviación estándar de 0.5622, mostrando una dispersión moderada alta. Sin embargo, su valor p fue extremadamente bajo (<0.005), indicando fuertemente que los datos de absorción tampoco siguen una distribución normal.

Figura 38
Grafica prueba de normalidad



Nota. Resultado con el programa MiniTab (elaboración propia).

b. Prueba de homegenidad y correlación.

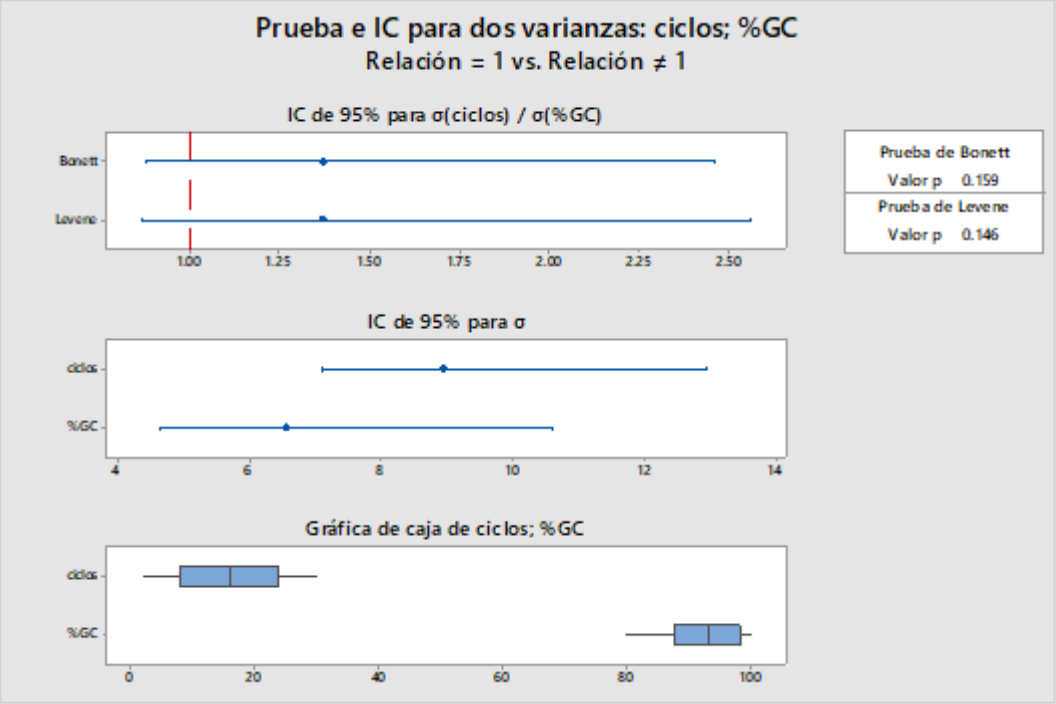
Análisis para grados de compactación con numero de ciclos.

Basándonos en el análisis de Minitab, se realizó una prueba para determinar la homogeneidad de varianzas entre las variables "Numero de ciclos" y "%Grados de Compactación". Los resultados clave son los valores p obtenidos de las pruebas de Bonett (0.159) y Levene (0.146). Dado que ambos valores p son superiores al nivel de significancia común de 0.05, no existe evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula de que las varianzas son iguales.

En consecuencia, podemos concluir que las varianzas de "ciclos de Compactación" y "%Grados de Compactación" son homogéneas. Esto significa que la variabilidad de los datos en ambos grupos es estadísticamente similar, lo cual es una condición favorable para la aplicación de pruebas estadísticas paramétricas que requieren esta asunción.

Figura 39

Pruebas de homocedasticidad y correlaciones para grados de compactación y N° de ciclos



Nota. Gráfico realizado en programa Mini Tab (elaboración propia)

Se presenta el análisis de normalidad para la variable grados de compactación. Se muestra en la imagen de la Figura Nº25 gráfico de probabilidades y se describe:

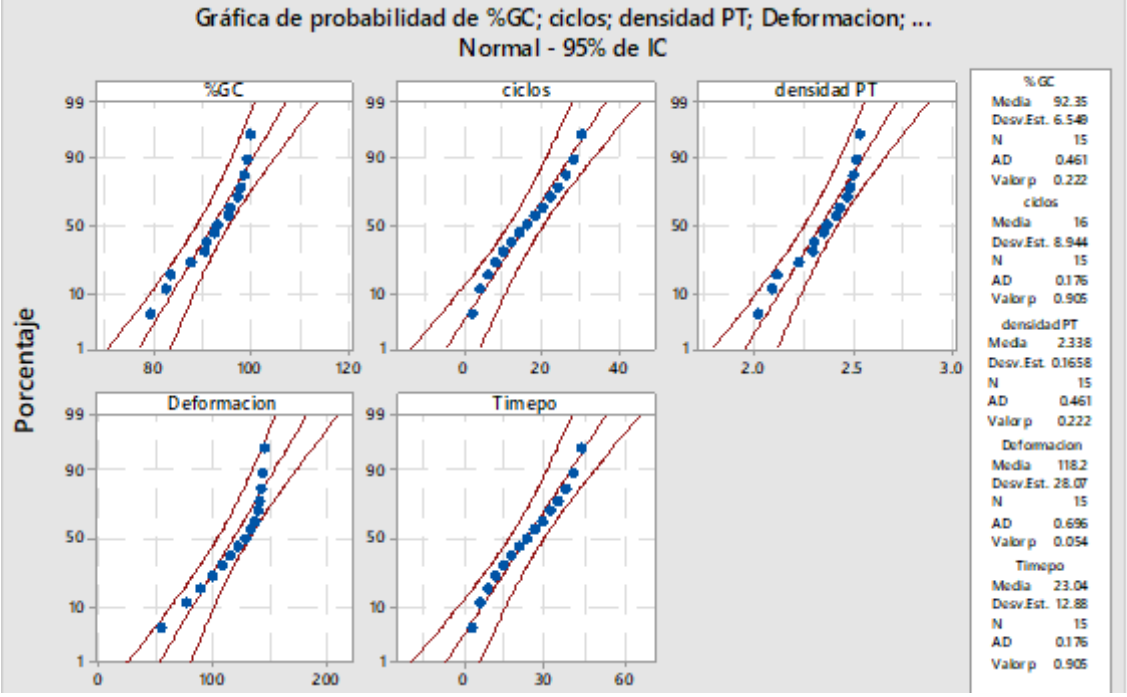
Las categorías grados de compactación (%GC), numero de ciclos (ciclos), densidades del Test Fill (TF) y Tiempo muestran que sus datos siguen una distribución normal. Para ciclos y tiempo la normalidad es muy fuerte, y para "%GC" y "densidad PT" también es clara. La variabilidad es baja para "densidad PT" y es moderada a alta para %GC "ciclos" y "tiempo".

La categoría Deformación tiene la media más alta y una variabilidad alta. Aunque su valor p de 0.054 sugiere normalidad, la cercanía al umbral de 0.05 implica que la suposición de normalidad debe manejarse con un un grado de precaución.

Se debe resaltar que, para %GC, ciclos, densidad PT y tiempo puede presentar implicaciones, con precaución, Deformación se pueden aplicar pruebas estadísticas paramétricas (como pruebas t, ANOVA) que asumen la normalidad de los datos.

A pesar de la normalidad de Deformación y tiempo, su alta variabilidad podría ser un punto a considerar en cualquier análisis o interpretación de resultados.

Figura 40
Grafica de prueba de las pruebas de normalidad de las pruebas de campo.



Nota. Resultados obtenidos con programa MiniTab (elaboración propia)

Análisis para grados de compactación y deformación.

El análisis de los datos reveló que, si bien la normalidad de las variables fue evaluada, las pruebas de homogeneidad de varianzas (Bonett, p=0.002; Levene, p=0.004) indicaron que las varianzas entre 'Deformación' y '%GC' no son homogéneas, lo cual es un hallazgo importante si se consideran futuras comparaciones de medias (como ANOVA) que requieran esta suposición. No obstante, en el análisis de la relación entre las variables, se observó una correlación lineal muy fuerte y positiva (Pearson, r=0.986, p=0.000) entre '%GC' y 'Deformación'. Dada la heterogeneidad de varianzas, se realizó también una prueba de correlación no paramétrica. El Rho de Spearman (0.996, p=0.000) confirmó una relación monótona extremadamente fuerte y estadísticamente significativa entre ambas variables.

En conclusión, existe una relación directa y muy robusta entre %GC y Deformación, y aunque las varianzas no son homogéneas, esta fuerte asociación es consistente y significativa bajo diferentes métodos de correlación.

Figura 41
Prueba estadística de Spearman para deformación.

Rho de Spearman: %GC; Deformacion

Correlaciones

Rho de Spearman	0.996
Valor p	0.000

Nota. Resultado mostrado del programa Mini Tab (elaboración propia)

Análisis para Grados de compactación y Factor constante de compactación tiempo (FCC).

En el caso de grados de **compactación y tiempo**, El análisis de los datos reveló que, si bien la normalidad de las variables fue evaluada, las pruebas de homogeneidad de varianzas (Bonett, p=0.006; Levene, p=0.008) indicaron que las varianzas entre las categorías de "Tiempo" y "%GC" no son homogéneas, lo cual es un hallazgo importante para futuras comparaciones de medias (como ANOVA). No obstante, en el análisis de la relación entre las variables, se observó una correlación lineal muy fuerte y positiva (Pearson, r=0.967, p=0.000) entre "%GC" y "Tiempo". Dada la heterogeneidad de varianzas, se realizó también una prueba de correlación no paramétrica. El Rho de Spearman (0.996, p=0.000) confirmó una relación monótona extremadamente fuerte y estadísticamente significativa entre ambas variables.

En conclusión, existe una relación directa y muy robusta entre %GC y Tiempo, y aunque las varianzas no son homogéneas, esta fuerte asociación es consistente y significativa bajo diferentes métodos de correlación

Figura 42
Prueba estadística de Spearman grados de compactación - tiempo

Rho de Spearman: %GC; Tiempo

Correlaciones

Rho de Spearman	0.996
Valor p	0.000

Nota. Resultado obtenido con el programa de Mini Tab (elaboración propia).

4.4.3. Análisis descriptivo variable geomateriales

Esta sección proporciona un resumen cuantitativo que incluye las características de los geomateriales como los parámetros obtenidos de la prueba test fill. Este análisis descriptivo es fundamental para comprender la distribución y la variabilidad de los datos, sentando las bases para los análisis inferenciales posteriores.

Las propiedades geotécnicas del geomaterial. las variables de caracterización son acordes a resultados presentados la sección 4.3.2. del capítulo IV. La Tabla Nº9 presenta un resumen de las estadísticas descriptivas (medias, medianas, desviación estándar, máximos, mínimos) de la caracterización del geomaterial.

El análisis descriptivo basado en 15 muestras proporciona una caracterización esencial de las propiedades de los geomateriales. Se observa una clara distinción entre propiedades que son muy uniformes y consistentes (ejemplo, Densidad Test Fill, G. Específica, %Grados de Compactación) y aquellas que muestran una variabilidad considerable (ej. MDS, Cu, pasa tamiz N° 200, Absorción). Esta información es fundamental para comprender la naturaleza de los materiales, identificar características dominantes y variables, y orientar la selección de métodos de análisis estadístico inferencial posteriores, así como posibles decisiones de ingeniería o investigación.

Tabla 17
Resumen estadístico de geomateriales

Resumen estadístico de propiedades de material cantera "desmontera huinchulla"																
	N° de Registro gradación	Bloque	Bolone	Grava	Arena	pasa	Coeficiente	Coeficiente	especifica	Gravedad	Atterberg	Limites de		ASTM D1557	proctor	Ensayo
		%	%	%	%	%	Cc	Cu	P. E.	Abs.	LL	PL	IP	D_{max} (gr/cc)	Hopt (%)	
Tabla estadística básicas descriptivos totales de ensayos estándar																
n		15	15	15	15	15	15.0	15.0	15.00	15.00	15	15	15	15.00	15.00	
S		62	483	780	124	50	28.4	383.9	39.14	21.43	372	267	105	35.44	77.70	

Mínimo	2	21	36	3	1	0.9	10.2	2.51	0.94	23	16	5	2.26	4.20		
Máximo	9	51	62	16	7	3.6	87.0	2.65	3.04	27	20	9	2.44	6.70		
Des. Estándar	2	8	7	4	2	0.9	19.8	0.04	0.56	2	1	1	0.05	0.87		
varianza	5	65	55	15	3	0.8	392.6	0.00	0.32	3	2	1	0.00	0.75		
Coef. de variación	56	25	14	48	50	48.1	77.4	1.60	39.36	7	7	17	2.10	16.77		

Nota. Estadísticas descriptivas de la variable Geomaterial (elaboración propia).

Dada la variabilidad inherente a los geomateriales de gran tamaño y las condiciones de compactación en campo, el enfoque estadístico adoptado busca proporcionar una base sólida para la generalización de los resultados y la propuesta de criterios de aceptación.

4.4.4.Análisis de regresión no lineal para la predicción de variable grados de compactación

Esta sección se enfoca en el desarrollo de modelos matemáticos no lineales que permitan predecir el Grado de Compactación (Y) a partir de las variables de control (Densidad del Test Fill, Número de Ciclos de Compactación, Deformación Vertical, y Factor Constante de Compactación tiempo. La elección de modelos no lineales responde a la naturaleza esperada de las relaciones en el comportamiento de los geomateriales bajo compactación.

Se encontró correlaciones significativas y se analizó la relación de las densidades del Test con el número de ciclos y se realizó análisis de regresión, Este enfoque permitió modelar como el incremento de ciclos de compactación, densidades, deformación vertical y el factor constante de compactación tiempo con el área influyen en los grados de compactación. A través de estos análisis se establecieron ecuaciones de regresión que describen la tendencia observada en los datos, permitiendo asi predecir grados de compactación, describe y presentan los gráficos con las ecuaciones:

a. Análisis número de ciclos de compactación y grados de compactación

Se desarrollo un Modelo **Predictivo Validado** con el análisis de regresión no lineal ha permitido establecer un modelo matemático robusto y predictivo para el Grado de Compactación en función del Número de Ciclos. El análisis de regresión no lineal para el Grado de Compactación (%GC) en función del Número de Ciclos reveló un modelo potencial altamente predictivo. La ecuación N°2 obtenida fue:

$$\%GC=72.5951 \cdot ciclos^{0.0933183} \quad \ldots\ldots..(2)$$

Esta ecuación describe una relación donde el Grado de Compactación aumenta con el número de ciclos, pero a una tasa decreciente, lo cual es típico en la compactación de materiales. El modelo demostró una alta precisión, con un error estándar de la estimación (RMSE) de solo 1.003%, lo que indica que las predicciones se desvían mínimamente de los valores observados. La gráfica de línea ajustada confirma visualmente el excelente ajuste de la curva a los datos. Estos resultados validan la posibilidad de predecir el Grado de Compactación basándose en el número de ciclos, ofreciendo una herramienta eficaz para el control y la optimización de los procesos de compactación en campo.

Regresión no lineal: %GC = Theta1 * ciclos ^ Theta2

Método

Algoritmo	Gauss-Newton
Iteraciones máx.	200
Tolerancia	0.00001

Valores iniciales de los parámetros

Parámetro	Valor
Theta1	10
Theta2	2

Ecuación

%GC = 72.5951 * ciclos ^ 0.0933183 ----------(xx)

Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
Theta1	72.5951	0.795719
Theta2	0.0933	0.003996

*%GC = Theta1 * ciclos ^ Theta2*

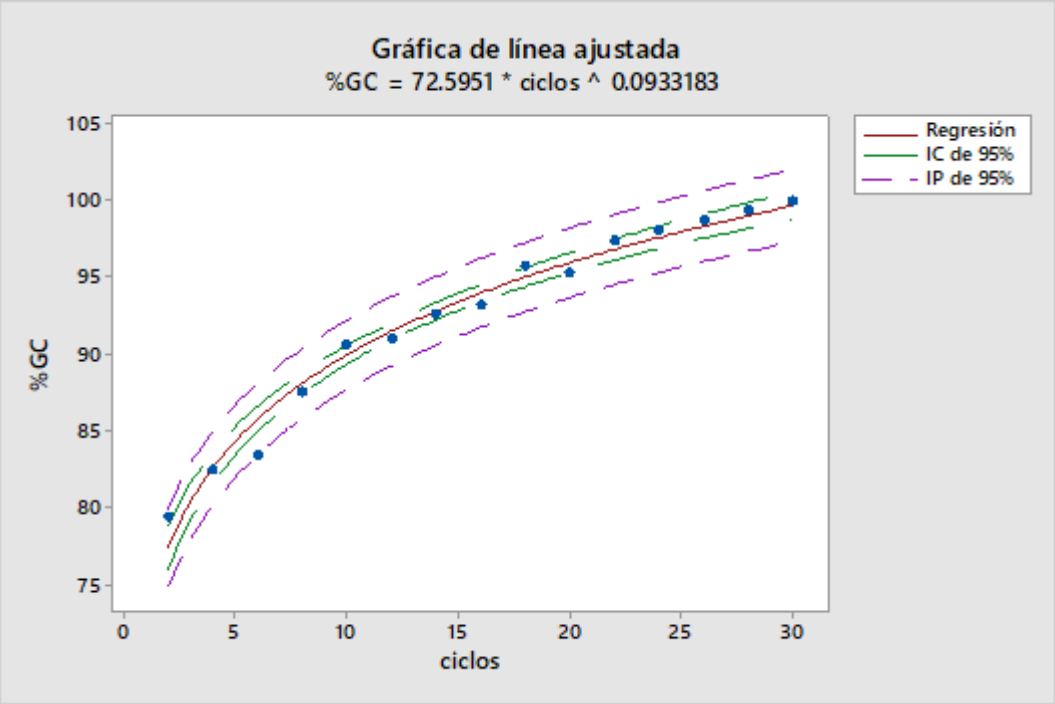
Falta de ajuste

No hay réplicas.
Minitab no puede realizar la prueba de falta de ajuste basándose en el error puro.

Resumen

Iteraciones	13
SSE final	13.0840
DFE	13
MSE	1.00646
S	1.00323

Figura 43
Grafica de análisis de regresión No Lineal para N° de ciclos y grados de compactación.



Nota. Gratifica resultado del análisis del programa Mini Tab (elaboración propia)

De los resultados obtenidos se desarrolló el modelo con numero de ciclos y grados de compactación que se muestra el Figura N°xx con su respectiva ecuación de tendencia polinómica. El R^2 para esta regresión es de 0.9756.

b. Modelo de regresión: Análisis de grados de compactación (Y) en función de la deformación vertical (X)

Para establecer un modelo predictivo del Grado de Compactación (%GC) a partir de la Deformación Vertical, se realizó un análisis de regresión no lineal de tipo potencial, empleando el algoritmo de Gauss-Newton. En ese sentido el análisis de regresión no lineal para el Grado de Compactación (%GC) en función de la Deformación Vertical ha revelado un modelo potencial expresado por la ecuación N° 3:

$$\%GC = 27.6277 \cdot Deformacion^{0.254126} \quad \ldots\ldots (3)$$

Este modelo indica que el Grado de Compactación aumenta a medida que se produce mayor deformación, pero con una eficiencia decreciente a medida que la deformación se incrementa. La precisión del modelo es buena, con un error estándar de la estimación (RMSE) de 1.710%, lo que valida su utilidad predictiva. Aunque se notó una correlación entre los parámetros estimados, la gráfica de ajuste muestra una excelente representación de la relación observada, proporcionando una base cuantitativa para el control de la compactación basado en la deformación.

Regresión no lineal: %GC = Theta1 * Deformacion ^ Theta2

Método

Algoritmo	Gauss-Newton
Iteraciones máx.	200
Tolerancia	0.00001

Valores iniciales de los parámetros

Parámetro	Valor
Theta1	29
Theta2	0.25

Ecuación

%GC = 27.6277 * Deformación ^ 0.254126

Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
Theta1	27.6277	2.52640
Theta2	0.2541	0.01913

*%GC = Theta1 * Deformacion ^ Theta2*

Falta de ajuste

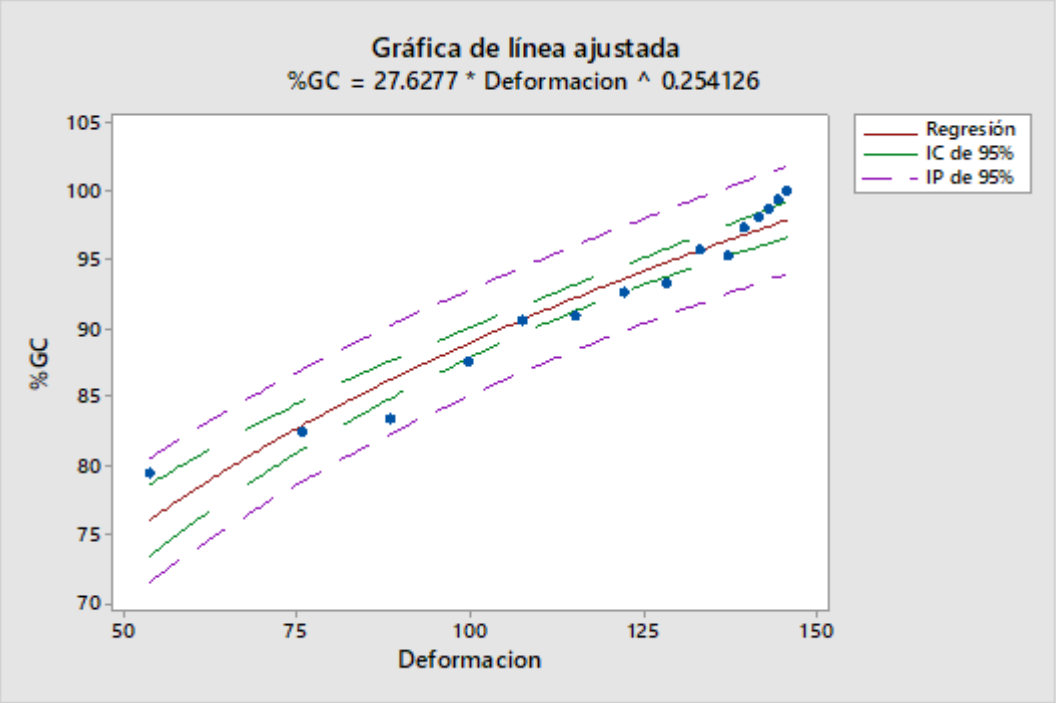
No hay réplicas.
Minitab no puede realizar la prueba de falta de ajuste basándose en el error puro.

Resumen

Iteraciones	5
SSE final	38.0240
DFE	13
MSE	2.92492
S	1.71024

* ADVERTENCIA * Algunas estimaciones de parámetros están altamente correlacionadas. Considere
simplificar la función de expectativa o transformar los predictores o los parámetros para reducir las colinealidades.

Figura 44
Grafica de análisis de regresión No Lineal para deformación vertical y grados de compactación.



Nota. Gratifica resultado del análisis del programa Mini Tab (elaboración propia)

c. Modelo de regresión: Análisis de grados de compactación (Y) en función del factor constante de compactación tiempo (FCC) (X)

Se presentan los resultados del análisis de regresión no lineal en Minitab, modelando la relación entre el Grado de Compactación (%GC, variable dependiente

Y) y el Tiempo (FCC, variable independiente X). El modelo ajustado es de tipo potencial, y el algoritmo utilizado fue Gauss-Newton.

El análisis de regresión no lineal para el Grado de Compactación (%GC) y el Tiempo (FCC) reveló un modelo potencial, cuya ecuación es %GC=70.1664·Tiempo (FCC)^0.0933183. Este modelo demuestra que el Grado de Compactación aumenta con el tiempo de compactación, pero con una tasa de ganancia que disminuye progresivamente. El modelo ajustado presenta una alta precisión, con un error estándar de la estimación (RMSE) de 1.003%, indicando una mínima desviación entre los valores predichos y los observados. Este RMSE y los parámetros del modelo son idénticos a los obtenidos para el modelo de %GC vs. Número de Ciclos, lo cual sugiere una fuerte relación entre el Tiempo (FCC) y el Número de Ciclos en la explicación del Grado de Compactación.

Regresión no lineal: %GC = Theta1 * 'Tiempo (FCC)' ^ Theta2

Método

Algoritmo	Gauss-Newton
Iteraciones máx.	200
Tolerancia	0.00001

Valores iniciales de los parámetros

Parámetro	Valor
Theta1	70
Theta2	0.09

Ecuación

%GC = 70.1664 * 'Tiempo (FCC)' ^ 0.0933183

Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimar	EE de estimación
Theta1	70.1664	0.868344
Theta2	0.0933	0.003996

*%GC = Theta1 * 'Tiempo (FCC)' ^ Theta2*

Falta de ajuste

No hay réplicas.

Minitab no puede realizar la prueba de falta de ajuste basándose en el error puro.

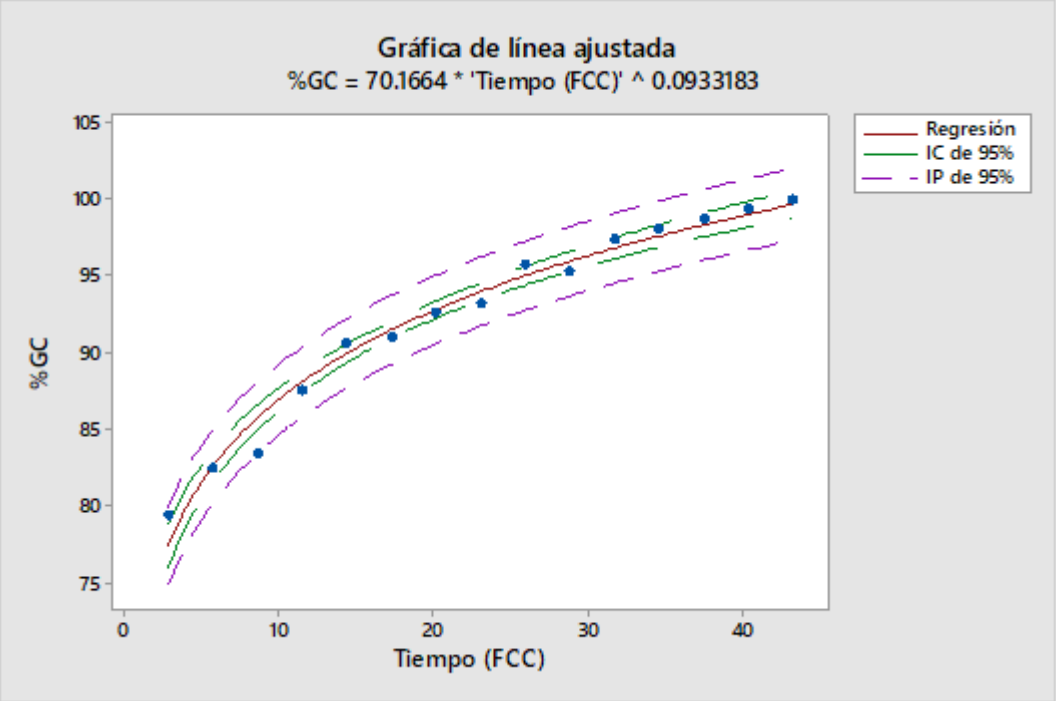
Resumen

Iteraciones	4
SSE final	13.0840

DFE	13
MSE	1.00646
S	1.00323

Figura 45

Grafica de análisis de regresión No Lineal para tiempo (FCC) y grados de compactación.



Nota. Gratifica resultado del análisis del programa Mini Tab (elaboración propia).

4.5.COMPROBACION DE HIPOTESIS

La presente sección tiene como objetivo fundamental la comprobación de la hipótesis de investigación formulada en el capítulo III. La hipótesis general de este estudio postula que: "**Es posible determinar los grados de compactación en Test Fill para terraplenes de presa con geomateriales a caracterizar - Antapite, Huancavelica 2024, mediante la metodología de: Número de ciclos, Deformación vertical y Factor Constante de Compactación tiempo".** Esta comprobación se realiza a partir de la evidencia cuantitativa obtenida de los análisis estadísticos de regresión no lineal detallados en el Capítulo V.

a. Desarrollo de la Comprobación:

Para validar esta hipótesis, se analizaron las relaciones entre el Grado de Compactación (%GC) y las variables de campo propuestas como metodologías de control: Número de Ciclos de Compactación, Deformación Vertical y Factor Constante de Compactación tiempo (FCC). Los resultados de los modelos de regresión no lineal, con su capacidad predictiva y bondad de ajuste, constituyen la evidencia primaria para la comprobación de la hipótesis:

b. Determinación del Grado de Compactación mediante el Número de Ciclos

El análisis de regresión no lineal reveló una relación potencial robusta entre el %GC y el Número de Ciclos, modelada por la ecuación $\%GC=72.5951 \cdot ciclos^{0.0933183}$. Este modelo mostró una precisión excepcional, con un Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE) de solo 1.003%, lo que indica una alta fiabilidad en la predicción del grado de compactación a partir del número de pasadas. Este resultado valida la posibilidad de utilizar el número de ciclos como una metodología efectiva para la determinación del %GC.

c. Determinación del Grado de Compactación mediante la Deformación Vertical

La relación entre el %GC y la Deformación Vertical fue exitosamente modelada por una ecuación potencial, $\%GC=27.6277 \cdot Deformacion^{0.254126}$. Este modelo presenta una buena capacidad predictiva (RMSE = 1.710%), confirmando que la deformación vertical, medida topográficamente en campo, sirve como un indicador confiable para estimar el grado de compactación alcanzado.

d. Determinación del Grado de Compactación mediante el Factor Constante de Compactación tiempo (FCC)

El modelo de regresión no lineal que vincula el %GC con el Tiempo (FCC) fue establecido como $\%GC=70.1664 \cdot Tiempo\ (FCC)^{0.0933183}$. Con un RMSE idéntico al del modelo de ciclos (1.003%), este resultado demuestra que el Factor Constante de Compactación tiempo es una variable altamente efectiva para la determinación del %GC, ofreciendo una alternativa o complemento directo al control basado en el número de ciclos.

e. Determinación del Grado de Compactación mediante la Densidad del Test Fill.

La consistencia y alta precisión de todos estos modelos, junto con la interpretación visual de sus gráficas de ajuste (como las presentadas en la Sección 4.4.4), demuestran de manera contundente la existencia de relaciones cuantificables entre el Grado de Compactación y las variables de campo propuestas. Estas relaciones no solo son estadísticamente significativas, sino que también son lo suficientemente precisas para ser aplicadas en un entorno ingenieril real para la determinación y el control del grado de compactación.

f. Conclusión Final de la Comprobación:

En suma, los resultados de los análisis de regresión no lineal, que han permitido desarrollar modelos predictivos robustos y de alta precisión para el Grado de Compactación en función del Número de Ciclos, la Deformación Vertical y el Factor Constante de Compactación tiempo (FCC), proporcionan la evidencia empírica necesaria y suficiente. Por lo tanto, se **comprueba afirmativamente la hipótesis general** planteada en esta investigación: **"Que si es posible determinar los grados de compactación en Test Fill para terraplenes de presa con geomateriales a caracterizar - Antapite, Huancavelica 2024, mediante la metodología de: Número de ciclos, Deformación vertical y Factor Constante de Compactación tiempo.** Estos hallazgos abren una vía hacia metodologías de control de compactación más eficientes y prácticas en obras de ingeniería geotécnica de gran envergadura.

4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

a. Propiedades Geotécnicas del Geomaterial (Caracterización).

Los análisis descriptivos de las propiedades geotécnicas del material de cantera "Desmontera Huinchulla" Tabla N°4, revelan características inherentes que influencian su comportamiento bajo compactación. La composición granulométrica indica un material predominantemente de material grueso, con un significativo porcentaje de la media en de grava y bolonería suelo bien gradado (GW), presentando en Grava = 52%, de Arena = 8%, Bolonería = 32%. La presencia de un porcentaje considerable de bolonería y roca requiere un manejo adecuado en

campo y justifica la aplicación de correcciones por sobretamaño en los ensayos de compactación, como se realizó en el Proctor.

Los coeficientes de uniformidad (Cu = 25.6) y curvatura (Cc = 1.9) sugieren una graduación amplia y bien distribuida, lo que es generalmente favorable para la compactación al permitir un buen encaje de partículas. La Gravedad Específica promedio de 2.61 es típica para materiales granulares. Los Límites de Atterberg (LL=25, LP=18, IP=7) indican una plasticidad, baja lo cual para el suelo en general es posible considerar no plástica, lo que facilita la compactación al no requerir un control tan estricto de la humedad para fines de cohesión, aunque sí para la lubricación entre partículas y el logro de la máxima densidad.

El valor promedio de Densidad Máxima Seca (Dmax (gr/cc) = 2.36 gr/cc) y Humedad Óptima (Hop = 5.18%) del ensayo Proctor Estándar establece los valores de referencia para el control de la compactación. La baja desviación estándar en Dmax (0.05) y Hopt (0.87) sugiere una relativa homogeneidad en la respuesta a la compactación estándar en laboratorio. Sin embargo, el coeficiente de variación (CV) para la bolonería (25%) y la grava (14%), así como para el Cu (77.4%) y el Cc (48%), denota una variabilidad considerable en la granulometría de la cantera. Esta variabilidad granulométrica puede influir en la respuesta a la compactación en campo y debe ser considerada en la interpretación de los resultados de densidad y grado de compactación, explicando parte de la dispersión observada en los análisis de regresión no lineal. La comprensión de estas propiedades es crucial para interpretar el comportamiento del material en el test fill y para la aplicabilidad de los modelos predictivos desarrollados.

b. Grados de compactación.

- **Grados de Compactación y numero de ciclos**

El análisis de regresión no lineal reveló una relación potencial estadísticamente significativa entre el Grado de Compactación (%GC) y el Número de Ciclos, modelada por la ecuación $\%GC=72.5951 \cdot ciclos^{0.0933183}$. Esta forma de relación es consistente con la literatura geotécnica, mostrando que el grado de compactación aumenta con los ciclos, pero a una tasa decreciente; es decir, las primeras pasadas son más eficientes y el rendimiento disminuye progresivamente.

Este modelo es crucial para la optimización de los procesos constructivos. Permite identificar el número óptimo de ciclos más allá del cual los beneficios adicionales de compactación son marginales, contribuyendo a la eficiencia en tiempo y recursos. La alta precisión del modelo, evidenciada por un RMSE de solo 1.003%, valida su uso como una herramienta predictiva confiable para el control de calidad en campo.

En la práctica, esta relación cuantificada ofrece una metodología para que ingenieros y supervisores establezcan el número de pasadas objetivo necesario para alcanzar un grado de compactación específico, optimizando así la ejecución de proyectos y reduciendo la dependencia de ensayos de control más lentos y costosos.

- **Grados de Compactación y Deformación vertical**

El análisis de regresión no lineal confirma una relación potencial significativa entre el Grado de Compactación (%GC) y la Deformación Vertical, representada por la ecuación %GC=27.6277·Deformacion0.254126. Esta tendencia indica que un aumento en la deformación se asocia con un mayor grado de compactación, aunque con un rendimiento decreciente a medida que la deformación progresa. A pesar de una leve correlación entre los parámetros del modelo, su precisión es buena (RMSE de 1.710%). Este hallazgo es fundamental para complementar las metodologías de control de compactación, permitiendo establecer criterios de aceptación basados en la deformación acumulada, un indicador directo del asentamiento y la densificación del terraplén.

- **Grados de Compactación y factor constante compactación tiempo (FCC).**

El modelo potencial que relaciona el Grado de Compactación (%GC) con el Tiempo (FCC) valida la existencia de una metodología de control basada en la duración de la operación, consistentemente con el comportamiento de compactación de los geomateriales. La disminución en la tasa de ganancia del %GC a medida que el tiempo de compactación aumenta es fundamental para identificar los límites de eficiencia y optimizar el proceso. La similitud notable en los parámetros y la precisión (RMSE de 1.003%) entre este modelo y el de %GC vs. Número de Ciclos sugiere que ambas variables están intrínsecamente ligadas y pueden ser utilizadas indistintamente o de forma complementaria para el control de

compactación, ofreciendo flexibilidad en la implementación en campo. Este modelo permite a los ingenieros programar y evaluar el progreso de la compactación en función del tiempo de operación, lo cual es una ventaja significativa para la gestión de proyectos.

Finalmente, la variabilidad inherente en las propiedades del geomaterial (granulometría, Cc y Cu) podría ser una de las razones subyacentes de la heterocedasticidad observada en los residuos de los modelos de regresión

De forma general, si bien los modelos predictivos son valiosos, no sustituye el control de calidad de las propiedades del material en origen, si un material se desvía drásticamente de las características analizadas aquí no responderá a los modelos de la misma manera.

c. Discusión sobre Metodologías

La propuesta del formato de registro para el control de compactación en campo presentado en la Sección 4.3.3 representa un componente esencial de las metodologías desarrolladas en esta investigación. El diseño se enfoca en la **utilidad y practicidad** operativa, recopilación de datos y la toma de decisiones en tiempo real durante la ejecución de los terraplenes. Al consolidar la información sobre las características del rodillo, el número de ciclos (pasadas ida y vuelta), la deformación vertical, mediciones de densidad, tiempo y grado de compactación, el formato actúa como una interfaz directa con los modelos predictivos establecidos en la sección 4.4.4.

La **eficiencia** de los formatos radica en su capacidad para estandarizar el proceso de control de calidad. Permite a los ingenieros y supervisores de obra documentar de manera organizada la compactación en cada prueba, facilitando el seguimiento del cumplimiento de los Grados de Compactación requeridos. La inclusión de campos para el registro de la deformación vertical y el tiempo (FCC) complementa los métodos tradicionales de control de densidad, ofreciendo alternativas o confirmaciones rápidas del nivel de compactación alcanzado, lo cual es particularmente ventajoso en proyectos con geomateriales donde los ensayos de densidad in situ pueden ser más laboriosos.

Finalmente, este formato no solo optimiza la fase de ejecución al permitir un control más dinámico y menos intrusivo, sino que también contribuye a la trazabilidad y el aseguramiento de la calidad de la obra. Su implementación reduciría los tiempos de espera asociados a los ensayos de laboratorio o de campo más demorados, traduciéndose en una mejora general en la eficiencia operativa y una reducción de costos en la supervisión de la compactación. La practicidad del registro es clave para su adopción efectiva por parte del personal de campo, asegurando que las metodologías propuestas sean aplicables y beneficiosas en un entorno real de construcción.

CONCLUSIONES

a. Conclusión específica sobre la variable Geomateriales

El material de cantera 'Desmontera Huinchulla' fue caracterizado geotécnicamente como un material grueso, bien graduado, con plasticidad baja a no plástica, presentando una Densidad Máxima Seca promedio de 2.36 gr/cc y una Humedad Óptima de 5.18%. Aunque las propiedades de compactación de laboratorio mostraron baja variabilidad, la granulometría de la cantera exhibió una variabilidad considerable, lo cual es relevante para comprender la dispersión de los datos de compactación en campo y la aplicabilidad de los modelos predictivos.

b. Conclusión específica para grados de compactación y numero de ciclos:

Se determinó que la relación entre el Grado de Compactación (%GC) y el Número de Ciclos de compactación sigue un modelo no lineal de tipo potencial, expresado por la ecuación %GC=72.5951*ciclos*0.0933183. Este modelo demostró ser altamente predictivo (RMSE = 1.003%), permitiendo estimar el grado de compactación con base en el número de pasadas aplicadas, lo cual es fundamental para el control y la optimización de la compactación en campo."

c. Conclusión específica para grados de compactación y deformación vertical

Se estableció que el Grado de Compactación (%GC) puede predecirse de forma robusta mediante la Deformación Vertical utilizando un modelo de regresión no lineal de tipo potencial (%GC=27.6277·Deformacion^0.254126). Este modelo, con una precisión de 1.710% (RMSE), proporciona una herramienta valiosa para monitorear el progreso de la compactación en campo a través de mediciones de deformación. lo cual es de gran utilidad para el control de calidad no intrusivo en proyectos de terraplenes.

d. Conclusión específica para grados de compactación y tiempo o factor constante de compactación tiempo (FCC).

Se determinó una relación potencial altamente predictiva entre el Grado de Compactación (%GC) y el Tiempo (FCC), expresada por la ecuación %GC=70.1664·Tiempo (FCC)*0.0933183. Este modelo, con un RMSE de 1.003%, valida el uso del tiempo de compactación como un indicador fiable para estimar el

grado de compactación alcanzado, operando con una precisión idéntica a la del modelo basado en el número de ciclos.

e. Conclusión específica sobre el formato de registró

Se desarrolló y propuso formatos de registro estandarizado para el control de compactación en campo. Este formato representa una herramienta práctica y eficiente que permite integrar los parámetros clave de compactación (ciclos, deformación, densidad y tiempo (FCC)) para el seguimiento y la toma de decisiones en tiempo real, contribuyendo a la operatividad de las metodologías de compactación determinadas en esta investigación

RECOMENDACIONES

a. Variable geomateriales y modelos

Se recomienda un monitoreo continuo de las propiedades granulométricas (frecuencia de ensayos) del material de la cantera 'Desmontera Huinchulla' durante la ejecución de los trabajos, dada la variabilidad identificada. Esto permitirá ajustar los criterios de control de compactación o las correcciones por sobretamaño de manera más precisa si fuera necesario. Asimismo, para futuros proyectos, se sugiere realizar ensayos de caracterización adicionales a diferentes profundidades o frentes de la cantera para obtener un perfil de variabilidad más completo. La integración de esta variabilidad en el control de calidad, incluso mediante el uso de rangos de los parámetros en los modelos predictivos (ej., estableciendo modelos para escenarios de material más fino y más grueso), podría mejorar aún más la robustez de las metodologías propuestas.

b. Para grados de compactación y numero de ciclos

Recomendación Operativa/Metodológica (basada en el modelo):

- Se recomienda la implementación del modelo de regresión no lineal para la obtención de los grados de compactación desarrollado en la sección 4.4.4 como una herramienta predictiva en el control de calidad en tiempo real de la compactación en terraplenes con geomateriales de características similares. Esto permitirá establecer un número óptimo de ciclos de compactación para alcanzar grados objetivos de compactación de manera eficiente y económica, minimizando la necesidad de ensayos intrusivos y optimizando los tiempos de construcción.

- Para futuras investigaciones, se sugiere realizar estudios similares con variaciones en la capacidad del rodillo, velocidad, espesor de capa, para validar la generalidad de la relación potencial y ajustar los parámetros del modelo a diferentes condiciones operativas.

- **Grados de compactación (%GC) y Factor constante de compactación tiempo (FCC)**

Se recomienda la aplicación del modelo de regresión no lineal de Grados de Compactación vs. Tiempo (a partir de FCC) como una herramienta práctica y eficiente para el control de calidad de la compactación en campo. Dada su alta

precisión y su equivalencia con el modelo de ciclos, el Tiempo (FCC) puede ser utilizado para la planificación, monitoreo en tiempo real de la compactación, facilitando la toma de decisiones operativas y la optimización de recursos en proyectos de construcción de terraplenes.

- **Grados de compactación (%GC) y deformación vertical**

Se sugiere la implementación del modelo de Grado de Compactación con relación a la deformación vertical como un criterio de control de calidad adicional en obra, aprovechando las mediciones topográficas de deformación como un control. Esto permitirá una verificación rápida, registrable y no invasiva del progreso de la compactación, complementando los ensayos de densidad tradicionales y optimizando la toma de decisiones en tiempo real para alcanzar los grados de compactación requeridos.

Se recomienda la integración del modelo de grado de compactación en función de la deformación vertical (Sección 4.4.4) en los protocolos de control de calidad de compactación. Esto permitiría la implementación de metodologías de aseguramiento de calidad basadas en el monitoreo topográfico de la deformación, ofreciendo una alternativa eficiente y en tiempo real a los ensayos tradicionales de densidad.

Para mejorar la comprensión intrínseca de las relaciones modeladas, se podría explorar en investigaciones futuras la aplicación de transformaciones de las variables o el ajuste de otros tipos de modelos no lineales. Esto buscaría optimizar la independencia de los parámetros del modelo, manteniendo su alta capacidad predictiva

De forma general para la aplicabilidad de los modelos, dado que el material presenta cierta variabilidad, la clave para todos los modelos de regresión su aplicabilidad se limita a materiales con características geotecnicas similares a las de la cantera estudiada. Si se usa material de otra cantera, o si la granulometría de esta cambia significativamente, los modelos se tendrán que ajustar.

c. Metodología y sobre los Formatos de Registro

Se recomienda la adopción e implementación de los formatos de registro propuesto en la sección 4.3.3 (propuesta de formato) como una herramienta oficial

en los proyectos de construcción de terraplenes con geomateriales, especialmente en contextos similares al estudiado. Su uso facilitará la estandarización del control de calidad, la optimización de los tiempos de supervisión y la eficiencia operativa en campo. Para futuras aplicaciones, se sugiere capacitar al personal de campo en el uso de este formato y considerar la posibilidad de digitalizarlo para una gestión de datos aún más ágil y precisa.

REFERENCIAS

[1] J. L. Briaud and D. Saez, *Recent developments in soil compaction*, no. Ccc. Elsevier Ltd., 2015.

[2] A. V. Hohn, R. F. Leme, F. C. da Silva Filho, T. E. Moura, and G. R. A. Llanque, "Empirical models to predict compaction parameters for soils in the state of Ceará, Northeastern Brazil," *Ing. e Investig.*, vol. 42, no. 1, pp. 1–11, 2022, doi: 10.15446/ing.investig.v42n1.86328.

[3] S. M. Oroya Cóndor, "Relación de espesores de Terraplén y el número de pasadas de rodillo estándar de 12 toneladas con la densificación en suelos granulares," Universidad Continental, 2019.

[4] J. Riquelme and L. Dorador, "Metodología para determinar densidades máxima y mínima en suelos granulares gruesos a partir de ensayos de laboratorio de escala reducida," *VIII Congr. Chil. Ing. Geotécnica*, no. December, pp. 1–11, 2014, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/270216113_Metodologia_para_determinar_densidades_maxima_y_minima_en_suelos_granulares_gruesos_a_partir_de_ensayos_de_laboratorio_de_escala_reducida.

[5] L. Dorador, M. Poblete, and I. Foretic, "Densidades Mínima y Máxima en Materiales Granulares Gruesos - Resultados Preliminares de un programa de ensayos en ejecución," *Congr. SOCHIGE 2018*, no. 1, p. 11, 2018, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/329453894_Densidades_Minima_y_Maxima_en_Materiales_Granulares_Gruesos_-_Resultados_Preliminares_de_un_programa_de_ensayos_en_ejecucion.

[6] A. Hernández-Tur and R. Guardado-Lacaba, "Modelo de óptimos de parámetros de compactación de rocosos argilíticos en presas de tierra. (Spanish)," *Models for optimal parameters for argillaceous rocky soil compaction in earthfill dam. (English)*, vol. 31, no. 1, pp. 52–66, 2015.

[7] E. N. Fosteris, I. G. Bakas, K. E. Loukakis, and K. E. Massoud, "Development of Compaction Methodology and Quality Control Procedures for Large Scale Rockfill Embankments," in *55th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Jun. 2021, p. ARMA-2021-1210, [Online]. Available: https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA21/All-ARMA21/ARMA-2021-1210/467955.

[8] R. Cier, "procedimientos de interpolacion en el calculo de asentamientos sobre suelos granulares usando el método de Schmertmann," no. December 2015, pp. 1–75, 2016, doi: 10.13140/RG.2.1.3587.8006.

[9] Ł. A. Kumor, M. K. Kumor, and M. Kopka, "Geotechnical Parameters of Soil, Considering the Effect of Additional Compaction of Embankment," *Procedia Eng.*, vol. 189, no. May, pp. 291–297, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.047.

[10] D. (ASTM), *Construction Quality Control Testing of Compacted Fills: Optimum Moisture-Density Values*. 2000, pp. 126–136.

[11] N. Verveckaite, J. Amsiejus, and V. Stragys, "Stress-strain analysis in the soil sample during laboratory testing," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 13, no. 1, pp. 63–70, 2007, doi: 10.1080/13923730.2007.9636420.

[12] E. Cavero and J. Teran, "Numero de ciclos patron a nivel de capa de afirmado para obtener el optimo grado de compactacion, utilizando metodos: cono de arena y densimetro nuclear; en el acceso principal a Conga, Cajamarca 2015," Universidad Privada del Norte, 2015.

[13] A. Yanac, "Análisis del diseño y proceso constructivo de un enrocado utilizando desmontes para la construcción de una presa de relaves-mina La Bonita , Arequipa," Universidad Mayor de San Marcos, 2021.

[14] J. Kodikara, T. Islam, and A. Sounthararajah, "Review of soil compaction: History and recent developments," *Transp. Geotech.*, vol. 17, pp. 24–34, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.trgeo.2018.09.006.

[15] T. Moura, “MODELOS MATEMÁTICOS PREDITIVOS PARA ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DE SOLOS COMPACTADOS,” Universidade federal do ceara campus de russas, 2019.

[16] R. Armas, “Criterios sobre la compactación de suelos y el control de calidad de terraplenes,” 2008. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Yoermes-Glez-Haramboure/publication/258120503_CRITERIOS_SOBRE_LA_COMPACTACION_DE_SUELOS_Y_EL_CONTROL_DE_CALIDAD_DE_TERRAPLENES/links/004635270f90042e4c000000/CRITERIOS-SOBRE-LA-COMPACTACION-DE-SUELOS-Y-EL-CONTROL-DE-CA.

[17] A. Villanueva, “Diseño de presa de relaves alpamarca y el uso de materiales de mina como cuerpo de presa,” Universidad Nacional de Ingenieria, 2006.

[18] B. M. Das, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, Cuarta edi. Mexico, 2015.

[19] L. Dorador and F. A. Villalobos, “Analysis of the geomechanical characterization of coarse granular materials using the parallel gradation method,” *Obras y Proy.*, no. 27, pp. 50–63, 2020, doi: 10.4067/s0718-28132020000100050.

[20] U. Borselli, Dr. Lorenzo (Instituto de Geología Fac. De Ingeniería, “Geotecnia I,” *Año Académico 2024-2025*, 2024. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.lorenzo-borselli.eu/geotecnia1/Geotecnia_1_parte_I.pdf.

[21] A. A. Desena and E. R. S. Jacinto, “Estabilidad de taludes en presas de tierra y enrocamiento,” p. 86, 2003, [Online]. Available: http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/4828/1/319_ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO.pdf.

[22] S. Azam, G. W. Wilson, D. G. Fredlund, and D. Van Zyl, “Geotechnical

characterization of mine waste rock Charactérisation géotechnique de débris rocheux miniers," no. October, 2020, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/346730391_Geotechnical_characterization_of_mine_waste_rock_Characterisation_geotechnique_de_debris_rocheux_miniers#:~:text=The determination of geotechnical charactertiscs,cohesion due to matric suction.

[23] r. M. d. Resendiz, *Presas de Tierra y Enrocamiento*, Limusa. Mexico, 1975.

[24] C. O. González, C. C. Iglesias, S. M. Herrera, S. G. Urriolagoitia, C. G. Urriolagoitia, and G. L. E. Hernández, "Parámetros de estado crítico empleados para la simulación de la respuesta mecánica de un suelo rhodic ferralsol (mediante el MEF)," *Científica*, vol. 13, no. 4, pp. 199–204, 2009, [Online]. Available: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61412466007.

[25] B. H. Fellenius, *Basics of Foundation Design*, no. January. Canada, 2006.

[26] D. J. White and M. J. Thompson, "Relationships between In Situ and Roller-Integrated Compaction Measurements for Granular Soils," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 134, no. 12, pp. 1763–1770, Dec. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:12(1763).

[27] A. Burgueño Muñoz, *Comité Nacional español de grandes presas*. 2008.

[28] G. Spagnoli and S. Shimobe, "An overview on the compaction characteristics of soils by laboratory tests," *Eng. Geol.*, vol. 278, pp. 105831–47, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105830.

[29] A. Alvares, "Compactacion de suelos. Suelos parcialmente saturados," pp. 1–12, 2012, [Online]. Available: https://www.academia.edu/16309733/INTRODUCCIÓN_A_LA_MECÁNICA_DE_SUELOS_NO_SATURADOS_EN_VÍAS_TERRESTRES?from=cover_page.

[30] K. Rainer Massarsch and B. H. Fellenius, "Deep vibratory compaction of

granular soils," in *Ground Improvement Case Histories: Compaction, Grouting and Geosynthetics*, Elsevier Ltd., 2015, pp. 111–135.

[31] comite nacional español de grandes Presas, *CRITERIO PARA PROYECTOS DE PRESAS Y SUS OBRAS ANEJAS*, vol. 11, no. 2. España, 2015, pp. 1–214.

[32] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, Fifth ed. Thomson, 1990.

[33] R. Horn and M. Lebert, "Soil Compactability and Compressibility," in *Developments in Agricultural Engineering*, vol. 11, no. C, Elsevier B.V., 1994, pp. 45–69.

[34] H. Ñaupas Paitán, E. Mejía Mejía, E. Novoa Ramírez, and A. Villagómez Paucar, *Metodologia de la Investigacion Cuantitativa y Cualitativa y Redaccion de la Tesis*, vol. 1999, no. December. 2014.

[35] P. Hernandez Sampieri, Roberto-Fernandez Collado, Carlos-Baptisa Lucio, *Metodología de la Investigación*. 2006.

ANEXO:

1. Resultados de contenido de humedad

° DE CAPA	CÓDIGO DE REGISTRO	Cont. de humedad (%)	Límite inferior humedad (%)	Óptimo contenido de humedad (%)	Límite superior humedad (%)
1	PT-CH01	6.50	4.00	5.50	7.00
2	PT-CH02	5.70	4.00	5.50	7.00
3	PT-CH03	7.00	4.00	5.50	7.00
4	PT-CH04	7.00	4.00	5.50	7.00
5	-	0.00	4.00	5.50	7.00
6	PT-CH05	6.10	4.00	5.50	7.00
7	-	0.00	4.00	5.50	7.00
8	PT-CH06	5.70	4.00	5.50	7.00
9	-	0.00	4.00	5.50	7.00
10	PT-CH07	5.70	4.00	5.50	7.00
11	-	0.00	4.00	5.50	7.00
12	PT-CH08	6.20	4.00	5.50	7.00
13	-	0.00	4.00	5.50	7.00
14	PT-CH09	6.30	4.00	5.50	7.00
15	PT-CH10	6.30	4.00	5.50	7.00
16	PT-CH11	5.79	4.00	5.50	7.00
17	PT-CH12	5.79	4.00	5.50	7.00
18	-	0.00	4.00	5.50	7.00
19	DH-CH13	6.90	4.00	5.50	7.00
20	-	0.00	4.00	5.50	7.00
21	DH-CH14	6.00	4.00	5.50	7.00
22	-	0.00	4.00	5.50	7.00
23	DH-CH15	6.50	4.00	5.50	7.00
24	-	0.00	4.00	5.50	7.00
25	DH-CH16	6.85	4.00	5.50	7.00

2. Resultado de caracterización del geomaterial.

N° de registro	Bloques o roca	Boloneria	Grava	Arena	pasa tamiz N° 200	CLASIFICACION			Coeficiente o parámetros	
	%	%	%	%	%	SUCS	AASHTO	IG	Cc	Cu
PT-GR01	4.00	21	62	12	1	GW	A-1-a	0	1.17	13.96
PT-GR02	5.40	23	62	7	3	GW	A-1-a	0	1.44	11.85
PT-GR03	7.40	23	62	6	2	GW	A-1-a	0	1.35	10.17
PT-GR04	3.80	43	46	5	2	GW	A-1-a	0	0.99	15.53
PT-GR05	1.60	35	46	13	4	GW	A-1-a	0	2.03	41.75
PT-GR06	2.30	29	54	10	4	GW	A-1-a	0	2.98	37.2
PT-GR07	2.30	29	56	8	5	GW	A-1-a	0	3.35	24.19
PT-GR08	2.30	29	57	7	4	GW	A-1-a	0	2.59	22.75
PT-GR09	2.20	36	50	7	4	GW	A-1-a	0	2.67	24.49
DH-GR10	2.30	29	46	16	7	GW	A-1-a	0	3.55	87.01
DH-GR11	6.10	30	55	5	3	GW	A-1-a	0	1.16	11.14
DH-GR12	3.10	33	53	8	3	GW	A-1-a	0	1.43	15.54
DH-GR13	7.60	38	51	3	1	GP	A-1-a	0	0.89	11.26
DH-GR14	3.10	33	45	14	5	GP	A-1-a	0	1.84	36.31
DH-GR15	8.80	51	36	3	1	GP	A-1-a	0	0.96	20.79

3. Resultados del Análisis Granulometrico por tamizado.

N° de registro	Análisis Granulometrico - % que pasa Tamiz																											
	450	300	250	200	150	100	75	63	50	37.5	25	19	12.5	9.5	6.3	4.75	2.36	2.0	1.18	0.85	0.6	0.425	0.3	0.25	0.18	0.150	0.106	0.075
	18"	12"	10"	8"	6"	4"	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	N°4	N°8	N°10	N°16	N°20	N°30	N°40	N°50	N°60	N°80	N°100	N°140	N°200
PT-GR01	100	96	88	85	81	78	75	71	65	55	42	35	26	21	16	13	9	8	6	5	4	4	3	2	2	1	1	1
PT-GR02	100	95	86	83	81	77	72	66	60	47	38	32	23	19	13	10	8	8	7	6	5	5	5	4	4	4	4	3
PT-GR03	100	93	79	75	73	72	70	64	55	47	34	28	20	16	11	8	6	6	5	4	4	4	3	3	3	3	3	2
PT-GR04	100	96	88	81	70	60	53	50	43	38	30	25	18	15	10	7	6	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3	2
PT-GR05	100	98	96	91	83	70	63	59	53	47	39	34	28	25	20	17	12	11	9	8	7	6	6	6	5	5	5	4
PT-GR06	100	98	91	86	79	74	69	63	54	46	37	32	25	22	17	14	11	11	9	8	7	6	6	5	5	5	5	4
PT-GR07	100	98	91	86	79	74	69	64	54	43	34	27	20	18	15	13	10	9	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5
PT-GR08	100	98	91	86	79	74	69	55	49	43	33	26	21	18	14	11	10	9	8	7	6	6	6	5	5	5	5	4
PT-GR09	100	98	93	86	80	70	62	56	49	40	31	27	21	18	14	12	10	9	8	7	6	6	5	5	5	5	5	4
DH-GR10	100	98	91	86	79	74	69	66	65	61	55	50	41	36	28	23	18	17	14	12	11	10	9	9	8	8	8	7
DH-GR11	100	94	86	81	76	67	64	60	55	47	35	29	21	17	11	8	7	6	6	5	5	4	4	4	3	3	3	3
DH-GR12	100	97	92	85	79	67	64	58	53	47	35	29	21	17	13	10	8	8	6	6	5	4	4	4	3	3	3	3
DH-GR13	100	92	81	77	67	59	54	51	43	36	27	20	14	10	6	4	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
DH-GR14	100	97	92	85	79	67	64	63	62	58	50	43	34	29	23	19	13	12	10	9	8	7	6	6	5	5	5	5
DH-GR15	100	91	68	57	48	43	40	37	32	26	19	15	11	10	5	4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1

Nota. Resumen de resultados de Análisis Granulometrico (elaboración propia).

4. Resultados de Limites de Atterberg.

N° de registro	LIMITES DE ATTERBERG		
	LL	PL	IP
PT-GR01	24	17	7
PT-GR02	25	19	6
PT-GR03	23	18	5
PT-GR04	27	20	7
PT-GR05	27	19	8
PT-GR06	26	18	8
PT-GR07	26	17	9
PT-GR08	24	18	6
PT-GR09	25	18	7
DH-GR10	27	20	7
DH-GR11	26	17	9
DH-GR12	23	18	5
DH-GR13	23	16	7
DH-GR14	23	16	7.00
DH-GR15	23	16	7.00

Nota. Resultado resumen de los límites de consistencia (elaboración propia).

5. Resultados de Gravedad Especifica y Absorción.

N° de registro	Gravedad especifica	
	Peso Especifico	Absorción
PT-GR01	2.61	0.94
PT-GR02	2.61	1.05
PT-GR03	2.64	1.19
PT-GR04	2.56	2.30
PT-GR0	2.61	1.15
PT-GR06	2.56	1.78
PT-GR07	2.65	1.20
PT-GR08	2.65	1.20
PT-GR09	2.65	1.20
DH-GR10	2.60	1.35
DH-GR11	2.58	1.59
DH-GR12	2.51	3.04
DH-GR1	2.65	1.20
DH-GR14	2.65	1.20
DH-GR15	2.60	1.06

Nota. Resumen de resultados de Gravedad Especifica (elaboración propia).

6. Resultados de Gravedad Especifica y Absorción.

N° de registro	Gravedad especifica

	Peso Especifico	Absorción
PT-GR01	2.61	0.94
PT-GR02	2.61	1.05
PT-GR03	2.64	1.19
PT-GR04	2.56	2.30
PT-GR0	2.61	1.15
PT-GR06	2.56	1.78
PT-GR07	2.65	1.20
PT-GR08	2.65	1.20
PT-GR09	2.65	1.20
DH-GR10	2.60	1.35
DH-GR11	2.58	1.59
DH-GR12	2.51	3.04
DH-GR1	2.65	1.20
DH-GR14	2.65	1.20
DH-GR15	2.60	1.06

Nota. Resumen de resultados de Gravedad Especifica (elaboración propia).

7. Resultados de ensayo de Proctor Estándar en laboratorio.

Item	Datos de ensayo sin corrección para obtención de máxima densidad								Resultados			
	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Sin corregir		Corregidos	
N° de registro	w %	ɣ (g/cm²)	w %	ɣ (g/cm²)	w %	ɣ (g/cm²)	w %	ɣ (g/cm²)	MDS g/cm³	OCH %	MDS	% OCH
PT-GR01	7.80	1.88	9.40	2.02	11.70	2.01	13.50	1.96	2.04	11.10	2.35	5.7
PT-GR02	7.51	1.86	9.38	1.98	11.26	2.02	13.17	1.94	2.02	10.90	2.35	5.9
PT-GR03	7.37	1.86	9.25	1.99	11.13	2.03	13.03	1.95	2.03	10.80	2.38	6.3
PT-GR04	4.85	1.86	8.10	1.94	9.99	2.05	12.95	1.95	2.01	10.00	2.38	4.7
PT-GR05	5.00	1.82	6.30	1.90	9.00	2.06	12.94	1.85	2.01	8.90	2.36	4.7
PT-GR06	6.09	1.81	8.40	1.94	10.27	2.03	12.51	2.02	2.03	11.70	2.35	5.6
PT-GR07	8.56	1.91	9.56	1.97	10.56	1.98	12.60	1.95	1.99	11.00	2.42	4.4
PT-GR08	9.39	1.97	11.60	1.98	13.20	1.94	14.27	1.89	1.99	11.00	2.42	4.3
PT-GR09	9.39	1.94	11.60	1.97	13.20	1.96	14.27	1.88	1.98	11.50	2.42	4.5
RH-GR10	8.80	1.95	10.50	1.98	12.70	1.97	14.27	1.88	1.99	11.00	2.26	6.6
RH-GR11	5.02	1.88	7.65	1.92	10.62	2.01	13.14	1.94	1.98	10.80	2.37	4.8
RH-GR12	7.00	2.02	9.00	2.05	11.00	2.04	13.00	2.00	2.05	9.70	2.34	4.2
RH-GR13	7.39	1.78	9.96	1.91	13.01	1.93	14.28	1.90	1.94	12.10	2.30	4.5
RH-GR14	5.03	1.90	8.01	1.96	9.73	2.03	11.70	2.00	2.01	11.00	2.31	6.7
RH-GR15	6.78	1.89	9.10	2.00	10.75	2.03	12.40	1.99	2.03	10.50	2.44	4.5
Xp (media)	7.07	1.89	9.19	1.97	11.21	2.01	13.20	1.94	2.00	10.80	2.36	5.2

Nota. Resultados del ensayo de Proctor estándar corregido, sin corrección y media

9. Resultados de Proctor Estándar corregidos por sobretamaño.

Item	Resultados			
	Sin corregir		Corregidos	
N° de registro	MDS (g/cm³)	OCH (%)	MDS (g/cm³)	OCH %
PT-GR01	2.04	11.10	2.35	5.70
PT-GR02	2.02	10.90	2.35	5.90
PT-GR03	2.03	10.80	2.38	6.30

PT-GR04	2.01	10.00	2.38	4.70
PT-GR05	2.01	8.90	2.36	4.70
PT-GR06	2.03	11.70	2.35	5.60
PT-GR07	1.99	11.00	2.42	4.40
PT-GR08	1.99	11.00	2.42	4.30
PT-GR09	1.98	11.50	2.42	4.50
DH-GR10	1.99	11.00	2.26	6.60
DH-GR11	1.98	10.80	2.37	4.80
DH-GR12	2.05	9.70	2.34	4.20
DH-GR13	1.94	12.10	2.30	4.50
DH-GR14	2.01	11.00	2.31	6.70
DH-GR15	2.03	10.50	2.44	4.50
n	15.00	15.00	15.00	15.00
S	30.08	162.00	35.44	77.40
Xp (media)	2.01	10.80	2.36	5.16
Mínimo	1.94	8.90	2.26	4.20
Máximo	2.05	12.10	2.44	6.70
Des. Estándar	0.03	0.79	0.05	0.88
varianza	0.00	0.63	0.00	0.78
Coef. De variación	1.45	7.34	2.10	17.08

Nota. Resultado de la máxima densidad seca y humedad del Proctor estándar

10. Resultados de densidad relativa Test Fil

Datos de la muestra		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Número de ciclos		4	6	8	10	12	14	16	18	20
01	Masa del agua de nivelación (g)	131818	130916	144830	132360	129775	126400	198145	157510	137223
02	Masa del agua del hoyo + marco (g)	784050	867621	723510	671643	635961	562306	705421	646921	665831
03	Temperatura del agua (°c)	16.00	15	16.00	16.00	16.00	16.00	15.00	16.00	16.00
04	Peso específico del agua (g/cm³)	999.03	999.03	999.03	999.03	999.03	999.03	999.03	999.03	999.03
05	Volumen de agua en el marco (cm³)	131.95	131.04	144.97	132.49	129.90	126.52	198.34	157.66	137.36
06	Volumen agua en el hoyo + marco cm³)	784.81	868.46	724.21	672.30	636.58	562.85	706.11	647.55	666.48
07	Volumen neto en el hoyo (cm³)	652.87	737.42	579.24	539.81	506.68	436.33	507.77	489.89	529.12
08	Masa húmeda del suelo extraído (g)	1449717	1655825	1365676	1316568	1240535	1088141	1274333	1262589	1357488
09	Masa húmeda part. sobredimensionadas (g)	327300	374120	422546	307242	302210	219670	211112	209082	270910
10	Masa húmeda de fracción de control (g)	1122417	1281705	943130	1009326	938325	868471	1063221	1053507	1086578
11	Peso esp. Part. Sobredim. (g/cm³)	2.570	2.570	2.570	2.570	2.570	2.570	2.570	2.570	2.570
12	Humedad de fracción de control (%)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
13	Humd de partículas sobredimensionada (%)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
14	Vol. de partículas sobredimensiona (cm³)	127.35	145.57	164.41	119.55	117.59	85.47	82.14	81.35	105.41
15	Volumen de fracción de control (cm³)	525.51	591.85	414.83	420.26	389.09	350.85	425.62	408.53	423.71
Cálculos del ensayo										

16	Densidad h. de la frac. de control (g/cm³)	2.136	2.166	2.274	2.402	2.412	2.475	2.498	2.579	2.564
17	Den. seca de la frac. de control (g/cm³)	2.015	2.043	2.145	2.266	2.275	2.335	2.357	2.433	2.419
18	Masa seca de la fracción de control (g)	1058884	1209156	889745	952194	885212	819312	1003038	993875	1025074
19	Masa seca de partículas sobred. (g)	325157	371671	419780	305231	300231	218232	209730	207713	269136
20	Masa seca de la muestra total (g)	1384041	1580826	1309525	1257425	1185444	1037544	1212768	1201588	1294210
21	% de partículas sobredim. (%)	23.5	23.5	32.1	24.3	25.3	21.0	17.3	17.3	20.8
22	Densidad h de la muestra total (g/cm³)	2.221	2.245	2.358	2.439	2.448	2.494	2.510	2.577	2.566
Resultados de prueba										
23	Humedad de la muestra total (%)	4.7	4.7	4.3	4.7	4.6	4.9	5.1	5.1	4.9
24	Densidad seca de la muestra total (g/cm³)	2.1	2.1	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.4
25	% de compactación alcanzado	87.5	88.5	93.3	96.2	96.6	98.2	98.6	101.3	101.0

Nota. Datos del ensayo, calculo y resultados de la prueba ASTM D-5030

11. Resultados de deformación de control topográfico.

Control topográfico de asentamientos vs ciclos de compactación																				
		Control topográfico de deformación vertical																		
		Numero de ciclos de compactación																		
Punto de control	Sector	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20
1	1	41	23	17	12	6	9	8	6	4	3	7	3	6	3	2	1	3	2	3
2	1	51	26	18	12	6	8	7	9	4	3	6	4	3	6	2	2	3	2	2
3	1	66	26	16	11	5	10	6	8	3	4	4	4	3	4	3	2	4	3	2
4	1	63	24	11	10	8	7	6	7	5	5	2	5	3	3	3	2	2	4	3
5	2	39	20	16	10	9	5	10	2	4	5	4	3	4	4	2	2	2	-	-
6	2	23	20	13	10	8	6	6	5	4	4	4	3	3	3	2	4	3	-	-
7	2	33	20	12	13	8	7	9	7	4	5	4	4	4	3	2	3	3	-	-
8	2	32	18	20	9	9	6	6	5	6	4	5	5	2	3	4	1	3	-	-
9	3	52	23	16	9	9	7	6	6	4	8	1	6	1	4	2	-	-	-	-
10	3	33	24	13	10	10	5	6	6	7	3	4	4	4	4	0	-	-	-	-
11	3	34	22	14	8	11	4	6	6	6	3	4	4	3	4	1	-	-	-	-
12	3	51	16	13	13	7	5	5	6	6	3	3	5	3	3	2	-	-	-	-
13	4	42	20	10	8	8	8	7	5	2	3	4	5	4	-	-	-	-	-	-
14	4	28	18	13	7	8	4	6	5	4	3	4	2	4	-	-	-	-	-	-
15	4	31	18	13	8	7	7	7	3	7	3	4	2	2	-	-	-	-	-	-
16	4	31	19	11	10	6	6	6	6	6	1	5	3	3	-	-	-	-	-	-
17	5	45	16	10	7	8	7	3	5	2	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-
18	5	20	12	15	4	10	5	3	6	1	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-
19	5	40	14	13	9	6	4	5	5	3	4	0	-	-	-	-	-	-	-	-
20	5	6	15	11	6	5	7	7	7	1	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-
21	6	31	14	14	4	7	3	4	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	6	12	15	12	7	5	5	5	3	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	6	37	17	10	13	6	3	7	2	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	6	33	16	11	8	6	5	6	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	7	20	10	3	9	6	1	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	7	20	12	10	5	6	6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	7	16	14	10	8	6	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	7	35	12	11	5	9	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	8	26	18	9	6	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	8	28	14	13	13	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	8	27	17	9	13	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	8	39	18	13	9	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	9	32	20	16	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	9	60	21	16	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	9	49	24	13	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	9	48	24	15	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Deformación promedio (mm)		35	18	13	9	7	6	6	5	4	4	4	4	4	3	3	3	2	2	2

Nota. Resumen de resultados de deformación vertical método topográfico,

APÉNDICE:

Matriz de consistencia del proyecto de investigación.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tema: METODOLOGIAS PARA DETERMINAR GRADOS DE COMPACTACION EN TEST FILL PARA TERRAPLENES DE PRESA CON GEOMATERIALES A CARACTERIZAR - ANTAPITE - HUANCAVELICA, 2024

TÍTULO	PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADOR
	GENERAL	**GENERAL**	**GENERAL**	**Dependientes**	
	¿Como se determinan las metodologías para grados de compactación para terraplenes de presa con geomateriales a caracterizar?	Determinar las metodologias para grados de compactacion en test fill para terraplenes de presa con geomateriales a caracterizar?	Las metodologías para determinar grados de compactación en test fill para terraplenes de presa con geomateriales a caracterizar – Antapite – Huancavelica 2024, es mediante las pruebas de densidad, deformaciones verticales, factor constante y número de ciclos de compactación.	Grados de compactacion	Porcentaje de Densidad del
				Independientes	
				1.- Geomateriales 2.- Metodologias	Limites de consist Humedad Granul predominan Proctor Deformacion
	ESPECÍFICOS	**ESPECÍFICOS**	**ESPECÍFICOS**		
Tema: METODOLOGIA PARA DETERMINAR GRADOS DE COMPACTACION EN TEST FILL PARA TERRAPLENES DE PRESA CON GEOMATERIALES A CARACTERIZAR	¿Cuáles son las metodologías medibles y reproducibles para determinar los grados de compactación en test fill para	Determinar Los grados de compactacion mediante las distintas metodologias medibles y reproducibles.	Los grados de compactacion se pueden determinar mediante las distintas metodologias que son medibles y reproducibles.	Grados de compactacion	Densidad máxima s Densidaes del test Deformacion vertic Factor constante de
	¿Cuáles son las características geotécnicas del geomaterial que influyen en su uso para terraplenes de presa?	Caracaterizar geotecnicamente los geomateriales para terraplenes de presa para su uso	La caracterización geotécnica indice del geomaterial en terraplenes de presa determinan su clasificacion y uso	Geomateriales	Contenido de Analisis limites de Atterber Gravedad Proctor estatandar
	¿Como se obtienen las densidades a distintos ciclos de compactación utilizando la norma ASTM D-5030 para calcular los grados de compactación?	Obtener mediante la aplicacion de la norma ASTM D-5030 las densidades a distintos ciclos de compactacion en test fill para su determinacion del grado de compactacion	La aplicacion de la norma ASTM D-5030 proporciona una metodología precisa y reproducible para obtener las densidades del suelo a diferentes ciclos de compactación en test fill, lo que permite una determinación confiable del grado	Metodologias (metodologia de aceptacion de la compactacion)	Densidad ASTM D 5030
	¿Cómo se OBTIENE las deformaciones verticales en el terraplén del test fill a medida que se incrementan los ciclos de compactación?	obtener las deformaciones verticales en el terraplen del test fill en los ciclos de compactación.	La obtención de deformaciones verticales en el terraplén durante los ciclos de compactación se obtienen mediante la integración de controles y métodos topográficos para determinar una metodología efectiva de grados de compactación,		Deformacion vertical mediante metodos topograficos
	¿Cómo se determina a partir los ciclos de compactación el factor constante de compactacion tiempo (FCC) necesario para obtener grados de compactación necesario?	Determinar, de los ciclos de compactacion el factor constante de compactacion tiempo (FCC) para obtener grados de compactacion necesario.	El grado de compactación de un suelo en terraplenes aumenta de forma directamente proporcional con el número de ciclos de compactación, donde se obtiene un factor constante constante de compactacion tiempo (FCC) a partir del área y tiempo empleado por ciclo de compactación y este representa una metodología para obtener grados de compactación, y obtener un grado de		FCC: Factor constante de compactacion (mediante un tiempo dado, area y velocidad constante