



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**RELACIÓN ENTRE LA REUTILIZACIÓN DE MATERIAL
COMPACTADO Y LOS PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN
DEL SUELO PROVENIENTE DE LA CANTERA CHALLAVILQUI
DEL DISTRITO DE PLATERÍA, 2021**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. HERBERTH DANIEL RAMOS POMA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO - PERÚ

2023



NOMBRE DEL TRABAJO

RELACIÓN ENTRE LA REUTILIZACIÓN DE MATERIAL COMPACTADO Y LOS PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN DEL SUELO

AUTOR

herberth daniel ramos poma

RECuento DE PALABRAS

22143 Words

RECuento DE CARACTERES

115850 Characters

RECuento DE PÁGINAS

121 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.0MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 10, 2023 3:36 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Aug 10, 2023 3:37 PM GMT-5

● **13% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 11% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

María A. García Loayza
C.I. 26223

Emilio Castillo Aroni
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 921514

Resumen



DEDICATORIA

A mi papá Bernardo que me enseñó a esforzarme para conseguir lo que quiero, me enseñó que todo es posible cuando uno quiere, fue ejemplo de vida en lo familiar y profesional y me inculcó grandes valores hasta el día que dejó el mundo terrenal.

A mi mamá Alejandra por hacerme fuerte desde pequeño y enseñarme la peculiaridad de la vida, por enseñarme que las personas pueden cambiar y ser tolerantes.

A mi hermana Cenaida por ser el mayor pilar de apoyo, sustento y ejemplo en mi vida, por darme ánimos constantes y preocuparse por mi día a día.

A mi hermana Danesa por ser mi mejor amiga y cómplice en todas mis locuras y empresas, por siempre confiar y preocuparse en mí.

A mis tres gatos, por demostrarme que el amor incondicional existe y siempre arrancarme una sonrisa cuando la necesité.

Sin ustedes todo esto no hubiera sido posible.

Herberth Daniel Ramos Poma



AGRADECIMIENTOS

A dios o el ser supremo que habita más allá de nuestra percepción humana, que nos observa e inspira, por darme el aliento de vida y la oportunidad de disfrutar de las maravillas que esta ofrece.

A mis jurados, Dr. Cesar Edwin Guerra Ramos, M. Sc. Samuel Laura Huanca e Ing. Gleny Zoila De La Riva Tapia por su guía y por darse el tiempo de revisar mi trabajo de investigación y estar al tanto de la situación de este.

A mi asesor M. Sc. Mariano Roberto García Loayza por todas las pautas, consejos brindados y honestidad a medida que realizaba este trabajo de investigación.

A la escuela profesional de Ingeniería Civil, a todos los docentes y personal de laboratorio que ayudaron a formarme como profesional, y en especial a la rama de geotecnia donde nació mi amor hacia la carrera.

A todas las personas que he conocido en este pequeño transcurso de mi vida y me transformaron en lo que soy hoy en día, quiero que sepan que todos ocupan un lugar en mi ser; agradezco el haber coincidido con ustedes.

Herberth Daniel Ramos Poma



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS¹⁴

RESUMEN 15

ABSTRACT..... 16

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 18

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 19

1.2.1 Problema general..... 19

1.2.2 Problemas específicos 19

1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 20

1.3.1 Hipótesis general 20

1.3.2 Hipótesis específicas 20

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO..... 20

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 21

1.5.1 Objetivo general 21

1.5.2 Objetivos específicos 21

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES 23

2.2 MARCO CONCEPTUAL 26

2.2.1 Cantera de suelo 26

2.2.2 Material de cantera o material natural..... 27

2.2.3 Compactación..... 27

2.2.4 Material reutilizado o recompactado..... 27

2.2.5 Ensayos de laboratorio 28



2.2.6	Ensayo de determinación de contenido de humedad	28
2.2.7	Ensayo de análisis granulométrico de suelos por tamizado	28
2.2.8	Ensayo de compactación proctor modificado	29
2.2.9	Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)	29
2.2.10	Afirmados.....	31
2.2.11	Requisitos y control de calidad en afirmados	32

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.....	36
3.2	PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO.....	36
3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO	37
3.3.1	Población.....	37
3.3.2	Elección de la población	38
3.3.3	Muestra del estudio	38
3.4	PROCEDIMIENTO.....	43
3.4.1	Muestreo.....	43
3.4.2	Ensayo de contenido de humedad	44
3.4.3	Ensayo de análisis granulométrico de suelo por tamizado.....	45
3.4.4	Ensayo de límites de Atterberg	48
3.4.5	Ensayo de Proctor Modificado.....	49
3.4.6	Ensayo de California Bearing Ratio (CBR).....	52
3.5	VARIABLES	55
3.5.1	Material compactado reutilizado (variable independiente).....	55
3.5.2	Parámetros de compactación (variables dependientes).....	56
3.5.3	Ecuación de relación (variable dependiente)	58
3.6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	60

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PROCTOR MODIFICADO	62
4.1.1	Fase de muestras patrón	63
4.1.2	Fase de primera reutilización	68
4.1.3	Fase de segunda reutilización.....	72



4.1.4	Fase de tercera reutilización.....	76
4.2	DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS DE PROCTOR MODIFICADO	80
4.2.1	Ensayos de Proctor Modificado - fase de muestras patrón	80
4.2.2	Ensayos de Proctor Modificado - fase de primera reutilización	83
4.2.3	Ensayos de Proctor Modificado - fase de segunda reutilización.....	86
4.2.4	Ensayos de Proctor Modificado - fase de tercera reutilización.....	89
4.2.5	Discusión general sobre los resultados de recompactación	92
4.3	RESULTADOS DE LAS ECUACIONES DE CORRELACIÓN	96
4.4	DISCUSIÓN DE LAS ECUACIONES DE CORRELACIÓN	105
4.4.1	Máxima densidad seca y número de reutilizaciones	105
4.4.2	Contenido de humedad óptimo y número de reutilizaciones	106
4.5	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CBR	106
4.6	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CBR	106
4.7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE GRANULOMETRÍA POST COMPACTACIÓN.....	108
4.8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN RESPECTO AL CONTROL DE CALIDAD	110
4.9	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS FISICOQUÍMICOS	111
4.10	RESUMEN DE RESULTADOS FINAL.....	111
V.	CONCLUSIONES.....	113
VI.	RECOMENDACIONES	116
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
ANEXOS	121

TEMA: Compactación de suelos para infraestructura vial

ÁREA: Geotecnia

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Geotecnia

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 18 de agosto de 2023



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Categorías de Subrasante con base al porcentaje de CBR.	31
Tabla 2	Gradación del material de afirmado.	32
Tabla 3	Ensayos y frecuencias destinado a la compactación.	34
Tabla 4	Datos básicos de la procedencia de la cantera.	37
Tabla 5	Listado de puntos de exploración realizados.	39
Tabla 6	Resumen de resultados porcentaje de humedad.	40
Tabla 7	Clasificación granulométrica.	42
Tabla 8	Resumen de los límites de Atterberg obtenidos.	42
Tabla 9	Juego de tamices recomendado.	47
Tabla 10	Especificación en la gradación para material destinado a afirmado.	48
Tabla 11	Cuadro resumen de nomenclaturas.	55
Tabla 12	Criterio de determinación de correlación entre variables.	60
Tabla 13	Resultado para la determinación del método de compactación.	62
Tabla 14	Alternativa de cálculo para el reemplazo en masa de partículas retenidas en el tamiz de 3/4 in para la compactación de especímenes de ensayo de Proctor para CBR y CBR.	63
Tabla 15	Resumen de los parámetros de compactación obtenidos para cada muestra patrón.	67
Tabla 16	Resumen de los parámetros de compactación obtenidos para cada muestra recompactada por primera vez.	71
Tabla 17	Resumen de los parámetros de compactación obtenidos para cada muestra recompactada por segunda vez.	75
Tabla 18	Resumen de los parámetros de compactación obtenidos para cada muestra recompactada por tercera vez.	79



Tabla 19	Resumen general de resultados de los ensayos de Proctor Modificado con sus incrementos de reutilización a reutilización.	93
Tabla 20	Resultados del ensayo CBR.	106
Tabla 21	Resultados de CBR característicos esperados después de tres reutilizaciones.	107
Tabla 22	Resultados granulométricos de las muestras después de las reutilizaciones.	108
Tabla 23	Comparativa de gradación para ensayo de Proctor Modificado y CBR. ...	109
Tabla 24	Requisitos de calidad y límites de control propuestos por la normativa peruana.	110
Tabla 25	Resultados de los ensayos fisicoquímicos.	111
Tabla 26	Resumen de propiedades perdidas.	112



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Ubicación política del lugar de estudio.....	36
Figura 2	Vista panorámica de la Cantera Challavilqui.....	37
Figura 3	Mapa de ubicación de los puntos de exploración.	39
Figura 4	Curva granulométrica de la Muestra Final (MF).	41
Figura 5	Comparativa de curvas granulométricas en un solo gráfico.	41
Figura 6	Distribución de golpes para el molde de seis pulgadas de diámetro.....	52
Figura 7	Curva de compactación del ensayo Proctor Modificado.	58
Figura 8	Curva de compactación MF ₁	64
Figura 9	Curva de compactación MF ₂	65
Figura 10	Curva de compactación MF ₃	65
Figura 11	Curva de compactación MF ₄	66
Figura 12	Curva de compactación MF ₅	67
Figura 13	Curva de compactación del ensayo MF ₁ R ₁	68
Figura 14	Curva de compactación del ensayo MF ₂ R ₁	69
Figura 15	Curva de compactación del ensayo MF ₃ R ₁	69
Figura 16	Curva de compactación del ensayo MF ₄ R ₁	70
Figura 17	Curva de compactación del ensayo MF ₁ R ₁	71
Figura 18	Curva de compactación del ensayo MF ₁ R ₂	72
Figura 19	Curva de compactación del ensayo MF ₂ R ₂	73
Figura 20	Curva de compactación del ensayo MF ₃ R ₂	73
Figura 21	Curva de compactación del ensayo MF ₄ R ₂	74
Figura 22	Curva de compactación del ensayo MF ₅ R ₂	75
Figura 23	Curva de compactación del ensayo MF ₁ R ₃	76
Figura 24	Curva de compactación del ensayo MF ₂ R ₃	77



Figura 25	Curva de compactación del ensayo MF ₃ R ₃	78
Figura 26	Curva de compactación del ensayo MF ₄ R ₃	78
Figura 27	Curva de compactación del ensayo MF ₅ R ₃	79
Figura 28	Curva de compactación total (CCT) para las muestras patrón.	81
Figura 29	Curva de compactación total corregida (CCTC) para las muestras patrón..	82
Figura 30	Compilado de curvas de compactación patrón MF ₁ a MF ₅	83
Figura 31	Curva de compactación total (CCT) para las muestras recompactadas por primera vez.....	84
Figura 32	Curva de compactación total corregida (CCTC) para las muestras recompactadas por primera vez.	85
Figura 33	Compilado de curvas para las muestras recompactadas por primera vez (MF ₁ R ₁ a MF ₅ R ₁)......	86
Figura 34	Curva de compactación total (CCT) para las muestras recompactadas por segunda vez.....	87
Figura 35	Curva de compactación total corregida (CCTC) para las muestras recompactadas por segunda vez.....	88
Figura 36	Compilado de curvas para las muestras recompactadas por segunda vez (MF ₁ R ₂ a MF ₅ R ₂)......	89
Figura 37	Curva de compactación total (CCT) para las muestras recompactadas por tercera vez.	90
Figura 38	Curva de compactación total corregida (CCTC) para las muestras recompactadas por tercera vez.	91
Figura 39	Compilado de curvas para las muestras recompactadas por tercera vez (MF ₁ R ₃ a MF ₅ R ₃)......	92
Figura 40	Comparativa de resultados Proctor Modificado.	95



Figura 41	Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₁	96
Figura 42	Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₁	97
Figura 43	Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₁	97
Figura 44	Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₂	98
Figura 45	Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₂	98
Figura 46	Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₂	99
Figura 47	Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₃	99
Figura 48	Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₃	100
Figura 49	Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₃	100
Figura 50	Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₄	101
Figura 51	Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₄	101
Figura 52	Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₄	102



Figura 53	Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₅	102
Figura 54	Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₅	103
Figura 55	Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF ₅	103
Figura 56	Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF corregida.	104
Figura 57	Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF corregida.	104
Figura 58	Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF corregida.	105
Figura 59	Fracturación de partículas en los especímenes.	109



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

MDS: Máxima Densidad Seca.

CHO: Contenido de Humedad Óptimo.

CBR: Relación de Soporte California.

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

AASHTO: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes.

MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

ASTM: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales.

MF: Muestra Final.

MF_i: Muestra Final “i”.

MF_iR_x: Muestra Final “i” recompactada por “x” vez.

CCT: Curva de Compactación Total.

CCTC: Curva de Compactación Total Corregida.

IP: Índice de Plasticidad.

LL: Limite Líquido.

LP: Limite Plástico.

R: Coeficiente de correlación de Pearson.

R²: Coeficiente de determinación.



RESUMEN

Las investigaciones sobre la prohibición de la reutilización de suelo previamente compactado son escasas y se desconocen razones académicas para su prohibición. Esta investigación se realizó con material granular de la cantera Challavilqui del distrito de Platería con el objetivo de evaluar y relacionar los efectos de la recompactación del suelo en mención con su Máxima Densidad Seca (MDS) y Contenido de Humedad Óptimo (CHO) del ensayo de Proctor Modificado (método C); con esta finalidad se realizaron veinte ensayos de Proctor Modificado comparativos entre un suelo patrón en estado de muestra natural y diversas muestras de suelo compactadas con anterioridad (hasta tres veces), analizando los cambios que sufre el suelo, principalmente en su MDS y CHO, para poder realizar la reutilización del suelo se preservaron las muestras previamente compactadas en bolsas de plástico herméticas y se hizo una simulación de escarificación manual. Los resultados obtenidos indican que a medida que se reutiliza el suelo la máxima densidad seca va en aumento llegando hasta un 4.6 % por reutilización y el contenido de humedad óptimo disminuye hasta un 9.3 % por reutilización, aunque esto aparentemente indique una mayor resistencia del suelo, los resultados demuestran que el CBR se reduce hasta un 41.56 % del CBR inicial; asimismo, se halla una correlación matemática lineal entre el número de reutilizaciones del material compactado “x” con cada uno de sus parámetros de compactación “y” (MDS y CHO), siendo esta correlación muy alta según los criterios de Cohen. Se concluye así que la reutilización de un suelo destinado como estructura de pavimento es un accionar perjudicial y desfavorable para la vida útil de una obra vial, ya que ataca directamente a su porcentaje de CBR y otras propiedades importantes.

Palabras clave: proctor modificado, recompactación, máxima densidad seca, óptimo contenido de humedad, ensayos.



ABSTRACT

Research on the prohibition of the reuse of previously compacted soil is limited and the academic reasons for its prohibition are unknown. This research was carried out on granular material from the Challavilqui quarry in the Platería district with the objective of evaluating and relating the effects of the recompaction of the soil in study with its Maximum Dry Density (MDS) and Optimal Moisture Content (CHO) of the test of Modified Proctor (by using method C); For this purpose, twenty comparative Modified Proctor tests were carried out between a standard soil in the state of a natural sample and various previously compacted soil samples (up to three times), analyzing the changes suffered by the soil, mainly in its MDS and CHO, in order to carry out the reuse of the soil, the previously compacted samples were preserved in hermetic plastic bags and a simulation of manual scarification was carried out. The results obtained indicate that as the soil is reused, the maximum dry density increases, reaching up to 4.6% for reuse and the optimum moisture content decreases to 9.3% for reuse, although this apparently indicates a greater resistance of the soil. the results show that the CBR is reduced to 41.56% of the initial CBR; Likewise, a linear mathematical correlation is found between the number of reuses of the compacted material "x" with each of its compaction parameters "y" (MDS and CHO), this correlation being very high according to Cohen's criteria. Thus, it is concluded that the reuse of a soil destined as a pavement structure is a detrimental and unfavorable action for the useful life of a road work, since it directly attacks its percentage of CBR and other important properties.

Keywords: modified proctor, recompaction, maximum dry density, optimal moisture content, testing.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación titulado “Relación entre la reutilización de material compactado y los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021” se realizó con el propósito de analizar la relación existente entre la reutilización de los suelos con sus parámetros de compactación, los cuales son la base para la correcta ejecución de cualquier obra vial, así como proponer como solución una ecuación que relacione estas variables y poder predecir sus efectos a largo plazo. Esta tesis desarrolla y explica la relación que existe entre la reutilización de los suelos con sus parámetros de compactación en cuatro capítulos principales estructurados de manera secuencial, finalizando con las conclusiones, recomendaciones y anexos.

Este primer capítulo abarca netamente el planteamiento del problema de investigación, formulación de hipótesis, su justificación y finalmente los objetivos que se seguirán. En el segundo capítulo refiere a todas las bases teóricas consultadas para la realización de este trabajo; partiendo por los antecedentes y llegando hasta los marcos teóricos y conceptuales necesarios para comprender el trabajo. El capítulo tres desarrolla los materiales y metodología empleados para llegar a los resultados, en este capítulo se podrá ver la ubicación y procedencia del material utilizado, así como los procedimientos seguidos en campo, laboratorio, y gabinete. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos, que para esta investigación son principalmente resultados de ensayos de laboratorio; también se realiza el análisis de estos y se presentan las ecuaciones que relacionan a las variables de estudio. Finalmente, el estudio termina con las conclusiones a las que se llega, en base a los objetivos planteados y las recomendaciones pertinentes.



1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Perú es un país en vías de desarrollo, en tal sentido el gobierno central destina grandes cantidades de presupuesto para la construcción de infraestructura vial, estando el sector transporte dentro de los 3 primeros sectores priorizados en los últimos 5 años (Alcalá & Cuadros, 2021). Durante la construcción de una obra vial se realiza un movimiento de tierras exorbitante, principalmente para la conformación del terraplén y la capa de afirmado, el cual debe cumplir y si es posible superar los estándares establecidos por la normativa actual.

Para llevar el control de calidad durante la ejecución de una obra vial se realizan ensayos de laboratorio, los cuales establecen los estándares mínimos que deberían tener los diferentes componentes de la estructura vial. Los ensayos de laboratorio muchas veces son desestimados en obra, pero se debe tener en cuenta que estos representan parámetros importantes de una obra e incluso toda la obra; ergo, se deben realizar de la manera más correcta posible y fieles a una estandarización nacional o internacional justificada con investigaciones científicas (Ulloa Calderón, Andrea, 2011).

La normativa vigente proporcionada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) prohíbe la reutilización de material previamente compactado, sin embargo, no brinda algún sustento científico para tal prohibición, y se verifica que a nivel nacional no existen investigaciones de este tema; esto produce que en algunos casos durante la ejecución de un proyecto vial, cuando la compactación no alcanza el control de calidad requerido, el personal responsable de la ejecución realice un escarificado en la última capa compactada para volver a recompactar o reutilizar este suelo, lo cual no siempre lleva a un resultado satisfactorio.



En tal sentido surge el interés por estudiar uno de los ensayos más importantes para la correcta ejecución de una obra vial, que es el ensayo de Proctor Modificado, el cual brinda los parámetros de compactación Contenido de Humedad Óptima y Máxima Densidad Seca, siendo estos la guía para un correcto control de calidad y profundizar en cómo es que la reutilización de material previamente compactado influye o se relaciona con estos parámetros mencionados.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

- ¿Cuál es la relación de la reutilización de material compactado con los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es el efecto de la reutilización de material compactado con la máxima densidad seca (MDS) del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021?
- ¿Cuál es el efecto de la reutilización de material compactado con el contenido de humedad óptimo (CHO) del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021?
- ¿Cuál es la relación entre la recompactación y los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021?



1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Hipótesis general

- a. La reutilización de material compactado incrementa los valores de los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021; debido al reacomodo de partículas y eliminación de espacios vacíos.

1.3.2 Hipótesis específicas

- a. La reutilización de material compactado incrementa el valor de la máxima densidad seca (MDS) del suelo compactado proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021; debido al reacomodo de partículas y eliminación de espacios vacíos.
- b. La reutilización de material compactado no influye en el contenido de humedad óptimo (CHO) del suelo compactado proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021; ya que se trata de una propiedad física y no mecánica.
- c. Existe una correlación entre el número de recompactaciones y la máxima densidad seca (MDS) del suelo compactado proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021; debido a que la MDS incrementa al igual que el número de recompactaciones.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El presente estudio tiene como propósito contribuir al conocimiento científico sobre la influencia que tiene el uso de un suelo recompactado en los parámetros de compactación obtenidos del ensayo de proctor modificado, en específico en los valores de máxima densidad seca (MDS) y contenido de humedad óptimo (CHO). Dichos



indicadores permitirán analizar y predecir el comportamiento de los suelos de cantera recompactados destinados a la conformación de estructura de un pavimento.

Los ensayos de laboratorio muchas veces son desestimados en obra, pero se debe tener en cuenta que son estos los que representan parámetros importantes de la obra e incluso toda la obra; ergo, se deben realizar lo más correctamente posible y fieles a una estandarización nacional o mundial, la cual es justificada con investigación científica. La normativa vigente proporcionada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) prohíbe la reutilización de material previamente compactado, sin embargo, no brinda algún sustento científico para tal prohibición; además a nivel local, nacional e internacional no se ha encontrado trabajos similares que aborden el tema de la recompactación de suelos, y en específico la relación entre la reutilización de material compactado y los parámetros de compactación del suelo. Si la situación continúa de esta manera se dará cabida a malas prácticas en laboratorios de mecánica de suelos; lo que busca este trabajo de tesis es explicar y relacionar la reutilización de material previamente compactado con los parámetros de compactación del suelo (CHO y MDS).

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo general

Determinar la relación entre la reutilización de material compactado y los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la reutilización de material compactado con la máxima densidad seca (MDS) del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021.



- Determinar el efecto de la reutilización de material compactado con el contenido de humedad óptimo (CHO) del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021.
- Establecer la relación entre la recompactación y los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, 2021.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

La compactación de suelos al ser un tema de vital importancia para la correcta ejecución de obras viales tiene diversos antecedentes. No sucede de la misma manera para la recompactación, por tanto, se compilan diferentes bibliografías que tratan ya sea el tema de recompactación o los parámetros de compactación.

Ahmad, Yamusa, & Bin (2018) estudiaron los efectos de la recompactación del suelo en la permeabilidad de suelos destinados como rellenos sanitarios. El trabajo tiene planteado como problema la alta permeabilidad de los rellenos sanitarios de ingeniería, causando así la contaminación del subsuelo; el objetivo principal es estudiar los efectos de la recompactación en la permeabilidad de un suelo laterítico y proporcionar antecedentes sobre la susceptibilidad del suelo laterítico al aplastamiento. Para la ejecución de esta investigación se hizo uso de suelo laterítico extraído a una profundidad de -1.0 m a -1.5 m del nivel de terreno natural de la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Tecnológica de Malaysia (UTM) en la ciudad de Johor; la metodología empleada fue de determinar las propiedades básicas del suelo en su estado natural mediante ensayos de laboratorio (compactación, granulometría, límites de Atterberg, y gravedad específica), luego realizar el ensayo de Proctor Estándar, recompactar agregando 5% de agua al suelo compactado, y finalmente el ensayo de permeabilidad, todos los ensayos realizados siguieron la normativa del Instituto Estándar Británico (BSI, 1990) salvo los ensayos de permeabilidad que siguieron la directiva del Manual de Head de Ensayos de Laboratorio de Suelos . Se proporciona como resultados que el valor de la permeabilidad del suelo estudiado recompactado (2.24×10^{-8} m/s) es menor



que la permeabilidad del suelo compactado (5.95×10^{-8} m/s), cuando ambos mantienen constante su óptimo contenido de humedad de moldeo (40%). Llegando a la conclusión de que las muestras recompactadas generalmente tuvieron una permeabilidad más baja que las muestras compactadas y que la trituración del suelo laterítico mediante recompactación produce un reordenamiento y reorientación en sus partículas.

El trabajo de investigación de tipo aplicada presentado por León Quiroz (2021) plantea como problema la escasa información que existe sobre la compactación y como esto afecta a la calidad final del proyecto ejecutado, siendo que estos presentan problemas de asentamientos, deslizamientos y otros; por lo que se propone como objetivo estudiar y analizar la influencia de la energía de compactación en el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima en el suelo granular de la cantera Agocucho, la cual se ubica en Cajamarca; el autor en mención ejecuta este estudio siguiendo la siguiente metodología: primero extracción de muestras, segundo realización de ensayos (análisis granulométrico, contenido de humedad, límites de plasticidad, peso específico, resistencia a la degradación y proctor modificado), obteniendo un contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima a medida que se aplicaban distintas energías de compactación, siguiendo el método C de proctor modificado. Se planteó la hipótesis de que, si se incrementa la energía de compactación, la densidad máxima aumenta y el contenido de humedad óptimo disminuye. León Quiroz llega al resultado de que la máxima densidad seca del suelo de la cantera Agocucho (1.98 g/cm^3) se presenta cuando se realizan 59 golpes en vez de los 56 que se habitúa; y que, si se aumentan más golpes, la densidad tiende a disminuir, lo cual significa que el suelo granular es propenso a fragmentarse en partículas más reducidas y esto explicaría una probable variabilidad en el contenido de humedad.



Melendez Leon (2017) en su trabajo plantea como problema el deficiente control de calidad en los terrenos de fundación de la estructura vial, causando así estructuras viales con diversos tipos de fallas e incluso riesgos de colapso; el objetivo principal es evaluar las diferencias en la aplicación de los métodos A, B y C del ensayo Proctor modificado en los agregados de las canteras Estrella, Pumpunya, Mitupampa – Chupuro –Huancayo. Para la ejecución de esta investigación se hizo uso de agregados de las canteras ubicadas en el distrito de Chupuro –Huancayo (Estrella, Pumpunya, Mitupampa) la metodología empleada fue de reconocimiento, elección de muestras, ensayos de laboratorio (granulometría, límites de Atterberg y proctor modificado), recolección de datos, evaluación y discusión (en la que se realiza una comparativa entre las curvas de compactación obtenidas por los diferentes métodos establecidos por el MTC para realizar el ensayo de proctor modificado) y finalmente elaboración de conclusiones. Obtuvieron como resultados que a medida que el número de golpes de cada ensayo aumentaba, el CHO (contenido de humedad óptimo) decrecía, no llegando a un patrón claro respecto a la DMS (densidad máxima seca), pero en su mayoría esta última decrecía también.

Yanapa Mamani (2019) realiza un estudio experimental – descriptivo en el cual plantea como problema la aplicación de una energía de compactación muy leve en los suelos gruesos de la estructura vial, causando así estructuras viales con diversos tipos de fallas y colapsos; el objetivo principal es determinar los efectos que produce la aplicación de mayor energía de compactación en el ensayo de Proctor Modificado en los suelos de las canteras de la ciudad de Juliaca. Los materiales utilizados son suelos granulares obtenidas de las canteras Taparachi, Isla y Yocara – Juliaca, siguiendo la siguiente metodología: obtención de muestras, ensayos de caracterización, ensayo de proctor modificado (aumentando la cantidad de golpes a cada capa compactada), teniendo como resultados que al aplicar 58 golpes por capa se llega a una energía de compactación



de 28.96 kg.cm/cm³, así como a un 100% de compactación; de conclusión final se obtuvo que el aumento de número de golpes o energía de compactación es algo positivo para el suelo.

Marron Machaca (2022) en su investigación perteneciente al tema de compactación de suelos arenosos profundiza en que la energía de compactación tiene un gran grado de influencia en la formación de la curva de compactación, haciendo que se produzca un doble pico en esta última. La metodología seguida fue de realizar muestreo de diferentes arenas de la región, caracterizarlas mediante ensayos básicos y luego se sometieron estas muestras a diferentes tipos de compactación (el martillo de compactación para cada tipo variaba), adicionalmente aplicó una prueba de crushing. El autor también establece una relación entre la compactación hecha en laboratorio y la compactación hecha en campo (en específico los ensayos de Proctor Modificado). El trabajo de investigación llega a la conclusión de que la formación de dos picos en la curva de compactación se debe principalmente a la energía de compactación y granulometría del material ensayado; en adición, el autor en una de sus conclusiones menciona que el método de compactación al cual fue sometida la muestra es muy influyente al momento de hallar los parámetros de compactación.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Cantera de suelo

Conjunto o depósito de material granular en lo posible del mismo tipo, uniforme y extenso de tal manera que permita su explotación, para diferentes áreas, principalmente la constructiva, usualmente se aplica un método de explotación no controlado, y que implica el uso de palas cargadoras, volquetes y otras maquinarias de movimiento de tierras (Herrera Herbert & Pla Ortiz de Urbina, 2006).



2.2.1.1 Muestra

Porción representativa del material de cantera, su tamaño y tipo depende del uso que se le dará más adelante, las cuales estarán supeditadas al ensayo de laboratorio a realizar. Se pueden obtener muestras de calicatas, perforaciones, trincheras y otros apropiados según el terreno natural encontrado (MTC, 2016).

2.2.2 Material de cantera o material natural

Se denomina como tal a todo material granular proveniente de la cantera o excavación en cuestión, de manera que no ha sido utilizado para ningún otro ensayo, uso o fin previo al que será sometido, se utiliza este material para establecer todos los resultados base (Quintero Esquivel, 2017).

2.2.3 Compactación

Para Saborio Ulloa (1995) la compactación es el aumento artificial del peso volumétrico seco de un suelo, al que se llega por medios mecánicos, este aumento se alcanza a costa de la disminución de los vacíos del suelo en cuestión, ya que se logra un mejor acomodo de las partículas que los constituyen, mediante la eliminación del aire y/o agua del material granular.

2.2.4 Material reutilizado o recompactado

Según Munkholm et al. (2005) es suelo aflojado por un proceso mecánico y que es propenso a la recompatación debido a que tiene poca resistencia, lo que explica que sus propiedades físicas se vean alteradas.

Ahmad et al. (2018) definen este concepto como un material que no ha sido desechado, en cambio este se ha desmenuzado lo más posible manualmente para su uso futuro y que al ser un material recuperado se prevé que este ha sufrido algún cambio físico en su estructura.



2.2.5 Ensayos de laboratorio

Para Sfriso (2021), la ejecución de ensayos de laboratorio permite obtener las medidas de propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de suelos mediante la utilización de técnicas prácticas; con el fin de entender el comportamiento de los suelos.

Los ensayos de laboratorio de suelos y materiales permiten obtener parámetros y propiedades estandarizadas, asegurando así un comportamiento de calidad al momento de su uso (MTC, 2016).

2.2.6 Ensayo de determinación de contenido de humedad

La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales o más conocida como ASTM por sus siglas en inglés del nombre American Society for Testing and Materials (2019) define a la determinación de contenido de humedad como “La razón, expresada en porcentaje, de la masa del agua contenida en los poros, o agua libre, en una masa dada de material con respecto a la masa del material sólido. Utilizando una temperatura estándar de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ para determinar estas masas”.

2.2.7 Ensayo de análisis granulométrico de suelos por tamizado

La ASTM (2016) en su norma D422 indica que el ensayo de análisis granulométrico de suelos por tamizado permite cuantificar la distribución de tamaños de las partículas del suelo, y determinar los porcentajes de suelos que pasan por diversos tamices empleados.

Consiste en pasar una muestra de suelo lavada por la malla N° 200 y secada al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ a través de una serie de mallas de dimensiones estandarizadas a fin de determinar las proporciones relativas de los diversos diámetros de las partículas.



2.2.8 Ensayo de compactación proctor modificado

En las palabras de Hohn et al. (2022) el ensayo de proctor modificado es un ensayo de laboratorio que consume mucho tiempo y que tiene como fin determinar la densidad seca máxima de un suelo y el contenido de humedad óptimo necesario para alcanzar esta densidad, definiendo a estos como los parámetros de compactación del suelo.

El ensayo de proctor modificado es similar al de proctor estándar, solo variando la capacidad del molde y el peso del martillo que cae sobre la muestra en el ensayo de proctor modificado se toman varias medidas de humedad y densidad del interior del molde con distintos grados de humedad para trazar la “curva Proctor” y de este modo dar por concluida la prueba Proctor Modificado (ASTM, 2021).

2.2.8.1 Contenido de humedad óptimo

Es el contenido de humedad en el que la cantidad de agua dentro del suelo actúa como un lubricante y material que activa la unión de partículas en el suelo. El suelo compactado atrapa la menor cantidad de vacíos en forma de aire, haciendo así que al momento de estar seco tenga la mayor cantidad de masa posible (Chirinos Quispe, 2016).

2.2.8.2 Máxima densidad seca

Es la densidad máxima que puede alcanzar el material granular, siendo así que la cantidad de espacios vacíos dentro de este suelo sea mínima (Chirinos Quispe, 2016).

2.2.9 Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)

“El objetivo del ensayo de CBR es determinar la máxima resistencia que tiene un suelo siendo este sometido a esfuerzos cortantes, a la vez de asignar una calidad aproximada del suelo para ser usado como material de estructura vial, tal como afirmado, sub-rasante, sub-base o base de pavimentos.” (Cajo, 2015). El resultado del ensayo de



CBR se expresa en porcentaje, pasando por todo un procesamiento de datos previo al cálculo de este porcentaje.

2.2.9.1 Selección de muestra para CBR

Tal como indica el manual de ensayos del MTC (2016) se debe cumplir lo siguiente:

Si todo el material pasa el tamiz de 19mm (3/4”), toda la graduación deberá usarse para preparar las muestras a compactar sin modificación. Si existe material retenido en el tamiz de 19 mm (3/4”), este material deberá ser removido y reemplazado por una cantidad igual de material que pase el tamiz de 3/4 de pulgada (19 mm) y sea retenido en el tamiz N° 4 obtenido por separación de porciones de la muestra no de otra forma usada para ensayos.

2.2.9.2 Porcentaje de CBR

Para Cajo (2015) el porcentaje de CBR es obtenido como un porcentaje del esfuerzo requerido para hacer penetrar un pistón una profundidad de 0.1 pulgadas en una muestra de suelo y el esfuerzo requerido para hacer penetrar el mismo pistón, la misma profundidad de 0.1 pulgadas, en una muestra patrón de piedra triturada. El porcentaje de CBR se encuentra referido al 95% de la MDS del suelo en estudio (MTC, 2014).

2.2.9.3 Categorías de CBR como subrasante

Según el MTC (2014) en la Sección de Suelos y Pavimentos del Manual de Carreteras se puede establecer hasta seis categorías de subrasante en función de su CBR, se presenta lo mencionado en la Tabla 1.



Tabla 1

Categorías de Subrasante con base al porcentaje de CBR.

Categorías de Sub rasante	CBR
S ₀ : Sub rasante inadecuada	CBR < 3%
S ₀ : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% a CBR < 6%
S ₀ : Sub rasante regular	De CBR ≥ 6% a CBR < 10%
S ₀ : Sub rasante buena	De CBR ≥ 10% a CBR < 20%
S ₀ : Sub rasante muy buena	De CBR ≥ 20% a CBR < 30%
S ₀ : Sub rasante excelente	CBR ≥ 30%

Nota: Extraído del Manual de Carreteras – Sección Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC (2014).

2.2.10 Afirmados

El MTC (2014) define un afirmado como una carretera no pavimentada que cuenta con un revestimiento granular, y en general posee bajo volumen de tránsito y un número de repeticiones de Ejes Equivalentes de hasta 300 000 EE en un periodo de diez años; el afirmado se considera como una mezcla de tres tamaños o tipos de materiales: piedra, arena y arcilla. Existen cuatro afirmados principales, explicados y clasificados de la siguiente manera:

- a) Carreteras de tierra constituidas por suelo natural y mejorado con grava seleccionada por zarandeo y finos ligantes.
- b) Carreteras gravosas constituidas por una capa de revestimiento con material natural pétreo sin procesar, seleccionado manualmente o por zarandeo, de tamaño máximo de 75 mm.



c) Carreteras afirmadas constituidas por una capa de revestimiento con materiales de cantera, dosificadas naturalmente o por medios mecánicos (zarandeo), con dosificación especificada, compuesta por una combinación apropiada de tres tamaños o tipos de material: piedra, arena y finos o arcilla, siendo el tamaño máximo 25 mm. Pudiendo ser estos: Afirmados con gravas naturales o zarandeadas, o Afirmados con gravas homogenizadas mediante chancado.

d) Carreteras con superficie de rodadura tratada con materiales industriales:

d.1 Afirmados con superficie tratada para el control de polvo, con materiales como: cloruros, aditivos, productos asfálticos (imprimación reforzada o diferentes o diferentes tipos de sello asfáltico), cemento, cal u otros estabilizadores químicos.

d.2 Suelos naturales estabilizados con: emulsión asfáltica, cemento, cal, cloruros, geosintéticos y otros aditivos que mejoren las propiedades del suelo.

2.2.11 Requisitos y control de calidad en afirmados

2.2.11.1 *Respecto al material*

El material destinado para la construcción de una vía de afirmado debe cumplir ciertos requisitos, establecidos por el MTC (2013), según se indica: las partículas de los agregados deben ser duras, durables y resistentes, se debe cumplir alguna de las gradaciones indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2

Gradación del material de afirmado.

Tamiz	Porcentaje que pasa					
	A-1	A-2	C	D	E	F
50 mm (2")	100					
37.5 mm (1 ½")	100					



Tamiz	Porcentaje que pasa					
	A-1	A-2	C	D	E	F
25 mm (1")	90 – 100	100	100	100	100	100
19 mm (3/4")	65 – 100	80 - 100				
9.5 mm (3/8")	45 – 80	65 - 100	50 - 85	60 – 100		
4.75 mm (N° 4)	30 – 65	50 - 85	35 – 65	50 – 85	55 - 100	70 – 100
2.00 mm (N° 10)	22 – 52	33 - 67	25 – 50	40 – 70	40 - 100	55 – 100
425 µm (N° 40)	15 – 35	20 - 45	15 – 30	25 – 45	20 - 50	30 - 70
75 µm (N° 200)	5 – 20	5 - 20	5 - 15	5 - 20	6 - 20	8 - 25

Nota: Adaptado de “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” – MTC (2013)., con fuente AASHTO M-147.

Además el material debe cumplir con cuatro requisitos de calidad más, que son:

- Límite Líquido: 35% máx. (directivas del MTC E 110)
- Índice de Plasticidad: 4-9% (directivas del MTC E 111)
- CBR: 40% mín. (directivas del MTC E 132); referido al 100% de la Máxima Densidad Seca y una Penetración de Carga de 0,1” (2,5 mm).
- Desgaste Los Ángeles: 50% máx. (directivas del MTC E 207)

2.2.11.2 *Respecto a la compactación*

“De cada procedencia de los materiales granulares a utilizarse, y para cualquier volumen previsto se tomarán cuatro (04) muestras para los ensayos y frecuencias que se indican en la Tabla 3” (MTC, 2013).

Tabla 3*Ensayos y frecuencias destinado a la compactación.*

Tipo de ensayo	Metodología	Norma ASTM	Norma AASHTO	Frecuencia	Lugar de muestreo
Granulometría	MTC E 204	C 136	T27	1 cada 750 m ³	Cantera
Límites de consistencia	MTC E 111	D4318	T89	1 cada 750 m ³	Cantera
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	T96	1 cada 2000 m ³	Cantera
CBR	MTC E 132	D 1883	T193	1 cada 2000 m ³	Cantera
Densidad-Humedad	MTC E 115	D 1557	T180	1 cada 750 m ²	Pista
Compactación	MTC E 117	D 1556	T191	1 cada 250 m ²	Pista
	MTC E 124	D 2922	T238		

Nota: En caso no se llegue a cumplir las frecuencias mínimas especificadas, se exigirá como mínimo un ensayo por cada propiedad o característica. Todo el material de cantera debe estar preparado previo a su uso.

2.2.11.3 Validación de los resultados de los ensayos

El MTC (2013) en su publicación “Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013” indica que las vías de afirmado terminadas deben “presentar una superficie uniforme y ajustarse a las dimensiones, rasantes y pendientes establecidas en el Proyecto”; además se deberán hacer comprobaciones para tres características principales del afirmado: compactación, espesor y rugosidad.

- Compactación, se realizarán los ensayos presentados en la Tabla 3 para determinar la densidad de la capa de afirmado (MTC E 117 y MTC E 124), como mínimo deberá haber 6 determinaciones de densidad, las zonas para estas mediciones serán escogidas de manera aleatoria, dichas densidades



individuales deben ser como mínimo el 100% de la MDS obtenida en el ensayo de Proctor Modificado de referencia (que sigue las directivas del MTC E 115); se debe cumplir también que la humedad de trabajo no debe variar en un $\pm 2.0\%$ con respecto al CHO obtenido en el ensayo ya mencionado. En caso de incumplir estas directivas, se rechazará el tramo.

- El espesor medio de la capa de afirmado no puede ser menor al espesor de diseño, conjuntamente que cada espesor individual debe ser como mínimo el 95% del espesor de diseño planteado; en caso de incumplir esta directiva, se rechazará el tramo.
- La rugosidad de la superficie afirmada se mide en unidades IRI, y no debe ser superior a 5 m/km.

CAPITULO III

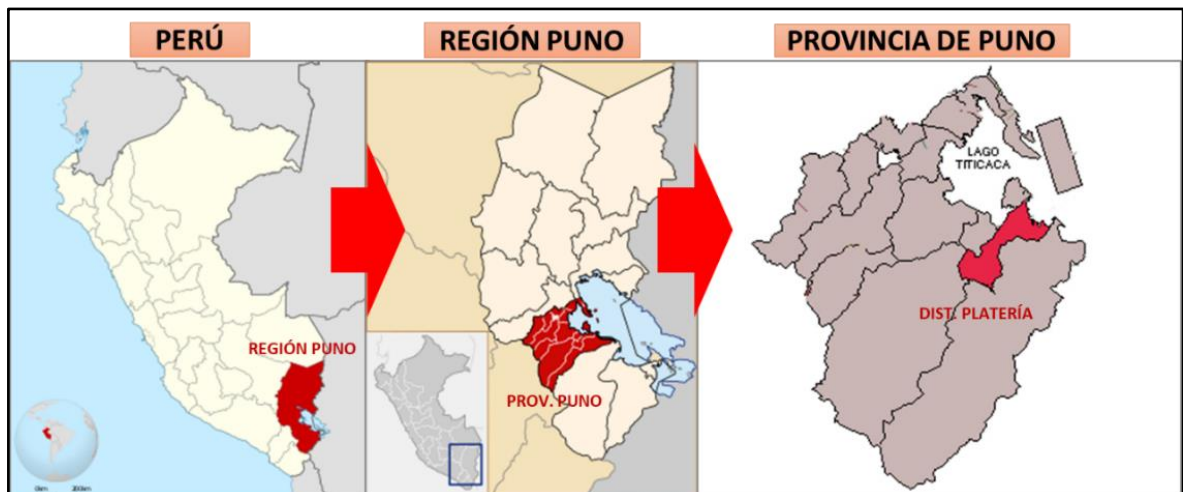
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en la Cantera Challavilqui del distrito de Platería, provincia de Puno, región de Puno, Perú. El siguiente esquema (Figura 1) muestra a detalle la ubicación política del estudio.

Figura 1

Ubicación política del lugar de estudio.



3.2 PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO

El material granular utilizado en este trabajo de investigación fue extraído de la Cantera Challavilqui del distrito de Platería, provincia de Puno, región de Puno, Perú. Se encuentra ubicado en las coordenadas indicadas en la Tabla 4. La Figura 2 muestra una vista panorámica de la Cantera en estudio.

Tabla 4

Datos básicos de la procedencia de la cantera.

Descripción	Potencia (m³)	Coordenadas de Ubicación (UTM WGS 84 Zona 19S)	Vía de acceso
Ingreso a la Cantera Challavilqui	16250	8234586 N 406535 E	PU 1106 (Trocha carrozable Platería Carucaya)

Figura 2

Vista panorámica de la Cantera Challavilqui.



3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

3.3.1 Población

La población correspondiente al trabajo de investigación realizado es todo el material granular que la Cantera Challavilqui permite explotar, en otras palabras, la potencia de la cantera; este cálculo se presenta en el Anexo 3.



3.3.2 Elección de la población

La población de estudio fue seleccionada mediante un mecanismo de comparación y descarte, en donde se evaluaron diferentes canteras de la provincia de Puno, siendo la Cantera Challavilqui del distrito de Platería la que más se adecuaba a las propiedades requeridas para esta investigación (ver Anexo 6); frente a las otras dicha cantera poseía una granulometría más uniforme y presentaba a simple inspección ocular una mezcla de agregados gruesos con material ligante uniforme, de la misma manera la cantidad de material disponible para explotación (potencia) era considerable, su ubicación también jugó un papel muy importante para su elección, ya que se encontraba muy próxima a ciudades que ejercen un movimiento económico importante, a nivel turístico, comercial y otros: Platería, Acora, Luquina Chico, Chucuito y Puno. El factor económico fue uno de los últimos factores influyentes en la elección de esta cantera, debido a las cantidades de material explotado, transporte y su accesibilidad respectiva. La cantera Challavilqui se encontraba más próxima al Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales LA-702 de la EPIC UNAP, donde se ejecutaron todos los ensayos indicados en la sección de procedimiento de este texto de investigación.

3.3.3 Muestra del estudio

La muestra de estudio que se utilizó fue una porción representativa de la cantera, esta porción se conformó mediante el muestreo de cuatro puntos representativos y en la medida posible equidistantes uno de otro, para así tener una muestra global. Esto se realizó tomando de referencia el Manual de Carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos. La Tabla 5 indica los puntos de exploración con sus coordenadas UTM respectivas, la Figura 3 muestra la ubicación de los puntos de muestreo.

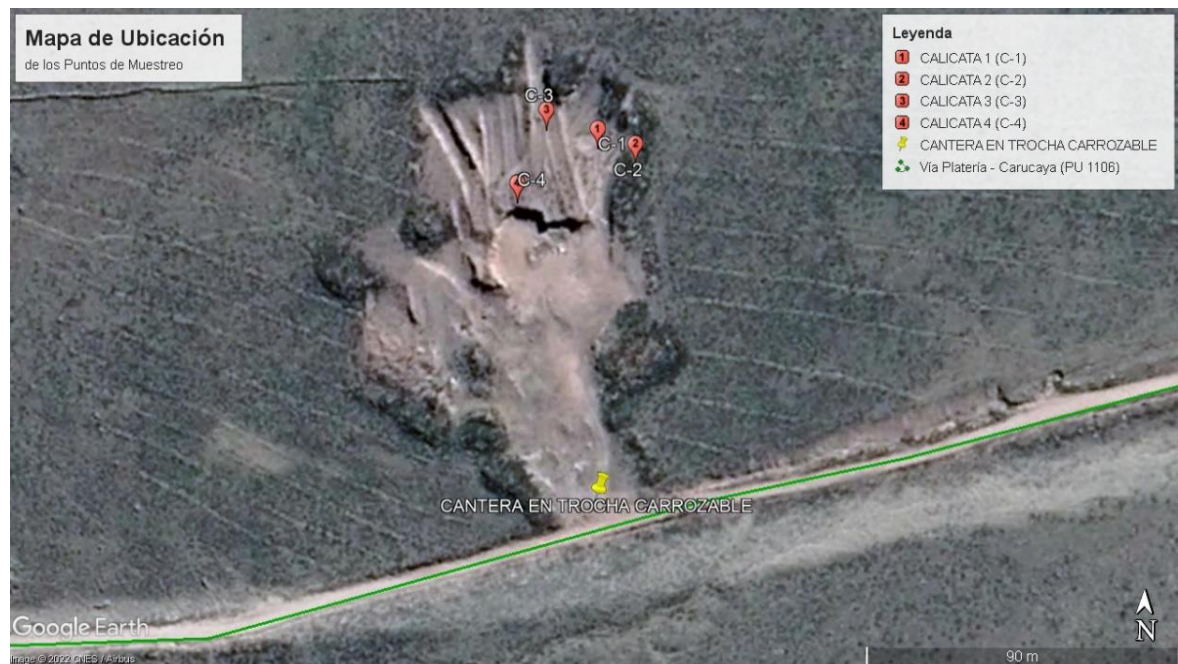
Tabla 5

Listado de puntos de exploración realizados.

Nombre	Nomenclatura	Coordenadas de Ubicación (UTM WGS 84 Zona 19S)	
		Norte	Este
Calicata 1	C-1	8234688	406533
Calicata 2	C-2	8234684	406544
Calicata 3	C-3	8234693	406518
Calicata 4	C-4	8234672	406510

Figura 3

Mapa de ubicación de los puntos de exploración.



Nota: Elaboración Propia. Programa de computador utilizado: Google Earth.

3.3.3.1 Contenido de humedad

En la Tabla 6 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de contenido de humedad, el cual se aplicó a los puntos explorados en la cantera, para tener noción de su humedad natural promedio, cabe resaltar que se hizo la extracción de muestra en el mes



de marzo de 2022, época de precipitaciones moderadas en la zona; el día de la toma de muestra y el anterior a este no se registraron precipitaciones pluviales en la cantera.

Tabla 6

Resumen de resultados porcentaje de humedad.

Punto de muestreo	Porcentaje de humedad promedio
C1	24.54 %
C2	21.97 %
C3	26.69 %
C4	22.57 %
Promedio	23.94 %

3.3.3.2 Granulometría

En el Anexo 2, en los resultados de los ensayos de laboratorio se muestran los resultados de las curvas granulométricas de cada calicata desde la 1 hasta la 4, la Figura 4 muestra la curva granulométrica de la muestra en conjunto (muestra final), que lleva por nomenclatura MF, por último, la Figura 5 muestra todas las curvas granulométricas en un solo gráfico. Cabe resaltar que en todas las curvas granulométricas se encuentran las “franjas granulométricas” que indican los mínimos y máximos porcentajes que deberían ser retenidos en los tamices correspondientes explicados en la metodología.

Figura 4

Curva granulométrica de la Muestra Final (MF).

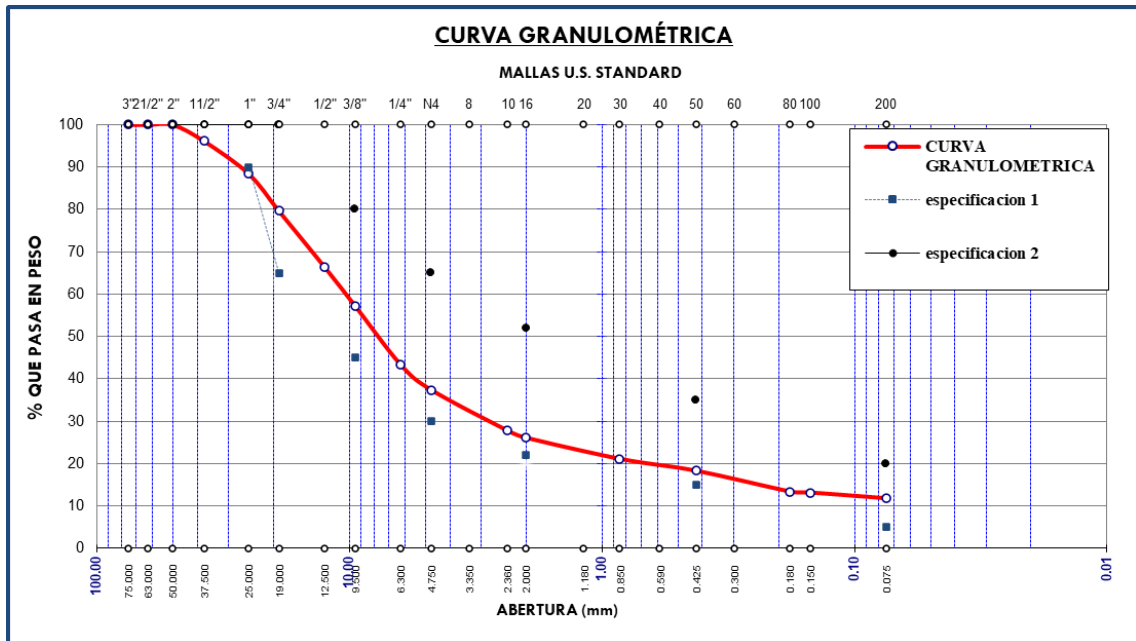
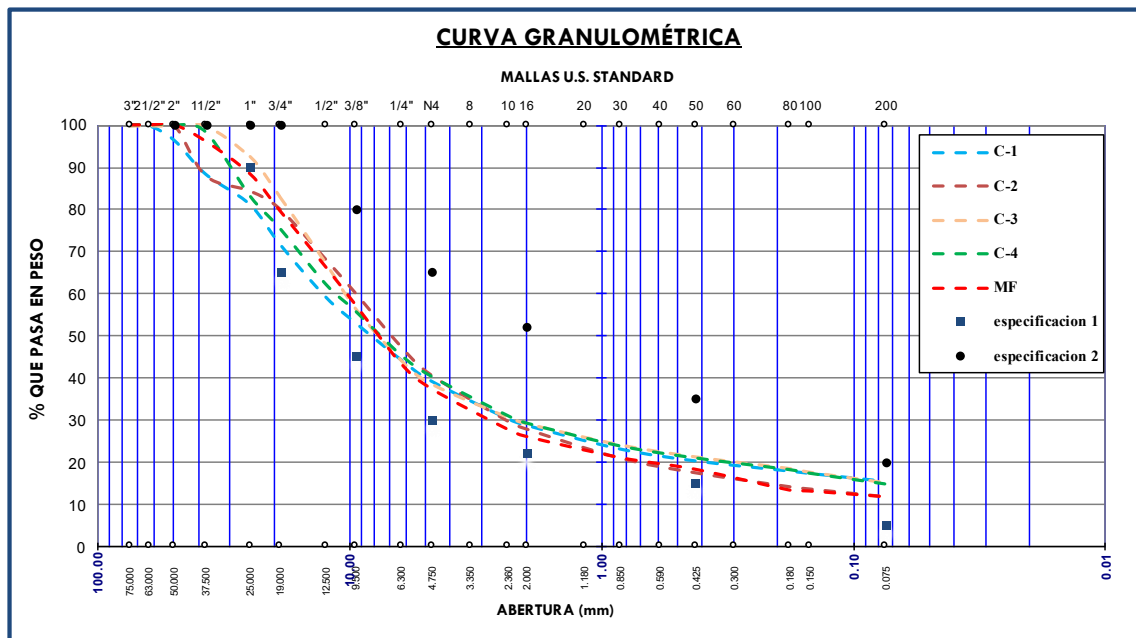


Figura 5

Comparativa de curvas granulométricas en un solo gráfico.



Según estos gráficos y el procesamiento en hojas de Excel (véase Anexo 2), se realiza la clasificación granulométrica de las diferentes muestras ensayadas. El resumen

de la clasificación granulométrica por los métodos SUCS y AASHTO obtenida para cada muestra se expone en la Tabla 7.

Tabla 7

Clasificación granulométrica.

Calicata	Clasificación		% Grava	% Arena	% Finos
	SUCS	AASHTO			
C-1	GM (Grava Limosa)	A-1-b (0)	60.64	23.79	15.56
C-2	GP-GM (Grava Limosa Mal Gradada)	A-2-4 (0)	59.23	28.80	11.97
C-3	GM (Grava Limosa)	A-2-4 (0)	61.30	23.44	15.26
C-4	GP-GM (Grava Limosa Mal Gradada)	A-2-4 (0)	59.57	25.47	14.97
MF	GP-GM (Grava Limosa Mal Gradada)	A-2-4 (0)	62.59	25.62	11.79

3.3.3.3 Límites de Atterberg

Al ser suelos que contienen materiales finos y plásticos, se realizan los ensayos de Límites de Atterberg, que son mostrados en la Tabla 8. Como se aprecia no existen diferencias de gran proporción de calicata a calicata ni en la muestra final, siendo la muestra final de plasticidad media.

Tabla 8

Resumen de los límites de Atterberg obtenidos.

Calicata	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)	Plasticidad
C-1	31.21	26.03	5.19	Baja



Calicata	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)	Plasticidad
C-2	31.87	25.76	6.11	Baja
C-3	34.44	26.29	8.15	Media
C-4	36.77	29.75	7.02	Media
MF	38.67	30.26	8.40	Media

Nota: Según las especificaciones técnicas del MTC (2013) el índice de plasticidad (IP) debe oscilar de 4 % a 9 % en materiales granulares destinados a la conformación de afirmados.

3.4 PROCEDIMIENTO

3.4.1 Muestreo

3.4.1.1 Equipos y materiales

- **Pico, pala y barreta:** elementos básicos, necesarios y útiles para realizar extracción y movimiento de tierras.
- **Bolsas plásticas herméticas y sacos:** estos elementos fueron utilizados para almacenar el material granular, las bolsas plásticas herméticas se utilizaron para las muestras destinadas a ensayos de contenido de humedad.
- **Malla metálica con abertura de 3 pulgadas:** elemento utilizado para hacer una selección previa del material granular y no cargar con excesos.
- **Lona:** utilizada para realizar el cuarteo a pie de cantera y poder seleccionar material representativo de cada punto de extracción.
- **Retroexcavadora:** maquinaria que consiste en una pala en la parte frontal y un cucharón excavador en la parte trasera, utilizada para



excavaciones y movimiento de tierras debido a su versatilidad. En el presente estudio ayudó en la ejecución de calicatas.

3.4.1.2 Procedimiento

Se realizó siguiendo lo expuesto en la norma MTC E 101, con algunas consideraciones, tales como: primero se determinaron los puntos en donde existía una diferencia del material granular, ya sea por el color, forma o gradación visual que se presentaba, esto debido a que en condiciones de ejecución de obra el movimiento de tierras es basto y no se extrae el material de cantera en un solo punto, calicata o coordenada. Establecidos los puntos de muestreo se procedió con la ejecución de calicatas con ayuda de una retroexcavadora, llegando hasta una profundidad promedio de un metro y medio, en dicha profundidad se realizó la extracción del material granular; primero se separó una muestra considerable para realizar el ensayo de humedad almacenándola herméticamente, luego se extrajo la muestra para los ensayos principales, tamizando antes este material por una malla de abertura cuadrada de tres pulgadas de lado, para tener un material más seleccionado tal como indica el MTC (2013), en donde para la conformación de una estructura vial se desestiman los materiales con diámetro mayor a dos pulgadas.

Toda la muestra extraída y seleccionada fue trasladada al laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano, en donde se procedió con la realización de los ensayos correspondientes y desarrollados a continuación.

3.4.2 Ensayo de contenido de humedad

3.4.2.1 Equipos y materiales

- **Recipientes o taras:** objeto que tiene como fin contener algún material, para este estudio se utilizaron recipientes metálicos capaces de soportar



temperaturas elevadas ($110 \pm 5^\circ \text{C}$) y ser capaces de contener hasta 1.5 kg de muestra de suelo.

- **Balanza de precisión:** Instrumento de medición de peso exacto con una capacidad de hasta 600g. y una precisión de 0.01g, calibrada por el laboratorio correspondiente.
- **Horno:** Aparato que emite ondas de calor para secar materiales. El horno se calibró a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$.

3.4.2.2 Procedimiento

Las muestras extraídas en cantera, seleccionadas para el ensayo de humedad y reservadas herméticamente fueron abiertas, para realizar el control de humedad según la norma MTC E 108 del Manual de Ensayo de Materiales. De cada muestra se extrajeron 3 kilogramos aproximadamente de muestra, la cual fue distribuida equitativamente en 3 taras previamente etiquetadas, pesadas y registradas, se hizo el registro de los pesos de la tara más suelo húmedo e inmediatamente después se llevaron las muestras al horno. Después de 16 horas, al ver que el peso seco era constante se hizo el control de peso, para luego ser procesado en gabinete.

3.4.3 Ensayo de análisis granulométrico de suelo por tamizado

3.4.3.1 Equipos y materiales

- **Tamices:** Recipientes de con mallas en su base, de diferentes gradaciones que acumulan el material que no pasa a través de sus aberturas. El material de estos recipientes es bronce pulido y lacado con mallas de acero inoxidable, deben ser manufacturados siguiendo la norma ASTM E11, con un diámetro de 8 pulgadas y una altura de 2 pulgadas de profundidad hasta la malla.



- **Bandejas:** Recipientes metálicos para realizar el pesaje de material granular.
- **Balanza de precisión:** Instrumento de medición de peso exacto con una capacidad de hasta 600g. y una precisión de 0.01g, calibrada por el laboratorio correspondiente.
- **Brochas y escobillas metálicas:** Instrumentos utilizados para la limpiar los tamices sin dañarlos y extraer la mayor cantidad de muestra granular posible de estos y así obtener resultados correctos.

3.4.3.2 Procedimiento

Por cada calicata realizada (4 en total) se realizó un ensayo de granulometría, asimismo se realizó un ensayo de granulometría de la muestra en conjunto, la cual fue una mezcla de los distintos materiales obtenidos, para analizar la variación que existía entre los puntos de muestreo y la muestra conjunta. La cantidad total de ensayos granulométricos realizados fue de cinco.

Para realizar este ensayo se siguió principalmente lo estipulado en el apartado MTC E 107 del Manual de Ensayo de Materiales. Las muestras fueron expuestas al aire libre para que tengan un secado natural, posterior a esto, se realizó el cuarteo respectivo de cada muestra según las directivas del MTC E 105 obteniendo así una muestra representativa para el ensayo, esta se introdujo en el horno para determinar su peso seco neto, una vez registrado este dato se procedió al lavado de la muestra por la malla N° 200 e introduciendo la muestra restante en el horno, una vez el peso seco de esta muestra fue constante se procedió a retirarla del horno y realizar el tamizado por las mallas indicadas en la Tabla 9, se hizo el registro del peso de muestra retenido en cada malla hasta el retenido en la base (pasante de la malla N° 200); concluyendo así con el ensayo.

Tabla 9*Juego de tamices recomendado.*

N° de Malla	Abertura de malla (mm)	N° de Malla	Abertura de malla (mm)
3"	75.000	N° 8	2.360
2 1/2"	63.000	N° 10	2.000
2"	50.000	N° 16	1.180
1 1/2"	37.500	N° 20	0.850
1"	25.000	N° 30	0.590
3/4"	19.000	N° 40	0.425
1/2"	12.500	N° 50	0.300
3/8"	9.500	N° 80	0.180
1/4"	6.300	N° 100	0.150
N° 4	4.750	N° 200	0.075
N° 6	3.350	Base	--

Nota: Extraído de la normativa ASTM D 6913-17.

Después de graficar los resultados en curvas granulométricas, estas serán sometidas a “franjas granulométricas” que indican los mínimos y máximos porcentajes que deberían ser retenidos en los tamices correspondientes. Esto aplicado a un material de afirmado, que según el MTC (2013) el requisito de calidad que debe cumplir es el A-1, ya que la zona de estudio se encuentra a más de 3000 m.s.n.m. La Tabla 10 muestra la gradación o franja que debe cumplir el material de estudio.

Tabla 10

Especificación en la gradación para material destinado a afirmado.

Tamiz	Porcentaje que pasa (Gradación A-1)
50 mm (2")	100
37.5 mm (1 ½")	100
25 mm (1")	90 – 100
19 mm (¾")	65 – 100
9.5 mm (3/8")	45 – 80
4.75 mm (N° 4)	30 – 65
2.00 mm (N° 10)	22 – 52
425 µm (N° 40)	15 – 35
75 µm (N° 200)	5 – 20

Nota: Extraído de “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” – MTC (2013).

3.4.4 Ensayo de límites de Atterberg

3.4.4.1 Equipos y materiales

- **Cuchara de Casagrande:** Instrumento inventado por Arthur Casagrande para determinar el límite líquido de los suelos, el cual cuenta con un mecanismo de elevación de una cuchara, donde se introduce el suelo a ser ensayado y se somete a golpes, teniendo como eje 25 golpes.
- **Taras:** Recipientes metálicos resistentes a altas temperaturas, de diversos tamaños, generalmente pequeños, similares a lo empleado en el ensayo de contenido de humedad.



- **Vidrio:** Pedazo de vidrio con superficie lisa, apta para realizar el ensayo de plasticidad del suelo.
- **Tamices:** Similar al utilizado en el ensayo de análisis granulométrico de suelo por tamizado, se utilizó el tamiz N° 40 (todo material pasante de esta malla fue sometido al ensayo).
- **Balanza:** Similar al utilizado en el ensayo de contenido de humedad.
- **Horno:** Similar al utilizado en el ensayo de contenido de humedad.
- **Paletas:** De metal y mango de madera, útiles para mezclar el agua en el suelo y distribuirlo de manera uniforme.

3.4.4.2 Procedimiento

La metodología seguida fue la misma que indica el MTC E 110 y MTC E 111, tomando como consideración extra para el ensayo de Límite Líquido la toma de dos “puntos” de humedad antes y después de los 25 golpes, teniendo en total cuatro puntos para el cálculo y procesamiento del resultado en gabinete.

3.4.5 Ensayo de Proctor Modificado

3.4.5.1 Equipo y materiales

- **Martillo o pisón de compactación:** Herramienta utilizada para realizar la compactación del material granular en el molde seleccionado. Se utilizó el martillo de compactación para Proctor Modificado, que cumple las siguientes especificaciones según el MTC (2016) “pisón de 44.5 N (10 lbf) que cae de una altura de 457 mm (18 pulg), produciendo una energía de compactación de 2700 kN-m/m³ (56000 pie-lbf/pie³)”.
- **Molde de 6 pulgadas:** Molde metálico “que tenga en promedio 152.4 ± 0.7 mm (6.000 ± 0.026 pulg) de diámetro interior, una altura de: 116.4 ±



0.5mm (4.584 ± 0.018 pulg) y un volumen de 2124 ± 25 cm³ (0.075 ± 0.0009 pie³)” MTC (2016).

- **Balanzas:** Instrumentos de medición de peso exacto con capacidades de hasta 600 g. y otra de hasta 5000 g., con una precisión de 0.01 g y 1 g respectivamente, calibradas por el laboratorio correspondiente.
- **Horno:** Similar al utilizado en el ensayo de contenido de humedad.
- **Regla:** una regla rígida de metal de cualquier longitud conveniente, pero no menos de 10 pulgadas (250 mm).
- **Tamices:** Tamices 3/4” (19.0 mm), 3/8” (9.5 mm) y N° 4 (4.75 mm), conforme a lo establecido en el manual de ensayos del MTC.
- **Muestra:** Porción de material granular clasificado y compensado, utilizado para la realización del ensayo (compactación). Se identifican dos tipos de muestras. El primer tipo es la “Muestra Final Patrón” con una nomenclatura MF_i, donde “i” va desde 1 a 5 y representa el número de la muestra ensayada. El segundo tipo es la “Muestra Final Recompactada” con una nomenclatura MF_{iR_x}, donde “i” va desde 1 a 5 y representa el número de la muestra ensayada y “x” va desde 1 a 3 y representa el número de reutilizaciones o recompactaciones realizadas. En total se tiene 20 muestras (5 MF_i, 5 MF_{iR1}, 5 MF_{iR2} y 5 MF_{iR3}).
- **Extractor de muestras:** Instrumento compuesto de una gata o alguna estructura que permita extraer las muestras compactadas del molde, sin la necesidad de aplicar una fuerza destructora en el material granular.
- **Bandejas:** Recipientes metálicos para realizar el pesaje de material granular.



- **Taras:** Similar a lo utilizado para el ensayo de contenido de humedad y límites de Atterberg.
- **Bolsas herméticas:** Bolsas de plástico con el detalle especial que en su abertura poseen un cierre hermético “zip-lock”, que no permite la fuga de líquidos al exterior, conservando así la humedad de las muestras por un mayor tiempo.
- **Vernier:** Instrumento de medición de distancias con precisión de hasta 0.01 mm.
- **Misceláneos:** Diversos instrumentos manuales utilizados, tales como espátulas, guantes impermeables de goma, cucharas, brochas entre otros.

3.4.5.2 Procedimiento

La metodología seguida para este ensayo es la indicada en el Manual de Ensayo de Materiales – MTC E 115 para las muestras naturales o muestras finales patrón (MF₁, MF₂, MF₃, MF₄, MF₅), complementando con lo expuesto en el manual se realiza la compactación de una manera ordenada siguiendo un orden, tal como indica la Figura 6.

Debido a la naturaleza de la investigación, donde debemos reutilizar material previamente compactado es obligatorio recuperar la mayor cantidad posible de material ensayado (compactado) para su posterior reutilización; por tanto, la medición de los contenidos de humedad para las diversas muestras se lleva en tres taras de tamaño medio, extrayendo las muestras de la parte superior, media y baja del espécimen extraído.

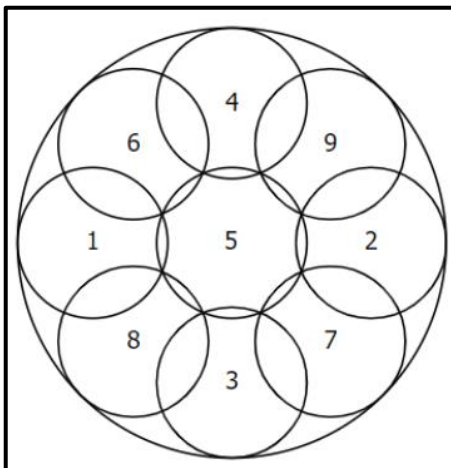
Para las muestras recompactadas (MF_{1Rx}, MF_{2Rx}, MF_{3Rx}, MF_{4Rx}, MF_{5Rx}) se tomó de referencia la metodología usada por Ahmad et al. (2018) en su artículo de investigación llamado “Effects of Soil Recomposition on Permeability”. Se puede describir la metodología seguida en los siguientes pasos:

1. Desmenuzar manualmente el suelo de la muestra patrón ensayada lo máximo posible.
2. Agregar 2% de agua respecto a la masa del suelo, mezclar y almacenar por 24 horas la muestra desmenuzada en una bolsa hermética para que el contenido de humedad se disperse homogéneamente.
3. Utilizar el suelo como si fuera una muestra natural y someterlo al ensayo de Proctor Modificado.

Se realizaron estos tres pasos para todas las muestras recompactadas.

Figura 6

Distribución de golpes para el molde de seis pulgadas de diámetro.



Nota: Esta distribución se realiza solo en el Molde de 6" para los Ensayos de Proctor Modificado y CBR. Extraído de la norma ASTM D 1557-12.

3.4.6 Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)

3.4.6.1 Equipo y materiales

Los equipos y materiales usados para este ensayo coinciden con lo desarrollado en el ensayo de Proctor Modificado, añadiendo y/o cambiando los siguientes ítems:



- **Muestra:** Se toman dos muestras, una correspondiente al patrón y una resultante de la tercera recompactación o reutilización. La muestra patrón tendrá las mismas características que la usada en el ensayo de Proctor Modificado y la muestra recompactada será tomada indistintamente de las muestras disponibles.
- **Molde metálico:** El MTC (2016) en su manual de ensayos describe este equipo como un molde cilíndrico metálico con perforaciones en su placa de base (espesor de 9.53 mm) que permiten el filtrado de agua, estas perforaciones no exceden los 1.6 mm, tiene un diámetro interior de 152.4 mm \pm 0,66 mm ($6 \pm 0,026$ "") y una altura de 177.8 \pm 0.46 mm ($7 \pm 0,018$ ""), a la vez que posee un collar de metal suplementario de 50.8 mm (2.0"") de altura.
- **Disco espaciador de metal:** De forma circular de 150.8 mm de diámetro exterior y un espesor aproximado de 61.37 \pm 0.127 mm, que actuará como falso fondo dentro del molde cilíndrico al momento de realizar la compactación.
- **Máquina de compresión para CBR:** Parecida a las que se usan en ensayos de compresión, se utiliza para forzar la penetración de un pistón en el espécimen de material granular MTC (2016).
- **Pistón de penetración:** Cilíndrico, con un diámetro de 49.63 \pm 0.13 mm y área de 19.35 cm².
- **Aparato medidor de expansión:** Consta de un trípode, cuyas patas se pueden apoyar en el borde del molde y en la zona céntrica lleva un dial (deformímetro) cuyo vástago coincida con el de la placa de metal perforada, sobre la cual descansan las pesas, esta placa debe tener un



diámetro de 149.2 mm y un vástago hacia arriba para poder llevar el control de la expansión del material granular.

- **Diales de recorrido:** Instrumento en forma de reloj o digital, que mide distancias desplazadas.
- **Pesas:** Masas redondas metálicas que tienen en total 4.54 ± 0.02 kg y con un agujero en el centro de estas, de 53.98 mm de diámetro aproximadamente. Estas pesas simulan el peso del pavimento sobre la muestra ensayada.
- **Poza o tanque de agua:** Con una capacidad lo suficientemente grande que permita la completa inmersión de los moldes bajo el agua.

3.4.6.2 Procedimiento

Se siguió las directivas indicadas en el Manual de Ensayos en el apartado MTC E 132 CBR de Suelos (Laboratorio), al momento de usar material previamente compactado se realizó el desmenuzado manual de la muestra y la corrección de la humedad para cada espécimen. Siempre que se agregaba agua para alcanzar una humedad óptima la muestra se almacenaba en bolsas herméticas, y después de 24 horas en estado de reposo, esta se encontraba lista para ser ensayada.

Para seleccionar la muestra a ser sometida al ensayo se realizó la separación de material según a lo requerido en el manual, primero se sometió a la gradación y a la determinación del método a una muestra patrón previamente cuarteada, se calculó los porcentajes retenidos en cada tamiz (3/4", 3/8", N° 4 y base), luego se calculó el porcentaje que representa cada uno y se distribuye proporcionalmente el porcentaje a excluir entre estos dos tamices.

3.5 VARIABLES

Para la presente investigación se definen cuatro variables principales (una independiente y tres dependientes)

3.5.1 Material compactado reutilizado (variable independiente)

Esta variable es la que se irá cambiando durante el proceso de investigación, y que al finalizar influirá en las variables dependientes. El indicador de esta variable es la cantidad de veces que se reutiliza el material compactado, recibe la nomenclatura de “x” y varía de 1 a 3.

3.5.1.1 Metodología de obtención

Para obtener el valor de “x” se realizará un conteo simple y registro en hojas de laboratorio. A continuación, en la Tabla 11 se presenta un cuadro resumen de nomenclatura para las muestras utilizadas.

Tabla 11

Cuadro resumen de nomenclaturas.

Nombre	Número de muestra	Número de reutilizaciones	Nomenclatura
Muestra Final Patrón	1	0	MF ₁
	2		MF ₂
	3		MF ₃
	4		MF ₄
	5		MF ₅
Muestra Final reutilizada por primera vez	1	1	MF _{1R1}
	2		MF _{2R1}
	3		MF _{3R1}
	4		MF _{4R1}
	5		MF _{5R1}
Muestra Final	1	2	MF _{1R2}

Nombre	Número de muestra	Número de reutilizaciones	Nomenclatura
reutilizada por segunda vez	2		MF _{2R2}
	3		MF _{3R2}
	4		MF _{4R2}
	5		MF _{5R2}
	1		MF _{1R3}
Muestra Final reutilizada por tercera vez	2		MF _{2R3}
	3	3	MF _{3R3}
	4		MF _{4R3}
	5		MF _{5R3}

3.5.2 Parámetros de compactación (variables dependientes)

Los parámetros de compactación para la presente investigación son dos, los cuales se originan de los resultados del ensayo de compactación Proctor Modificado, en específico del gráfico del resultado, el cual representa la Máxima Densidad Seca (MDS) vs Contenido de Humedad Óptimo (CHO), siendo estos los indicadores de las variables uno y dos respectivamente.

La MDS y el CHO irán cambiando de valor a medida que se cambie la cantidad de veces que se reutiliza el material compactado.

3.5.2.1 Metodología de obtención

Se hallarán los indicadores de estas variables mediante el procesamiento de los datos de laboratorio del ensayo de Proctor Modificado y obtención de la curva de compactación del suelo ensayado.

La curva de compactación para un ensayo de proctor modificado (Figura 7) se obtiene siguiendo los siguientes pasos:



1. Cálculo del contenido de humedad de cada espécimen ensayado, mediante la siguiente fórmula:

$$w = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo seco}} * 100$$
$$w = \frac{W_{t+sh} - W_{t+ss}}{W_{t+ss} - W_t} * 100 = \frac{W_a}{W_s} * 100$$

Donde:

w = contenido de humedad, (%)

W_{t+sh} = peso de la tara más suelo húmedo, en gramos

W_{t+ss} = peso de la tara más suelo secado en horno, en gramos

W_t = peso de la tara, en gramos

W_a = peso del agua, en gramos

W_s = peso del suelo seco, en gramos

2. Cálculo de la densidad seca, primero se halla la densidad húmeda (ecuación a) y luego la densidad seca (ecuación b) como sigue:

$$\rho_m = \frac{M_{m+sh} - M_m}{V} \quad (a)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}} \quad (b)$$

Donde:

ρ_m = densidad húmeda del espécimen compactado, (gr/cm³)

M_{m+sh} = masa del molde más suelo húmedo compactado, en gramos

M_m = masa del molde, en gramos

V = Volumen del molde, (cm³)

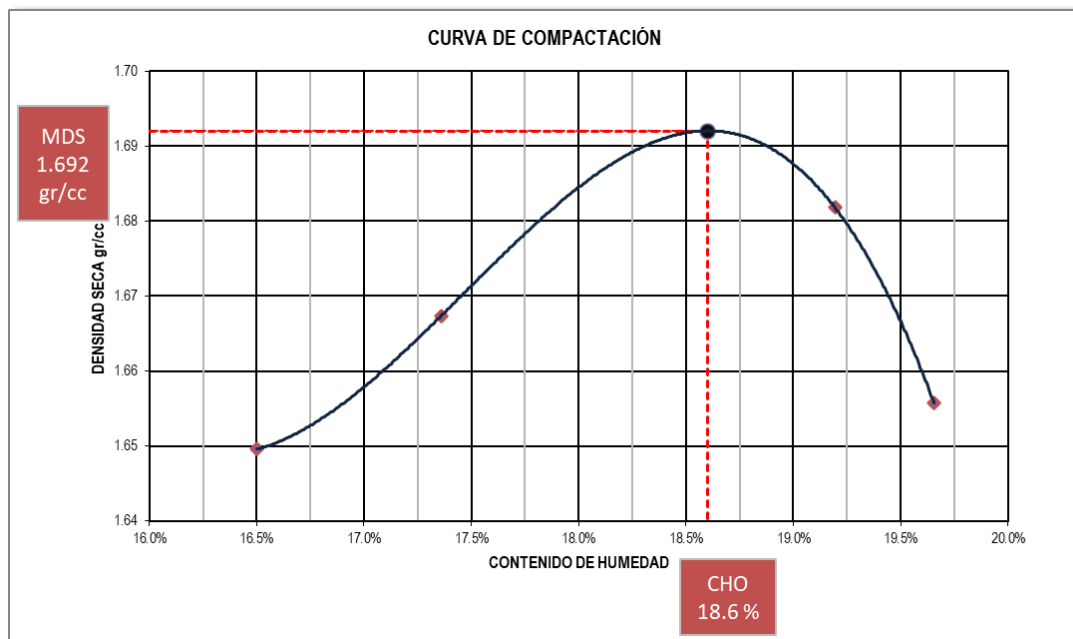
ρ_d = densidad seca del espécimen compactado, (gr/cm³)

w = contenido de humedad, (%)

3. Plotear la curva de compactación, cumpliendo siempre que deben existir por lo menos dos puntos en la zona ascendente (seca) y dos puntos en la zona descendente (húmeda).
4. Trazar una línea horizontal en el punto máximo de la curva que intercepte al eje y, este valor será la MDS.
5. A partir de la intersección del punto máximo de la curva y la línea horizontal, trazar una línea vertical hasta el eje x, este valor será el CHO.

Figura 7

Curva de compactación del ensayo Proctor Modificado.



3.5.3 Ecuación de relación (variable dependiente)

Es la variable que relaciona la cantidad de recompactaciones hechas con la MDS inicial y final mediante una ecuación matemática.

3.5.3.1 Forma de obtención

Se obtendrá mediante el análisis de la variable dependiente y las variables independientes, realizando una regresión lineal simple; “la cual estudia el grado de



dependencia lineal entre dos variables, una llamada independiente o que es representada por X , y la otra Y llamada variable dependiente” (Jallo Apaza, 2014), teniendo por modelo estadístico:

$$\hat{Y} = a + bX$$

Donde:

\hat{Y} : Variable de respuesta o dependiente

X : Variable predictora o independiente

a : Valor de Y cuando X es cero (intercepto)

b : cálculo de la inclinación de la línea, tasa de cambio de la variable dependiente cuando cambia en una unidad la variable independiente, y se denomina coeficiente de regresión

Los coeficientes a y b se calcularán con el método de mínimos cuadrados y ayuda del programa MS Excel. Según Walpole et al. (2012) el método de mínimos cuadrados aplica las siguientes fórmulas:

$$b = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

Donde:

n : Cantidad de datos analizados (número entero)

X_i : Valor de X correspondiente a i

Y_i : Valor de Y correspondiente a i

\bar{Y} : Promedio de los valores de Y

\bar{X} : Promedio de los valores de X

3.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El resultado al que se presta mayor importancia es la ecuación de relación, el cual estará sujeto al coeficiente de correlación lineal de Pearson, que en este caso particular (modelo lineal entre dos variables) es equivalente al coeficiente de determinación múltiple o R^2 (Quezada Lucio, 2017), que según las palabras de Walpole et al. (2012) ilustra lo más adecuado para un modelo de regresión lineal, dando así pie a encontrar la “mejor regresión”, y que darán predicciones útiles y una ecuación funcional. Es importante y necesario saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1, indicando que mientras más cerca se esté de la unidad, más “útil” será la ecuación.

Entonces, el R^2 es el porcentaje de la variación en la variable de respuesta que es explicado por un modelo lineal. Su fórmula es: $R^2 = \text{Suma de cuadrados residuo} / \text{suma de cuadrados total}$ (Quezada Lucio, 2017).

Según Huaquisto Cáceres (2014) se puede realizar un criterio de aceptación para la correlación estimada, la Tabla 12 muestra estos criterios. Este criterio es una adaptación de los “criterios de Cohen” para el coeficiente de determinación, D'Angelo (2021) en su artículo científico profundiza en este tema.

Tabla 12

Criterio de determinación de correlación entre variables.

Tipo de correlación	Rango de valores
Inexistente	$R^2 = 0.00$
Muy baja	$0.00 < R^2 \leq 0.20$
Baja	$0.20 < R^2 \leq 0.40$
Moderada	$0.40 < R^2 \leq 0.60$
Alta	$0.60 < R^2 \leq 0.80$
Muy alta	$0.80 < R^2 < 1$
Perfecta	$R^2 = 1$

Nota: Adaptado de Huaquisto Cáceres (2014) y D'Angelo (2021).

Las hipótesis planteadas serán analizadas mediante fórmulas estadísticas, tal como sugieren Mamani Cutipa (2017) y Huaquisto Cáceres (2014) en sus estudios de investigación.

La técnica estadística utilizada para el análisis de los resultados fue el coeficiente de correlación lineal de Pearson, en conjunto con la prueba de T-student, considerando una significancia (α) igual a 0.05. Esta formulación es presentada a continuación:

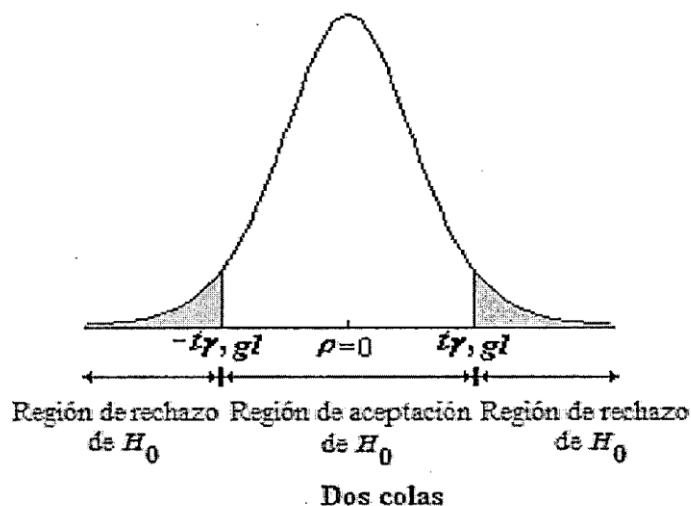
Hipótesis nula $H_0: \rho = 0$ (no existe correlación)

Hipótesis alterna $H_a: \rho \neq 0$ (existe correlación)

Prueba de comprobación:

$$t_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

Se toman 2 grados de libertad o $gl = n-2$; $t(\alpha/2; gl)$



El análisis de la comprobación de los datos con la prueba "t", se muestra en el Anexo 4 de la presente investigación. Como análisis final se explicará cuáles son los efectos de los resultados ya sean positivos o negativos y su posible impacto en la ingeniería.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PROCTOR MODIFICADO

Se realizaron en total 20 ensayos de Proctor Modificado, en consecuencia, se tienen 20 curvas de compactación, 5 por cada fase de ensayos.

Se determinó el método de compactación (A, B o C) en base a la gradación del material extraído de cantera. Para lo cual se utilizó una porción de material significativo (4.5 kg), también se pudo verificar los resultados en los ensayos de granulometría. El resultado se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Resultado para la determinación del método de compactación.

Tamiz	Peso de tara (g)	Peso de masa + tara (g)	Masa Retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado
3/4 in	523	1380	857	19.29	19.29
3/8 in	415	1341	926	20.84	40.13
N°4	562	1339	777	17.49	57.62
Fondo	609	2492	1883	42.38	100
TOTAL			4443		

Se realiza el análisis de los métodos, según el método A se debe cumplir que 20 % o menos del material debe ser retenido en el tamiz N° 4, la Tabla 13 muestra que más del 50 % se retiene en dicho tamiz; por lo tanto, no aplica el método A.

Para aplicar el método B se deben cumplir dos condiciones, siendo una de ellas que el 20 % o menos del material debe ser retenido por el tamiz de 3/8", se verifica que



se retiene más del 40 %, por lo que el método B tampoco es aplicable para este estudio de investigación.

En el caso del método C pide dos condiciones, la primera indica que más del 20 % debe ser retenido en el tamiz de 3/8", cumpliéndose así esta primera condición; la segunda menciona que menos del 30 % del material deber ser retenido en el tamiz de 3/4", observando la Tabla 13 tenemos solo un 19.29 %, lo cual hace que se cumpla esta segunda condición.

Hecho el análisis se determinó el Método C para ejecutar el ensayo de Proctor Modificado en las muestras. El cual menciona que se empleará material que pase por el tamiz de 3/4", se utilizará el molde de 6 pulgadas de diámetro y se emplearán cinco capas para la compactación y en cada capa se darán 56 golpes.

4.1.1 Fase de muestras patrón

Se realizaron los ensayos en las cinco muestras finales, las cuales corresponden a las muestras representativas del material granular mezclado y cuarteado según los procedimientos respectivos. Primero se realizó la selección de material, dando como resultado las proporciones del material a utilizar en los ensayos patrón, la Tabla 14 muestra estos valores, cabe indicar que esta distribución también se aplica a los ensayos de CBR.

Tabla 14

Alternativa de cálculo para el reemplazo en masa de partículas retenidas en el tamiz de 3/4 in para la compactación de especímenes de ensayo de Proctor para CBR y CBR.

Tamiz	Masa Retenida (g)	% Retenido Original	% Retenido por reemplazo	Masa a utilizar por tamiz (g)
3/4 in	857.0	19.3	-	-
3/8 in	926.0	20.8	31.3	1410

Tamiz	Masa Retenida (g)	% Retenido Original	% Retenido por reemplazo	Masa a utilizar por tamiz (g)
N°4	777.0	17.5	26.3	1183
Fondo	1883.0	42.4	42.4	1907
TOTAL	4443.0	100.0	100.0	4500.0

Como resultados se obtienen los parámetros de compactación (MDS y CHO), los cuales son presentados en los siguientes gráficos de curvas de compactación. Se observa en la Figura 8 que los puntos se distribuyen de una manera correcta, teniendo tres en la zona húmeda y dos en la zona seca. El resultado de este ensayo (MF_1) es de una MDS de 1.713 g/cm^3 y un CHO de 17.6% .

Figura 8

Curva de compactación MF_1 .

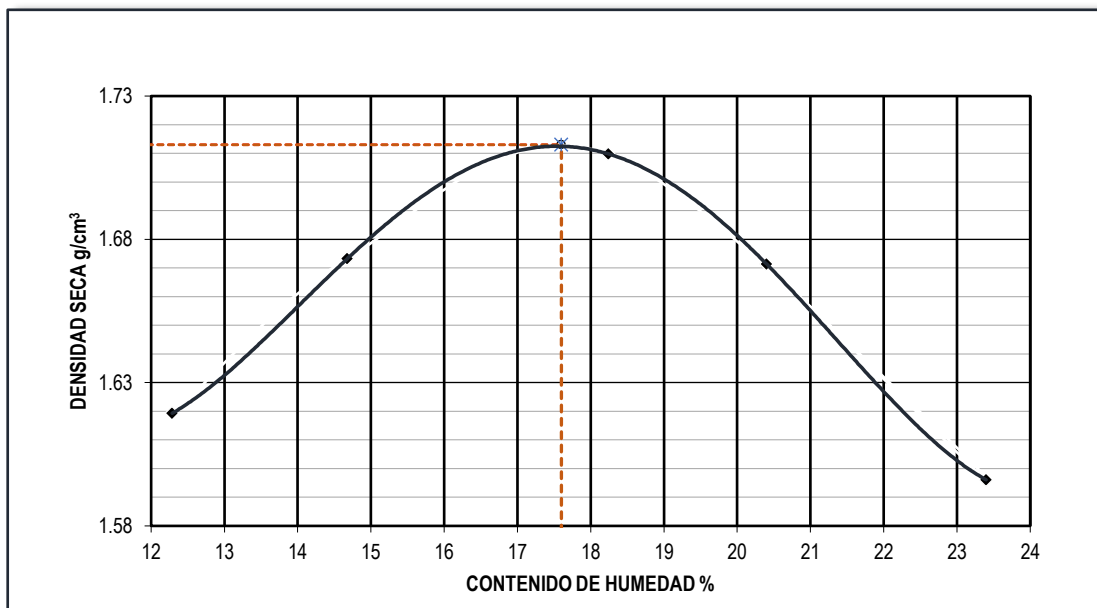
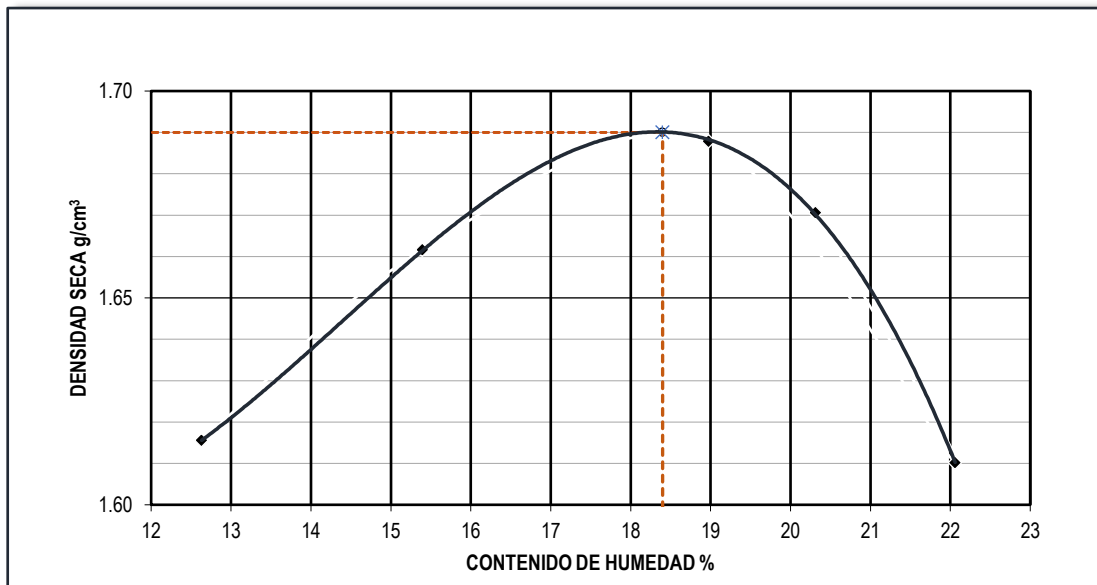


Figura 9

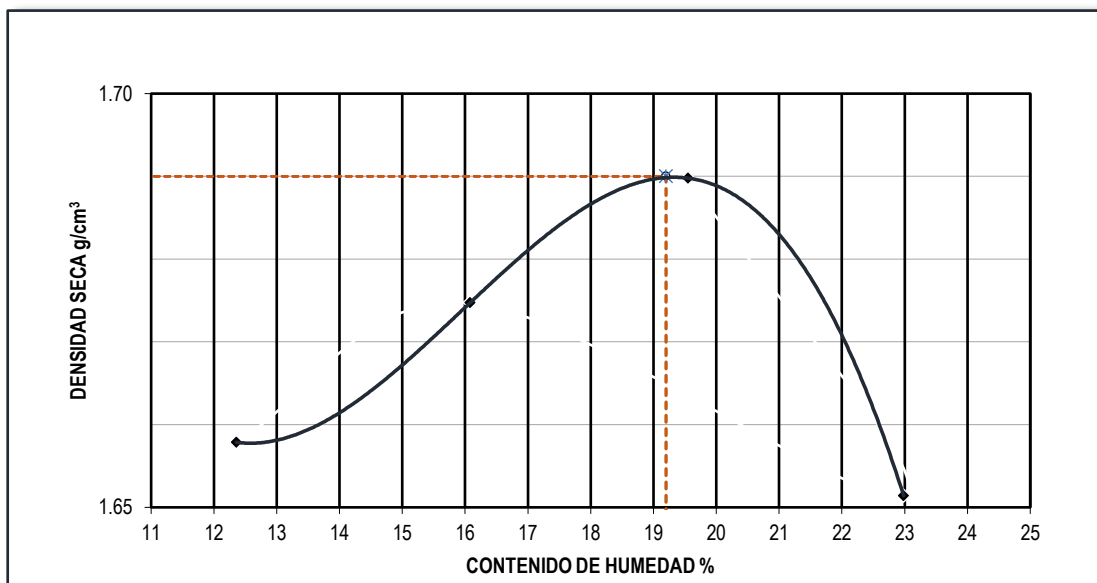
Curva de compactación MF₂.



En la Figura 9 se tiene que los puntos se distribuyen de una manera correcta, teniendo tres en la zona húmeda y dos en la zona seca. El resultado de este ensayo es de una MDS de 1.690 g/cm^3 y un CHO de 18.4 %.

Figura 10

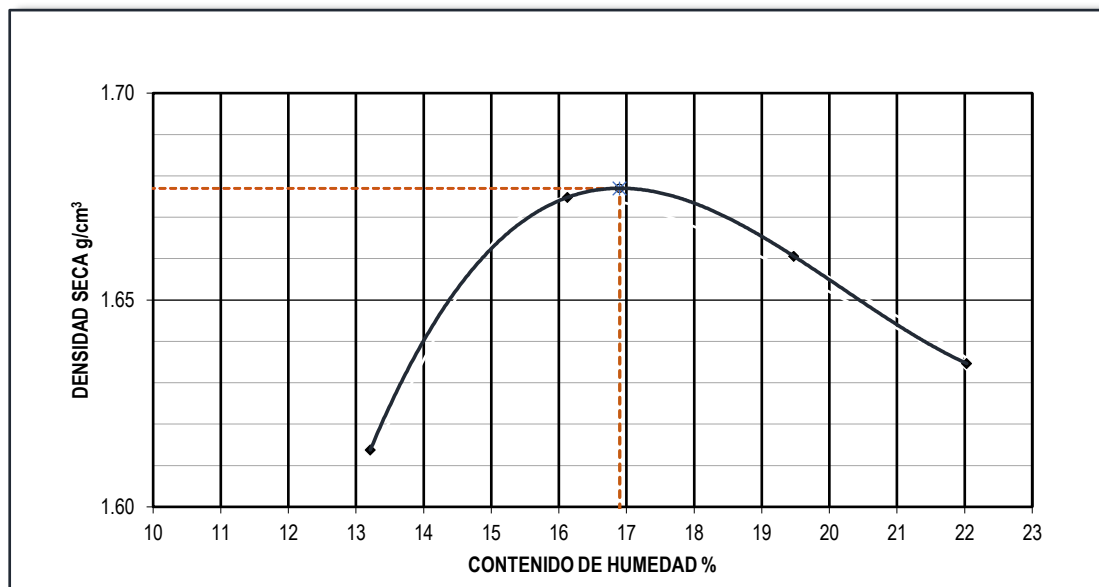
Curva de compactación MF₃.



Al tener los resultados de los ensayos para MF₁ y MF₂, se nota que el CHO de ambos oscila entre 17% a 19%, por lo que para MF₃ se ensayan solo cuatro puntos por curva, procurando mantener las humedades alrededor de estos números. Se nota en la Figura 10 que los puntos se distribuyen de una manera correcta, teniendo dos en la zona húmeda y dos en la zona seca. El resultado de este ensayo es de una MDS de 1.690 g/cm³ y un CHO de 19.2 %.

Figura 11

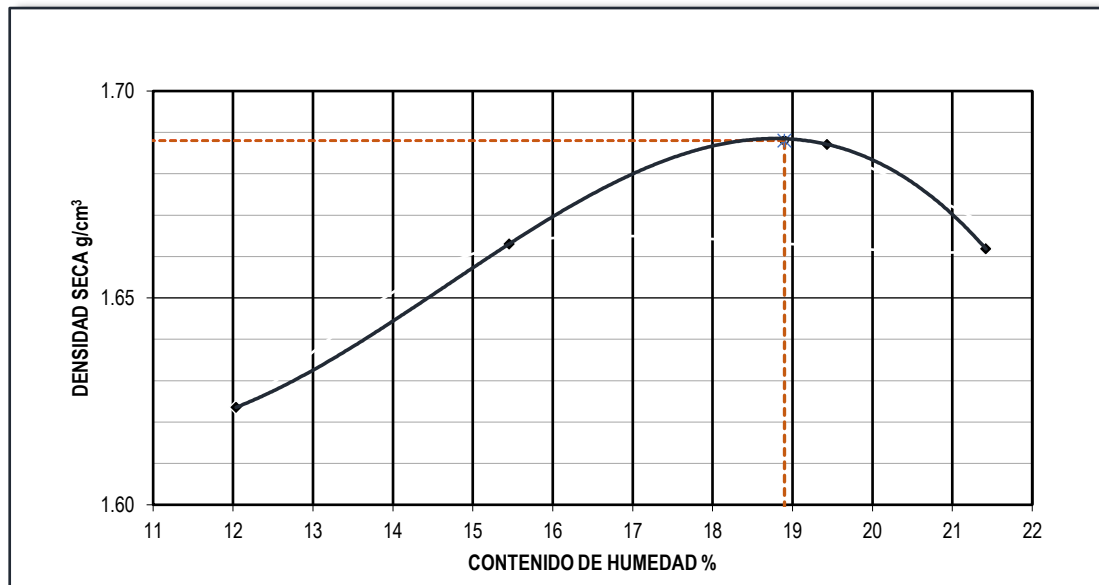
Curva de compactación MF₄.



Para el caso de la muestra MF₄ también se nota que los puntos se distribuyen de una manera correcta (Figura 11), teniendo dos en la zona húmeda y dos en la zona seca. El resultado de este ensayo es de una MDS de 1.677 g/cm³ y un CHO de 16.9 %.

Figura 12

Curva de compactación MF₅.



En la Figura 12 se aprecia la correcta distribución de los puntos, teniendo dos en la zona húmeda y dos en la zona seca. El resultado de este ensayo (MF₅) es de una MDS de 1.688 g/cm³ y un CHO de 18.9 %.

El resumen de los resultados obtenidos en la fase de compactación para las muestras patrón, así como el promedio aritmético de estos se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15

Resumen de los parámetros de compactación obtenidos para cada muestra patrón.

Muestra	MDS (g/cm ³)	CHO (%)
MF ₁	1.713	17.6
MF ₂	1.690	18.4
MF ₃	1.690	19.2
MF ₄	1.677	16.9
MF ₅	1.688	18.9
Promedio	1.692	18.2

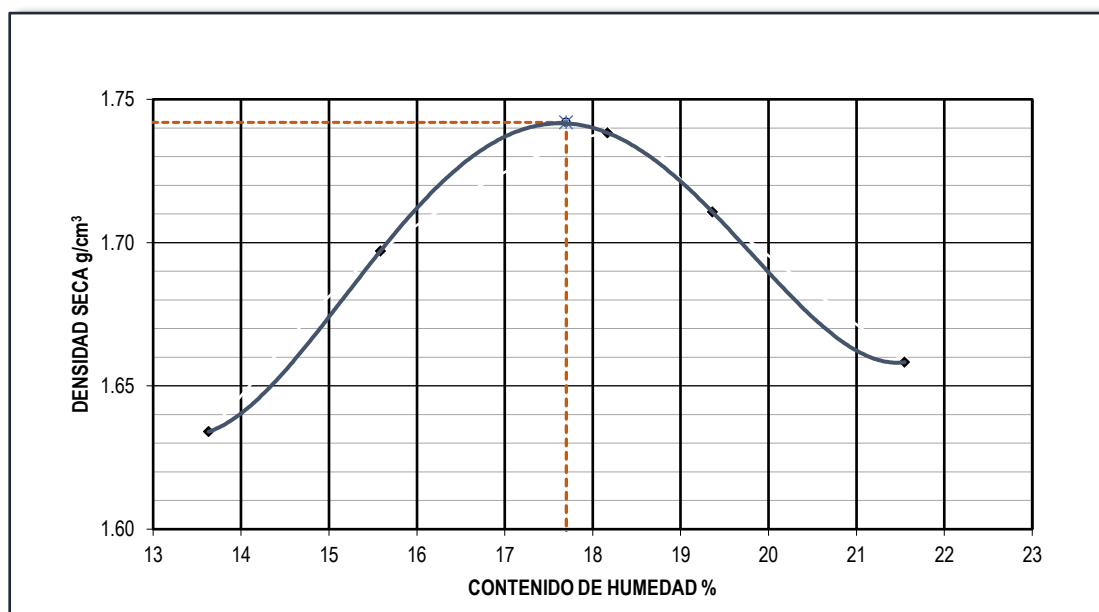
4.1.2 Fase de primera reutilización

Se realiza la primera reutilización del material ensayado, los parámetros de compactación resultantes, así como las curvas de compactación de cada MF se presentan desde la Figura 13 hasta la Figura 17.

En la Figura 13 se observa una correcta distribución de los puntos en la curva de compactación del ensayo MF₁R₁, teniendo tres en la zona húmeda y dos en la zona seca. El resultado de este ensayo es de una MDS de 1.742 g/cm³ y un CHO de 17.7 %.

Figura 13

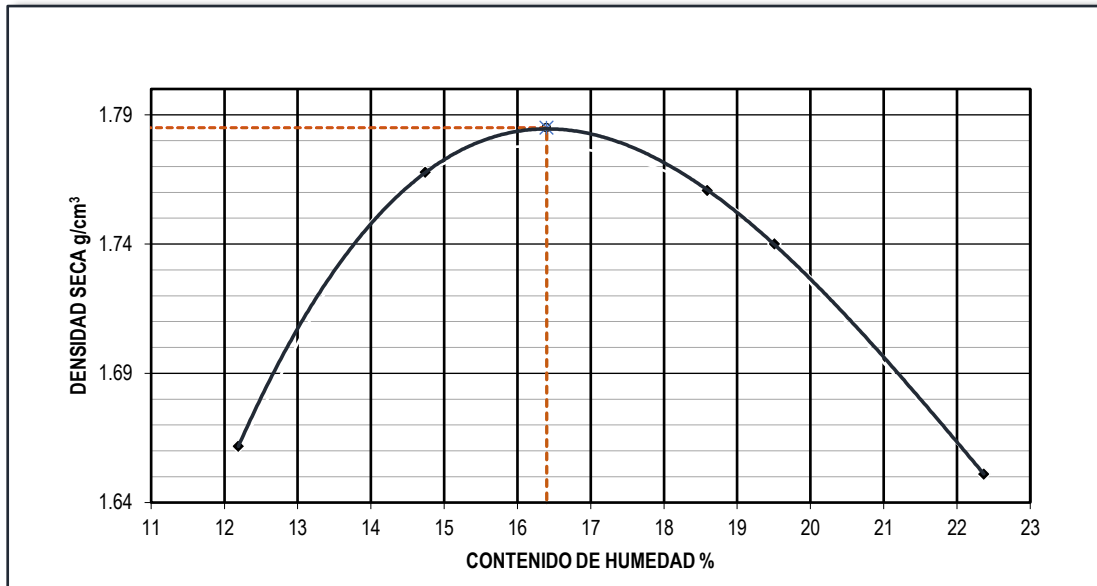
Curva de compactación del ensayo MF₁R₁.



La Figura 14 presenta la curva de compactación del ensayo MF₂R₁, y los parámetros de compactación obtenidos son de MDS igual a 1.785 g/cm³ y un CHO de 16.4 %. También se puede verificar la correcta distribución de puntos, dos en la zona seca y tres en la zona húmeda de la curva.

Figura 14

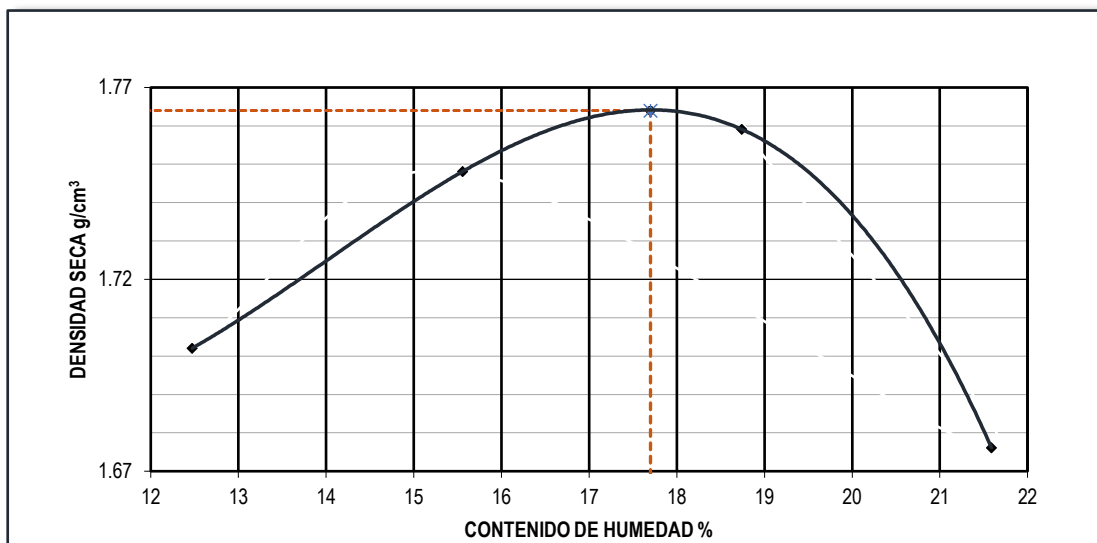
Curva de compactación del ensayo MF₂R₁.



La Figura 15 presenta la curva de compactación del ensayo MF₃R₁, y los parámetros de compactación obtenidos son de MDS igual a 1.764 g/cm³ y un CHO de 17.7 %. También se puede verificar la correcta distribución de puntos, dos en cada una de las zonas.

Figura 15

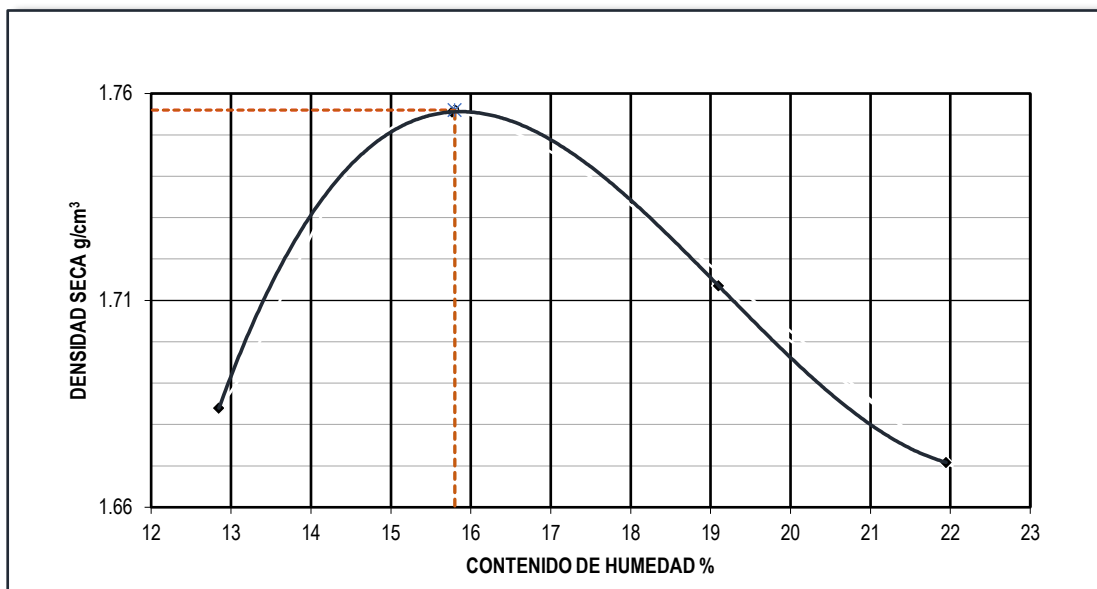
Curva de compactación del ensayo MF₃R₁.



La Figura 16 presenta la curva de compactación del ensayo MF₄R₁, los parámetros de compactación obtenidos son de MDS igual a 1.756 g/cm³ y un CHO de 15.8 %. En este caso se nota que uno de los puntos de la zona seca casi coincide con el máximo estimado, aun así, se puede verificar la correcta distribución de puntos, dos en cada una de las zonas.

Figura 16

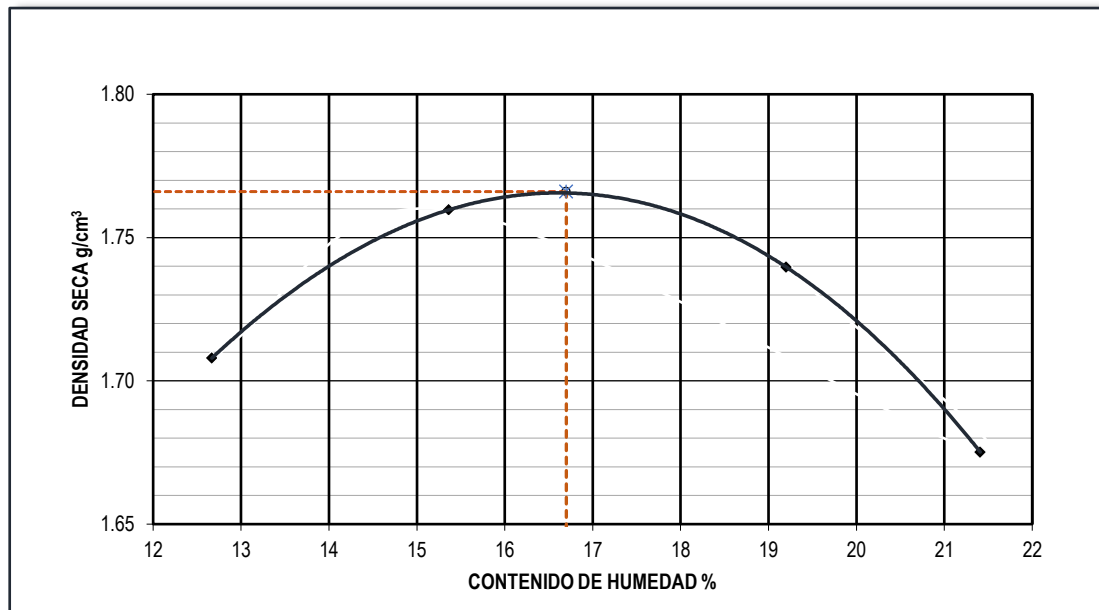
Curva de compactación del ensayo MF₄R₁.



La curva de compactación del ensayo MF₅R₁ se muestra en la Figura 17, los resultados son una MDS de 1.766 g/cm³ y un CHO de 16.7 %.

Figura 17

Curva de compactación del ensayo MF₁R₁.



Los parámetros de compactación obtenidos son condensados en la Tabla 16, la cual también indica el promedio obtenido.

Tabla 16

Resumen de los parámetros de compactación obtenidos para cada muestra recompactada por primera vez.

Muestra	MDS (g/cm ³)	CHO (%)
MF ₁ R ₁	1.742	17.7
MF ₂ R ₁	1.785	16.4
MF ₃ R ₁	1.764	17.7
MF ₄ R ₁	1.756	15.8
MF ₅ R ₁	1.766	16.7
Promedio	1.763	16.9

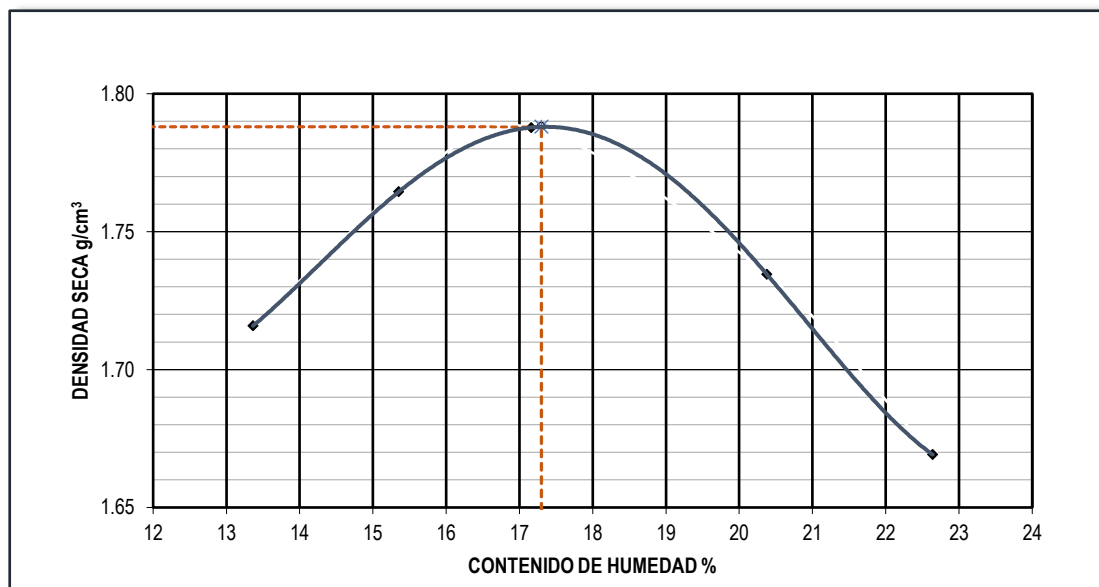
4.1.3 Fase de segunda reutilización

Los parámetros de compactación resultantes de la fase de segunda reutilización, así como las curvas de compactación de cada MF se presentan desde la Figura 18 hasta la Figura 22.

En la Figura 18 se observa una correcta distribución de los puntos en la curva de compactación del ensayo MF₁R₂, teniendo tres en la zona húmeda (una muy cerca del pico de la curva) y dos en la zona seca. El resultado de este ensayo es de una MDS de 1.788 g/cm³ y un CHO de 17.3 %.

Figura 18

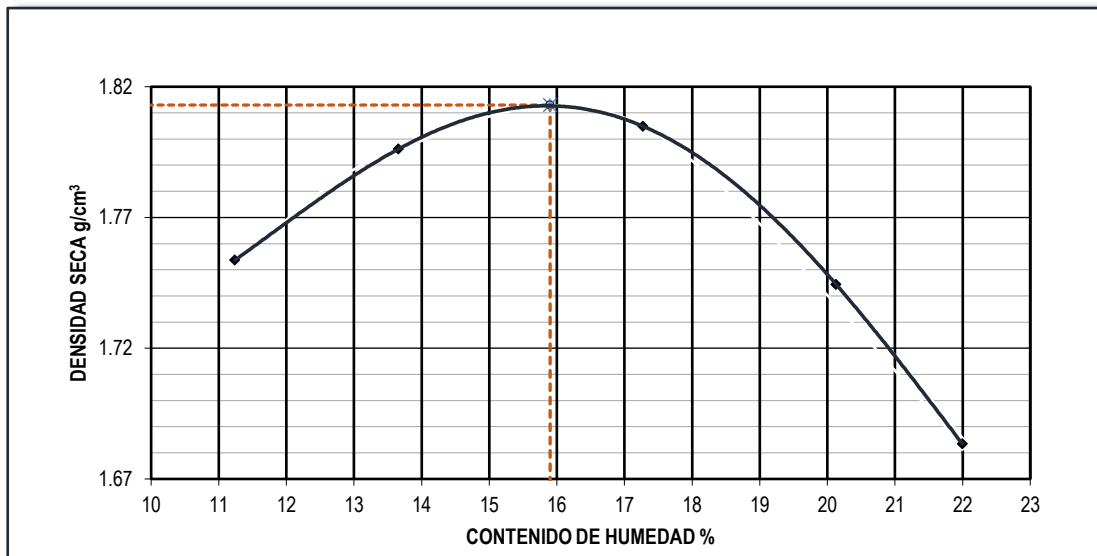
Curva de compactación del ensayo MF₁R₂.



La Figura 19 presenta la curva de compactación del ensayo MF₂R₂, y los parámetros de compactación obtenidos son de MDS igual a 1.813 g/cm³ y un CHO de 15.9 %. También se puede verificar la correcta distribución de puntos, dos en la zona seca y tres en la zona húmeda.

Figura 19

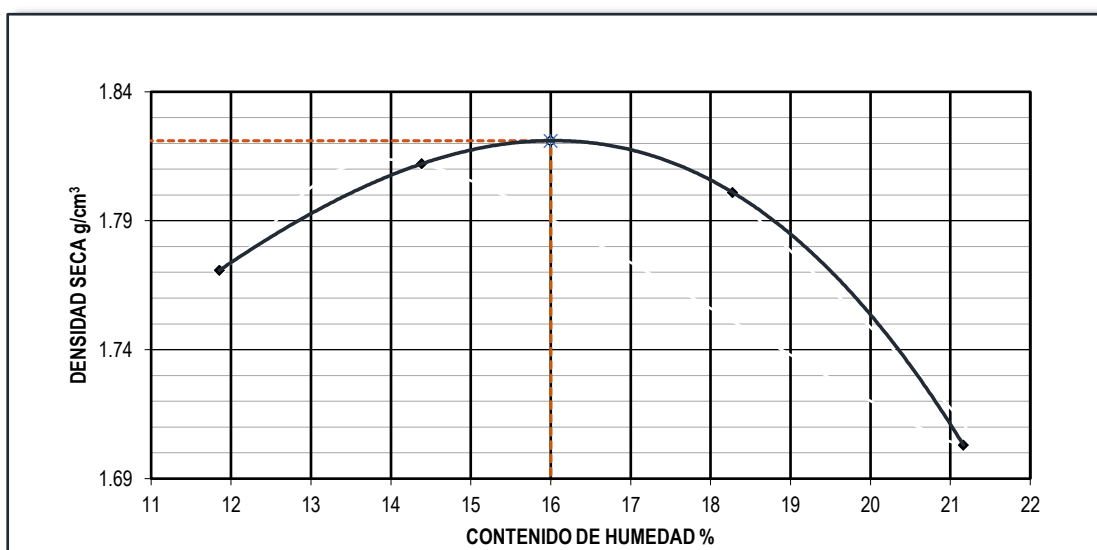
Curva de compactación del ensayo MF₂R₂.



La curva de compactación del ensayo MF₃R₂ se muestra en la Figura 20, los parámetros de compactación obtenidos son de MDS igual a 1.821 g/cm³ y un CHO de 16.0 %. También se puede verificar la correcta distribución de puntos, dos en cada una de las zonas.

Figura 20

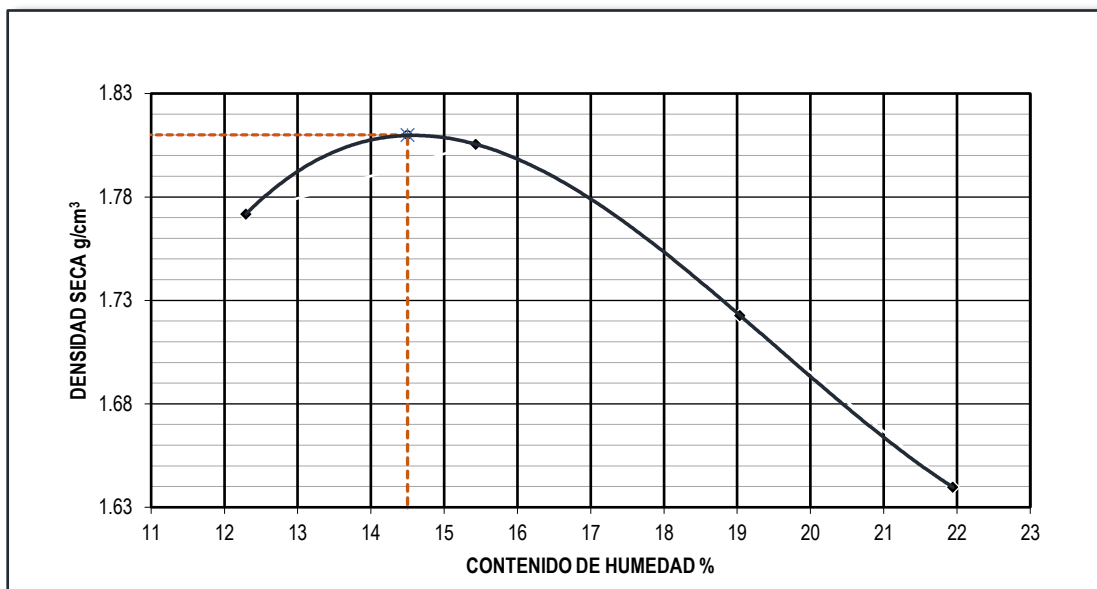
Curva de compactación del ensayo MF₃R₂.



El siguiente resultado es del ensayo MF₄R₂ (Figura 21), del cual se obtienen como resultados un MDS igual a 1.810 g/cm³ y un CHO de 14.5 %. También se aprecia que un punto de la zona seca pasa ahora a la zona húmeda, esto puede explicarse debido al reacomodo de partículas producto de las repetidas compactaciones a la que ha sido sometido el material.

Figura 21

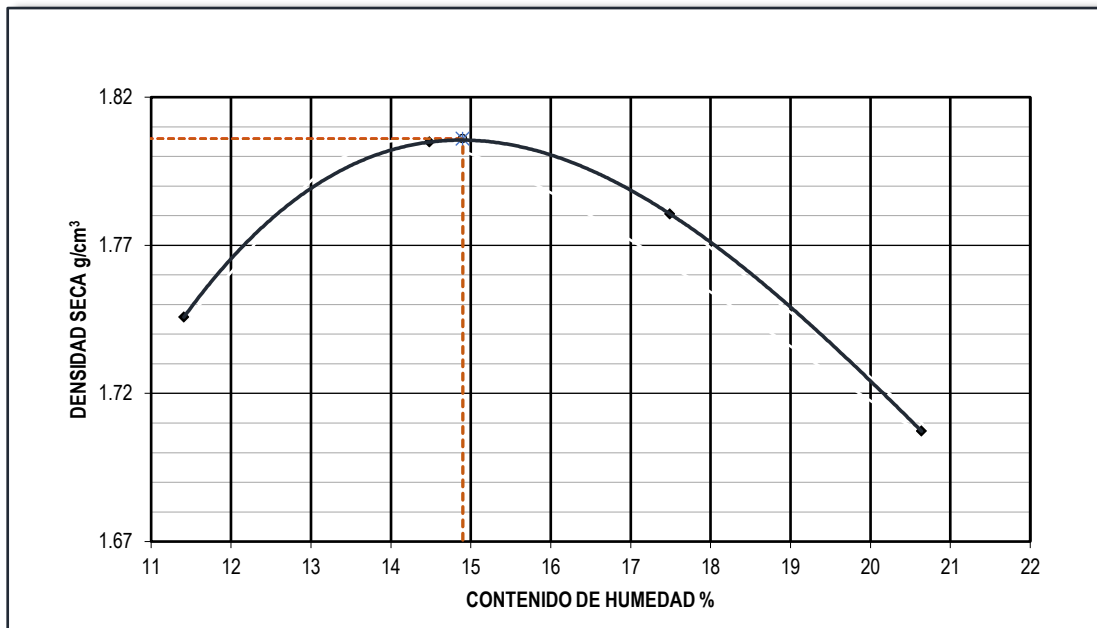
Curva de compactación del ensayo MF₄R₂.



En la Figura 22 se aprecia la correcta distribución de los puntos, teniendo dos en cada zona. El resultado de este ensayo (MF₅R₂) es de una MDS de 1.806 g/cm³ y un CHO de 14.9 %.

Figura 22

Curva de compactación del ensayo MF₅R₂.



El resumen de resultados y el promedio respectivo de la fase de segunda reutilización se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17

Resumen de los parámetros de compactación obtenidos para cada muestra recompactada por segunda vez.

Muestra	MDS (g/cm ³)	CHO (%)
MF ₁ R ₂	1.788	17.3
MF ₂ R ₂	1.813	15.9
MF ₃ R ₂	1.821	16.0
MF ₄ R ₂	1.810	14.5
MF ₅ R ₂	1.806	14.9
Promedio	1.808	15.7

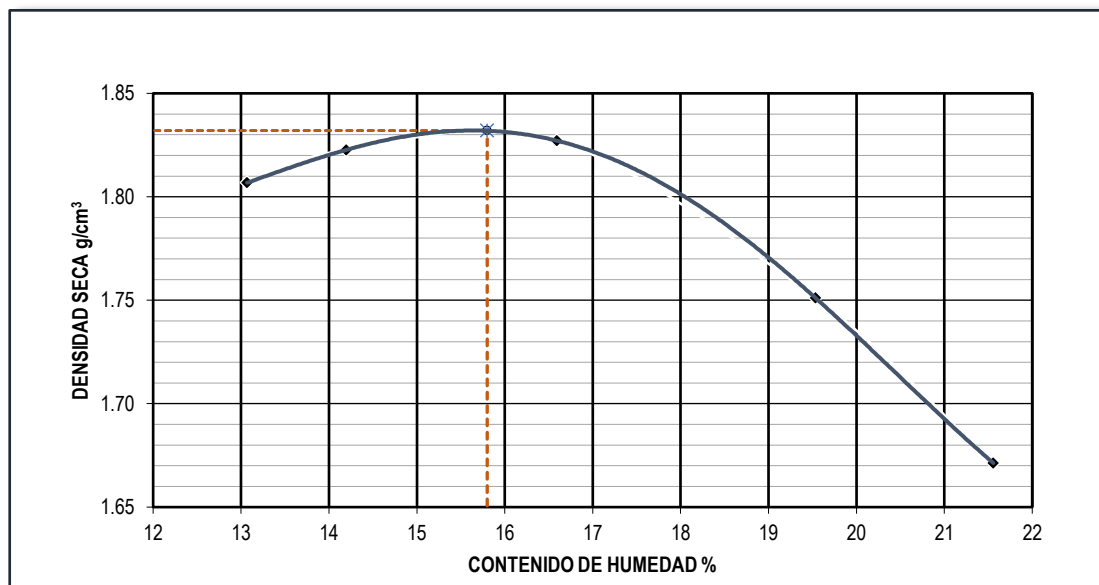
4.1.4 Fase de tercera reutilización

En la última fase de reutilización también se realizan los ensayos de Proctor Modificado, las curvas de compactación de cada MF y sus respectivos parámetros de compactación se presentan desde la Figura 23 hasta la Figura 27.

En la Figura 23 se observa una correcta distribución de los puntos en la curva de compactación del ensayo MF₁R₃, teniendo tres en la zona y dos en la zona seca, pero la curva se desplaza y tiende a inclinarse hacia la derecha, cambiando su forma inicial de distribución tipo campana. El resultado de este ensayo es de una MDS de 1.832 g/cm³ y un CHO de 15.8 %.

Figura 23

Curva de compactación del ensayo MF₁R₃.



En el caso del ensayo MF₂R₃ (Figura 24) también se aprecia una correcta distribución de los puntos tres en la zona y dos en la zona seca, el resultado de los parámetros de compactación es de MDS de 1.850 g/cm³ y un CHO de 15.8 %.

La Figura 25 presenta los parámetros de compactación después de la tercera reutilización de la muestra MF₃ y lleva como nombre MF₃R₃; los cuales son MDS igual a 1.844 g/cm³ y CHO igual a 14.9 %.

Los resultados del ensayo MF₄R₃ se presentan en la Figura 26 los cuales son MDS igual a 1.833 g/cm³ y CHO igual a 14.3 %; y para el ensayo de la muestra MF₅R₃ los resultados son de 1.852 g/cm³ y 14.1 % como MDS y CHO respectivamente, se puede apreciar a mayor detalle la curva y los parámetros de compactación en la Figura 27.

Figura 24

Curva de compactación del ensayo MF₂R₃.

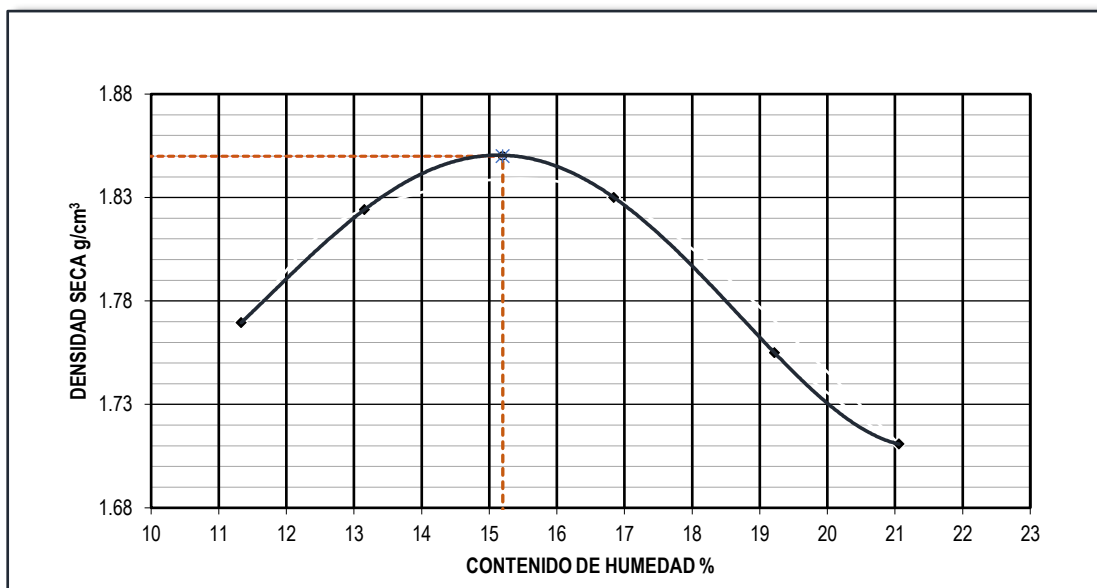


Figura 25

Curva de compactación del ensayo MF₃R₃.

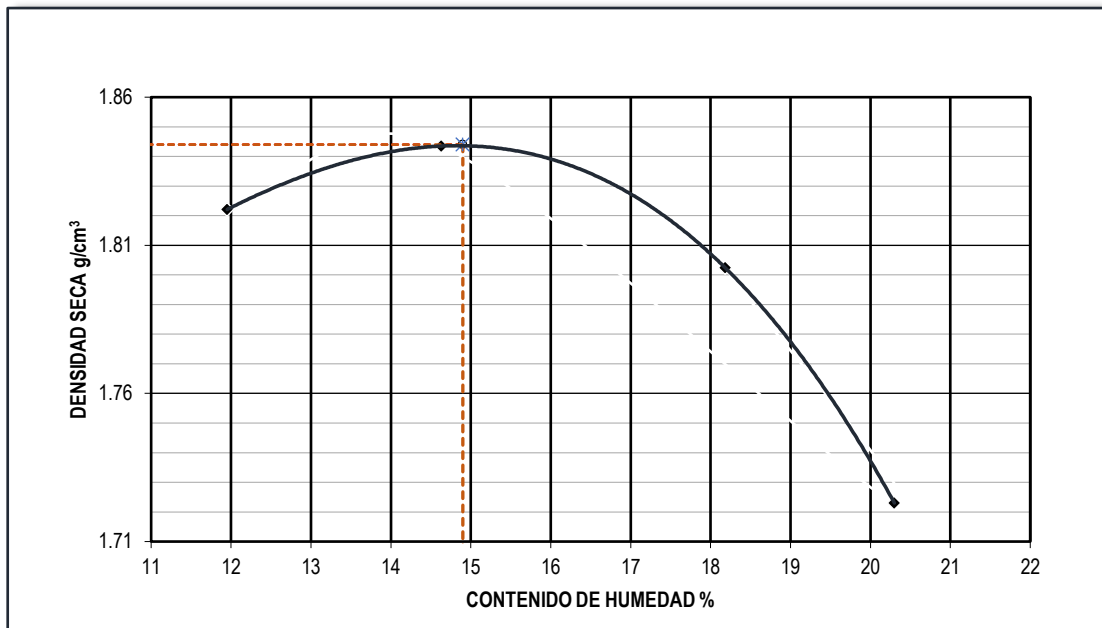


Figura 26

Curva de compactación del ensayo MF₄R₃.

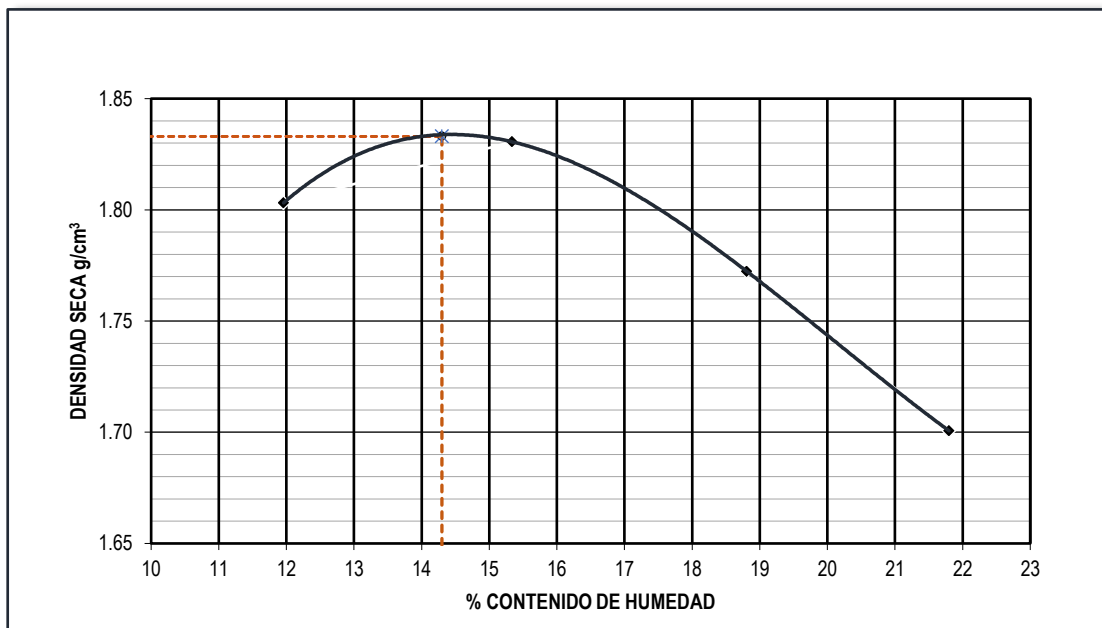
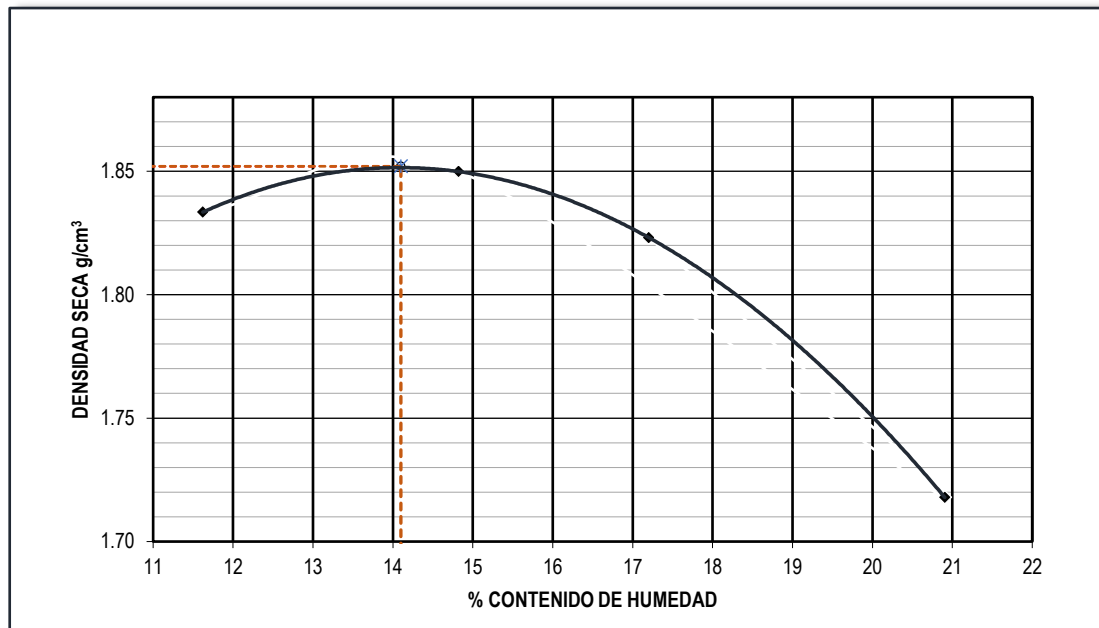


Figura 27

Curva de compactación del ensayo MF₅R₃.



Así los resultados obtenidos en esta última fase se pueden resumir tal como indica la Tabla 18, también se presenta el promedio resultante de estos.

Tabla 18

Resumen de los parámetros de compactación obtenidos para cada muestra recompactada por tercera vez.

Muestra	MDS (g/cm ³)	CHO (%)
MF ₁ R ₃	1.832	15.8
MF ₂ R ₃	1.850	15.2
MF ₃ R ₃	1.844	14.9
MF ₄ R ₃	1.833	14.3
MF ₅ R ₃	1.852	14.1
Promedio	1.842	14.9



4.2 DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS DE PROCTOR MODIFICADO

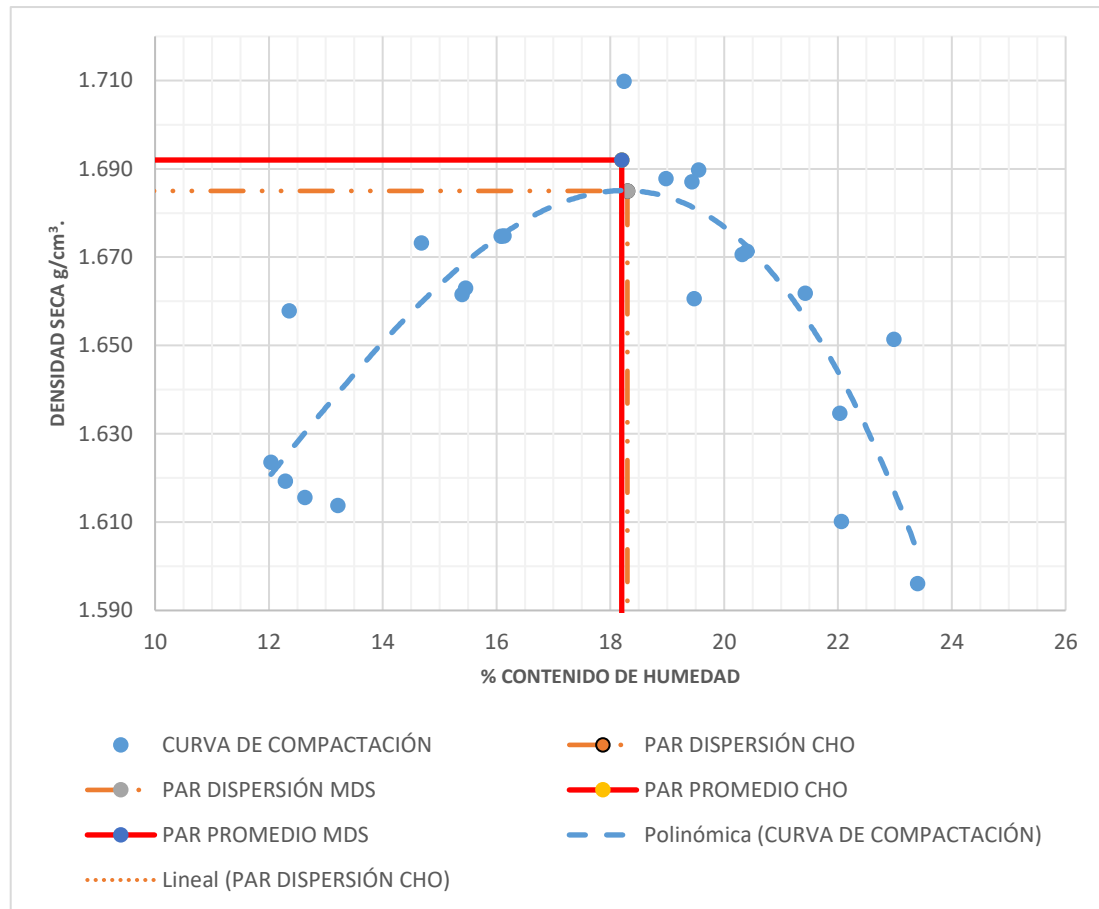
4.2.1 Ensayos de Proctor Modificado - fase de muestras patrón

Para realizar futuros ensayos (CBR), se requiere de solo una MDS y un CHO, el cual puede ser determinado como el promedio de los resultados obtenidos de analizar cada MF por separado, obteniendo como resultado una MDS de 1.692 g/cm^3 y un CHO de 18.2 %, dicho promedio se encuentra en la Tabla 15.

Se analizaron curvas de compactación particulares para cada muestra, pero ya que todas provienen del mismo lugar y han pasado por el mismo proceso de clasificación y cuarteo se puede considerar a todas las muestras para crear una sola curva de compactación con todos los datos registrados. Entonces, considerando cada par ordenado de CHO y MDS como dato se construye una curva de compactación llamada Curva de Compactación Total (CCT) presentada en la Figura 28; se nota que el par ordenado de color rojo correspondiente al CHO y MDS promedio (18.2 %, 1.692 g/cm^3) se posicionan ligeramente por encima de la curva de compactación total, la cual tiene como resultado de CHO y MDS 18.30 % y 1.685 g/cm^3 respectivamente (par ordenado de color naranja).

Figura 28

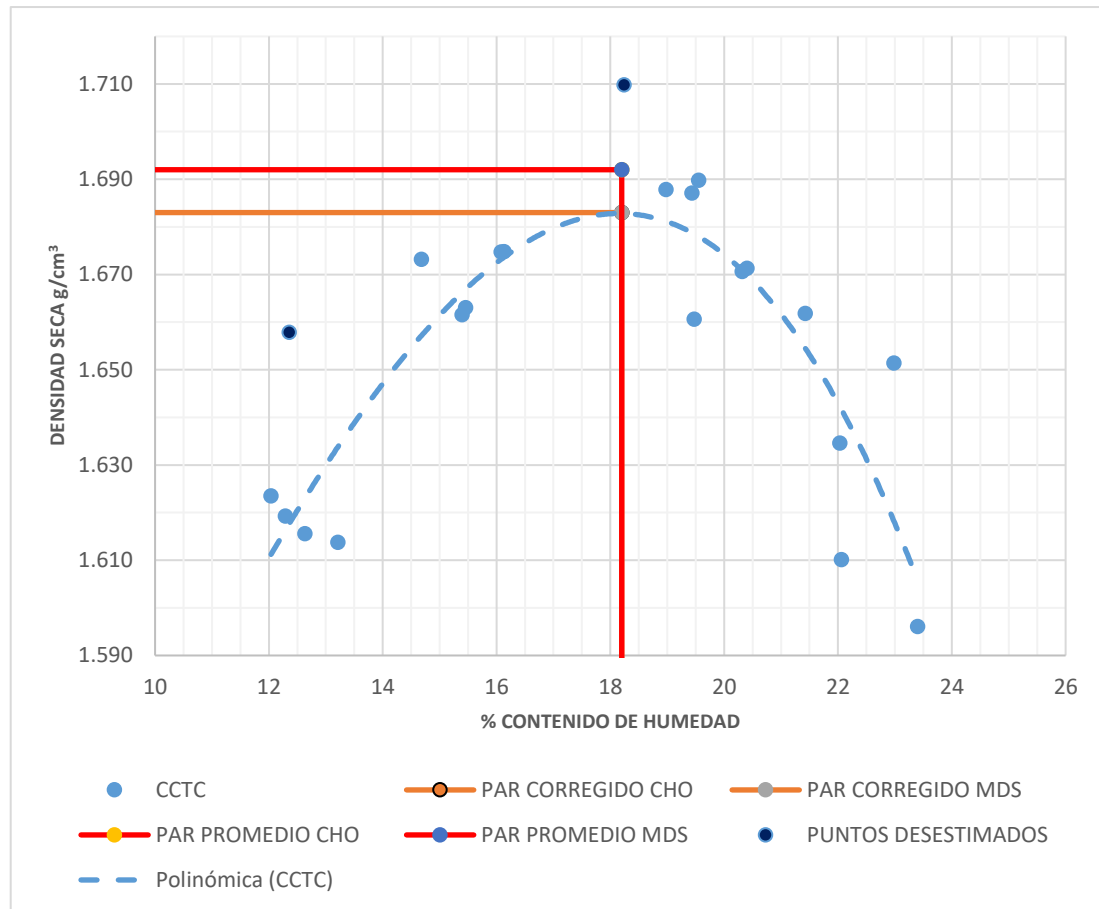
Curva de compactación total (CCT) para las muestras patrón.



La CCT presenta una curva con ciertas inclinaciones, lo cual se debe corregir y desestimar los valores que se encuentran muy dispersos a la nube principal de puntos. Siendo así, se retiran los puntos de los pares ordenados correspondientes a (12.36 %; 1.658 g/cm³) y (18.24 %; 1.710 g/cm³) con lo que se realiza una nueva curva de compactación denominada Curva de Compactación Total Corregida (CCTC), la cual se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Curva de compactación total corregida (CCTC) para las muestras patrón.

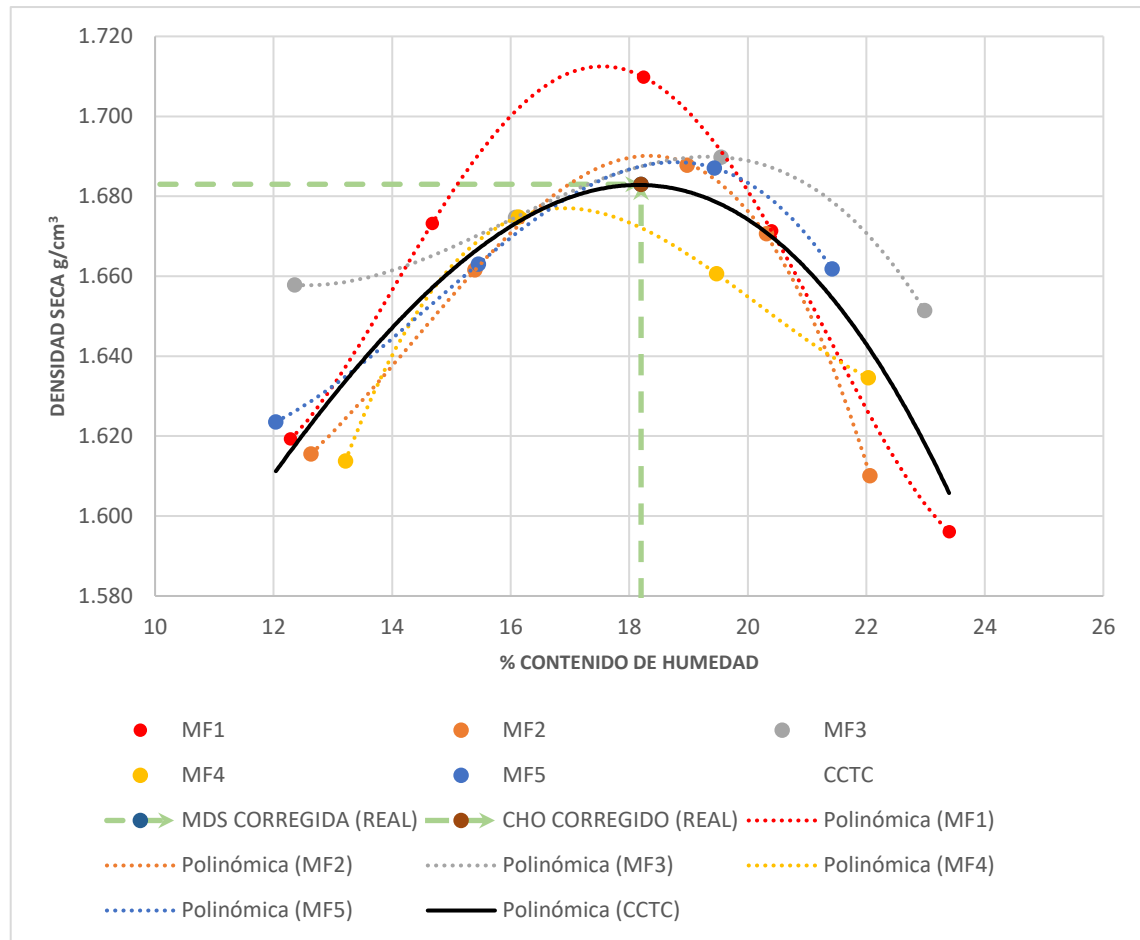


La CCTC muestra que el verdadero resultado de toda la fase de ensayos patrón de las muestras finales es el par ordenado de parámetros de compactación de CHO igual a 18.20 % y MDS igual a 1.683 g/cm³. Estos parámetros de compactación serán utilizados en el ensayo de CBR.

La Figura 30 muestra el compilado de curvas de compactación de los ensayos patrón, mostrando la variabilidad que existen entre estas, siendo la más disímil la curva de la muestra MF₁ (color rojo), de negro se puede observar la CCTC trazada.

Figura 30

Compilado de curvas de compactación patrón MF₁ a MF₅.

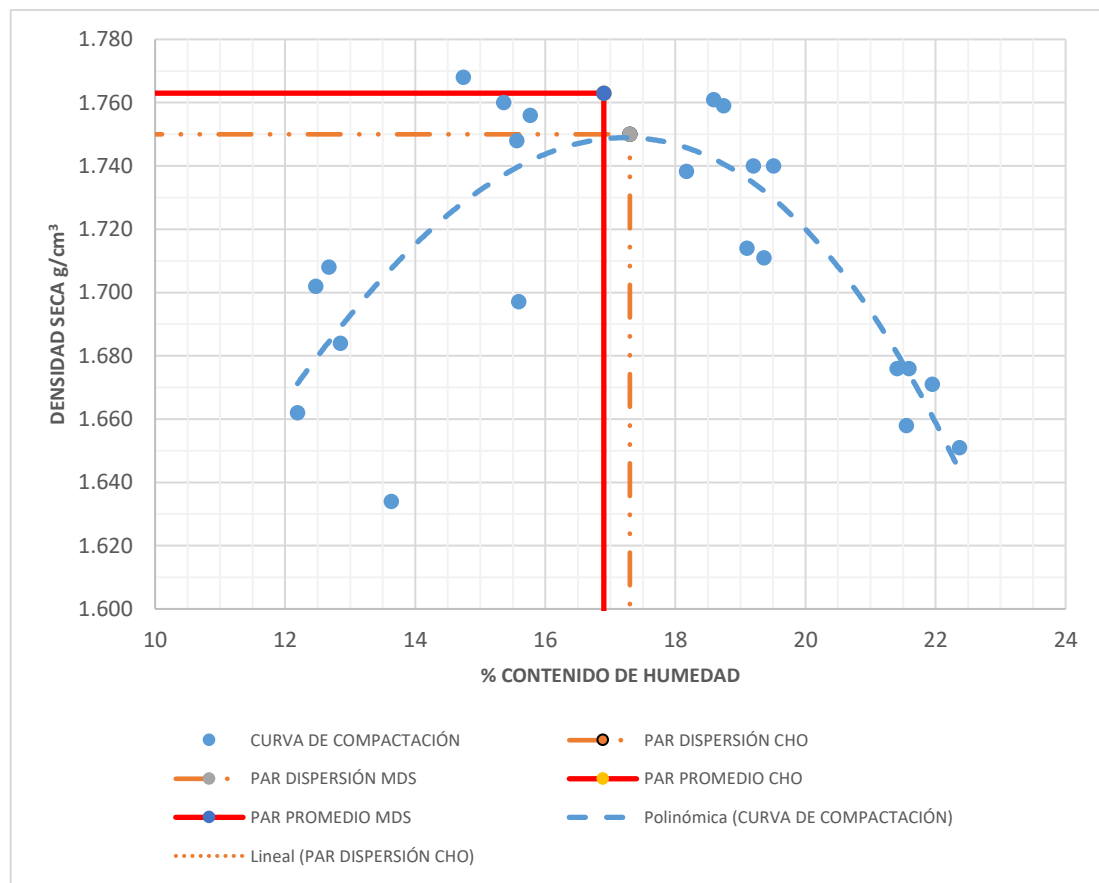


4.2.2 Ensayos de Proctor Modificado - fase de primera reutilización

De la misma manera que para la muestra patrón se realiza una CCT para estos resultados, teniendo así la curva presentada en la Figura 31; se nota que el par ordenado (de color rojo) de CHO y MDS promedio (16.9 %, 1.763 g/cm³) obtenidos en la Tabla 16, se posicionan ligeramente por encima de la curva de compactación total, la cual tiene como resultado de CHO y MDS 17.30 % y 1.750 g/cm³ respectivamente (representados con color naranja).

Figura 31

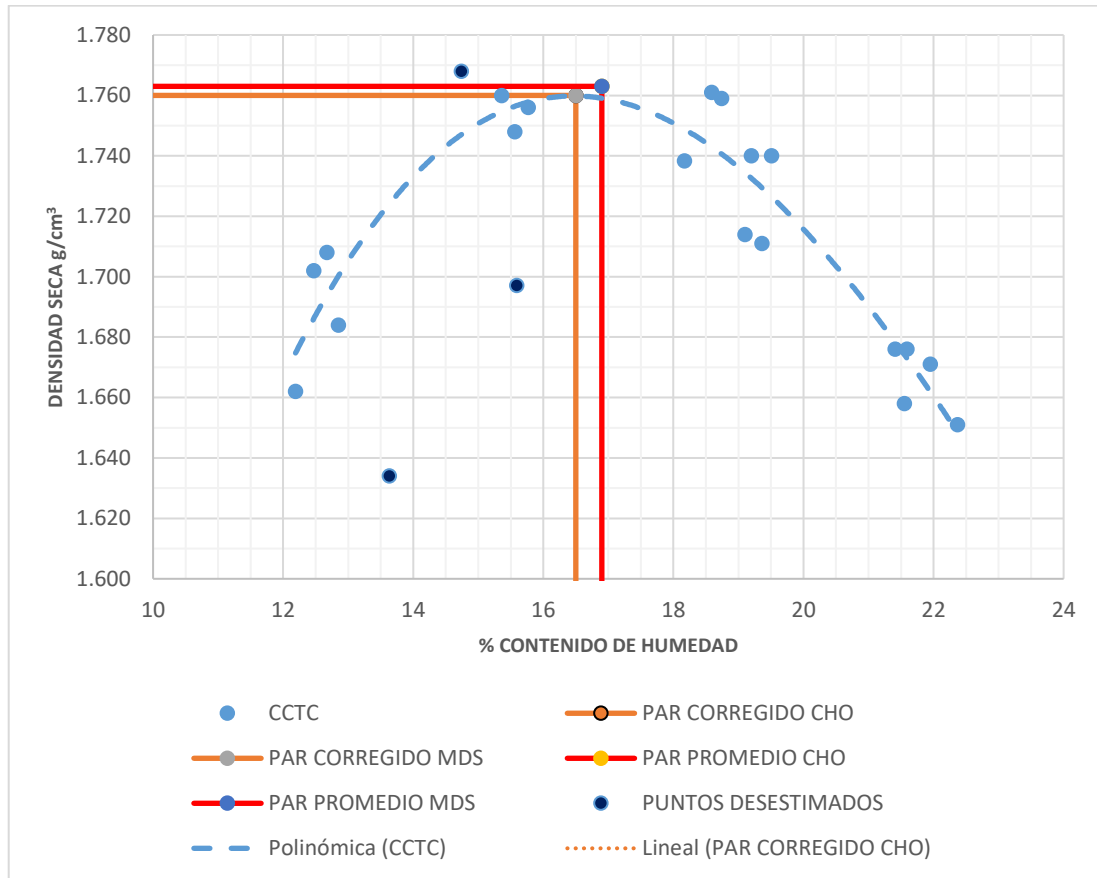
Curva de compactación total (CCT) para las muestras recompactadas por primera vez.



Se realiza entonces la corrección por sesgo o error, eliminando los puntos que se alejan más de la curva gráficamente. El resultado se presenta en la Figura 32. Con esta corrección se determinan nuevos parámetros de compactación, siendo estos: MDS igual a 1.760 g/cm^3 y CHO igual a 16.50% .

Figura 32

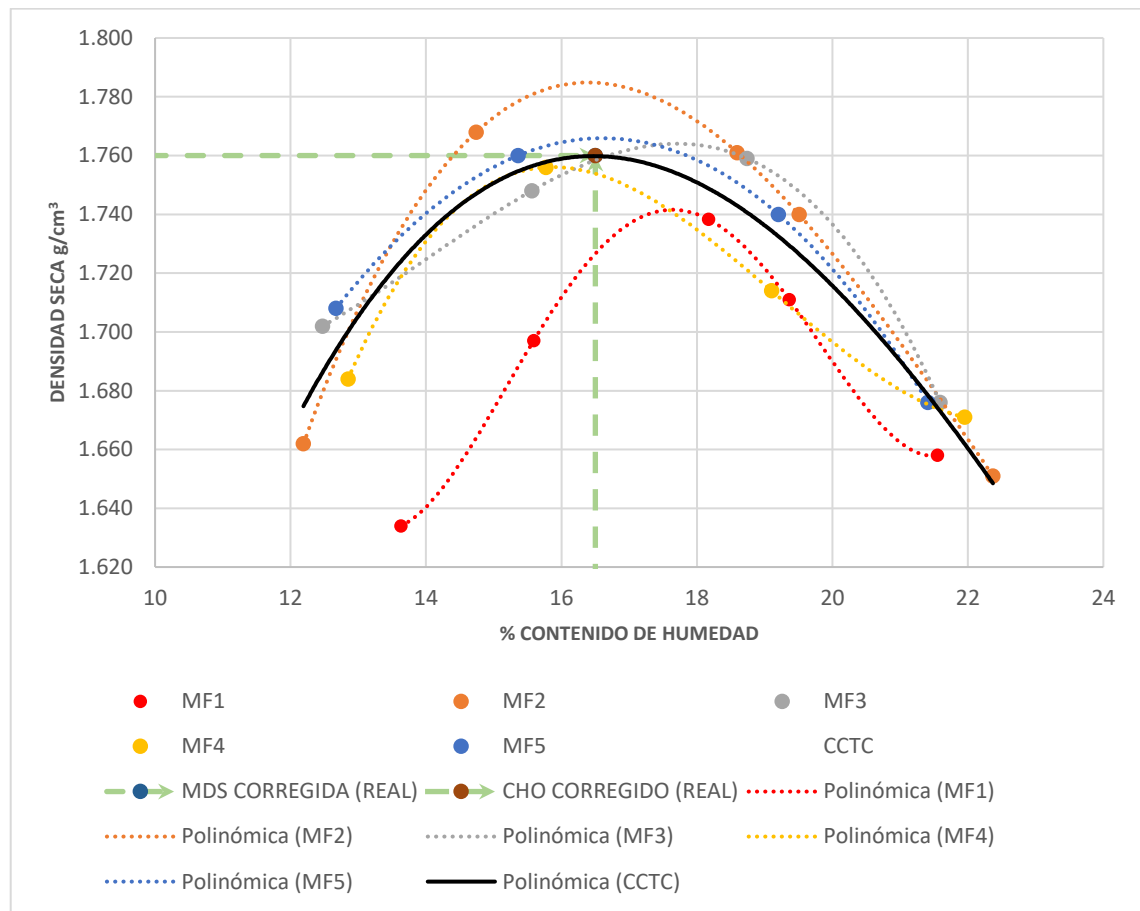
Curva de compactación total corregida (CCTC) para las muestras recompactadas por primera vez.



La Figura 33 muestra el compilado de curvas de compactación de la fase de ensayos en primera reutilización, mostrando la variabilidad que existen entre estas, del análisis visual se nota que la curva de la muestra MF₁ (línea punteada de color rojo) se queda relegada a las demás curvas, por contraparte la curva de compactación de la muestra MF₂ (línea punteada de color naranja) se encuentra ligeramente por encima de las demás curvas, de negro se puede observar la CCTC trazada.

Figura 33

Compilado de curvas para las muestras recompactadas por primera vez (MF_1R_1 a MF_5R_1).

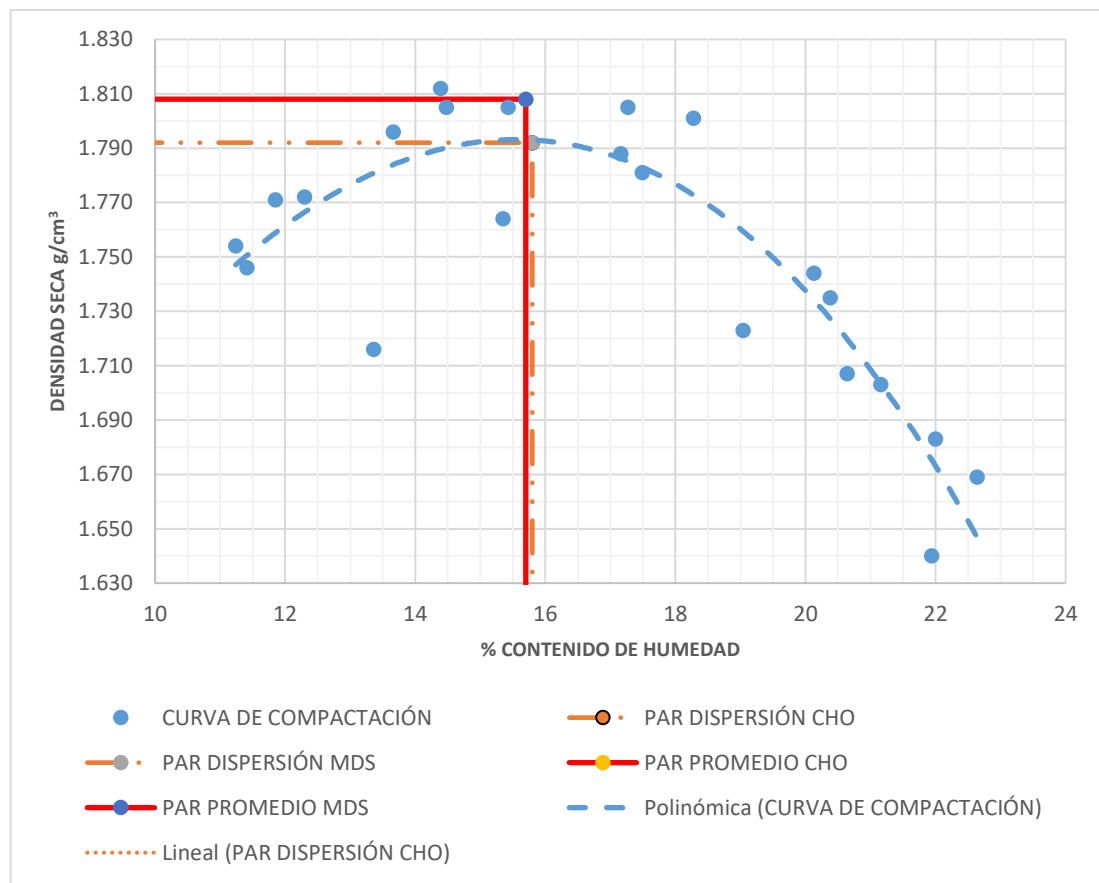


4.2.3 Ensayos de Proctor Modificado - fase de segunda reutilización

La CCT para estos resultados se aprecia en la Figura 34; se nota que el par ordenado (color rojo) de CHO y MDS promedio (15.7 %, 1.808 g/cm³), presentados en la Tabla 17, se posicionan por encima de la curva de compactación total, la cual tiene como resultado de CHO y MDS 15.80 % y 1.792 g/cm³ respectivamente (representados con color naranja).

Figura 34

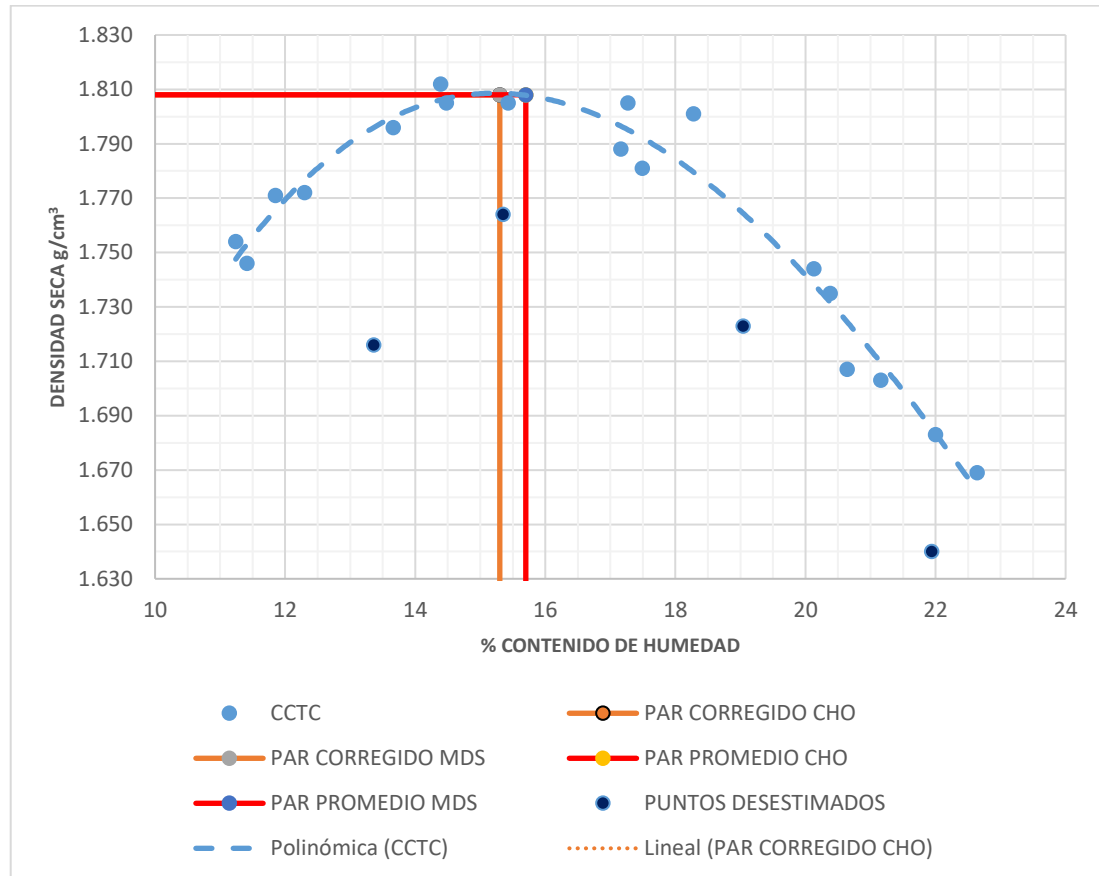
Curva de compactación total (CCT) para las muestras recompactadas por segunda vez.



Los pares ordenados eliminados para la segunda reutilización de material son el conjunto $\{(13.36; 1.716), (15.35; 1.764), (19.04; 1.723), (21.94; 1.640)\}$. El resultado se presenta en la Figura 35. Los nuevos parámetros de compactación son MDS igual a 1.808 g/cm³ y CHO igual a 15.30 %.

Figura 35

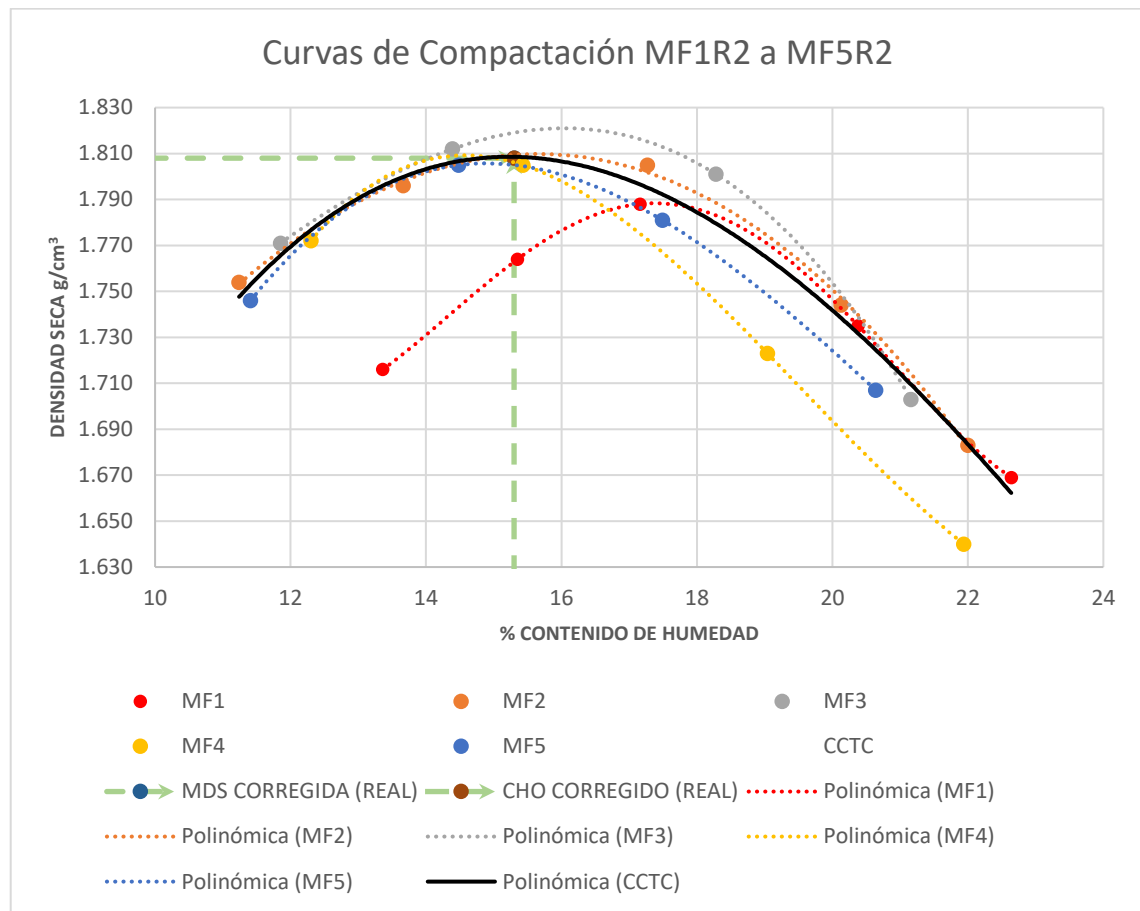
Curva de compactación total corregida (CCTC) para las muestras recompactadas por segunda vez.



El compilado de curvas de compactación de la fase de ensayos en segunda reutilización o recompactación se presenta en la Figura 36, se nota una pronunciada variabilidad entre la curva de la muestra MF₁ (línea punteada de color rojo) y las demás curvas, esta inicia su trazado muy por la derecha de las demás. La diferencia de esto último se puede explicar por fallos en la ejecución del ensayo, ya que, al ser la primera muestra ensayada, no se tenía la práctica adecuada para realizar este ensayo, se nota que en las demás muestras hay un orden más aceptable. De negro se puede observar la CCTC trazada, la cual se adecúa más a las demás curvas obtenidas.

Figura 36

Compilado de curvas para las muestras recompactadas por segunda vez (MF₁R₂ a MF₅R₂).

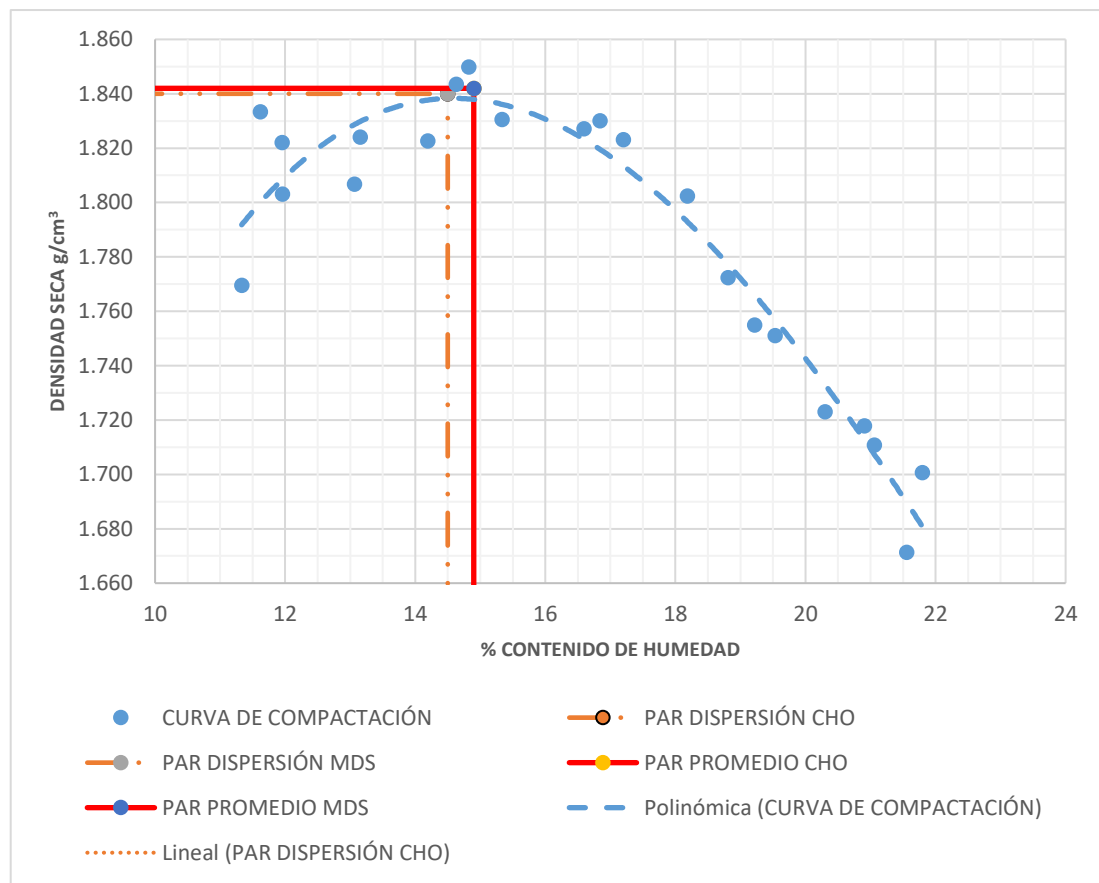


4.2.4 Ensayos de Proctor Modificado - fase de tercera reutilización

La última CCT se realiza para estos resultados, teniendo así la curva presentada en la Figura 37; de la misma manera que en los anteriores casos se nota que el par ordenado de color rojo presenta el CHO y MDS promedio (14.9 %, 1.842g/cm³) se posicionan demasiado ligeramente por encima de la curva de compactación total, la cual tiene como resultado las líneas de color naranja que representan a un CHO y MDS de 14.50 % y 1.840 g/cm³ respectivamente.

Figura 37

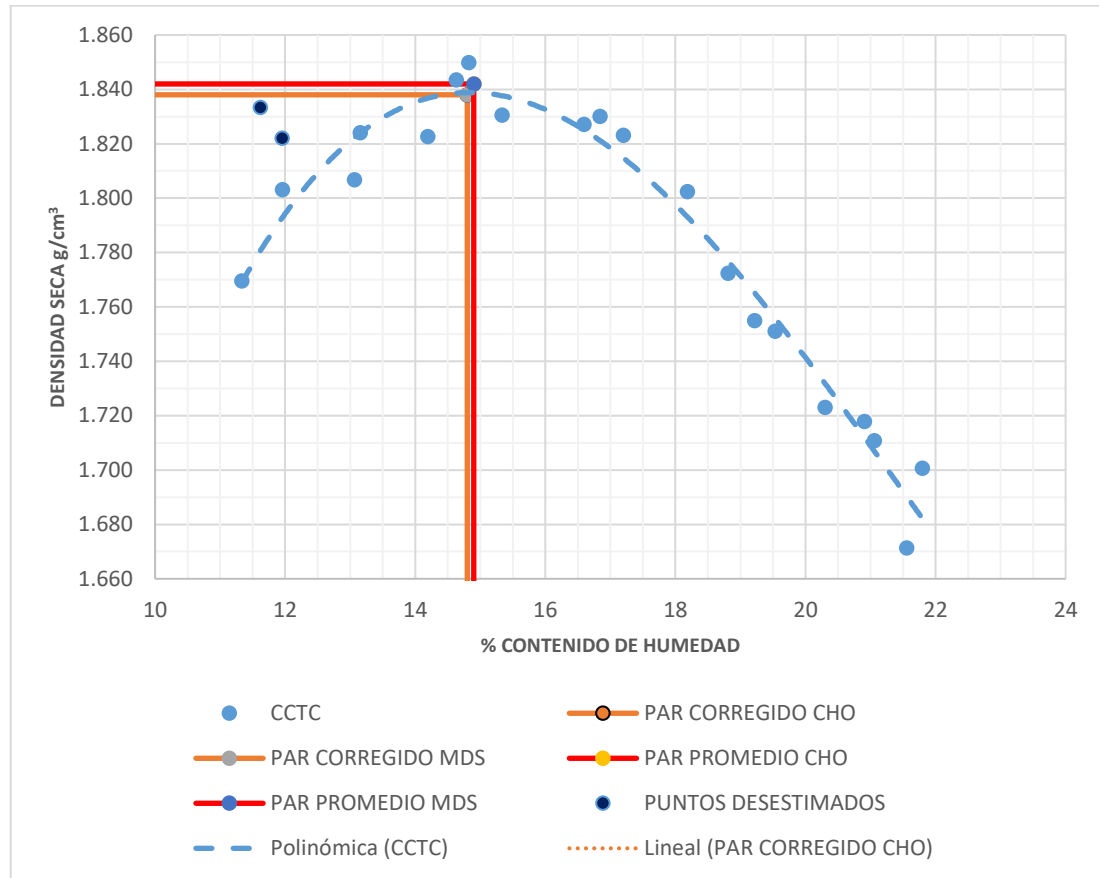
Curva de compactación total (CCT) para las muestras recompactadas por tercera vez.



Se eliminan los puntos que se alejan más de la curva gráficamente (los pares ordenados: (11.62, 1.833) y (11.95, 1.822)), ya que pueden deberse a un error de manipulación o error humano al momento de realizar los ensayos. El resultado final después de esta eliminación se presenta en la Figura 38. Los nuevos parámetros de compactación son de MDS igual a 1.838 g/cm³ y CHO igual a 14.80 %.

Figura 38

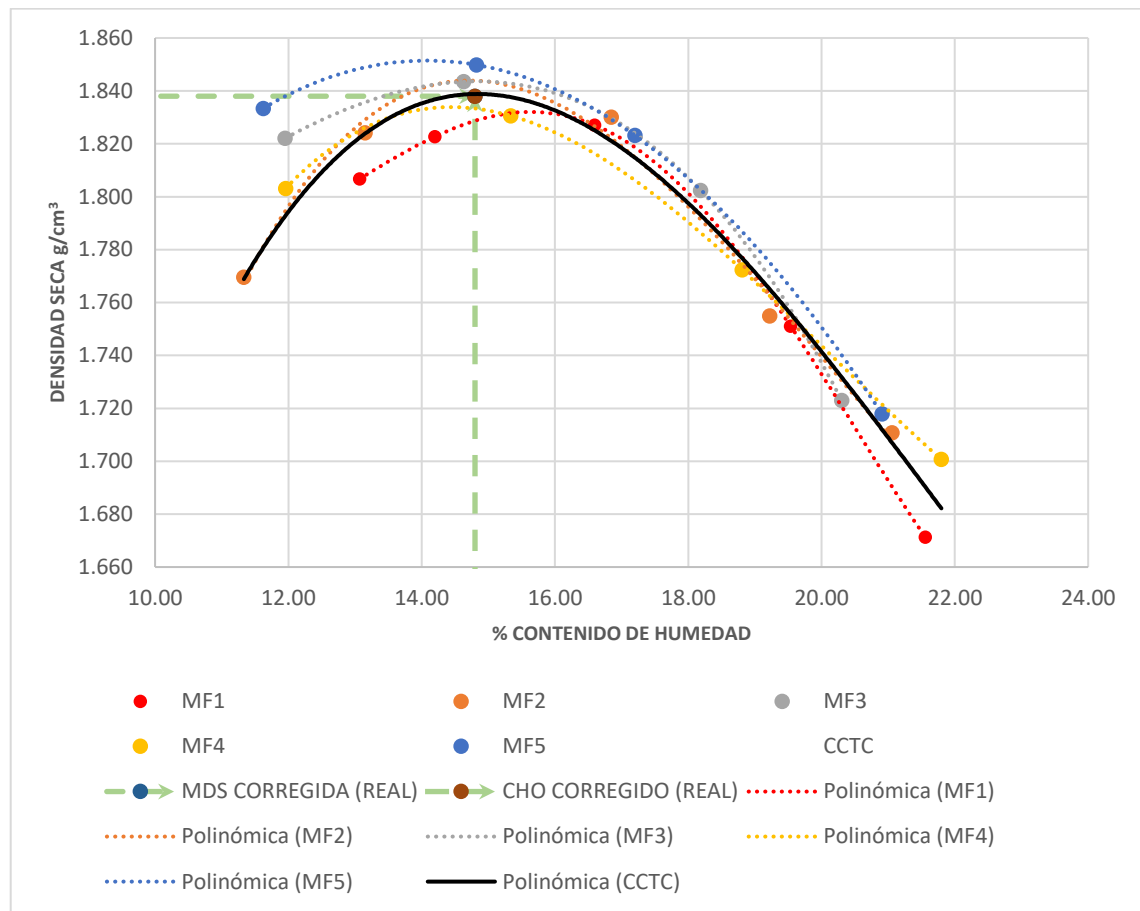
Curva de compactación total corregida (CCTC) para las muestras recompactadas por tercera vez.



El último compilado de curvas de compactación correspondiente a la fase de ensayos en tercera o última recompactación se presenta en la Figura 39, en este gráfico se aprecia que todas las curvas incluida la CCTC (curva de color negro) tienen correlación entre ellas, lo que se explica por la continuidad de los ensayos y la habilidad ganada después de realizarlos.

Figura 39

Compilado de curvas para las muestras recompactadas por tercera vez (MF_1R_3 a MF_5R_3).



4.2.5 Discusión general sobre los resultados de recompactación

El resumen de resultados de todos los ensayos de Proctor modificado se presenta en la Tabla 19, en la zona inferior se encuentran el promedio de los resultados respectivos y los resultados corregidos, después de la eliminación de resultados por sesgo. Nótese la diferencia entre los resultados a medida que aumentan las reutilizaciones, por tanto, importa conocer dicho crecimiento, para poder predecir y relacionar el efecto que tiene el número de reutilizaciones en los parámetros de compactación, la misma tabla muestra la diferencia en los parámetros de compactación de reutilización a reutilización, y la diferencia total (muestra patrón y muestra reutilizada por tercera vez).

Tabla 19

Resumen general de resultados de los ensayos de Proctor Modificado con sus incrementos de reutilización a reutilización.

MUESTRA	PARÁMETRO DE COMPACTACIÓN	PATRÓN	REUTILIZACIÓN			INCREMENTOS			%	
			1	2	3	REUT. 1	REUT. 2	REUT. 3		TOTAL
MF1	MDS (g/cm ³)	1.713	1.742	1.788	1.832	0.029	0.046	0.044	0.119	7%
	CHO (%)	17.6	17.7	17.3	15.8	0.1	-0.4	-1.5	-1.8	-10%
MF2	MDS (g/cm ³)	1.690	1.785	1.813	1.850	0.095	0.028	0.037	0.160	9%
	CHO (%)	18.4	16.4	15.9	15.2	-2.0	-0.5	-0.7	-3.2	-17%
MF3	MDS (g/cm ³)	1.690	1.764	1.821	1.844	0.074	0.057	0.023	0.154	9%
	CHO (%)	19.2	17.7	16.0	14.9	-1.5	-1.7	-1.1	-4.3	-22%
MF4	MDS (g/cm ³)	1.677	1.756	1.810	1.833	0.079	0.054	0.023	0.156	9%
	CHO (%)	16.9	15.8	14.5	14.3	-1.1	-1.3	-0.2	-2.6	-15%
MF5	MDS (g/cm ³)	1.688	1.766	1.806	1.852	0.078	0.040	0.046	0.164	10%
	CHO (%)	18.9	16.7	14.9	14.1	-2.2	-1.8	-0.8	-4.8	-25%

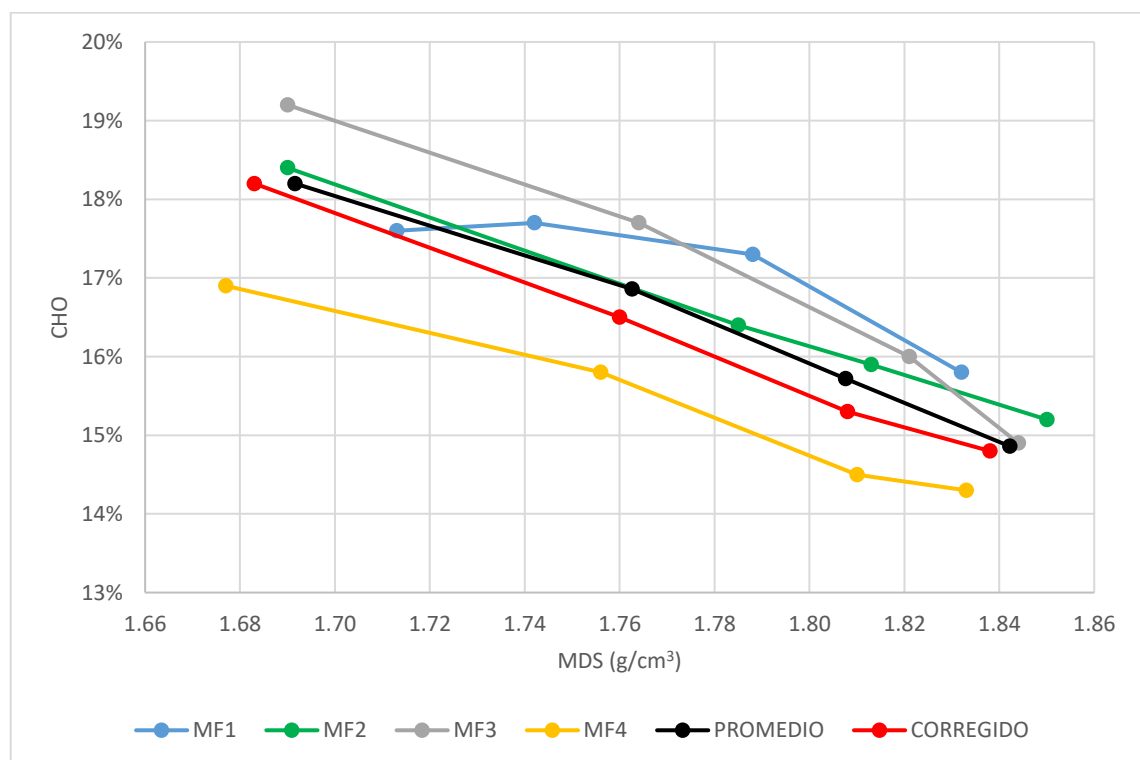


MUESTRA	PARÁMETRO DE COMPACTACIÓN	PATRÓN	REUTILIZACIÓN			INCREMENTOS				
			1	2	3	REUT. 1	REUT. 2	REUT. 3	TOTAL	%
PROMEDIO	MDS (g/cm ³)	1.692	1.763	1.808	1.842	0.071	0.045	0.035	0.151	0.071
	CHO (%)	18.2	16.9	15.7	14.9	-1.3	-1.1	-0.9	-3.3	-1.3%
CORREGIDO	MDS (g/cm ³)	1.683	1.760	1.808	1.838	0.077	0.048	0.030	0.155	9%
	CHO (%)	18.2	16.5	15.3	14.8	-1.7	-1.2	-0.5	-3.4	-19%

En la Figura 40 se puede observar el comportamiento de la MDS y el CHO, que van de izquierda a derecha a medida que aumentan las reutilizaciones del material, nótese que mientras las reutilizaciones aumentan, la máxima densidad seca también, en cambio el contenido de humedad óptimo decrece. Se nota que el mayor salto en la MDS se da en la primera reutilización, este primer aumento es aproximadamente de 0.08 g/cm^3 . La línea de resultado (CHO vs MDS) en la que se debe tener mayor atención es la de color rojo, que presenta los valores de MDS y CHO corregidos; en adición se obtiene que el aumento total de la MDS desde la muestra patrón hasta su última reutilización es de 0.155 g/cm^3 o un 9 %, en contraparte el CHO final decrece en total 3.4 % del CHO inicial, este valor representa un 19 % del valor original.

Figura 40

Comparativa de resultados Proctor Modificado.



4.3 RESULTADOS DE LAS ECUACIONES DE CORRELACIÓN

Con los resultados presentados en la Tabla 19, y mediante el método de mínimos cuadrados se construyen las líneas de tendencia y se calculan las ecuaciones que relacionan los parámetros de compactación (y) con el número de recompactaciones hechas (x); también en los gráficos se presenta el valor del coeficiente de determinación (R^2), el cual como ya se explicó, mientras más cercano esté a la unidad mayor veracidad dará a la relación y ecuación calculada. Estos gráficos se presentan desde la Figura 41 hasta la Figura 58.

Figura 41

Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF1.

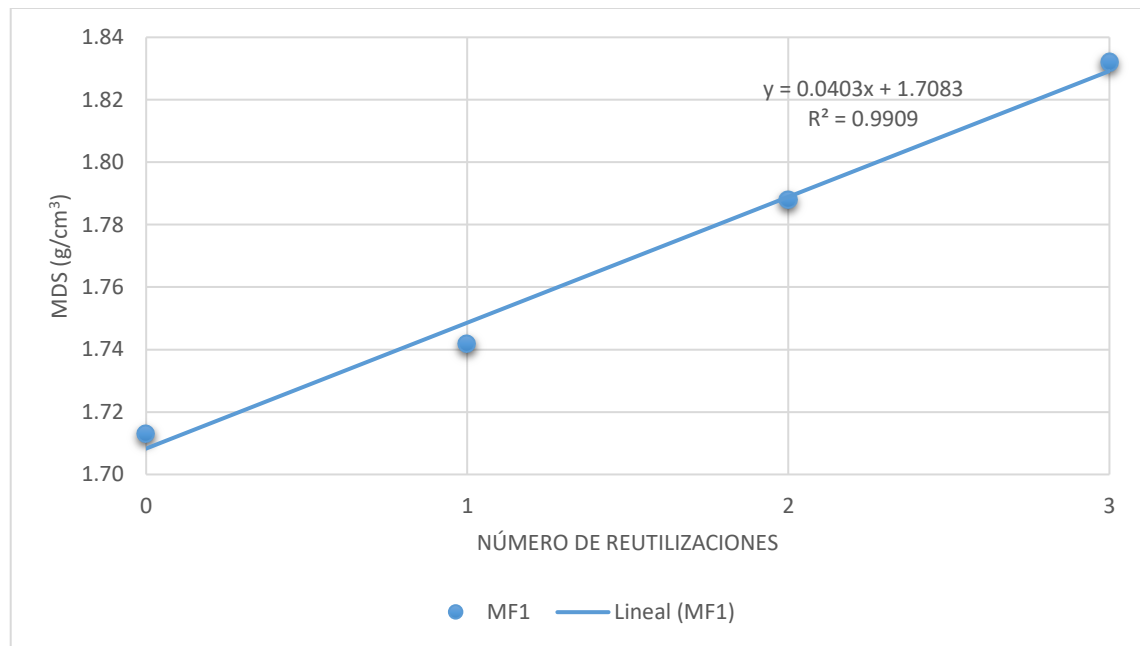


Figura 42

Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra

MF₁.

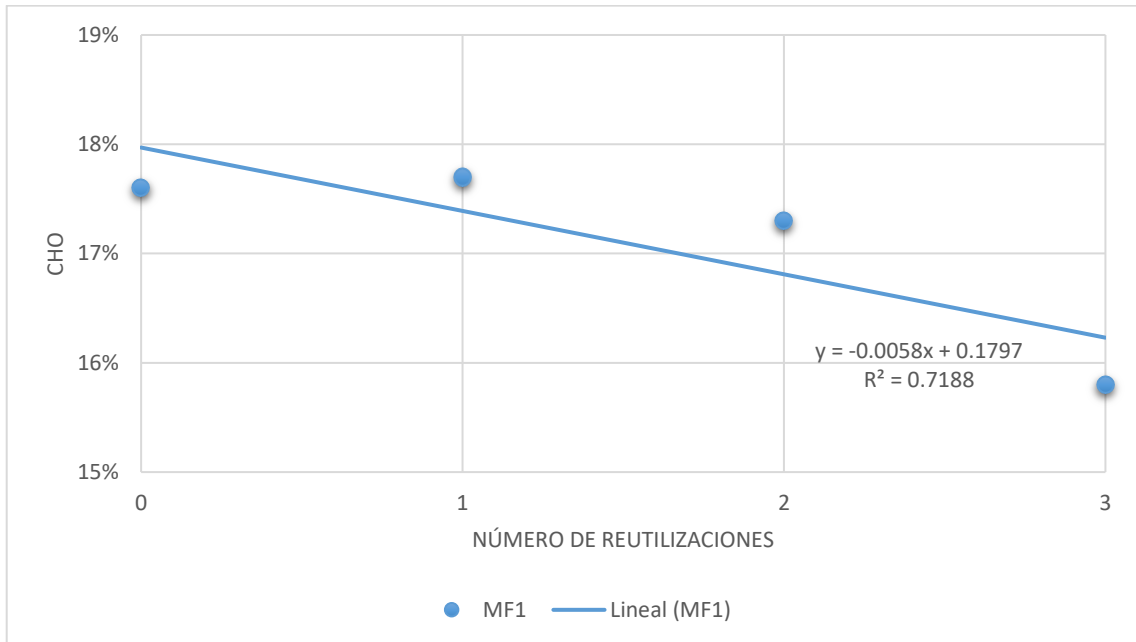


Figura 43

Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para

la muestra MF₁.

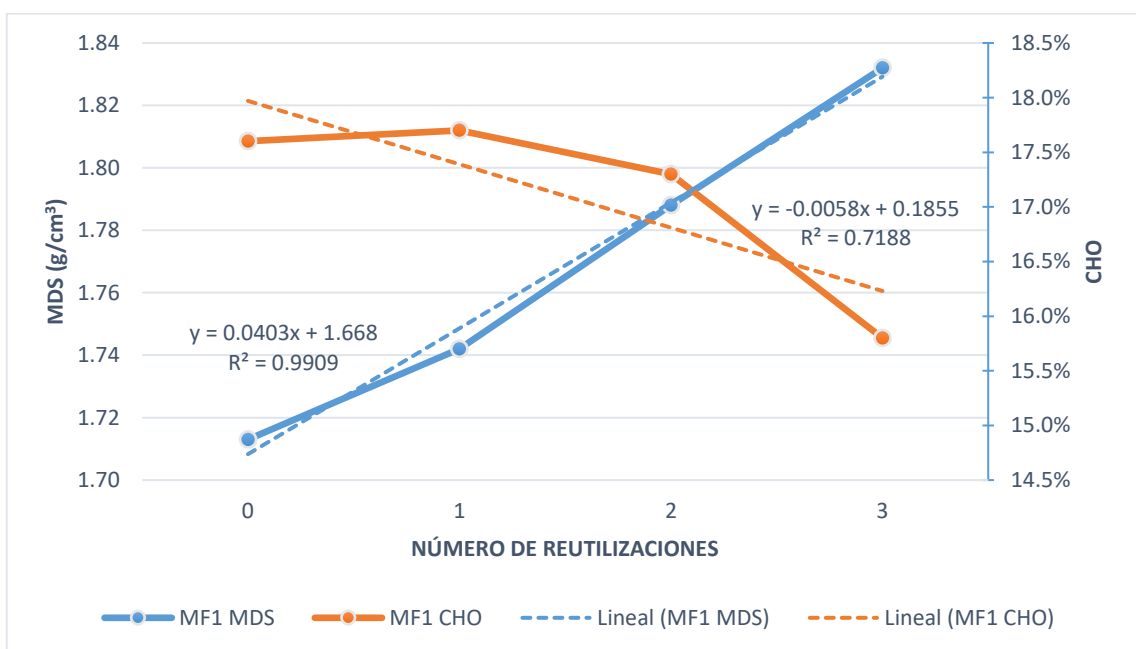


Figura 44

Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra

MF₂.

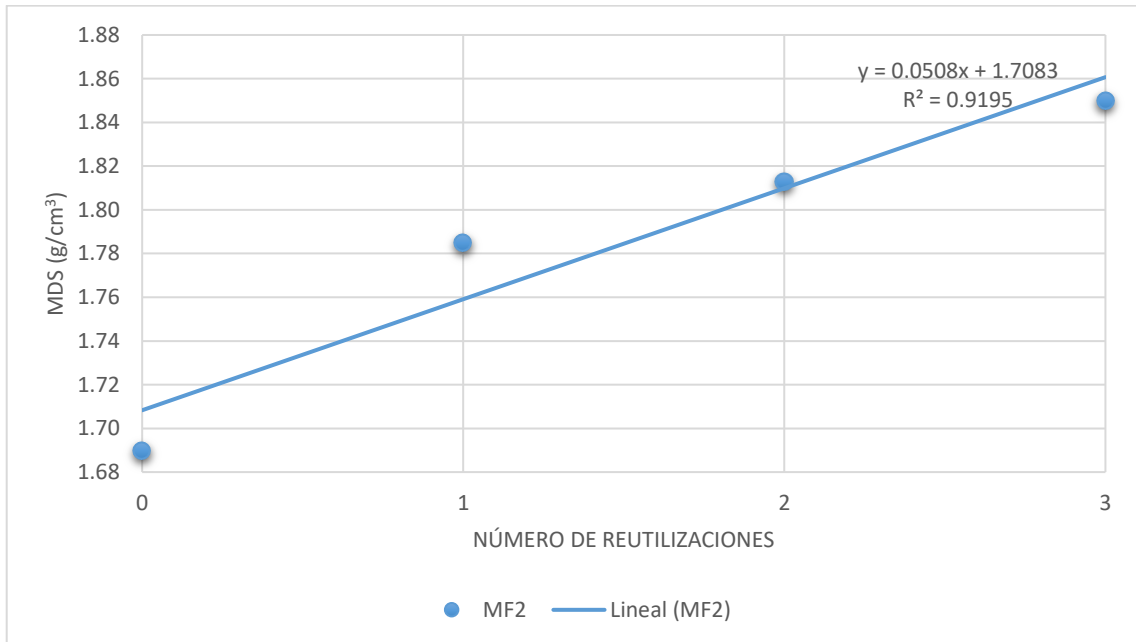


Figura 45

Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra

MF₂.

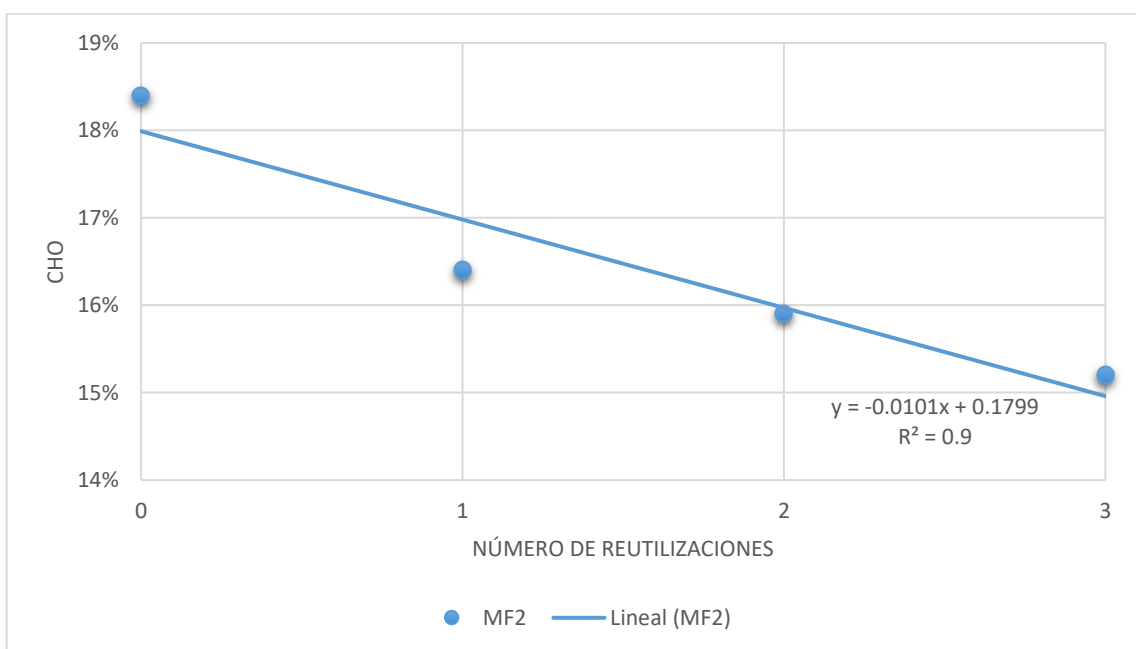


Figura 46

Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF₂.

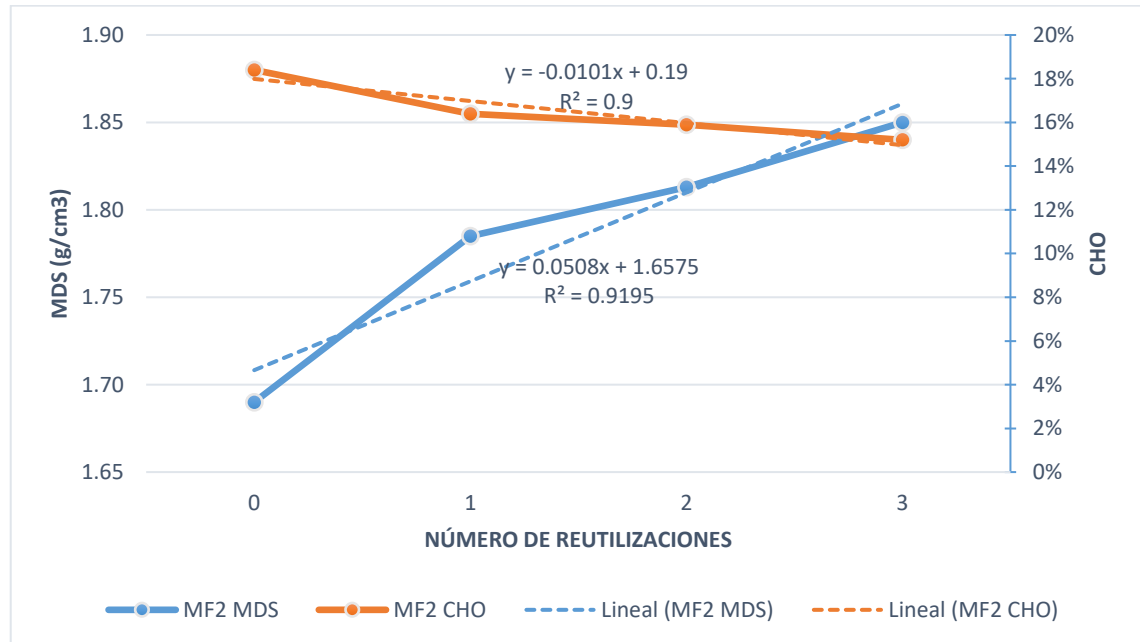


Figura 47

Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF₃.

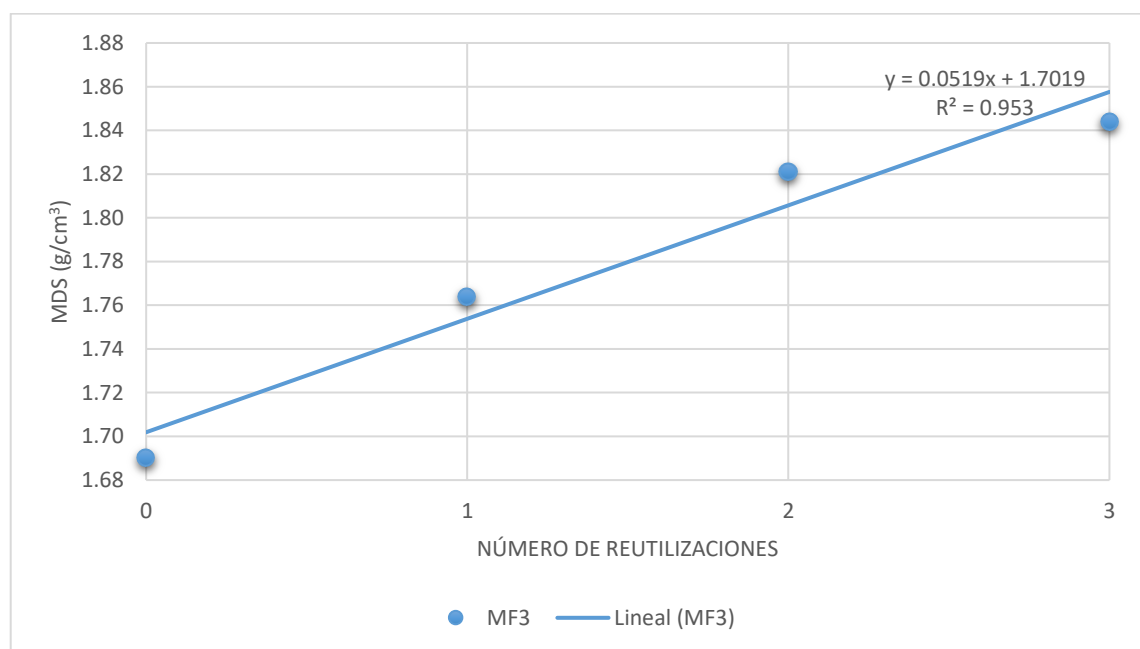


Figura 48

Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra

MF₃.

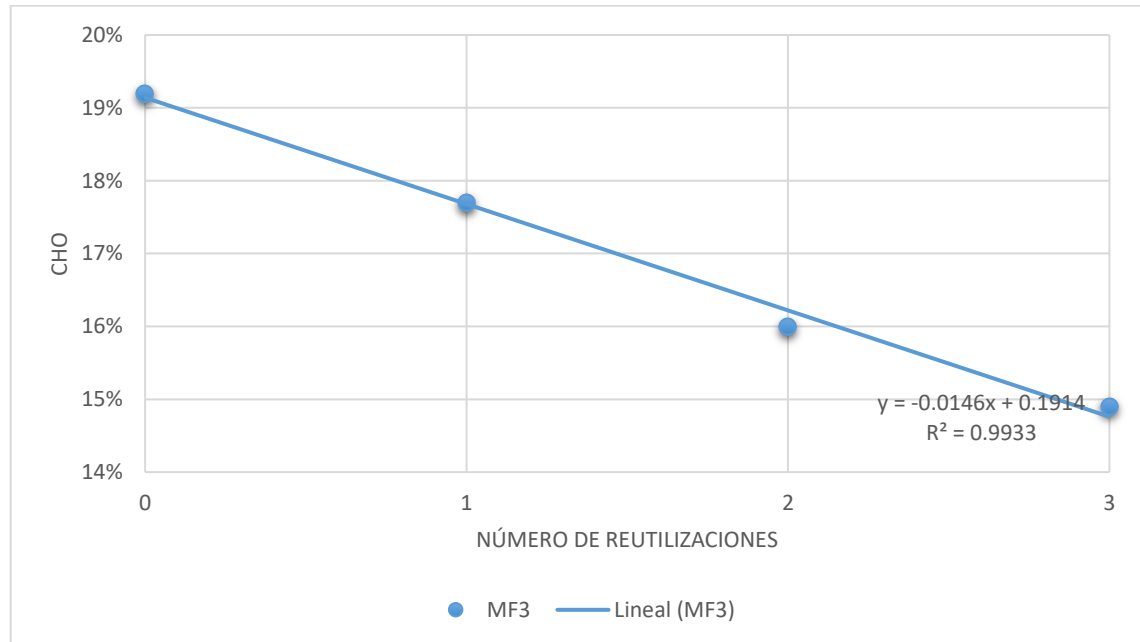


Figura 49

Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para

la muestra MF₃.

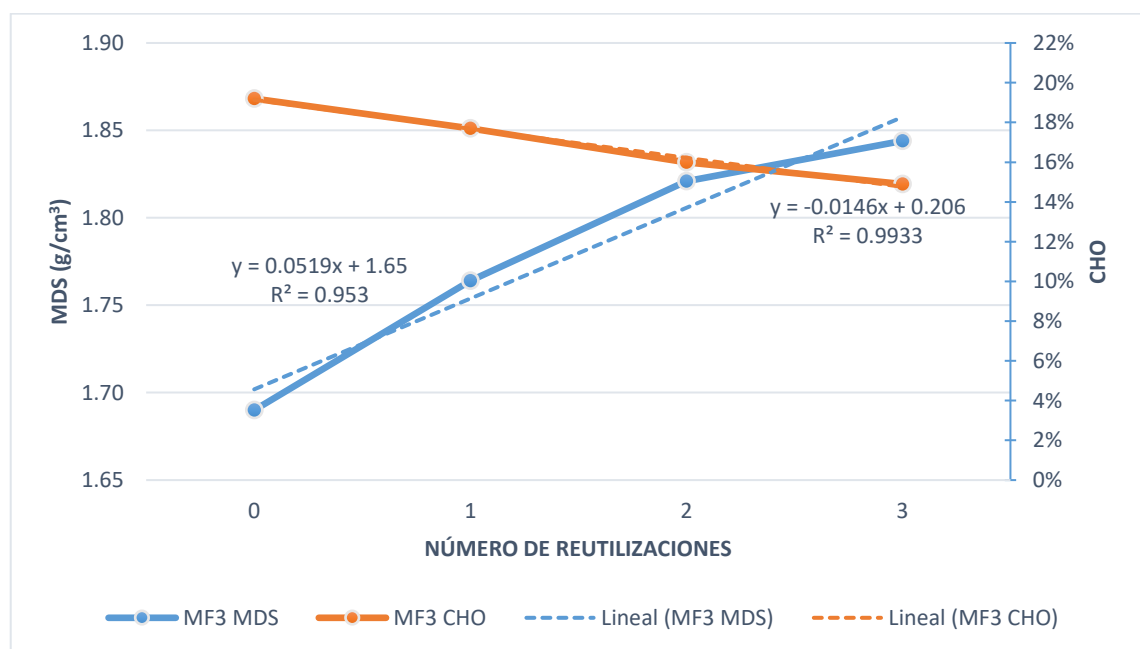


Figura 50

Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra

MF₄.

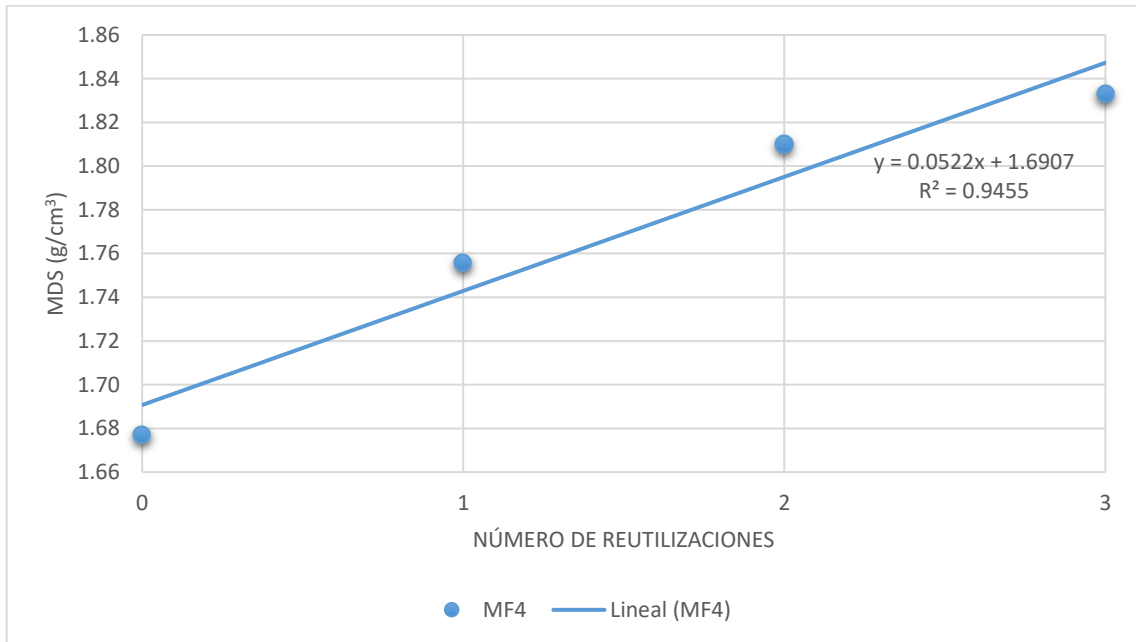


Figura 51

Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra

MF₄.

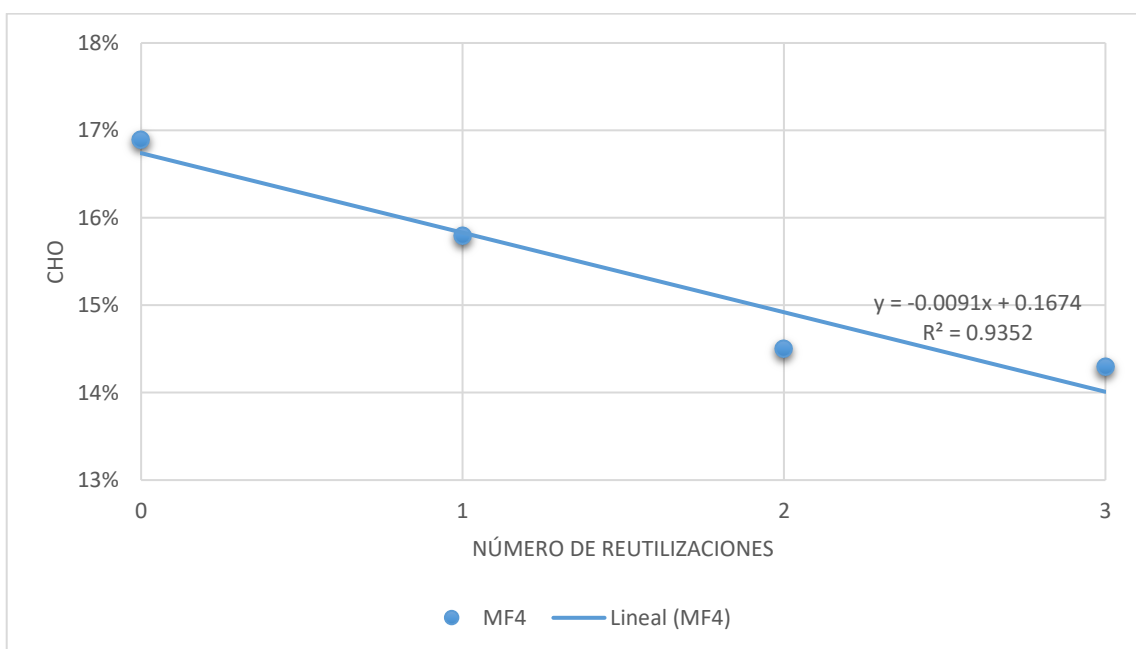


Figura 52

Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF4.

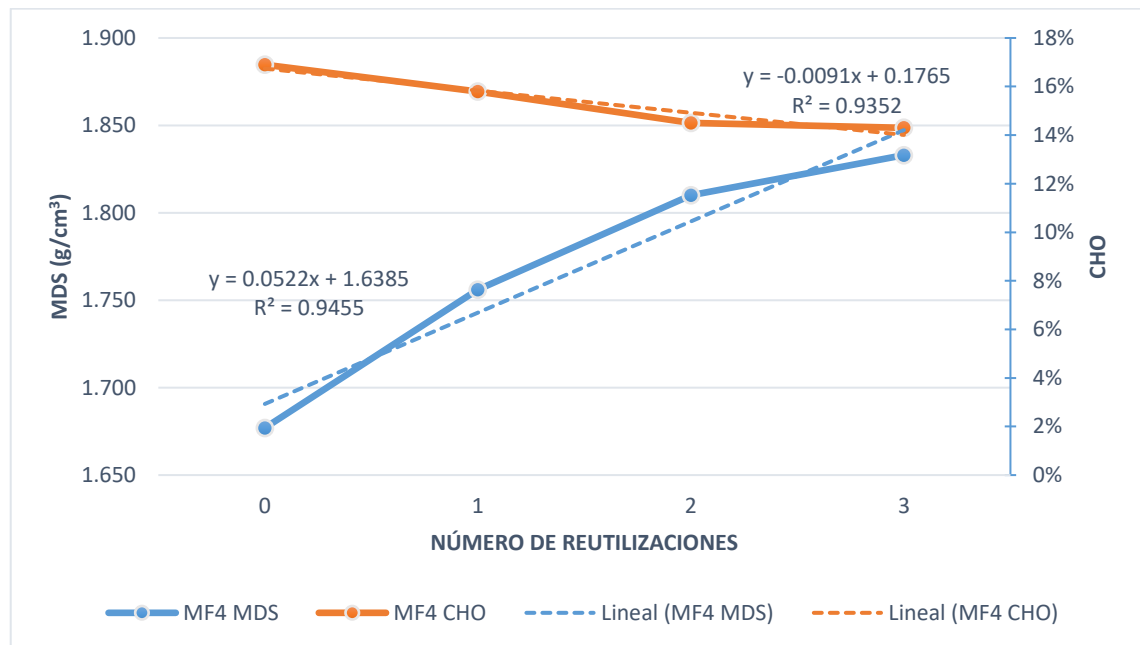


Figura 53

Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF5.

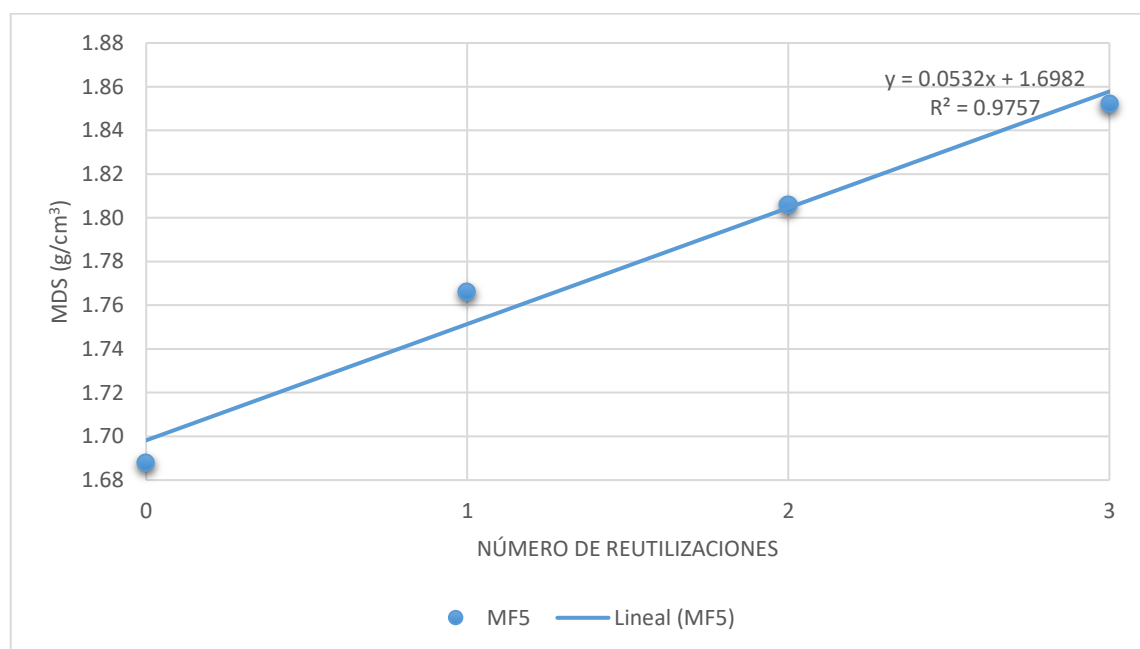


Figura 54

Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra

MF₅.

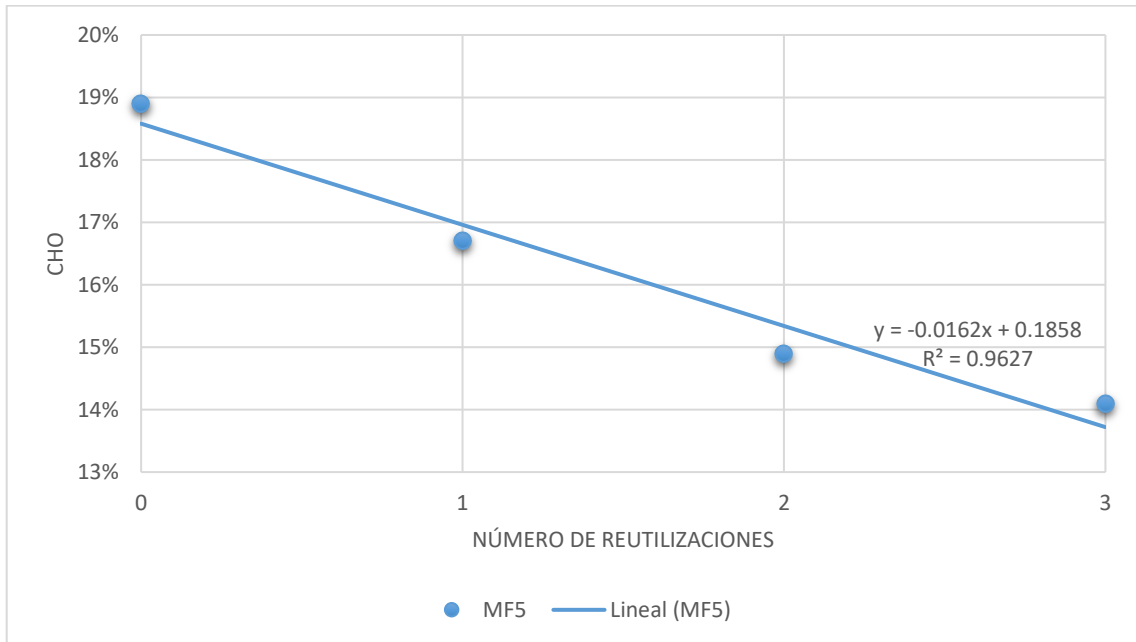


Figura 55

Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para

la muestra MF₅.

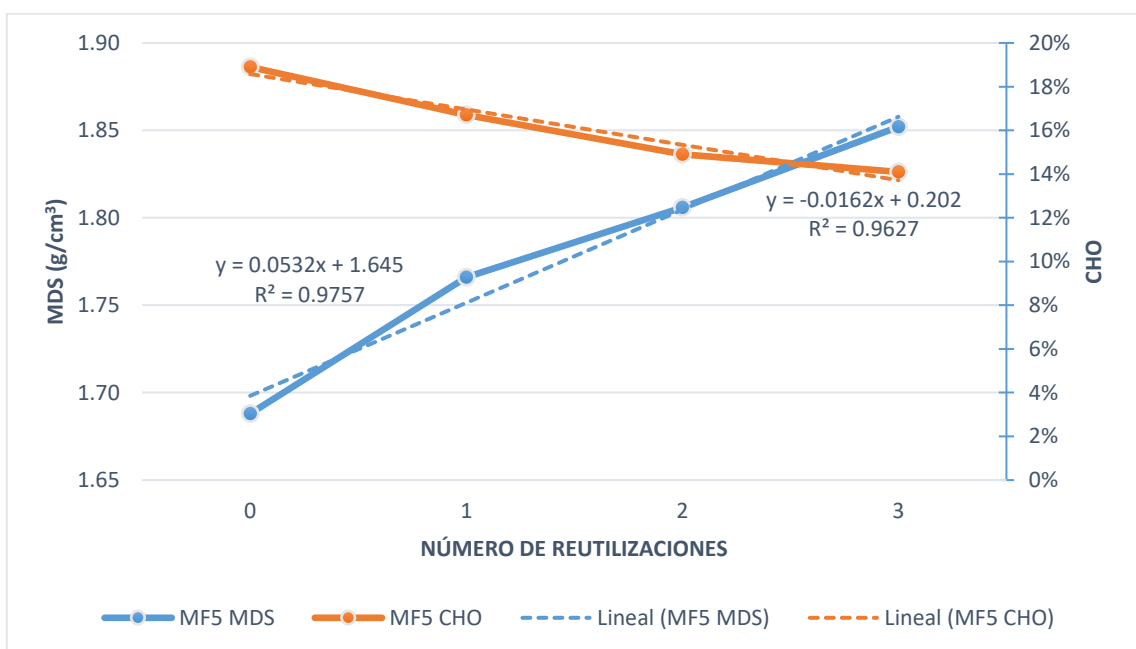


Figura 56

Correlación entre la MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF corregida.

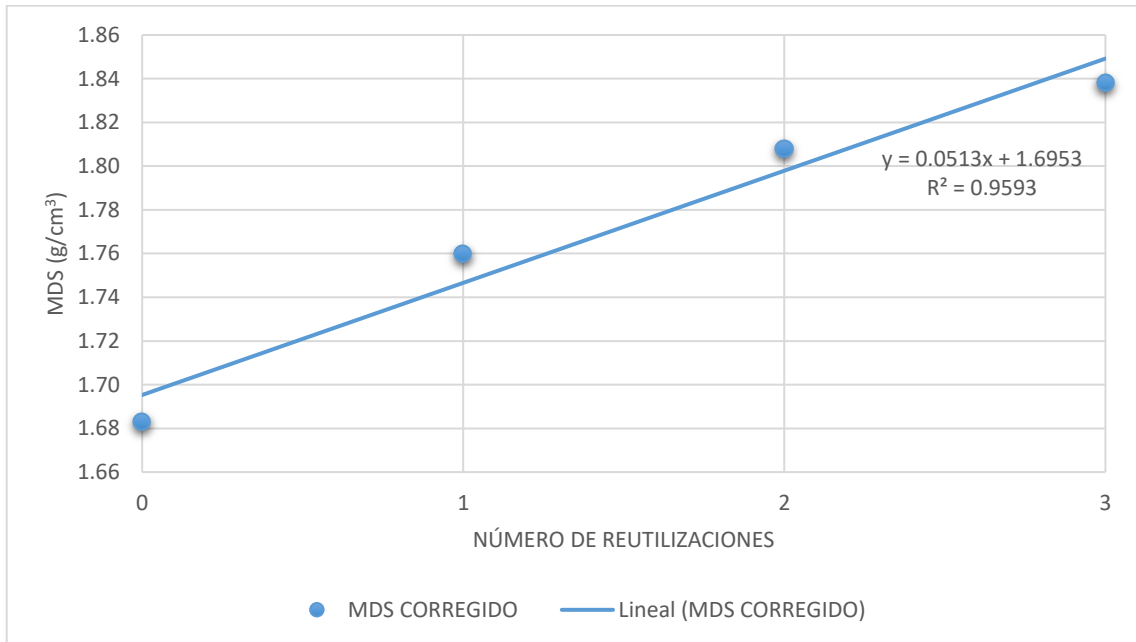


Figura 57

Correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF corregida.

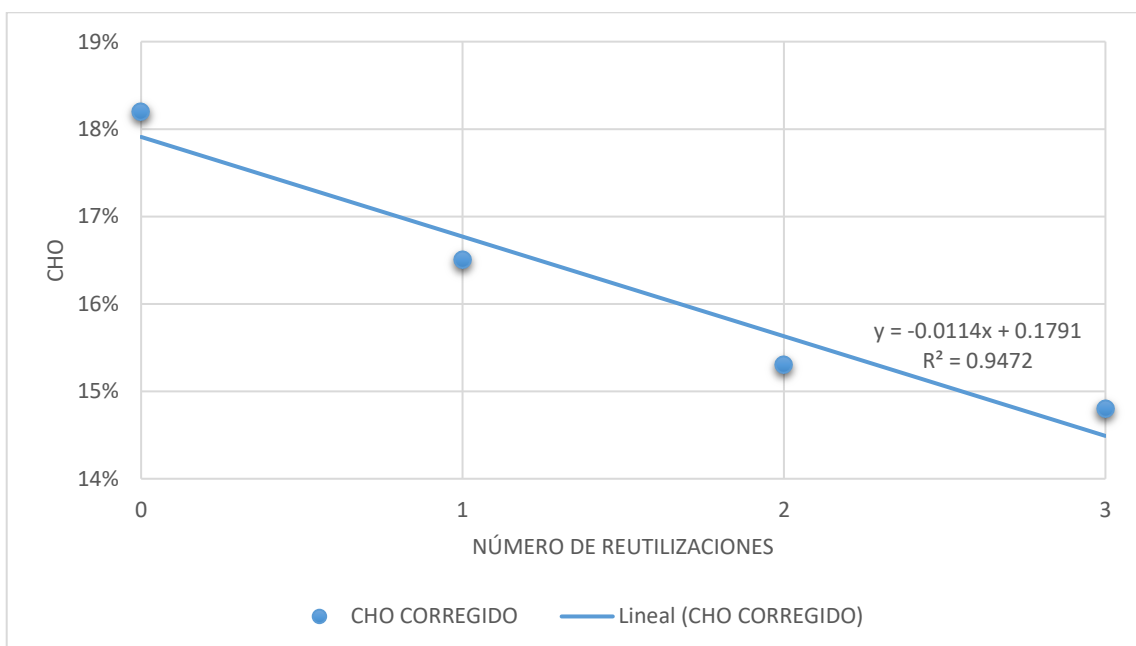
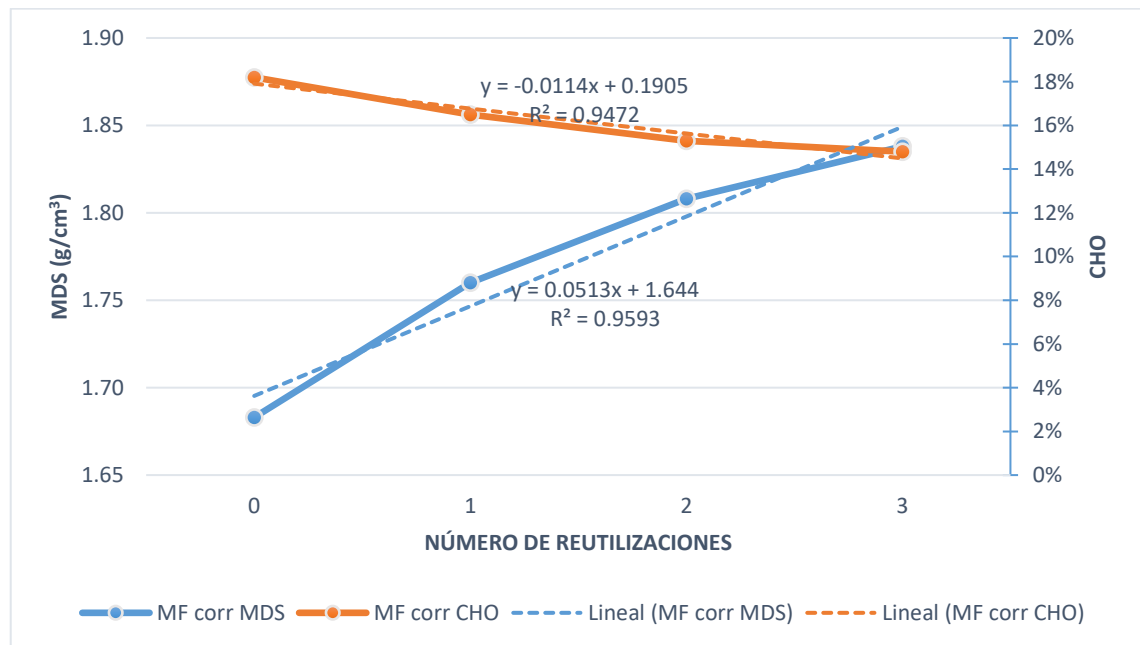


Figura 58

Correlación doble entre el CHO, MDS y el número de reutilizaciones realizadas para la muestra MF corregida.



4.4 DISCUSIÓN DE LAS ECUACIONES DE CORRELACIÓN

4.4.1 Máxima densidad seca y número de reutilizaciones

Al revisar los resultados obtenidos referentes a la MDS podemos notar que el valor de R^2 en todos los casos analizados es superior a 0.910, correspondiendo esto a una tipología de correlación MUY ALTA.

Se presta especial atención a los resultados corregidos, que son los que mayor precisión tienen con respecto a los ensayos realizados, de la misma manera se cataloga que la MDS y el número de reutilizaciones tienen una correlación MUY ALTA ($R^2 = 0.9593$).

4.4.2 Contenido de humedad óptimo y número de reutilizaciones

Los resultados obtenidos referentes al CHO indican que todos los valores de R^2 a excepción de la muestra MF₁ son superiores a 0.900, correspondiendo esto a una tipología de correlación MUY ALTA. En cambio, la muestra MF₁ muestra que la correlación entre el CHO y el número de reutilizaciones es simplemente ALTA.

Los resultados corregidos para el CHO indican que este tiene una correlación MUY ALTA con el número de reutilizaciones hechas, correspondiente a un $R^2 = 0.9472$.

4.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CBR

Se trabajan los resultados del ensayo de CBR con base en los resultados corregidos del ensayo de Proctor Modificado para las muestras patrón y para las muestras reutilizadas por tercera vez.

La Tabla 20 muestra los resultados del CBR al 95 % de la MDS; para las muestras patrón y reutilizada por tercera vez.

Tabla 20

Resultados del ensayo CBR.

Tipo de muestra	CBR (al 95 % de la MDS)	Categoría como Sub rasante
Patrón	68.1 %	Excelente
Recompactada por tercera vez	39.8 %	Excelente

4.6 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CBR

Al realizar los ensayos en la muestra patrón se nota una gran capacidad de soporte, catalogando al material granular de la cantera Challavilqui como “excelente”, a pesar de

que el suelo se cataloga como excelente, se nota una disminución de este, siendo así que la recompactación es algo perjudicial para el suelo en estudio.

El caso del CBR al 95 % de la MDS exhibe que el resultado de la muestra recompactada por tercera vez representa el 58.44 % del resultado de CBR patrón, implicando una pérdida en porcentaje de 41.56 % respecto al CBR patrón.

Tomando esta base se puede sacar una línea general de la disminución de suelos sometidos a tres reutilizaciones, la Tabla 21 muestra estas probables pérdidas a resultados de CBR característicos.

Tabla 21

Resultados de CBR característicos esperados después de tres reutilizaciones.

Categoría de Sub rasante	CBR (%)	CBR después de 3 reutilizaciones	Nueva Categoría de Sub Rasante
Inadecuada	< 3	< 1.75	Inadecuada
Insuficiente	3 a 6	1.75 a 3.51	Inadecuada
Regular	6 a 10	3.51 a 5.84	Inadecuada a Insuficiente
Buena	10 a 20	5.84 a 11.69	Insuficiente a Regular
Muy buena	20 a 30	11.69 a 17.53	Buena
Excelente	> 30	> 17.53	Buena
--	100	58.44	Excelente

4.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE GRANULOMETRÍA POST COMPACTACIÓN

Una vez terminados los ensayos de caracterización del suelo destinado a material para conformación de estructura vial, se realiza un contraste con la propiedad básica de la granulometría, los resultados de los ensayos de laboratorio se pueden consultar en el Anexo 2.

Se seleccionaron cinco muestras previamente compactadas (reutilizadas 3 veces) al azar y se las sometió al ensayo de clasificación granulométrica. Se nota en la Tabla 22 que todas las muestras tienen una nueva clasificación de SM (SUCS) y A-2-4 (0) para AASHTO.

Tabla 22

Resultados granulométricos de las muestras después de las reutilizaciones.

Muestra	% Humedad	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO
MF ₁	14		
MF ₂	18		
MF ₃	20	SM, Arenas limosas con grava	A-2-4 (0)
MF ₄	14		
MF ₅	20		

Se realiza una comparativa con los porcentajes retenidos en los tamices específicos para los ensayos de Proctor Modificado y CBR cuyo resultado se presenta en la Tabla 23.

Tabla 23

Comparativa de gradación para ensayo de Proctor Modificado y CBR.

Tamiz	% Retenido acumulado	% Retenido acumulado post recompactación				
		MF ₁	MF ₂	MF ₃	MF ₄	MF ₅
3/4 in	-	-	-	-	-	-
3/8 in	31.30	11.15	14.98	18.02	10.58	13.38
N°4	57.60	26.05	31.41	34.46	24.16	28.09
Fondo	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

La Figura 59 exhibe la fracturación mencionada en dos muestras sometida a la compactación y en proceso de escarificado manual; se puede apreciar la fracturación de algunas partículas de estos especímenes.

Figura 59

Fracturación de partículas en los especímenes.



Nota: a la izquierda se puede observar una muestra después de ser sometida a compactación y a la derecha una muestra antes de ser sometida a compactación, que se trituró mientras se preparaba la muestra.

4.8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN RESPECTO AL CONTROL DE CALIDAD

Según lo expuesto en la sección teórica, existen controles de calidad aplicados a las estructuras viales construidas. La Tabla 24, muestra los límites de control propuesto por las normativas peruanas vigentes comparados con los resultados obtenidos en la ejecución de este trabajo de investigación.

Tabla 24

Requisitos de calidad y límites de control propuestos por la normativa peruana.

Indicador de Calidad	Resultado (investigación)	Requisito (según normativa)	Cumple	Normativa Vigente
Granulometría	A-1	A-1	Sí	MTC E 107
Límite Líquido	31.30 %	Máx. 35 %	Sí	MTC E 110
Índice de Plasticidad	8.40 %	De 4 a 9 %	Sí	MTC E 111
CBR	68.10 %	Mín. 40 %	Sí	MTC E 132
Desgaste Los Ángeles	49 %	Máx. 50 %	Sí	MTC E 207
Densidad en campo	Densidad de ensayo:	Cumplir con densidad de ensayo (laboratorio)	--	MTC E 117, MTC E 124
Humedad en campo	Humedad de ensayo:	Cumplir con densidad de ensayo (laboratorio)	--	MTC E 117, MTC E 124

Si bien existe un ensayo para determinar el valor de CBR en campo, las normativas peruanas actuales no contemplan su uso, tan solo recomiendan verificar la densidad de campo (método de cono de arena, método nuclear), y la humedad en campo (método nuclear, método tradicional con horno). Los resultados obtenidos en esta investigación en la parte de CBR demuestran que es necesario realizar ensayos de control de CBR en los suelos recompactados, ya que este disminuye a medida que se aumenta el número de compactaciones realizadas.

4.9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS FISICOQUÍMICOS

Las propiedades químicas del suelo también son necesarias para ciertos trabajos de ingeniería, en este caso se realizaron dos paquetes de ensayos de control fisicoquímico en la muestra patrón (MF₁) y en la muestra recompactada final (MF₁R₃) en el “Laboratorio de Control de Calidad” de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA Puno los certificados que validan los resultados de estos ensayos químicos se presentan en el Anexo 7. La Tabla 25, muestra los resultados y su comparativa respectiva.

Tabla 25

Resultados de los ensayos fisicoquímicos.

Parámetros fisicoquímicos	Unidad	MF ₁	MF ₁ R ₃	Diferencia
Potencial de hidrógeno	pH	6.78	6.78	0.00
Conductividad Eléctrica	μS/cm	64.70	64.71	0.01
Cloruros como Cl ⁻	ppm	119.26	120.62	1.36
Sulfatos como SO ₄ ⁼	ppm	4.30	4.80	0.50
Sales Solubles Totales	ppm	39.45	39.48	0.03

Según los resultados obtenidos se observa una disminución mínima entre los diferentes parámetros evaluados. La principal diferencia se nota en el contenido de cloruros, el cual aumenta debido al uso de agua potable durante la ejecución del proyecto de tesis al momento de humectar el suelo para que llegue a su CHO.

4.10 RESUMEN DE RESULTADOS FINAL

El material granular de la cantera Challavilqui fue evaluado y procesado según la metodología presentada en el capítulo tres. Se registran los cambios que sufre el material a lo largo de los procesos, en este sentido los resultados nos guían a que el material pierde



ciertas propiedades debido a su reutilización, a continuación, en la Tabla 26 se presentan las propiedades perdidas.

Tabla 26

Resumen de propiedades perdidas.

DESCRIPCIÓN	MUESTRA PATRÓN	MUESTRA REUTILIZADA POR TERCERA VEZ	PORCENTAJE DE DISMINUCIÓN (%)
MDS	1.683 g/cm ³	1.838 g/cm ³	-9.21
CHO	18.20 %	14.80 %	18.68
CBR	68.10 %	39.80 %	41.56
GRANULOMETRÍA	GP-GM	SM	No aplica

Viendo estas características podemos asegurar que el material granular de la cantera Challavilqui a pesar de ser afectado y mermado en algunas propiedades debido a la reutilización al finalizar aún mantiene propiedades aceptables en las normativas peruanas. El principal requisito para asegurar un correcto desempeño de un material reutilizado es que su porcentaje de CBR no sea menor a 10.27 %.



V. CONCLUSIONES

La investigación realizada comprueba que existe una relación entre el número de reutilizaciones de material previamente compactado y los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platería, la influencia de esta correlación se cataloga como “muy alta”. En tal sentido la reutilización de material compactado incrementa la máxima densidad seca y disminuye el contenido de humedad óptimo del suelo, siendo este patrón progresivo a medida que se reutiliza el material; también se determina que existe una relación matemática entre el número de recompactaciones y la máxima densidad seca. Lo anterior permite desestimar la hipótesis general planteada, ya que la reutilización de material compactado no incrementa todos los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui, solo la máxima densidad seca. No obstante, esto no excluye que la reutilización del suelo compactado modifique algunas propiedades del suelo. En este sentido el estudio permite dar el siguiente análisis:

La máxima densidad seca (MDS) del suelo proveniente de la cantera Challavilqui en estado natural es de 1.683 g/cm^3 , esta máxima densidad seca aumenta según las reutilizaciones hechas, un 4.6 % en la primera (1.760 g/cm^3), 2.9 % en la segunda (1.808 g/cm^3) y en la tercera solo un 1.8 % (1.838 g/cm^3), esto se explica principalmente a que los espacios vacíos del suelo cada vez son menos, y sus partículas internas se van condensando cada vez más; en total, tras tres reutilizaciones del material granular, la máxima densidad seca aumenta un 9 % respecto a la muestra patrón. Siendo así que la primera hipótesis específica se valida.

En el caso del contenido de humedad óptimo (CHO) del suelo proveniente de la cantera Challavilqui se tiene que en estado natural es de 18.20 %, este contenido de



humedad óptimo disminuye según las reutilizaciones hechas, un 9.3 % en la primera (16.50 %), un 6.6 % en la segunda (15.30 %) y en la última solo un 2.7 % (14.80 %), esto se debe a que el material cada vez se encuentra más denso y al tener menos espacios vacíos no permite el ingreso de partículas de agua a su estructura interna; en total, el contenido de humedad tras las tres reutilizaciones hechas disminuye un 19 % respecto a la muestra patrón. Dando esto a que la segunda hipótesis específica no se valide, debido a que sí existe una variación en el contenido de humedad óptimo.

Se concluye que existe una relación matemática entre el número de recompactaciones y la máxima densidad seca del suelo proveniente de la cantera Challavilqui, la cual toma la siguiente forma: $y = 0.0513x + 1.6953$, en donde “y” representa la máxima densidad seca y “x” el número de reutilización llevado a cabo, ya que el suelo se compacta y se densifica a medida que se reutiliza el material granular. Asimismo, existe una relación matemática entre el número de recompactaciones y contenido de humedad óptimo del suelo, ya que este disminuye mientras más se reutiliza el material granular, debido a que la densidad del suelo y su compacidad ya no permite el paso de agua a sus espacios vacíos internos siendo estos últimos mínimos; la fórmula en mención toma la siguiente forma: $y = -0.0114x + 0.1791$, en donde “y” representa el contenido de humedad óptimo y “x” el número de reutilización llevado a cabo.

El valor del CBR del material estudiado es de 68.1 %, y si bien la máxima densidad seca aumenta tras las reutilizaciones, y se logra una disminución del agua necesaria para llegar a este valor, entendiéndose un ahorro de agua; el valor del CBR se ve mermado, llegando a ser el nuevo valor de CBR igual a 39.8 %, se demuestra que este valor de la muestra recompactada por tercera vez representa solo el 58.44 % del resultado de CBR patrón, implicando una pérdida en porcentaje de 41.56 % respecto a este último. La disminución del CBR perjudica enormemente a la obra vial en la que se emplea al



material granular, ya que el hecho de realizar una recompactación disminuye en más de la mitad al CBR de diseño, lo cual afecta a la mayoría de los materiales granulares con categoría de subrasante buena o inferior, ya que esta categoría de subrasante se verá disminuida a una categoría de subrasante insuficiente.



VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda no realizar la técnica de recompactación de suelo cuando no se llegue a la máxima densidad seca requerida, si es que el CBR del material en cuestión está categorizado como “bueno” a inferiores. Ya que esto significa una disminución del CBR llegando hasta una categoría de insuficiente.

Para poder aplicar la recompactación se debe asegurar que el suelo tenga catalogación de “excelente” y que se haya hecho alguna verificación en laboratorio o recurrir a la ecuación planteada en este trabajo de investigación.

Para ampliar y conocer más las propiedades del suelo con relación a la recompactación, se recomienda realizar más estudios dirigidos a relacionar el porcentaje de CBR con el número de reutilizaciones y el tipo de compactación realizado; asimismo, se recomienda ejecutar esta investigación con diferentes tipos de suelos, y ubicados a diferentes alturas sobre el nivel del mar.

Para optimizar la ejecución de ensayos de compactación en el laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la EPIC – UNAP, se recomienda la recalibración y mantenimiento de las máquinas automatizadas, así como la implementación de mejores utensilios.

Para poder justificar las recompactaciones de una manera adecuada, se recomienda que el MTC incluya en sus manuales la explicación científica a la prohibición del material previamente compactado con base a los resultados de este trabajo de investigación.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, K., Yamusa, Y. B., & Bin Kamisan, M. A. (2018). Effects Of Soil Recomposition On Permeability. *Science World Journal Vol 13(No 3) 2018*, 6-9.
- Alcalá, C., & Cuadros, F. (30 de Agosto de 2021). *ECONOMÍA - Presupuesto público del 2022 se elevaría en 7,6%*. La República: <https://larepublica.pe/economia/2021/08/30/presupuesto-publico-del-2022-se-elevaria-en-76/>
- American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM.
- ASTM. (2016). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM.
- ASTM. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*. ASTM.
- Cajo, E. (2015). *Informe Del Ensayo De CBR Para Pavimentos*. Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Chirinos Quispe, J. C. (2016). *Efecto de la Energía de Compactación en la Densidad Seca Máxima y Contenido Óptimo de Humedad del Suelo Granular de la Cantera El Gavilán, 2015*. Universidad Privada del Norte.
- D'Angelo, L. (2021). Tamaño de efecto, potencia de la prueba, factor de bayes y meta-análisis en el marco de la crisis de reproducibilidad de la ciencia. El caso de la diferencia de medias -con muestras independientes- (primera parte). *Cuadernos del CIMBAGE*, 1(23), 47-82.
- Gutiérrez Abanto, J. C. (2021). *Curso Taller: Mecánica de Suelos*. Ingeo Control.



- Herrera Herbert, J. (2007). *Diseño de Explotaciones de Cantera*. Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.21839>
- Herrera Herbert, J., & Pla Ortiz de Urbina, F. (2006). *Métodos de Minería a Cielo Abierto*. Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.10675>
- Hohn, A. V., Leme, R. F., da Silva Filho, F. C., Moura, T. E., & Llanque, G. R. (2022). Empirical Models to Predict Compaction Parameters for Soils in the State of Ceará, Northeastern Brazil. *Ingeniería e Investigación*, 42(1), 31-41. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n1.86328>
- Huaquisto Cáceres, S. (2014). *Efecto del Aceite Residual de la Maquinaria Pesada en los Factores Físico Mecánicos del Suelo*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Jallo Apaza, M. (2014). *Modelo de Regresión para la Precipitación Pluvial en la Ciudad de Puno Periodo 1979 - 2012*. Universidad Nacional del Altiplano - Puno.
- León Quiroz, J. J. (2021). *Influencia de la Energía de Compactación en la Densidad Seca Máxima y Contenido Óptimo de Humedad del Suelo Granular de la Cantera Agocucho, Cajamarca - 2017*. Universidad Privada del Norte.
- López, P. L. (2004). Población muestra y muestreo. *Punto cero*, 9(08), 69-74.
- Mamani Cutipa, C. A. (2017). *Influencia De Aceites Residuales De Vehículos Motorizados En Los Parámetros De Resistencia De Suelos Finos*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Marron Machaca, D. W. (2022). *Análisis para la determinación del peso específico seco máximo y humedad optima en los ensayos de compactación para las arenas limosas en la región de Puno*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano Puno.



- Melendez Leon, C. (2017). *Evaluación De La Aplicación De Los Métodos A, B Y C Del Ensayo Proctor Modificado En Los Agregados De Las Canteras Estrella, Pumpunya, Mitupampa – Chupuro – Huancayo, 2017*. Huancayo: Universidad Peruana Los Andes.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2013). *Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2014). *Manual de Carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección Suelos y Pavimentos*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Munkholm, L. J., Schjonning, P., & Rüegg, K. (2005). Mitigation of subsoil recompaction by light traffic and on-land ploughing I. Soil response. *Soil and Tillage Research*, 80(1-2), 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.015>.
- Quezada Lucio, N. (2017). *Estadística con SPSS 24. MACRO*.
- Quintero Esquivel, J. M. (2017). *Suelo-cemento con sustitución en franja granulométrica con concreto reciclado*. Universidad La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1119&context=ing_civil
- Raper, R. L., & Kirby, J. (2006). Soil Compaction: How to Do It, Undo It, or Avoid Doing It. *ASAE Distinguished Lecture*(30), 1-14.
- Saborio Ulloa, J. (1995). *Compactación de suelos*. Universidad de Guadalajara.
- Sfriso, A. (2021). *Laboratorio De Suelos*. Buenos Aires: Laboratorio de Mecánica de Suelos.



- Ulloa Calderón, Andrea. (2011). Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de calidad en materiales de un pavimento asfáltico. En Dialnet, *Métodos y Materiales* (Primera ed., Vol. 1, págs. 39-50). Dialnet.
- Umar, T., Egbu, C., & Saidani, M. (2019). *A Modified Method for Los Angeles Abrasion Test*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00268-w>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (Novena ed.). México: Pearson Educación.
- Yanapa Mamani, C. Y. (2019). *Análisis de efectos producidos por la Aplicación de mayor energía de Compactación en el Ensayo Proctor Modificado en Suelos de las Canteras de la Ciudad de Juliaca*. Juliaca: Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez.



ANEXOS

ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO.

ANEXO 2: RESULTADOS DE LABORATORIO.

ANEXO 3: CÁLCULO DE POTENCIA DE LA CANTERA.

**ANEXO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA COMPROBACIÓN DE
HIPÓTESIS.**

ANEXO 5: CUADRO DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.

ANEXO 6. COMPARATIVA DE CANTERAS.

ANEXO 7. RESULTADOS ENSAYOS QUÍMICOS.



Universidad Nacional del Altiplano
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
DIRECCIÓN DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



ACTA DE DICTAMEN DE REVISIÓN DE BORRADOR DE TESIS

En el local de la sala de Docentes de la Escuela Profesional de:
INGENIERÍA CIVIL siendo las 11:00 horas del día
14 de JULIO del año 2023 se reunieron los miembros del
Jurado Dictaminador:

PRESIDENTE : ING. CESAR EDWIN GUERRA ROMOS

1er MIEMBRO : ING. SAMUEL LAURA HUANCA

2do MIEMBRO : ING. GLENY ZOYLA DE LA RIVA TAPIA

DIRECTOR/ASESOR: ING. MARIANO ROBERTO GARCIA LOAYZA

Quienes revisaron el borrador de tesis intitulado: "RELACIÓN ENTRE LA
REUTILIZACIÓN DE MATERIAL COMPACTADO Y LOS PARÁMETROS
DE COMPACTACIÓN DEL SUELO PROVENIENTE DE LA CONTERA
CHALLAVILQUI DEL DISTRITO DE PLATERÍA, 2021"

Presentado por el (la) (los) bachiller (es):
HERBERTH DANIEL RAROS POMA

El cual ha sido debidamente evaluado de acuerdo al Reglamento de Titulaciones y Normas de la UNA-PUNO, habiéndose emitido las observaciones por parte de los miembros del jurado, siendo absueltas en su oportunidad, en mérito de lo cual la comisión ha considerado la APROBACIÓN del mencionado borrador de Tesis.

El jurado Dictaminador previa coordinación propone ejecutar el Acto de Sustentación y defensa del (los) bachiller (es) para el día 18 de AGOSTO del año 2023 a horas 09:00 en la Sala de Sustentaciones de la Escuela Profesional. Siendo las 11:20 horas del mismo día, se dio por concluida la presente reunión de trabajo, firmado para refrendar la presente.


PRESIDENTE


SEGUNDO MIEMBRO


PRIMER MIEMBRO


TERCER MIEMBRO



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo HERBERTH DANIEL RAMOS POMA
, identificado con DNI 70202879 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA CIVIL

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"Relación entre la reutilización de material compactado y los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platena, 2021"

" Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 14 de JULIO del 20 23

FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo HERBERTH DANIEL RAMOS POMA
identificado con DNI 70202878 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"Relación entre la reutilización de material compactado y los parámetros de compactación del suelo proveniente de la cantera Challavilqui del distrito de Platená, 2023"

" Es un tema original.


Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 14 de Julio del 20 23


FIRMA (obligatoria)



Huella