

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**COMPARATIVA DEL VALOR DEL CBR OBTENIDO EN LABORATORIO, EN
CAMPO Y MEDIANTE EQUIPO CLEGG HAMMER.**

POR:

OSCAR ORLANDO GAYTÁN CRUZ

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN VÍAS TERRESTRES**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

OCTUBRE DE 2021



Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo *Clegg Hammer* presentado por Oscar Orlando Gaytán Cruz como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Vías Terrestres, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado

M.A. María de Lourdes Flores Portillo
Coordinador(a) Académico

M.I. José Carlos Montero De Anda
Director(a) de Tesis

Fecha

Comité:

M.I. José Carlos Montero De Anda
M.I. Luís Enrique Morales Gutiérrez
M.E.A. Pamela Sisi Paredes Araiza
M.I. Jorge Alejandro Martínez Sosa

© Derechos Reservados

Oscar Orlando Gaytán Cruz
Circuito Número I, Nuevo
Campus Universitario II, 31125
Chihuahua, Chih. México
Octubre 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

22 de octubre de 2021.

ING. OSCAR ORLANDO GAYTÁN CRUZ

Presente.-

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Vías Terrestres, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **M.I. José Carlos Montero de Anda** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“COMPARATIVA DE VALOR DEL CBR OBTENIDO EN LABORATORIO, EN CAMPO Y MEDIANTE EQUIPO CLEGG HAMMER”**.

Índice de Contenido

Dedicatoria
Agradecimientos
Resumen
Índice de Contenido
Índice de Figuras
Índice de ilustraciones

Capítulo I: Introducción

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Justificación
- 1.3 Alcances y objetivos

Capítulo II: Marco Teórico

- 2.1 Capas granulares de un pavimento
- 2.2 Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S)
- 2.3 Principales características y pruebas de evaluación DE LOS SUELOS
- 2.4 Métodos de obtención de valor CBR
- 2.5 Estadística

Capítulo III: Metodología

- 3.1 Procedimiento
- 3.2 Normatividad y consideraciones generales
- 3.3 Lugar para pruebas y muestreo del suelo
- 3.4 caracterización del material granular

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 3.5 Elaboración de pruebas CBR en el lugar con equipo móvil
- 3.6 Elaboración de pruebas CBR con equipo Clegg Hammer
- 3.7 Elaboración de pruebas CBR en el laboratorio

Capítulo 4: Análisis estadístico de resultados de 3 métodos utilizados para determinar el CBR.

- 4.1 Diseño por bloques aleatorizados.

Capítulo 5: Conclusiones y reconocimientos

- 5.1 Conclusiones
- 5.2 Recomendaciones

Bibliografía

ATENTAMENTE
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

Dedicatoria

A mis padres que siempre me han guiado por el buen camino e impulsado para conseguir mis metas en la vida, a mis hermanos por ser el hermano mayor y darles un buen ejemplo a seguir, a mi esposa por apoyarme en todas mis decisiones e ir de la mano conmigo y especialmente a mi hija por ser la razón de superarme día a día y motivarme para nunca rendirme a pesar de cualquier circunstancia.

Agradecimientos

A la empresa Grupo Promotor Aries por brindarme la oportunidad de continuar con mis estudios y apoyarme en este camino, a Laboratorio y Estudios de Suelos y Asfaltos (LESA) por el apoyo con el equipo para lograr desarrollar las pruebas de campo, a mis profesores por compartirme sus conocimientos, a mis asesores de tesis por los consejos y sugerencias para mejorar en la investigación y a mi director de Tesis el M.I. José Carlos Montero De Anda por el gran apoyo brindado tanto en la investigación como fuera de ella.

Resumen

El presente estudio tiene por objetivo realizar una comparativa acerca del equipo Clegg Hammer con dos metodologías existentes actualmente normadas en México para obtener el valor CBR de los materiales granulares, ya que en la actualidad es un valor importante de resistencia para la conformación de capas de pavimento y diseño de las mismas, por lo que es una alternativa de solución más dentro del campo de estudio.

Aquí se analiza específicamente sobre materiales calidad Sub – Base, ya que es una de las capas importantes del pavimento y demanda una mayor calidad a diferencia de las capas de terracería, teniéndose un mayor control y especificaciones para su correcto funcionamiento estructural, para lo cual utilizamos algunos muestreos y elaboración de pruebas para analizar mediante métodos estadísticos y comprobar la variabilidad entre dichas metodologías y llegar a un mismo valor.



Índice de Contenido

Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos	v
Resumen	vi
Índice de Contenido.....	vii
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Figuras.....	x
Índice de Ilustraciones	xi
Capítulo 1: Introducción	12
1.1 ANTECEDENTES.....	12
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3 ALCANCES Y OBJETIVOS	13
Capítulo 2: Marco Teórico.....	15
2.1 CAPAS GRANULARES DE UN PAVIMENTO	15
2.2 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)	17
2.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y PRUEBAS DE EVALUACIÓN DE LOS SUELOS	18
2.4 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE VALOR CBR	21
2.5 ESTADÍSTICA	23
Capítulo 3: Metodología.....	29
3.1 PROCEDIMIENTO	29
3.2 NORMATIVIDAD Y CONSIDERACIONES GENERALES	29
3.3 LUGAR PARA PRUEBAS Y MUESTREO DEL SUELO.....	29
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR	30
3.5 ELABORACIÓN DE PRUEBAS CBR EN EL LUGAR CON EQUIPO MÓVIL	49
3.6 ELABORACIÓN DE PRUEBAS CBR CON EQUIPO CLEGG HAMMER.....	65
3.7 ELABORACIÓN DE PRUEBAS CBR EN EL LABORATORIO.....	71
Capítulo 4: Análisis estadístico de resultados de 3 métodos utilizados para determinar el CBR.	97
4.1 DISEÑO POR BLOQUES ALEATORIZADOS.....	98



Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones	105
5.1 CONCLUSIONES	105
5.2 RECOMENDACIONES	106
Referencias	108
Glosario.....	110
Curriculum Vitae	111



Índice de Tablas

Tabla 1: Análisis de varianza (Elaboración propia, 2020).	28
Tabla 2 : Requisitos de granulometría de los materiales para subbases de pavimento asfáltico. (SCT, 2016)	32
Tabla 3: Clasificación S.U.C.S. (Crespo Villalaz, 2011).	41
Tabla 4: Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas (SCT, 2002b).....	44
Tabla 5: Identificación de manzana y lote (SCT, 2002b).....	50
Tabla 6: Lecturas de tiempo – penetración (SCT, 2013).....	52
Tabla 7: Resultados de compactaciones (Elaboración propia, 2020).....	65
Tabla 8: Valores de Impacto con equipo Clegg Hammer (Elaboración propia, 2020).	67
Tabla 9: CBR correlacionado 1980 1-2 (Elaboración propia,2020).....	68
Tabla 10: CBR correlacionado 1980 2-2 (Elaboración propia, 2020).....	69
Tabla 11: CBR correlacionado 2002 1-2 (Elaboración propia, 2020).....	70
Tabla 12: CBR correlacionado 2002 2-2 (Elaboración propia, 2020).....	71
Tabla 13: Lecturas tiempo – penetración (SCT, 2008).....	73
Tabla 14: CBR de laboratorio (Elaboración propia, 2020).....	96
Tabla 15: Resumen de resultados de las tres metodologías (Elaboración propia, 2020).	97
Tabla 16: Análisis de datos mediante bloques aleatorizados correlación 1 (Elaboración propia, 2020).100	
Tabla 17: Análisis de datos mediante bloques aleatorizados correlación 2 (Elaboración propia, 2020).102	
Tabla 18: Análisis de varianza correlación 2 (Elaboración propia, 2020).	104



Índice de Figuras

Figura 1: Procedimiento de muestreo en bancos de material acamellonado. (Elaboración propia, 2020).	30
Figura 2: Extendido y secado de las muestras en laboratorio. (Elaboración propia, 2020).	31
Figura 3: Equipo para obtención de límites. (Elaboración propia, 2020).	37
Figura 4: Copa de Casagrande con material. (Elaboración propia, 2020).	38
Figura 5: Cuarteo material cribado por malla No 4. (Elaboración propia, 2020).	42
Figura 6: Desgaste de los Ángeles. (Elaboración propia, 2020).	45
Figura 7: Compactación del material en molde Proctor. (Elaboración propia, 2020).	47
Figura 8: Ubicación de pruebas de campo. (Elaboración propia, 2020).	50
Figura 9: CBR en campo con equipo móvil. (Elaboración propia, 2020).	51
Figura 10: Prueba CBR en campo (Elaboración propia, 2020).	52
Figura 11: Verificación de compactación en plataformas (Elaboración propia, 2020).	64
Figura 12: Equipo Clegg Hammer (Elaboración propia, 2020).	66
Figura 13: Pruebas con Clegg Hammer en campo (Elaboración propia, 2020).	67
Figura 14: Pruebas de CBR en laboratorio (Elaboración propia, 2020).	73



Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Curva Granulométrica muestra 1. (Elaboración propia, 2020)	33
Ilustración 2: Curva granulométrica muestra 2. (Elaboración propia, 2020)	34
Ilustración 3: Límite líquido muestra 1. (Elaboración propia, 2020)	39
Ilustración 4: Límite líquido muestra 2. (Elaboración propia, 2020)	39
Ilustración 5: Prueba Proctor muestra 1 (Elaboración propia, 2020).....	48
Ilustración 6: Prueba Proctor muestra 2. (Elaboración propia, 2020).....	49
Ilustración 7: CBR en campo Manzana 32 lote 42 (Elaboración propia, 2020).....	54
Ilustración 8: CBR en campo Manzana 34 lote 7 (Elaboración propia, 2020).....	55
Ilustración 9: CBR en campo Manzana 36 lote 13 (Elaboración propia, 2020).....	56
Ilustración 10: CBR en campo Manzana 37 lote 2 (Elaboración propia, 2020).....	57
Ilustración 11: CBR en campo Manzana 38 lote 1 (Elaboración propia, 2020).....	58
Ilustración 12: CBR en campo Manzana 41 lote 41 (Elaboración propia, 2020).....	59
Ilustración 13: CBR en campo Manzana 42 lote 18 (Elaboración propia, 2020).....	60
Ilustración 14: CBR en campo Manzana 44 lote 9 (Elaboración propia, 2020).....	61
Ilustración 15: CBR en campo Manzana 47 lote 3 (Elaboración propia, 2020).....	62
Ilustración 16: CBR en campo Manzana 49 lote 5 y 4 (Elaboración propia, 2020).....	63
Ilustración 17: Curvas típicas carga – penetración $M \cdot MMP \cdot 1 \cdot 11/08$, figura 8 (SCT, 2008).....	74
Ilustración 18: CBR de laboratorio prueba 1 (Elaboración propia, 2020).....	75
Ilustración 19: CBR de laboratorio prueba 2 (Elaboración propia, 2020).....	76
Ilustración 20: CBR de laboratorio prueba 3 (Elaboración propia, 2020).....	77
Ilustración 21: CBR de laboratorio prueba 4 (Elaboración propia, 2020).....	78
Ilustración 22: CBR de laboratorio prueba 5 (Elaboración propia, 2020).....	79
Ilustración 23: CBR de laboratorio prueba 6 (Elaboración propia, 2020).....	80
Ilustración 24: CBR de laboratorio prueba 7 (Elaboración propia, 2020).....	81
Ilustración 25: CBR de laboratorio prueba 8 (Elaboración propia, 2020).....	82
Ilustración 26: CBR de laboratorio prueba 9 (Elaboración propia, 2020).....	83
Ilustración 27: CBR de laboratorio prueba 10 (Elaboración propia, 2020).....	84
Ilustración 28: CBR de laboratorio prueba 11 (Elaboración propia, 2020).....	85
Ilustración 29: CBR de laboratorio prueba 12 (Elaboración propia, 2020).....	86
Ilustración 30: CBR de laboratorio prueba 13 (Elaboración propia, 2020).....	87
Ilustración 31: CBR de laboratorio prueba 14 (Elaboración propia, 2020).....	88
Ilustración 32: CBR de laboratorio prueba 15 (Elaboración propia, 2020).....	89
Ilustración 33: CBR de laboratorio prueba 16 (Elaboración propia, 2020).....	90
Ilustración 34: CBR de laboratorio prueba 17 (Elaboración propia, 2020).....	91
Ilustración 35: CBR de laboratorio prueba 18 (Elaboración propia, 2020).....	92
Ilustración 36: CBR de laboratorio prueba 19 (Elaboración propia, 2020).....	93
Ilustración 37: CBR de laboratorio prueba 20 (Elaboración propia, 2020).....	94
Ilustración 38: Curva MVS - CBR (Elaboración propia, 2020).....	95
Ilustración 39: Gráfica de residuos para validación del modelo (Elaboración propia, 2020).....	101
Ilustración 40: Prueba de igualdad de varianzas (Elaboración propia, 2020).....	101
Ilustración 41: Gráfica cuatro en uno correlación 2 (Elaboración propia, 2020).....	103
Ilustración 42: Comparación de medias de las metodologías de obtención de CBR usando método de Fisher (Elaboración propia, 2020).....	104



Capítulo 1: Introducción

1.1 ANTECEDENTES

Dentro de la ingeniería, uno de los parámetros más utilizados en cuestiones del suelo y materiales granulares ha sido el valor CBR (California Bearing Ratio o relación de soporte de California), propuesto en 1929 por los ingenieros T.E. Stanton y O.J. Porter del departamento de carreteras de California, este método se basa en la resistencia de un suelo bajo condiciones de humedad y densidades específicas, sometida a una carga unitaria para determinar la resistencia de cierto material granular.

El CBR es un valor de los más importantes en cuestiones de pavimentos, así como algunas otras pruebas, ya que las estructuras del pavimento se acentúan en capas de distintas calidades, granulometrías y resistencias, por lo cual es un dato primordial para el diseño y control de calidad de estos.

Un factor importante de la prueba es que requiere tiempo para llevarse a cabo, por lo que con el paso de los años han surgido equipos de campo más prácticos como el Clegg Hammer, el cual determina este valor en campo en poco tiempo, por lo cual es importante definir la variación entre este equipo, con equipo de campo y una muestra controlada en laboratorio para tener certeza de los resultados obtenidos con este equipo.

Existen en la actualidad algunos estudios relacionados al Clegg Hammer en distintas partes del mundo, tal es el caso de Fidel Rivera y Arnoldo Flores de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (Rivera González & Flores Mendoza, 2009), donde realizaron un caso similar para comprobar la veracidad del equipo en comparación al CBR y su correlación, entre este existen algunos otros estudios enfocados a otros temas.

Un punto a mencionar sobre el Clegg Hammer es que se deberá verificar su correcta funcionalidad en cuestiones de obtención de datos, para tener certeza en los resultados, por lo que se prueba utilizando un anillo de retención de plástico de poliuretano de dimensiones establecidas y dejando caer el martillo a una altura específica se comparan algunas lecturas para verificar la correcta funcionalidad del equipo, de presentarse variaciones se deberá



realizar una verificación electrónica para el acelerómetro de acuerdo con las instrucciones de calibración del fabricante.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El valor de CBR se puede obtener por diferentes métodos, por lo que se pretende utilizar el equipo Clegg Hammer para contrastar el valor con otras metodologías y evaluar si es posible utilizarlo en la verificación de valores de CBR de materiales granulares en campo de manera rápida y confiable, ayudando a optimizar tiempos en proyectos o revisión de calidad del suelo rápidamente para toma de decisiones, facilitando la obtención de resultados muy semejantes a pruebas de laboratorio de forma inmediata, contando con tres de los criterios de justificación, los cuales son conveniencia, implicaciones prácticas y utilidad metodológica según Hernández (2014, p. 40).

1.3 ALCANCES Y OBJETIVOS

1.3.1 Alcances

Dentro de los alcances involucrados en este trabajo se tiene comparar las metodologías convencionales con la del *Clegg Hammer* específicamente en suelos granulares, debido a procesos de pruebas en laboratorios tardados, a la dificultad para programar pruebas con el CBR en campo, disponibilidad de terrenos o plataformas que se trabajan actualmente para realizar dichas pruebas de campo y la importancia del valor CBR en capas del pavimento como son en bases y sub bases, se realizara este estudio en un material de calidad sub base, siendo esta de especificaciones de calidad por debajo de la base pero de bastante importancia y similitudes.

Por lo pronto las pruebas a realizarse serán dentro de la ciudad de Chihuahua, específicamente en plataformas ubicadas en el norte de la ciudad, tomándose pruebas aleatorias y pruebas en diferentes puntos de la capa sub base.



1.3.2 Objetivo General

Realizar una comparativa entre el valor de CBR obtenido por el método convencional en laboratorio, en campo con equipo móvil adaptado y con equipo Clegg Hammer en suelos granulares.

1.3.3 Objetivo Particular

Determinar la confiabilidad de una prueba rápida del Clegg Hammer respecto a una prueba con procedimientos controlados y establecer criterios para utilizarla en cuanto a precisión de valores de CBR, costos de pruebas, tiempos de determinación de datos y fines prácticos, esto con el fin de brindar una herramienta para los trabajos de verificación de calidad de los materiales granulares una vez colocados en el sitio del proyecto.



Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 CAPAS GRANULARES DE UN PAVIMENTO

Los pavimentos se conforman por varias capas de suelo de diferentes calidades, los cuales son trasladados al sitio del proyecto desde los bancos de materiales, especialmente en los flexibles se consideran más debido la distribución de esfuerzos que se requiere en la estructura, estas van de menor a mayor calidad en cuanto desplante del pavimento.

Ciertamente son varias las capas de pavimento que lo conforman, pero no todas son necesarias, depende de ciertos factores de diseño para el uso de cada una y también hay unas de suma importancia que no se deben omitir debido a las funciones que desempeña, unas de las principales se mencionan a continuación:

2.1.1 *Terraplén*

La principal función de esta capa es la de brindar los niveles adecuados para satisfacer especificaciones geométricas y lograr el correcto desplante de la estructura del pavimento en secciones en terraplén, es de características y calidades muy bajas respecto a las demás y se encarga de distribuir los esfuerzos producidos por el tránsito directamente al terreno natural.

En secciones en corte no tiene un uso, debido a su baja calidad y a que se puede desplantar la estructura directamente del terreno natural con la capa subrasante.

2.1.2 *Capa Subyacente*

Al igual que el cuerpo de terraplén esta capa se considera de bajas especificaciones o mala calidad, dando funciones muy similares como reducción de espesores en las capas superiores del pavimento, obtención de niveles de proyecto y distribución de esfuerzos producidos por el tránsito, no tiene una granulometría definida y de igual manera puede no ser utilizada de acuerdo con los requisitos de proyecto y especificaciones, sin embargo en caso de utilizarse cumplirá con ciertas características de acuerdo con los requisitos de calidad de materiales para capa subyacente (SCT, 2002c).



2.1.3 Capa Subrasante

Es la capa de apoyo de la estructura del pavimento. Esta se emplea en dar la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas de tránsito. Por lo general el parámetro de resistencia utilizado para caracterizar la resistencia de los materiales es el valor relativo de soporte (Zárate Aquino, 2011).

Esta capa granular es de suma importancia y por lo cual no se deberá omitir en ninguna ocasión, ya que a pesar de tener desplante en cortes como podrían ser rocas y no ser necesaria por su resistencia es indispensable para dar uniformidad al terreno y tener un desplante correcto de las capas de pavimento, siendo considerada esta capa como una capa de transición entre la estructura de pavimento y el terreno natural.

2.1.4 Capa Sub-base

Es la capa que va debajo de la base y sobre la capa subrasante. Su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme y construir una adecuada plataforma de trabajo para su colocación y compactación (Zárate Aquino, 2011), además de tener funciones hidráulicas como la de desalojar el exceso de humedad que pueda penetrar a las capas.

A pesar de ser una capa de inferior calidad que una base esta misma tiene ciertas características como índice y de resistencia que la diferencia y la hace de mayor calidad que una subrasante, por lo que se podría decir que es una de las capas que en caso de utilizarse es de mucha importancia tener un buen control de calidad tanto de los materiales como en la conformación y la ejecución de la misma para lograr desempeñar su función estructural de la manera correcta.

2.1.5 Capa Base

Su función es eminentemente resistente, puede absorber la mayor parte de los esfuerzos verticales y su rigidez o resistencia a la deformación bajo las sollicitaciones



repetidas del tránsito suele corresponder a la intensidad del tránsito pesado. (Zárate Aquino, 2011).

Se podría decir que es la capa granular de mayor importancia por sus características específicas y su mayor calidad, ya que esta capa cumple con pruebas de calidad y resistencia mayores a las capas anteriores y es principalmente la capa granular antes de las capas estabilizadas y que al igual que las anteriores se tendrá que lograr un buen control de calidad en todas las etapas desde caracterización hasta su conformación en campo para que se logre un buen desempeño de la misma.

2.2 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)

Es un sistema para la clasificación de los suelos de acuerdo con sus tamaños de partículas y el porcentaje dominante del tipo de suelo, ya sea suelo grueso (gravas y/o arenas) o suelos finos (limos y/o arcillas), adicional se puede llegar a tener clasificaciones con doble nomenclatura, para suelos gruesos se tienen si están bien graduados o mal graduados y en el caso de suelos finos si son orgánicos, inorgánicos y de alta o baja plasticidad.

2.2.1 Suelos gruesos

Se les llama suelos gruesos a las gravas y arenas, estas partículas son diferenciadas entre sí por la malla número 4, donde el material retenido son gravas y el que pasa y retiene la malla No. 200 son arenas, adicional se tiene que todo lo retenido en la malla de 3” no se consideran gravas si no fragmentos de roca.

2.2.2 Suelos finos

Son las partículas de suelo que pasan por la malla número 200, en estas se encuentran los limos y arcillas, generalmente se clasifican en orgánicas, inorgánicas de alta y baja plasticidad de acuerdo con el límite líquido e índice plástico del material, todo de acuerdo con la carta de plasticidad para la clasificación de suelos de partículas finas.



Por lo general en la conformación de capas de pavimento, plataformas y construcciones similares se procura evitar dichos suelos, ya que los comportamientos son inestables, de baja resistencia a los esfuerzos y capacidad.

2.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y PRUEBAS DE EVALUACIÓN DE LOS SUELOS

2.3.1 *Masa volumétrica*

Se denomina masa volumétrica de un suelo (γ) al peso de dicho suelo contenido en la unidad de volumen, y generalmente se expresa en unidades de masa sobre volumen, como por ejemplo Kg/m³ (Crespo Villalaz, 2011).

2.3.2 *Densidad*

La densidad absoluta de un cuerpo es la masa de dicho cuerpo contenida en la unidad de volumen, sin incluir sus vacíos. La densidad aparente es la masa de un cuerpo contenida en la unidad de volumen, incluyendo sus vacíos. La densidad relativa de un sólido es la relación de su densidad a la densidad absoluta del agua destilada a una temperatura de 4°C (Crespo Villalaz, 2011).

2.3.3 *Granulometría*

Sirve para discernir sobre la influencia que puede tener en la densidad del material compactado. El análisis granulométrico se refiere a la determinación de la cantidad en por ciento de los diversos tamaños de las partículas que constituyen el suelo (Crespo Villalaz, 2011).

2.3.4 *Límites de consistencia*

Es uno de los parámetros que representan la plasticidad de un suelo y la capacidad de deformarse con la presencia del agua, así mismo presentando diversos comportamientos de



acuerdo con el estado en el que se encuentre debido al cruzar el límite líquido y límite plástico, en los cuales se pueden representar como estado sólido, estado semisólido, estado plástico y estado líquido, dependiendo del tipo de suelo, contenido de arcilla y de humedad.

2.3.5 Límite líquido

Es la frontera que existe entre los estados del suelo plástico y estado líquido y se representa como el contenido de humedad en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra (Crespo Villalaz, 2011), así mismo es un indicador junto con el límite plástico el cual se usa para la clasificación e identificación de un suelo.

2.3.6 Límite plástico

Es la frontera que existe entre los estados del suelo semisólido y estado plástico y se representa como el contenido de humedad en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno (Crespo Villalaz, 2011), cuando el límite plástico es nulo, es decir, no presenta (N.P.), el índice plástico se considera también como nulo y se reporta con un resultado “no presenta” (N.P.), esto significa que la porción fina del suelo que se está analizando no tiene comportamiento plástico y se considera como un suelo inerte.

2.3.7 Índice plástico

Es la frontera que existe entre los estados del suelo semisólido y estado plástico y se representa como el contenido de humedad en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno (Crespo Villalaz, 2011), este parámetro aplicando en suelos cohesivos para poder realizar la prueba mediante suelo moldeable pudiéndose tomar de las muestras del límite líquido, cabe mencionar que no todos los suelos presentan este límite, ya que este depende de la cantidad de arcilla y en caso de no presentarse se puede decir que es un material no plástico y por lo pronto al no presentarse este límite el índice plástico será igual a cero.



2.3.8 Prueba proctor

Es una prueba de suelos granulares que se realiza para determinar el peso por unidad de volumen compactado mediante un procedimiento determinado y a diferentes contenidos de humedad y tiene por objetivos principales obtener masa volumétrica seca máxima ($\gamma_s \text{ máx}$), la humedad óptima para alcanzarla y poder determinar con este dato el grado de compactación en campo una vez que se realice la conformación de una capa (Crespo Villalaz, 2011).

La prueba Proctor se divide en dos pruebas con diferentes variantes, las cuales son la proctor estándar y proctor modificada, en las que los diferencia el número de capas y el pisón, adicional se tiene una variante en el molde sin embargo esta dependerá de la granulometría del material y no del tipo de prueba.

2.3.9 Valor C.B.R.

Se define como la relación, expresada como porcentaje, entre la presión necesaria para penetrar los primeros 0.25 cm (0.1 pulg) y la presión para tener la misma penetración en un material arbitrario, adoptado como patrón, que es una piedra triturada en la cual se tienen las presiones en el vástago para las penetraciones establecidas (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1967).

Es uno de los valores utilizados en la determinación de resistencia de un suelo, su calidad y es de suma importancia en el diseño de un pavimento o estructuras en las cuales se encuentre sometido a ciertas cargas. Este parámetro es uno de los más importantes para determinar su aceptación o rechazo en la construcción.

2.3.10 Equivalente de arena

Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos, tales como limos o arcillas presentes en los materiales (SCT, 2002a), está representado en



porcentaje a la relación de la altura de la arena con respecto a la altura total de finos obtenidos de la prueba y principal mente es un indicador de la calidad del material.

2.3.11 Desgaste de los Ángeles

Es una prueba utilizada con el objetivo de determinar la resistencia que tiene un material a la trituración, es una propiedad natural de cada suelo, la prueba consiste en preparar una muestra de acuerdo con el manual de métodos de muestreo y pruebas de materiales (SCT, 2002b) y someterla en un cilindro giratorio con esferas metálicas durante un tiempo determinado, realizando desgaste al material para obtener la diferencia entre las masas antes y después de realizar dicha prueba.

2.4 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE VALOR CBR

Por ser un valor muy importante para la elaboración de un proyecto o estudio se debe tener un control y ciertos procedimientos específicos para la obtención de dicho resultado, en la actualidad existen diversas metodologías las cuales conllevan al mismo valor con alguna variación, una de las más confiables y utilizada es la tradicional prueba CBR en laboratorio, adicional de algunas otras las cuales son obtenidas en campo con equipo móvil adaptado y algunos equipos portátiles correlacionados como el Clegg Hammer .

2.4.1 CBR en laboratorio

Esta prueba esta normada por la secretaria de comunicaciones y transportes (SCT), y consiste en compactar una porción de muestra preparada con cierto porcentaje de agua para lograr su acomodo y posteriormente sumergirlos en agua para saturarlos hasta que el material deje de expandirse para realizarle una penetración en la superficie de la muestra mediante un pistón y tomando las lecturas correspondientes de carga de acuerdo con el manual de métodos de muestreo y pruebas de materiales (SCT, 2008).



Una vez obtenidas las lecturas a cada punto específico se obtiene la gráfica de carga-penetración para observar el tipo de curva y verificar que la prueba sea aceptada y no presenta curva defectuosa o de rechazo, una vez comprobada correctamente se realizan los cálculos correspondientes para obtener el valor de CBR obtenido en porcentaje.

2.4.2 CBR en campo con equipo móvil

Una de las ventajas de este método es que puedes obtener de forma real el valor CBR en el material en campo ya conformado en capas, sin embargo, una de las desventajas es en algunas ocasiones el difícil acceso a algunos lugares por las dimensiones, debido a que se encuentra adaptado el equipo de laboratorio a un camión móvil.

Se basa en el mismo procedimiento de CBR de laboratorio al probar la muestra, pero con algunas variantes, es decir en laboratorio es probada en moldes y en esta metodología es directamente sobre el suelo uniforme, sin embargo, el equipo de carga es similar en cuanto a elementos y procedimiento.

Así mismo esta metodología se encuentra establecida mediante la secretaria de comunicaciones y transportes (SCT, 2013), donde menciona el equipo y procedimientos necesarios para realizar las pruebas, así como preparación del sitio y algunas otras consideraciones generales.

2.4.3 CBR con equipo Clegg Hammer

El equipo Clegg Hammer es utilizado principalmente como medidor de resistencias de suelo, en si los resultados obtenidos en las pruebas que se realizan mediante este aparato se denominan valor de impacto, el cual es correlacionado con algunas fórmulas para obtener un resultado indirecto de pruebas como compactación, CBR, entre otros.

El aparato y la prueba consisten en un martillo de peso conocido que cae a través de un tubo guía a una altura específica sobre el suelo uniforme y limpio, una vez que impacta un acelerómetro de precisión ubicado en el equipo registra la desaceleración del martillo



debido a la rigidez del material y registra el valor de impacto a la unidad de lectura digital portátil del equipo.

Una de las ventajas de esta metodología es la practica forma de obtener resultados en poco tiempo y la facilidad de cargar el aparato a cualquier lugar, sin embargo no se sabe con certeza la variabilidad de una prueba correlacionada a una con procedimientos controlados, este equipo no se encuentra normado como metodología por parte de la secretaria de comunicaciones y transportes, pero tiene su propia norma en las ASTM (American Society for Testing and Materials, 2002), donde especifica la metodología y los parámetros de verificación del equipo para obtener los resultados.

2.5 ESTADÍSTICA

La estadística se encarga de los métodos científicos para recolectar, organizar, resumir, presentar y analizar datos para obtener conclusiones validas y tomar decisiones razonables con base en el análisis (Murray R. Spiegel & Stephens, 2009) y a sus diferentes campos de aplicación, por lo que se utilizan varios modelos o métodos para cada caso en particular.

Tiene una gran importancia en la aplicación de la ingeniería, específicamente las técnicas estadísticas pueden construir una poderosa ayuda para el diseño de nuevos productos y sistemas, mejorar diseños existentes, desarrollar y mejorar procesos de producción (Montgomery & Runger, 2003).

2.5.1 *Diseño de experimentos*

Es un fundamento muy importante casi en cualquier área de la ingeniería y la ciencia experimental, en donde un conjunto de los llamados tratamientos o combinaciones de tratamientos se vuelven las poblaciones que se van a estudiar o a comparar en algún sentido (Ronald E, Walpole; Raymond H. Myers; Sharon L. Myers; Keying Ye, 2012), por lo que es



el primer paso para la recolección de información y de acuerdo con las variables estudiar dependerá el tipo de diseño experimental que se utilice.

2.5.2 Bloques aleatorizados

Este es un tipo de diseño de experimentos que se emplea para estudiar la influencia de un factor sobre una variable cuantitativa, controlando otro factor o fuente que también influye en la variable cuantitativa (Murray R. Spiegel & Stephens, 2009), utilizando bloques para reducir la varianza del error experimental y lograr una mayor precisión de los resultados.

El concepto de bloques fue introducido por Fisher hacia 1925 en ensayos de agricultura en donde hacia la asignación de un tratamiento de un punto a otro complicaba la asignación de tratamientos, de ahí que el bloque permitiría la partición de la variabilidad inherente en el campo experimental (Melo et al., 2020).

Para el caso de estudio en cuestión tenemos el siguiente modelo donde la variable respuesta “Y” depende de la media global más el efecto de bloques más el efecto de tratamientos más el termino de error, así mismo los datos obtenidos deberán cumplir con una distribución normal, una linealidad, homocedasticidad e independencia entre sí, por lo que se expresa de la siguiente manera:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

para $i = 1, \dots, a$ y $j = 1, \dots, b$, siendo:

μ = Media global

α_i = El efecto sobre la media causado por el nivel i del factor A

β_j = El efecto sobre la media causado por el nivel j del bloque B

ε_{ij} = El termino de error.

Este modelo consiste en comparar las medias de los efectos causados por “a” niveles del factor “A” de acuerdo a lo siguiente:



$$\sum_{i=1}^a \alpha_i = \sum_{j=1}^b \beta_j = 0$$

$$H_0 = \alpha_i = 0$$

$$H_1 = \alpha_i \neq 0 \quad \exists_i$$

Esto tiene valides si se cumple con los siguientes supuestos:

- Normalidad
- Linealidad
- Homocedasticidad
- Independencia

Así mismo se tendrá que considerar que se analizará cada uno de los estimadores de los parámetros del modelo mencionado, los cuales son obtenidos por medio del método de mínimos cuadrados de acuerdo con lo siguiente:

$$\min_{\mu, \alpha_i, \beta_j} \phi = \min \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (y_{ij} - \mu - \alpha_i - \beta_j)^2$$

Sujeto a

$$\sum_{i=1}^a \alpha_i = \sum_{j=1}^b \beta_j = 0$$

Se tiene lo siguiente:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{ab} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ijk} = \bar{y}_{..}$$

Para i fijado:

$$\hat{\alpha}_i = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^b y_{ij} - \bar{y}_{..} = \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}$$

Análogamente para j fijado:



$$\hat{\beta}_j = \bar{y}_{\cdot j} - \bar{y}_{\cdot\cdot}$$

Así:

$$\hat{y}_{ij} = \bar{y}_{\cdot\cdot} + (\bar{y}_{i\cdot} - \bar{y}_{\cdot\cdot}) + (\bar{y}_{\cdot j} - \bar{y}_{\cdot\cdot}) = \bar{y}_{i\cdot} + \bar{y}_{\cdot j} - \bar{y}_{\cdot\cdot}$$

El número total de parámetros a estimar será:

$$1 + (a - 1) + (b - 1) = a + b - 1$$

Teniendo que el número total de observaciones es $N = ab$ entonces el número de grados de libertad es:

$$ab - a - b + 1 = (a - 1)(b - 1)$$

De este modo como:

$$\begin{aligned} SCE &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (y_{ij} - (\bar{y}_{i\cdot} + \bar{y}_{\cdot j} - \bar{y}_{\cdot\cdot}))^2 \\ &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (y_{ij} - \bar{y}_{i\cdot} - \bar{y}_{\cdot j} + \bar{y}_{\cdot\cdot})^2 \end{aligned}$$

Entonces se estima la varianza total que es:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{(a - 1)(b - 1)} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (y_{ij} - \bar{y}_{i\cdot} - \bar{y}_{\cdot j} + \bar{y}_{\cdot\cdot})^2$$

Por lo que se puede descomponer la variabilidad total de la siguiente manera:

$$SCT = SC_A + SC_B + SCE$$

Siendo:

$$\begin{aligned} SCT \text{ (suma de cuadrados totales)} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (y_{ij} - \bar{y}_{\cdot\cdot})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - N\bar{y}_{\cdot\cdot}^2 \\ &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{\cdot\cdot}^2}{N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SC_A \text{ (suma de cuadrados debido al factor A)} &= b \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i\cdot} - \bar{y}_{\cdot\cdot})^2 = b \sum_{i=1}^a \bar{y}_{i\cdot}^2 - N\bar{y}_{\cdot\cdot}^2 \\ &= \frac{1}{b} \sum_{i=1}^a y_{i\cdot}^2 - \frac{y_{\cdot\cdot}^2}{N} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 SC_B(\text{suma de cuadrados debido al factor } B) &= a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_j - \bar{y}_{..})^2 = a \sum_{j=1}^b \bar{y}_j^2 - N\bar{y}_{..}^2 \\
 &= \frac{1}{a} \sum_{j=1}^b y_{.j}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}
 \end{aligned}$$

$$SCE(\text{suma de cuadrados residual}) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (y_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y}_{..})^2$$

$$SCE = SCT - SC_A - SC_B$$

A lo que se puede demostrar que:

$$E \left[\frac{SC_A}{a-1} \right] = \sigma^2 + \frac{b \sum_{i=1}^a \alpha_i^2}{a-1}$$

$$E \left[\frac{SC_B}{b-1} \right] = \sigma^2 + \frac{a \sum_{j=1}^b \beta_j^2}{b-1}$$

$$E \left[\frac{SCE}{(a-1)(b-1)} \right] = \sigma^2$$

Y así se puede considerar el estadístico de la siguiente manera:

$$F_0 = \frac{MC_A}{MCE} = \frac{\frac{SC_A}{a-1}}{\frac{SCE}{(a-1)(b-1)}}$$

De modo que si H_0 resultase cierta, F_0 se distribuirá como una F de Fisher-Snedecor $F_{a-1, (a-1)(b-1), \alpha}$, y es rechazada la H_0 si: $F_0 > F_{a-1, (a-1)(b-1), \alpha}$.

En caso de plantear una suposición en contra, es decir de igualdad entre bloques, aparecerían dificultades teóricas, debido a que la aleatorización solo se realiza dentro de cada bloque, sin embargo, si llegara a considerarse un estadístico sería de la forma:



$$F_0 = \frac{MC_B}{MCE} = \frac{\frac{SC_B}{b-1}}{\frac{SCE}{(a-1)(b-1)}}$$

Por lo que el análisis de varianza queda de la siguiente manera:

Tabla 1: Análisis de varianza (Elaboración propia, 2020).

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F
Factor A	SC_A	$a - 1$	$MC_A = \frac{SC_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MC_A}{MCE}$
Factor Bloque	SC_B	$b - 1$	$MC_B = \frac{SC_B}{b - 1}$	
Error	SCE	$(a - 1)(b - 1)$	$MCE = \frac{SCE}{(a - 1)(b - 1)}$	
Total	SCT	$ab - 1$		



Capítulo 3: Metodología

3.1 PROCEDIMIENTO

Esta investigación fue desarrollada de acuerdo con los siguientes procedimientos:

1. Normatividad y consideraciones generales.
2. Lugar para pruebas y muestreo del suelo.
3. Caracterización del material granular.
4. Elaboración de pruebas CBR en el lugar con equipo móvil.
5. Elaboración de pruebas CBR con equipo Clegg Hammer.
6. Elaboración de pruebas CBR en laboratorio.
7. Análisis estadístico de resultados de 3 métodos utilizados para determinar el CBR.
8. Conclusiones y recomendaciones.

3.2 NORMATIVIDAD Y CONSIDERACIONES GENERALES

Para realizar la investigación fue necesario apearse a las especificaciones y procedimientos descritos en Normatividad para la Infraestructura del Transporte, especialmente en las especificaciones para capa subbase debido a ser el material utilizado en el lugar.

Se realizaron diversas visitas al lugar para toma de muestras y recorridos, así como selecciones aleatorias a las plataformas para realizar las pruebas debido a la metodología estadística que se utilizó, cumpliendo con el diseño estadístico de experimentos de bloques aleatorizados y los accesos disponibles para el equipo.

3.3 LUGAR PARA PRUEBAS Y MUESTREO DEL SUELO

El presente estudio se realizó en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua más específicamente al norte de la ciudad en plataformas de fraccionamientos ubicados en la



colonia Riveras del Sacramento, esto debido a la disponibilidad de la zona, el fácil acceso al equipo de muestreo y de pruebas de campo.

El procedimiento de muestreo del suelo se realizó de acuerdo con el manual de Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base (SCT, 2016), en material acamellonado del fraccionamiento Vistas del Prado Etapa II, teniéndose material parcialmente triturado proveniente de bancos de materiales de GCC (Grupo Cementos de Chihuahua) con calidad subbase, esto realizándose en el sitio con tamaños de muestra mayores a 50 Kg por banco, con la finalidad de obtener resultados representativos en las pruebas de caracterización y elaboración de especímenes de CBR en laboratorio.



Figura 1: Procedimiento de muestreo en bancos de material acamellonado. (Elaboración propia, 2020).

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR

Una vez que se realizó el muestreo correctamente se trasladaron a el laboratorio de materiales, mecánica de suelos y asfaltos en facultad de ingeniería de la Universidad



Autónoma de Chihuahua para secar las muestras y realizar las pruebas correspondientes y caracterizar el suelo de acuerdo con los resultados que se obtuvieron.



Figura 2: Extendido y secado de las muestras en laboratorio. (Elaboración propia, 2020).

3.4.1 *Granulometría*

De acuerdo con la norma N-CMT-4-02-001/16 (SCT, 2016) Materiales para Subbases, especifica los requisitos de calidad necesarios para cumplir como subbase, uno de ellos es la granulometría, la cual se realizó por duplicado para verificar su cumplimiento y poderlo caracterizar.

Los requisitos como mallas y porcentajes que debe pasar ya sean para calidad de menos o igual a un millón de ejes equivalentes o superior se especifican en la siguiente tabla:



Tabla 2 : Requisitos de granulometría de los materiales para subbases de pavimento asfáltico. (SCT, 2016)

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designacion	$\sum L \leq 10^6$	$\sum L > 10^6$
75	3"	100	100
50	2"	85 - 100	85 - 100
37.5	1 1/2"	75 - 100	75 - 100
25	1"	62 - 100	62 - 100
19	3/4"	54 - 100	54 - 100
9.5	3/8"	40 - 100	40 - 100
4.75	Nº 4	30 - 100	30 - 80
2	Nº 10	21 - 100	21 - 60
0.85	Nº 20	13 - 92	13 - 45
0.425	Nº 40	8 - 75	8 - 33
0.25	Nº 60	5 - 60	5 - 26
0.15	Nº 100	3 - 45	3 - 20
0.075	Nº 200	0 - 25	0 - 15

Realizando las granulometrías por duplicado para el banco muestreado con un peso promedios por prueba de material inicial de 14 Kg y un peso lavado promedio de 500 gramos se obtuvieron las siguientes curvas granulométricas, quedando dentro de los dos rangos de aceptación en las dos ocasiones:



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Peso Inicial PI=	13874.6	Grava % =	40.90
Peso Lavado=	644.7	Arena % =	47.68
Clasificación SUCS=	(SW-SM)	Finos % =	11.42

Malla	Abertura (mm)	Peso Retenido (grs)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que pasa
3.0"	75	0	0.00	0.00	100.00
2.0"	50	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.5	487.5	3.51	3.51	96.49
1"	25	587.2	4.23	7.75	92.25
3/4"	19	722.7	5.21	12.95	87.05
3/8"	9.5	1847.5	13.32	26.27	73.73
N° 4	4.75	2030	14.63	40.90	59.10
N° 10	2	207.7	19.04	59.94	40.06
N° 20	0.85	117.3	10.75	70.69	29.31
N° 40	0.425	75	6.88	77.57	22.43
N° 60	0.25	39.1	3.58	81.15	18.85
N° 100	0.15	44.5	4.08	85.23	14.77
N° 200	0.075	36.5	3.35	88.58	11.42
FINOS		124.6	11.42	100.00	

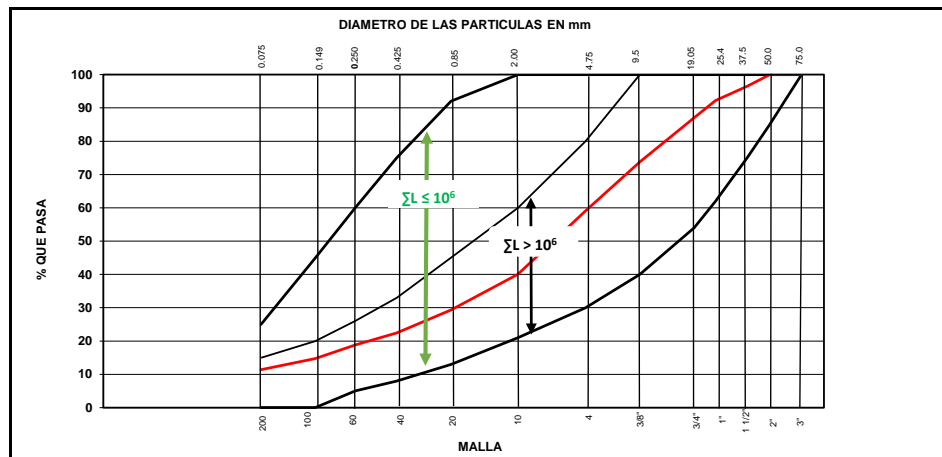


Ilustración 1: Curva Granulométrica muestra 1. (Elaboración propia, 2020)

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Peso Inicial PI=	13953.5	Grava % =	46.56
Peso Lavado=	502.3	Arena % =	42.58
Clasificación SUCS=	(GW-GM)	Finos % =	10.86

Malla	Abertura (mm)	Peso Retenido (grs)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que pasa
3.0"	75	0	0.00	0.00	100.00
2.0"	50	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.5	231.4	1.66	1.66	98.34
1"	25	849.7	6.09	7.75	92.25
3/4"	19	785.6	5.63	13.38	86.62
3/8"	9.5	2372.3	17.00	30.38	69.62
Nº 4	4.75	2257.2	16.18	46.56	53.44
Nº 10	2	126.7	13.48	60.04	39.96
Nº 20	0.85	101.5	10.80	70.84	29.16
Nº 40	0.425	69.5	7.39	78.23	21.77
Nº 60	0.25	35.8	3.81	82.04	17.96
Nº 100	0.15	36.8	3.92	85.96	14.04
Nº 200	0.075	29.9	3.18	89.14	10.86
FINOS		102.1	10.86	100.00	

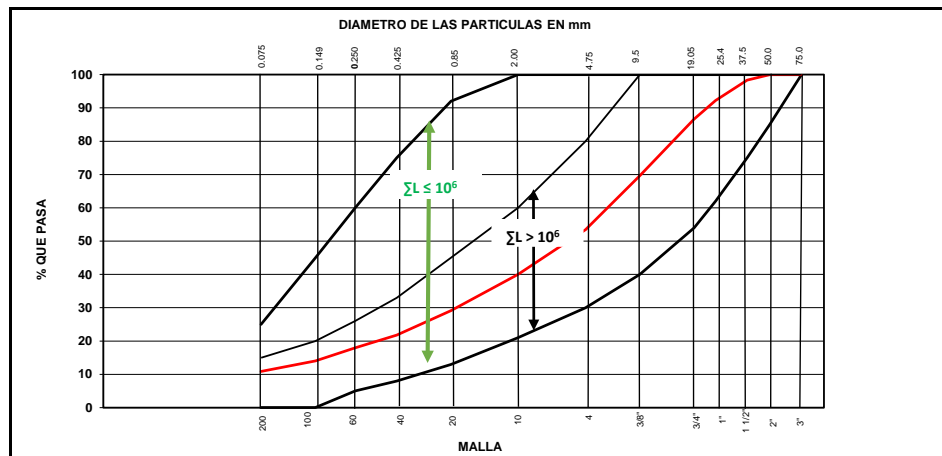


Ilustración 2: Curva granulométrica muestra 2. (Elaboración propia, 2020)

Adicional a las curvas granulométricas, se obtuvieron los valores correspondientes a D10, D30 y D60 de cada muestra con el fin de obtener los coeficientes de uniformidad y curvatura, para posteriormente poder realizar la clasificación S.U.C.S. de las muestras, por lo cual se utilizaron las siguientes ecuaciones para ambas pruebas:



$$D_x = \frac{D_2 - D_1}{\text{Log}\%2 - \text{Log}\%1} * (\text{Log}\%x - \text{Log}\%1) + D_1$$

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$$

Para la primera muestra se tienen los siguientes resultados para cada uno de los valores:

$$D_{10} = \frac{0.001 - 0.0075}{\text{Log}0.001 - \text{Log}11.42} * (\text{Log}10 - \text{Log}11.42) + 0.0075$$

$$\mathbf{D_{10} = 0.074}$$

$$D_{30} = \frac{0.85 - 2.0}{\text{Log}29.31 - \text{Log}40.06} * (\text{Log}30 - \text{Log}40.06) + 2.0$$

$$\mathbf{D_{30} = 0.936}$$

$$D_{60} = \frac{4.75 - 9.5}{\text{Log}59.10 - \text{Log}73.73} * (\text{Log}60 - \text{Log}73.73) + 9.5$$

$$\mathbf{D_{60} = 5.075}$$

$$C_u = 5.075/0.074$$

$$\mathbf{C_u = 68.58}$$

$$C_c = (0.936)^2 / (0.074)(5.075)$$

$$\mathbf{C_c = 2.33}$$

En el caso de la segunda muestra tenemos los siguientes resultados:



$$D_{10} = \frac{0.001 - 0.0075}{\text{Log}0.001 - \text{Log}10.86} * (\text{Log}10 - \text{Log}10.86) + 0.0075$$

$$\mathbf{D_{10} = 0.074}$$

$$D_{30} = \frac{0.85 - 2.0}{\text{Log}29.16 - \text{Log}39.96} * (\text{Log}30 - \text{Log}39.96) + 2.0$$

$$\mathbf{D_{30} = 0.953}$$

$$D_{60} = \frac{4.75 - 9.5}{\text{Log}53.44 - \text{Log}69.62} * (\text{Log}60 - \text{Log}69.62) + 9.5$$

$$\mathbf{D_{60} = 6.829}$$

$$Cu = 6.829/0.074$$

$$\mathbf{Cu = 92.28}$$

$$Cc = (0.953)^2/(0.074)(6.829)$$

$$\mathbf{Cc = 1.79}$$

De acuerdo con los resultados se observa que en ambas muestras se tiene un porcentaje de finos entre 5% al 12% de finos, por lo que de acuerdo con la clasificación S.U.C.S. esta tendrá doble nomenclatura, por lo que es necesario obtener los límites de consistencia del material para determinar la parte fina y algunos otros parámetros dentro de la carta de plasticidad de los suelos.



3.4.2 Límites de consistencia

Los límites de consistencia del material se obtuvieron a partir del manual de métodos de muestreo y pruebas de materiales (SCT, 2007), con material que pasa por la malla número 40, teniendo como equipo principal la copa de casa grande para el caso del límite líquido, adicional balanza, horno, recipientes, cápsulas, espátula, vidrio de placa como de reloj, entre algunos otros elementos.

Figura 3: Equipo para obtención de límites. (Elaboración propia, 2020).

3.4.3 Límite líquido

Para la preparación de las muestras fue necesario obtener una porción representativa del material cribado por la malla N° 40 de aproximadamente 300 gr, teniendo los procedimientos por duplicado para mayor precisión en la determinación de los resultados, las muestras son preparada mediante saturación en agua en un lapso de 24 horas.

Una vez pasado el lapso de preparación de las muestras se procedió a homogenizar el material con una espátula y previamente a la prueba se realizó la verificación de la calibración de la copa de casa grande, la cual tendrá una caída de 1 cm de altura a un ritmo constante de dos golpes por segundo, el material homogenizado es colocado en la copa de casa grande y



separada mediante el ranurador, obteniendo el número de golpes necesarios para unir los bordes inferiores del material en una longitud de 13 mm, adicional tomando una pequeña porción del material probado se colocó en un recipiente de masa conocida con su contenido de agua y colocándolo en el horno para secarlo y pesarlo en su estado seco para obtener el contenido de agua.

Figura 4: Copa de Casagrande con material. (Elaboración propia, 2020).

Posteriormente se realizó el procedimiento agregando agua al recipiente de la muestra y homogenizando nuevamente, esto obteniéndose cuatro diferentes lecturas con distinta cantidad de agua para lograr graficar el número de golpes con el contenido de agua de cada una de las determinaciones y poder obtener el límite líquido a los 25 golpes, esto realizándose con dos muestras diferentes para lograr una mejor confiabilidad en los resultados.

Los resultados obtenidos en las pruebas de las muestras anteriores se muestran a continuación:



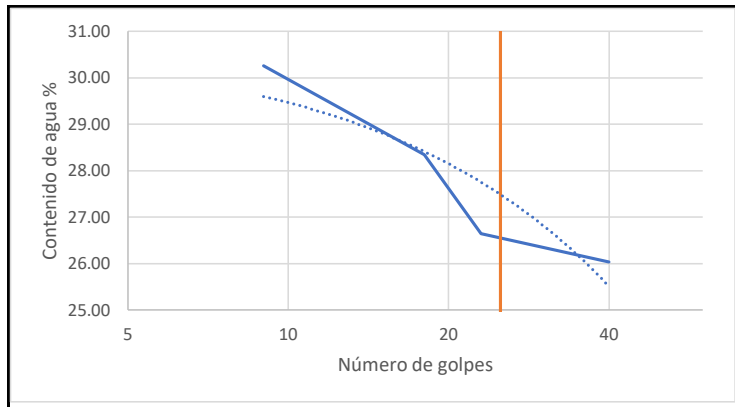
TARA	PESO TARA	TARA + SH	TARA + SS	PESO DE AGUA	SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA	NÚMERO DE GOLPES
No.	grs.	grs.	grs.	grs.	grs.	%	

LÍMITE LÍQUIDO

A-8	13.48	27.23	24.39	2.84	10.91	26.03	40
16	13.6	27.29	24.41	2.88	10.81	26.64	23
45	13.16	27.92	24.66	3.26	11.50	28.35	18
X	13.16	40.93	34.48	6.45	21.32	30.25	9

LÍMITE PLÁSTICO

							N.P.



Clasificación

(SW-SM)

L.L. = 27.5

L.P. = N.P.

I.P. = N.P.

Ilustración 3: Límite líquido muestra 1. (Elaboración propia, 2020)

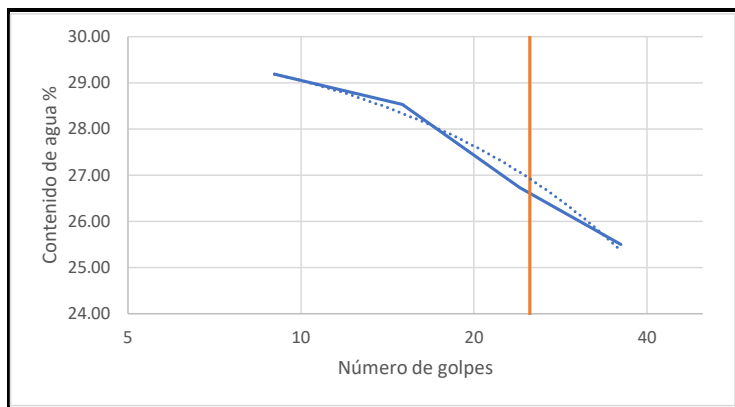
TARA	PESO TARA	TARA + SH	TARA + SS	PESO DE AGUA	SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA	NÚMERO DE GOLPES
No.	grs.	grs.	grs.	grs.	grs.	%	

LÍMITE LÍQUIDO

4	13.27	24.54	22.25	2.29	8.98	25.50	36
A-6	13.33	23.05	21	2.05	7.67	26.73	24
A-10	13.08	25.56	22.79	2.77	9.71	28.53	15
3	13.21	31.58	27.43	4.15	14.22	29.18	9

LÍMITE PLÁSTICO

							N.P.



Clasificación

(GW-GM)

L.L. = 27

L.P. = N.P.

I.P. = N.P.

Ilustración 4: Límite líquido muestra 2. (Elaboración propia, 2020)



Ambas pruebas se observan realizadas de manera satisfactoria, teniendo resultados similares y cumpliendo satisfactoriamente al límite líquido necesario para cumplir de acuerdo con la norma N-CMT4-02-001/16 (SCT, 2016) Materiales para Subbases.

3.4.4 Límite plástico

Tomando material de la preparación de la muestra anterior se realizó la prueba del límite plástico por duplicado mediante una pequeña esfera moldeándola con los dedos para hacerla perder agua y formar un cilindro con la palma de la mano sobre una placa de vidrio, con el objetivo de llegar a un diámetro de 3 mm en una velocidad de girado de 60 a 80 ciclos por minuto y fragmentarlo en 3 secciones de acuerdo con las especificaciones del manual de la SCT, límites de consistencia (SCT, 2007) y así obteniendo posteriormente su contenido de agua para obtener su límite plástico.

En los casos donde los cilindros no se fragmentan significa que su contenido de agua es superior por lo que se moldeó nuevamente varias veces para realizar una pérdida de agua del material, sin embargo, se realizaron varias pruebas sin posibilidad de obtener cilindros del diámetro especificado con ningún contenido de agua por lo que se concluye que es un material no plástico.

3.4.5 Clasificación S.U.C.S.

Adicional se obtuvo la clasificación S.U.C.S. de cada una de las muestras ya teniendo sus límites de consistencia, por lo que se utilizó la siguiente tabla:



Tabla 3: Clasificación S.U.C.S. (Crespo Villalaz, 2011).

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR		SIMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ²	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	DETERMÍNENSE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA; IDENTIFÍQUESE LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5% GW, GP, SW, SP; más del 12%, GM, GC, SM, SC. Entre 5% y 12%, Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles ** COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60} / D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW. LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LINEA A" O I.P. MENOR QUE 4. Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LINEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7. $Cu = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3. No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LINEA A" O I.P. MENOR QUE 4. Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LINEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	
		* GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	
		u		
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla	
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
		SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
		* SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	
		u		
		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	
SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ² Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No.200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduado, P – Mal Graduado, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)
		CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
	LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido Mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.	
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.	
		OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.	
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.	

** Clasificación de frontera – Los suelos que posean las características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos, por ejemplo, GW-GC, mezcla de arena y grava bien graduadas con cementante arcilloso.
² Todos los tamaños de las mallas en esta son los U.S. Standard.
³ La división de los grupos GM y SM en subdivisiones d, u, son para caminos y aeropuertos únicamente, la subdivisión esta basada en los límites de Atterberg. El sufijo d se usa cuando el L.L. es de 28 o menos y el I.P. es de 6 o menos. El sufijo u es usado cuando el L.L. es mayor que 28.

Se tienen muestras con clasificaciones con doble nomenclatura por el porcentaje de finos de cada uno los cuales se mantienen entre 5% y 12%, una muestra obteniéndose como grava y la otra como arena, debido a los porcentajes muy similares del agregado grueso, para la parte fina de acuerdo con la carta de plasticidad se considera como limo, ya que no presento



limite plástico por lo cual no existe índice plástico y se mantiene bajo la línea A de la misma carta, en la parte de graduación cumple con los coeficientes de uniformidad y curvatura por lo que se consideran materiales bien graduados.

Por lo tanto, con las muestras trabajadas con sus resultados obtenidos se representan de acuerdo con la clasificación S.U.C.S. de la siguiente manera:

Muestra 1: SW-SM (Arena bien graduada limosa)

Muestra 2: GW-GM (Grava bien graduada limosa)

3.4.6 Equivalente de arena

Para la determinación del contenido de arena en la muestra fue necesario una preparación previa de la muestra, la verificación del equipo y tener las soluciones necesarias para realizar los procedimientos de manera adecuada y obtener resultados coherentes.

Para la preparación de la muestra se utiliza el material cribado por la malla N° 4 tratando de no perder las partículas finas, posteriormente se realizó un cuarteo del material obtenido como se muestra en la figura 5 y con una masa inferior a 2 Kg y se llenaron 2 cápsulas de dimensiones específicas sin compactar y enrasándolas, para la solución de trabajo se verificaron que los elementos y dimensiones fueran las correctas para realizar las pruebas correspondientes.



Figura 5: Cuarteo material cribado por malla No 4. (Elaboración propia, 2020).



Ya con los elementos previamente preparados se llenó el cilindro hasta una altura de 10 cm (4") y se vacía la muestra de la cápsula con la ayuda de un embudo y tratando de eliminar el aire atrapado realizando suaves golpes con la palma en la parte inferior del cilindro y reposándolo por 10 minutos para lograr una saturación, ya pasado el tiempo se realizó el agitado del cilindro de manera manual con un tapón y colocándolo de manera horizontal de un lado hacia otro durante 90 ciclos durante un tiempo de 30 segundos en una longitud aproximada de 20 cm y se dejó reposar durante 20 minutos.

Una vez reposada la muestra se midieron y registraron las lecturas de los finos (LNS_{finos}) en suspensión y posteriormente se introdujo lentamente la varilla con pisón para descansar en la arena y obtener su lectura de arena (LNS_{arena}), para el resultado del equivalente de arena se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%EA = \left(\frac{LNS_{arena}}{LNS_{finos}} \right) \times 100$$

Todos los procedimientos que se realizaron fueron de acuerdo con el manual de métodos de muestreo y pruebas de materiales (SCT, 2002a) realizándose por duplicado y obteniéndose los siguientes resultados:

$$\text{Prueba 1} \quad \%EA = \left(\frac{5.8}{19.2} \right) \times 100 \quad \%EA = 30.2 \%$$

$$\text{Prueba 2} \quad \%EA = \left(\frac{6.0}{19.6} \right) \times 100 \quad \%EA = 31.0\%$$

3.4.7 Desgaste de los Ángeles

La principal razón de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales que se van a emplear, más específicamente es una prueba utilizada en gravas en su mayoría, al igual que las pruebas anteriores se requirió la preparación de una muestra para realizar las pruebas de la misma manera de manera duplicada, en este caso el procedimiento



se realizó de acuerdo con el manual de métodos de muestreo y pruebas de los materiales (SCT, 2002b).

Del material muestreado en el sitio se realizó un cuarteo partiéndolo en cuatro partes iguales y se toman dos cuartos opuestos para lavarlo y eliminar el polvo adherido al material y posteriormente secarlo al horno, con el objetivo que al realizar la prueba no ingresen finos y afecte en los resultados.

Debido al tamaño de los agregados del material y granulometría se definió el tipo de prueba según la tabla 2 donde muestra la composición de muestras y cargas abrasivas que en este caso fue la "A" por lo que se recurrió a obtener las fracciones de masa necesarias respecto al tamaño de partículas correspondientes.

Tabla 4: Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas (SCT, 2002b).

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37.5 - 25	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 10
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12.5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12.5 - 9.5	½" - ⅜"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	⅜" - ¼"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼" - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

Teniendo las masas correspondientes se procedió a realizar la prueba ingresando las esferas y el material a la máquina de los ángeles y cerrándola para hacerla girar a una

velocidad aproximada de 33 rpm durante 15 minutos para obtener 500 revoluciones especificadas por el manual.



Figura 6: Desgaste de los Ángeles. (Elaboración propia, 2020).

Una vez realizado el ciclo de revoluciones se retiró el material en una charola para pasarla por la malla N° 12 y conservar solo lo retenido para nuevamente lavar con agua para retirar material fino y secarlo al horno y tener solamente la masa gruesa y registrarla, para el cálculo del desgaste de Los Ángeles se utilizó la siguiente ecuación:

$$P_a = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

- P_a = Desgaste por trituración Los Ángeles, (%)
- P_i = Masa inicial de la muestra de prueba, (g)
- P_f = Masa final del material de la muestra de prueba mayor de 1,7 mm (malla N°12), (g)



Por lo que se tienen los siguientes resultados para las dos pruebas realizadas:

$$\text{Prueba 1} \quad P_a = \frac{4992 - 3839.5}{4992} \times 100 \quad P_a = 23.1\%$$

$$\text{Prueba 2} \quad P_a = \frac{5025.6 - 3880.8}{5025.6} \times 100 \quad P_a = 22.8\%$$

3.4.8 Prueba Proctor modificada

Debido a que el material es calidad sub base se realizó la prueba Proctor modificada con el molde de 6" y el pisón de 4.54 kg, con el principal objetivo de conocer su M.V.S.M. y obtener así el grado de compactación en campo de las plataformas en las cuales se realizaron pruebas de CBR con métodos de campo con equipo móvil y Clegg Hammer, así mismo conocer su contenido de agua óptimo para la preparación de las muestras de CBR correspondientes en laboratorio.

La preparación y procedimiento de las pruebas se llevó a cabo de acuerdo con el manual de métodos de muestreo y pruebas de materiales para compactaciones AASHTO (SCT, 2006), para la preparación de la muestra se realizó un cuarteo del material previamente seco y disgregado, se tomó una porción representativa de aproximadamente 8 Kg cribado por la malla 3/4" y homogenizándola en una charola se fue vertiendo agua al material en un 6% aproximadamente e incorporando homogéneamente en toda la muestra.

Una vez homogenizada la muestra, se realizó la compactación en el molde, debido a que es prueba proctor modificada esta se realizará en 5 capas a razón de 56 golpes por capa, sobresaliendo un poco de material en la última capa sobre el cilindro y retirando la extensión para enrasar la muestra, una vez realizado el proceso se determinó la masa del cilindro con el material tomando el registro y posteriormente retirando el material del mismo para extraer una pequeña muestra representativa y obtener su contenido de agua respecto al material seco con la ayuda del horno.



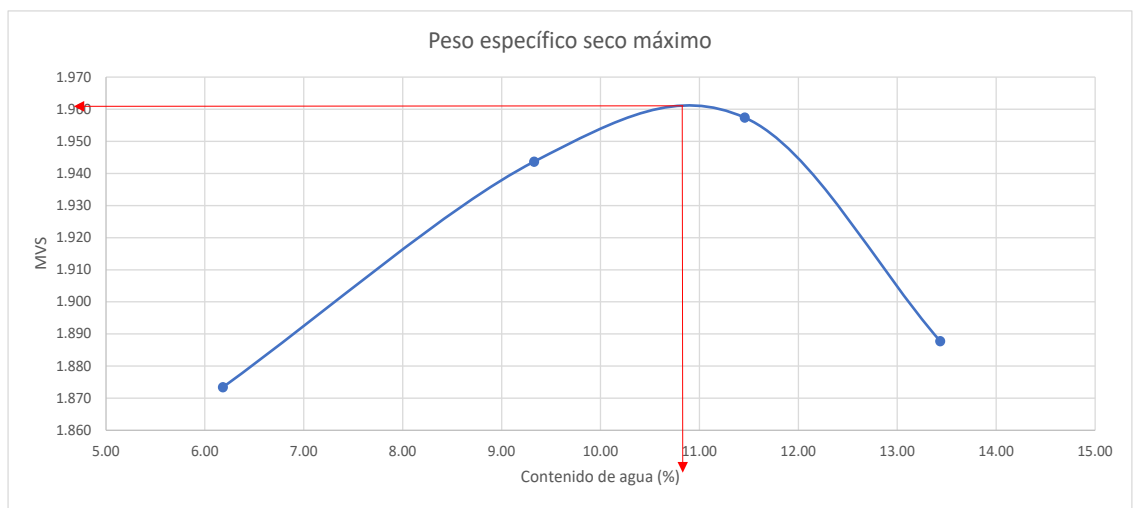
Figura 7: Compactación del material en molde Proctor. (Elaboración propia, 2020).

Este proceso se repite agregando aproximadamente 2% a 3% de agua en la siguiente prueba de la misma manera homogenizando el material, compactándolo, obteniendo su masa con el cilindro y contenido de humedad, esto se realizó 4 veces para lograr obtener varias mediciones y lograr graficar la masa contra su contenido de humedad y así se obtuvo el contenido óptimo para lograr alcanzar en la compactación la M.V.S.M. y se realizó la prueba por duplicado para verificación y mayor certeza en los resultados, los valores obtenidos se muestran en las ilustraciones 5 y 6.



Tipo de prueba :	Proctor			Molde No:	
Número de capas :	5	Peso pisón:	4.54 Kg	Altura de caída:	45.7 cm
No. de golpes por capa :	56	Volumen:	2098.16 cm ³		

Prueba No.	1	2	3	4	5	6	7
Peso molde + suelo húmedo, grs.	10024.90	10309.80	10428.80	10344.20			
Peso del molde, grs.	5851.30	5851.30	5851.30	5851.30			
Peso del suelo húmedo, grs. (Wm)	4173.60	4458.50	4577.50	4492.90			
Peso específico húmedo, kg/cm ³	1.99	2.12	2.18	2.14			
Capsula número	16	50	45	76			
Peso cápsula + suelo húmedo, grs.	66.51	68.63	59.57	91.55			
Peso cápsula + suelo seco, grs.	63.43	63.93	54.80	82.31			
Peso del agua, grs.	3.08	4.70	4.77	9.24			
Peso cápsula, grs.	13.60	13.54	13.17	13.53			
Peso del suelo seco	49.83	50.39	41.63	68.78			
Contenido de agua, % (w).	6.18	9.33	11.46	13.43			
Peso específico seco, Kg/cm ³	1.873	1.944	1.957	1.888			



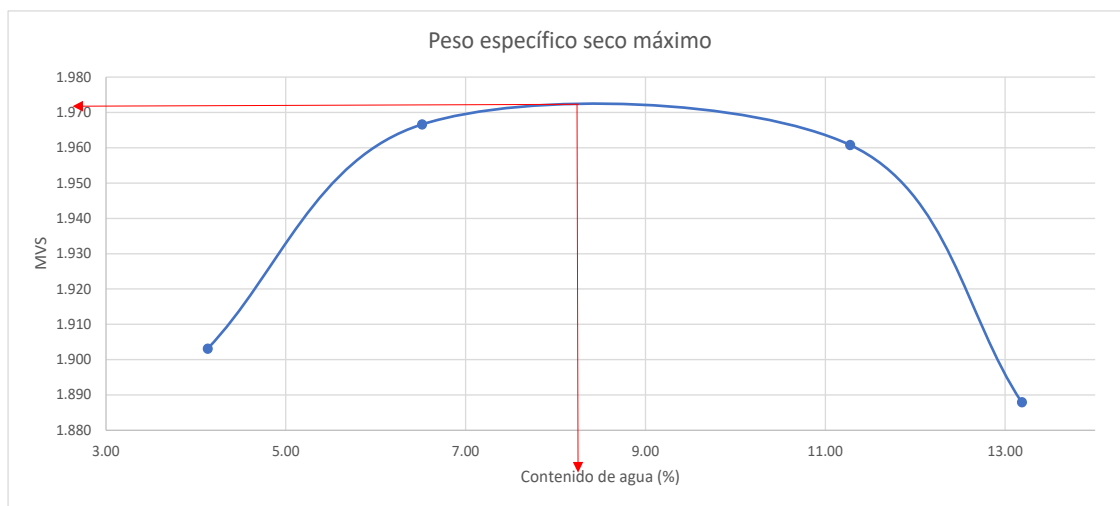
Masa Volumétrica Seca Máxima (Kg/m ³) =	1960
Humedad Óptima (%) =	11

Ilustración 5: Prueba Proctor muestra 1 (Elaboración propia, 2020).



Tipo de prueba :	Proctor		
Número de capas :	5	Peso pisón: 4.54 Kg	Molde No:
No. de golpes por capa :	56	Altura de caída: 45.7 cm	Volumen: 2098.16 cm ³

Prueba No.	1	2	3	4	5	6	7
Peso molde + suelo húmedo, grs.	10009.30	10246.30	10429.20	10334.80			
Peso del molde, grs.	5851.30	5851.30	5851.30	5851.30			
Peso del suelo húmedo, grs. (Wm)	4158.00	4395.00	4577.90	4483.50			
Peso específico húmedo, kg/cm ³	1.98	2.09	2.18	2.14			
Capsula número	A-8	3	A-10	31			
Peso cápsula + suelo húmedo, grs.	66.92	57.52	53.96	52.99			
Peso cápsula + suelo seco, grs.	64.80	54.81	49.82	48.23			
Peso del agua, grs.	2.12	2.71	4.14	4.76			
Peso cápsula, grs.	13.48	13.21	13.10	12.13			
Peso del suelo seco	51.32	41.60	36.72	36.10			
Contenido de agua, % (w).	4.13	6.51	11.27	13.19			
Peso específico seco, Kg/cm ³	1.903	1.967	1.961	1.888			



Masa Volumétrica Seca Máxima (Kg/m ³) =	1970
Humedad Óptima (%) =	8.6

Ilustración 6: Prueba Proctor muestra 2. (Elaboración propia, 2020).

3.5 ELABORACIÓN DE PRUEBAS CBR EN EL LUGAR CON EQUIPO MÓVIL

El objetivo principal de la prueba es la misma que la del laboratorio y consiste en determinar el CBR de un material, la diferencia es que el equipo de prueba se encuentra adaptado a un vehículo, pero el procedimiento de prueba prácticamente es el mismo, a diferencia que se realiza directamente en el suelo a probar sin una saturación previa del material, simplemente se realizan algunas consideraciones como suelo uniforme y que se encuentre homogéneo, adicional a esto, se debe conocer el equipo y saberlo manipular para tener resultados consistentes.

Para realizar las pruebas CBR en el lugar con el equipo móvil fue necesario previamente realizar de una manera aleatoria la asignación de pruebas necesarias en las plataformas de pruebas para cumplir con los requisitos necesarios para el diseño de bloques aleatorizados y posteriormente determinar si existe diferencia en la medición entre los tres métodos, por lo que las pruebas se realizaron en los siguientes puntos del lugar:



Figura 8: Ubicación de pruebas de campo. (Elaboración propia, 2020).

Tabla 5: Identificación de manzana y lote (SCT, 2002b).

Número de identificación	Manzana	Lote
3	34	7
4	36	13
7	37	2
6	38	1
10	32	42
2	42	18
5	44	9
8	47	3
1	49	5
9	41	41

Una vez ubicadas las plataformas para realizar las pruebas se programaron los trabajos de campo con el equipo móvil, viendo las condiciones apropiadas para la correcta ejecución de las mismas, es decir que no hubiese lluvias o alguna condición climática la cual pudiese afectar las propiedades del suelo como saturación de esta, congelamiento, etc., adicional previo a las pruebas se revisó el equipo para el correcto funcionamiento de este.



Figura 9: CBR en campo con equipo móvil. (Elaboración propia, 2020).

Los aspectos y procedimientos necesarios para la ejecución de las pruebas se llevaron a cabo de acuerdo con el manual de métodos de muestreo y pruebas CBR en el lugar (SCT, 2013), el cual consiste en la penetración de un pistón en el suelo de igual forma a la prueba de CBR en el laboratorio, sin embargo se tiene una pequeña variante en cuanto a los tiempos de penetración y solamente se toman en cuenta cinco lecturas o en caso dado hasta que el equipo sobre pase su capacidad de carga, de igual manera las lecturas son graficadas para obtener las curvas típicas de carga – penetración tal como se muestra en la tabla 6:

Tabla 6: Lecturas de tiempo – penetración (SCT, 2013).

Lecturas	Tiempo min:s	Penetración mm
Primera	01:00	1.27
Segunda	02:00	2.54
Tercera	03:00	3.81
Cuarta	04:00	5.08
Quinta	06:00	7.62

Tomando en cuenta la relación de tiempo – penetración para el caso de pruebas de CBR en el lugar con equipo móvil se procedió a realizar las pruebas por triplicado en cada una de las plataformas antes mencionadas, llevando los procedimientos establecidos de acuerdo con el manual y registrando las lecturas de cada una de las penetraciones, cabe señalar que no en todas las pruebas se lograron las cinco lecturas, debido a que la capacidad del equipo fue superada.



Figura 10: Prueba CBR en campo (Elaboración propia, 2020).

Una vez que se obtuvieron las curvas típicas se toman en cuenta algunas consideraciones de correcciones según el tipo de curva obtenida y los resultados, ya una vez



tomadas en cuenta y revisadas se realiza el cálculo para la obtención del CBR del lugar, mediante la siguiente ecuación:

$$CBR = \frac{100C'_{2.54}}{13.97}$$

- CBR = Valor Soporte de California en el lugar de la capa estudiada, expresado como un porcentaje de la carga de referencia de 13,97 kN (1 425 kg)
- C'2,54 = Promedio de las tres determinaciones de la carga C2,54, (kN).

Una vez realizadas todas las pruebas de campo mediante el método CBR en el lugar con equipo móvil se obtuvieron los resultados para cada una de las plataformas ubicándolas por número de lote y manzana como se muestra a continuación:



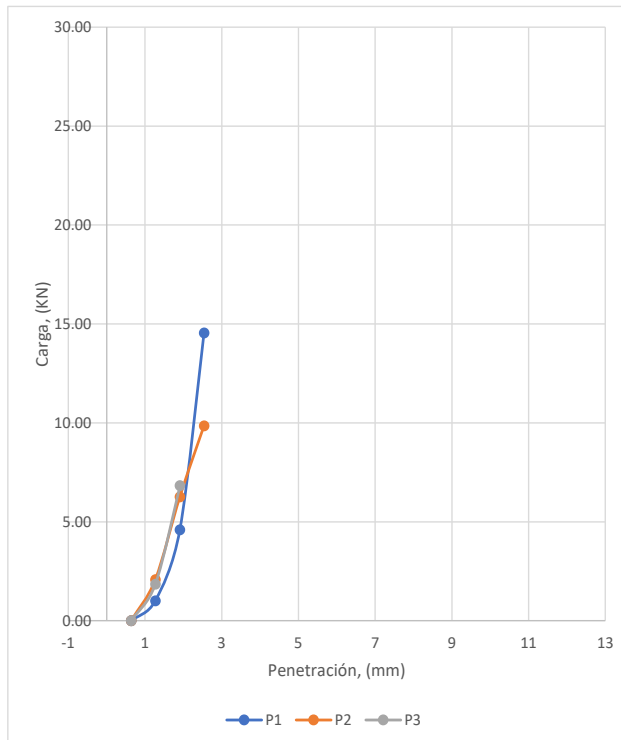
Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería



Valor de CBR con equipo Móvil

Solicitante :	Oscar Orlando Gaytán Cruz
Lugar de prueba:	Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 32 lote 42
Capa:	Subbase
Descripción:	Material utilizado en plataformas
Fecha de iniciación :	



Masa volumétrica seca (yd)= 1771 Kg/m³

Contenido de agua (w)= 5 %

Grado de compactación= 90 %

Penetración (mm)	Carga de penetración (KN)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.64	0.00	0.00	0.00		
1.27	1.01	2.08	1.85		
1.91					
2.54	4.59	6.26	6.83		
3.81	14.55	9.85			
5.08					
7.62					
10.15					
12.7					
C 2.54	4.59	6.26	6.83		
Promedio C'2.54	6				
CBR (%)	42				

Observaciones: _____

Ilustración 7: CBR en campo Manzana 32 lote 42 (Elaboración propia, 2020).



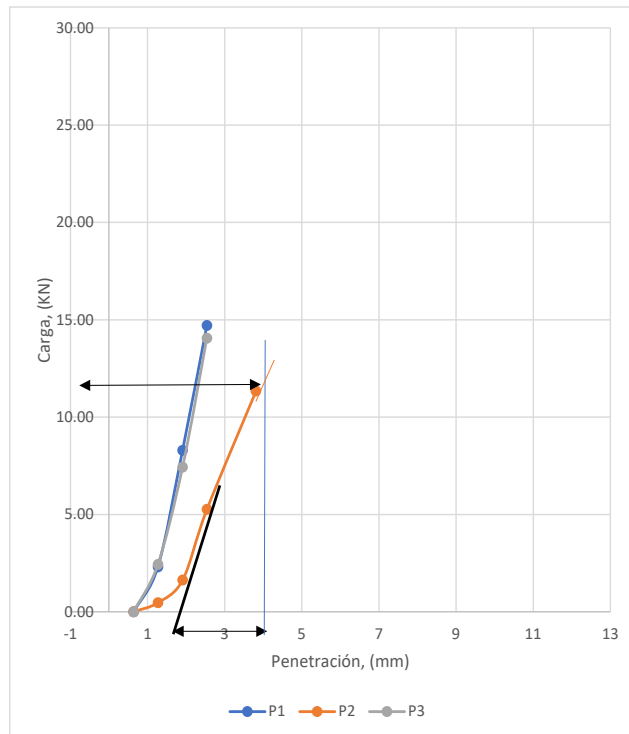
Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería



Valor de CBR con equipo Móvil

Solicitante :	Oscar Orlando Gaytán Cruz
Lugar de prueba:	Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 34 lote 7
Capa:	Subbase
Descripción:	Material utilizado en plataformas
Fecha de iniciación :	



Masa volumétrica seca (yd)= 1819 Kg/m³

Contenido de agua (w)= 4.96 %

Grado de compactación= 92 %

Penetración (mm)	Carga de penetración (KN)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.64	0.00	0.00	0.00		
1.27	2.30	0.47	2.44		
1.91					
2.54	8.30	1.63	7.43		
3.81	14.71	5.27	14.06		
5.08		11.34			
7.62					
10.15					
12.7					
C 2.54	8.30	12.00	7.43		
Promedio C' 2.54	9				
CBR (%)	66				

Observaciones: Lectura corregida P2 = 12 KN

Ilustración 8: CBR en campo Manzana 34 lote 7 (Elaboración propia, 2020).



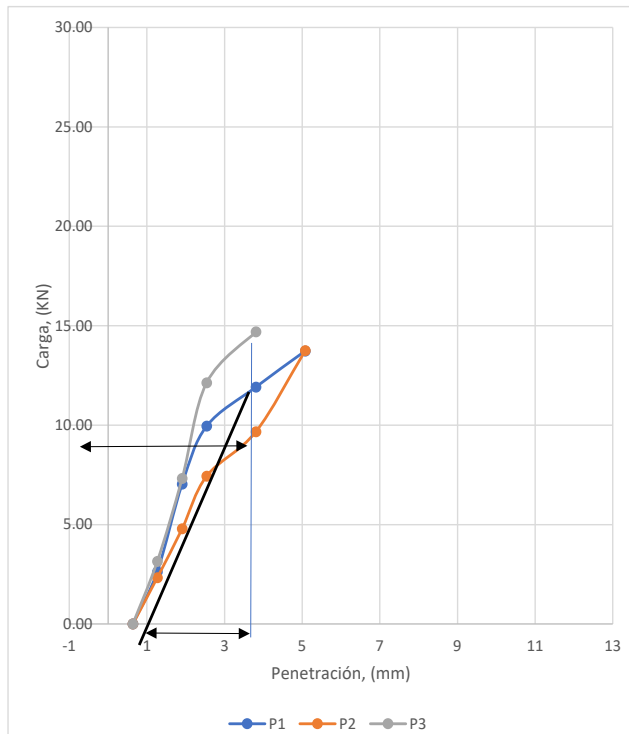
Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería



Valor de CBR con equipo Móvil

Solicitante :	Oscar Orlando Gaytán Cruz
Lugar de prueba:	Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 36 lote 13
Capa:	Subbase
Descripción:	Material utilizado en plataformas
Fecha de iniciación :	



Masa volumétrica seca (γ_d)= 1804 Kg/m³

Contenido de agua (w)= 5.45 %

Grado de compactación= 92 %

Penetración (mm)	Carga de penetración (KN)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.64	0.00	0.00	0.00		
1.27	2.63	2.33	3.15		
1.91					
2.54	7.03	4.79	7.32		
3.81	9.95	7.44	12.13		
5.08	11.92	9.67	14.69		
7.62	13.73	13.74			
10.15					
12.7					
C 2.54	7.03	9.00	7.32		
Promedio C'2.54	8				
CBR (%)	56				

Observaciones: Lectura corregida P2 = 9 KN

Ilustración 9: CBR en campo Manzana 36 lote 13 (Elaboración propia, 2020).



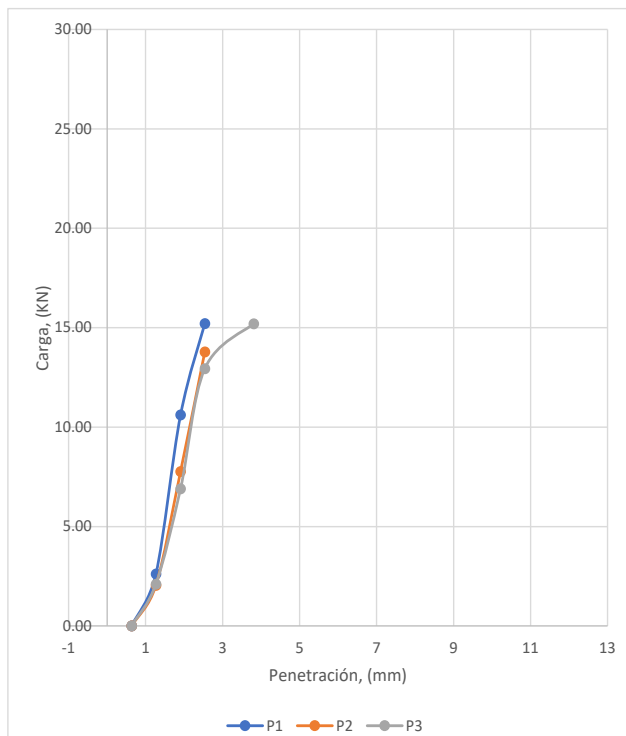
Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería



Valor de CBR con equipo Móvil

Solicitante :	Oscar Orlando Gaytán Cruz
Lugar de prueba:	Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 37 lote 2
Capa:	Subbase
Descripción:	Material utilizado en plataformas
Fecha de iniciación :	



Masa volumétrica seca (yd)= 1813 Kg/m³

Contenido de agua (w)= 4.95 %

Grado de compactación= 92 %

Penetración (mm)	Carga de penetración (KN)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.64	0.00	0.00	0.00		
1.27	2.61	2.04	2.10		
1.91					
2.54	10.61	7.77	6.90		
3.81	15.20	13.79	12.94		
5.08			15.20		
7.62					
10.15					
12.7					
C 2.54	10.61	7.77	6.90		
Promedio C' 2.54	8				
CBR (%)	60				

Observaciones: _____

Ilustración 10: CBR en campo Manzana 37 lote 2 (Elaboración propia, 2020).



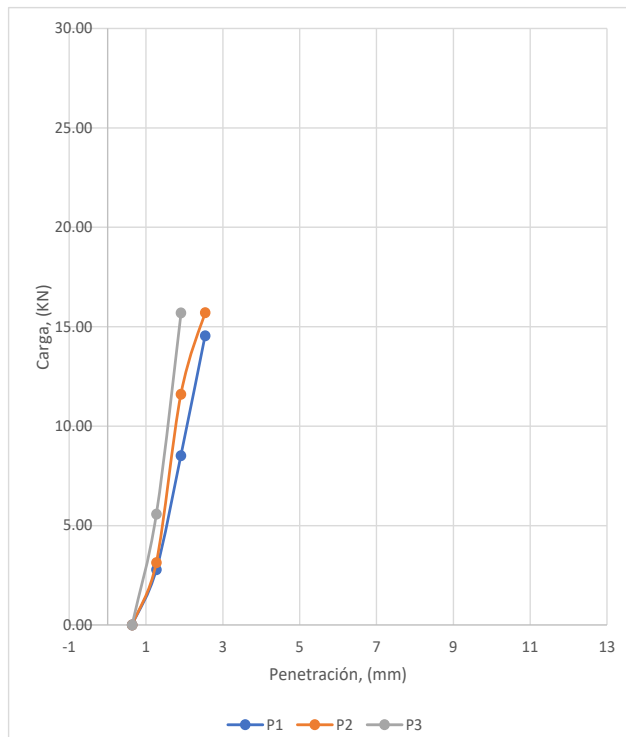
Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería



Valor de CBR con equipo Móvil

Solicitante :	Oscar Orlando Gaytán Cruz
Lugar de prueba:	Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 38 lote 1
Capa:	Subbase
Descripción:	Material utilizado en plataformas
Fecha de iniciación :	



Masa volumétrica seca (yd)= 1865 Kg/m³

Contenido de agua (w)= 4.67 %

Grado de compactación= 95 %

Penetración (mm)	Carga de penetración (KN)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.64	0.00	0.00	0.00		
1.27	2.78	3.13	5.58		
1.91					
2.54	8.52	11.61	15.69		
3.81	14.55	15.70			
5.08					
7.62					
10.15					
12.7					
C 2.54	8.52	11.61	15.69		
Promedio	12				
C'2.54	12				
CBR (%)	85				

Observaciones: _____

Ilustración 11: CBR en campo Manzana 38 lote 1 (Elaboración propia, 2020).



Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería



Valor de CBR con equipo Móvil

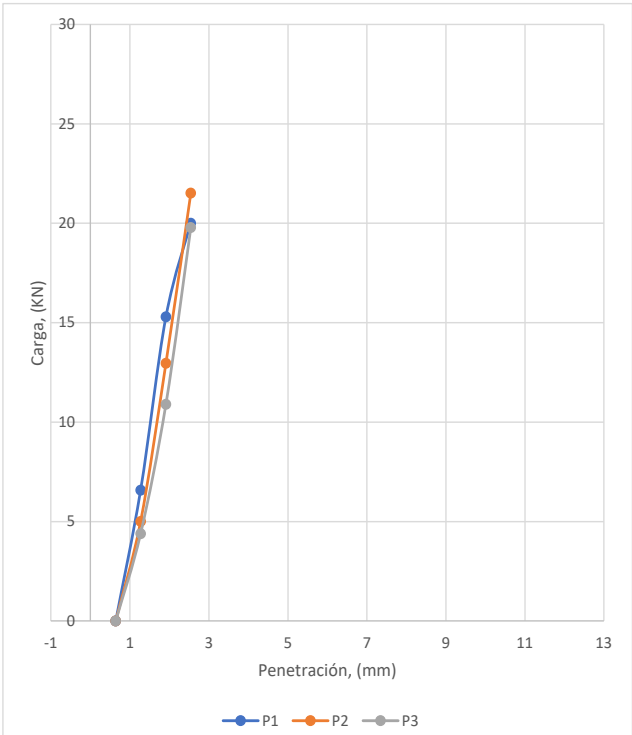
Solicitante : Oscar Orlando Gaytán Cruz

Lugar de prueba: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 41 lote 41

Capa: Subbase

Descripción: Material utilizado en plataformas

Fecha de iniciación :



Masa volumétrica seca (γd)= 1897 Kg/m³

Contenido de agua (w)= 5.13 %

Grado de compactación= 96 %

Penetración (mm)	Carga de penetración (kN)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.64	0	0	0		
1.27	6.5833	5.0083	4.3964		
1.91					
2.54	15.294	12.958	10.903		
3.81	20.007	21.514	19.787		
5.08					
7.62					
10.15					
12.7					
C 2.54	15.294	12.958	10.903		
Promedio	13				
C' 2.54	93				
CBR (%)	93				

Observaciones: _____

Ilustración 12: CBR en campo Manzana 41 lote 41 (Elaboración propia, 2020).



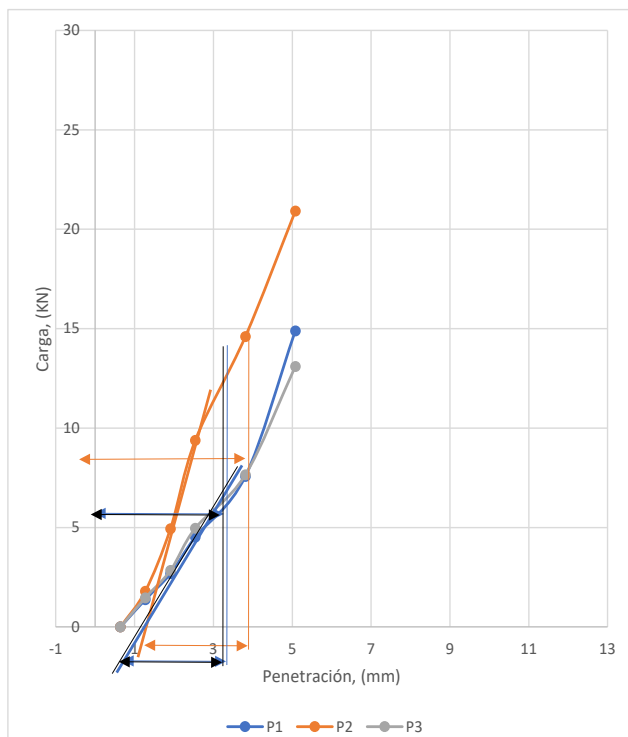
Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería



Valor de CBR con equipo Móvil

Solicitante :	Oscar Orlando Gaytán Cruz
Lugar de prueba:	Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 42 lote 18
Capa:	Subbase
Descripción:	Material utilizado en plataformas
Fecha de iniciación :	



Masa volumétrica seca (yd)= 1795 Kg/m³

Contenido de agua (w)= 5.72 %

Grado de compactación= 91 %

Penetración (mm)	Carga de penetración (KN)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.64	0	0	0		
1.27	1.3749	1.7966	1.4642		
1.91					
2.54	2.6782	4.9436	2.8401		
3.81	4.517	9.3851	4.9662		
5.08	7.5738	14.599	7.6472		
7.62	14.889	20.915	13.1		
10.15					
12.7					
C 2.54	6	8.5	6		
Promedio	7				
C' 2.54	49				
CBR (%)	49				

Observaciones: Lecturas corregidas

Ilustración 13: CBR en campo Manzana 42 lote 18 (Elaboración propia, 2020).



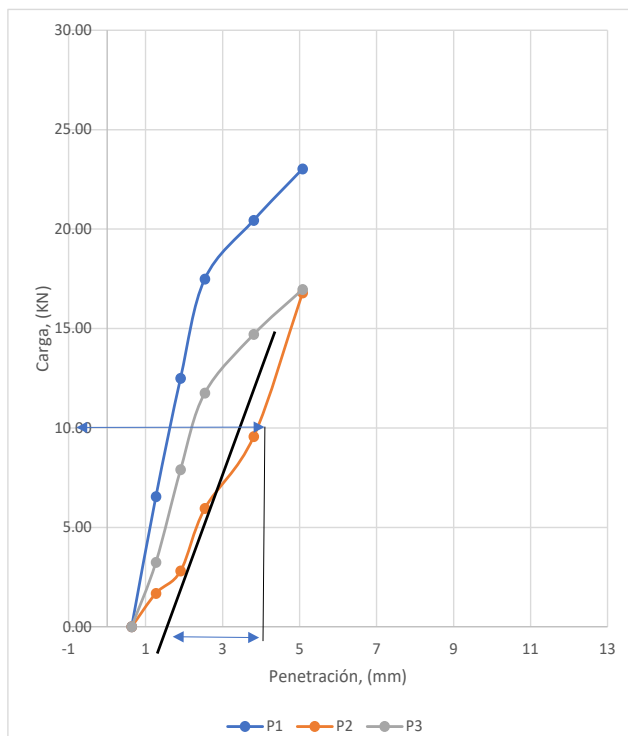
Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería



Valor de CBR con equipo Móvil

Solicitante :	Oscar Orlando Gaytán Cruz
Lugar de prueba:	Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 44 lote 9
Capa:	Subbase
Descripción:	Material utilizado en plataformas
Fecha de iniciación :	



Masa volumétrica seca (yd)= 1841 Kg/m³

Contenido de agua (w)= 4.6 %

Grado de compactación= 93 %

Penetración (mm)	Carga de penetración (KN)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.64	0.00	0.00	0.00		
1.27	6.54	1.68	3.24		
1.91					
2.54	12.50	2.80	7.90		
3.81	17.49	5.95	11.76		
5.08	20.44	9.56	14.70		
7.62	23.03	16.80	16.97		
10.15					
12.7					
C 2.54	12.50	10.20	7.90		
Promedio C'2.54	10				
CBR (%)	73				

Observaciones: Lectura corregida P2 = 10.1 KN

Ilustración 14: CBR en campo Manzana 44 lote 9 (Elaboración propia, 2020).



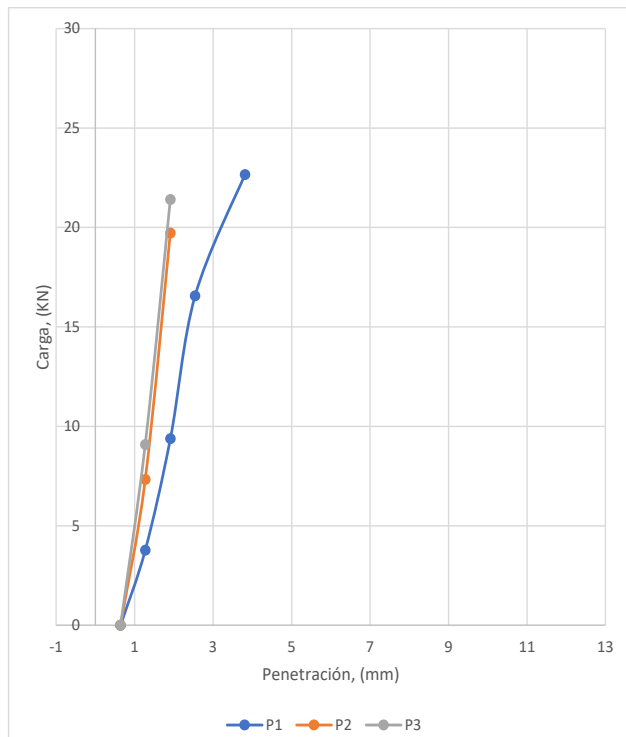
Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería



Valor de CBR con equipo Móvil

Solicitante :	Oscar Orlando Gaytán Cruz
Lugar de prueba:	Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 47 lote 3
Capa:	Subbase
Descripción:	Material utilizado en plataformas
Fecha de iniciación :	



Masa volumétrica seca (yd)= 1823 Kg/m³

Contenido de agua (w)= 4.47 %

Grado de compactación= 93 %

Penetración (mm)	Carga de penetración (KN)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.64	0	0	0		
1.27	3.7805	7.3286	9.0919		
1.91					
2.54	9.3782	19.715	21.403		
3.81	16.565				
5.08	22.654				
7.62					
10.15					
12.7					
C 2.54	9.3782	19.715	21.403		
Promedio C'2.54	9				
CBR (%)	67				

Observaciones: _____

Ilustración 15: CBR en campo Manzana 47 lote 3 (Elaboración propia, 2020).

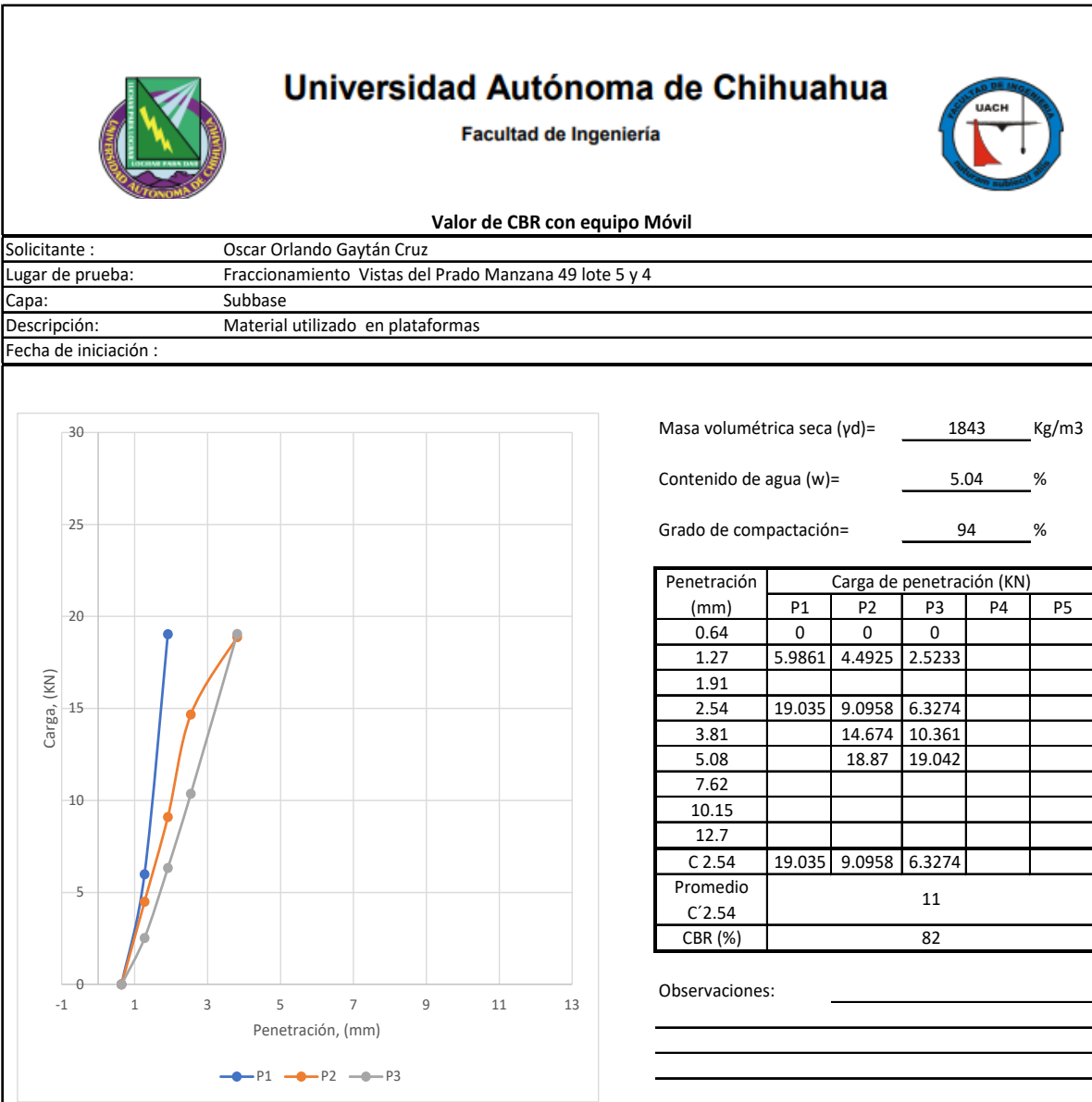


Ilustración 16: CBR en campo Manzana 49 lote 5 y 4 (Elaboración propia, 2020).

Algunas lecturas fueron corregidas dada a la forma de curva que presentaban, esto apeándose a la normativa, adicional a las pruebas de CBR en el lugar con equipo móvil, se realizaron también pruebas de compactación del lugar mediante densímetro nuclear y



obteniendo así su masa y contenido de agua en ese momento para tomarse en consideración de los resultados de CBR respecto a su grado de compactación.



Figura 11: Verificación de compactación en plataformas (Elaboración propia, 2020).

De las pruebas realizadas se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las plataformas y teniendo anteriormente de las pruebas Proctor la M.V.S.M. se determinó el grado de compactación sobre cada una como se muestra:



Tabla 7: Resultados de compactaciones (Elaboración propia, 2020).

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 44 lote 9			
γ Lugar 1=	1920 kg/m ³	γ Lugar 2=	1932 kg/m ³
% Humedad=	4.25 %	% Humedad=	4.94 %
M.V.S.=	1841.7 kg/m ³	M.V.S.=	1841 kg/m ³
γ Promedio=	1841 kg/m³		
Grado de compactación=	93 %		

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 32 lote 42			
γ Lugar 1=	1870 kg/m ³	γ Lugar 2=	1849 kg/m ³
% Humedad=	4.9 %	% Humedad=	5.12 %
M.V.S.=	1782.7 kg/m ³	M.V.S.=	1759 kg/m ³
γ Promedio=	1771 kg/m³		
Grado de compactación=	90 %		

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 47 lote 3			
γ Lugar 1=	1908 kg/m ³	γ Lugar 2=	1901 kg/m ³
% Humedad=	5.21 %	% Humedad=	3.72 %
M.V.S.=	1813.5 kg/m ³	M.V.S.=	1833 kg/m ³
γ Promedio=	1823 kg/m³		
Grado de compactación=	93 %		

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 38 lote 1			
γ Lugar 1=	1959 kg/m ³	γ Lugar 2=	1945 kg/m ³
% Humedad=	5.12 %	% Humedad=	4.22 %
M.V.S.=	1863.6 kg/m ³	M.V.S.=	1866 kg/m ³
γ Promedio=	1865 kg/m³		
Grado de compactación=	95 %		

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 49 lote 5 y 4			
γ Lugar 1=	1924 kg/m ³	γ Lugar 2=	1947 kg/m ³
% Humedad=	4.83 %	% Humedad=	5.25 %
M.V.S.=	1835.4 kg/m ³	M.V.S.=	1850 kg/m ³
γ Promedio=	1843 kg/m³		
Grado de compactación=	94 %		

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 37 lote 2			
γ Lugar 1=	1909 kg/m ³	γ Lugar 2=	1896 kg/m ³
% Humedad=	4.68 %	% Humedad=	5.21 %
M.V.S.=	1823.7 kg/m ³	M.V.S.=	1802 kg/m ³
γ Promedio=	1813 kg/m³		
Grado de compactación=	92 %		

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 41 lote 41			
γ Lugar 1=	1985 kg/m ³	γ Lugar 2=	2004 kg/m ³
% Humedad=	5.02 %	% Humedad=	5.25 %
M.V.S.=	1890.1 kg/m ³	M.V.S.=	1904 kg/m ³
γ Promedio=	1897 kg/m³		
Grado de compactación=	96 %		

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 36 lote 13			
γ Lugar 1=	1910 kg/m ³	γ Lugar 2=	1895 kg/m ³
% Humedad=	5.28 %	% Humedad=	5.61 %
M.V.S.=	1814.2 kg/m ³	M.V.S.=	1794 kg/m ³
γ Promedio=	1804 kg/m³		
Grado de compactación=	92 %		

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 42 lote 18			
γ Lugar 1=	1907 kg/m ³	γ Lugar 2=	1889 kg/m ³
% Humedad=	6.2 %	% Humedad=	5.25 %
M.V.S.=	1795.7 kg/m ³	M.V.S.=	1795 kg/m ³
γ Promedio=	1795 kg/m³		
Grado de compactación=	91 %		

Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 34 lote 7			
γ Lugar 1=	1896 kg/m ³	γ Lugar 2=	1923 kg/m ³
% Humedad=	4.93 %	% Humedad=	5 %
M.V.S.=	1806.9 kg/m ³	M.V.S.=	1831 kg/m ³
γ Promedio=	1819 kg/m³		
Grado de compactación=	92 %		

3.6 ELABORACIÓN DE PRUEBAS CBR CON EQUIPO CLEGG HAMMER

Para poder determinar las correlaciones y pruebas con el Clegg Hammer en el lugar fue necesario previamente una verificación rápida del equipo, el cual consistió en corroborar que las mediciones del valor de impacto fueran las correctas, esto con un anillo del mismo equipo que cuenta con una graduación con margen de error, que nos sirve como un indicador

para probar el martillo sobre él en una plancha de concreto uniforme y verificar que los valores de impacto sean los correctos y no se encuentre de cierta forma descalibrado.



Figura 12: Equipo Clegg Hammer (Elaboración propia, 2020).

Una vez verificado se llevó el equipo a campo con el que se realizaron las mediciones correspondientes en los mismos puntos donde fueron realizadas las pruebas de CBR en campo con equipo móvil, obteniendo un mínimo de tres lecturas por plataforma, para la obtención del valor de impacto correcto se realizan cinco caídas del martillo donde la cuarta lectura es la que se toma como válida, en los casos que se reportaron errores por diferencias de lecturas en el equipo las pruebas se repitieron hasta lograr valores adecuados que fueran aceptadas por el Clegg Hammer.



Figura 13: Pruebas con Clegg Hammer en campo (Elaboración propia, 2020).

Ya realizadas las pruebas en los diferentes puntos aleatorios en las plataformas se registraron todos los valores de impacto obtenidos por el equipo Clegg Hammer obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 8: Valores de Impacto con equipo Clegg Hammer (Elaboración propia, 2020).

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 32 lote 42

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	24	24	13
2	31	31	25
3	34	36	24
4	35	32	28
5	40	37	28

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 41 lote 41

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	49	39	51
2	50	52	51
3	48	52	50
4	49	51	52
5	49	51	53

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 34 lote 7

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	54	45	45
2	54	52	51
3	52	54	52
4	62	45	53
5	62	62	47

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 42 lote 18

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	35	42	15
2	31	41	32
3	41	46	38
4	41	43	38
5	41	45	40

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 36 lote 13

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	15	25	22
2	19	27	35
3	27	30	37
4	28	31	37
5	30	31	37

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 44 lote 9

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	31	48	32
2	36	49	38
3	37	50	39
4	37	51	43
5	38	51	44

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 37 lote 2

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	23	25	22
2	33	27	35
3	33	30	37
4	32	31	37
5	32	31	37

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 47 lote 3

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	42	51	44
2	42	53	46
3	49	52	47
4	43	46	45
5	47	52	47

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 38 lote 1

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	37	39	41
2	45	42	48
3	47	45	50
4	47	44	49
5	47	48	51

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 49 lote 5 y 4

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	39	49	41
2	45	35	46
3	52	43	54
4	53	49	46
5	54	43	41



Teniendo el registro por lote, manzana y el valor de impacto de cada uno de los puntos se realizó un promedio del valor, el cual se utilizó para la determinación del CBR por medio de una correlación basada en pruebas de laboratorio presentadas por el Dr Baden Clegg, el cual menciona que es de uso general pero está sujeta a una alta variabilidad debido al tipo de suelo y recomienda a cada organización considerar establecer su propia relación para materiales y condiciones específicas (Dr. Clegg, 1980), sin embargo establece la siguiente ecuación para su uso general:

$$CBR = (0.24 (CIV) + 1)^2$$

Usando la ecuación propuesta para uso general se lograron obtener los siguientes valores de CBR mediante la correlación donde CIV = valor de impacto:

Tabla 9: CBR correlacionado 1980 1-2 (Elaboración propia,2020).

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 32 lote 42

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	24	24	13
2	31	31	25
3	34	36	24
4	35	32	28
5	40	37	28

Grado de compactación en el lugar	90
-----------------------------------	----

Promedio cuarto golpe =	31.7
CBR #1 =	88 %
CBR #2 =	75 %
CBR #3 =	60 %
CBR promedio=	74 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 34 lote 7

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	54	45	45
2	54	52	51
3	52	54	52
4	62	45	53
5	62	62	47

Grado de compactación en el lugar	92
-----------------------------------	----

Promedio cuarto golpe =	53.3
CBR #1 =	252 %
CBR #2 =	139 %
CBR #3 =	188 %
CBR promedio=	190 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 36 lote 13

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	15	25	22
2	19	27	35
3	27	30	37
4	28	31	37
5	30	31	37

Grado de compactación en el lugar	92
-----------------------------------	----

Promedio cuarto golpe =	32.0
CBR #1 =	60 %
CBR #2 =	71 %
CBR #3 =	98 %
CBR promedio=	75 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 37 lote 2

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	23	25	22
2	33	27	35
3	33	30	37
4	32	31	37
5	32	31	37

Grado de compactación en el lugar	92
-----------------------------------	----

Promedio cuarto golpe =	33.3
CBR #1 =	75 %
CBR #2 =	71 %
CBR #3 =	98 %
CBR promedio=	81 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 38 lote 1

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	37	39	41
2	45	42	48
3	47	45	50
4	47	44	49
5	47	48	51

Grado de compactación en el lugar	95
-----------------------------------	----

Promedio cuarto golpe =	46.7
CBR #1 =	151 %
CBR #2 =	134 %
CBR #3 =	163 %
CBR promedio=	149 %



Tabla 10: CBR correlacionado 1980 2-2 (Elaboración propia, 2020)

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 41 lote 41

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	49	39	51
2	50	52	51
3	48	52	50
4	49	51	52
5	49	51	53

Grado de compactación en el lugar
96

Promedio cuarto golpe =	50.7
CBR #1 =	163 %
CBR #2 =	175 %
CBR #3 =	182 %
CBR promedio=	173 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 42 lote 18

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	35	42	15
2	31	41	32
3	41	46	38
4	41	43	38
5	41	45	40

Grado de compactación en el lugar
91

Promedio cuarto golpe =	40.7
CBR #1 =	118 %
CBR #2 =	128 %
CBR #3 =	102 %
CBR promedio=	116 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 44 lote 9

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	31	48	32
2	36	49	38
3	37	50	39
4	37	51	43
5	38	51	44

Grado de compactación en el lugar
93

Promedio cuarto golpe =	43.7
CBR #1 =	98 %
CBR #2 =	175 %
CBR #3 =	128 %
CBR promedio=	132 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 47 lote 3

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	42	51	44
2	42	53	46
3	49	52	47
4	43	46	45
5	47	52	47

Grado de compactación en el lugar
93

Promedio cuarto golpe =	44.7
CBR #1 =	128 %
CBR #2 =	145 %
CBR #3 =	139 %
CBR promedio=	137 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 49 lote 5 y 4

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	39	49	41
2	45	35	46
3	52	43	54
4	53	49	46
5	54	43	41

Grado de compactación en el lugar
94

Promedio cuarto golpe =	49.3
CBR #1 =	188 %
CBR #2 =	163 %
CBR #3 =	145 %
CBR promedio=	165 %

Previamente a un análisis estadístico a este punto se puede ver una diferencia considerable a diferencia de los valores de CBR obtenidos por el método de campo, cabe aclarar que las pruebas fueron realizadas en las mismas plataformas para ser representativos los resultados.

Adicional en la investigación se encontró un estudio similar, pero con algunas variantes realizado en Arabia Saudita, en donde se realizaron algunas muestras de CBR en suelos muy similares como GW y SW, en donde obtuvieron una correlación combinada de estos materiales, una para suelos GM y otra para suelos SM solamente, la cual se ajustan



bastante bien a los resultados obtenidos de las pruebas en campo, la siguiente correlación corresponde para los tipos de suelos GM y los cuales son similares a los obtenidos en este estudio y el que mejor se ajustó a nuestros valores:

$$CBR = 0.861 * (CIV)^{1.136} \text{ (Al-Amoudi et al., 2002)}$$

Por lo que también se realizó un cálculo adicional con esta correlación para obtener más resultados respecto al valor de impacto del Clegg Hammer ya obtenidos y tener un mejor panorama y enfoque de la realidad al probarse en campo y apegarse mejor a las metodologías normadas y establecidas por la SCT, en la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de CBR para cada lectura:

Tabla 11: CBR correlacionado 2002 1-2 (Elaboración propia, 2020).

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 32 lote 42

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI # 3
1	24	24	13
2	31	31	25
3	34	36	24
4	35	32	28
5	40	37	28

Grado de compactación en el lugar
90

Promedio cuarto golpe =	31.7
CBR #1 =	49 %
CBR #2 =	44 %
CBR #3 =	38 %
CBR promedio=	44 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 34 lote 7

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI # 3
1	54	45	45
2	54	52	51
3	52	54	52
4	62	45	53
5	62	62	47

Grado de compactación en el lugar
92

Promedio cuarto golpe =	53.3
CBR #1 =	94 %
CBR #2 =	65 %
CBR #3 =	78 %
CBR promedio=	79 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 36 lote 13

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI # 3
1	15	25	22
2	19	27	35
3	27	30	37
4	28	31	37
5	30	31	37

Grado de compactación en el lugar
92

Promedio cuarto golpe =	32.0
CBR #1 =	38 %
CBR #2 =	43 %
CBR #3 =	52 %
CBR promedio=	44 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 37 lote 2

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI # 3
1	23	25	22
2	33	27	35
3	33	30	37
4	32	31	37
5	32	31	37

Grado de compactación en el lugar
92

Promedio cuarto golpe =	33.3
CBR #1 =	44 %
CBR #2 =	43 %
CBR #3 =	52 %
CBR promedio=	46 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 38 lote 1

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI # 3
1	37	39	41
2	45	42	48
3	47	45	50
4	47	44	49
5	47	48	51

Grado de compactación en el lugar
95

Promedio cuarto golpe =	46.7
CBR #1 =	68 %
CBR #2 =	63 %
CBR #3 =	72 %
CBR promedio=	68 %



Tabla 12: CBR correlacionado 2002 2-2 (Elaboración propia, 2020).

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 41 lote 41

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	49	39	51
2	50	52	51
3	48	52	50
4	49	51	52
5	49	51	53

Grado de compactación en el lugar
96

Promedio cuarto golpe =	50.7
CBR #1 =	72 %
CBR #2 =	75 %
CBR #3 =	77 %
CBR promedio=	74 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 42 lote 18

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	35	42	15
2	31	41	32
3	41	46	38
4	41	43	38
5	41	45	40

Grado de compactación en el lugar
91

Promedio cuarto golpe =	40.7
CBR #1 =	58 %
CBR #2 =	62 %
CBR #3 =	54 %
CBR promedio=	58 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 44 lote 9

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	31	48	32
2	36	49	38
3	37	50	39
4	37	51	43
5	38	51	44

Grado de compactación en el lugar
93

Promedio cuarto golpe =	43.7
CBR #1 =	52 %
CBR #2 =	75 %
CBR #3 =	62 %
CBR promedio=	63 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 47 lote 3

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	42	51	44
2	42	53	46
3	49	52	47
4	43	46	45
5	47	52	47

Grado de compactación en el lugar
93

Promedio cuarto golpe =	44.7
CBR #1 =	62 %
CBR #2 =	67 %
CBR #3 =	65 %
CBR promedio=	65 %

Ubicación: Fraccionamiento Vistas del Prado Manzana 49 lote 5 y 4

No Golpe	VI # 1	VI # 2	VI #3
1	39	49	41
2	45	35	46
3	52	43	54
4	53	49	46
5	54	43	41

Grado de compactación en el lugar
94

Promedio cuarto golpe =	49.3
CBR #1 =	78 %
CBR #2 =	72 %
CBR #3 =	67 %
CBR promedio=	72 %

3.7 ELABORACIÓN DE PRUEBAS CBR EN EL LABORATORIO

Una vez que se caracterizó el material y observar que cumple con todos los parámetros necesarios mínimos para cumplir como calidad sub base se procedió a realizar una serie de pruebas CBR en laboratorio y obtener varias lecturas para la comparación con los diferentes métodos aquí realizados, uno de los principales problemas al realizar dichas pruebas es el tiempo de preparación y obtención de cada uno de los datos, ya que debido a la limitación de moldes de pruebas y el número de muestra requerido para lograr realizar un análisis estadístico adecuado de los resultados fue alto.



Se tomaron algunas consideraciones para evitar la menor variación posible en cuanto a resultados como la homogenización por igual del material muestreado, utilización de los mismos moldes y prensa CBR, la preparación de las muestras con el mismo operador para evitar manipulaciones de la muestra o equipo diferente, entre algunas otras.

Los procedimientos realizados en las pruebas fueron las establecidas por el manual de métodos de muestreo y pruebas de materiales para valores soportes de california (CBR) y expansión (Exp) en laboratorio (SCT, 2008), ya que es el manual que se encuentra en la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Para la preparación de las muestras se obtuvieron muestras representativas de aproximadamente 21 Kg y cribadas por la malla de $\frac{3}{4}$ " desechando el material retenido, previamente de las pruebas Proctor se obtuvo el contenido de humedad óptimo, lo cual es dato necesario para la incorporación de agua uniforme a la muestra y homogenización de la misma para lograr la compactación necesaria en los moldes CBR.

Los moldes previamente fueron lubricados con aceite en las paredes interiores, así mismo se colocaron los collarines de los moldes, el disco espaciador y el papel filtro sobre la base para evitar que el material al compactar se adhiriera a esta y se procedió a compactar 3 muestras a razón de 5 capas a diferentes golpes 56, 25 y 10 por capa hasta sobre pasar por un poco el collarín de los moldes y poderlos enrasar siendo lo más uniforme posible para posteriormente retirar el disco espaciador y obtener su masa, luego se volvió a colocar papel filtro y sobre la muestra la placa de base perforada de masa conocida para después saturarlas en agua durante 76 horas y obtener su máxima expansión.



Figura 14: Pruebas de CBR en laboratorio (Elaboración propia, 2020).

Una vez preparada la muestra se procedió a realizar la prueba mediante la penetración con el pistón al centro del espécimen y aplicando una carga inicial de 43 N (4.38 Kg), se colocaron los extensómetros para medir la penetración apoyado en el vástago sobre la pared del molde y colocando en ceros la medición de cargas se realiza la penetración una vez listo todo el equipo a una velocidad uniforme de 1.27 mm/min, registrando las cargas obtenidas en cada una de las penetraciones según la tabla 13.

Tabla 13: Lecturas tiempo – penetración (SCT, 2008).

Lecturas	Tiempo min:s	Penetración mm
Primera	00:30	0.64
Segunda	01:00	1.27
Tercera	01:30	1.91
Cuarta	02:00	2.54
Quinta	03:00	3.81
Sexta	04:00	5.08
Séptima	06:00	7.62
Octava	08:00	10.16
Novena	10:00	12.7



La misma norma menciona que algunas lecturas como la octava y novena pueden omitirse en caso de que la capacidad del equipo sea rebasada, en este caso las lecturas solamente fueron tomadas hasta la séptima, por lo que para verificar la correcta obtención de los resultados estas mediciones se grafican para obtener curvas típicas carga – penetración y ver qué tipo de comportamiento presenta o si es defectuosa y por lo tanto no son válidos los resultados.

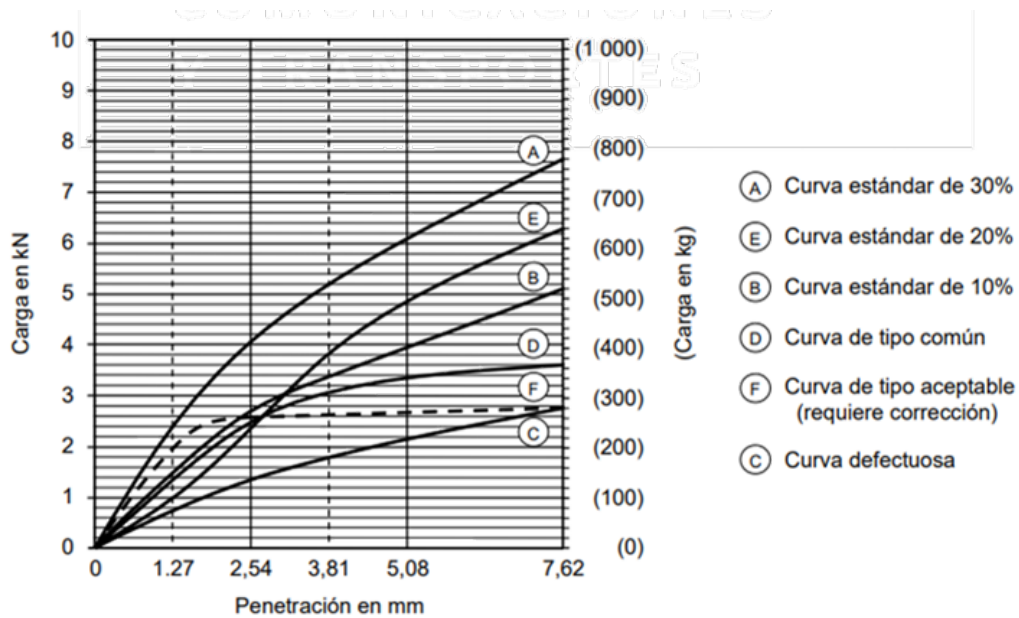


Ilustración 17: Curvas típicas carga – penetración M-MMP-1-11/08, figura 8 (SCT, 2008).

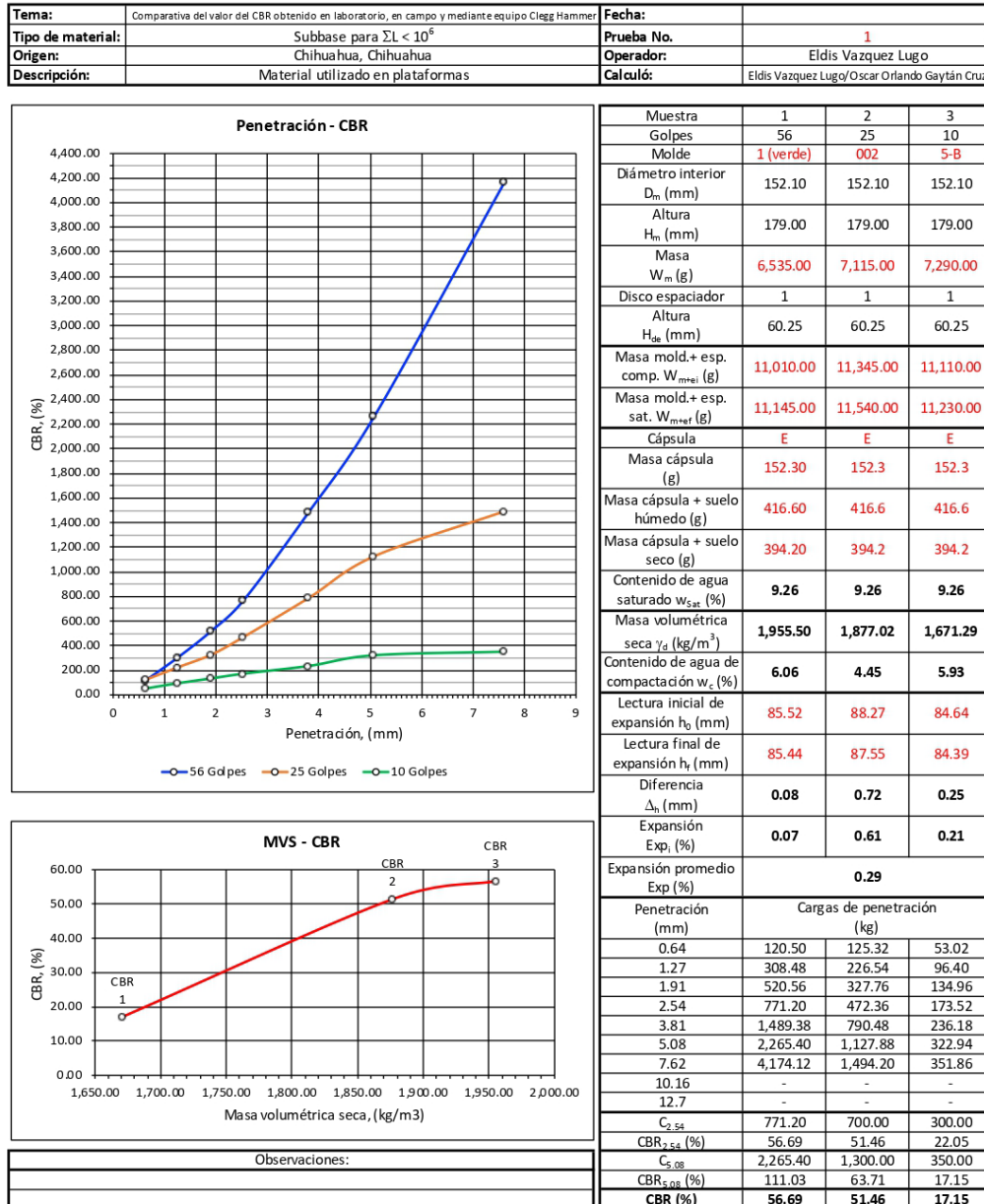
Para la obtención del CBR se realiza tomando en cuenta las lecturas 2.54 mm y 5.08 mm a partir de las siguientes expresiones:

$$CBR_{2.54} = \frac{100C_{2.54}}{13.34} \text{ y } CBR_{5.08} = \frac{100C_{5.08}}{20.01}$$

- CBR_{2,54} = Valor Soporte de California determinado para una penetración de 2,54 mm
- CBR_{5,08} = Valor Soporte de California determinado para una penetración de 5,08 mm
- C_{2,54} = Carga aplicada o corregida, (kN), para una penetración de 2,54 mm
- C_{5,08} = Carga aplicada o corregida, (kN), para una penetración de 5,08 mm



En este caso los resultados de los CBR para cada una de las pruebas se muestran en las siguientes ilustraciones, así mismo se graficaron las pruebas correspondientes de acuerdo con las 3 diferentes masas volumétricas de los diferentes números de golpes para poder obtener el CBR a sus diferentes grados de compactación según la graficas obtenidas:

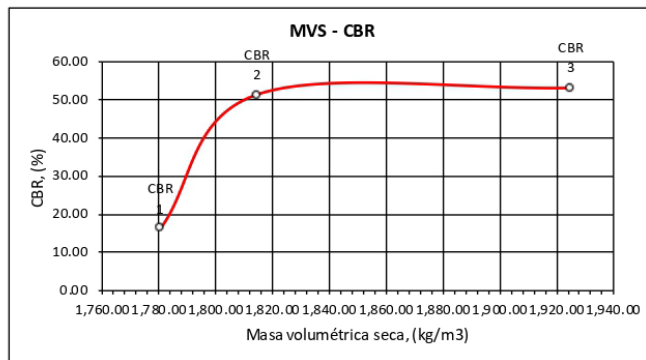
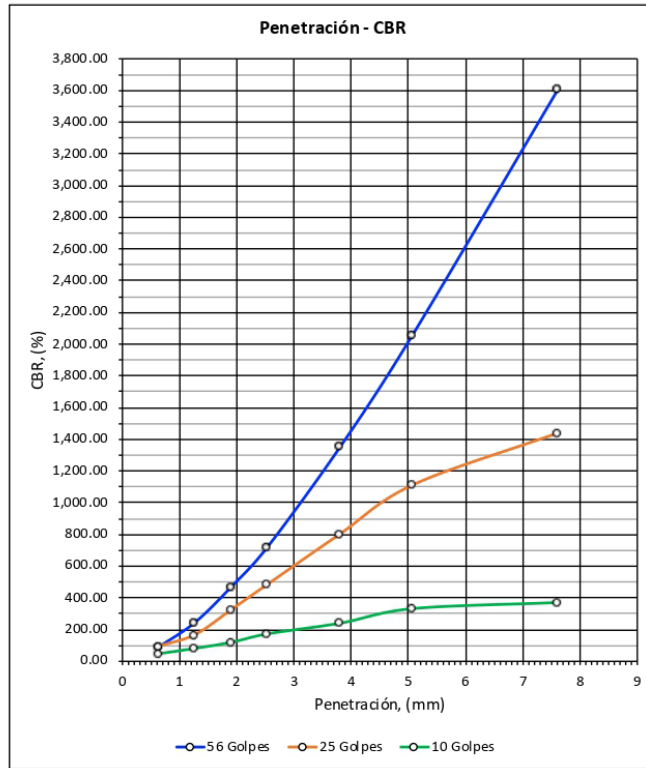


Observaciones:

Ilustración 18: CBR de laboratorio prueba 1 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	2
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



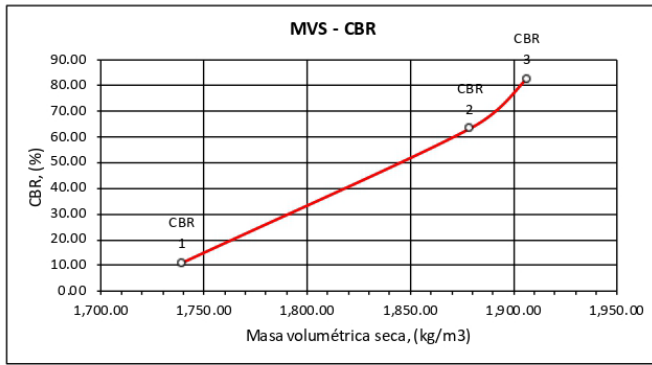
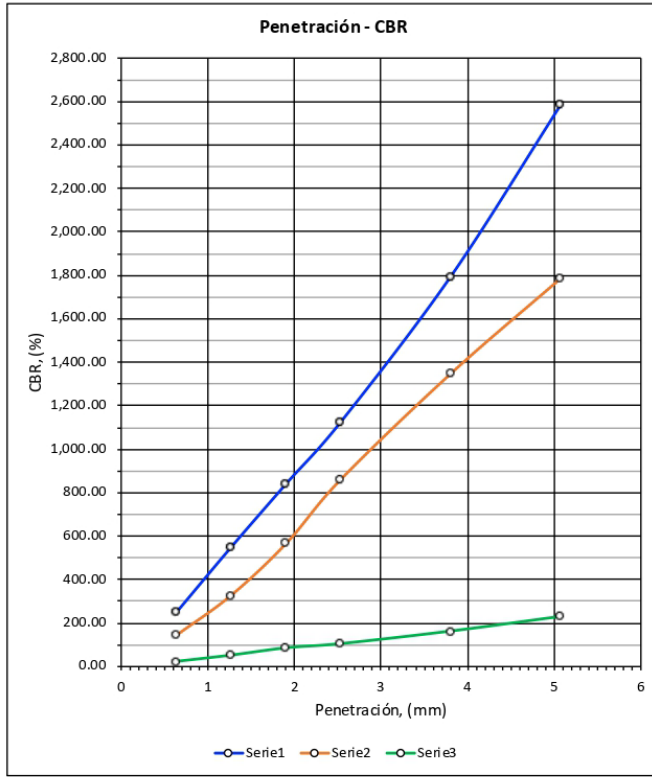
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	03	02	01 (verde)
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	7,385.00	7,345.00	6,535.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ej} (g)	12,045.00	11,795.00	10,405.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+ef} (g)	11,915.00	11,615.00	10,725.00
Cápsula	E1	E1	E1
Masa cápsula (g)	69.00	69	69
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	295.50	295.5	295.5
Masa cápsula + suelo seco (g)	276.70	276.7	276.7
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	9.05	9.05	9.05
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m ³)	1,925.24	1,814.74	1,780.74
Contenido de agua de compactación w_c (%)	12.18	13.65	0.72
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	90.96	94.94	85.79
Lectura final de expansión h_f (mm)	90.58	94.28	85.42
Diferencia Δ_h (mm)	0.38	0.66	0.37
Expansión Exp_i (%)	0.32	0.56	0.31
Expansión promedio Exp (%)	0.40		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	91.58	96.40	48.20
1.27	245.82	168.70	81.94
1.91	472.36	327.76	120.50
2.54	723.00	486.82	173.52
3.81	1,354.42	804.94	241.00
5.08	2,062.96	1,113.42	332.58
7.62	3,610.18	1,441.18	371.14
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	723.00	700.00	225.00
$CBR_{2.54}$ (%)	53.15	51.46	16.54
$C_{5.08}$	2,062.96	1,150.00	350.00
$CBR_{5.08}$ (%)	101.10	56.36	17.15
CBR (%)	53.15	51.46	16.54

Ilustración 19: CBR de laboratorio prueba 2 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	3
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



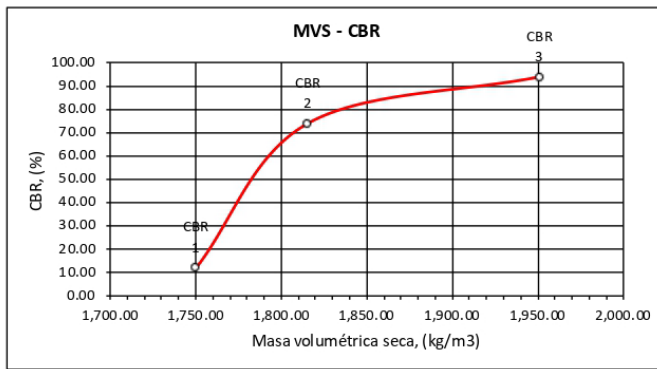
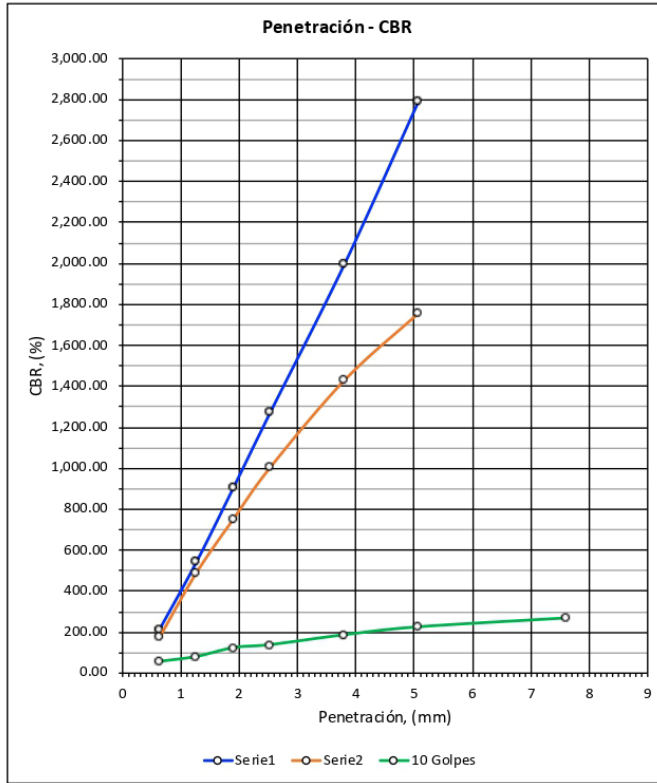
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	01 (verde)	002	5-B
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	6,535.00	7,115.00	7,290.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	10,895.00	11,365.00	11,115.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+ef} (g)	11,040.00	11,555.00	11,400.00
Cápsula	R6	R6	R6
Masa cápsula (g)	69.10	69.1	69.1
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	250.00	250	250
Masa cápsula + suelo seco (g)	234.30	234.3	234.3
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	9.50	9.50	9.50
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m^3)	1,906.71	1,879.20	1,739.53
Contenido de agua de compactación w_c (%)	5.98	4.82	1.91
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	88.75	83.58	93.95
Lectura final de expansión h_f (mm)	88.48	83.07	93.74
Diferencia Δ_n (mm)	0.27	0.51	0.21
Expansión Exp. (%)	0.23	0.43	0.18
Expansión promedio Exp (%)	0.28		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	250.64	144.60	24.10
1.27	549.48	327.76	53.02
1.91	843.50	568.76	86.76
2.54	1,127.88	862.78	106.04
3.81	1,797.86	1,349.60	163.88
5.08	2,588.34	1,788.22	231.36
7.62	-	-	-
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,127.88	862.78	150.00
$CBR_{2.54}$ (%)	82.92	63.43	11.03
$C_{5.08}$	2,588.34	1,788.22	300.00
$CBR_{5.08}$ (%)	126.85	87.64	14.70
CBR (%)	82.92	63.43	11.03

Ilustración 20: CBR de laboratorio prueba 3 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	4
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



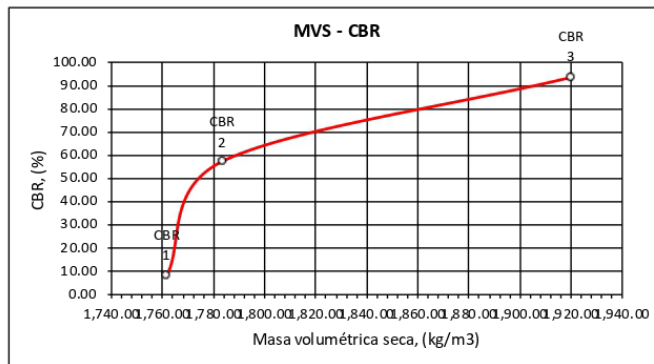
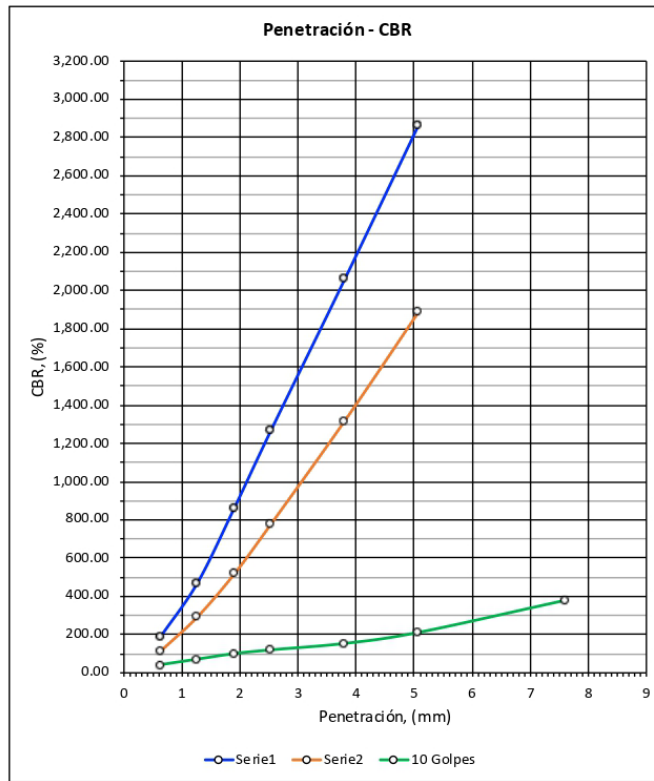
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	03	50	5-B
Diámetro interior D _m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H _m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W _m (g)	7,385.00	8,725.00	7,290.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H _{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W _{m+ei} (g)	11,895.00	12,910.00	11,130.00
Masa mold.+ esp. sat. W _{m+esat} (g)	12,000.00	13,100.00	11,430.00
Cápsula	R2	A	R2
Masa cápsula (g)	68.60	6.48	68.6
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	284.20	73.81	284.2
Masa cápsula + suelo seco (g)	265.30	66.78	265.3
Contenido de agua saturado w _{sat} (%)	9.61	11.66	9.61
Masa volumétrica seca γ _d (kg/m ³)	1,951.40	1,815.95	1,750.55
Contenido de agua de compactación w _c (%)	7.11	6.81	1.67
Lectura inicial de expansión h ₀ (mm)	92.48	83.34	84.26
Lectura final de expansión h _f (mm)	92.20	83.17	84.15
Diferencia Δ _h (mm)	0.28	0.17	0.11
Expansión Exp _i (%)	0.24	0.14	0.09
Expansión promedio Exp (%)	0.16		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	216.90	178.34	57.84
1.27	544.66	491.64	81.94
1.91	910.98	756.74	125.32
2.54	1,277.30	1,007.38	139.78
3.81	2,000.30	1,431.54	187.98
5.08	2,795.60	1,759.30	226.54
7.62	-	-	269.92
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
C _{2.54}	1,277.30	1,007.38	170.00
CBR _{2.54} (%)	93.90	74.06	12.50
C _{5.08}	2,795.60	1,759.30	250.00
CBR _{5.08} (%)	137.01	86.22	12.25
CBR (%)	93.90	74.06	12.25

Ilustración 21: CBR de laboratorio prueba 4 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	5
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



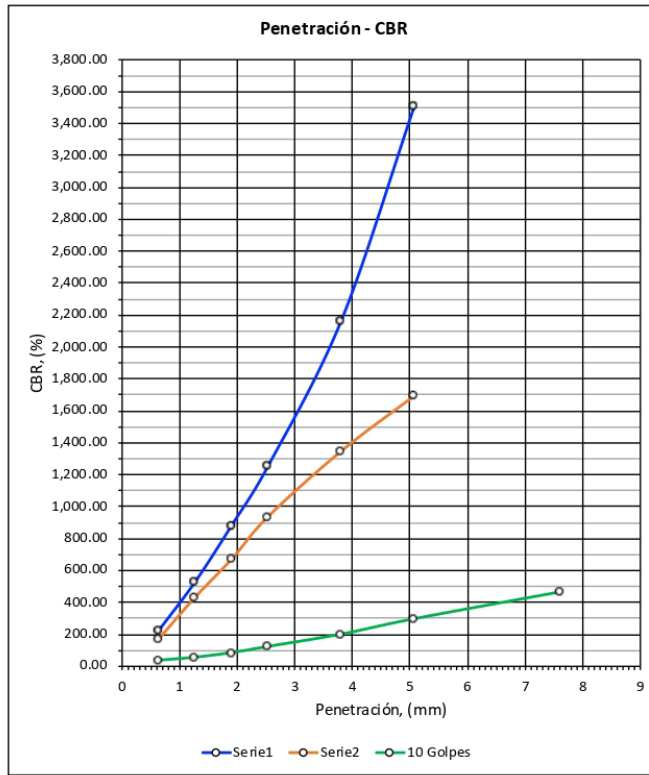
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	01 (verde)	51	5-B
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	6,535.00	8,520.00	7,290.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+el} (g)	10,920.00	12,655.00	11,140.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+es} (g)	11,085.00	12,850.00	11,465.00
Cápsula	R10	37	R10
Masa cápsula (g)	70.50	6.05	70.5
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	304.20	106.81	304.2
Masa cápsula + suelo seco (g)	283.30	95.6	283.3
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	9.82	12.52	9.82
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m³)	1,920.18	1,783.54	1,761.93
Contenido de agua de compactación w_c (%)	5.84	7.45	1.27
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	83.99	119.82	86.95
Lectura final de expansión h_f (mm)	83.80	119.72	86.87
Diferencia Δ_h (mm)	0.19	0.10	0.08
Expansión Exp. (%)	0.16	0.08	0.07
Expansión promedio Exp (%)	0.10		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	192.80	115.68	43.38
1.27	472.36	294.02	72.30
1.91	867.60	520.56	101.22
2.54	1,272.48	780.84	120.50
3.81	2,062.96	1,320.68	154.24
5.08	2,867.90	1,889.44	212.08
7.62	-	-	380.78
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,272.48	780.84	120.50
$CBR_{2.54}$ (%)	93.55	57.40	8.86
$C_{5.08}$	2,867.90	1,889.44	212.08
$CBR_{5.08}$ (%)	140.55	92.60	212.08
CBR (%)	93.55	57.40	8.86

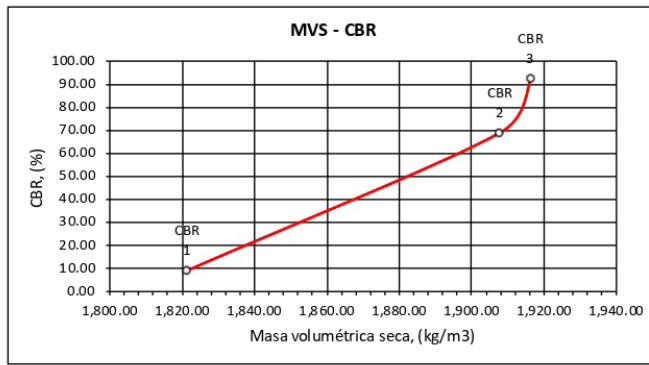
Ilustración 22: CBR de laboratorio prueba 5 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	6
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	18	02	5-B
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	8,685.00	7,345.00	7,290.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	13,120.00	11,670.00	11,435.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+es} (g)	13,230.00	11,870.00	11,610.00
Cápsula	10	10	10
Masa cápsula (g)	5.63	5.63	5.63
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	139.89	139.89	139.89
Masa cápsula + suelo seco (g)	127.78	127.78	127.78
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	9.91	9.91	9.91
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m ³)	1,916.46	1,908.02	1,821.58
Contenido de agua de compactación w_c (%)	7.25	5.06	5.46
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	110.52	82.25	80.17
Lectura final de expansión h_f (mm)	110.50	82.21	79.87
Diferencia Δ_h (mm)	0.02	0.04	0.30
Expansión Exp_i (%)	0.02	0.03	0.25
Expansión promedio Exp (%)	0.10		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	226.54	173.52	38.56
1.27	530.20	433.80	57.84
1.91	886.88	674.80	86.76
2.54	1,258.02	939.90	125.32
3.81	2,169.00	1,349.60	202.44
5.08	3,513.78	1,696.64	298.84
7.62	-	-	467.54
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,258.02	939.90	125.32
$CBR_{2.54}$ (%)	92.48	69.10	9.21
$C_{5.08}$	3,513.78	1,696.64	298.84
$CBR_{5.08}$ (%)	172.21	83.15	14.65
CBR (%)	92.48	69.10	9.21

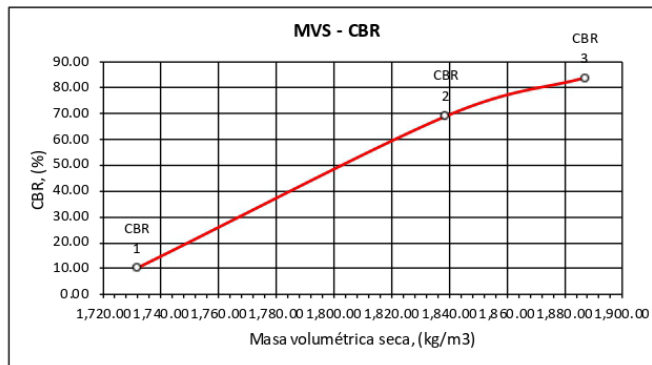
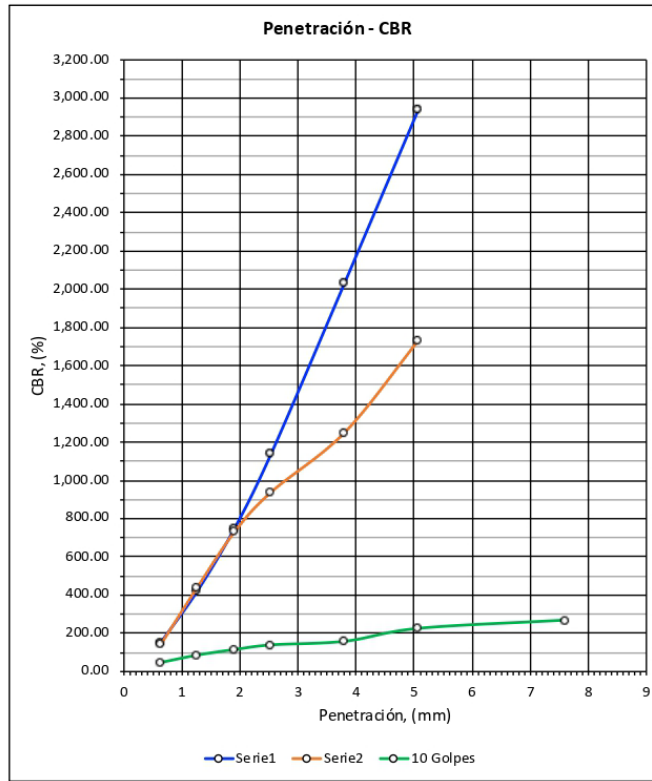


Observaciones:

Ilustración 23: CBR de laboratorio prueba 6 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	7
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



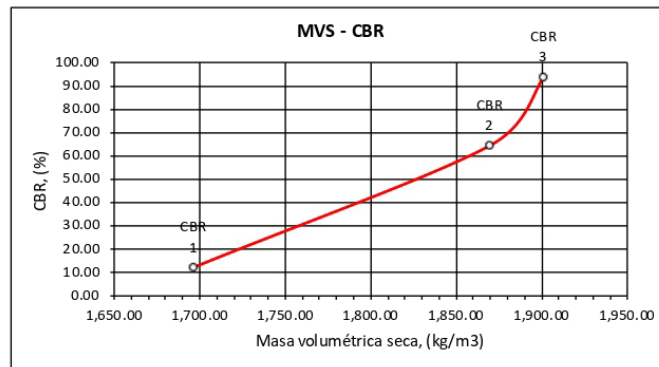
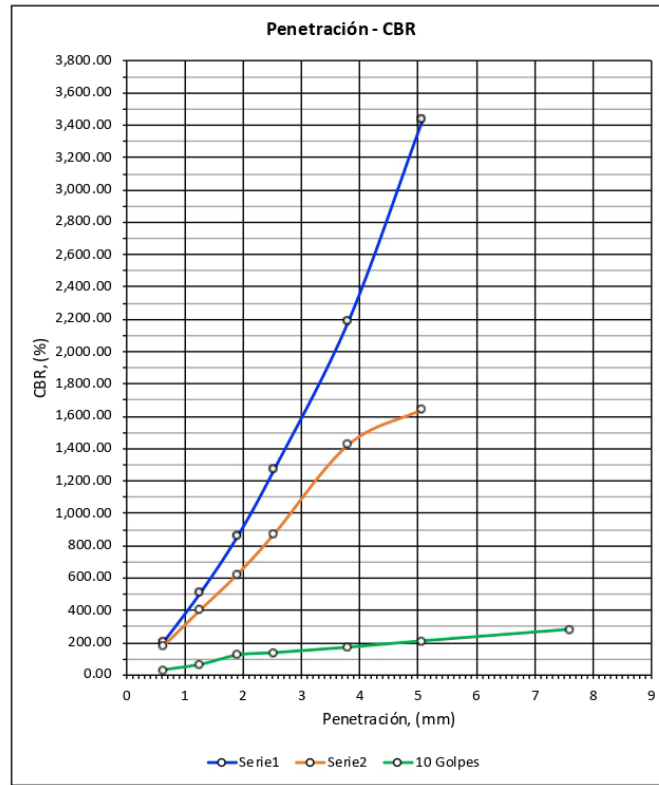
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	21	002	5-B
Diámetro interior D _m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H _m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W _m (g)	8,750.00	7,115.00	7,290.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H _{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W _{mref} (g)	13,115.00	11,270.00	11,080.00
Masa mold.+ esp. sat. W _{mref} (g)	13,240.00	11,490.00	11,410.00
Cápsula	14	14	14
Masa cápsula (g)	5.79	5.79	5.79
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	108.12	108.12	108.12
Masa cápsula + suelo seco (g)	98.60	98.6	98.6
Contenido de agua saturado W _{sat} (%)	10.26	10.26	10.26
Masa volumétrica seca γ _d (kg/m ³)	1,887.37	1,839.03	1,731.84
Contenido de agua de compactación w _c (%)	7.19	4.71	1.43
Lectura inicial de expansión h ₀ (mm)	118.36	89.42	90.45
Lectura final de expansión h _f (mm)	118.20	89.36	90.22
Diferencia Δ _h (mm)	0.16	0.06	0.23
Expansión Exp _i (%)	0.13	0.05	0.19
Expansión promedio Exp (%)	0.13		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	154.24	144.60	48.20
1.27	424.16	443.44	86.76
1.91	751.92	732.64	115.68
2.54	1,142.34	939.90	139.78
3.81	2,038.86	1,253.20	159.06
5.08	2,945.02	1,735.20	226.54
7.62	-	-	269.92
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
C _{2.54}	1,142.34	939.90	139.78
CBR _{2.54} (%)	83.98	69.10	10.28
C _{5.08}	2,945.02	1,735.20	226.54
CBR _{5.08} (%)	144.33	85.04	11.10
CBR (%)	83.98	69.10	10.28

Ilustración 24: CBR de laboratorio prueba 7 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	8
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



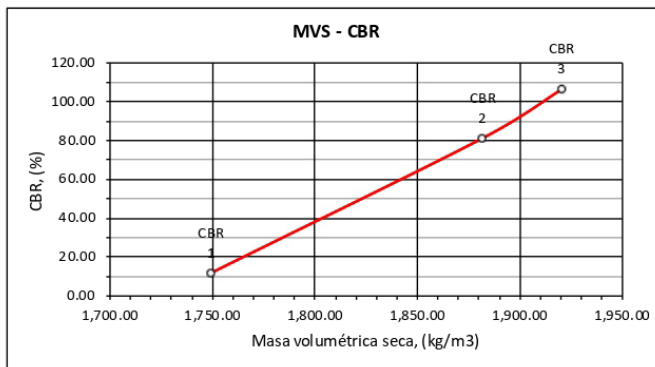
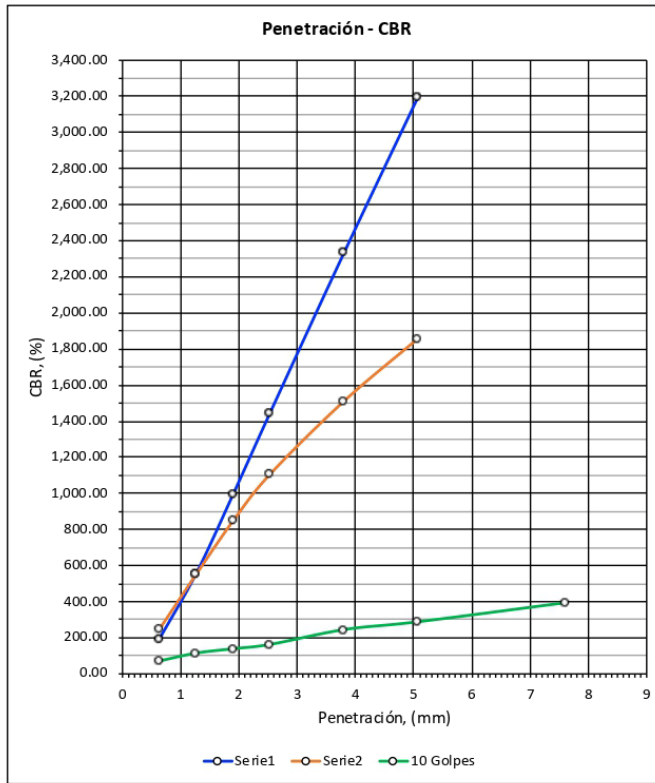
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	40	02	03
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	8,620.00	7,345.00	7,385.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	13,040.00	11,540.00	11,205.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+ef} (g)	13,145.00	11,795.00	11,520.00
Cápsula	37	37	14
Masa cápsula (g)	6.07	6.07	5.79
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	82.47	82.47	67.26
Masa cápsula + suelo seco (g)	75.34	75.34	60.21
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	10.29	10.29	12.95
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m^3)	1,901.47	1,869.95	1,696.64
Contenido de agua de compactación w_c (%)	7.73	3.97	4.35
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	119.27	89.95	99.08
Lectura final de expansión h_f (mm)	118.84	88.78	98.98
Diferencia Δ_h (mm)	0.43	1.17	0.10
Expansión Exp_i (%)	0.36	0.99	0.08
Expansión promedio Exp (%)	0.48		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	207.26	183.16	33.74
1.27	510.92	404.88	67.48
1.91	862.78	626.60	125.32
2.54	1,277.30	877.24	139.78
3.81	2,193.10	1,426.72	173.52
5.08	3,436.66	1,643.62	212.08
7.62	-	-	284.38
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,277.30	877.24	170.00
$CBR_{2.54}$ (%)	93.90	64.49	12.50
$C_{5.08}$	3,436.66	1,643.62	250.00
$CBR_{5.08}$ (%)	168.43	80.55	12.25
CBR (%)	93.90	64.49	12.25

Ilustración 25: CBR de laboratorio prueba 8 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	9
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



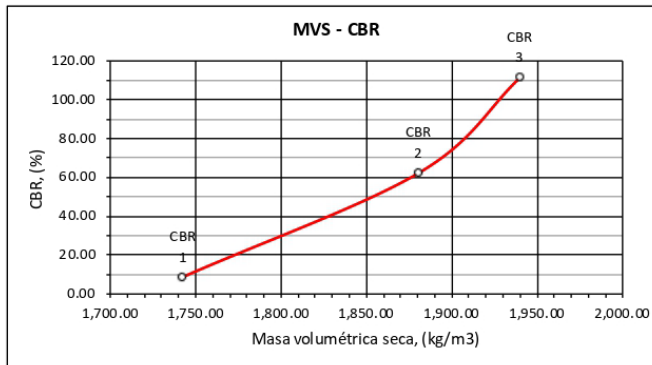
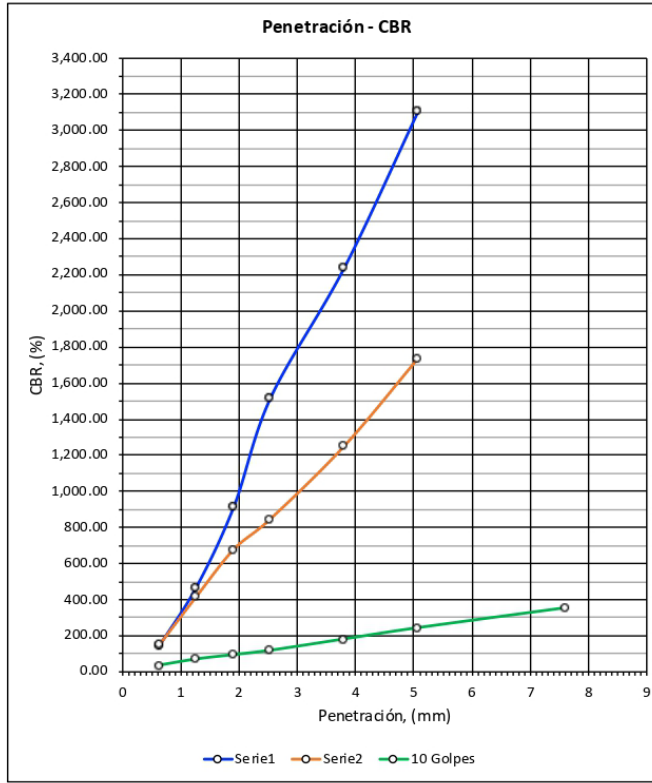
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	01 (verde)	002	5-B
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	6,535.00	7,115.00	7,290.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	10,890.00	11,335.00	11,120.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+es} (g)	11,025.00	11,515.00	11,380.00
Cápsula	E1	E1	E1
Masa cápsula (g)	69.00	69	69
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	313.20	313.2	313.2
Masa cápsula + suelo seco (g)	294.40	294.4	294.4
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	8.34	8.34	8.34
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m ³)	1,920.76	1,882.26	1,749.64
Contenido de agua de compactación w_c (%)	5.08	3.91	1.45
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	85.12	86.53	85.36
Lectura final de expansión h_f (mm)	84.83	86.32	85.15
Diferencia Δ_h (mm)	0.29	0.21	0.21
Expansión Exp_i (%)	0.24	0.18	0.18
Expansión promedio Exp (%)	0.20		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	197.62	250.64	72.30
1.27	559.12	554.30	115.68
1.91	1,002.56	853.14	139.78
2.54	1,450.82	1,108.60	163.88
3.81	2,337.70	1,513.48	245.82
5.08	3,200.48	1,860.52	289.20
7.62	-	-	395.24
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,450.82	1,108.60	163.88
$CBR_{2.54}$ (%)	106.66	81.50	12.05
$C_{5.08}$	3,200.48	1,860.52	289.20
$CBR_{5.08}$ (%)	156.85	91.18	14.17
CBR (%)	106.66	81.50	12.05

Ilustración 26: CBR de laboratorio prueba 9 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^5$	Prueba No.	10
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



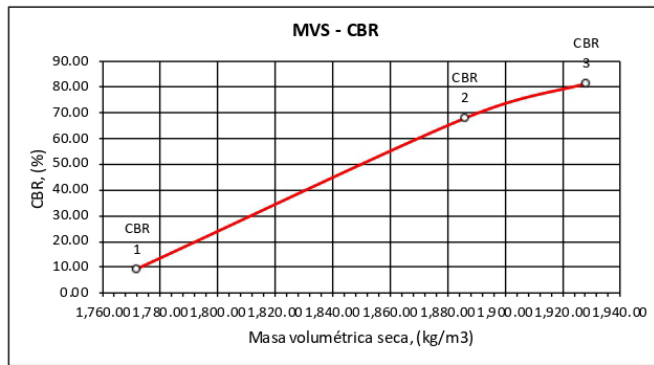
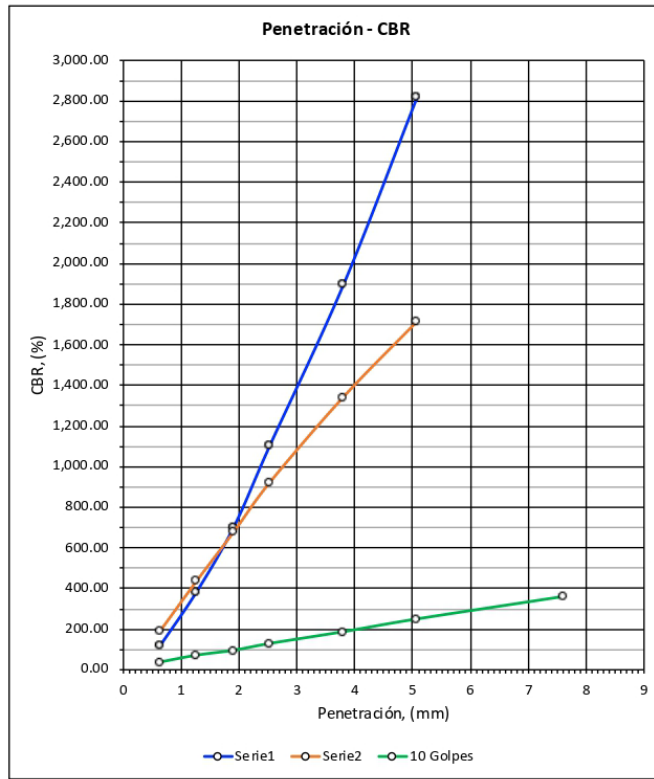
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	03	02	002
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	7,385.00	7,345.00	7,115.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	11,850.00	11,600.00	10,935.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+ef} (g)	11,955.00	11,775.00	11,220.00
Cápsula	R6	R6	R6
Masa cápsula (g)	69.00	69	69
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	312.00	312	312
Masa cápsula + suelo seco (g)	291.60	291.6	291.6
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	9.16	9.16	9.16
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m ³)	1,940.23	1,880.79	1,742.81
Contenido de agua de compactación w_c (%)	6.66	4.85	1.59
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	87.03	94.42	93.75
Lectura final de expansión h_f (mm)	86.92	84.34	93.52
Diferencia Δ_n (mm)	0.11	10.08	0.23
Expansión Exp. (%)	0.09	8.49	0.19
Expansión promedio Exp (%)	2.92		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	149.42	154.24	38.56
1.27	472.36	419.34	72.30
1.91	915.80	679.62	96.40
2.54	1,518.30	848.32	120.50
3.81	2,241.30	1,253.20	183.16
5.08	3,108.90	1,740.02	245.82
7.62	-	-	356.68
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,518.30	848.32	120.50
$CBR_{2.54}$ (%)	111.62	62.36	8.86
$C_{5.08}$	3,108.90	1,740.02	245.82
$CBR_{5.08}$ (%)	152.37	85.28	12.05
CBR (%)	111.62	62.36	8.86

Ilustración 27: CBR de laboratorio prueba 10 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	11
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



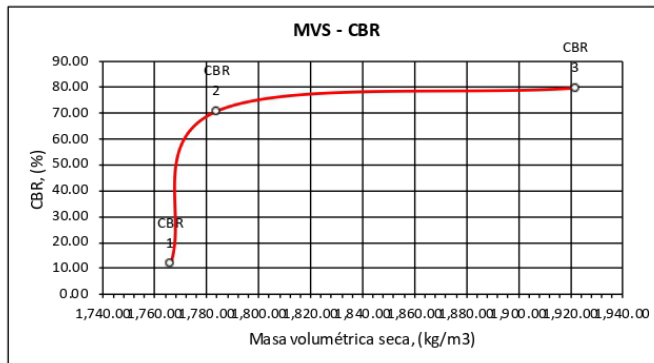
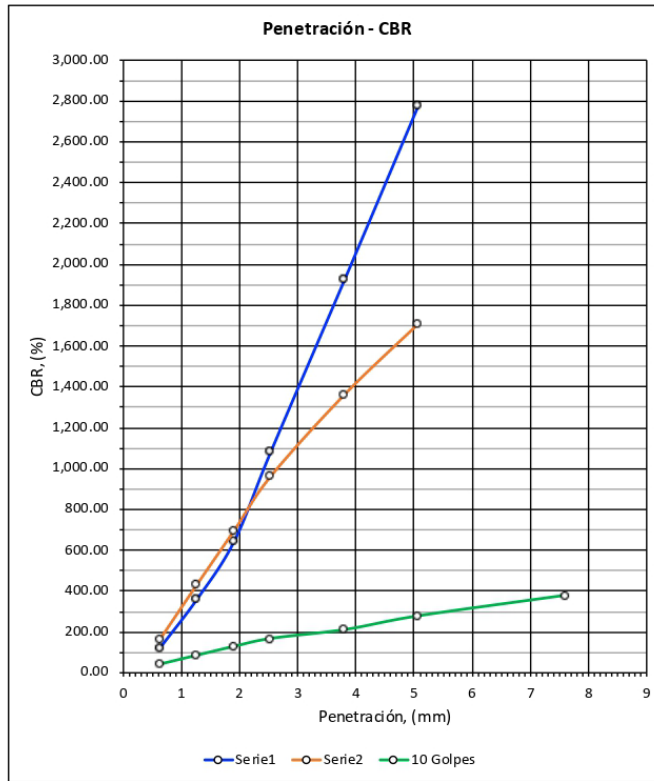
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	01 (verde)	002	5-B
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	6,535.00	7,115.00	7,290.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	10,990.00	11,410.00	11,245.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+ef} (g)	11,100.00	11,580.00	11,485.00
Cápsula	R6	R6	R6
Masa cápsula (g)	68.80	68.8	68.8
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	316.30	316.3	316.3
Masa cápsula + suelo seco (g)	294.40	294.4	294.4
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	9.71	9.71	9.71
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m ³)	1,928.51	1,886.27	1,772.20
Contenido de agua de compactación w_c (%)	7.06	5.53	3.43
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	85.62	82.27	90.36
Lectura final de expansión h_f (mm)	85.12	82.19	90.18
Diferencia Δ_n (mm)	0.50	0.08	0.18
Expansión Exp _i (%)	0.42	0.07	0.15
Expansión promedio Exp (%)	0.21		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	120.50	192.80	38.56
1.27	385.60	438.62	72.30
1.91	703.72	679.62	96.40
2.54	1,108.60	925.44	130.14
3.81	1,899.08	1,344.78	187.98
5.08	2,819.70	1,715.92	250.64
7.62	-	-	361.50
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,108.60	925.44	130.14
$CBR_{2.54}$ (%)	81.50	68.03	9.57
$C_{5.08}$	2,819.70	1,715.92	250.64
$CBR_{5.08}$ (%)	138.19	84.10	12.28
CBR (%)	81.50	68.03	9.57

Ilustración 28: CBR de laboratorio prueba 11 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^5$	Prueba No.	12
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/ Oscar Orlando Gaytán Cruz



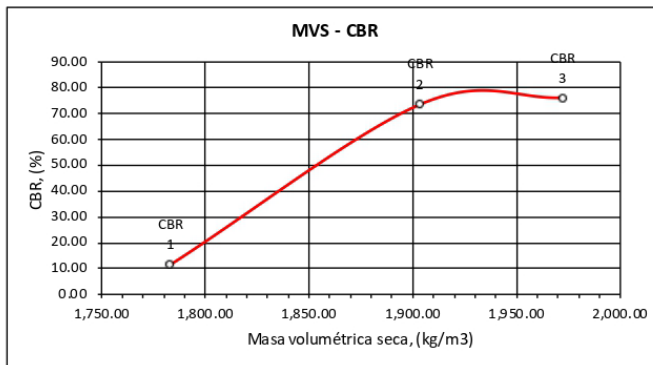
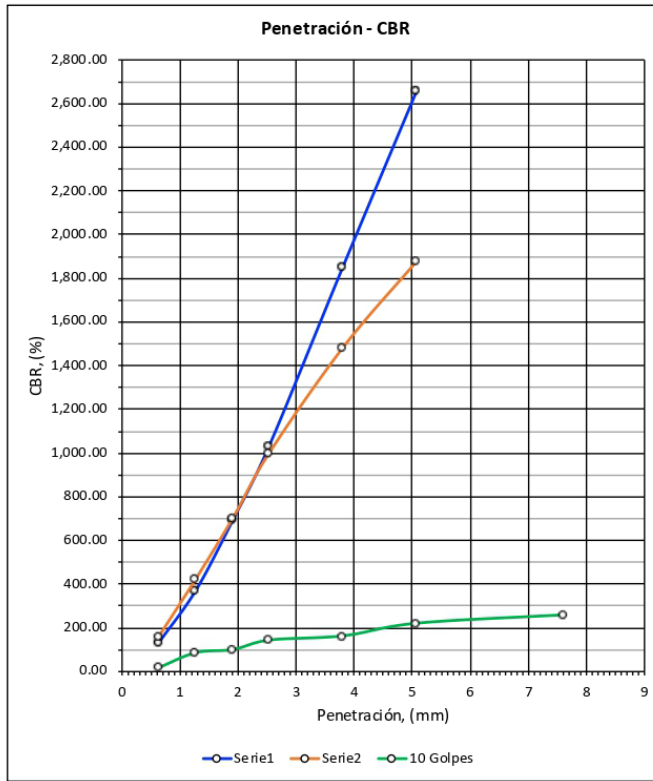
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	03	53	1
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	7,385.00	8,695.00	7,091.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	11,795.00	12,840.00	11,022.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+ef} (g)	11,935.00	13,020.00	11,272.00
Cápsula	R6	13	R6
Masa cápsula (g)	68.80	5.74	68.8
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	316.30	87.68	316.3
Masa cápsula + suelo seco (g)	294.40	78.67	294.4
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	9.71	12.35	9.71
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m³)	1,922.18	1,784.08	1,766.29
Contenido de agua de compactación w_c (%)	6.33	7.68	3.15
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	83.87	85.09	86.93
Lectura final de expansión h_f (mm)	83.74	84.91	86.85
Diferencia Δ_h (mm)	0.13	0.18	0.08
Expansión Exp_i (%)	0.11	0.15	0.07
Expansión promedio Exp (%)	0.11		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	125.32	168.70	43.38
1.27	361.50	433.80	86.76
1.91	645.88	698.90	130.14
2.54	1,084.50	964.00	168.70
3.81	1,928.00	1,364.06	212.08
5.08	2,781.14	1,711.10	279.56
7.62	-	-	380.78
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,084.50	964.00	168.70
$CBR_{2.54}$ (%)	79.73	70.87	12.40
$C_{5.08}$	2,781.14	1,711.10	279.56
$CBR_{5.08}$ (%)	136.30	83.86	13.70
CBR (%)	79.73	70.87	12.40

Ilustración 29: CBR de laboratorio prueba 12 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	13
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



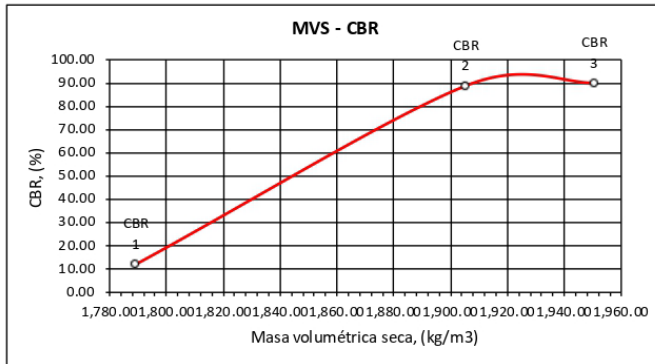
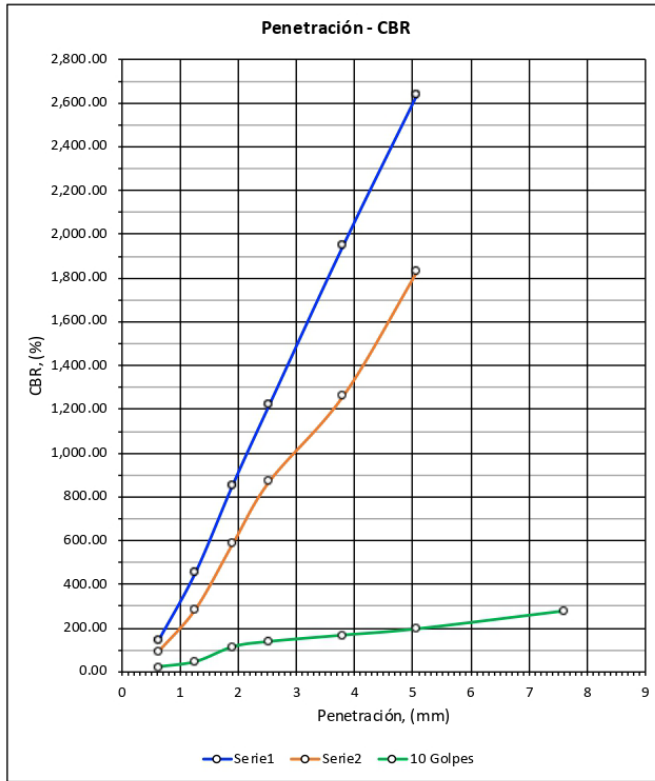
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	18	53	21
Diámetro interior D _m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H _m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W _m (g)	8,685.00	8,695.00	8,750.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H _{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W _{m+ei} (g)	13,150.00	12,920.00	12,560.00
Masa mold.+ esp. sat. W _{m+esat} (g)	13,280.00	13,130.00	12,905.00
Cápsula	E1	E1	E1
Masa cápsula (g)	69.10	69.1	69.1
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	248.10	248.1	248.1
Masa cápsula + suelo seco (g)	234.90	234.9	234.9
Contenido de agua saturado w _{sat} (%)	7.96	7.96	7.96
Masa volumétrica seca γ _d (kg/m ³)	1,972.58	1,903.90	1,783.70
Contenido de agua de compactación w _c (%)	4.91	2.85	-1.00
Lectura inicial de expansión h ₀ (mm)	125.10	123.90	123.80
Lectura final de expansión h _f (mm)	124.60	123.50	123.50
Diferencia Δ _h (mm)	0.50	0.40	0.30
Expansión Exp _i (%)	0.42	0.34	0.25
Expansión promedio Exp (%)	0.34		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	134.96	163.88	19.28
1.27	371.14	424.16	86.76
1.91	694.08	703.72	101.22
2.54	1,036.30	1,002.56	144.60
3.81	1,855.70	1,484.56	163.88
5.08	2,660.64	1,879.80	221.72
7.62	-	-	260.28
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
C _{2.54}	1,036.30	1,002.56	160.00
CBR _{2.54} (%)	76.18	73.70	11.76
C _{5.08}	2,660.64	1,879.80	250.00
CBR _{5.08} (%)	130.40	92.13	12.25
CBR (%)	76.18	73.70	11.76

Ilustración 30: CBR de laboratorio prueba 13 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	14
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



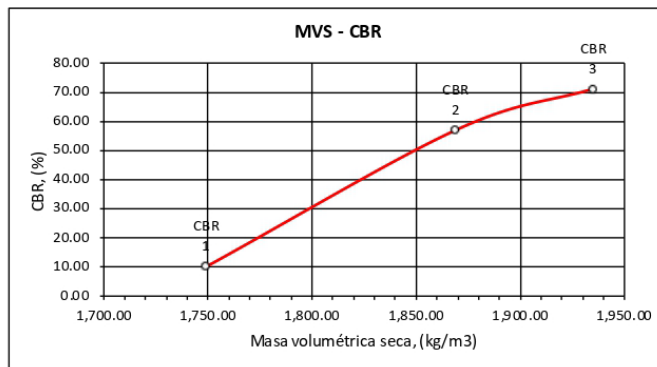
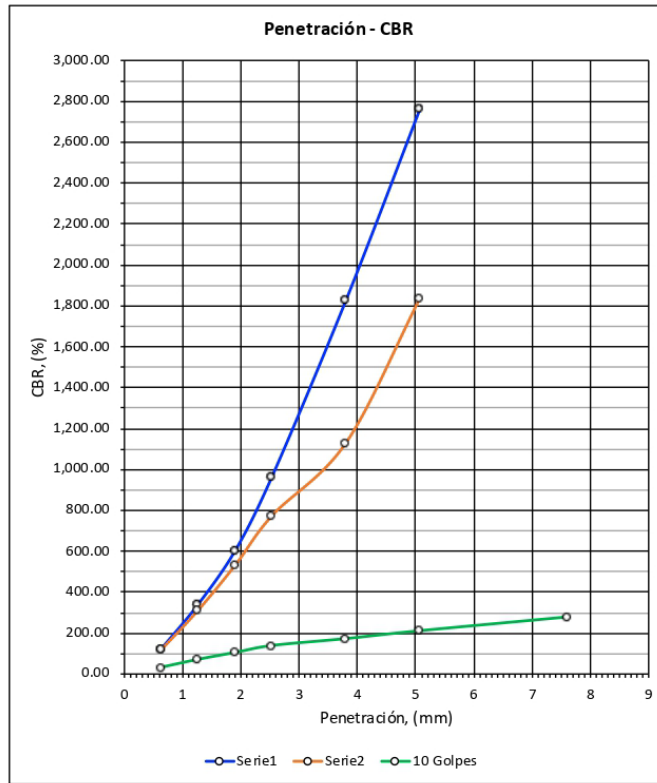
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	1 (gris)	51	50
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	7,660.00	8,520.00	8,725.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{mrei} (g)	12,000.00	12,685.00	12,530.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{mref} (g)	12,195.00	12,950.00	12,885.00
Cápsula	R4	R4	R4
Masa cápsula (g)	72.40	72.4	72.4
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	303.50	303.5	303.5
Masa cápsula + suelo seco (g)	286.90	286.9	286.9
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	7.74	7.74	7.74
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m³)	1,950.84	1,905.68	1,789.53
Contenido de agua de compactación w_c (%)	3.11	1.29	-1.46
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	124.20	84.02	121.01
Lectura final de expansión h_f (mm)	124.10	83.50	120.80
Diferencia Δh (mm)	0.10	0.52	0.21
Expansión Exp_i (%)	0.08	0.44	0.18
Expansión promedio Exp (%)	0.23		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	149.42	96.40	24.10
1.27	457.90	289.20	48.20
1.91	857.96	588.04	115.68
2.54	1,224.28	872.42	139.78
3.81	1,952.10	1,262.84	168.70
5.08	2,641.36	1,831.60	197.62
7.62	-	-	279.56
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,224.28	1,210.00	175.00
$CBR_{2.54}$ (%)	90.00	88.95	12.87
$C_{5.08}$	2,641.36	2,390.00	250.00
$CBR_{5.08}$ (%)	129.45	117.13	12.25
CBR (%)	90.00	88.95	12.25

Ilustración 31: CBR de laboratorio prueba 14 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	15
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



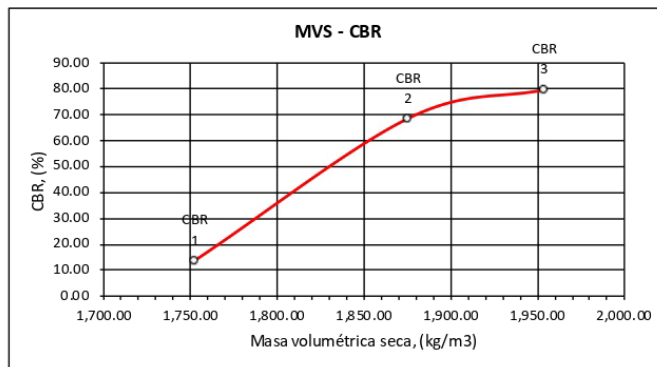
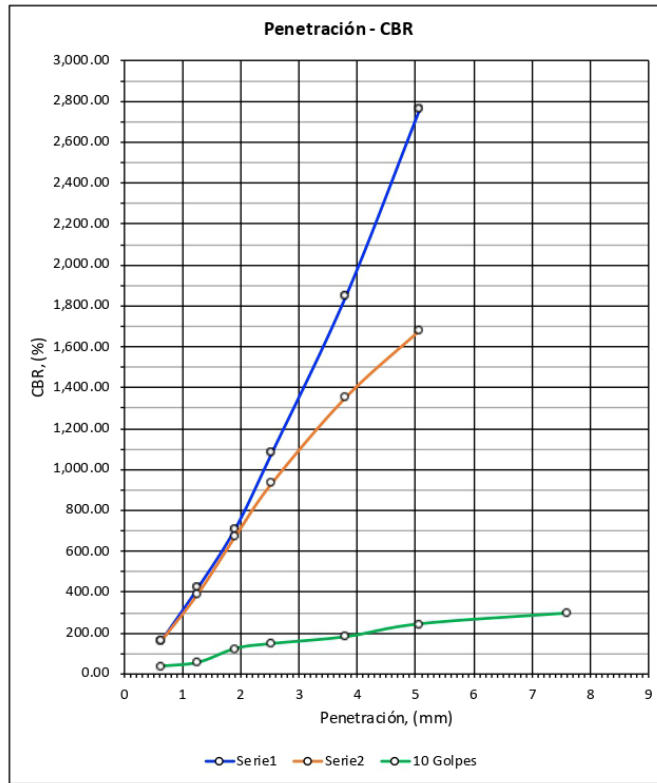
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	18	53	1 (gris)
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	8,685.00	8,695.00	7,660.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	13,055.00	12,850.00	11,440.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+es} (g)	13,215.00	13,070.00	11,755.00
Cápsula	E1	E1	E1
Masa cápsula (g)	69.20	69.2	69.2
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	354.60	354.6	354.6
Masa cápsula + suelo seco (g)	332.30	332.3	332.3
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	8.48	8.48	8.48
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m^3)	1,935.46	1,869.23	1,749.60
Contenido de agua de compactación w_c (%)	4.64	3.02	0.13
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	113.15	123.52	110.93
Lectura final de expansión h_f (mm)	112.91	122.42	110.88
Diferencia Δ_h (mm)	0.24	1.10	0.05
Expansión Exp_i (%)	0.20	0.93	0.04
Expansión promedio Exp (%)	0.39		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	125.32	120.50	33.74
1.27	342.22	313.30	72.30
1.91	607.32	535.02	106.04
2.54	968.82	776.02	139.78
3.81	1,831.60	1,132.70	173.52
5.08	2,766.68	1,841.24	212.08
7.62	-	-	279.56
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	968.82	776.02	139.78
$CBR_{2.54}$ (%)	71.22	57.05	10.28
$C_{5.08}$	2,766.68	1,841.24	212.08
$CBR_{5.08}$ (%)	135.59	90.24	10.39
CBR (%)	71.22	57.05	10.28

Ilustración 32: CBR de laboratorio prueba 15 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	16
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



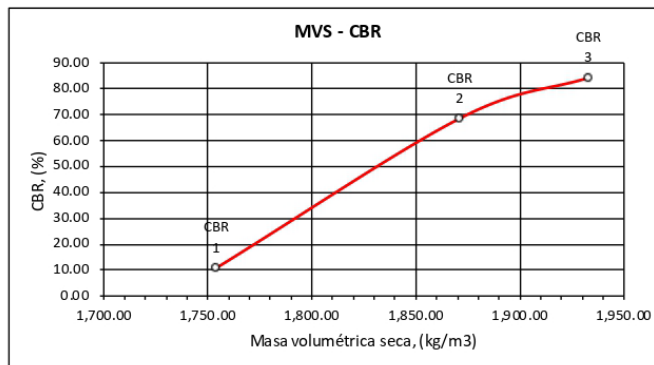
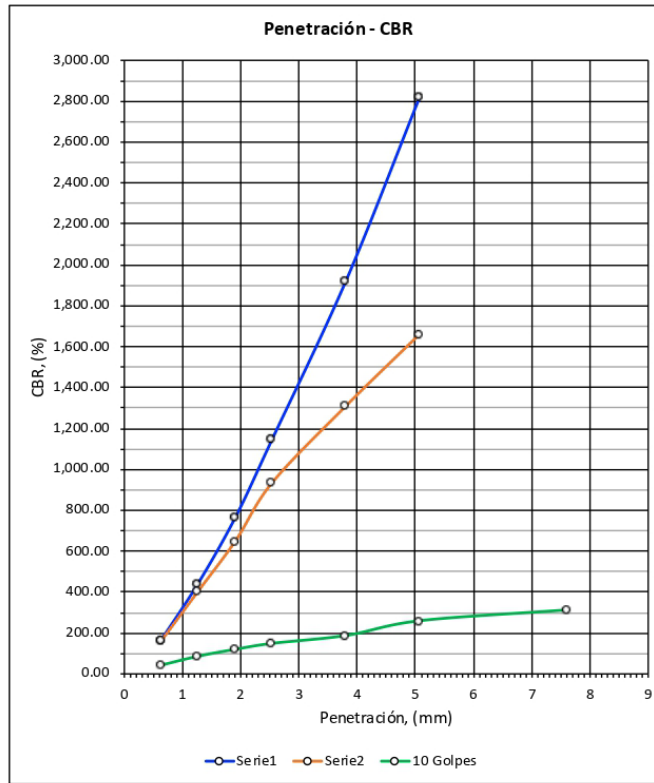
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	21	51	50
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	8,750.00	8,520.00	8,725.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	13,225.00	12,745.00	12,530.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+es} (g)	13,360.00	12,945.00	12,860.00
Cápsula	R2	R2	R2
Masa cápsula (g)	68.50	68.5	68.5
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	294.70	294.7	294.7
Masa cápsula + suelo seco (g)	275.40	275.4	275.4
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	9.33	9.33	9.33
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m^3)	1,954.28	1,875.85	1,752.92
Contenido de agua de compactación w_c (%)	6.13	4.39	0.60
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	119.11	84.27	120.83
Lectura final de expansión h_f (mm)	118.59	84.24	120.62
Diferencia Δ_h (mm)	0.52	0.03	0.21
Expansión Exp_i (%)	0.44	0.03	0.18
Expansión promedio Exp (%)	0.21		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	163.88	163.88	38.56
1.27	424.16	395.24	57.84
1.91	713.36	674.80	125.32
2.54	1,084.50	935.08	149.42
3.81	1,850.88	1,354.42	183.16
5.08	2,766.68	1,682.18	245.82
7.62	-	-	298.84
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,084.50	935.08	190.00
$CBR_{2.54}$ (%)	79.73	68.74	13.97
$C_{5.08}$	2,766.68	1,682.18	290.00
$CBR_{5.08}$ (%)	135.59	82.44	14.21
CBR (%)	79.73	68.74	13.97

Ilustración 33: CBR de laboratorio prueba 16 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	17
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



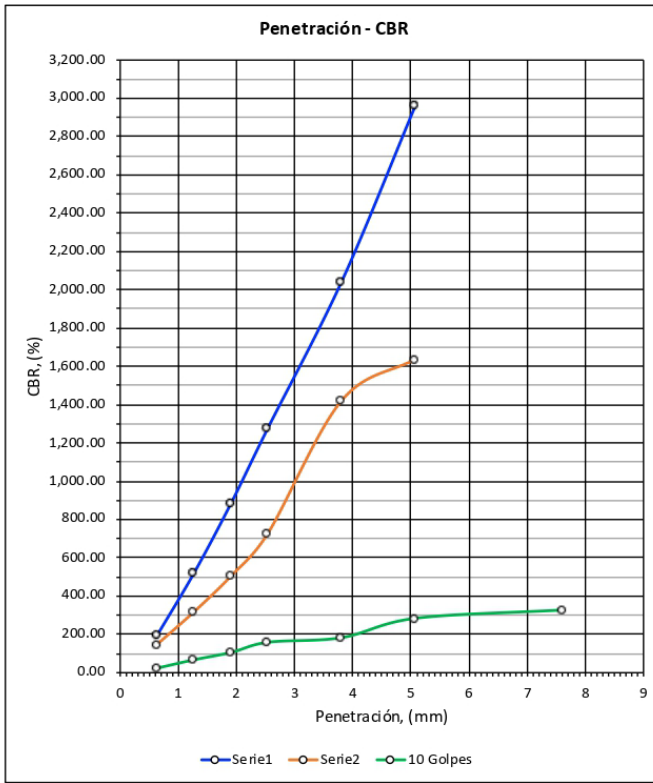
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	40	1 (verde)	002
Diámetro interior D _m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H _m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W _m (g)	8,620.00	6,535.00	7,115.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H _{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W _{m+ei} (g)	12,970.00	10,690.00	10,885.00
Masa mold.+ esp. sat. W _{m+esat} (g)	13,160.00	10,930.00	11,235.00
Cápsula	R10	R10	R10
Masa cápsula (g)	70.40	70.4	70.4
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	388.10	388.1	388.1
Masa cápsula + suelo seco (g)	362.30	362.3	362.3
Contenido de agua saturado w _{sat} (%)	8.84	8.84	8.84
Masa volumétrica seca γ _d (kg/m ³)	1,933.26	1,871.52	1,754.41
Contenido de agua de compactación w _c (%)	4.28	2.90	-0.41
Lectura inicial de expansión h ₀ (mm)	85.29	91.77	98.79
Lectura final de expansión h _f (mm)	85.18	91.22	98.28
Diferencia Δ _h (mm)	0.11	0.55	0.51
Expansión Exp _i (%)	0.09	0.46	0.43
Expansión promedio Exp (%)	0.33		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	168.70	163.88	43.38
1.27	443.44	404.88	86.76
1.91	766.38	650.70	120.50
2.54	1,147.16	935.08	149.42
3.81	1,923.18	1,311.04	187.98
5.08	2,824.52	1,662.90	260.28
7.62	-	-	313.30
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
C _{2.54}	1,147.16	935.08	149.42
CBR _{2.54} (%)	84.33	68.74	10.98
C _{5.08}	2,824.52	1,662.90	260.28
CBR _{5.08} (%)	138.43	81.50	12.76
CBR (%)	84.33	68.74	10.98

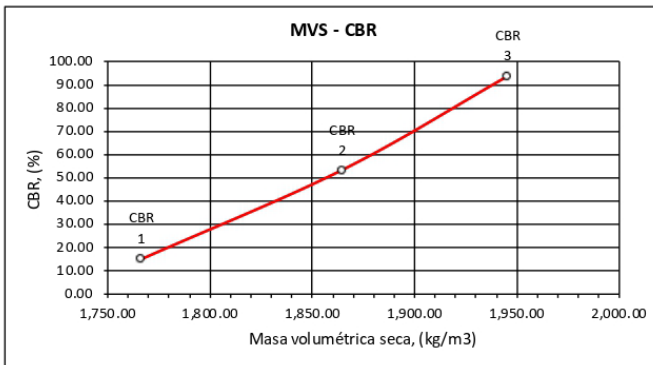
Ilustración 34: CBR de laboratorio prueba 17 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	18
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	18	53	1 (gris)
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	8,685.00	8,695.00	7,660.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+el} (g)	13,035.00	12,805.00	11,425.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+er} (g)	13,250.00	13,070.00	11,805.00
Cápsula	43	43	43
Masa cápsula (g)	6.20	6.2	6.2
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	128.30	128.3	128.3
Masa cápsula + suelo seco (g)	118.50	118.5	118.5
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	8.73	8.73	8.73
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m^3)	1,945.91	1,864.92	1,766.88
Contenido de agua de compactación w_c (%)	3.61	2.14	-1.24
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	119.50	114.91	112.19
Lectura final de expansión h_r (mm)	118.55	114.63	111.97
Diferencia Δ_h (mm)	0.95	0.28	0.22
Expansión Exp. (%)	0.80	0.24	0.19
Expansión promedio Exp (%)	0.41		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	197.62	149.42	24.10
1.27	520.56	318.12	67.48
1.91	886.88	506.10	106.04
2.54	1,277.30	727.82	159.06
3.81	2,043.68	1,421.90	183.16
5.08	2,964.30	1,638.80	284.38
7.62	-	-	327.76
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,277.30	727.82	215.00
$CBR_{2.54}$ (%)	93.90	53.51	15.81
$C_{5.08}$	2,964.30	1,638.80	310.00
$CBR_{5.08}$ (%)	145.28	80.32	15.19
CBR (%)	93.90	53.51	15.19

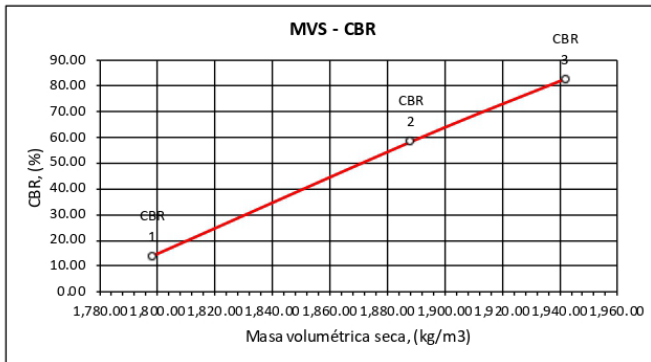
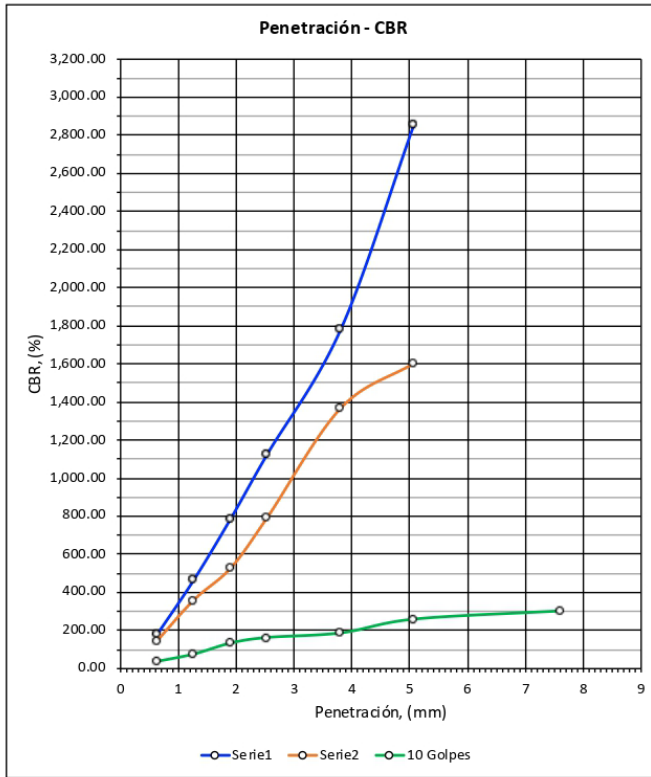


Observaciones:

Ilustración 35: CBR de laboratorio prueba 18 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	19
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



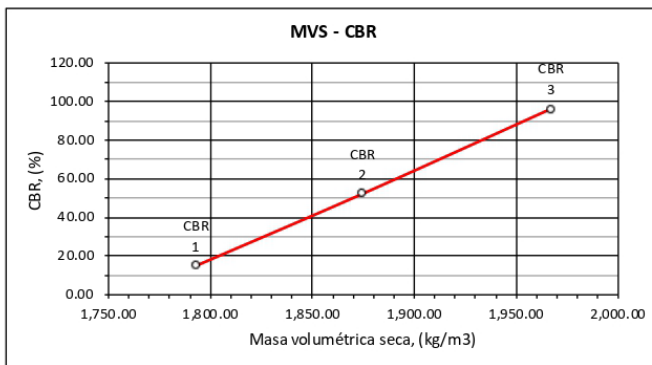
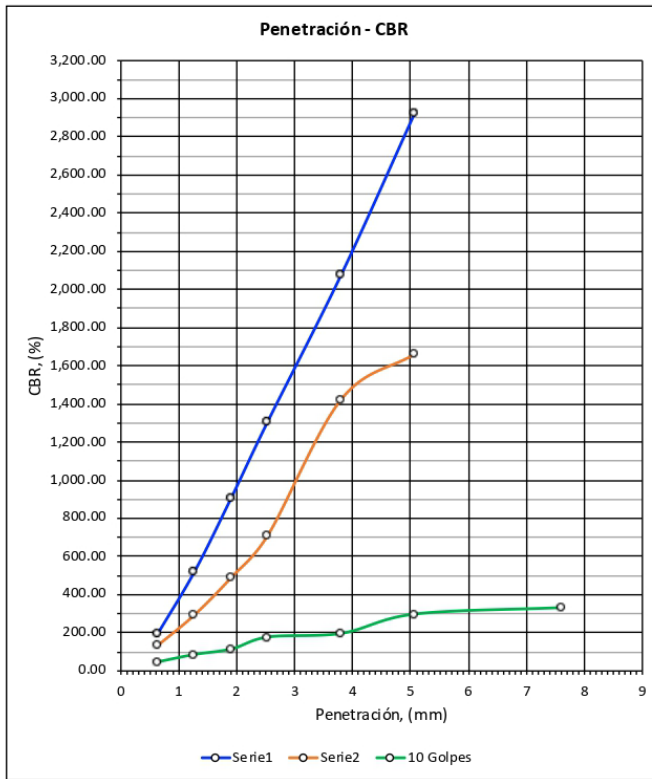
Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	21	51	50
Diámetro interior D _m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H _m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W _m (g)	8,750.00	8,520.00	8,725.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H _{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W _{m+el} (g)	13,060.00	12,665.00	12,555.00
Masa mold.+ esp. sat. W _{m+ef} (g)	13,270.00	12,915.00	12,910.00
Cápsula	24	24	24
Masa cápsula (g)	6.50	6.5	6.5
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	174.00	174	174
Masa cápsula + suelo seco (g)	161.80	161.8	161.8
Contenido de agua saturado w _{sat} (%)	7.86	7.86	7.86
Masa volumétrica seca γ _d (kg/m ³)	1,942.29	1,888.57	1,798.33
Contenido de agua de compactación w _c (%)	2.84	1.72	-1.29
Lectura inicial de expansión h ₀ (mm)	124.92	84.34	121.29
Lectura final de expansión h _r (mm)	124.84	84.25	121.21
Diferencia Δ _h (mm)	0.08	0.09	0.08
Expansión Exp _i (%)	0.07	0.08	0.07
Expansión promedio Exp (%)	0.07		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	183.16	149.42	38.56
1.27	467.54	361.50	77.12
1.91	790.48	530.20	134.96
2.54	1,127.88	795.30	163.88
3.81	1,783.40	1,368.88	187.98
5.08	2,863.08	1,605.06	260.28
7.62	-	-	303.66
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
C _{2.54}	1,127.88	795.30	190.00
CBR _{2.54} (%)	82.92	58.47	13.97
C _{5.08}	2,863.08	1,605.06	290.00
CBR _{5.08} (%)	140.32	78.66	14.21
CBR (%)	82.92	58.47	13.97

Ilustración 36: CBR de laboratorio prueba 19 (Elaboración propia, 2020).



Tema:	Comparativa del valor del CBR obtenido en laboratorio, en campo y mediante equipo Clegg Hammer	Fecha:	
Tipo de material:	Subbase para $\Sigma L < 10^6$	Prueba No.	20
Origen:	Chihuahua, Chihuahua	Operador:	Eldis Vazquez Lugo
Descripción:	Material utilizado en plataformas	Calculó:	Eldis Vazquez Lugo/Oscar Orlando Gaytán Cruz



Observaciones:

Muestra	1	2	3
Golpes	56	25	10
Molde	40	1 (verde)	002
Diámetro interior D_m (mm)	152.10	152.10	152.10
Altura H_m (mm)	179.00	179.00	179.00
Masa W_m (g)	8,620.00	6,535.00	7,115.00
Disco espaciador	1	1	1
Altura H_{de} (mm)	60.25	60.25	60.25
Masa mold.+ esp. comp. W_{m+ei} (g)	13,020.00	10,635.00	10,930.00
Masa mold.+ esp. sat. W_{m+esat} (g)	13,200.00	10,900.00	11,290.00
Cápsula	23	23	23
Masa cápsula (g)	6.30	6.3	6.3
Masa cápsula + suelo húmedo (g)	140.20	140.2	140.2
Masa cápsula + suelo seco (g)	130.40	130.4	130.4
Contenido de agua saturado w_{sat} (%)	7.90	7.90	7.90
Masa volumétrica seca γ_d (kg/m^3)	1,967.32	1,874.97	1,793.35
Contenido de agua de compactación w_c (%)	3.66	1.35	-1.41
Lectura inicial de expansión h_0 (mm)	85.74	91.84	98.29
Lectura final de expansión h_f (mm)	85.46	91.37	98.18
Diferencia Δ_h (mm)	0.28	0.47	0.11
Expansión Exp_i (%)	0.24	0.40	0.09
Expansión promedio Exp (%)	0.24		
Penetración (mm)	Cargas de penetración (kg)		
0.64	197.62	134.96	48.20
1.27	520.56	294.02	86.76
1.91	910.98	491.64	115.68
2.54	1,311.04	713.36	178.34
3.81	2,082.24	1,426.72	197.62
5.08	2,930.56	1,662.90	298.84
7.62	-	-	332.58
10.16	-	-	-
12.7	-	-	-
$C_{2.54}$	1,311.04	713.36	220.00
$CBR_{2.54}$ (%)	96.38	52.44	16.17
$C_{5.08}$	2,930.56	1,662.90	310.00
$CBR_{5.08}$ (%)	143.63	81.50	15.19
CBR (%)	96.38	52.44	15.19

Ilustración 37: CBR de laboratorio prueba 20 (Elaboración propia, 2020).

Dada las fórmulas anteriores se registraron los dos valores de CBR a 2.54 mm y a 5.08 mm, resultando el de menor valor en el primer caso, por lo que fueron los valores utilizados para las gráficas anteriores de MVS-CBR.



Una vez obtenidos los resultados de laboratorio se analizaron cada uno de estos, así mismo obteniendo la media de todos los valores para cada tipo de prueba con diferente número de golpes, para nuestro caso poder utilizar una gráfica MVS-CBR en la cual se tenían dos opciones, la primera realizar una nueva gráfica con los valores medios obtenidos o la segunda utilizar una ya existente que se apegara a los valores de la media, por lo que se optó por utilizar la existente, que en nuestro caso dos de ellas resultaban muy cercanas siendo las pruebas No 7 y No 8 pero finalmente se eligió la No 7:

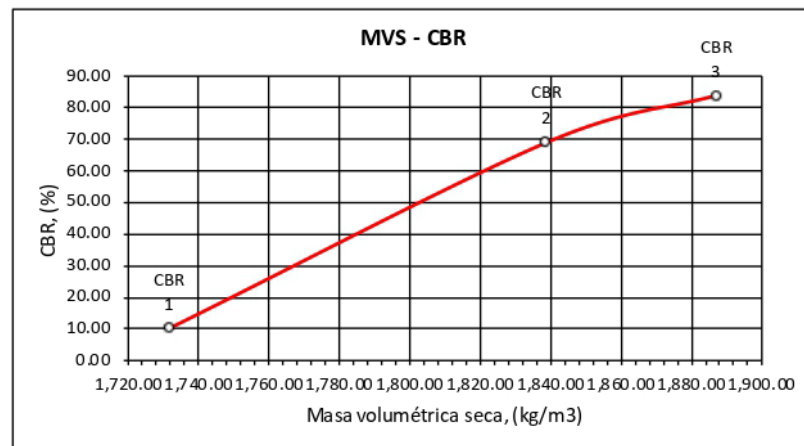


Ilustración 38: Curva MVS - CBR (Elaboración propia, 2020).

Esta gráfica tiene la finalidad de comparar los valores CBR que se tendrían con pruebas de laboratorio reflejadas en campo, ingresando a la gráfica con la MVS obtenida en campo, ya sea por cualquier método normado por la SCT como el cono y arena, el método de trompa y arena (SCT, 2003) o como el densímetro nuclear el cual no se encuentra normado por la SCT, tratando de simular las mismas condiciones para comparar los resultados entre cada metodología.

Para obtener resultados relacionando la prueba de laboratorio a las de campo se obtuvieron valores a partir de la gráfica anterior y con los valores de MVS registrados mediante el densímetro nuclear en la misma zona de estudio arrojando lo siguiente:



Tabla 14: CBR de laboratorio (Elaboración propia, 2020).

Manzana	Lote	CBR Laboratorio
32	42	32%
34	7	60%
36	13	51%
37	2	56%
38	1	78%
41	41	87%
42	18	45%
44	9	70%
47	3	61%
49	5	71%



Capítulo 4: Análisis estadístico de resultados de 3 métodos utilizados para determinar el CBR.

Para realizar un análisis estadístico se deberán tomar en cuenta las variables a utilizar y el método adecuado, por lo que en este caso se realizan tres metodologías diferentes para llegar a un mismo valor. Se utilizará un análisis de bloques completamente aleatorizados para el estudio del efecto en la medición de CBR, dado por las diferentes metodologías de medición de este, considerando una variación controlada dada por la zona (plataformas).

Previamente se realiza la recopilación de los valores para el análisis estadístico, es decir los resultados de las diferentes metodologías de los CBR:

Tabla 15: Resumen de resultados de las tres metodologías (Elaboración propia, 2020).

Prueba	Manzana	Lote	Laboratorio	Campo	Clegg Hammer	
					Dr. Clegg, 1980 CBR= $((0.24*VI)+1)^2$	Al-Amoudi et al., 2002 CBR=0.861 (CIV) ^{1.136} Suelos GM
5	44	9	70%	73%	132%	63%
10	32	42	32%	42%	74%	44%
8	47	3	61%	67%	137%	65%
6	38	1	78%	85%	149%	68%
1	49	5	71%	82%	165%	72%
7	37	2	56%	60%	81%	46%
9	41	41	87%	93%	173%	74%
4	36	13	51%	56%	75%	44%
2	42	18	45%	49%	116%	58%
3	34	7	60%	66%	190%	79%

Cabe mencionar que todos los datos se obtuvieron a través del promedio de 3 lecturas mínimas para cada metodología, esto para verificación y mayor certeza de los datos que se registraron y evitar errores de lectura o descalibración de los equipos que pudiesen afectar a los resultados.

Los cálculos para la metodología del Clegg Hammer se realizaron inicialmente con la correlación propuesta para suelos en general del Dr. Clegg, sin embargo se notó que conforme el valor de impacto del equipo aumente, el CBR se aleja de los valores obtenidos



por métodos convencionales y normados, por lo que adicional se realizaron los cálculos con la correlación propuesta para suelos GM en 2002 (Al-Amoudi et al., 2002), sin embargo se tomaran en cuenta ambos para verificar la certeza de cada una para nuestro caso en particular mediante el análisis estadístico.

Adicional se puede observar que los valores de CBR de laboratorio respecto a los de CBR en campo son ligeramente inferiores, esto pudiéndose atribuir a las condiciones en las que se someten las pruebas de laboratorio, es decir en las más desfavorables a pesar de que los procedimientos sean más controlados, y para el caso de las pruebas de campos estas se encuentran en condiciones más favorables, pero aun así siendo resultados congruentes entre sí.

4.1 DISEÑO POR BLOQUES ALEATORIZADOS

Este análisis de varianza será utilizado como parte de un experimento con los datos obtenidos durante la investigación, ya que este tipo de diseño se emplea analizar una fuente de variabilidad y controlar otra fuente de variabilidad que puede afectar al experimento y no es motivo de estudio (Murray R. Spiegel & Stephens, 2009) por lo que este modelo funciona para el objetivo de la investigación y determinar el efecto de las diferentes metodologías de obtención de CBR, utilizando como fuentes de variabilidad las metodologías de cálculo de CBR y el factor a controlar es la zona de obtención de la muestra.

Para este caso en particular, nuestro modelo consta de 2 variables, fuentes de variación o factores que son las metodologías de CBR y la zona de obtención de la muestra, sin interacción entre estos factores, en el cual nos interesa la variación entre las metodologías para el cálculo de CBR, tomando en consideración la posible variabilidad que la zona puede influir en los resultados por lo que utilizaremos el modelo del diseño de bloques aleatorizados mediante lo siguiente:



$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

para $i = 1, 2, 3$ y $j = 1, \dots, 10$, siendo:

μ = Media global

α_i = El efecto sobre la media causado por las metodologías de medición de CBR

β_j = El efecto sobre la media causado por las zonas

ε_{ij} = El termino de error.

De acuerdo con la teoría se podrán cumplirán dos hipótesis a partir de las siguientes condiciones:

$H_0 = \alpha_i = 0$ (El efecto de las metodologías de obtención de CBR es el mismo)

$H_1 = \alpha_i \neq 0$ (Al menos una metodología de obtención de CBR tiene un efecto diferente a las demás)

Así mismo se tendrá que considerar las observaciones obtenidas, en nuestro caso se utilizará un nivel de significancia del $\alpha=0.05$, realizando el experimento para verificar la variabilidad entre factores tenemos en este caso 10 zonas previamente aleatorizadas y tres metodologías para el cálculo del CBR. A continuación, se presentan los análisis realizados dentro de las dos correlaciones diferentes utilizadas para el Clegg Hammer y las otras dos metodologías tradicionales de medición de CBR que son la de laboratorio y en campo con equipo móvil:

4.1.1 Comparación de metodologías de cálculo de CBR usando laboratorio, campo y correlación Dr. Clegg.

Comenzamos analizando los datos con las metodologías de laboratorio, campo y equipo Clegg Hammer mediante la correlación del Dr. Clegg por lo que se ordenan los datos de la siguiente manera:



Tabla 16: Análisis de datos mediante bloques aleatorizados correlación 1 (Elaboración propia, 2020).

Factor	Zonas										ȳt.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Laboratorio=	70.00	32.00	61.00	78.00	71.00	56.00	87.00	51.00	45.00	60.00	61.10
Campo=	73.00	42.00	67.00	85.00	82.00	60.00	93.00	56.00	49.00	66.00	67.30
Clegg Hammer (Dr. Clegg) =	132.00	74.00	137.00	149.00	165.00	81.00	173.00	75.00	116.00	190.00	129.20
	91.67	49.33	88.33	104.00	106.00	65.67	117.67	60.67	70.00	105.33	85.87

Para realizar nuestro análisis de varianza se realizaron los cálculos correspondientes a la suma de cuadrados mediante las siguientes formulas:

$$SC_{Factor} = 10 * (61.1^2 + 67.3^2 + 129.2^2) - (30 * 85.87^2)$$

$$SC_{Factor} = 28,359$$

$$SC_{Zona} = 3 * (91.67^2 + 49.33^2 + 88.33^2 + 104^2 + 106^2 + 65.67^2 + 117.67^2 + 60.67^2 + 70^2 + 105.33^2) - (30 * 85.87^2)$$

$$SC_{Zona} = 14,381$$

$$SC_{Total} = (70^2 + 32^2 + 61^2 + 78^2 + 71^2 + 56^2 + 87^2 + 51^2 + 45^2 + 60^2 + 73^2 + 42^2 + 67^2 + 85^2 + 82^2 + 60^2 + 93^2 + 56^2 + 49^2 + 66^2 + 132^2 + 74^2 + 137^2 + 149^2 + 165^2 + 81^2 + 173^2 + 75^2 + 116^2 + 190^2) - (30 * 85.87^2)$$

$$SC_{Total} = 48,947$$

$$SCE = 48,947 - 14381 - 28359$$

$$SCE = 6,208$$

A este punto se realiza un análisis mediante una gráfica cuatro en uno de residuos para validar el modelo mediante las hipótesis que debe cumplir los valores, por lo que estos deberán de ser lineales, normales, deben tener homocedasticidad e independencia entre sí, teniendo como resultado lo siguiente:

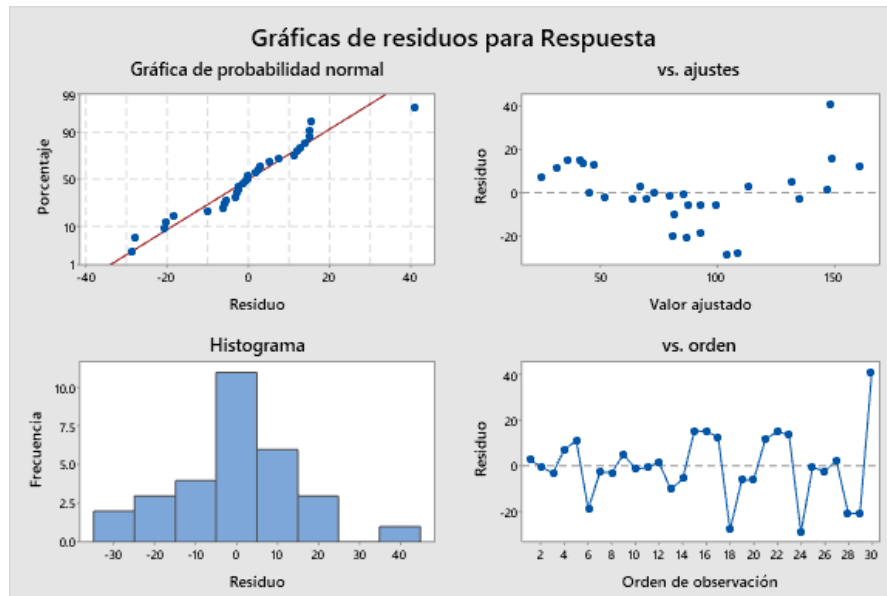


Ilustración 39: Gráfica de residuos para validación del modelo (Elaboración propia, 2020).

Se observa que los residuos están distribuidos normalmente, son simétricos, no se presenta alguna correlación, respecto a la dispersión de los residuos presenta una irregularidad posible que pone en duda el supuesto de varianza constante en los errores del modelo, por lo que se realizó una prueba de igualdad de varianzas bajo el mismo nivel de significancia con el método de Levene por lo que se observa lo siguiente:

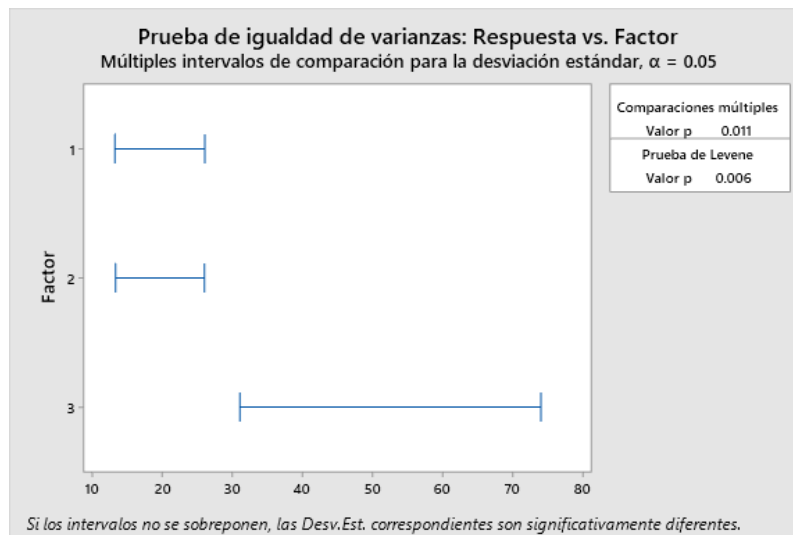


Ilustración 40: Prueba de igualdad de varianzas (Elaboración propia, 2020).



Dado lo anterior, se observa que el método de Clegg Hammer (factor 3 en la ilustración 40) para la determinación del CBR mediante la correlación del Dr. Clegg es la que presenta una variación diferente en comparación a las otras dos metodologías por lo que se concluye que existe evidencia estadística significativa para decir que no se cumple el supuesto de homocedasticidad, lo cual no permite realizar el análisis de varianza.

4.1.2 Comparación de metodologías de cálculo de CBR usando laboratorio, campo y correlación para suelos GM (Al-Amoudi et al., 2002).

Al igual que el análisis anterior el procedimiento será exactamente el mismo, solo que los datos de CBR de Clegg Hammer esta vez son los calculados con la correlación para suelos GM, los cuales previamente al análisis se observan con menor variabilidad en este caso, por lo que los resultados se muestran de la siguiente manera:

Tabla 17: Análisis de datos mediante bloques aleatorizados correlación 2 (Elaboración propia, 2020).

Factor	Zonas										ȳt.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Laboratorio=	70.00	32.00	61.00	78.00	71.00	56.00	87.00	51.00	45.00	60.00	61.10
Campo=	73.00	42.00	67.00	85.00	82.00	60.00	93.00	56.00	49.00	66.00	67.30
Clegg Hammer(Suelos GM) =	63.00	44.00	65.00	68.00	72.00	46.00	74.00	44.00	58.00	79.00	61.30
	68.67	39.33	64.33	77.00	75.00	54.00	84.67	50.33	50.67	68.33	63.23

Para continuar con el procedimiento del análisis de experimento se realizan los cálculos correspondientes para la obtención de suma de cuadrados para posteriormente realizar el análisis de varianza (ANOVA), por lo que se determinan los resultados mediante las siguientes operaciones:

$$SC_{Factor} = 10 * (61.1^2 + 67.3^2 + 61.3^2) - (30 * 63.23^2)$$

$$SC_{Factor} = 5,474.7$$

$$SC_{Zona} = 3 * (68.67^2 + 39.33^2 + 64.33^2 + 77^2 + 75^2 + 54^2 + 84.67^2 + 50.33^2 + 50.67^2 + 68.33^2) - (30 * 63.23^2)$$

$$SC_{Zona} = 248.3$$

$$\begin{aligned}
 SC_{Total} &= (70^2 + 32^2 + 61^2 + 78^2 + 71^2 + 56^2 + 87^2 + 51^2 + 45^2 + 60^2 + 73^2 \\
 &\quad + 42^2 + 67^2 + 85^2 + 82^2 + 60^2 + 93^2 + 56^2 + 49^2 + 66^2 + 63^2 + 44^2 \\
 &\quad + 65^2 + 68^2 + 72^2 + 46^2 + 74^2 + 44^2 + 58^2 + 79^2) - (30 * 63.23^2)
 \end{aligned}$$

$$SC_{Total} = 6,491.4$$

$$SCE = 6491.4 - 5474.7 - 248.3$$

$$SCE = 768.4$$

Previo al análisis de varianza tenemos nuevamente para este caso la gráfica cuatro en uno para validar el uso del diseño de bloques aleatorizados, como se ve a continuación:



Ilustración 41: Gráfica cuatro en uno correlación 2 (Elaboración propia, 2020).

Por lo que dada la gráfica anterior se observa que los residuos presentan una distribución normal, lineal, son aleatorios, independientes entre sí y homocedásticos, por lo que se valida el uso del diseño de bloques aleatorizados.

Se realiza el ANOVA con las hipótesis planteadas y el nivel de significancia establecido:

Tabla 18: Análisis de varianza correlación 2 (Elaboración propia, 2020).

Fuentes de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor crítico de F	Valor de P
Metodologías CBR	2	248.3	124.13	2.91	3.55	0.080
Zonas	9	5474.7	608.30	14.25	2.46	0.000
Error Experimental	18	768.4	42.69			
Total	29	6491.4				

Con base al análisis de varianza mostrada en la tabla 18 se puede concluir que de acuerdo con lo anterior no existe evidencia estadística significativa para decir que el efecto de al menos una metodología de cálculo de CBR es diferente ya que para este caso el valor de P se tiene que es mayor a $\alpha=0.05$ para el factor de estudio que es Metodologías CBR lo cual implica que no hay variación significativa entre las metodologías, adicional a estos valores también tenemos un $R^2 = 88.16\%$, lo cual confirma un buen ajuste del modelo.

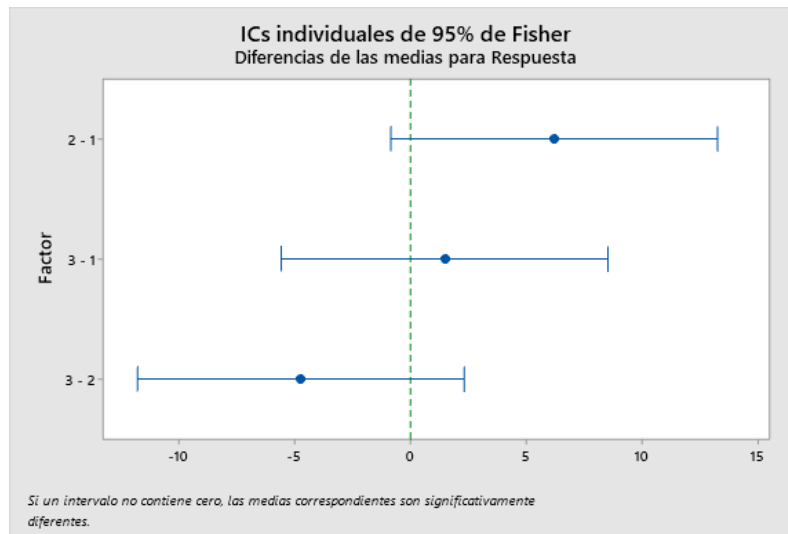


Ilustración 42: Comparación de medias de las metodologías de obtención de CBR usando método de Fisher (Elaboración propia, 2020).

Haciendo una prueba de comparación de medias, mediante el método de Fisher se comprueba que no existe diferencia entre metodologías de obtención de CBR por lo que no se rechaza la hipótesis nula.



Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

5.1 CONCLUSIONES

Uno de los principales objetivos de esta investigación fue realizar una comparativa de tres metodologías para la determinación del CBR, dos de ellas normadas y establecidas por la secretaria de comunicaciones y transportes para determinarse aceptables y confiables, y una tercera la cual fue mediante equipo Clegg Hammer, por lo cual el objetivo se cumplió, teniendo dos diferentes correlaciones para la obtención de resultados por medio del valor de impacto del equipo Clegg Hammer se realizó el análisis en ambas para determinar la que más ajustaba o mayor certeza en resultados tuviera respecto a las otras dos, por lo que mediante un análisis de bloques aleatorizados se llegó a las siguientes conclusiones:

Para el caso de la primera correlación analizada propuesta para uso general por el Dr. Clegg se llegó a la conclusión que para nuestro caso en particular teniendo un tipo de suelo granular SW-SM y GW-GM, hay variación significativa pudiéndose atribuir a la gran variedad de suelos que existen, ya que como se mencionó anteriormente esta correlación es para uso de suelos en general, lo que implica que para algunos tipos de suelo llegase a ver buen comportamiento en resultados, adicional se observó que mientras el valor de impacto vaya aumentando el comportamiento de la correlación tiende a arrojar valores muy altos, ya que en este caso probándose en una calidad Sub – Base los valores de impacto obtenidos por el equipo son altos, pero no comparándose la correlación a los CBR obtenidos por métodos convencionales, ya que observo una variación de resultados de CBR para este tipo de material.

Con respecto a la segunda correlación utilizada para suelos GM (Al-Amoudi et al., 2002), es específicamente para un tipo de suelo o suelo muy similar, por lo que no generaliza y va enfocada a ese tipo de clasificación, en nuestro caso el material tiene muy poca variación respecto al mencionado, por unos mínimos aspectos cambia su clasificación pero su comportamiento mecánico es prácticamente el mismo, por lo que fue utilizada su correlación dentro de un diseño de bloques aleatorizados usando como factor principal la metodología



de obtención de CBR siendo los niveles campo con equipo móvil, laboratorio y Clegg Hammer los niveles de estudio, el diseño tuvo un ajuste del 88.16% y se concluyó que no hay diferencia en la medición de CBR en comparación a la obtenida por laboratorio y campo de la misma manera analizada, este estudio es confiable para dicho material SW-SM y GW-GM calidad Sub – Base pudiendo obtener resultados al instante del valor de impacto, en funciones prácticas puede utilizarse para la verificación, supervisión y procedimientos constructivos de calidad más eficientes de sub bases, ya que se puede monitorear en tiempo real los CBR de manera confiable, pero sin descartar pruebas controladas para corroborar la calidad del material, debido a que no se encuentra aún normado, una prueba de este equipo no sería válida ante algunas dependencias como lo es la SCT.

5.2 RECOMENDACIONES

Antes de utilizar el equipo Clegg Hammer para realizar algún tipo de prueba será necesario verificar la correcta calibración del equipo mediante el anillo del fabricante echo de plástico de poliuretano para comprobar que el valor de impacto coincida con en especificado del anillo con su margen de error permisible, esto sobre una plancha de concreto uniforme y a la altura específica.

Al realizar pruebas se deberán seguir las especificaciones del equipo, en este caso se realiza la lectura al cuarto golpe ya que se alcanza una estabilización en el valor de impacto teniendo una quinta para comprobación y asegurar la correcta ejecución de la prueba, sin embargo, se recomienda un sondeo de 3 pruebas para corroborar similitud entre resultados y obtener promedio de un punto deseado.

Es recomendable nunca descartar alguna metodología normada como lo es en campo con equipo móvil o la de laboratorio, en caso de utilizar el equipo Clegg Hammer para algún tipo de verificación rápida o control de calidad sobre procedimientos, esto para respaldarse sobre datos correctos y tener una noción del comportamiento mecánico del material y teniendo en cuenta la variabilidad que se tendrá respecto al material en cuestión y la



correlación utilizada ya que este estudio se realizó en calidades sub – base obteniendo buenos resultados pero no generalizando a cualquier tipo de suelo.

Se debe tomar en cuenta que el contenido de humedad y la compactación influyen en los resultados de la prueba por lo que también es necesario conocer este parámetro para cualquier tipo de incongruencia en los resultados obtenidos.

Este estudio se realizó a un solo tipo de suelo, por lo que se tiene un bajo rango de utilidad en cuestiones confiables y probadas, por lo que es recomendable expandir el área de estudio a otros tipos de suelo, probando las correlaciones existentes o generando otras confiables para una mayor utilidad práctica, ya que el equipo es sencillo, práctico de utilizar y rápido respecto a las otras metodologías, y agilizaría procesos constructivos en cuestiones de aceptación o rechazo a cuestiones técnicas de manera casi inmediata, por lo que si se tiene suficientes datos de estudio en los diferentes tipos de calidades especificadas por la SCT a futuro podría normarse bajo esta dependencia y utilizarse de manera valida bajo sus criterios.

De acuerdo con el estudio realizado se recomienda el uso del equipo Clegg Hammer solamente para pruebas rápidas de verificación en campo para un mayor control de calidad, sin embargo, estas no sustituirán los procedimientos actuales en cuestiones de aceptación de calidad de materiales.



Referencias

- Al-Amoudi, O. S. B., Asi, I. M., Al-Abdul Wahhab, H. I., & Khan, Z. A. (2002). Clegg Hammer - California-bearing ratio correlations. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 512–523. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:6\(512\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(512))
- American Society for Testing and Materials. (2002). D 5874-02. *Standard Test Method for Determination of the Impact Value (IV) of a Soil 1, 04(Iv)*, 1–9.
- Crespo Villalaz, C. (2011). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (6a.) [Book]. Limusa.
- Dr. Clegg, B. (1980). *CORRELACIÓN CON LA RELACIÓN DE RODAMIENTOS DE CALIFORNIA*. [Http://Www.Clegg.Com.Au/Information_list12.Html](http://Www.Clegg.Com.Au/Information_list12.Html).
- Hernández Sampieri R., Fernández Collado C., Baptista Lucio M, & . (2014). *Metodología de la investigación*.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1967). *Mecánica de suelos, Tomo II-Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos* (p. 971).
- Melo, O. O., López, L. A., & Melo, S. E. (2020). Diseño de Experimentos: Metodos y Aplicaciones. In *Universidad Nacional de Colombia* (segunda ed).
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). *Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería* (Segunda Ed).
- Murray R. Spiegel, & Stephens, L. J. (2009). *Estadística* (4a Edición).
- Rivera González, F. A., & Flores Mendoza, A. E. (2009). *Análisis comparativo entre los resultados de los ensayos California Bearing Ratio (CBR) y Valor Impacto de Clegg (VIC) ejecutados en especímenes de suelo fabricados con material del banco "Material de Celda", ubicado en la Mina Orosí, municipio de La Libe.*
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA.
- Ronald E, Walpole; Raymond H. Myers; Sharon L. Myers; Keying Ye, . (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (Novena edi).
- SCT. (2003). M·MMP·1·08/03. *Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales*, 1–27.
- SCT. (2007). M·MMP·1·07/07. *Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales*, 1–9.
- SCT, S. de comunicaciones y transportes. (2002a). M·MMP·4·04·004/02. *MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES*, 1–8.
- SCT, S. de comunicaciones y transportes. (2002b). M·MMP·4·04·006/02. *MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES*, 4–8.
- SCT, S. de comunicaciones y transportes. (2002c). N·Cmt-1-02/02. *Características de Los Materiales*, 1–5.



SCT, S. de comunicaciones y transportes. (2006). M·MMP·1·09/06. *Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales*, 1–9.

SCT, S. de comunicaciones y transportes. (2008). M·MMP·1·11/08. *MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES*, 1–15.

SCT, S. de comunicaciones y transportes. (2013). M·MMP·1·12/13. *MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES*, 6–13.

SCT, S. de comunicaciones y transportes. (2016). Normatividad para la infraestructura del transporte. N-CMT-4-02.001/16. *Característica de Los Materiales, 02 Materiales Para Pavimentos*, 1–8.

Zárate Aquino, M. (2011). *Diseño de pavimentos flexibles primera parte (3a.)* [Book]. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.



Glosario

CBR = (California Bearing Ratio o relación de soporte de California)

Clegg Hammer = Equipo martillo de impacto para ensayo de suelos

N.P. = No presenta

$\gamma_s \text{ máx}$ = Masa volumétrica seca máxima

SCT = Secretaria de Comunicaciones y Transportes

ASTM = American Society for Testing and Materials

ANOVA = Análisis de la Varianza con un Factor

GCC = Grupo Cementos de Chihuahua

S.U.C.S. = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

% E. A. = Porcentaje de equivalente de arena

Rpm. = Revoluciones por minuto

M.V.S.M. = Masa volumétrica seca máxima

M.V.S. = Masa volumétrica seca

CIV = VI = Valor de Impacto del equipo Clegg Hammer

GW = Grava bien graduada

SW = Arena bien graduada

GM = Grava limosa

ΣL = Número de ejes equivalentes de diseño



Curriculum Vitae

Oscar Orlando Gaytán Cruz, nacido en ciudad Juárez, Chihuahua el día 1 de noviembre de 1993, ingreso a la facultad de ingeniería en la Universidad Autónoma de Chihuahua en el año 2011 en el programa de Licenciatura en Ingeniería Civil egresando en el año 2016 mediante la presentación del Examen General de Egreso de Licenciatura (EGEL) alcanzando el testimonio Sobresaliente otorgado por el CENEVAL.

En su vida profesional ha desempeñado servicios profesionales de ingeniería en las vías terrestres, desempeñando puestos de supervisor de obra, superintendente y servicios de ingeniero independiente.

Cuenta con un “Diplomado en Ferrocarriles”, impartido por el Centro de Actualización Profesional e Innovación Tecnológica del Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C. en conjunto con la Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A.C.

Durante el periodo del 2018 al 2020, realizo los estudios de la Maestría en Ingeniería en Vías Terrestres en la facultad de ingeniería en la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Domicilio Permanente: Circuito Puerta San Camilo 3002, Puerta San Miguel Etapa 2
Chihuahua, Chihuahua, 31125

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por Oscar Orlando Gaytán Cruz