



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA PARA LA EJECUCIÓN DE ENSAYOS CBR EN
SUELOS GRANULARES CON CONTENIDO DE FINOS MENOR AL 12 %

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

YERAL IGNACIO JESÚS MARTÍNEZ ASTUDILLO

PROFESOR GUÍA:
ABELARDO JULIO AMDAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FELIPE OCHOA CORNEJO
IVÁN BEJARANO BEJARANO

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil con Mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia
POR: Yeral Ignacio Jesús Martínez Astudillo
FECHA: 20/10/2020
PROFESOR GUÍA: Abelardo Julio Amdan

ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA PARA LA EJECUCIÓN DE ENSAYOS CBR EN SUELOS GRANULARES CON CONTENIDO DE FINOS MENOR AL 12 %

Dada la importancia de la infraestructura vial para el desarrollo del país y el lento avance en la pavimentación de caminos en los últimos años en comparación a lo desarrollado en décadas anteriores, se ha realizado una revisión de las técnicas y normativas que se encuentran vigentes para la definición de materiales constituyentes del paquete estructural, como base o sub-base. En este sentido, este trabajo se ha concentrado en proponer una metodología para confeccionar probetas remoldeadas en suelos granulares con contenido de finos menor al 12%, con el objetivo de estandarizar un procedimiento de confección de probetas para la ejecución de ensayos de resistencia a la penetración (California Bearing Ratio) los cuales, en la actualidad, sólo pueden ser realizados en suelos con contenido de finos mayor al 12%, mediante el ensayo de compactación Proctor.

Para cumplir con lo señalado anteriormente, se recolectarán muestras, a las cuales se realizará un plan de ensayos de clasificación de los materiales junto con los ensayos de Densidad Relativa, DR, a distintos niveles de energía por vibración. Los resultados de los ensayos se analizarán con el fin de determinar una correlación entre las características del material y las densidades alcanzadas para cada energía aplicada por vibración, indicando los parámetros y criterios necesarios, y así proponer configuraciones de tiempo y frecuencia de vibrado para confeccionar probetas a distintos niveles de densificación y ser utilizadas en un ensayo CBR.

Dedicado a mi madre, padre y hermano.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Lucy & Francisco, y mi hermano Francisco por el apoyo a lo largo de toda esta etapa, sin ellos esto no pudo ser posible, solo puedo decir gracias totales.

Agradecer al profesor Abelardo Julio por la oportunidad de desarrollar esta investigación y abrirme las puertas de su laboratorio, junto con todos los valiosos consejos e historias profesionales y de vida que me ha entregado.

También, mencionar a todo el equipo que conforma el laboratorio AJGEOTECH, a Anahí, Deysa, Nativita, Vivian y a los laboratoristas Jaime y Pablo, quienes me ayudaron durante todo el desarrollo de este trabajo y siempre me hicieron sentir cómodo en un grato ambiente laboral.

Dar las gracias a todas las empresas colaboradoras que me facilitaron generosamente las muestras utilizadas en la investigación. Estas son:

- GDE Ingenieros Consultores.
- GeoDam Consultores.
- Ingeniería, Montaje y Construcción.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Objetivos	2
1.2.1.	Objetivo General	2
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	2
1.3.	Alcance	2
1.4.	Organización del Trabajo.....	3
2.	Revisión bibliográfica.....	4
2.1.	Conceptos básicos.....	4
2.2.	Normativa.....	6
2.2.1.	Normativa nacional	7
2.2.2.	Normativa internacional	9
3.	Metodología.....	21
3.1.	Problemática.....	21
3.2.	Materiales	24
3.3.	Trabajo de laboratorio.....	24
3.3.1.	Cuarteo de muestras.....	24
3.3.2.	Granulometría	24
3.3.3.	Límite Líquido.....	29
3.3.4.	Límite Plástico.....	31
3.3.5.	Peso específico de las partículas menores a tamiz N°4 (5 mm) ...	31
3.3.6.	Peso específico de las partículas mayores a tamiz N°4.....	32
3.3.7.	Densidad Mínima, Máxima e Intermedia	34
3.4.	Selección de las frecuencias de vibrado	41
3.5.	Parámetros índices y de estado a evaluar en los materiales	41
3.5.1.	Diámetros característicos, coeficientes de curvatura y uniformidad 41	
3.5.2.	Plasticidad.....	43
3.5.3.	Clasificación USCS	45

3.6.	Correlaciones entre parámetros y densidades.....	45
3.7.	Propuesta para dar respuesta a la problemática	57
4.	Resultados	58
4.1.	Materiales seleccionados.....	58
4.2.	Plan de ensayos	64
4.3.	Parámetros de los materiales ensayados	66
4.3.1.	Granulometría	66
4.3.2.	Límites de Atterberg.....	69
4.3.3.	Densidad partículas sólidas	70
4.3.4.	Resumen de resultados	71
4.4.	Densidades secas vibradas	73
5.	Análisis y discusión de resultados	81
5.1.	Curvas granulométricas	81
5.2.	Curvas de densidad según tiempo y frecuencia en mesa vibratoria	86
5.3.	Correlación entre densidad máxima y mínima	93
5.4.	Influencia de la gradación en la densidad y densidad relativa	95
5.5.	Influencia del contenido de finos en la densidad y densidad relativa	105
5.6.	Discusión de la configuración de vibrado propuesta	109
6.	Procedimiento propuesto	110
7.	Conclusiones y recomendaciones	122
7.1.	Conclusiones	122
7.2.	Recomendaciones	124
8.	Bibliografía.....	126
	Notación.....	130
	Apéndice A.....	133
	Anexo A.....	137

Índice de Figuras

Figura 2.1: Composición del suelo (Budhu, 2011).....	4
Figura 2.2: Variación de la densidad máxima con la amplitud de vibración (Tavenas & La Rochelle,1972)	11
Figura 2.3: Densidad seca en función del tiempo de vibración (Pettibone & Hardin,1964).	12
Figura 2.4: Densidad versus sobrecarga por peso muerto (Pettibone & Hardin,1964). .	13
Figura 2.5: Densidad seca en función de frecuencia de vibración (Pettibone & Hardin,1964).....	14
Figura 2.6: Montaje para el ensayo CBR in situ (ASTM D4429, 2009).	15
Figura 2.7: Diagrama de flujo que representa los métodos de preparación de muestras para la prueba CBR (BS 1377-4,1990).....	18
Figura 2.8: Montaje de compactación mediante martillo vibratorio (BS1377-4,1990). ...	19
Figura 2.9: Montaje para el ensayo CBR in situ (BS1377-4,1990).....	20
Figura 3.1: Cuarteo de muestras (MOP, 2018).	25
Figura 3.2: a) Tamiz de alambre tejido b) Esquema del tejido simple de los tamices (Endecotts, 2015).	28
Figura 3.3: a) Ranura Abierta b) Ranura cerrada c) Acanalador ASTM (MOP, 2018)..	30
Figura 3.4: a) Vista lateral máquina Casagrande b) Vista frontal máquina Casagrande (Manual de Carreteras, MOP, 2018).	30
Figura 3.5: Matraz aforado 100 ml con tapón de plástico (IndusLab, 2020).....	32
Figura 3.6: Montaje ensayo peso específico partículas mayores a Tamiz N° 4.	33
Figura 3.7: Dimensiones de moldes ensayo densidad máxima (ASTM, 2016b).	36
Figura 3.8: Montaje de aparatos para densidades máxima e intermedias (Manual de Carreteras, MOP,2018).	37
Figura 3.9: Caja control de mesa vibratoria, equipo AJGEOTECH.	38
Figura 3.10: Dimensiones placa base y sobrecarga (ASTM, 2016b).	39
Figura 3.11: Combinaciones preliminares de frecuencia tiempo.	40

Figura 3.12: Curvas granulométricas y diámetros característicos (Budhu, 2011).	42
Figura 3.13: Estados del suelo en función del volumen del suelo y el contenido de humedad (Budhu, 2011).....	43
Figura 3.14: Resultado Límite Líquido mediante método de Casagrande (Budhu, 2011).	44
Figura 3.15: Carta plasticidad (ASTM-D-2487,2000).	45
Figura 3.16: Índice de vacío mínimo y máximo, e_{min} y e_{max} , en función de C_U para mezclas artificiales de arenas (Youd,1973).....	46
Figura 3.17: Relación empírica entre densidades máximas y mínimas versus coeficiente de uniformidad (Johnston, 1973).....	47
Figura 3.18: Densidad seca máxima v/s coeficiente de uniformidad (Kezdi, 1979).....	48
Figura 3.19: Relación entre índices de vacíos y coeficiente de uniformidad C_U . a) Índice de vacío máximo e_{max} vs C_U , b) Índice de vacío mínimo e_{min} vs C_U . (Miura et al, 1997).48	48
Figura 3.20: Índice de vacío mínimo, e_{min} , como función del coeficiente de uniformidad y angularidad de partículas de enrocados (Biarez, 1994).	49
Figura 3.21: Relación entre índice de vacíos mínimo y coeficiente de uniformidad (Dorador & Riquelme, 2014).....	50
Figura 3.22: Índices de vacíos máximos y mínimos versus tamaño medio de grano para mezclas artificiales de arena con $C_U=1,4$ (Youd, 1979).	51
Figura 3.23: Relación entre índice de vacíos y tamaño de grano medio d_{50} . a) Índice de vacío máximo e_{max} vs d_{50} , b) Índice de vacío mínimo e_{min} vs d_{50} . (Miura et al, 1997).....	52
Figura 3.24: Influencia del tamaño medio de grano en índice de vacío máximo (Cubrinovski & Ishihara, 2002).	53
Figura 3.25: Influencia de d_{50} en e_{max} para materiales con C_U entre 0,5 y 29 (Besio & Dorador, 2013).	53
Figura 3.26: Efectos del contenido de finos en e_{max} y e_{min} de arenas: a) e_{max} vs. C_F b) e_{min} vs. C_F (Cubrinovski & Ishihara, 2002).....	54
Figura 3.27: Correlación entre Índice de vacíos máximo e Índice de vacíos mínimo para enrocados (Veiga Pinto, 1979).....	55
Figura 3.28: Correlaciones entre e_{min} y e_{max} en: a) Arenas limpias, b) Arenas con finos, c) Arenas con finos y arcillas, d) Limos y e) Resumen para todos los suelos (Cubrinovski & Ishihara, 2002).	56

Figura 3.29: Correlaciones entre los Índices de vacíos e_{min} y e_{max} determinados a partir de ensayos basados en las normas ASTM (De La Hoz, 2007).	57
Figura 4.1: Sector de Chile de donde provienen las muestras (MINEDUC, 2020).	59
Figura 4.2: Distribución espacial de las muestras (SERNAGEOMIN, 2020).	60
Figura 4.3: Mapa geológico: a) Provincia de Santiago b) Comuna de Buin (SERNAGEOMIN, 2020).	61
Figura 4.4: Mapa geológico: a) Comuna de Lampa b) Comuna de Calle Larga (SERNAGEOMIN, 2020).	62
Figura 4.5: a) Mapa geológico comuna de Quillota b) Leyenda (SERNAGEOMIN, 2020).	63
Figura 4.6: Curvas granulométricas del Grupo 1, muestras M-1 a M-12.	66
Figura 4.7: Curvas granulométricas del Grupo 2, muestras M-13 a M-16.	67
Figura 4.8: Resultados de composición de las partículas finas del material según carta de plasticidad de todos los materiales con finos que exhiben plasticidad.	70
Figura 4.9: Resultados densidades secas de la muestra M-1.	74
Figura 4.10: Resultados densidad relativa de la muestra M-1.	75
Figura 4.11: Combinaciones finales de frecuencia tiempo a considerar.	76
Figura 4.12: Resultados densidades secas vibradas a una frecuencia de 60 Hz.	77
Figura 4.13: Resultados densidades secas vibradas a una frecuencia de 30 Hz.	77
Figura 4.14: Resultados densidades secas vibradas a una frecuencia de 15 Hz.	78
Figura 4.15: Resultados Densidades Relativas vibradas a una frecuencia de 60 Hz.	79
Figura 4.16: Resultados Densidades Relativas vibradas a una frecuencia de 30 Hz.	79
Figura 4.17: Resultados Densidades Relativas vibradas a una frecuencia de 15 Hz.	80
Figura 5.1: Comparación curvas granulométricas Grupo 1 vs bandas granulométricas especificadas según MOP (2018). a) Sub-base, b) Base.	82
Figura 5.2: Comparación curvas granulométricas Grupo 2 vs bandas granulométricas especificadas según MOP (2018). a) Sub-base, b) Base.	83

Figura 5.3: Comparación curvas granulométricas Grupo 1 cortadas en tamiz 3/4" vs bandas granulométricas especificadas según MOP (2018). a) Sub-base, b) Base.....	84
Figura 5.4: Comparación curvas granulométricas Grupo 2 cortadas en tamiz 3/4" vs bandas granulométricas especificadas según MOP (2018). a) Sub-base, b) Base.....	85
Figura 5.5: Histogramas de densidades relativas para distintos tiempos a una frecuencia de 60 Hz.....	87
Figura 5.6: Histogramas de densidades relativas para distintos tiempos a una frecuencia de 30 Hz.....	88
Figura 5.7: Histogramas de densidades relativas para distintos tiempos a una frecuencia de 15 Hz.....	89
Figura 5.8: Densidades relativas alcanzadas en las distintas configuraciones para el Grupo 2 de muestras.....	92
Figura 5.9: Correlación lineal entre la densidad máxima seca, $\gamma_{d \max}$, y densidad mínima seca, $\gamma_{d \min}$, sin considerar muestra M-10.	94
Figura 5.10: Comparación resultados obtenidos del total de muestras entre índice de vacío mínimo, e_{\min} , vs índice de vacío máximo, e_{\max} , y diferentes autores.	95
Figura 5.11: Correlación entre la densidad máxima seca, $\gamma_{d \max}$, y el coeficiente de uniformidad, C_U , sin considerar muestra M-10.	96
Figura 5.12: Comparación resultados obtenidos de densidad máxima del total de muestras vs coeficiente de uniformidad y Kezdi (1979).	97
Figura 5.13: Comparación resultados obtenidos de índices de vacíos mínimo y máximo del total de muestras vs coeficiente de uniformidad y Youd (1973).	98
Figura 5.14: Comparación resultados obtenidos de índice de vacío mínimo del total de muestras vs coeficiente de uniformidad y Biarez (1994).	98
Figura 5.15: Densidad relativa del Grupo 1, sin muestra M-10, para las distintas configuraciones de vibrado versus coeficiente de uniformidad.	99
Figura 5.16: Densidad máxima seca, $\gamma_{d \max}$, versus coeficiente de curvatura, C_C , sin considerar muestra M-10.....	100
Figura 5.17: Densidad relativa del Grupo 1, sin considerar muestra M-10, para las distintas configuraciones de vibrado versus coeficiente de curvatura.	101
Figura 5.18: Densidad máxima seca, $\gamma_{d \max}$, versus diámetro característico d_{50} , sin considerar muestra M-10.....	102

Figura 5.19: Comparación resultados obtenidos de índices de vacíos mínimo y máximo del total de muestras vs d_{50} y Youd (1973).	103
Figura 5.20: Comparación resultados obtenidos de índice de vacío máximo del total de muestras vs d_{50} y Cubrinovski & Ishihara (2002).	103
Figura 5.21: Comparación resultados obtenidos de índice de vacío máximo del total de muestras vs d_{50} y Miura et al. (1997).	104
Figura 5.22: Densidad relativa del Grupo 1, sin muestra M-10, para las distintas configuraciones de vibrado versus d_{50}	105
Figura 5.23: Densidad máxima seca, $\gamma_{d \max}$, versus contenido de finos, C_F , sin considerar muestra M-10	106
Figura 5.24: Comparación resultados obtenidos de índices de vacíos máximo y mínimo del total de muestras vs C_F y Cubrinovski & Ishihara (2002).	107
Figura 5.25: Densidad relativa del Grupo 1, sin muestra M-10, para las distintas configuraciones de vibrado versus porcentaje de contenido de finos.	108
Figura 6.1: Corrección curva tensión-deformación (MOP,2018).	116
Figura 6.2: Razón de soporte, CBR, para una densidad específica.	117
Figura 6.3: Prensa ensayo CBR (Eliza Díaz, 2020).	117
Figura 6.4: Moldes, cargas y pistón para ensayo CBR vibrado.	118
Figura 6.5: Molde y collar para ensayo CBR vibrado, equipo AJGEOTECH.	119
Figura 6.6: Elemento de medición y tubo guía para ensayo CBR vibrado.	120
Figura 6.7: Montaje molde, collar y tubo guía ensayo CBR vibrado, equipo AJGEOTECH.	121
Figura 0.1: Diagrama de flujo para clasificar suelos de grano grueso (más del 50 % en masa de las partículas es retenido en el tamiz N°200 (0.075 mm) (ASTM-D-2487, 2000).	134
Figura 0.2: Diagrama de flujo para clasificar suelos de grano fino (50 % o más en masa de las partículas pasa el tamiz N°200 (0.075 mm) (ASTM-D-2487, 2000).	135
Figura 0.3: Diagrama de flujo para clasificar suelos orgánicos de grano fino (50 % o más en masa de las partículas pasa el tamiz N°200 (0.075 mm) (ASTM-D-2487, 2000). ...	136

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Descripción del estado de suelos granulares basados en la densidad relativa y la porosidad (Budhu, 2011).	6
Tabla 3.1: Alcance y restricciones de normas de ensayo CBR.	21
Tabla 3.2: Alcance y restricciones de normas de ensayo Proctor.	22
Tabla 3.3: Alcance y restricciones de normas de ensayo Densidad Máxima y Mínima.	22
Tabla 3.4: Bandas granulométricas para sub-base, bases y capas de rodadura (MOP,2018).	23
Tabla 3.5: Serie de tamices utilizados.	26
Tabla 3.6: Cantidad mínima de muestra para granulometría según tamaño máximo absoluto del suelo (MOP, 2018).	27
Tabla 3.7: Cantidad mínima de muestra según tamaño máximo nominal del material.	33
Tabla 3.8: Valores obtenidos de la calibración de los moldes (ASTM, 2016b).	34
Tabla 3.9: Masa muestra requerida, tamaño molde y aparato de llenado (ASTM, 2016b).	35
Tabla 4.1: Identificación de muestras.	58
Tabla 4.2: Plan de ensayos.	65
Tabla 4.3: Porcentaje en peso de gravas, arenas y finos de todas las muestras.	67
Tabla 4.4: Diámetros característicos, coeficientes de uniformidad y curvatura.	68
Tabla 4.5: Resultados límite líquido, plástico e índice de plasticidad de todas las muestras.	69
Tabla 4.6: Resultados densidad partículas sólidas todas las muestras.	70
Tabla 4.7: Resumen de resultados de parámetros significativos.	72
Tabla 4.8: Resultados densidades secas de la muestra M-1.	73
Tabla 4.9: Resultados densidad relativa de la muestra M-1.	74
Tabla 5.1: Resultados análisis de histogramas para frecuencia de vibrado de 60 Hz.	90
Tabla 5.2: Resultados análisis de histogramas para frecuencia de vibrado de 30 Hz.	90

Tabla 5.3: Resultados análisis de histogramas para frecuencia de vibrado de 15 Hz....	90
Tabla 5.4: Configuraciones preliminares de tiempo y frecuencia para confección de probetas para ensayo CBR.	91
Tabla 5.5: Densidades relativas alcanzadas en las distintas configuraciones para el Grupo 2 de muestras.....	93
Tabla 6.1: Configuraciones de tiempo y frecuencia para confección de probetas para ensayo CBR.	112
Tabla 6.2: Tamaño mínimo de muestra para determinar humedad.....	114
Tabla 7.1 Configuraciones de tiempo y frecuencia para confección de probetas para ensayo CBR y DR esperado.	123
Tabla 0.1: Resultados ensayos granulometría.	138
Tabla 0.2: Resultados ensayos densidades intermedias.....	139
Tabla 0.3: Resultados densidades relativas.	140

1. Introducción

1.1. Motivación

La infraestructura vial de un país cumple un rol fundamental en su desarrollo y progreso, otorgando conectividad terrestre para el transporte de personas y carga, lo que permite realizar actividades productivas, de servicios, turística, entre otras, mejorando la calidad de vida de sus habitantes.

En Chile, durante las últimas décadas del siglo pasado, existió un gran avance en el mejoramiento de caminos, muy distinto a lo desarrollado en la presente década, lo que se traduce en que solo el 24 % de las rutas del país están pavimentadas. Expertos señalan que es necesario actualizar las normativas incorporando nuevas tecnologías, ampliando el espectro de materiales y técnicas de construcción. Esto implicaría extender el campo de aplicación de ciertos ensayos.

Un ejemplo es el ensayo California Bearing Ratio, CBR, que es utilizado para determinar la resistencia a la penetración de suelos, previamente compactados mediante el procedimiento del ensayo Proctor o Proctor modificado, y fue desarrollado por la División de Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificar la capacidad de un material granular para ser utilizado como subrasante, sub-base, base o terraplén.

La norma chilena que estandariza este ensayo corresponde a la publicada por el Instituto Nacional de Normalización, INN, con denominación NCh 1852, en la cual se indica que las probetas deben ser compactadas con el fin de obtener la máxima densidad y humedad óptima según los procedimientos del ensayo Proctor o Proctor modificado.

Esto no da cabida a la realización del ensayo CBR en suelos con partículas de mayor tamaño y bajo contenido de finos, C_F , que debido a su naturaleza deben ser compactados mediante vibración y no por golpes, por lo cual no es posible obtener una relación definida entre el contenido de humedad y la densidad.

Debido a la importancia del desarrollo de la infraestructura vial para el crecimiento de nuestro país, junto con la incorporación de nuevas tecnologías en la construcción, motivan a proponer una nueva metodología para confeccionar probetas remoldeadas en suelos granulares con bajo contenido de finos, C_F , comenzado a estandarizar un procedimiento para la ejecución de ensayos California Bearing Ratio, CBR, en materiales naturales donde se proyecta emplazar nuevos caminos y pavimentos, pero no cumplen con las actuales limitaciones de la prueba y que potencialmente pueden ser utilizados como elementos de construcción, toda vez que cumplan con los demás requerimientos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Proponer una metodología para la confección de probetas remodeladas por vibración en moldes de CBR, en suelos granulares con un contenido de finos, C_F , menor al 12 %.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Revisión bibliográfica sobre normas nacionales e internacionales que establecen metodologías para la ejecución del ensayo CBR.
2. Establecer las características de los materiales a analizar, los parámetros y los ensayos.
3. Recolectar muestras de material granular para realizar los ensayos necesarios establecidos.
4. Estudiar características y parámetros de los materiales que influyan en las densidades alcanzadas mediante vibración y determinar posibles correlaciones entre éstos.
5. Proponer una nueva metodología para la ejecución de ensayos CBR en suelos granulares limpios, de acuerdo a las variables en inciden en el vibrado de estos materiales.

1.3. Alcance

En el presente documento se propone, de forma preliminar, un procedimiento para la confección de probetas en moldes CBR en suelos granulares con bajo contenido de finos, C_F , que se confeccionan con igual metodología que la usada para el ensayo de densidad mínima y, luego, compactadas mediante una mesa vibratoria.

Esta metodología es aplicable a materiales que presenten una porción que pasa por el tamiz N°200 (0,075 mm) menor al 12 % en relación a su masa y para los cuales no se obtiene una curva definida de relación humedad densidad a través del ensayo Proctor Normal o Proctor Modificado.

Los estudios realizados en la presente investigación se realizan con materiales ensayados en estado seco, por lo tanto, el alcance de los resultados aplica a esta condición de preparación de muestras.

1.4. Organización del Trabajo

La presente investigación está compuesta por siete capítulos, los cuales se definen a continuación.

En el capítulo 2 se presentan conceptos básicos utilizados durante el desarrollo del informe junto a una recopilación de antecedentes normativos asociados a los ensayos de resistencia a la penetración CBR.

En el capítulo 3 se describe la problemática de no contar con un procedimiento definido para realizar ensayos CBR en suelos granulares con escaso o nulo contenido de finos, además de la metodología de trabajo a seguir indicando las características de los materiales y parámetros geotécnicos a considerar en los análisis, junto con los ensayos que serán realizados en el estudio.

En el capítulo 4 se exponen los materiales utilizados, indicando lugar de origen, características geológicas, entre otros, junto a los resultados de los diferentes ensayos realizados de caracterización y densidades relativas.

En el capítulo 5 se presentan los análisis de los resultados con el fin de establecer configuraciones de vibrado para la confección de probetas durante el ensayo CBR, además de estudiar correlaciones entre distintos parámetros del suelo según los resultados obtenidos en las pruebas de vibración y como éstos influyen en la densidad relativa alcanzada a las distintas configuraciones de vibrado.

En el capítulo 6 se presenta un procedimiento detallado para ejecutar el ensayo CBR en los suelos estudiados, indicando equipamiento necesario, ejecución del ensayo junto a los cálculos y presentación de resultados.

En el capítulo 7 se señalan las principales conclusiones de la investigación, junto con indicar recomendaciones para la realización de futuros trabajos.

2. Revisión bibliográfica

A continuación, se presentan los conceptos claves que se utilizan en el desarrollo de la investigación, además de una revisión de la normativa vigente, tanto nacional como internacional, que tienen relación con los ensayos California Bearing Ratio (CBR), Proctor Normal y/o Modificado, en los que se basa la confección de probetas, y densidad relativa (DR).

2.1. Conceptos básicos

El suelo puede representarse de forma conceptual mediante tres fases que son sólidos, líquidos y gases como se indica en la Figura 2.1. La fase sólida está formada por partículas minerales y/o materia orgánica. Los espacios entre los sólidos se denominan vacíos, en los que se pueden encontrar líquidos (agua principalmente) y gases (aire predominantemente).

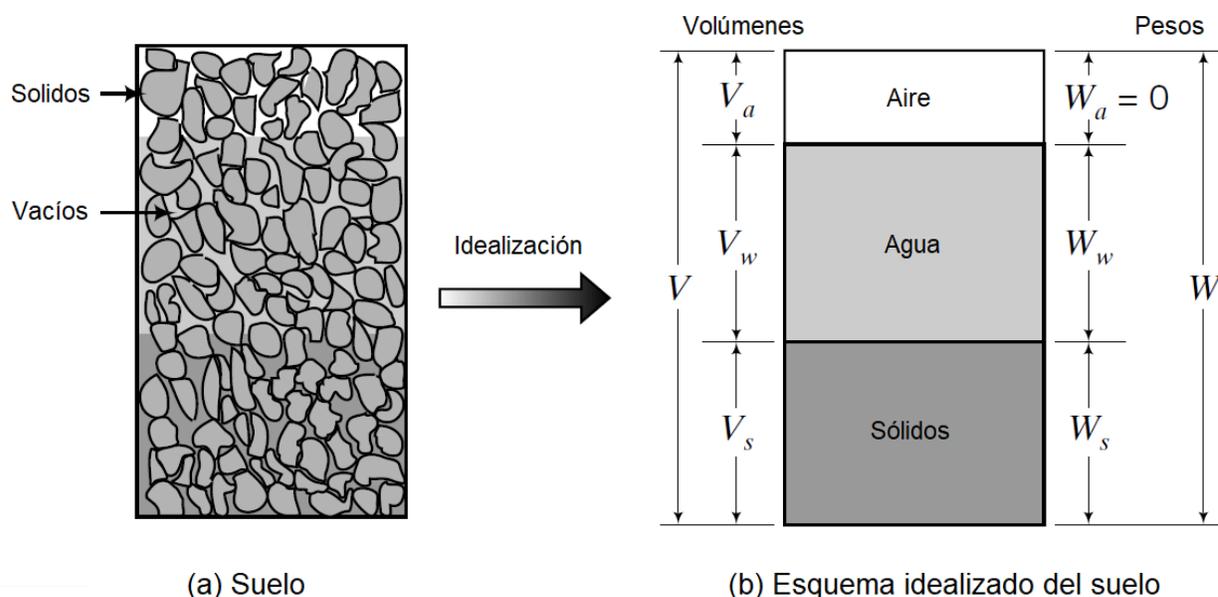


Figura 2.1: Composición del suelo (Budhu, 2011).

El volumen total del suelo es la suma de los volúmenes de sólidos, agua y aire, como se expresa en la Ecuación (2.1).

$$V = V_s + V_w + V_a = V_s + V_v \quad (2.1)$$

En cambio, el peso total corresponde a la suma de los pesos de los sólidos y el agua.

$$W = W_s + W_w \quad (2.2)$$

Luego, a partir de dichas definiciones, es posible establecer parámetros de estado para comprender la condición de densidad y saturación a la que se encuentra un material en terreno.

Humedad (w): Conocido también como contenido de humedad en vía seca, corresponde a la razón de los pesos de agua y sólidos, expresada comúnmente en porcentaje.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.3)$$

Índice de vacíos (e): Razón entre los volúmenes de vacío y sólidos.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_w + V_a}{V_s} \quad (2.4)$$

Porosidad (n): Razón entre los volúmenes de vacíos y total.

$$\eta = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1 + e} \quad (2.5)$$

Gravedad específica (G_s): Razón entre el peso y el volumen de los sólidos, normalizado por la densidad del agua a 4°C (γ_0).

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_0} \quad (2.6)$$

Grado de saturación (S): relación de los volúmenes de agua y vacíos.

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w G_s \gamma_0}{e \gamma_w} \quad (2.7)$$

Si $S = 1$, el suelo se encuentra saturado, en cambio, si $S = 0$ el material está completamente seco.

Peso unitario (γ): peso de un suelo por unidad de volumen.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \left(\frac{G_s \gamma_0 + S e \gamma_w}{1 + e} \right) \quad (2.8)$$

Cuando el material se encuentra saturado, es decir $S = 1$, se tiene:

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{G_s \gamma_0 + e \gamma_w}{1 + e} \right) \quad (2.9)$$

En el caso contrario, cuando el suelo está completamente seco, $S = 0$, se tiene:

$$\gamma_d = \left(\frac{G_s \gamma_0}{1 + e} \right) \quad (2.10)$$

Densidad relativa (DR): índice que cuantifica el grado de empaquetamiento entre los estados más suelto y denso posibles, e_{max} y e_{min} respectivamente, de suelos granulares.

$$DR = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (2.11)$$

En términos de pesos unitarios secos se define como:

$$DR = \frac{\gamma_{d \max} (\gamma_d - \gamma_{d \min})}{\gamma_d (\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min})} \times 100 \quad (2.12)$$

A partir de la densidad relativa que presente un material, se puede establecer su nivel de densificación, según la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Descripción del estado de suelos granulares basados en la densidad relativa y la porosidad (Budhu, 2011).

Densidad relativa, DR [%]	Porosidad, η [%]	Descripción
0-20	100-80	Muy suelto
20-40	80-60	Suelto
40-70	60-30	Medio denso o firme
70-85	30-15	Denso
85-100	<15	Muy denso

2.2. Normativa

A nivel nacional, el Instituto Nacional de Normalización, INN, corresponde al organismo encargado del estudio y elaboración de las normas técnicas para los distintos sectores productivos. Dentro de su amplio abanico de normas, existen los métodos estandarizados para realizar los ensayos CBR, Proctor Normal y/o Modificado y densidades máxima y mínima, los cuales, en su edición vigente, corresponden a:

- NCh1852.Of2010 Determinación de la razón de soporte de suelos compactadas en laboratorio.
- NCh1534/1.Of2008 Relaciones humedad/densidad – Parte 1: Métodos de compactación con pisón de 2,5 kg y 305 mm de caída.

- NCh1534/2.Of2008 Relaciones humedad/densidad – Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 460 mm de caída.
- NCh1726/1:2009 Determinación de la densidad en suelos no cohesivos – Parte 1: Densidad máxima usando mesa vibratoria.
- NCh1726/2:2009 Determinación de la densidad en suelos no cohesivos – Parte 2: Densidad mínima.

En el ámbito internacional, la American Society for Testing and Materials, ASTM, es una de las mayores organizaciones de desarrollo de normas voluntarias de consenso internacional para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Dentro de las más de 12.000 normas que ASTM ha desarrollado a lo largo de sus más de 120 años de historia, los métodos de los ensayos analizados son:

- ASTM D4429-09a. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place.
- ASTM D698-12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.
- ASTM D1557-12e¹ Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort.
- ASTM D4253-16e¹ Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of soils using a vibratory Table.
- ASTM D4254-16 Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of soils and calculation of Relative Density.

Otra organización de reconocimiento internacional sobre el desarrollo de normas estandarizadas es British Standards Institution, BSI. Creada a inicios del siglo XX en Inglaterra, BSI ha desarrollado una gran variedad de normativa en diferentes áreas como finanzas, educación, construcción, ingeniería, entre otros. Entre sus publicaciones ha definido metodologías para la ejecución de estos ensayos dentro de la norma:

- BS1377-4:1990 Methods of test for Soils for civil engineering purposes Part 4: Compaction-related tests.

2.2.1. Normativa nacional

La norma NCh1852.Of2010 tiene como alcance determinar el valor CBR de materiales de capa base, sub-base y terreno de fundación a partir de probetas compactadas en laboratorio. Además, tienen como fin principal, pero no excluyente, evaluar la resistencia de los materiales que tienen como un tamaño máximo de partículas menor a 3/4" (19 mm).

En el caso que el material presente partículas mayores a 3/4" (19 mm), el método estipula modificar la gradación del material, de modo que todo el material usado pase el tamiz 3/4" (19 mm), manteniendo la fracción de grava retenida en tamiz N°4 (4,75 mm).

Sin embargo, el material modificado puede presentar propiedades de resistencia significativamente diferentes en relación al material original, debido a que el corte de material puede modificar de forma significativa el contenido de finos del suelo que es ensayado.

La norma presenta dos maneras de realizar el ensayo. La primera corresponde a materiales compactados a un contenido de humedad específica, confeccionando tres probetas con distintos esfuerzos de compactación mediante los ensayos Proctor Normal o Proctor Modificado, dispuestos en las normas NCh1534/1.Of2008 y NCh1534/2.Of2008, respectivamente. La otra manera es para un rango de contenido de humedad, preparando una serie de probetas para cada uno de los tres esfuerzos de compactación dentro del rango de contenidos humedad requerido.

Generalmente, los tres esfuerzos de compactación corresponden a la aplicación de 56, 25 y 10 golpes por capa, con 5 capas por probeta.

Con respecto a los ensayos Proctor Normal o Proctor Modificado, las normas respectivas, tienen como alcance determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo compactado en un molde estandarizado por golpes mediante un pisón a un nivel de energía normalizado. Sin embargo, este método es aplicable a materiales que contengan, al menos, un 12% en masa de partículas pasante del tamiz 200 (0,075 mm). En su defecto, se recomienda determinar la densidad máxima mediante el uso de una mesa vibratoria de acuerdo con la norma NCh1726/1:2009 y la densidad mínima según la norma NCh1726/2:2009.

Dichas normas, tienen como alcance determinar las densidades características de los suelos no cohesivos y de libre drenaje, que presenten un tamaño máximo de partículas hasta 75 mm y que contengan hasta un 15% en masa de partículas menores al tamiz N°200 (0,075 mm).

La norma NCh1726/1:2009 indica que el valor de la máxima densidad se puede determinar mediante cuatro métodos alternativos para determinar este parámetro, los cuales son:

- Método 1A: Uso de suelo secado al horno y una mesa electromecánica de vibración vertical.
- Método 1B: Uso de suelo húmedo y una mesa electromecánica de vibración vertical.
- Método 2A: Uso de suelo secado al horno y una mesa excéntrica vibrada verticalmente.
- Método 2B: Uso de suelo húmedo y una mesa excéntrica vibrada verticalmente.

En todos los métodos, el material se vierte en un molde estandarizado, se coloca una sobrecarga equivalente a $13,8 \pm 0,1$ kPa y se vibra a una frecuencia de 60 Hz durante 8 min con una doble amplitud de vibración vertical igual a $0,33 \pm 0,05$ mm o, en su defecto,

a una frecuencia de 50 Hz durante 12 min con una doble amplitud de vibración igual a $0,48 \pm 0,08$ mm.

Con respecto a la densidad mínima, el procedimiento consiste en depositar el material en un molde estandarizado tan suelto como sea posible aplicando menor energía durante el proceso con el objetivo de obtener el máximo volumen posible de espacios vacíos.

Si el tamaño máximo nominal es menor o igual a 10 mm, el material es depositado mediante el uso de un embudo manteniendo un flujo constante y una altura de descarga menor a 25 mm. En cambio, si el tamaño máximo es superior a 10 mm, el material se coloca con una pala o puruña de modo que se deslice sobre el suelo previamente depositado.

2.2.2. Normativa internacional

- **American Society for Testing and Materials, ASTM**

La norma ASTM D4429-09a define el CBR como una relación de la unidad de carga en el pistón que se requiere para penetrar 0,1" (2,5 mm) y 0,2" (5,1 mm) del material de prueba en comparación a la carga unitaria requerida para penetrar un material estándar de roca triturada bien gradada.

El alcance del método es determinar el CBR de los materiales que son usados como paquete estructural para disponer sobre éstos los pavimento (base y/o sub-base), destinado principalmente, pero no excluyente, a evaluar la resistencia de los materiales que tienen como un tamaño máximo de partículas menor a 3/4" (19 mm).

Si se desea ensayar materiales que presenten partículas mayores a 3/4" (19 mm) el método proporciona la opción de modificar la gradación del material para que la porción de material utilizado para el ensayo pase en totalidad el tamiz 3/4" (19 mm) manteniendo la fracción de grava, contenida en tamiz N°4 (4,75 mm). Sin embargo, el material modificado puede presentar resistencia significativamente mayor en relación al material original.

El método proporciona un procedimiento para determinar el CBR de un material con un contenido óptimo de humedad, determinado mediante los ensayos de compactación por impacto Proctor Normal (D698-07e¹) o Proctor Modificado (D1557-12 e¹).

En el caso que se desea obtener el CBR al 100 % de la densidad máxima, se debe compactar el material, en el molde estandarizado, utilizando el mismo procedimiento de compactación, Proctor Normal o Proctor modificado, con el material preparado a la humedad óptima. En cambio, si se desea determinar el valor de CBR a otro nivel de grado

de compactación, sobre el 90 %, se preparan 3 probetas diferentes, con material preparado a la humedad óptima, las que se compactan con 56, 25 y 10 golpes por capa.

Con respecto a los ensayos Proctor Normal o Proctor Modificado, las normas respectivas establecen que estos procedimientos proporcionan una relación entre el contenido de humedad y la densidad (curva de compactación) bien definida para suelos de drenaje no libre. Por lo tanto, si se requiere obtener la densidad máxima de suelos de libre drenaje se recomienda utilizar el método descrito en la norma D4253-16e¹ mediante el uso de mesa vibratoria, además de obtener la densidad mínima a través del método descrito en la norma D4254-16.

Estos procedimientos tienen como alcance determinar el índice de densidad máxima y mínima de suelos sin cohesión y libre drenaje, específicamente, materiales que contenga hasta un máximo de 15 %, en masa seca, de partículas que pasa a través del tamiz N°200 (0,075 mm) y que el 100 % de estas pasen a través del tamiz 3" (75 mm).

Con respecto a la densidad máxima, la norma proporciona cuatro métodos alternativos para determinar este parámetro, los cuales son:

- Método 1A: Uso de suelo secado al horno y una mesa electromecánica de vibración vertical.
- Método 1B: Uso de suelo húmedo y una mesa electromecánica de vibración vertical.
- Método 2A: Uso de suelo secado al horno y una mesa excéntrica vibrada verticalmente.
- Método 2B: Uso de suelo húmedo y una mesa excéntrica vibrada verticalmente.

En todos los métodos, el material se vierte en un molde estandarizado, se coloca una sobrecarga equivalente a $13,8 \pm 0,1$ kPa y se vibra a una frecuencia de 60 Hz durante 8 min con una doble amplitud de vibración vertical igual a $0,33 \pm 0,05$ mm o, en su defecto, a una frecuencia de 50 Hz durante 10 min con una doble amplitud de vibración igual a $0,48 \pm 0,08$ mm.

Estos valores de sobrecarga, frecuencia, tiempo y amplitud se obtuvieron a partir de distintos estudios presentados en las reuniones anuales de la ASTM, en donde se concluye que la variable más significativa corresponde a la amplitud de vibración.

Los trabajos realizados por Tavenas & La Rochelle (1972), concluyeron que la densidad máxima presenta un comportamiento no lineal frente la amplitud, es decir, la densidad máxima aumenta inicialmente con el aumento de la amplitud de vibración hasta alcanzar un pick para luego disminuir como se aprecia en la Figura 2.2. Además, se observa que la amplitud de onda óptima varía dependiendo del tipo de suelo.

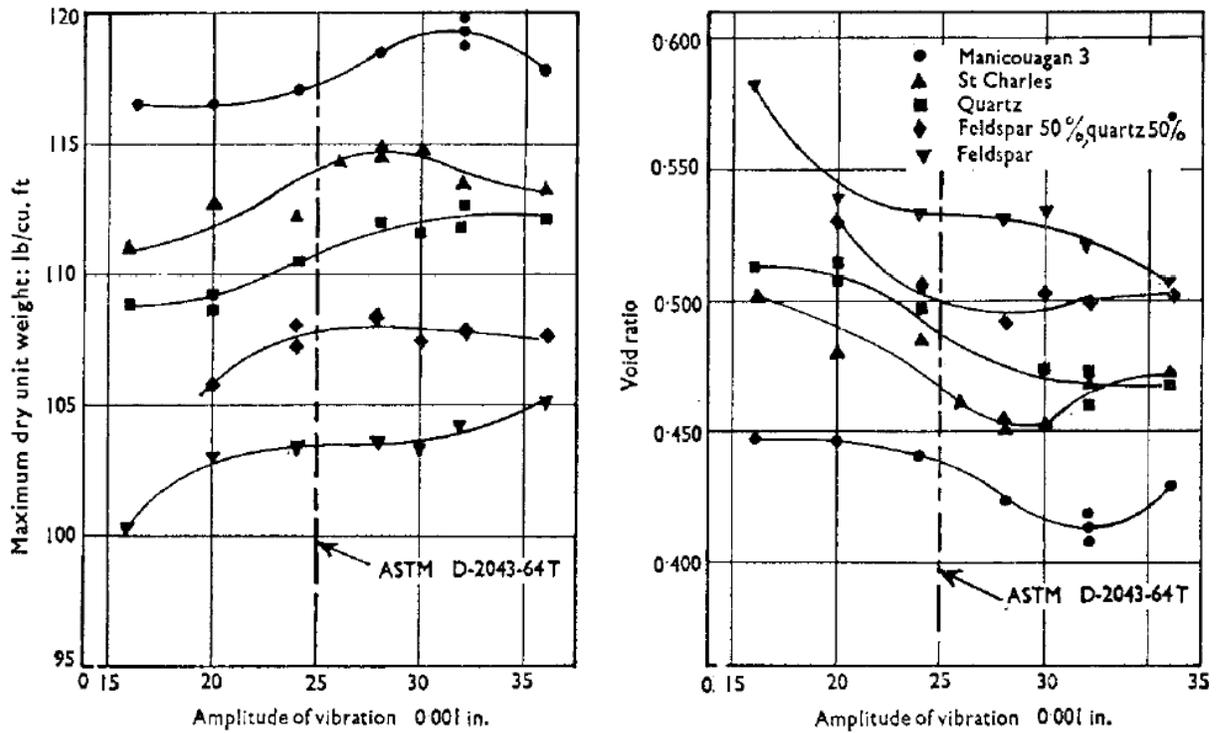


Figura 2.2: Variación de la densidad máxima con la amplitud de vibración (Tavenas & La Rochelle, 1972) .

Pettibone & Hardin (1964) estudiaron las diferentes variables durante el ensayo de densidad máxima, determinando que no existe un aumento considerable de la densidad máxima a partir de un tiempo de vibración mayor a 6 min, como se observa en la Figura 2.3.

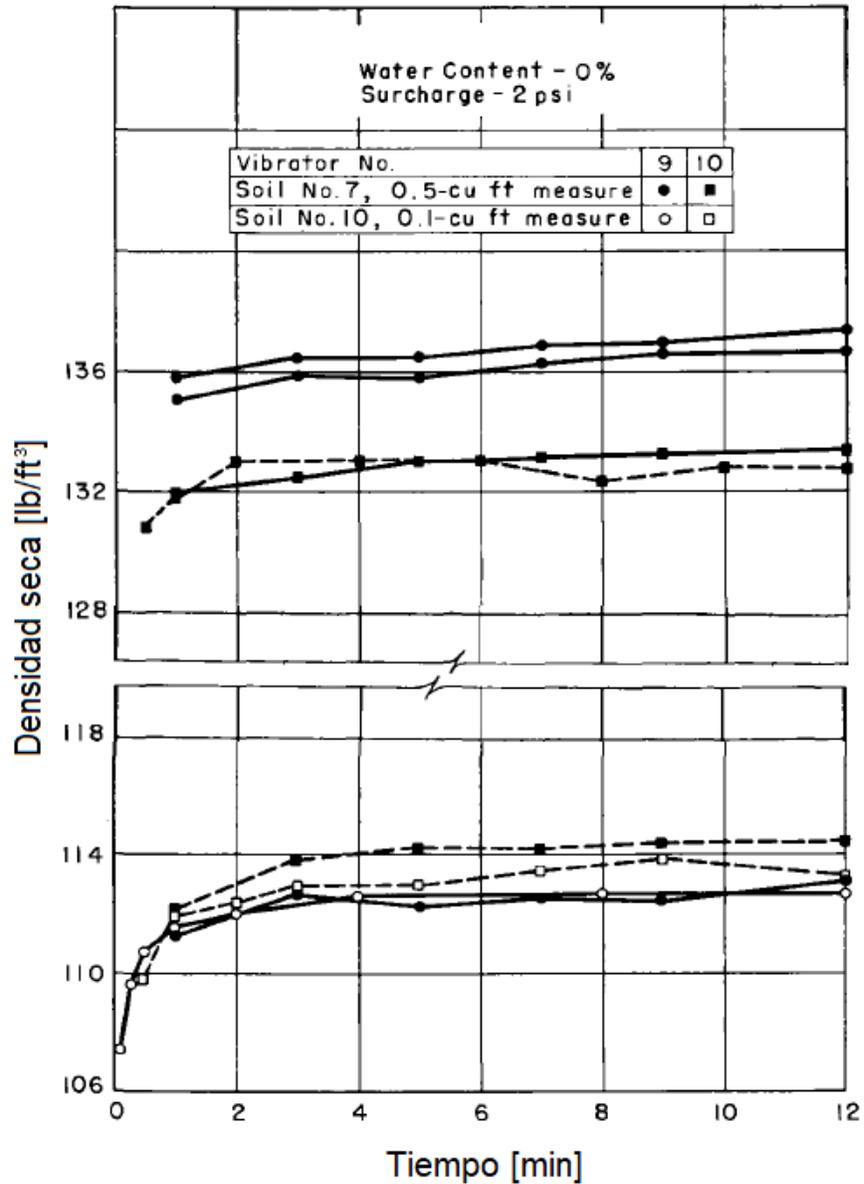


Figura 2.3: Densidad seca en función del tiempo de vibración (Pettibone & Hardin, 1964).

Además, realizaron el ensayo para distintos valores de sobrecarga como se muestra en la Figura 2.4, donde no se aprecia una variación de la densidad para mayores valores de sobrecarga.

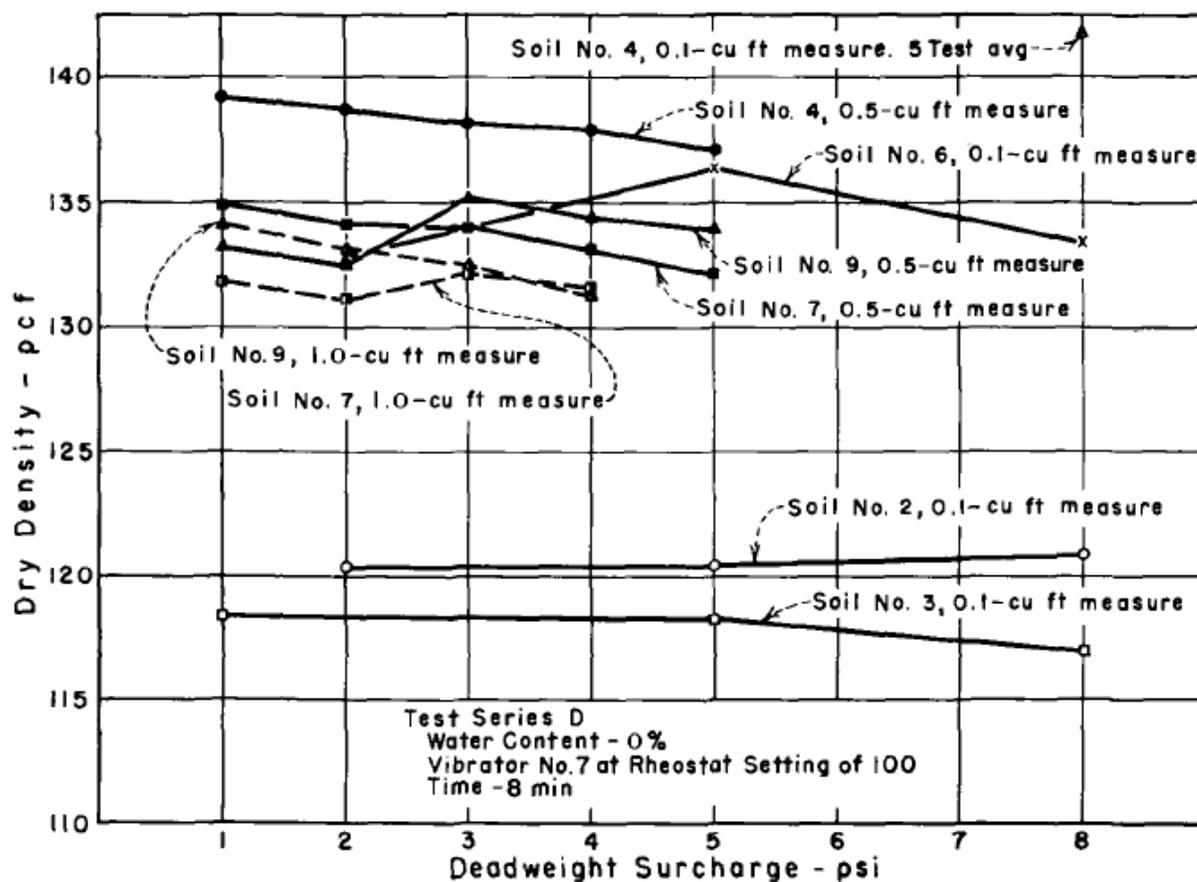


Figura 2.4: Densidad versus sobrecarga por peso muerto (Pettibone & Hardin, 1964).

Finalmente, determinaron las densidades a distintas frecuencias de vibrado en un rango de 20 a 100 Hz como se expone en la Figura 2.5. A partir de estos resultados se deduce que no existen diferencias significativas para frecuencias mayores a 60 Hz.

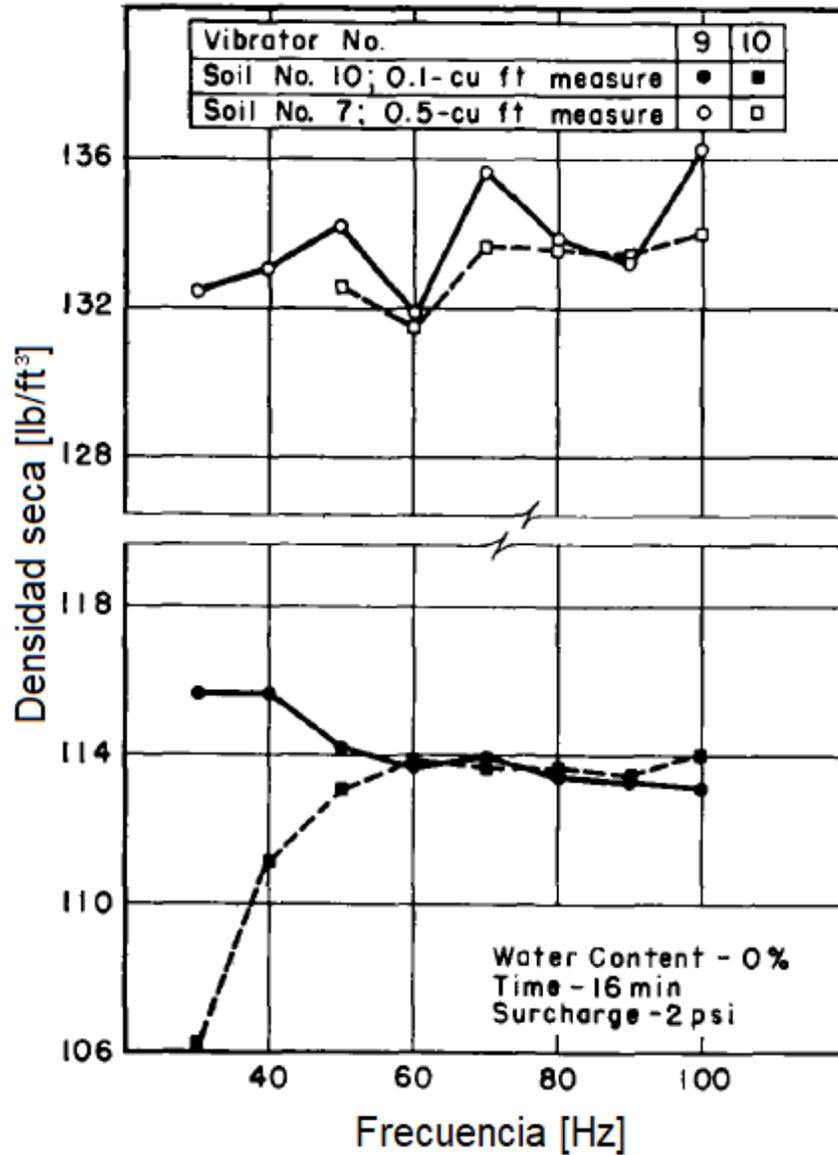


Figura 2.5: Densidad seca en función de frecuencia de vibración (Pettibone & Hardin, 1964).

En cuanto a la densidad mínima, la norma D4254-16, provee tres métodos alternos para obtener el este parámetro, los cuales son:

- Método A: Uso de un dispositivo de vertido de embudo o cuchara de mano para colocar el material en el molde estandarizado.
- Método B: Depositar material en un molde extrayendo un tubo lleno de tierra.
- Método C: Depositar material invirtiendo un cilindro graduado.

Todos los métodos tienen por objetivo depositar el material en un molde muy cuidadosamente, aplicando la menor cantidad de energía posible. Cada procedimiento es aplicable dependiendo de la distribución granulométrica del suelo y la cantidad de material disponible, siendo el método A el preferido ampliamente.

Por último, cabe señalar que como se puede determinar el valor de CBR de ciertos materiales realizando el ensayo en el laboratorio, existe la forma de ejecutar el ensayo en terreno, obteniendo este valor de manera in-situ.

La ASTM provee un método para la ejecución del ensayo CBR in situ, presentado en la norma con denominación D4429-09a. Este ensayo, tiene como alcance evaluar la calidad de los suelos utilizados como subrasante para un pavimento. La prueba se debe realizar bajo una de las siguientes condiciones: cuando el grado de saturación es igual o mayor al 80 %, cuando el material es de grano grueso y no cohesivo para que no se vea afectado significativamente por los cambios en el contenido de humedad o cuando el suelo no ha sido modificado por las actividades de construcción durante los dos años previos a la ejecución del ensayo.

Para la ejecución del ensayo es necesario un camión o pieza de equipo suficientemente pesada como para proporcionar una reacción de aproximadamente 31 kN y gatos mecánicos de tornillo operados manualmente con una capacidad mínima de 2700 kg, junto al pistón de penetración y celda de carga dispuestos como se muestra en la Figura 2.6.

El procedimiento consiste básicamente en aplicar la carga del camión o pieza pesada al pistón a una velocidad de penetración de 1,3 mm/min aproximadamente, utilizando el gato mecánico.



Figura 2.6: Montaje para el ensayo CBR in situ (ASTM D4429, 2009).

- **British Standards Institution, BSI**

La norma BS1377-4:1990 señala que debido al tamaño del molde y del émbolo, la prueba es apropiada solo para materiales que tienen un tamaño máximo de partículas que no excede los 20 mm. Específicamente, si la fracción, en masa, retenida en tamiz 3/4" (20 mm) es superior al 25 % la prueba no es aplicable.

Para la realización del ensayo, la norma proporciona seis métodos para la preparación de muestras alteradas. En los métodos 1 y 2 se utiliza una compactación estática para lograr una densidad especificada. En los otros métodos se utiliza una compactación dinámica para lograr una densidad específica, métodos 3 y 4, o para proporcionar un esfuerzo comparativo específico, métodos 5 y 6. La selección de métodos se ilustra en la Figura 2.7.

Cuando se especifica la densidad de una muestra compactada, se calcula la masa requerida para la prueba a partir del volumen del molde a utilizar. En el caso de un esfuerzo de compactación especificado, la masa de suelo sólo se puede estimar.

En el método 1, se vierte lentamente la masa determinada previamente en un molde estandarizado. Luego, se nivela la superficie y se aplica una carga hasta que el tapón quede al ras del molde.

El método 2 es similar al anterior, donde la masa determinada se divide en tres porciones iguales. Después, se coloca una porción de material en el molde, se nivela la superficie y se aplica una carga hasta que el espesor del suelo, terminada la aplicación de la carga, sea aproximadamente un tercio de la profundidad del molde. Esto se repite con las siguientes dos porciones del material hasta que el tapón quede nivelado con la parte superior del molde.

Para el método 3, la masa de material requerida se divide en cinco porciones iguales. Posteriormente, se coloca la primera porción de suelo en el molde y se compacta con un apisonador de 2,5 kg o de 4,5 kg hasta que la capa ocupe aproximadamente un quinto de la altura del molde. Se repite el procedimiento con las porciones restantes de modo que el nivel final de la quinta capa quede al nivel del molde.

Para el método 4 se utiliza un martillo vibrador, como el que se presenta en la Figura 2.8, lo que lo hace apto para materiales más granulares. En éste, el material acondicionado se divide en 3 porciones iguales. Luego, la primera fracción del material en el molde y se compacta con el martillo vibratorio. Después, se repite el proceso con las dos porciones restantes, de modo que el nivel del material, al final de la tercera capa, quede al nivel del borde superior del molde.

En el método 5, el esfuerzo de compactación especificado debe corresponder al método de Proctor Normal o Proctor modificado. Cuando se utiliza el procedimiento correspondiente al ensayo Proctor Normal, la masa de material preparada se divide en 3 porciones iguales. Se coloca la primera porción en el molde y se compacta mediante el

apisonador de 2,5 kg aplicando 62 golpes de manera uniforme, de modo que la capa compactada alcance un tercio de la altura del molde. Esto se repite con las dos porciones restantes, logrando que la superficie del suelo se encuentre cercana al borde superior del molde, para luego enrasar.

En el caso de utilizar el procedimiento correspondiente al ensayo Proctor modificado, el material se divide en 5 porciones iguales, cada capa debe alcanzar un quinto de la altura del molde y el apisonador utilizado es de 4,5 kg.

En caso que se requiera obtener una densidad intermedia, entre las alcanzadas por los dos procedimientos anteriores, se sugiere realizar un esfuerzo intermedio realizando la compactación en 5 capas iguales aplicando 30 golpes en cada una con el apisonador de 4,5 kg.

Por último, en el método 6, donde se utiliza un martillo vibrador y el material es dividido en tres partes iguales. Luego, la primera porción se coloca en el molde y se compacta mediante el martillo vibrador durante 60 ± 2 s, aplicando una fuerza total hacia abajo entre 300 N y 400 N, alcanzando un espesor de la capa cercano a un tercio del alto del molde. Esto se repite con las siguientes dos porciones de material, de modo que la superficie del suelo se encuentre cerca al borde superior del molde, para luego enrasar.

Para la muestra inalterada, esta de toma del suelo o relleno compactado utilizando un molde pesado de CBR equipado con una zapata de corte. Después de retirar la zapata de corte del molde, se recortan los extremos de la muestra, de modo que la muestra quede al ras de los extremos del molde. Luego, se rellenan los espacios vacíos con material fino y compactado.

Con respecto a las densidades máxima y mínima para suelos granulares, en el mismo volumen 4 de la norma BS 1377, publicada el año 1990, se presentan otras metodologías para los ensayos de dichas densidades. Esta señala que la densidad seca que alcanza un material depende de la energía aplicada y la cantidad de agua presente en el suelo. Para un suelo cohesivo dado, existe un contenido de humedad óptimo con el cual se obtiene un valor máximo de densidad, Sin embargo, para suelos sin cohesión, es difícil definir este valor óptimo.

La norma indica realizar los ensayos de densidad mínima y máxima para materiales que contienen hasta un 10 %, en masa seca, de partículas que pasa a través del tamiz de 0.063 mm.

Con respecto a la densidad máxima, el material se satura, se deposita en un molde de 1000 cm^3 para arenas y un molde de CBR de 152 mm de diámetro para gravas. Luego se compacta con un martillo vibrador, como se indica en la Figura 2.8, durante al menos 2 min para arenas y 3 min para gravas, aplicando una fuerza entre 300 y 400 N.

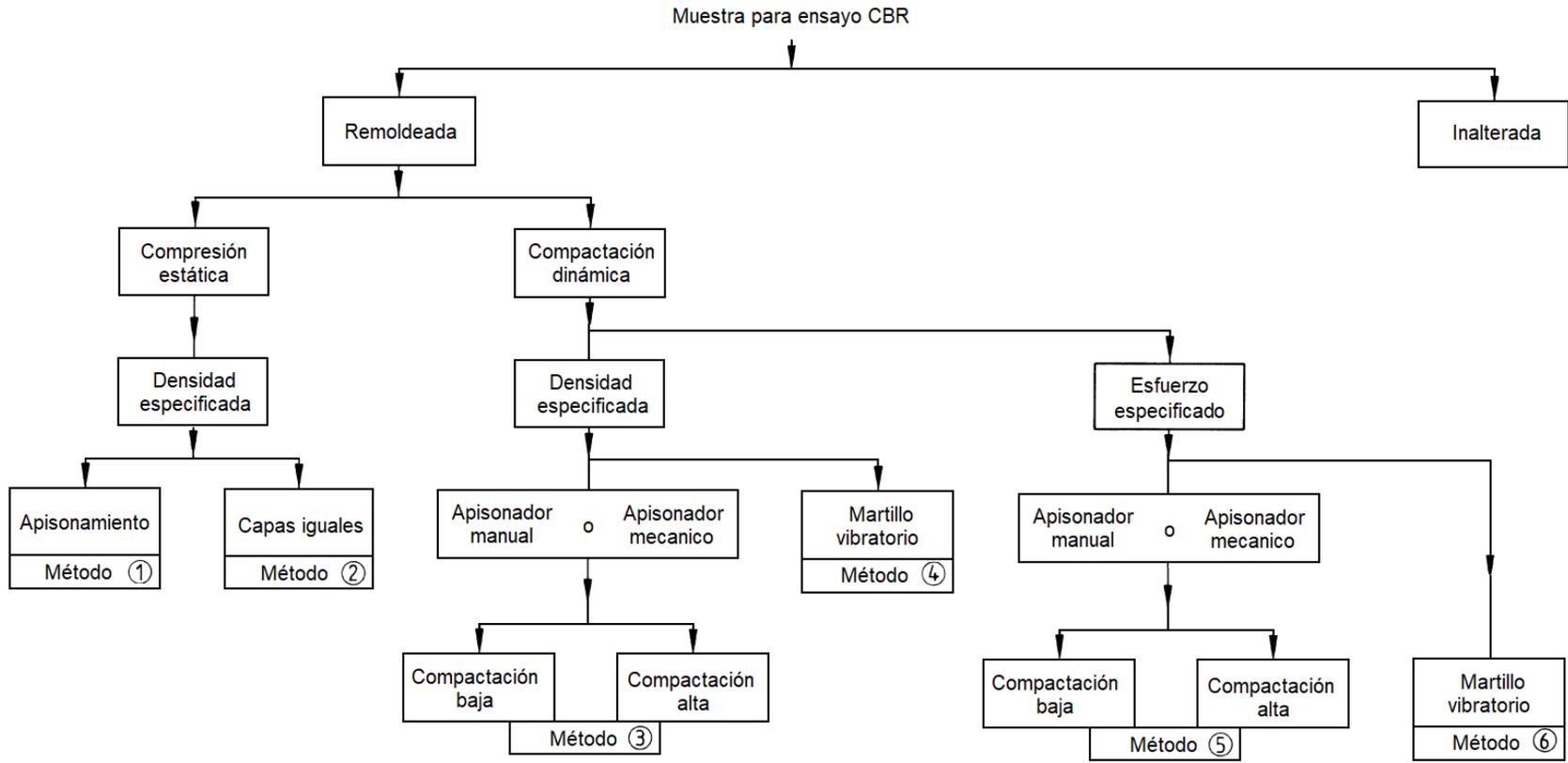
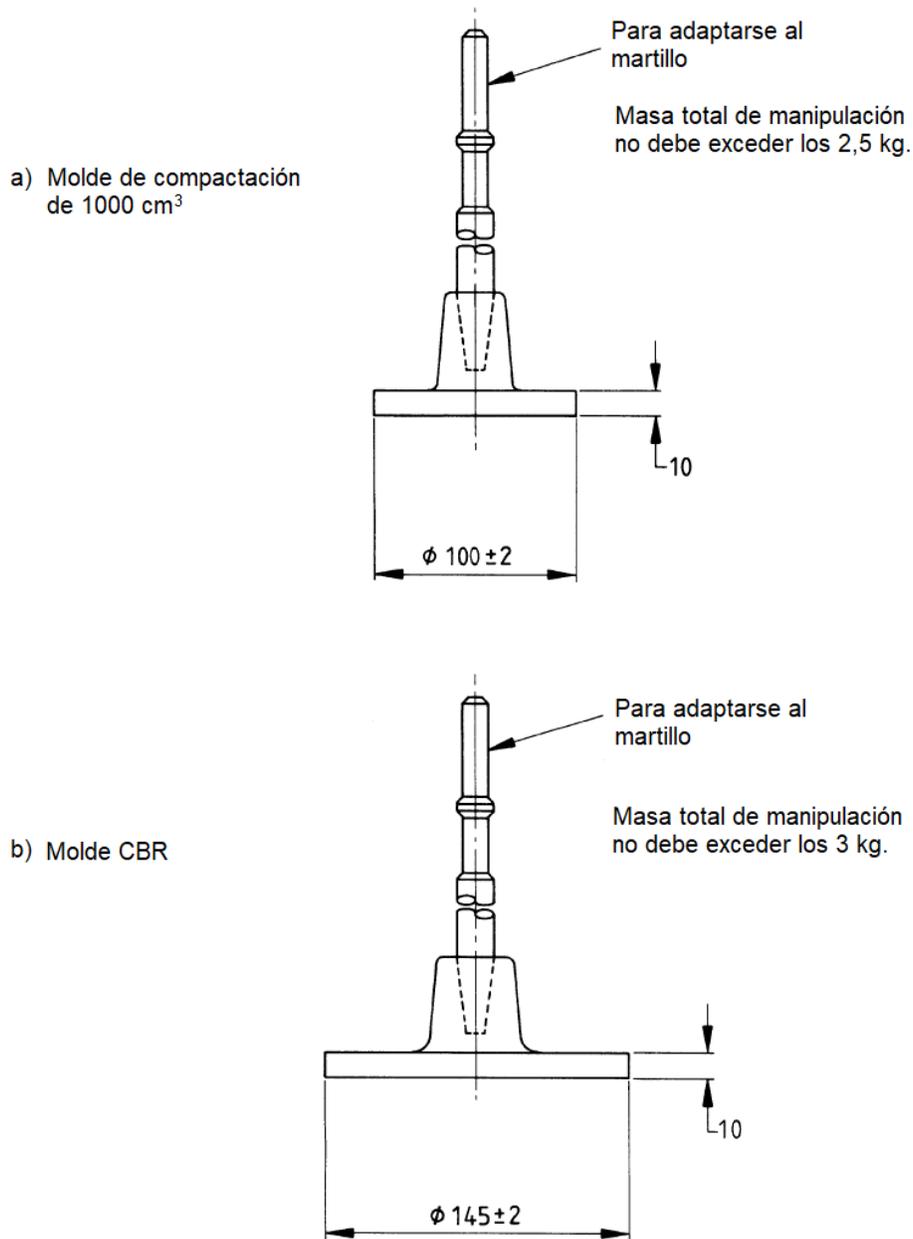


Figura 2.7: Diagrama de flujo que representa los métodos de preparación de muestras para la prueba CBR (BS 1377-4,1990).



Las dimensiones se muestran en milímetros

Figura 2.8: Montaje de compactación mediante martillo vibratorio (BS1377-4,1990).

En cuanto a la densidad mínima, se presentan dos procedimientos dependiendo de la gradación del material. El primero, corresponde para arenas que pasan por el tamiz de 2 mm, donde se deposita el material en un envase de 1000 cm³ para luego agitarlo con la intención de atrapar aire formando una estructura de grano que encierra el máximo volumen posible de espacios vacíos.

El segundo, es aplicado a gravas que pasan por el tamiz de 37,5 mm, donde el material se deja caer libremente en un molde de CBR, de 152 mm de diámetro, formando una estructura de grano que encierre el máximo volumen posible de huecos.

Por último, la BSI igualmente proporciona un método para la realización del ensayo de terreno, el cual se encuentra comprendido en la norma denominada BS 1377-9:1990. Ésta especifica que, debido al tamaño del pistón, la prueba es apropiado solo para materiales con un tamaño máximo de partículas igual o inferior a 20 mm.

El procedimiento descrito en la norma es similar al provisto por la ASTM, en la cual se utiliza una carga de reacción conectado a un gato, de modo que actúe como un peso muerto estable, junto a un pistón, dispositivos de medición de carga y penetración dispuestos según la Figura 2.9.

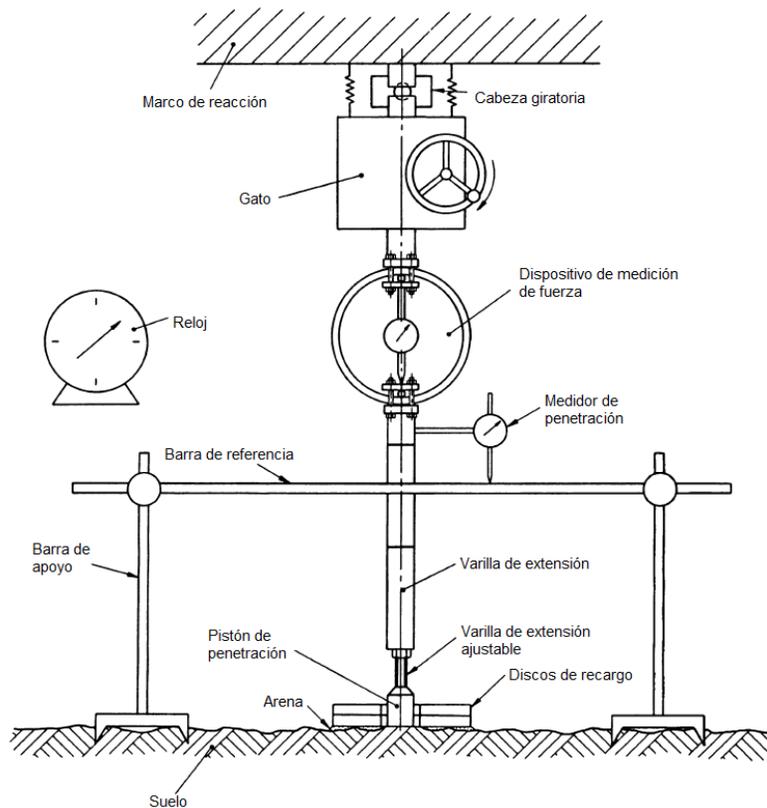


Figura 2.9: Montaje para el ensayo CBR in situ (BS1377-4,1990).

3. Metodología

En el presente capítulo se expone la problemática que se pretende abordar en la investigación, a partir de la normativa nacional e internacional que abarcan el ensayo CBR, junto con indicar la clase de materiales que se consideran, los ensayos que se realizan, las correlaciones que se buscan entre los distintos parámetros y proponer una metodología para dar respuesta a la problemática planteada.

3.1. Problemática

Los alcances y restricciones de los procedimientos provistos por las distintas organizaciones, nacional e internacionales, para la ejecución de los ensayos CBR, Proctor y Densidades Máxima y Mínima se muestran en la Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3, respectivamente.

Tabla 3.1: Alcance y restricciones de normas de ensayo CBR.

Norma	Alcance y restricciones
NCh1852.Of2010	Principalmente a materiales con un tamaño máximo de partículas menor a 3/4" (19 mm). Compactación de probetas por golpes mediante Proctor Normal o Proctor Modificado.
ASTM D1883-16	Principalmente a materiales con un tamaño máximo de partículas menor a 3/4" (19 mm). Compactación de probetas por golpes mediante Proctor Normal o Proctor Modificado.
BS 1377-4: 1990 -7	Materiales que presenten una fracción menor al 25%, en masa, de partículas retenidas en tamiz 3/4" (19 mm). Diferentes métodos de compactación mediante golpes y vibración.
ASTM D4429-09a	Materiales in-situ que presenten un grado de saturación mayor al 80% o materiales de grano grueso y no cohesivo.
BS 1377-9:1990 -4	Materiales que presenten un tamaño máximo de partículas menor o igual a 20 mm.

Tabla 3.2: Alcance y restricciones de normas de ensayo Proctor.

Norma	Alcance y restricciones
NCh1534Of.2008	Materiales que contengan al menos un 12%, en masa, de partículas menores al tamiz 200 (0,075 mm).
D698-12 D1557-12e ¹	Materiales de drenaje no libre.

Tabla 3.3: Alcance y restricciones de normas de ensayo Densidad Máxima y Mínima.

Norma	Alcance y restricciones
NCh1726.Of2009	Suelos no cohesivos, de libre drenaje, que presenten un tamaño máximo de partículas menor a 75 mm y que contengan hasta un 15%, en masa, de partículas menores al tamiz N°200 (0,075 mm)
ASTM D4254-16e1 / D4253-16	Materiales que contengan un máximo de 15%, en masa, de partículas menores al tamiz N°200 (0,075 mm)
BSI 1377-4:1990-4	Materiales que contienen hasta un 10 %, en masa, de partículas menores a 0.063 mm.

La principal forma para confeccionar las probetas que son utilizadas durante el ensayo CBR en laboratorio, corresponde a la compactación por golpes mediante los ensayos Proctor Normal o Proctor Modificado, a excepción de un método mediante el uso de un martillo vibrador suministrado por la BSI, el cual no admite partículas de gran tamaño.

Sin embargo, los ensayos Proctor tienen como campo de aplicación los suelos de drenaje no libre, por lo que deben presentar un contenido de fino mínimo, alrededor de 12 %, para obtener una curva definida de humedad densidad.

Por lo tanto, las normativas, nacional e internacional, no definen un procedimiento si se requiere obtener el valor de CBR a suelos que no cumplan con el mínimo de contenido de fino, debido a que no es posible realizar la confección de las probetas mediante la compactación por golpes.

Esta problemática se presenta en algunos materiales que se recomienda utilizar como base o sub-base y cumplen con los requerimientos granulométricos especificados por el Manual de Carreteras (MOP, 2018), expresados en la Tabla 3.4, pero a los cuales

no es posible determinar, según la normativa el valor de CBR necesario para evaluar su calidad. Como se observa en la Tabla 3.4, todas las bandas granulométricas permiten utilizar suelos en el rango donde el ensayo Proctor no es aplicable.

Actualmente, el Laboratorio Nacional de Vialidad define un método alternativo de compactación para este tipo de materiales durante el ensayo CBR, similar al ensayo Proctor, donde se compacta el material por capas y se apisona con un pistón de penetración largo de CBR, aplicando el número de golpes necesario para lograr la densidad requerida.

Tabla 3.4: Bandas granulométricas para sub-base, bases y capas de rodadura (MOP,2018).

Tamiz [mm]	TM-50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
50	100	100	100				
40	-	70-100	-	100	100	100	
25	55-100	55-85	70-100	70-100	80-100	80-100	100
20	-	45-75	60-90	50-80	-	-	70-100
10	30-75	35-65	40-75	25-50	50-80	50-80	50-80
5	20-65	25-55	30-60	10-30	35-65	35-65	35-65
2,5	-	-	-	5-15	-	-	-
2	10-50	15-45	15-45	-	25-50	25-50	25-50
0,5	5-30	5-25	10-30	0-5	10-30	15-30	10-30
0,08	0-20	0-10	0-15	0-3	5-15	5-20	0-15

Otro problema asociado a los suelos granulares, corresponde a que éstos presentan una gran fracción de partículas mayores al tamiz 3/4" (19 mm), por lo que al cortar el material en dicho tamiz se modifica considerablemente la estructura del material que será ensayado, llegando a duplicar el contenido de fino, C_F , en ciertos casos, implicando que el resultado del ensayo no sea representativo del material original.

Por estos motivos, mediante ensayos de laboratorio en la mesa vibradora usada para el ensayo de densidad máxima, se analizan la influencia de las variables de vibrado, tiempo y frecuencia, sobre la densidad de los materiales granulares con bajo C_F . Además, se estudian distintas correlaciones entre las densidades características de estos tipos de materiales con respecto a parámetros índices.

3.2. Materiales

Para el estudio se utiliza un total de 16 materiales proporcionados por las empresas colaboradoras y facilitadas por el laboratorio de AJGEOTECH, principalmente provenientes de la cuenca de Santiago entre los ríos Mapocho y Maipo.

Estos tienen como característica principal presentar un bajo contenido de fino, C_F , específicamente menor a un 12% en masa, pasante del tamiz N°200 (0,075 mm) para ejecutar ensayos de densidad máxima mediante el uso de mesa vibratoria.

Además, en su mayoría, presentan un gran porcentaje de partículas mayores al tamiz 3/4" (19 mm), para evaluar la representatividad de la muestra ensayada durante la prueba de CBR y proponer un método de escalamiento de granulometrías a utilizar.

3.3. Trabajo de laboratorio

A continuación, se describen los procedimientos utilizados para realizar los diferentes ensayos de laboratorio.

3.3.1. Cuarteo de muestras

El procedimiento utilizado para reducir la cantidad de material corresponde a un cuarteo manual mediante el uso de una pala descrito por MOP (2018).

En primer lugar, el material debe estar húmedo con el objetivo de evitar la pérdida de la fracción fina de este a través del polvo en suspensión. Es así que si el material se encuentra seco se debe humectar con agua limpia mediante un rociador para luego mezclarlo formando una pila en forma de cono. Esto se repite tres veces.

Después, se distribuye el material de manera uniforme en capas sobre una superficie lisa y plana, formando un montón plano y ancho el que es dividido en cuatro partes iguales. Posteriormente, se remueven dos cuartas partes opuestas como se muestra en la Figura 3.1.

Por último, se repite el procedimiento indicado con la porción restante del material, hasta obtener la cantidad requerida para el ensayo a realizar.

3.3.2. Granulometría

En este método se utiliza una serie de tamices tejidos, Figura 3.2, que cumplen con la norma NCh1022.Of76. Los tamaños nominales de las aberturas se presentan en la Tabla 3.5.

Para determinar la granulometría del material, éste debe ser acondicionado y reducido por cuarteo hasta obtener, cuando se encuentre seco, una cantidad no menor a la se establece en la Tabla 3.6. Luego, se seca la muestra obtenida hasta masa constante a una temperatura de 60 ± 5 °C.

INN (1979b) define masa constante como el límite de secado en que dos pesadas sucesivas, separadas por una hora de secado en horno, difieren en un porcentaje menor o igual a 0.1 % de la menor masa determinada.

Una vez alcanzada la masa constante, se pesa toda la muestra en una balanza, que debe tener una resolución de 0,1 g para muestras menores a 1000 g y de 1 g para muestras mayores a 1000 g. Este valor se registra como A.

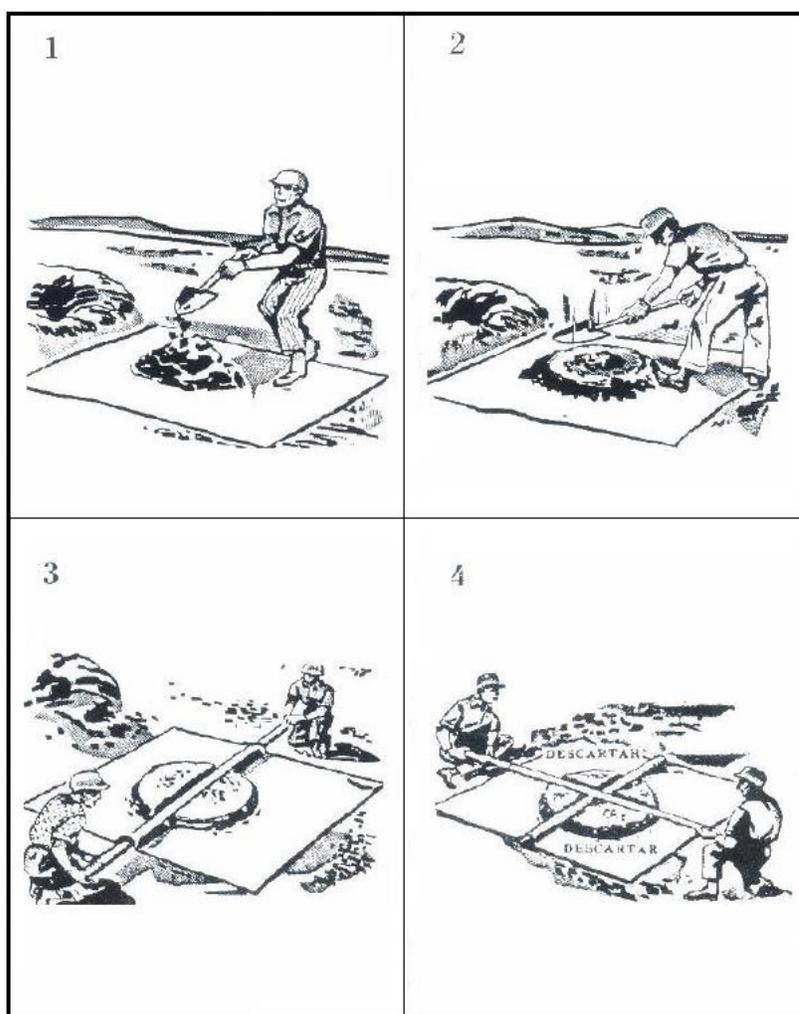


Figura 3.1: Cuarteo de muestras (MOP, 2018).

Luego, se hace pasar todo el material a través del tamiz 3" (76 mm), separando las partículas de sobre tamaño, determinando la masa de las fracciones sobre y bajo dicho tamaño y registrándolas como B y Z respectivamente. El material registrado como Z se corta en tamiz N°4 (5 mm) y se determina la masa de las fracciones pasantes y retenidas registrándolas como C y D respectivamente.

La fracción retenida en el tamiz N°4 (5 mm) se coloca en recipiente de lavado a la que se agrega agua potable, de manera de cubrir la muestra en su totalidad, para luego proceder a lavarla.

Esto se realiza agitando la muestra con el agua para separar el material fino del grueso, dejándolo en suspensión para luego vaciarlo a través del tamiz N°4 (5 mm). Se agrega nuevamente agua y se repite la operación hasta que el agua permanezca limpia y clara.

Tabla 3.5: Serie de tamices utilizados.

Abertura [mm]	ASTM
76	3"
62,5	2 1/2"
50	2"
37,5	1"
25	1 1/2"
19	3/4"
9,5	3/8"
5	N°4
2	N°10
0,9	N°20
0,5	N°40
0,25	N°60
0,1	N°140
0,075	N°200

Tabla 3.6: Cantidad mínima de muestra para granulometría según tamaño máximo absoluto del suelo (MOP, 2018).

Tamaño Máximo Absoluto [mm]	Cantidad mínima de muestra a extraer en terreno [kg]	Cantidad mínima de muestra para el ensayo [kg]
5	2	0,5
10	8	2
20	20	5
25	40	10
50	60	15
80	80	20
100	120	30
150	160	40

Una vez limpio el material grueso, se coloca en el horno de secado a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante registrándola como D'. Cabe señalar que se utiliza esta temperatura ya que el material a secar presenta solo partículas gruesas que pueden soportar altas temperaturas sin alterar su integridad físico química.

El material registrado como D' se tamiza a través de la serie de tamices 3" (76 mm), 2 ½" (62,5 mm), 2" (50 mm), 1 ½" (37,5 mm), 1" (25 mm), ¾" (19 mm), ⅜" (9,5 mm) y N°4 (5 mm).

El tamizado se realiza en dos etapas. La primera consiste en vaciar el material sobre el tamiz superior de la serie de tamices, dispuestos en orden decreciente, los que se cubren con la tapa en la parte superior y el fondo en la inferior para luego agitar el conjunto durante 5 min aproximadamente.

La segunda etapa comienza retirando la tapa y el primer tamiz para agitarlo individualmente sobre un recipiente, operación que dura 1 min. Después se pesa y registra el material retenido. El material pasante, contenido en el recipiente, es depositado sobre el siguiente tamiz. Este proceso se repite hasta completar todos los tamices de la serie. Por último, se pesa y registra la fracción de residuo contenido en el fondo.

Por otro lado, del material pasante del tamiz N°4 (5 mm) registrado como C se toma una muestra homogénea de al menos 500 g registrándola como C'. Posteriormente,

se lava cuidadosamente con agua potable sobre el tamiz 200 (0,075 mm) repitiendo el mismo procedimiento utilizado para el material grueso. El material retenido se vacía en un recipiente para luego secar hasta masa constante a una temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ registrándola como "C" utilizando una balanza con precisión de 0,1 g.

Luego, el material se tamiza en la serie de tamices N°10 (2 mm), N°20 (0,9 mm), N°40 (0,5 mm), N°60 (0,25 mm), N°140 (0,1 mm) y N°200 (0,075 mm) siguiendo el mismo procedimiento utilizado para el material sobre 5 mm registrando las masas retenidas en cada tamiz y el material residuo ubicado en el fondo. Adicionalmente, se debe verificar que la suma de todas las masas retenidas en los tamices no debe diferir más de 3 % para el material bajo 5 mm, ni más de 0,5 % para el material sobre 5 mm, en caso contrario se debe repetir en ensayo.



Figura 3.2: a) Tamiz de alambre tejido b) Esquema del tejido simple de los tamices (Endecotts, 2015).

Posteriormente, se construye la curva granulométrica a partir de los pesos retenidos en cada tamiz durante el ensayo. A partir de estos valores se calcula el porcentaje de sobretamaño, mayor a 3" (76 mm), los porcentajes retenidos en cada tamiz i sobre y bajo 5 mm mediante las Ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3), respectivamente.

$$ST = \frac{B}{A} \times 100 \quad (3.1)$$

$$R_i = \frac{M_i}{C + D} \times 100 \quad (3.2)$$

$$R_i = \frac{C \times M_i}{C' \times (C + D)} \times 100 \quad (3.3)$$

Después, se expresa la granulometría como porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz, indicando como primer resultado el del menor tamiz que pasa el 100 %. El porcentaje que pasa en cada tamiz i se obtiene utilizando la Ecuación (3.4)

$$\% \text{ que pasa } i = \% \text{ que pasa } i+1 - R_i \quad (3.4)$$

3.3.3. Límite Líquido

En primer lugar, se extrae por cuarteo una muestra representativa no menor a 160 g de material que pasa a través del tamiz N°40 (0,5 mm). Esta se acondiciona en un plato de evaporación, de porcelana, agregando agua destilada y mezclando con una espátula de hoja flexible hasta alcanzar una mezcla homogénea.

La mezcla se deja curando durante el tiempo necesario para que la fase líquida y sólida se mezclen homogéneamente. En suelos con alta plasticidad este tiempo debe ser mayor a 24 h, suelos con plasticidad media mayor a 12 h y de baja plasticidad mayor a 1 h.

Una vez acondicionada la muestra, se coloca una porción de ésta en la taza de la máquina Casagrande y con la ayuda de la espátula se moldea la masa de suelo hasta obtener la forma indicada en la Figura 3.4.

Luego, se divide la masa de suelo pasando el acanalador ASTM de manera perpendicular a través del eje de simetría de la taza, formando una ranura bien definida y con las medidas especificadas en la .Figura 3.3. Si ocurre desprendimiento de la masa del fondo de la taza se retira el material y se reinicia el procedimiento.

Posteriormente, se gira la manilla para levantar y dejar caer la taza a una frecuencia de dos golpes por segundo hasta que las paredes de la ranura estén en contacto en el fondo de la taza en un tramo continuo de 10 mm. Se registra el número de golpes.

Después, se retira 10 g aproximadamente desde el centro de la cuchara, en donde se juntan las paredes del surco, depositándolo en una cápsula de secado, de aluminio, determinando su masa y posteriormente secarlo en el horno a una temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante.

El material restante en la cuchara se transfiere al plato de evaporación para lavar y secar la taza, además del acanalador.

Por último, se bate con la espátula la pasta de suelo en el plato para obtener un secado homogéneo y repetir el procedimiento para alcanzar un nuevo punto para el trazado de la curva de fluidez, la cual requiere un mínimo de 5 puntos en el rango de 10 a 45 golpes.

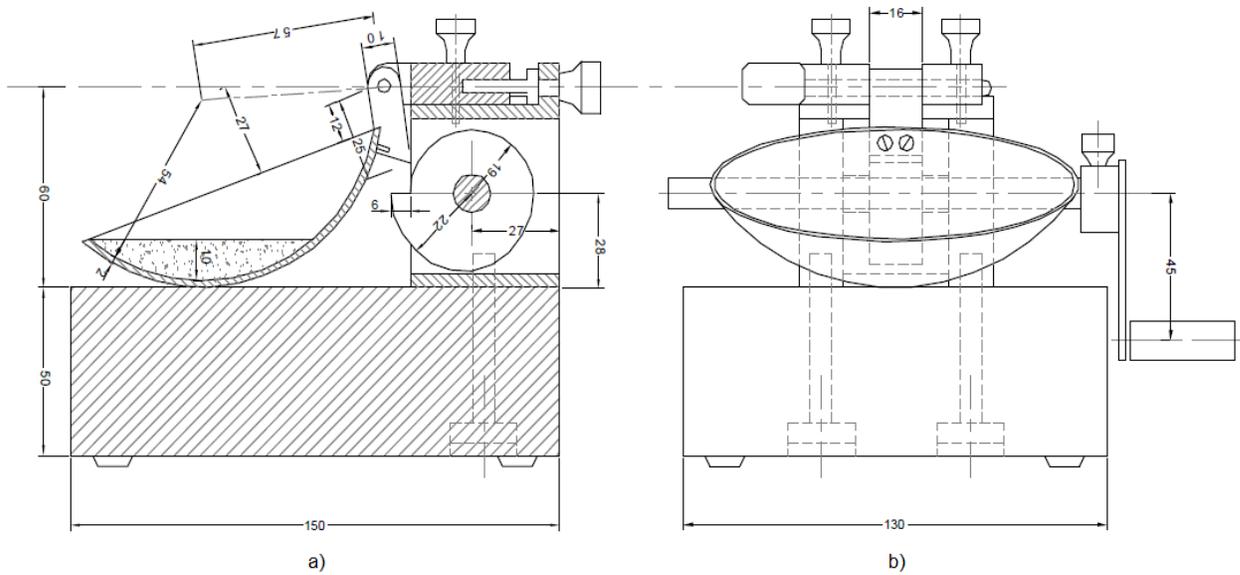


Figura 3.4: a) Vista lateral máquina Casagrande b) Vista frontal máquina Casagrande (Manual de Carreteras, MOP, 2018).

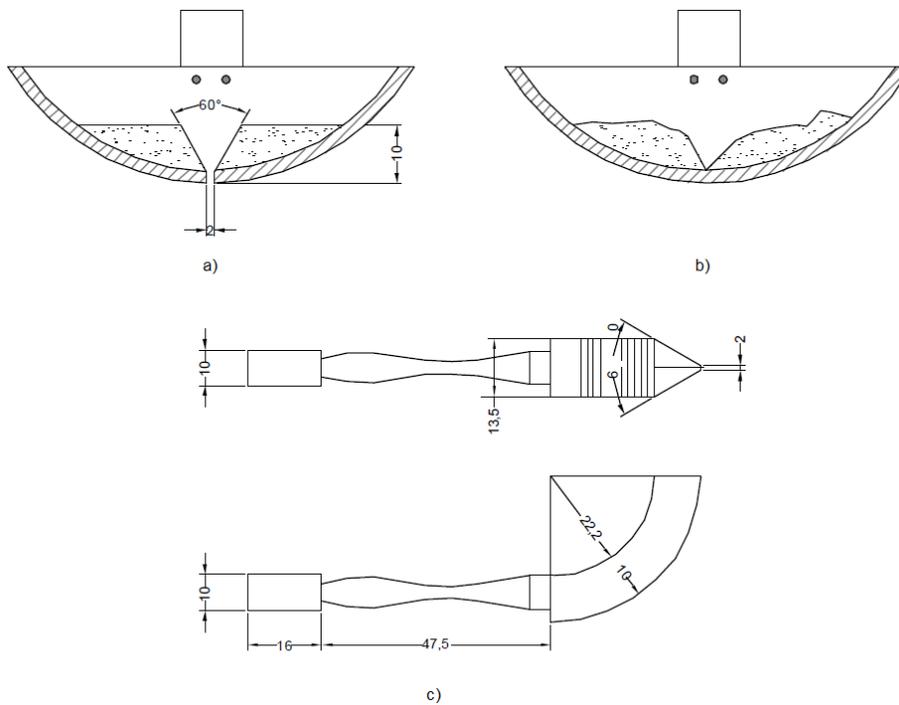


Figura 3.3: a) Ranura Abierta b) Ranura cerrada c) Acanalador ASTM (MOP, 2018).

3.3.4. Límite Plástico

De igual manera que para el límite líquido, se extrae por cuarteo una muestra representativa no menor a 40 g de material que pasa a través del tamiz N°40 (0,5 mm), la cual se deja curando el tiempo necesario según su nivel de plasticidad indicado anteriormente.

Luego, se toma una porción del material acondicionado de aproximadamente 1 cm³ y se procede a amasarla entre las manos y sobre la superficie de amasado, la cual corresponde a una placa de vidrio esmerilado, ejerciendo una leve presión con la palma de la mano hasta conformar un cilindro.

Cuando el cilindro alcanza un diámetro de aproximadamente 3 mm, se dobla y amasa nuevamente para volver a conformar el cilindro. Esto se repite hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de 3 mm aproximadamente, en trozos de entre 0,5 y 1 cm de largo, y no pueda ser reamasado ni reconstituido.

Las fracciones del cilindro disgregado se colocan en una cápsula de secado, alcanzando una porción no menor a 10 g de material, para posteriormente determinar su masa y secarlo en el horno a una temperatura de $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante.

Cabe señalar, que cuando no se pueda determinar uno de los dos límites, líquido o plástico, o la diferencia resulte negativa, se indica el Índice de Plasticidad, IP, como no plástico, NP.

3.3.5. Peso específico de las partículas menores a tamiz N°4 (5 mm)

En primer lugar, se extrae por cuarteo una muestra representativa no menor a 60 g de material que pasa a través del tamiz N°40 (0,5 mm). Se vierte dentro del matraz aforado una cantidad no menor a 30 g con ayuda de un embudo plástico, de manera de no perder material.

Después, se agrega agua destilada hasta alcanzar 3/4 de la capacidad del matraz aforado, aproximadamente. A continuación, la muestra se deja sumergida por, a lo menos, 12 h.

Una vez acondicionada la muestra, se procede a remover el aire atrapado entre las partículas de suelo colocando en el matraz en un baño maría de glicerina durante 10 min desde que el agua comienza a hervir. Luego, se tapa el matraz con la muestra y se deja enfriar a temperatura ambiente.

Posteriormente, se agrega agua destilada hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de calibración del matraz. Por último, se registra la masa del matraz con la muestra y el agua, M_m , en una balanza con precisión de 0,01 g, además de medir la temperatura del contenido.



Figura 3.5: Matraz aforado 100 ml con tapón de plástico (IndusLab, 2020).

3.3.6. Peso específico de las partículas mayores a tamiz N°4

Inicialmente, se extrae por cuarteo una cantidad mínima de material dependiendo del tamaño máximo nominal como se establece en la Tabla 3.7. La muestra puede provenir del ensayo de granulometría, debidamente homogenizado.

Luego, se eliminan las partículas inferiores al tamiz N°4 (5 mm), se lava el material restante removiendo el polvo superficial adherida en las partículas y se deja secar al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante. Posteriormente, se deja enfriar la muestra al aire a temperatura ambiente durante 24 ± 4 h y se sumerge en agua a temperatura ambiente por el mismo periodo de tiempo.

Terminado el periodo de saturación, la muestra se coloca en un canastillo portamuestra, de alambre de acero inoxidable con malla igual o inferior a 2 mm y de una capacidad igual o mayor a 4000 cm^3 , el cual es sumergido en agua a una temperatura de 20 ± 3 °C, por un periodo de al menos 3 min. Después, el canastillo portamuestra se suspende sobre el platillo de la balanza, de modo que la muestra quede sumergida en su

totalidad, como se muestra en la Figura 3.6 Así se determina la masa sumergida y se registra como M_{sum} .

Tabla 3.7: Cantidad mínima de muestra según tamaño máximo nominal del material.

Tamaño máximo nominal [mm]	Cantidad mínima de muestra [gr]
12,5	2.000
20	3.000
25	4.000
40	5.000
50	8.000

Finalmente, se retira la muestra del canastillo portamuestra y se seca en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante. Una vez fría, se determina la masa de la muestra seca y se registra como M_s .

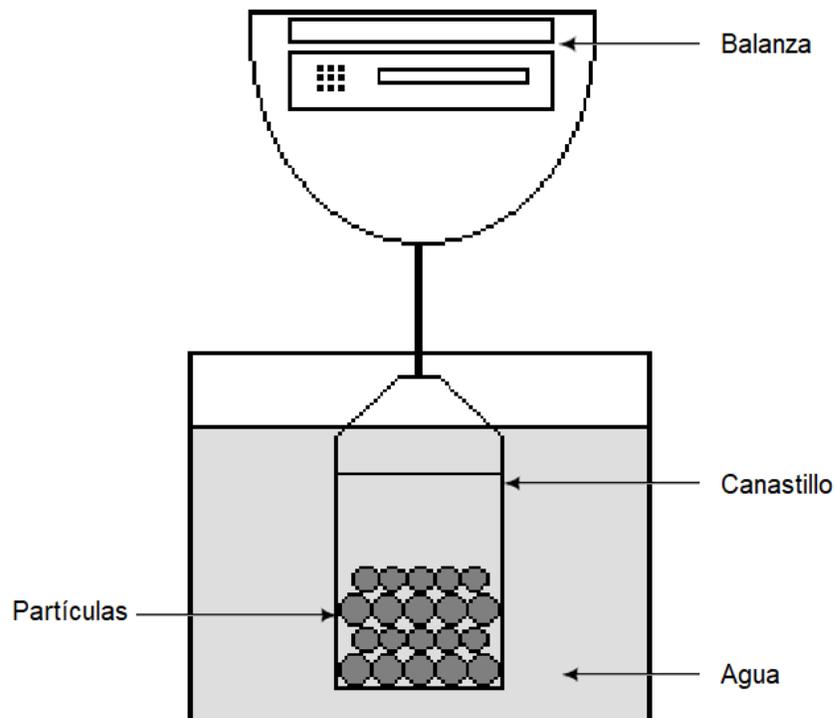


Figura 3.6: Montaje ensayo peso específico partículas mayores a Tamiz N° 4.

El peso específico de las partículas sólidas mayores a tamiz N°5 (5 mm) se determina a partir de las masas obtenidas durante el ensayo y mediante la Ecuación (3.5).

$$G_{SC} = \frac{M_s}{M_s - M_{sum}} \quad (3.5)$$

3.3.7. Densidad Mínima, Máxima e Intermedia

Para determinar la densidad mínima, índice de vacío máximo, e_{max} , se hace uso del método A según la norma ASTM D4253-16e¹. Este corresponde a verter el material mediante un embudo o cuchara manual dentro de un molde estandarizado. Estos moldes son de metal y de forma cilíndrica con una capacidad nominal de 2830 y 14000 cm³, cuyas dimensiones se especifican en la Figura 3.7.

El volumen y área transversal de cada molde se calibra de manera periódica. Esta calibración se puede realizar mediante dos métodos, medición directa o por llenado con agua. El volumen obtenido debe estar dentro del $\pm 1,5$ % del valor nominal.

El laboratorio ha realizado previamente la calibración mediante ambos métodos, asignando al molde el volumen obtenido por el primer método. Este se realiza a través del promedio de al menos tres mediciones de diámetro y altura con el uso de un pie de metro con precisión de 0.05 mm. Además, se han registrado las masas de los moldes utilizando una balanza con precisión de 1 g. Los resultados se expresan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Valores obtenidos de la calibración de los moldes (ASTM, 2016b).

Tamaño molde nominal [cm ³]	Masa [gr]	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Volumen [cm ³]	Variación con respecto al volumen nominal [%]
14200	28396	231,4	279,2	14167,20	0,23
2830	9250	155,75	152,35	2839,24	0,32

A partir de la granulometría realizada anteriormente, es posible conocer el tamaño máximo de la muestra y así determinar la masa requerida, tamaño del molde y dispositivo de vertido según lo señalado en la Tabla 3.9.

Luego, el material se reduce por cuarteo hasta obtener la masa requerida. Posteriormente, se seca la muestra obtenida hasta masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Antes de comenzar a verter el material, el molde se coloca sobre una superficie firme, plana y horizontal. Luego, el proceso de llenado depende del tamaño máximo nominal.

Tabla 3.9: Masa muestra requerida, tamaño molde y aparato de llenado (ASTM, 2016b).

Tamaño máximo nominal de partículas [mm]	Masa de material requerida [kg]	Tamaño nominal de molde [cm ³]	Aparato de llenado
75	45	14200	Poruña
38	45	14200	Poruña
19	11	2830	Embudo

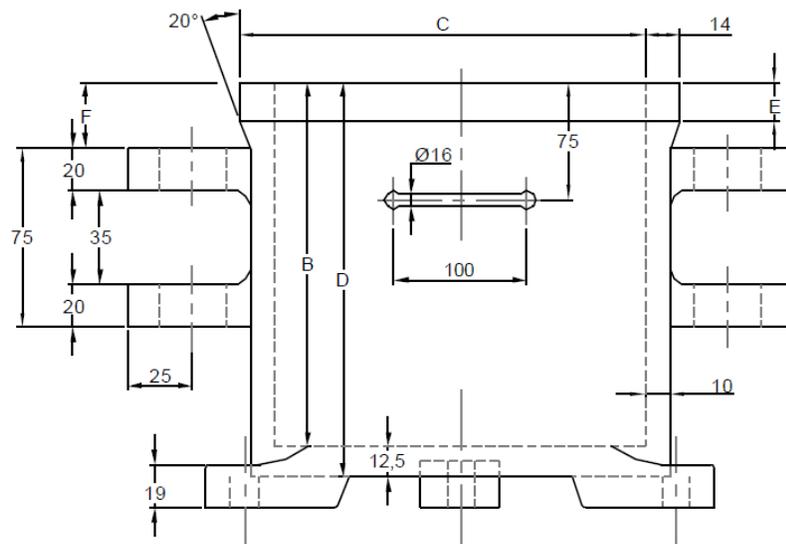
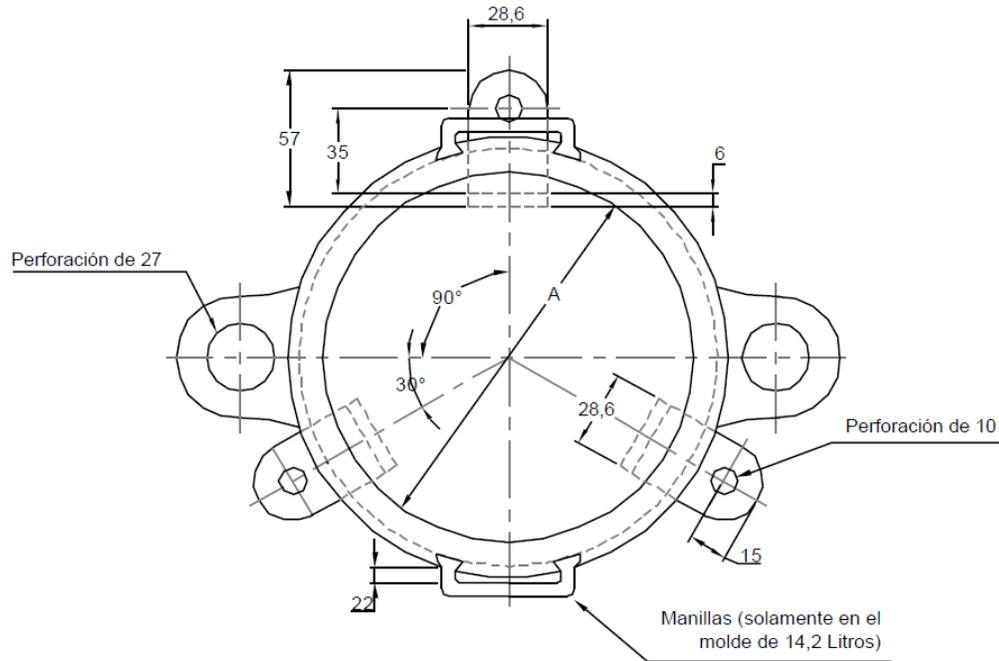
Si la muestra sólo presenta partículas menores a 10 mm, el material se deposita tan suelto como sea posible, vaciándolo en un flujo constante sosteniendo el dispositivo de vertido de manera vertical o casi vertical y realizando un movimiento de espiral desde la pared del molde hacia el centro, con el objetivo de formar una capa de espesor uniforme sin segregación de partículas. Asimismo, se ajusta la altura de la descarga manteniendo una caída libre del suelo de aproximadamente 1/2" (13 mm) o lo suficientemente alto para mantener un flujo continuo sin que la boquilla del embudo entre en contacto con el suelo ya depositado. Siguiendo este proceso, el molde se llena hasta aproximadamente 1" (25 mm) por sobre el borde de este.

Terminado el proceso de llenado, se enrasa el material excedente mediante una pasada continua con una regla de metal, procurando no sacudir o alterar excesivamente el suelo causando un reordenamiento de las partículas y por consiguiente una compactación del suelo. De ser necesario, se realiza una segunda pasada adicional.

Por otra parte, si la muestra presenta partículas de tamaño mayor a 10 mm, el material se coloca sosteniendo la poruña justo sobre el fondo del molde o la superficie del material previamente depositado, de manera que deslice en lugar de caer, sujetando con la mano las partículas de mayor tamaño de ser necesario.

De igual manera al caso anterior, el molde se llena hasta aproximadamente 1" (25 mm) por sobre el borde de este. Posteriormente, se enrasa la fracción sobrante de material efectuando una pasada con la regla de metal, ayudándose con los dedos, de modo que cualquier leve proyección de las partículas más grandes sobre el borde del molde compense aproximadamente los espacios vacíos en la superficie.

Dimensiones en mm.



Tamaño nominal del molde L	Dimensiones (mm)					
	A	B	C	D	E	F
2,8	152,4	155,2	180,4	165,1	12,7	28,6
14,2	279,4	230,9	307,4	241,3	15,9	50,8

Figura 3.7: Dimensiones de moldes ensayo densidad máxima (ASTM, 2016b).

Por último, se pesa el molde con el suelo utilizando balanzas de capacidades mínimas de 60 kg y 30 kg con precisiones de 20 g y 1 g para los moldes de 14200 cm³ y 2830 g, respectivamente. De manera de determinar la masa seca que llena el molde. Este procedimiento se repite hasta obtener al menos dos resultados consistentes, preferiblemente en un rango de diferencia del 1%.

Con respecto a las densidades máxima, índice de vacío mínimo, e_{min} , e intermedias, estas se determinan mediante el método 1A según la norma ASTM D4253-16e¹, es decir, utilizando el suelo secado previamente en el horno y una mesa vibradora verticalmente accionada por un vibrador electromecánico.

La mesa es de acero de aproximadamente 750 mm x 750 mm, se apoya sobre amortiguadores y se monta sobre un piso de hormigón. El vibrador electromecánico es de una masa neta igual o mayor a 45 kg.

La mesa debe ser capaz de vibrar verticalmente, con el conjunto de aparatos ensamblado como se muestra en la Figura 3.8, de forma sinusoidal con una doble amplitud (de pick a pick) entre 0,05 y 0,33 mm a una frecuencia de 60 Hz. Además, se puede ajustar la frecuencia de vibración entre 0 y 60 Hz desde la caja de control, Figura 3.9.

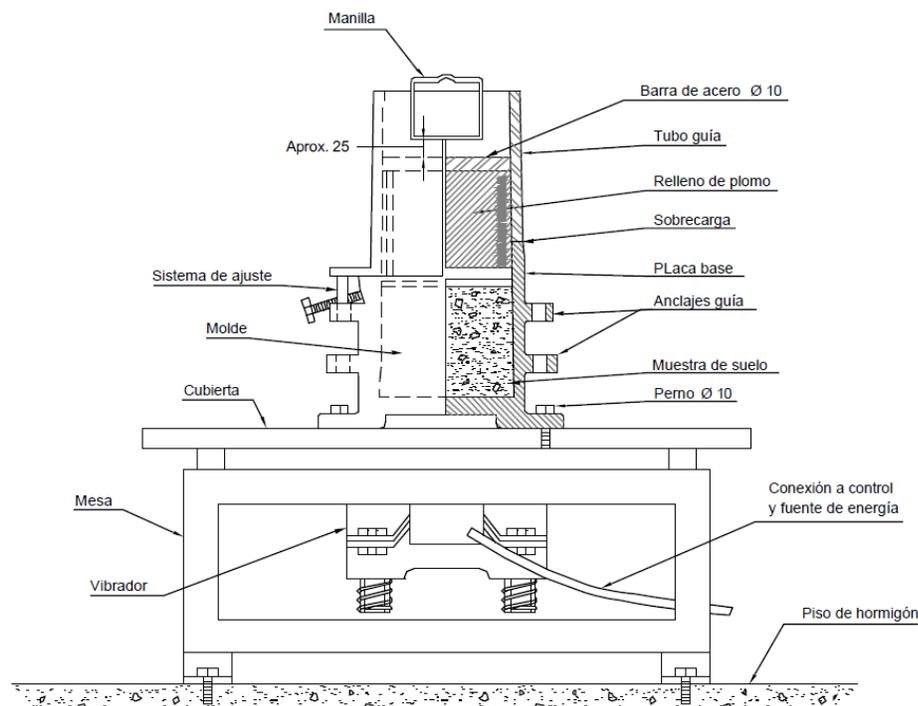


Figura 3.8: Montaje de aparatos para densidades máxima e intermedias (Manual de Carreteras, MOP,2018).

Los moldes, Tabla 3.8, la cantidad de material, Tabla 3.9, acondicionamiento de la muestra y el proceso de llenado son los mismos utilizados anteriormente para determinar la densidad mínima.

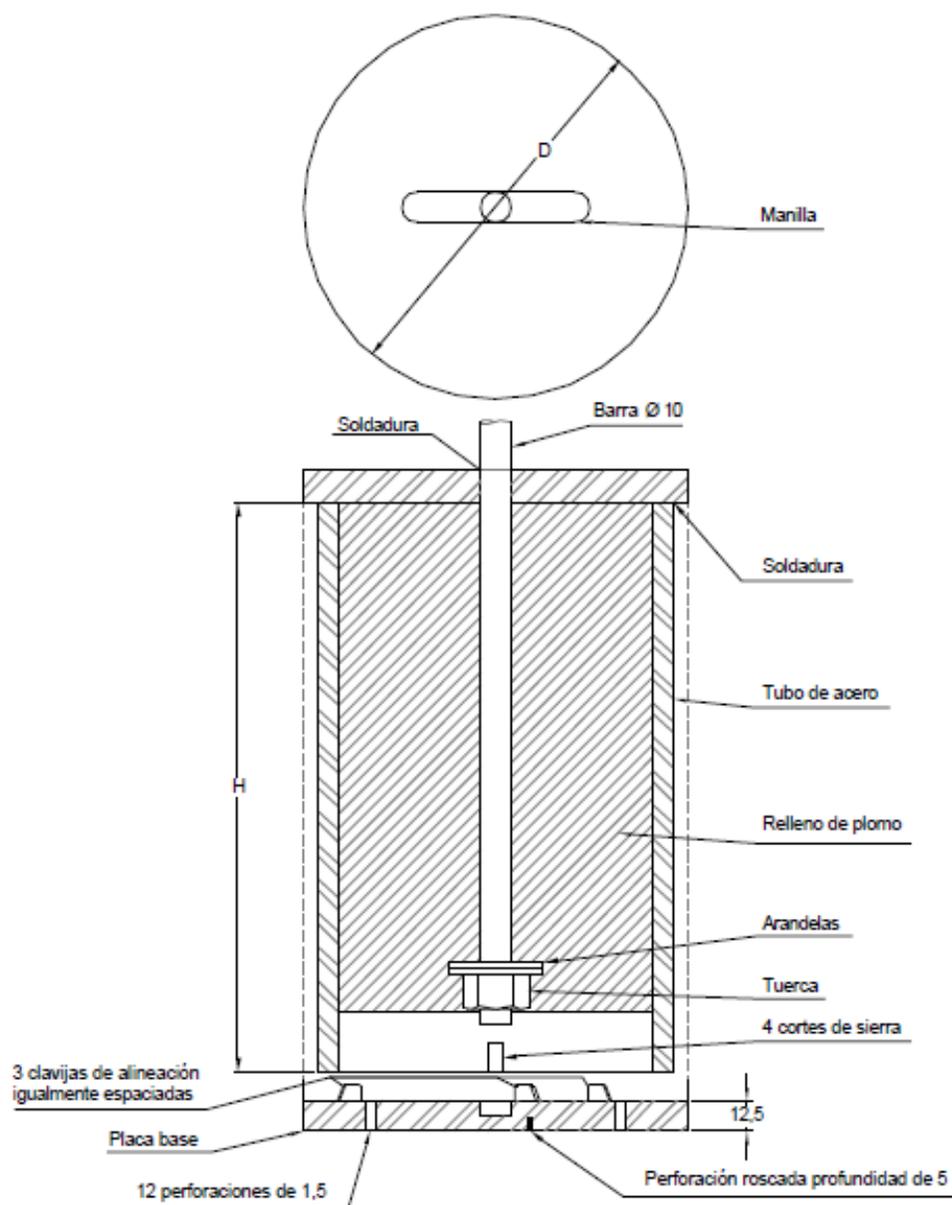
Una vez llenado el molde con el material se determina la masa del conjunto. Luego, se coloca la placa base, de acero de 12,5 mm de espesor y diámetro según la Figura 3.10, sobre la superficie del suelo girándolo ligeramente varias veces para que exista un contacto uniforme entre la placa y el material.



Figura 3.9: Caja control de mesa vibratoria, equipo AJGEOTECH.

Después, se fija el molde sobre la mesa mediante tres pernos de anclajes en las perforaciones de 10 mm, Figura 3.7, y se coloca la sobrecarga según Figura 3.10 sobre la placa base, empleando un aparejo de izar en el caso del molde de 14200 cm³.

Posteriormente, se coloca el tubo guía, de acero de dimensiones según Figura 3.10, sobre el borde del molde, de modo que las paredes internas de estos queden alineadas y se fijan los elementos a través de dos pernos y tuercas.



Tamaño nominal del molde, L	D mm	H mm	Tubo mm	Masa Total kg
2,8	150,8	152,4	101,6	25,9 ± 0,2
14,2	276,2	228,6	254,0	86,2 ± 0,4

Figura 3.10: Dimensiones placa base y sobrecarga (ASTM, 2016b).

Para determinar la densidad máxima, se vibra el conjunto del molde y muestra durante $8 \pm 0,25$ min a una frecuencia de 60 ± 2 Hz. En el caso de las densidades intermedias, preliminarmente, la probeta se vibra a distintas combinaciones de tiempo y frecuencia como se presenta en la Figura 3.11, obteniendo un total de 30 densidades, sin considerar la mínima.

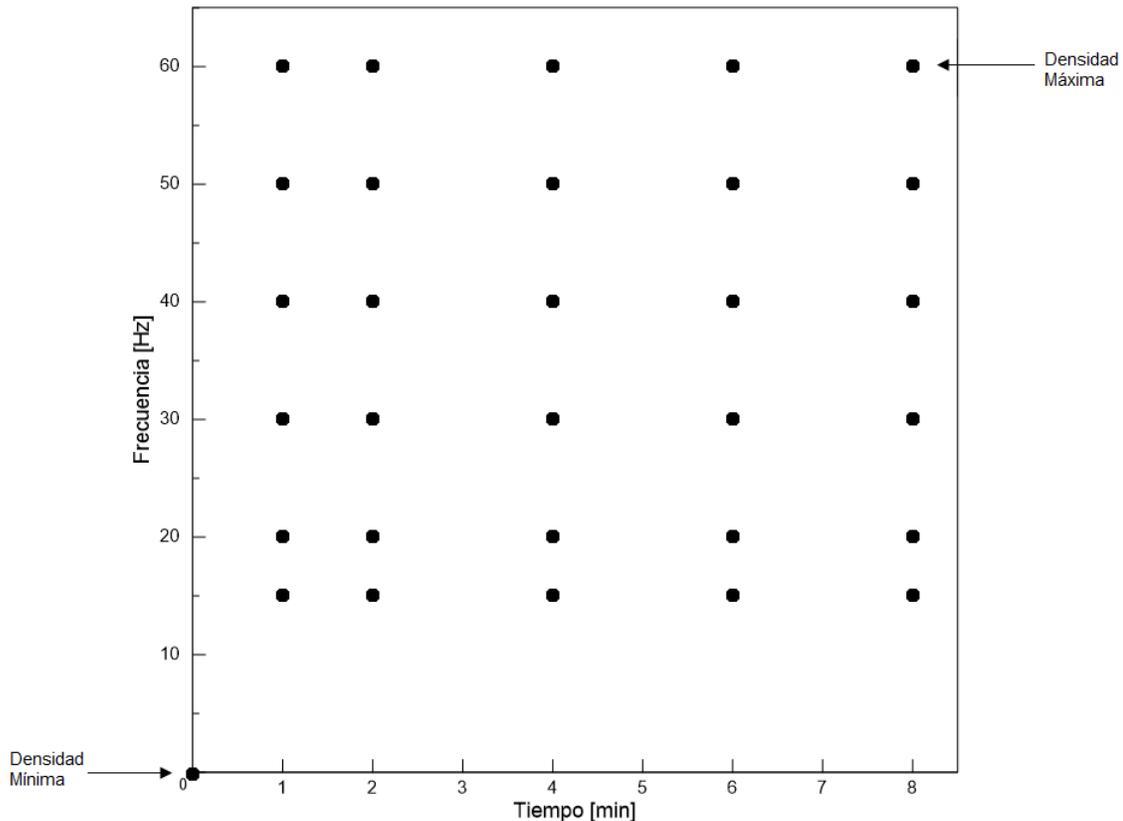


Figura 3.11: Combinaciones preliminares de frecuencia tiempo.

En seguida, se retira el tubo guía y la sobrecarga, además se limpia la parte superior de la placa base para retirar cualquier elemento que podría haberse acumulado. Para determinar el descenso del material, se coloca el deformímetro en los soportes a cada lado de la placa, se determinan y registran 6 lecturas en cada lado.

Por último, se retira la placa base y se retira el molde de la mesa vibratoria. Este procedimiento se repite hasta obtener al menos dos resultados consistentes, preferiblemente en un rango de diferencia del 2 %.

3.4. Selección de las frecuencias de vibrado

A las muestras se les realiza un análisis integral para establecer distintos criterios de aplicación de los ensayos de densidades intermedias, variando la frecuencia y tiempo de vibrado, con el objetivo de reconstituir probetas para realizar ensayos de CBR.

Es así que, preliminarmente, se realizan los ensayos para determinar las densidades que alcanza una muestra en particular, M-1, vibrándola a las combinaciones de tiempo y frecuencia presentados en la Figura 3.11. Los resultados se analizan para determinar cuáles son los pares frecuencia tiempo más significativos, con los cuales se puedan caracterizar las curvas de densidades que cubran mayoritariamente el espectro de la densidad relativa desde el 0 al 100 %.

3.5. Parámetros índices y de estado a evaluar en los materiales

Una vez realizados los ensayos, obtenidos y registrados los resultados de éstos, se procede a trabajar los datos conseguidos para determinar distintos parámetros que puedan caracterizar cada material.

3.5.1. Diámetros característicos, coeficientes de curvatura y uniformidad

Según lo indicado en el acápite 3.3.2, la curva granulométrica se expresa de forma gráfica en un sistema de coordenadas ortogonales donde, en el eje de las abscisas, se indican las aberturas de los tamices en escala logarítmica y, en el eje de las ordenadas, los porcentajes que pasan en cada tamiz i en escala lineal.

Luego, se determinan ciertos diámetros característicos que están asociados a un porcentaje que pasa. En este caso se utilizan d_{10} , d_{30} y d_{60} , que corresponden a los diámetros por los que pasa un 10, 30 y 60 % de la muestra, respectivamente. Estos diámetros y uno x se calculan mediante la Ecuación (3.6).

$$d_x = 10 \left[\log d_{i+1} - (P_{i+1} - P_x) \times \frac{\log \frac{d_{i+1}}{d_i}}{P_{i+1} - P_i} \right] \quad (3.6)$$

También, pueden ser determinados a partir de la curva granulométrica, como se muestra en la Figura 3.12.

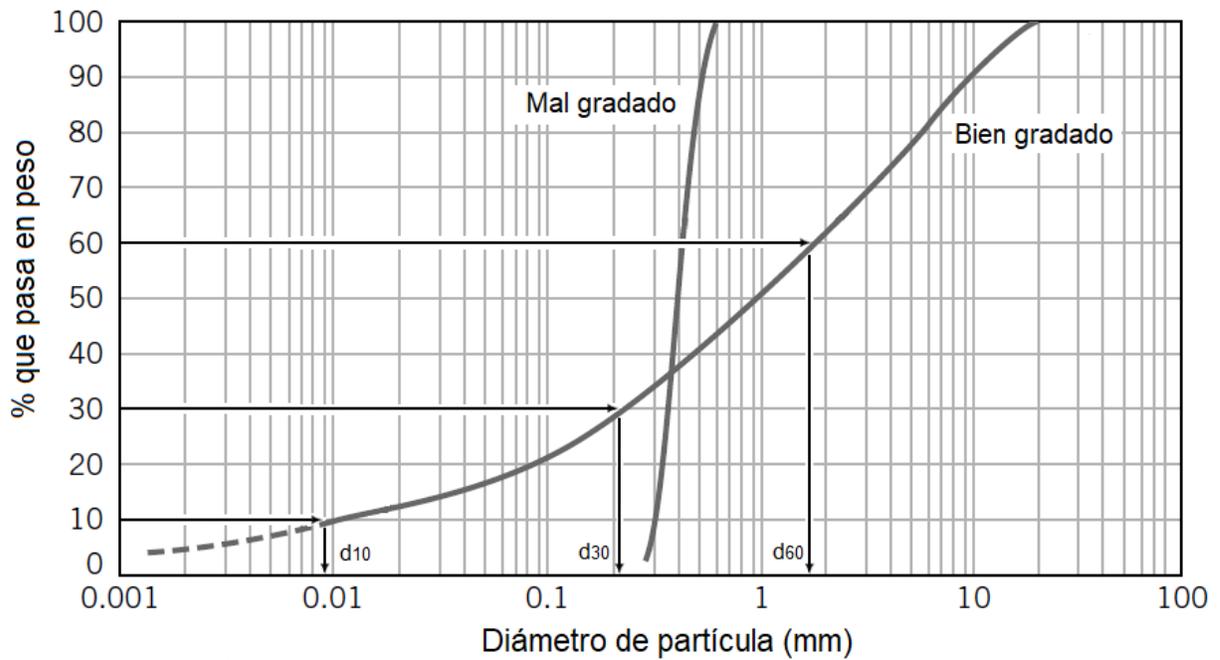


Figura 3.12: Curvas granulométricas y diámetros característicos (Budhu, 2011).

A partir de los diámetros característicos, se pueden obtener los coeficientes de curvatura, C_c , y uniformidad, C_u . El primero tiene relación con la forma de la curva granulométrica, es decir, que nivel de concavidad presenta. Valores de C_c pequeños indican una curva convexa, cercanos a 1 una curva casi lineal y mayores a 1 una curva cóncava.

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (3.7)$$

Por otro lado, el coeficiente de uniformidad, C_u , indica el nivel de uniformidad del tamaño de las partículas del material. A medida que C_u decrece y tiende a 1, es decir los valores de d_{60} y d_{10} se acercan entre sí, la uniformidad aumenta. Caso contrario para cuando C_u aumenta.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.8)$$

3.5.2. Plasticidad

La plasticidad de un material es la capacidad de ser moldeado resistiendo deformaciones sin agrietarse ni desagregarse debido a la capacidad de las partículas de interactuar con el agua. La magnitud de la plasticidad del material depende del tamaño de sus partículas, la composición mineralógica y el contenido de humedad. Es debido a la variación de este último que el suelo puede pasar de un estado sólido, en condición seca, a líquido cuando presenta grandes contenidos de humedad.

Por ejemplo, si una arcilla presenta una cantidad excesiva de agua, esta podrá fluir como un líquido viscoso. A medida que la humedad disminuye el material presentará un comportamiento plástico, en el que se podrá moldear, hasta llegar nuevamente a un estado sólido con una condición rígida.

Es así que se ha denominado el Límite Líquido, LL, como el porcentaje de humedad con el que el suelo cambia de un estado plástico a líquido y el Límite Plástico, LP, como el porcentaje de humedad con el que el material pasa de un estado plástico a semi-sólido, Figura 3.13.

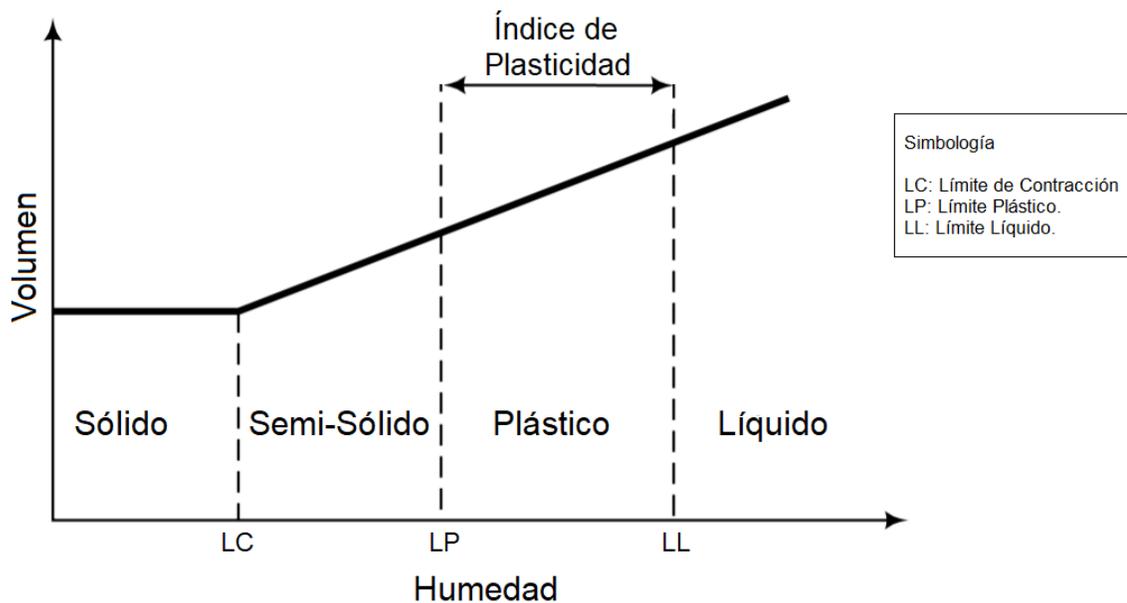


Figura 3.13: Estados del suelo en función del volumen del suelo y el contenido de humedad (Budhu, 2011).

Luego, el Límite Líquido se determina según el procedimiento estandarizado desarrollado por Arthur Casagrande en 1932, definido como la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en una cuchara Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluyan y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

Para esto, en primer lugar, se calcula el contenido de humedad de las muestras obtenidas durante el ensayo mediante la Ecuación (3.9).

$$w = \left(\frac{m_h - m_s}{m_s - m_r} \right) \times 100 \quad (3.9)$$

Los resultados se presentan en un gráfico de coordenadas ortogonales, disponiendo en el eje de las abscisas el número de golpes en escala logarítmica y en el eje de las ordenadas el contenido de humedad en escala lineal. Posteriormente, mediante el uso de una regresión lineal se obtiene la humedad correspondiente a los 25 golpes, como se muestra en la Figura 3.14.

Por otro lado, el Límite Plástico, LP, corresponde a la humedad promedio de las 3 muestras obtenidas durante el ensayo, las cuales no deben diferir en más de un 2 % entre sí.

Determinados ambos límites, se calcula el índice de plasticidad de acuerdo a la Ecuación (3.10).

$$IP = LL - LP \quad (3.10)$$

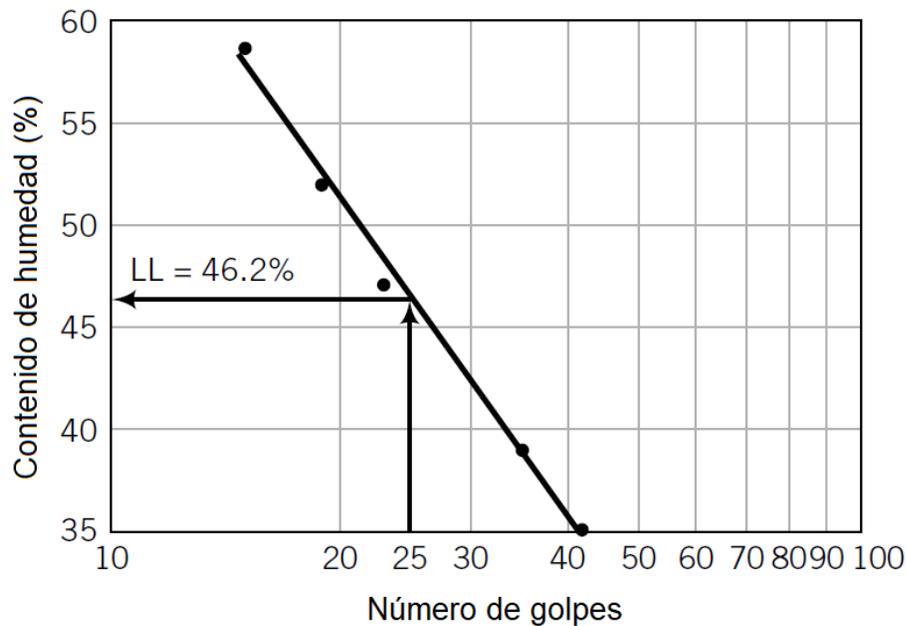


Figura 3.14: Resultado Límite Líquido mediante método de Casagrande (Budhu, 2011).

Posteriormente, a partir del Límite Líquido, LL, e Índice de Plasticidad, IP, se determina la composición de las partículas finas del material, que pasan el tamiz N°200 (0.075 mm), a través de la carta de plasticidad que se presenta en la Figura 3.15.

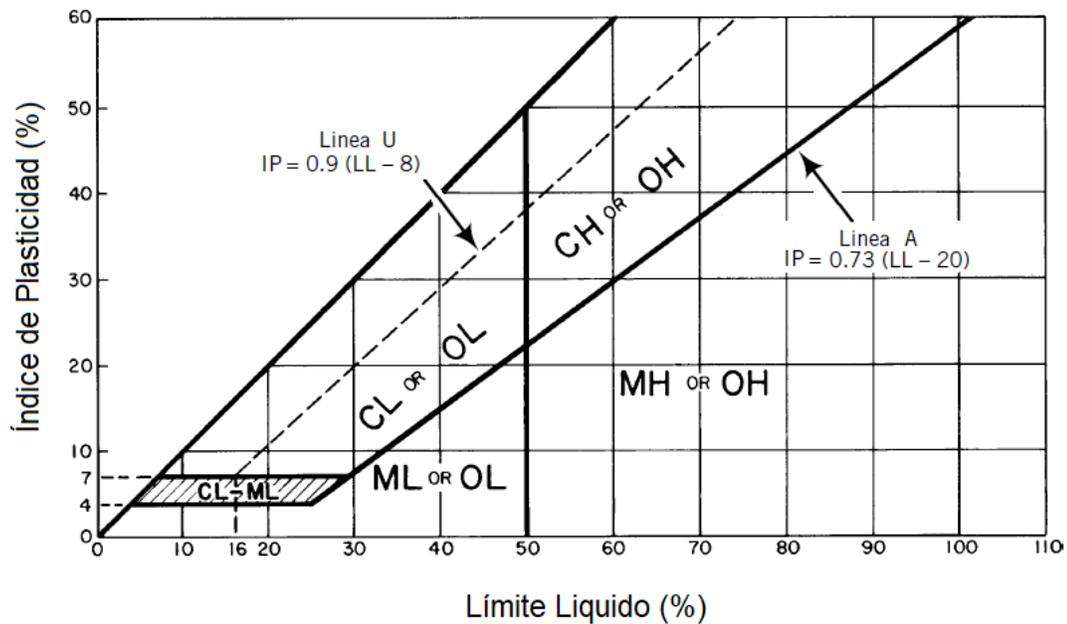


Figura 3.15: Carta plasticidad (ASTM-D-2487,2000).

3.5.3. Clasificación USCS

La clasificación de los materiales ensayados utilizada corresponde al Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (USCS) dispuesto en la norma ASTM D2487-00.

Esta se realiza a partir de los porcentajes en masa de las partículas de grava, arena y finos obtenidos en la granulometría, junto con los coeficientes de curvatura y uniformidad, Límite Líquido e Índice de Plasticidad.

Con estos datos se ingresa a los diagramas de flujo que se muestran en Apéndice A, con los cuales se obtiene la clasificación del material con su correspondiente simbología.

Cabe señalar que, en los diagramas de flujo, los términos gravel, sand, silt y clay corresponden a grava, arena, limo y arcillas, respectivamente. Además, lean clay y fat clay indican arcillas de baja y alta plasticidad, respectivamente.

3.6. Correlaciones entre parámetros y densidades

La distribución granulométrica es uno de los factores más influyentes en las densidades que puede alcanzar un material, además de la forma de las partículas. Este efecto ha sido estudiado por varios autores, donde se ha establecido una relación

estrecha entre el coeficiente de uniformidad, C_U , y las densidades máxima y mínima de los materiales granulares.

Youd (1973) determinó los índices de vacíos mínimo y máximo, e_{\min} y e_{\max} , para mezclas de arenas modificadas en su granulometría con diferentes C_U y redondez de las partículas, R , como se muestra en la Figura 3.16, donde se aprecia una relación inversa, a mayor C_U menores valores para los índices de vacíos.

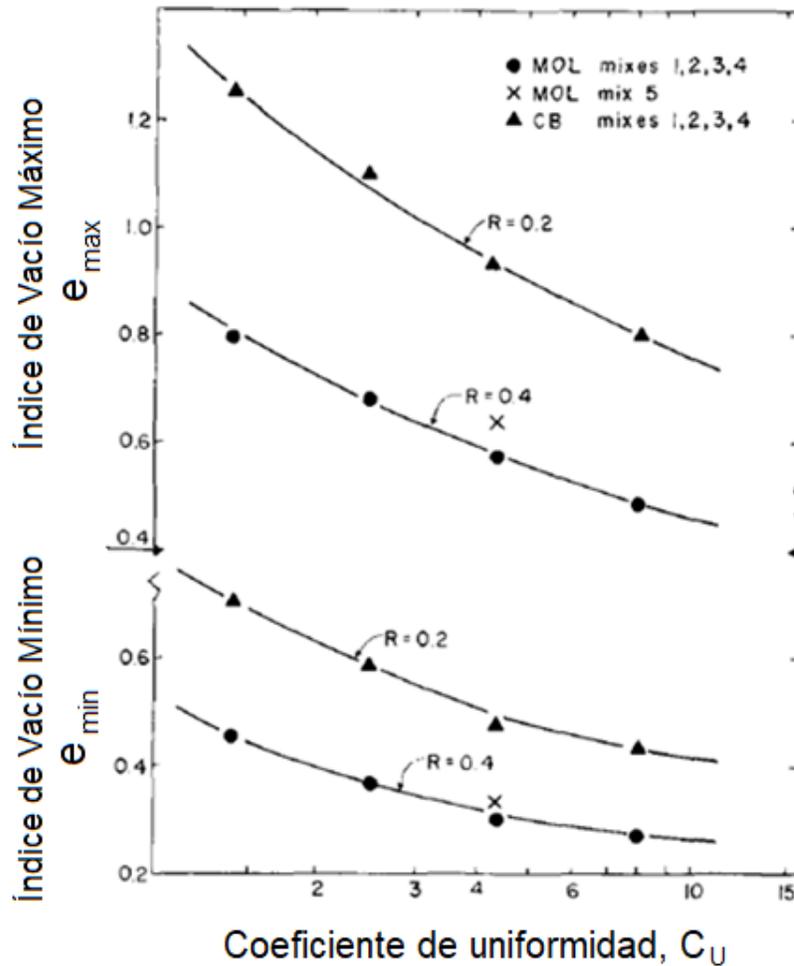


Figura 3.16: Índice de vacío mínimo y máximo, e_{\min} y e_{\max} , en función de C_U para mezclas artificiales de arenas (Youd,1973).

Por otra parte, Johnston (1973) determinó una correlación no lineal graficando C_u en escala logarítmica versus las densidades en escala aritmética, como se presenta en la Figura 3.17, para suelos con contenido de finos igual a cero.

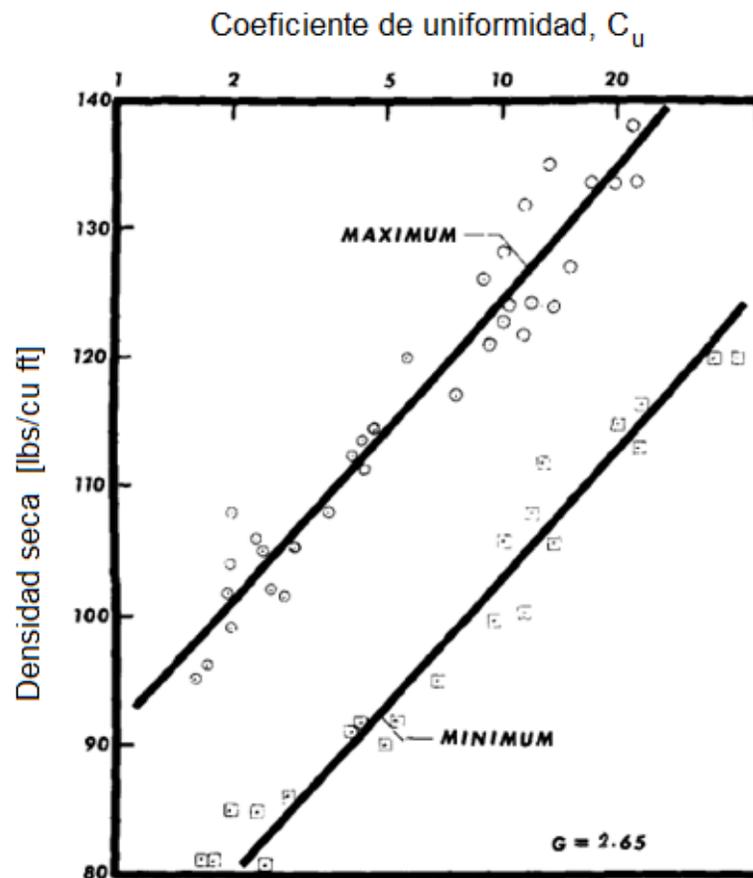


Figura 3.17: Relación empírica entre densidades máximas y mínimas versus coeficiente de uniformidad (Johnston, 1973)

Luego, Kezdi (1979) obtuvo la densidad máxima para una serie de materiales con distintos C_u , como se aprecia en la Figura 3.18, obteniendo una tendencia similar a la expuesta por Youd (1973) en términos de densidades.

Miura et al. (1997) determinaron los índices de vacíos mínimo y máximo, e_{min} y e_{max} , para diferentes muestras de arenas naturales, reconstituidas y materiales artificiales con diferentes C_u como se muestra en la Figura 3.19, donde se aprecia que e_{min} y e_{max} decrecen frente al aumento de los valores para C_u .

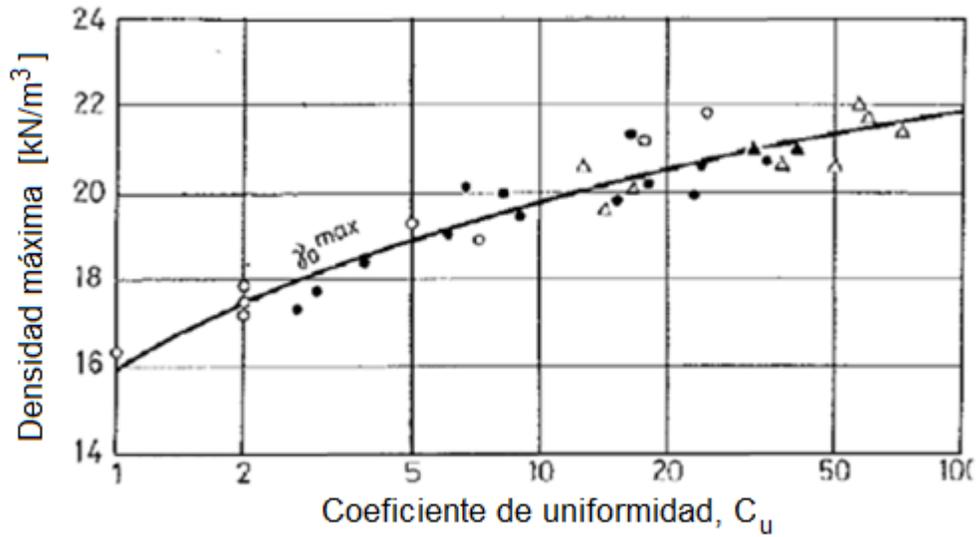


Figura 3.18: Densidad seca máxima v/s coeficiente de uniformidad (Kezdi, 1979).

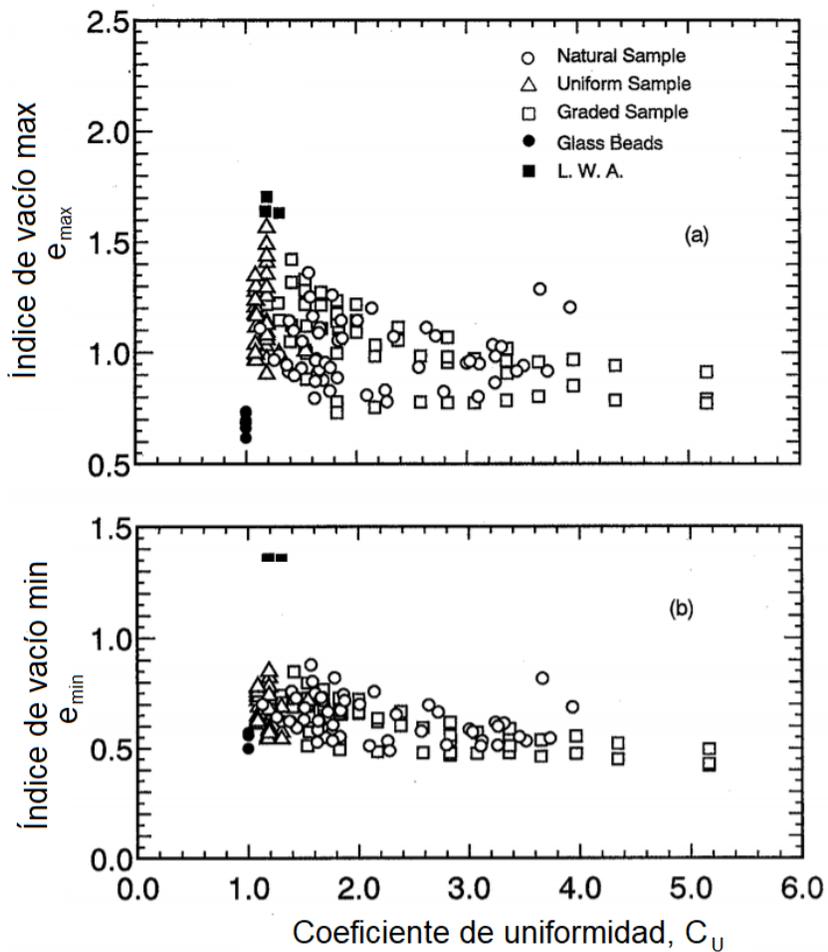


Figura 3.19: Relación entre índices de vacíos y coeficiente de uniformidad C_U . a) Índice de vacío máximo e_{max} vs C_U , b) Índice de vacío mínimo e_{min} vs C_U . (Miura et al, 1997).

Mismo resultado obtuvieron Biarez (1994), que se presentan en Figura 3.20, y Dorador & Riquelme (2014), que se presentan Figura 3.21, para suelos granulares gruesos. Estos últimos explicitan una correlación no lineal entre estos parámetros, la que se detalla en la Ecuación (3.11).

$$e_{min} = 0,7008(C_u)^{-0.304} \quad (3.11)$$

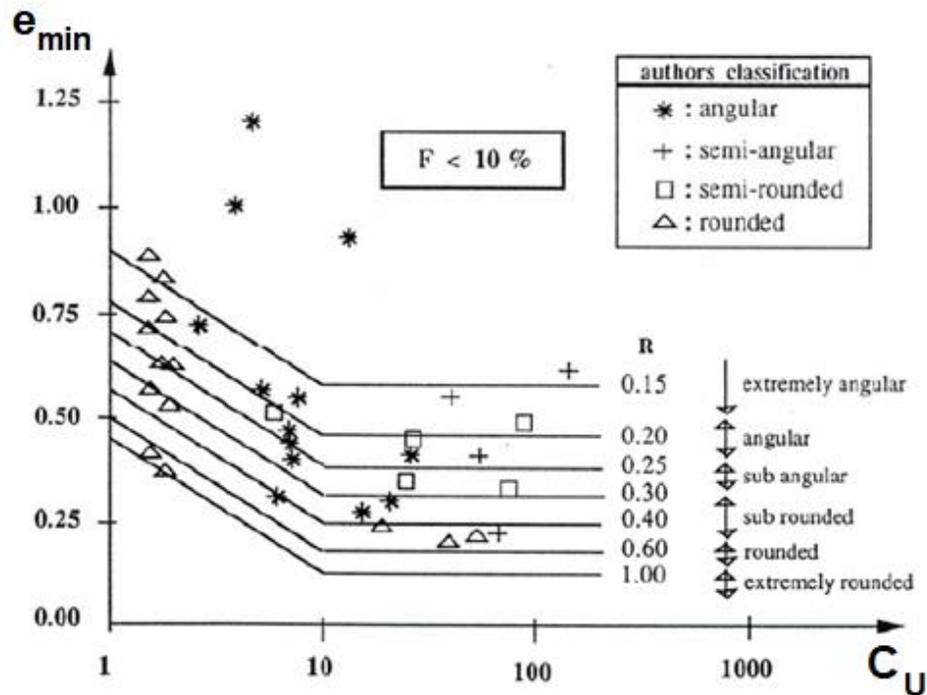


Figura 3.20: Índice de vacío mínimo, e_{min} , como función del coeficiente de uniformidad y angularidad de partículas de enrocados (Biarez, 1994).

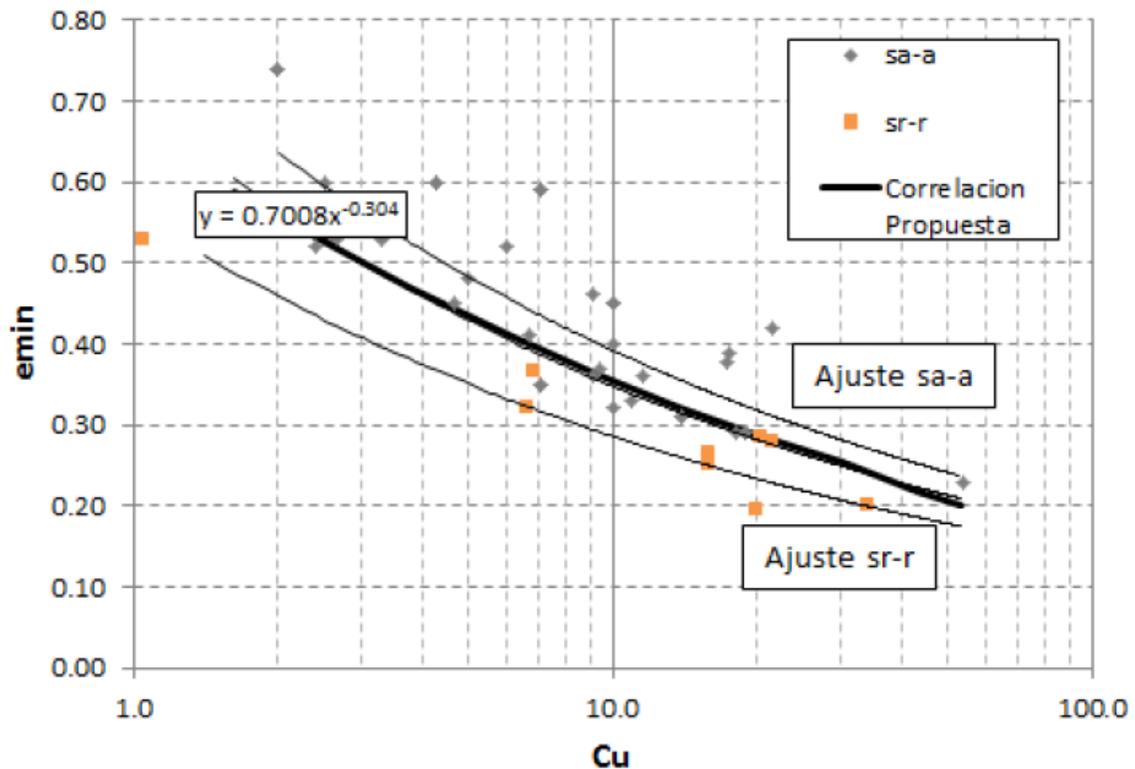


Figura 3.21: Relación entre índice de vacíos mínimo y coeficiente de uniformidad (Dorador & Riquelme, 2014).

Otra propiedad de los materiales que influye en las densidades características corresponde al tamaño de sus partículas. Una manera de ver esta variable es a través de los diámetros característicos.

Algunos autores que han estudiado estos parámetros, los cuales no han podido encontrar una correlación única, pero sí una tendencia a aumentar la densidad mínima, disminuye el e_{max} , a medida que aumenta el valor del diámetro promedio de las partículas, d_{50} .

Esto se aprecia de manera directa en la investigación de Youd (1973), donde gráfica los valores de e_{max} y e_{min} en función de d_{50} para diferentes mezclas artificiales de arenas con el mismo coeficiente de curvatura, como se expone en la Figura 3.22. Youd indica que no existe una única relación entre el tamaño medio de las partículas y el índice de vacíos mínimo ni máximo.

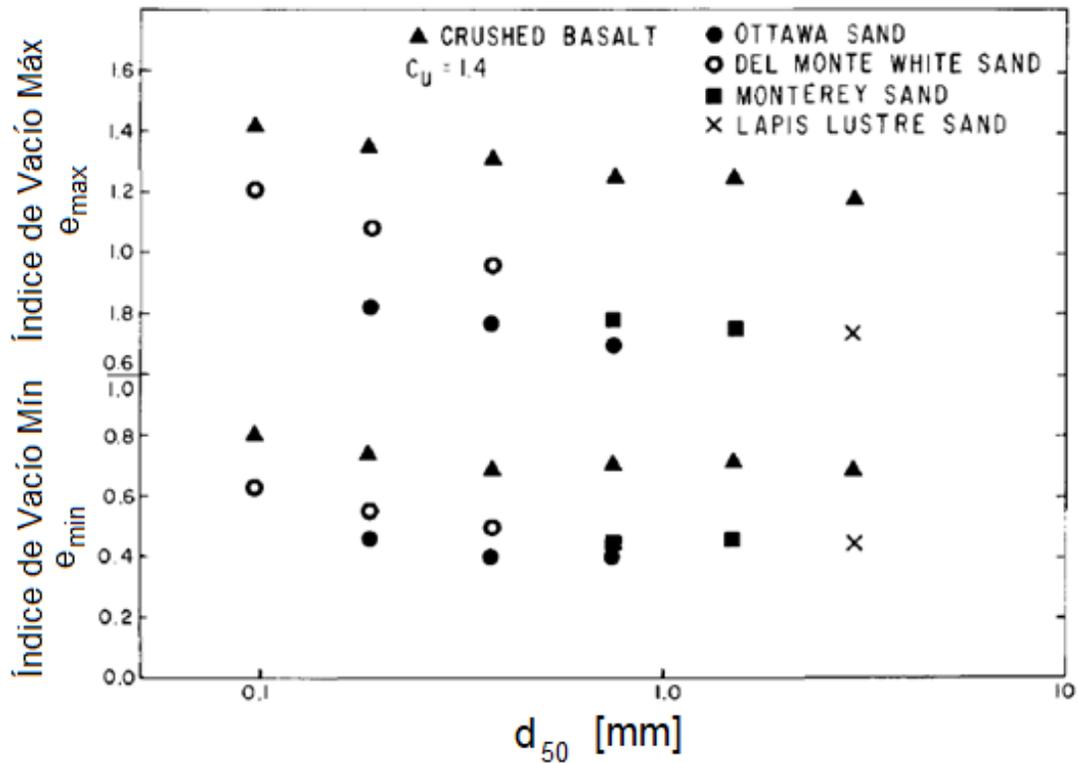


Figura 3.22: Índices de vacíos máximos y mínimos versus tamaño medio de grano para mezclas artificiales de arena con $C_u=1,4$ (Youd, 1979).

Miura et al. (1997) determinaron los índices de vacíos mínimo y máximo, e_{min} y e_{max} , para diferentes muestras de arenas naturales, reconstituidas y materiales artificiales versus el tamaño de grano medio d_{50} , como se muestra en la Figura 3.23. Aquí se puede ver que e_{min} y e_{max} decrecen para valores mayores de d_{50} .

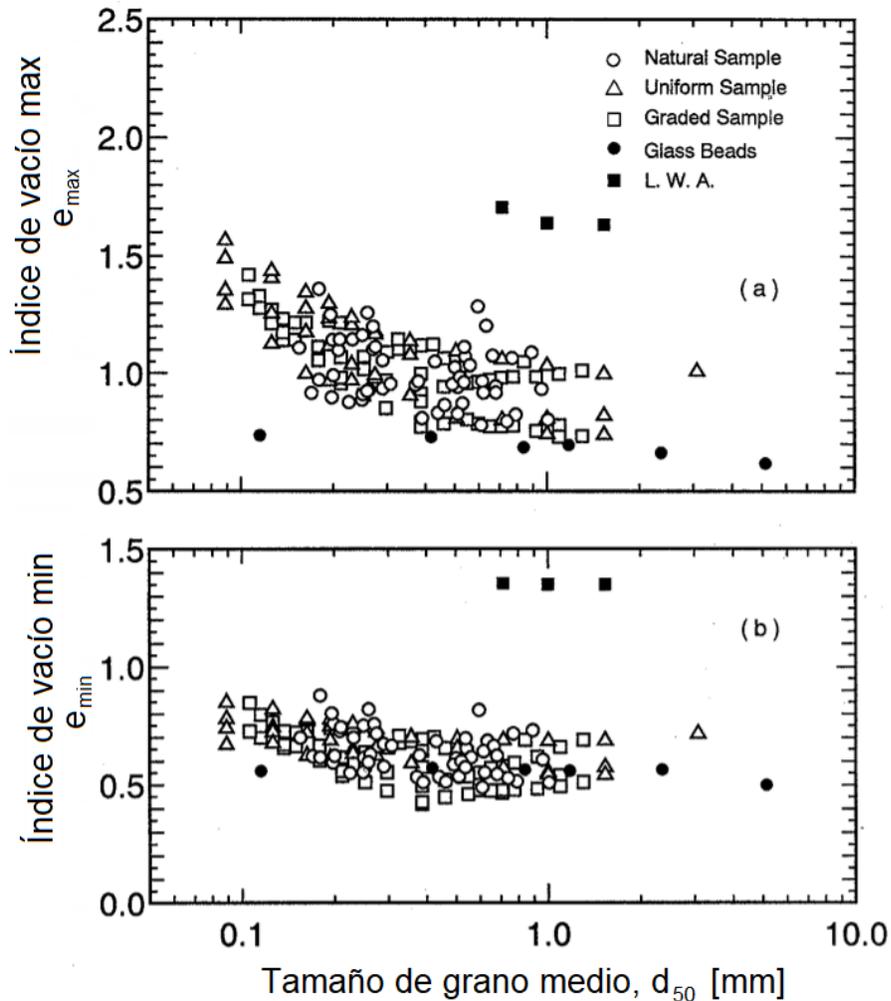


Figura 3.23: Relación entre índice de vacíos y tamaño de grano medio d_{50} . a) Índice de vacío máximo e_{max} vs d_{50} , b) Índice de vacío mínimo e_{min} vs d_{50} . (Miura et al, 1997).

Cubrinovski & Ishihara (2002) estudiaron esta relación para un gran número de muestras de arenas naturales y mezclas artificiales con diferentes contenido de finos, como se expone en la Figura 3.24, donde se aprecia que el e_{max} aumenta frente una disminución en d_{50} , con la tendencia a ser más pronunciada para suelos de grano más fino.

Luego, Besio & Dorador (2013) indican la misma tendencia de manera indirecta contrastando los valores de e_{max} y e_{min} clasificando los materiales por rangos de diámetros medios, como se muestra en la Figura 3.25.

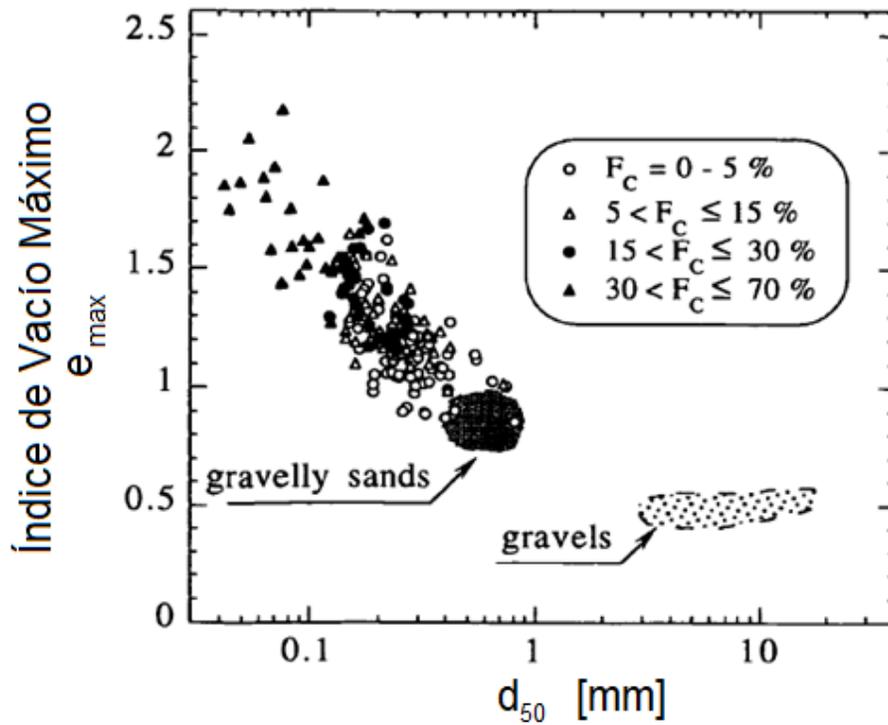


Figura 3.24: Influencia del tamaño medio de grano en índice de vacío máximo (Cubrinovski & Ishihara, 2002).

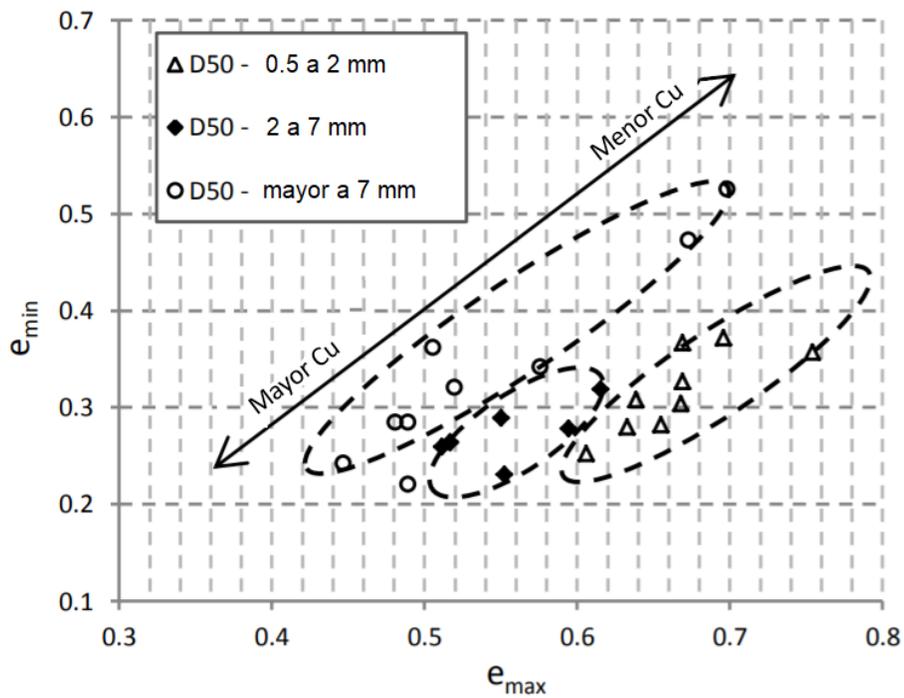


Figura 3.25: Influencia de d_{50} en e_{max} para materiales con C_u entre 0,5 y 29 (Besio & Dorador, 2013).

Además, Cubrinovski & Ishihara (2002) establecen, para arenas, que existe un aumento proporcional del índice de vacíos máximo, e_{max} , y el contenido de finos, C_F , en un rango desde el 0 al 70 % de C_F , como se aprecia en la Figura 3.26 a).

Por otro lado, el índice de vacíos mínimo, e_{min} , presenta un ligero aumento para un rango de C_F entre el 0 y 30 %, mientras que se observa una mayor tasa de aumento para materiales con más del 30 % de contenido de finos, como se muestra en la Figura 3.26 b).

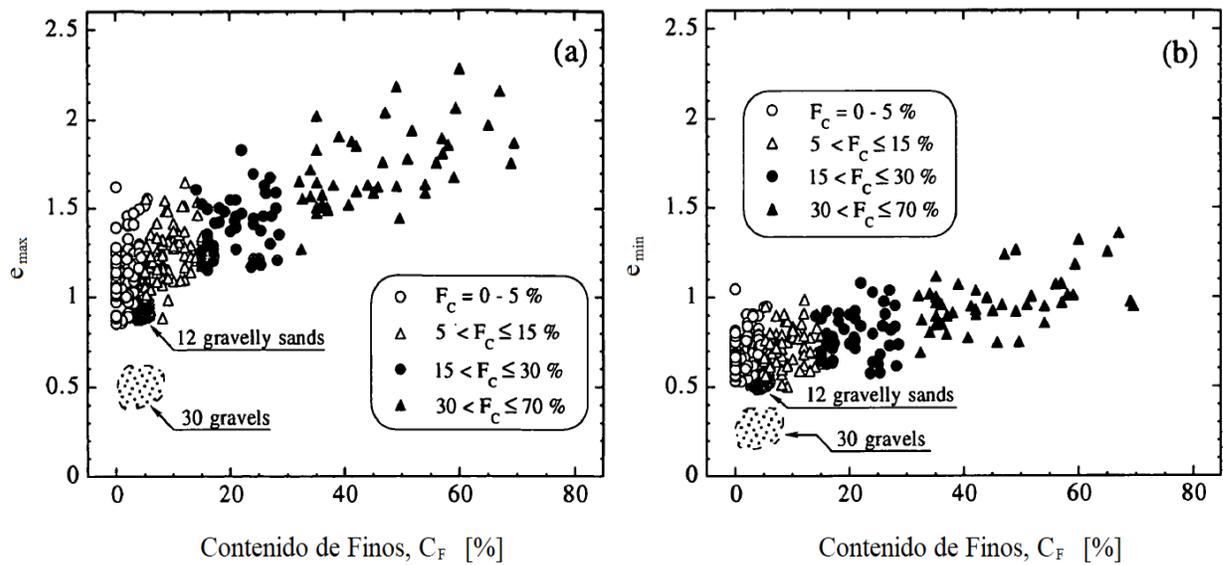


Figura 3.26: Efectos del contenido de finos en e_{max} y e_{min} de arenas: a) e_{max} vs. C_F b) e_{min} vs. C_F (Cubrinovski & Ishihara, 2002).

Por último, estudios previos han establecido ciertas correlaciones entre el índice de vacíos máximo, e_{max} , y el índice de vacíos mínimo, e_{min} . Dicho en otras palabras, entre la densidad mínima, γ_{min} , y la densidad máxima, γ_{max} , respectivamente.

Veiga Pinto (1979) presenta una correlación lineal entre estos dos parámetros para enrocados, basados en métodos no convencionales, como se muestra en la Figura 3.27.

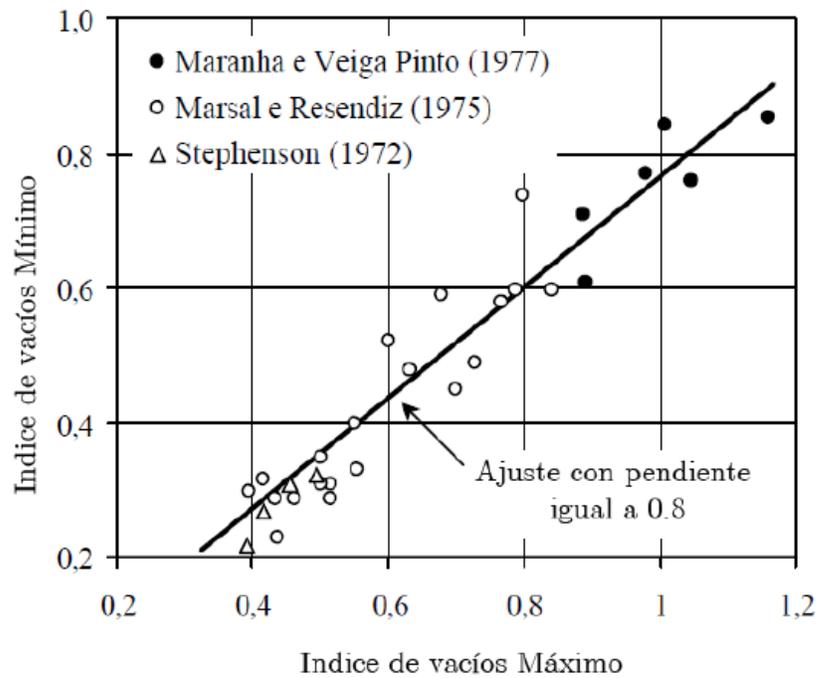


Figura 3.27: Correlación entre Índice de vacíos máximo e Índice de vacíos mínimo para enrocados (Veiga Pinto, 1979).

Por otra parte, Cubrinovski & Ishihara (2002) proponen otras correlaciones para arenas con diferentes contenidos de finos, utilizando la norma Japonesa para su determinación, las que se muestran en la Figura 3.28.

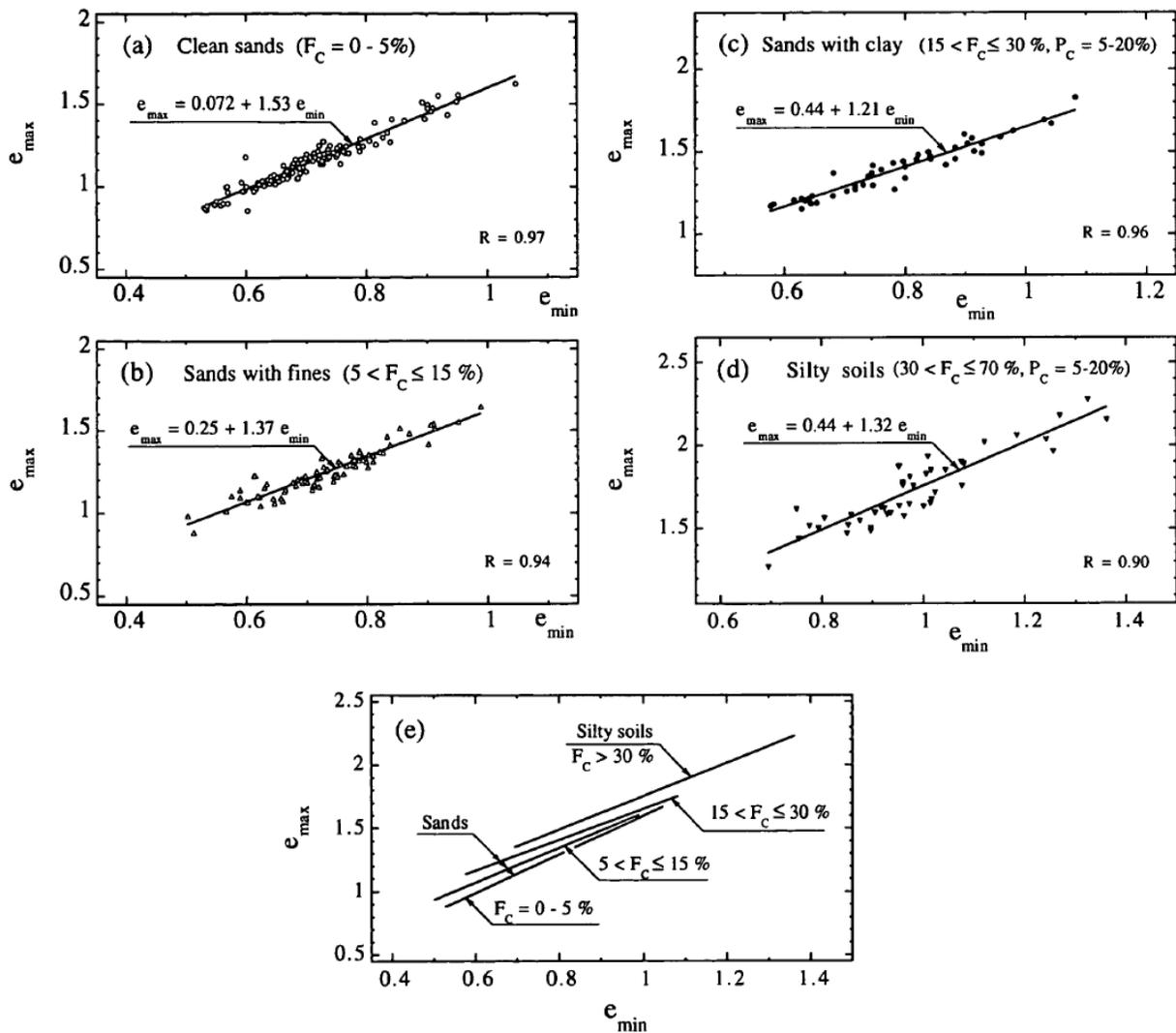


Figura 3.28: Correlaciones entre e_{min} y e_{max} en: a) Arenas limpias, b) Arenas con finos, c) Arenas con finos y arcillas, d) Limos y e) Resumen para todos los suelos (Cubrinovski & Ishihara, 2002).

Luego, De La Hoz (2007) define nuevas correlaciones para arenas y gravas como se muestra en la Figura 3.29, y que se indican en las Ecuaciones (3.12) y (3.13).

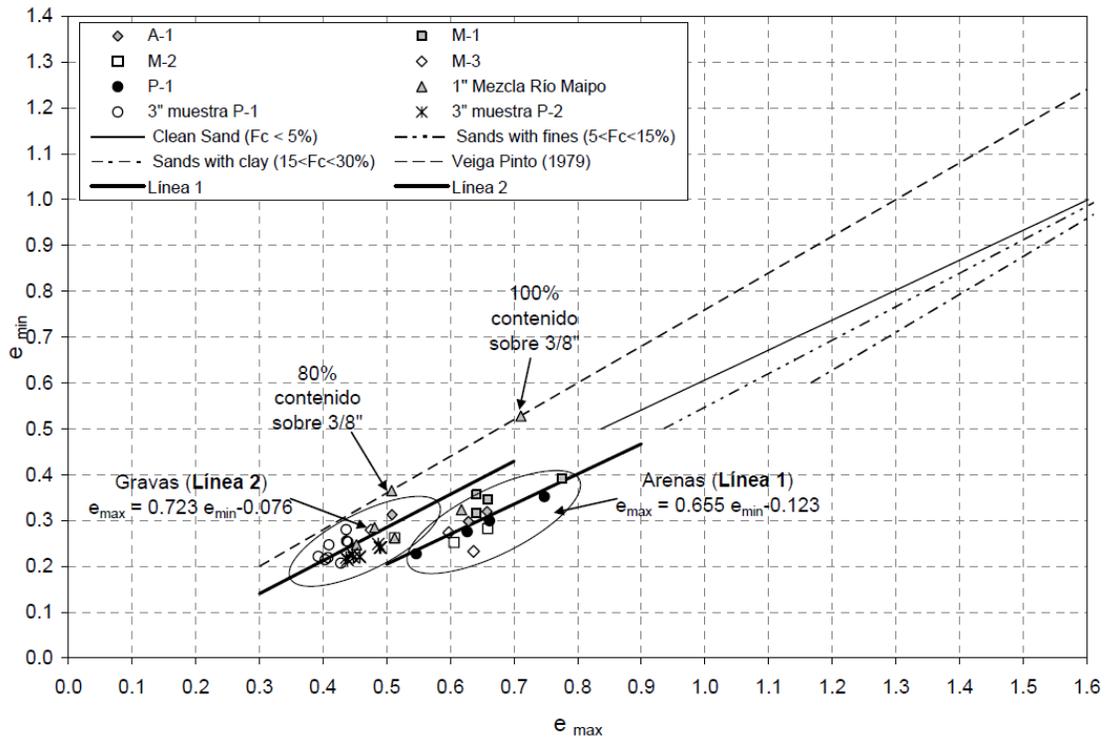


Figura 3.29: Correlaciones entre los Índices de vacíos e_{min} y e_{max} determinados a partir de ensayos basados en las normas ASTM (De La Hoz, 2007).

$$\text{Lineas 1 (Arenas)} : e_{min} = 0,655 e_{max} - 0,123 \quad (3.12)$$

$$\text{Lineas 2 (Gravas)} : e_{min} = 0,723 e_{max} - 0,076 \quad (3.13)$$

3.7. Propuesta para dar respuesta a la problemática

A partir de los diferentes ensayos realizados a un primer grupo de materiales, se propone una combinación de configuraciones tiempo y frecuencia de vibrados para la confección de probetas, a las cuales se analiza la reproducibilidad de los resultados mediante un segundo grupo de muestras.

Por último, se propone una metodología detallada para la realización de ensayos CBR en suelos granulares con bajo C_F , en la cual se exponen los equipos y accesorios necesarios, el acondicionamiento de la muestra, la confección de las probetas densificadas mediante el uso de mesa vibratoria, el procedimiento de inmersión y penetración, junto a los cálculos y presentación de los resultados.

4. Resultados

En el presente capítulo se presentan los materiales utilizados para la ejecución de los diferentes ensayos, indicando lugar de origen, características geológicas, entre otros. Además, se presentan los resultados de las pruebas de caracterización y densidades.

4.1. Materiales seleccionados

Las muestras extraídas de forma alterada provienen de distintos puntos de la región Metropolitana y algunas de la región de Valparaíso como se presenta en la Figura 4.1 y Figura 4.2. Además, en la Tabla 4.1 se especifica la comuna y la profundidad a la que se extrajo cada muestra.

Tabla 4.1: Identificación de muestras.

ID muestra	Comuna	Región	Profundidad Inicial [m]	Profundidad Final [m]
M-1	La Cisterna	Metropolitana	8,0	-
M-2	Calle Larga	Valparaíso	1,8	2,0
M-3	Calle Larga	Valparaíso	1,9	2,3
M-4	Santiago	Metropolitana	7,0	-
M-5	Vitacura	Metropolitana	4,0	-
M-6	Independencia	Metropolitana	7,5	-
M-7	Ñuñoa	Metropolitana	14,0	-
M-8	Santiago	Metropolitana	0,5	1,0
M-9	Buín	Metropolitana	3,2	3,6
M-10	Lampa	Metropolitana	1,5	1,8
M-11	La Florida	Metropolitana	4,5	-
M-12	Ñuñoa	Metropolitana	14,0	-
M-13	La Florida	Metropolitana	1,5	2,0
M-14	Independencia	Metropolitana	-	-
M-15	Quillota	Valparaíso	1,5	1,8
M-16	Recoleta	Metropolitana	4,0	-

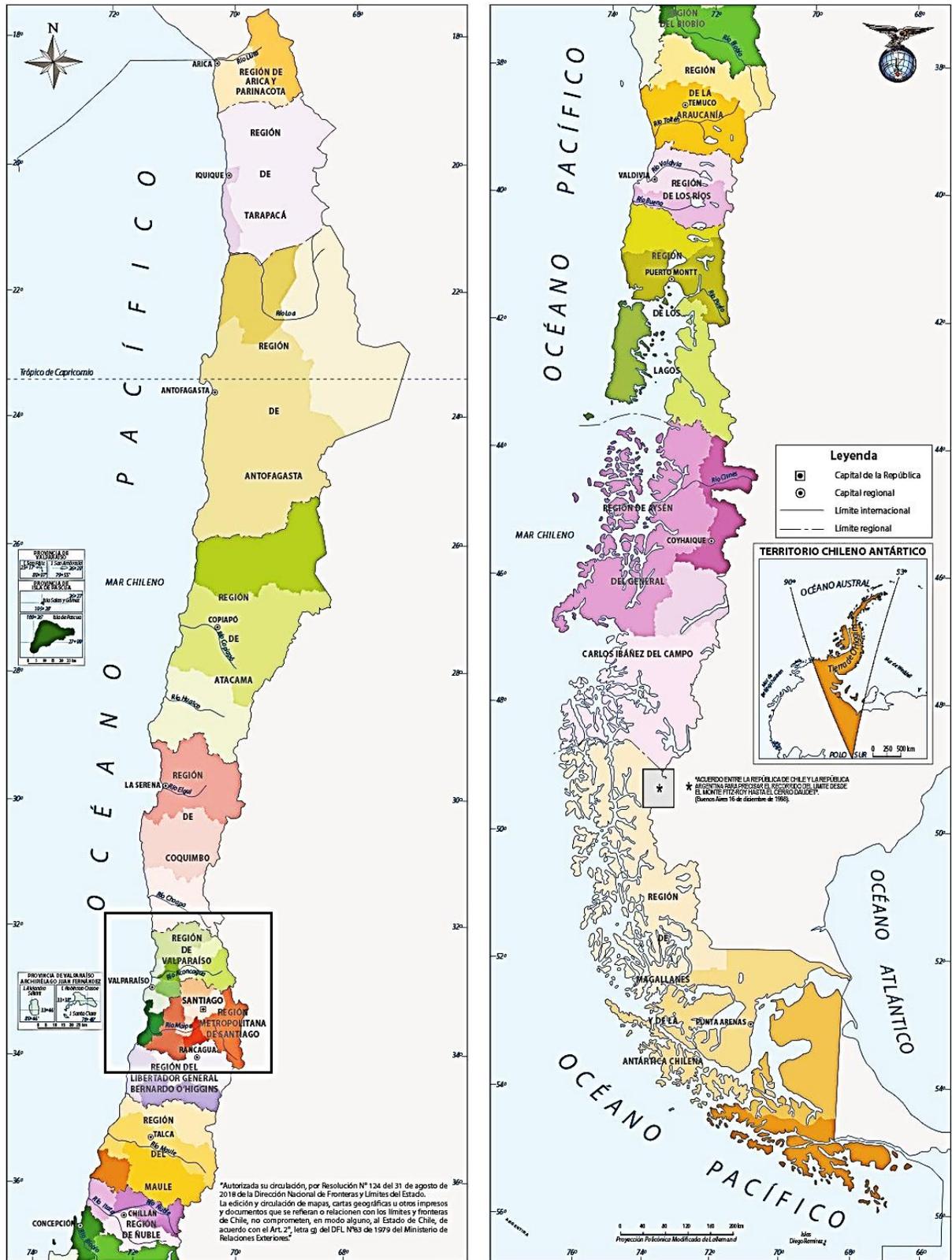


Figura 4.1: Sector de Chile de donde provienen las muestras (MINEDUC, 2020).



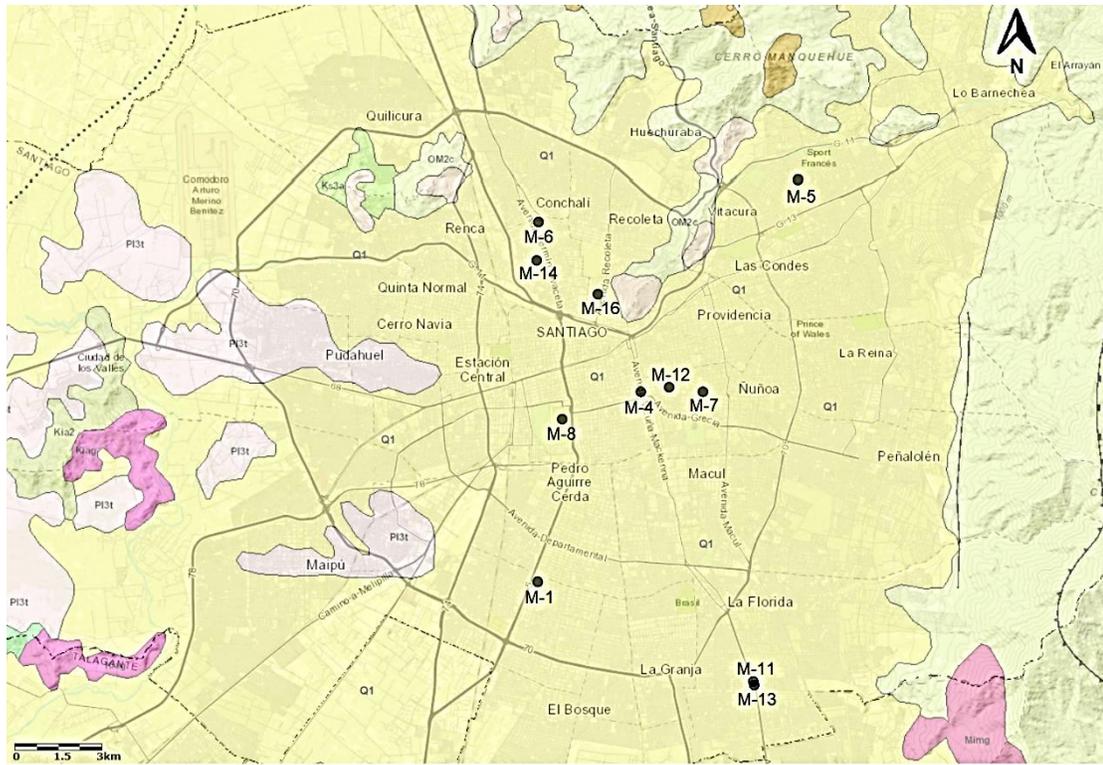
Figura 4.2: Distribución espacial de las muestras (SERNAGEOMIN, 2020).

A partir del mapa geológico de Chile, proporcionado de manera pública por el Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, en una escala de 1:1.000.000, se puede conocer el origen geológico de los materiales seleccionados.

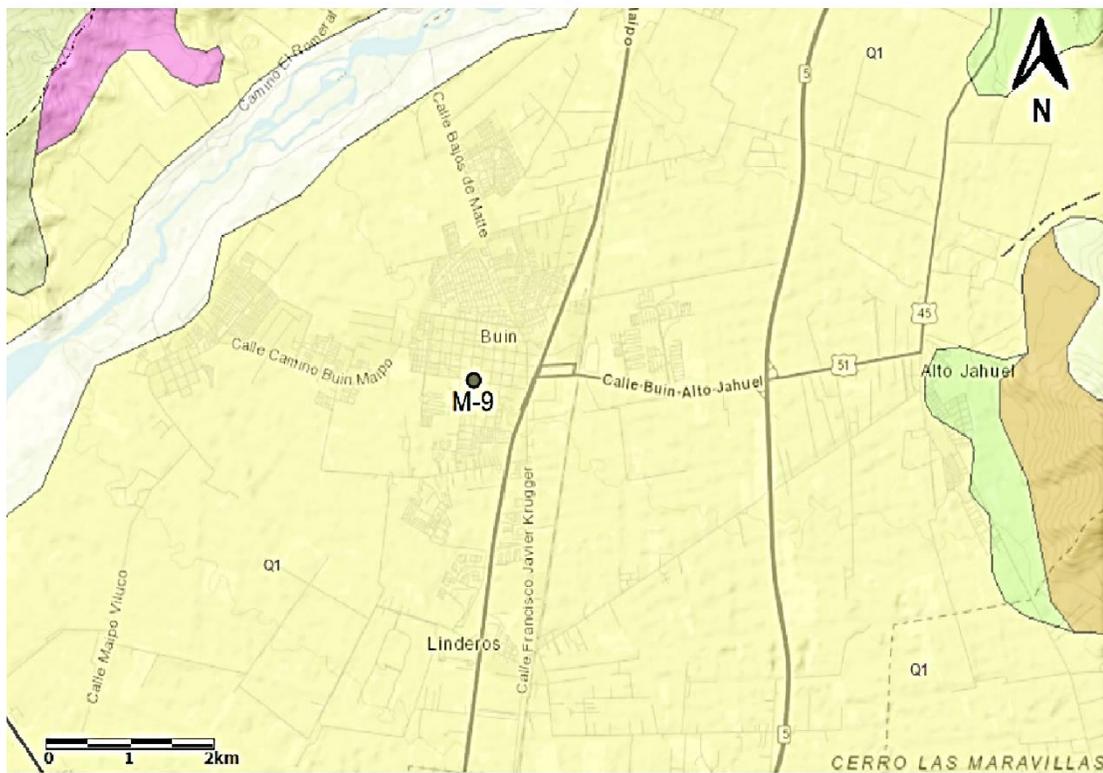
Es así que se sitúan las muestras en el mapa geológico de cada comuna como se aprecia en la Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5. En éstas, se observa que las muestras, casi en totalidad, se ubican en sectores clasificados como Q1, de acuerdo con la leyenda que se presenta en la Figura 4.5. Éstos corresponden a secuencias sedimentarias provenientes, principalmente, de depósitos aluviales, coluviales, de remoción en masa y fluvio-glaciales formadas entre 0,01 y 2,59 millones de años atrás correspondiente al periodo Cuaternario de la era Cenozoico.

Por otra parte, la muestra identificada como M-15, originaria de la comuna de Quillota, proviene de una zona de transición entre dos unidades geológicas, identificadas como Q1 y Qf, como se observa en la Figura 4.5.

La unidad Qf corresponde a una secuencia sedimentaria originadas por depósitos fluviales de gravas, arenas y limos debido al curso actual del río Aconcagua que pasa al costado de la comuna.

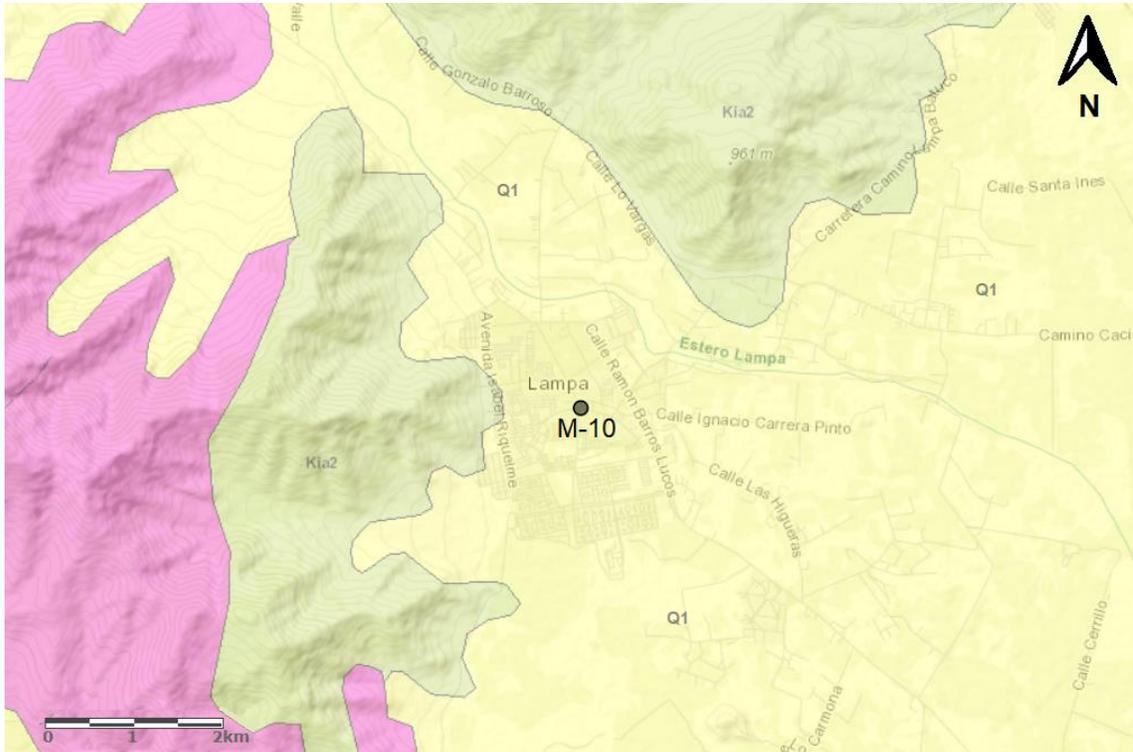


a)

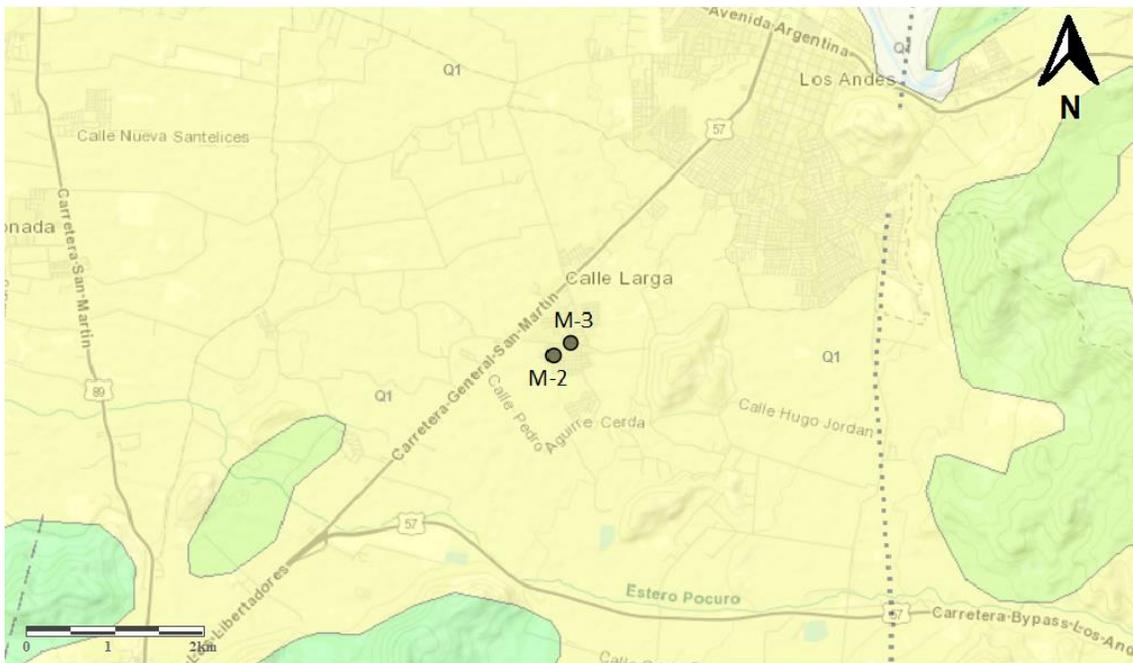


b)

Figura 4.3: Mapa geológico: a) Provincia de Santiago b) Comuna de Buin (SERNAGEOMIN, 2020).

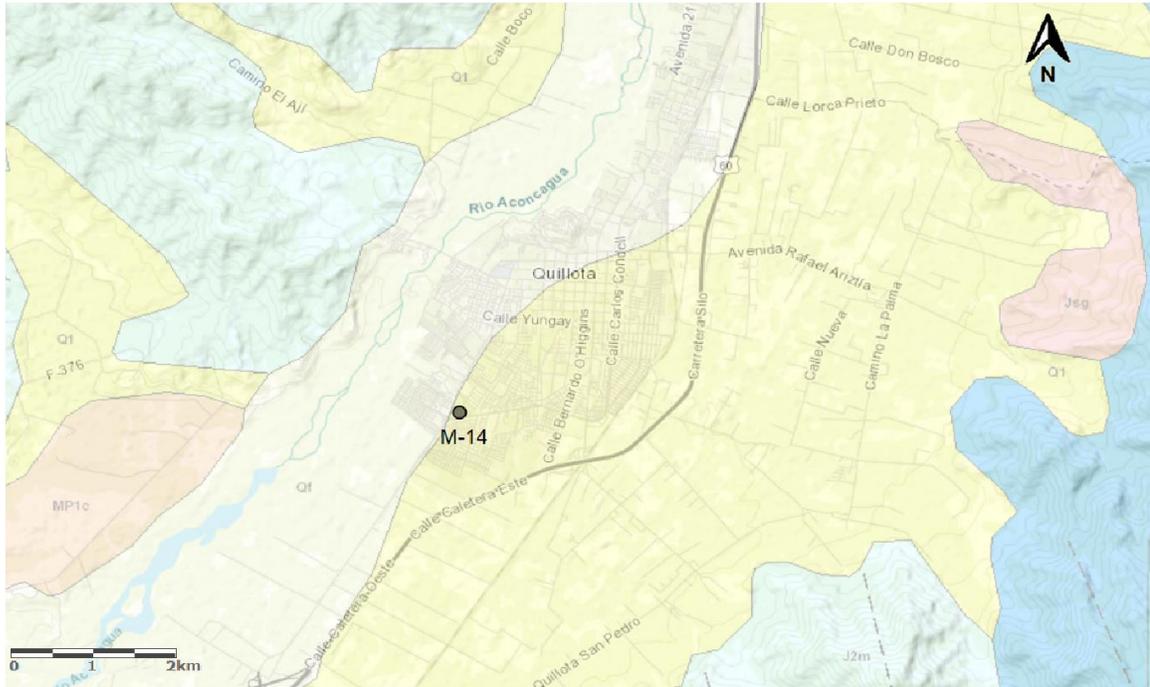


a)



b)

Figura 4.4: Mapa geológico: a) Comuna de Lampa b) Comuna de Calle Larga (SERNAGEOMIN, 2020).



a)

SECUENCIAS SEDIMENTARIAS

- Q1**
Pleistoceno-Holoceno
 Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvio-glaciales con intercalación de depósitos volcánoclasticos.
- Qf**
Pleistoceno-Holoceno
 Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.
- MP1c**
Mioceno Superior-Plioceno
 Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas. En las regiones I a IV: formaciones Huaylas, Lauca y Pastos Chicos, Gravas del Copiapó; en la región XI: Formación Galeras.
- Js1m**
Jurásico Medio-Superior
 Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, areniscas, lutitas calcáreas, en parte bituminosas, con intercalaciones epiclásticas y niveles evaporíticos superiores. En las regiones I y II: formaciones Los Tarros, Chiza, Guantajaya, Cholita, Pachica, Duplijsa y Grupo Caracoles; en las regiones V a VII: formaciones Cerro Calera, Río Colina y Nacientes del Teno.

SECUENCIAS VOLCANOSEDIMENTARIAS SECUENCIAS VOLCANICAS

- PI3t**
Pleistoceno
 Depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. En la Depresión Central y valles de la Cordillera Principal, regiones V a VII: Ignimbrita Pudahuel y Toba Loma Seca.
- OM2c**
Oligoceno-Mioceno
 Secuencias volcánosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. En la Cordillera Principal, regiones I a IX: formaciones Lupica, Escabroso, Abanico, Coya-Machali, Cura-Mallín (inferior).
- Kia2**
Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo
 Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas. En la Precordillera y Cordillera de la Costa, regiones III a Metropolitana: formaciones Cerrillos, Viñita (occidental) y Las Chilcas.
- J2m**
Jurásico
 Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas y brechas, andesíticas y basálticas, calizas y areniscas marinas fosilíferas. En la Cordillera de la Costa, región I: Formación Caleta Ligate; en la Depresión Central, regiones II a III: formaciones Sierra Candeleros y Sierra Fraga.

b)

Figura 4.5: a) Mapa geológico comuna de Quillota b) Leyenda (SERNAGEOMIN, 2020).

4.2. Plan de ensayos

Las 16 muestras seleccionadas se dividen en dos grandes grupos. El primero está conformado por las 12 primeras, las cuales se someten a ensayos de clasificación completa, densidad de partículas sólidas menores a tamiz N°4 (5 mm) y densidades mínima, máxima e intermedias, con el objetivo de determinar las combinaciones de frecuencia tiempo, con las que se puedan caracterizar las curvas de densidades y proponer configuraciones de tiempo y frecuencia para la confección de probetas durante el ensayo CBR.

El segundo grupo corresponde a los cuatro materiales restantes, en los cuales se ejecutan los ensayos de granulometría, límites de Atterberg y densidad de partículas sólidas bajo y sobre tamiz N°4, junto con determinar las densidades alcanzadas a partir de las configuraciones de vibrado propuestas partir de la primera etapa de ensayos.

El detalle de los ensayos realizados a cada grupo de muestras se presenta en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Plan de ensayos.

Grupo		1											2				
Id. Muestra		M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10	M-11	M-12	M-13	M-14	M-15	M-16
Granulometría bajo 3"		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Límites de Atterberg		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Gs bajo N°4		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Gs sobre N°4														x	x	x	x
DR	Densidad Máxima	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Densidad Mínima	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Densidades Intermedias	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Densidades ensayos CBR													x	x	x	x

4.3. Parámetros de los materiales ensayados

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos granulométricos, indicando los diámetros característicos, límites de Atterberg, densidades de partículas sólidas bajo y sobre tamiz N°4, junto con la clasificación de todos los materiales considerados.

4.3.1. Granulometría

Las curvas granulométricas del primer grupo de 12 muestras y del segundo grupo de 4 muestras, se presentan en la Figura 4.6 y Figura 4.7, respectivamente.

Adicionalmente, en la Tabla 4.3 se indican los porcentajes en peso de grava, arena y material fino que presenta cada muestra.

Por último, los diámetros característicos junto a los coeficientes de uniformidad y curvaturas de todos los materiales, se muestran en la Tabla 4.4.

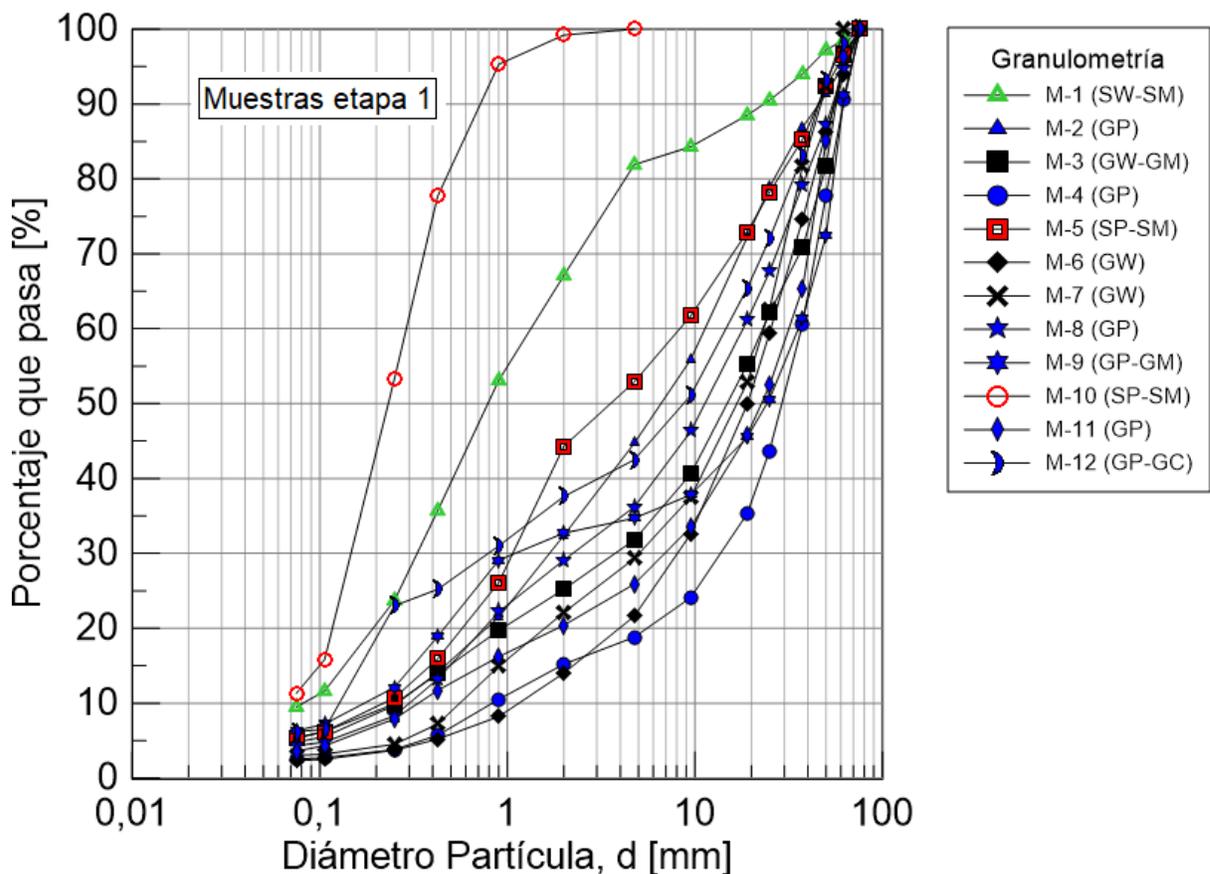


Figura 4.6: Curvas granulométricas del Grupo 1, muestras M-1 a M-12.

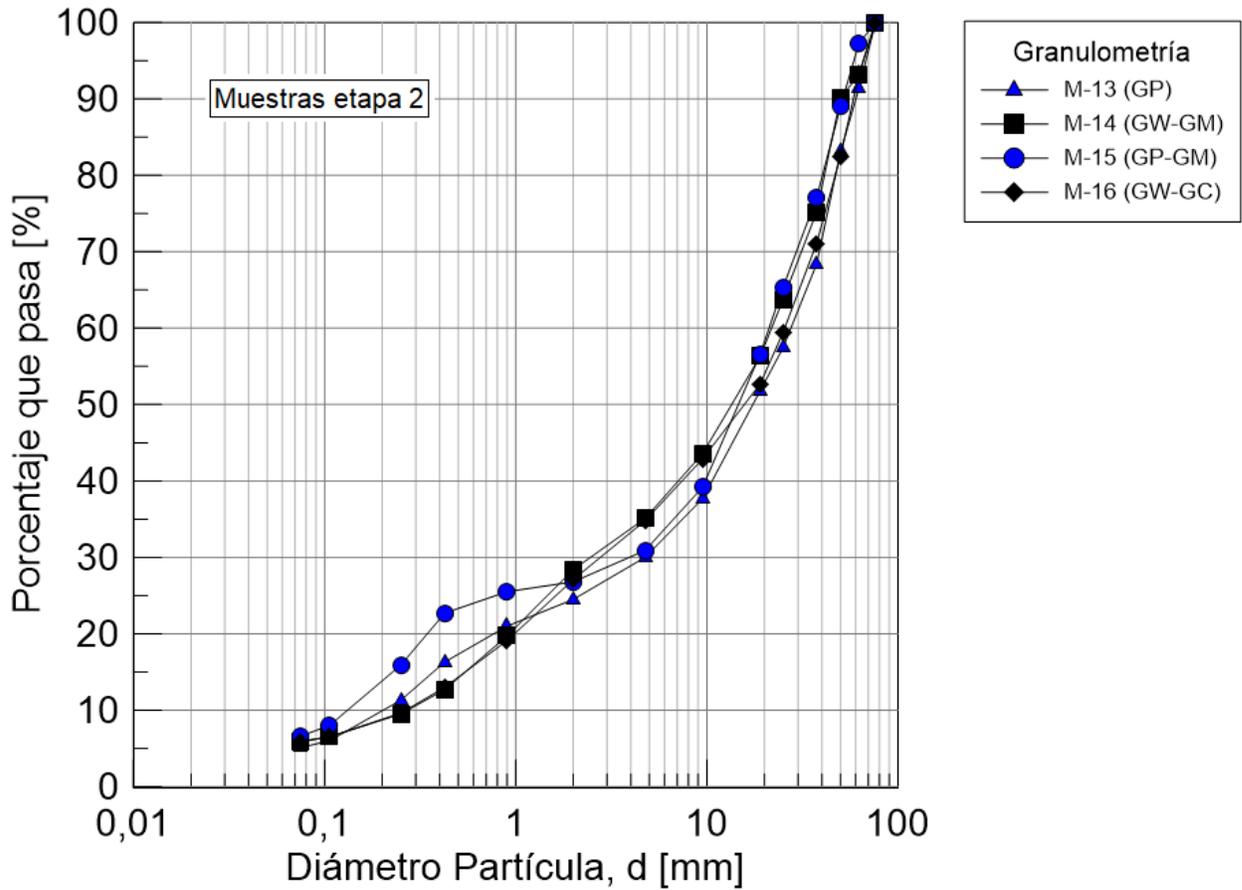


Figura 4.7: Curvas granulométricas del Grupo 2, muestras M-13 a M-16.

Tabla 4.3: Porcentaje en peso de gravas, arenas y finos de todas las muestras.

Id. Muestra	Gravas [% en peso]	Arenas [% en peso]	Finos [% en peso]
M-1	18,1	72,4	9,5
M-2	55,3	39,9	4,8
M-3	68,2	26,4	5,4
M-4	81,2	16,3	2,5
M-5	47,1	47,6	5,3
M-6	78,4	19,3	2,3
M-7	70,7	26,3	3,0
M-8	63,8	31,9	4,3

Id. Muestra	Gravas [% en peso]	Arenas [% en peso]	Finos [% en peso]
M-9	65,3	28,4	6,3
M-10	0,0	88,7	11,3
M-11	74,1	22,3	3,6
M-12	57,5	36,3	6,2
M-13	70,0	24,9	4,9
M-14	64,9	29,2	5,9
M-15	69,1	24,3	6,6
M-16	65,2	28,9	5,9

Tabla 4.4: Diámetros característicos, coeficientes de uniformidad y curvatura.

Id. Muestra	d ₆₀ [mm]	d ₅₀ [mm]	d ₃₀ [mm]	d ₁₀ [mm]	C _U [-]	C _C [-]
M-1	1,33	0,79	0,33	0,08	16,38	1,00
M-2	11,31	6,59	1,68	0,26	43,63	0,96
M-3	23,00	14,84	3,75	0,25	90,77	2,42
M-4	36,96	29,08	13,69	0,83	44,41	6,09
M-5	8,31	3,55	1,07	0,22	37,98	0,63
M-6	25,40	19,05	8,06	1,15	22,03	2,22
M-7	23,24	16,74	5,04	0,56	41,63	1,96
M-8	18,05	11,30	2,23	0,30	60,05	0,92
M-9	35,58	24,21	1,10	0,17	205,57	0,20
M-10	0,29	0,23	0,15	0,06	4,86	1,25
M-11	31,69	22,63	6,90	0,34	94,53	4,49
M-12	14,62	8,69	0,79	0,13	115,01	0,34
M-13	27,51	17,39	4,75	0,20	135,84	4,05
M-14	21,79	13,47	2,46	0,27	80,24	1,02

Id. Muestra	d ₆₀ [mm]	d ₅₀ [mm]	d ₃₀ [mm]	d ₁₀ [mm]	C _u [-]	C _c [-]
M-15	21,15	14,61	3,93	0,13	160,58	5,54
M-16	25,53	15,70	2,77	0,27	95,92	1,13

4.3.2. Límites de Atterberg

Los porcentajes de humedad correspondientes a los límites líquido y plástico junto al índice de plasticidad, se exponen en la Tabla 4.5.

Luego, la carta de plasticidad de los materiales se exhibe en la Figura 4.8.

Tabla 4.5: Resultados límite líquido, plástico e índice de plasticidad de todas las muestras.

Id. Muestra	Límite Líquido [%]	Límite Plástico [%]	Índice de Plasticidad [%]
M-1	N.D.	N.P.	N.P.
M-2	N.D.	N.P.	N.P.
M-3	N.D.	N.P.	N.P.
M-4	N.D.	N.P.	N.P.
M-5	N.D.	N.P.	N.P.
M-6	N.D.	N.P.	N.P.
M-7	28	17	11
M-8	N.D.	N.P.	N.P.
M-9	N.D.	N.P.	N.P.
M-10	N.D.	N.P.	N.P.
M-11	N.D.	N.P.	N.P.
M-12	29	16	13
M-13	N.D.	N.P.	N.P.
M-14	N.D.	N.P.	N.P.
M-15	N.D.	N.P.	N.P.
M-16	26	16	10

Cabe señalar que N.D y N.P corresponden a no detectado y no plástico, respectivamente.

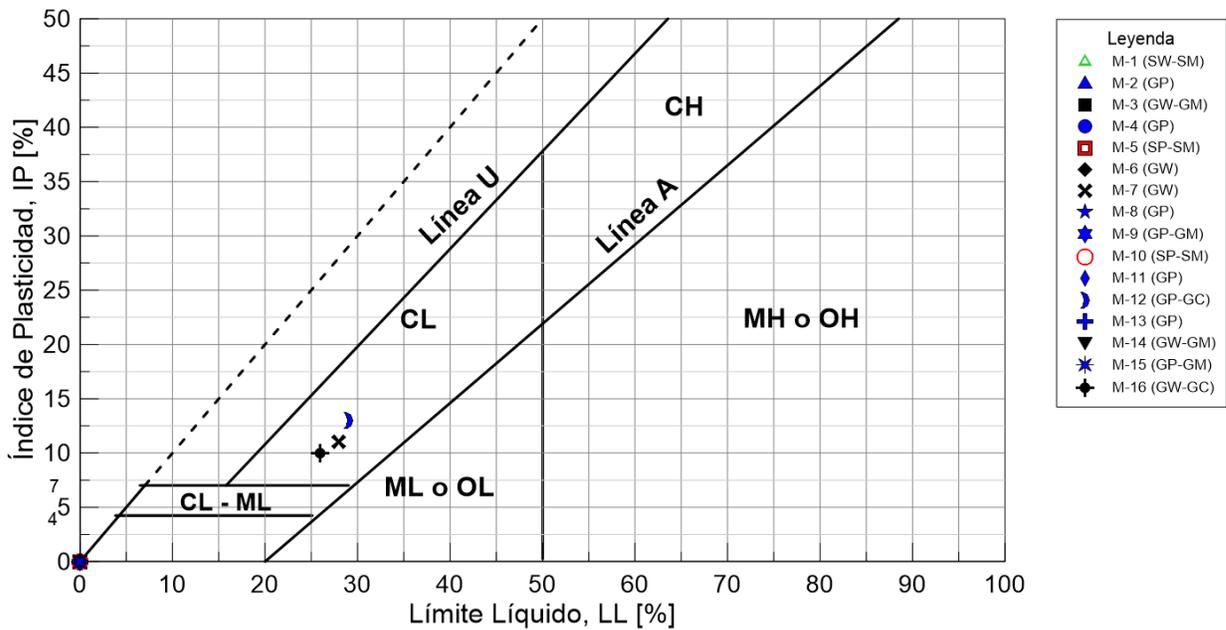


Figura 4.8: Resultados de composición de las partículas finas del material según carta de plasticidad de todos los materiales con finos que exhiben plasticidad.

4.3.3. Densidad partículas sólidas

En la Tabla 4.6 se muestran los valores de la densidad de partículas sólidas bajo y sobre tamiz N°4 (5 mm) junto a la densidad de partículas sólidas ponderada por los porcentajes de las fracciones menor y mayor al tamiz N°4.

Cabe señalar que para las muestras del Grupo 1, se asumirá como valor de G_s , el obtenido bajo tamiz N°4

Tabla 4.6: Resultados densidad partículas sólidas todas las muestras.

Id. Muestra	G_{SF} [-]	G_{SC} [-]	G_S [-]
M-1	2,824	-	-
M-2	2,769	-	-
M-3	2,869	-	-
M-4	2,825	-	-
M-5	2,783	-	-

Id. Muestra	G_{SF} [-]	G_{SC} [-]	G_S [-]
M-6	2,713	-	-
M-7	2,745	-	-
M-8	2,562	-	-
M-9	2,725	-	-
M-10	2,862	-	-
M-11	2,773	-	-
M-12	2,804	-	-
M-13	2,808	2,696	2,730
M-14	2,760	2,676	2,706
M-15	2,789	2,688	2,719
M-16	2,784	2,641	2,691

4.3.4. Resumen de resultados

A continuación, en la Tabla 4.7 se presenta un resumen con los resultados de los parámetros significativos de los materiales considerados.

Cabe señalar que el peso específico indicado para el primer grupo de muestras, M-1 a M-12, corresponde al de particular menores a tamiz N°4 a diferencia del segundo grupo, M-13 a M-16, que corresponde al peso específico ponderado por las fracciones pasante y retenidas en el tamiz N°4.

Tabla 4.7: Resumen de resultados de parámetros significativos.

Id. Muestra	Gravas [% en peso]	Arenas [% en peso]	Finos [% en peso]	d ₅₀ [mm]	Cu [-]	Cc [-]	IP [%]	LL [%]	Gs [-]	Clasificación USCS
M-1	18,1	72,4	9,5	0,79	16,38	1	N.D.	N.P.	2,824	SW-SM
M-2	55,3	39,9	4,8	6,59	43,63	0,96	N.D.	N.P.	2,769	GP
M-3	68,2	26,4	5,4	14,84	90,77	2,42	N.D.	N.P.	2,869	GW-GM
M-4	81,2	16,3	2,5	29,08	44,41	6,09	N.D.	N.P.	2,825	GP
M-5	47,1	47,6	5,3	3,55	37,98	0,63	N.D.	N.P.	2,783	SP-SM
M-6	78,4	19,3	2,3	19,05	22,03	2,22	N.D.	N.P.	2,713	GW
M-7	70,7	26,3	3	16,74	41,63	1,96	28	11	2,745	GW
M-8	63,8	31,9	4,3	11,30	60,05	0,92	N.D.	N.P.	2,562	GP
M-9	65,3	28,4	6,3	24,21	205,57	0,2	N.D.	N.P.	2,725	GP-GM
M-10	0	88,7	11,3	0,23	4,86	1,25	N.D.	N.P.	2,862	SP-SM
M-11	74,1	22,3	3,6	22,63	94,53	4,49	N.D.	N.P.	2,773	GP
M-12	57,5	36,3	6,2	8,69	115,01	0,34	29	13	2,804	GP-GC
M-13	70	24,9	4,9	17,39	135,84	4,05	N.D.	N.P.	2,730	GP
M-14	64,9	29,2	5,9	13,47	80,24	1,02	N.D.	N.P.	2,706	GW-GM
M-15	69,1	24,3	6,6	14,61	160,58	5,54	N.D.	N.P.	2,719	GP-GM
M-16	65,2	28,9	5,9	15,70	95,92	1,13	26	10	2,691	GW-GC

4.4. Densidades secas vibradas

En primer lugar, se obtienen las densidades secas preliminares de la muestra M-1 para las 30 combinaciones de tiempo y frecuencia, indicadas previamente en la Figura 3.11. Los resultados se presentan en la Tabla 4.8 y de manera gráfica en la Figura 4.9.

Luego, se determina la densidad relativa para cada punto a través de la Ecuación (2.12). Los valores se muestran en la Tabla 4.9 y en la Figura 4.10.

Tabla 4.8: Resultados densidades secas de la muestra M-1.

Tiempo [min]	Densidad [gr/cm ³]					
	15 [Hz]	20 [Hz]	30 [Hz]	40 [Hz]	50 [Hz]	60 [Hz]
0	1,981	1,981	1,981	1,981	1,981	1,981
1	2,001	2,133	2,142	2,204	2,216	2,182
2	2,005	2,150	2,156	2,214	2,222	2,214
4	2,010	2,168	2,172	2,226	2,239	2,240
6	2,011	2,170	2,179	2,232	2,247	2,248
8	2,016	2,180	2,179	2,246	2,246	2,250

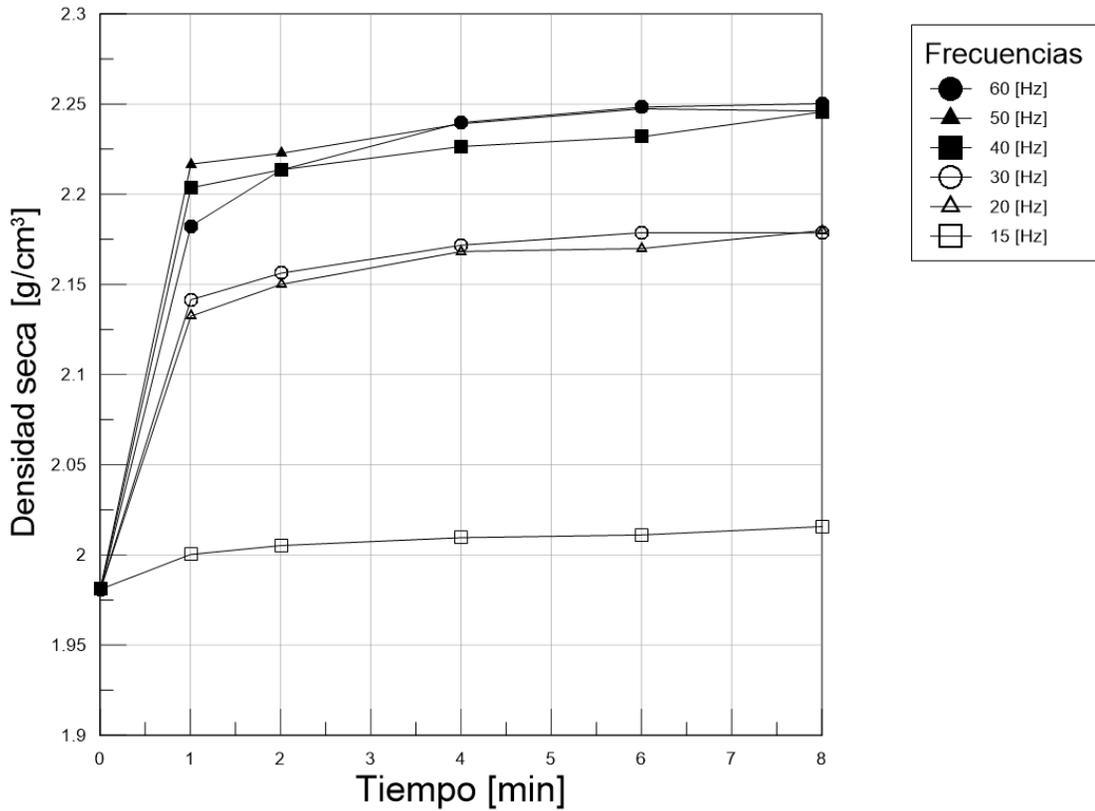


Figura 4.9: Resultados densidades secas de la muestra M-1.

Tabla 4.9: Resultados densidad relativa de la muestra M-1.

Tiempo [min]	Densidad Relativa [%]					
	15 [Hz]	20 [Hz]	30 [Hz]	40 [Hz]	50 [Hz]	60 [Hz]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	8,08	59,34	62,69	84,37	88,74	77,08
2	10,09	65,7	68,98	87,72	90,76	87,76
4	11,89	72,2	73,46	92,10	96,22	96,53
6	12,53	72,76	75,91	93,90	98,95	99,35
8	14,41	76,26	75,84	98,46	98,53	100,00

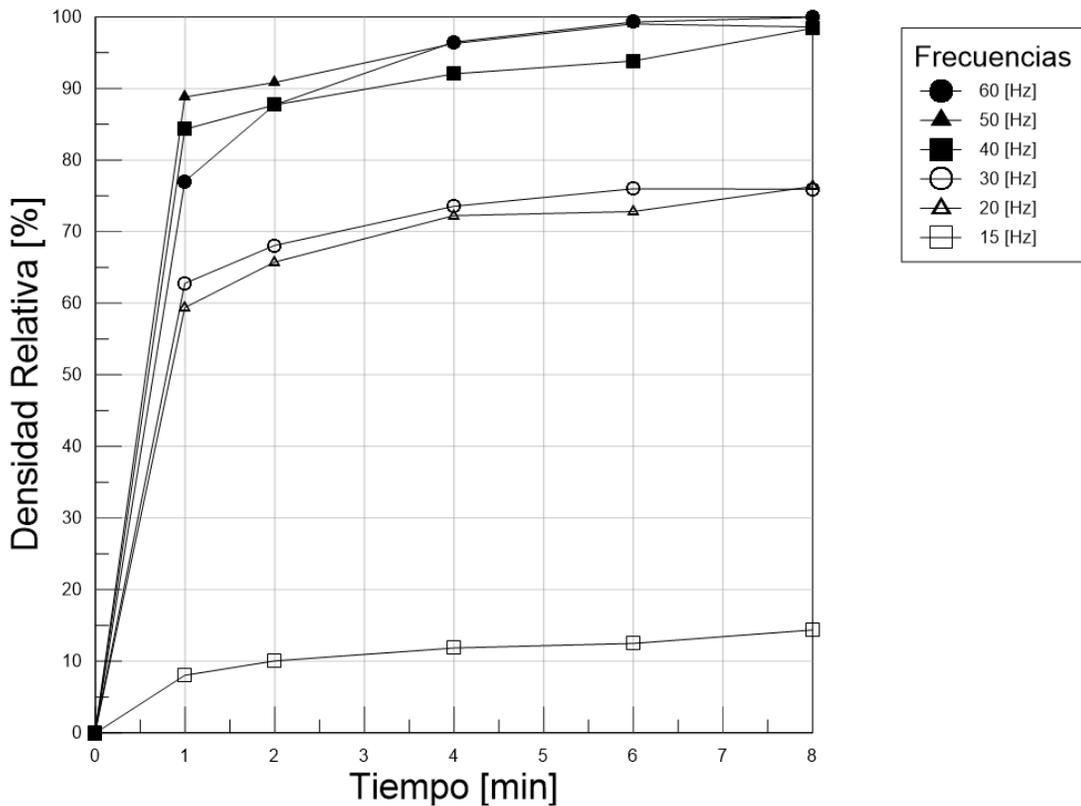


Figura 4.10: Resultados densidad relativa de la muestra M-1.

A partir de la Tabla 4.9 y Figura 4.10 se aprecia que con la gama de frecuencias de vibrado utilizadas se obtienen tres curvas predominantes en el espacio tiempo-densidades relativas. La primera con 15 Hz alcanzando un DR máximo cercado al 15%, la segunda con 20 y 30 Hz consiguiendo un DR máximo igual a 75 % y la tercera con 40, 50 y 60 Hz donde obtiene la densidad máxima.

Por otro lado, se observa que la densidad tiene un comportamiento no lineal en el tiempo donde, en los primeros 2 min, se obtiene la mayor parte de la densificación.

Además, en la Tabla 4.9 se observa que los porcentajes obtenidos a los 4 y 6 min en todas las frecuencias difieren en alrededor de un 3 % en promedio entre sí. Por lo tanto, es adecuado descartar el tiempo de vibración igual a 6 min para las próximas muestras.

A partir de los resultados anteriores, parece apropiado considerar sólo tres frecuencias de vibrado para determinar densidades intermedias de cada material, las cuales corresponden a 15, 30 y 60 Hz.

Por consiguiente, las distintas combinaciones de tiempo y frecuencia de vibrado a considerar se muestran en la Figura 4.11, con las cuales se obtendrán un total de 13

densidades para cada material, donde una corresponden a la mínima, una a la máxima y, el resto, a densidades intermedias.

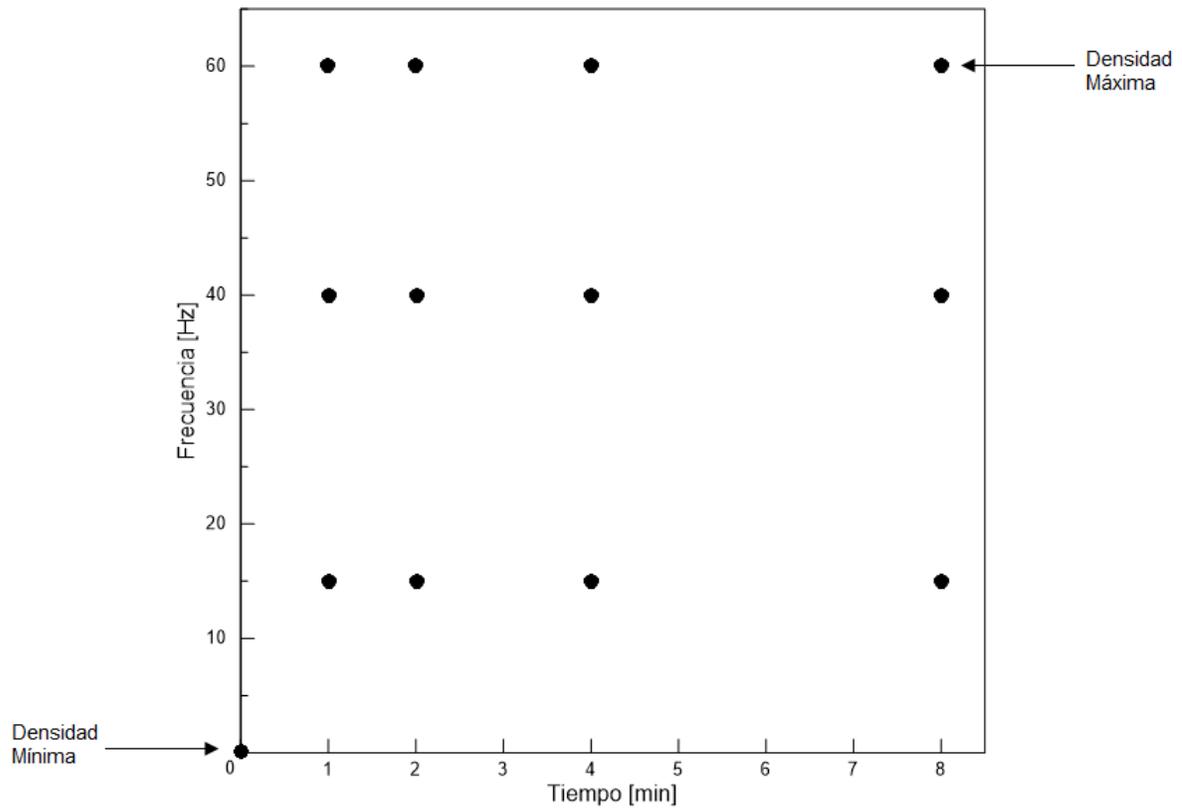


Figura 4.11: Combinaciones finales de frecuencia tiempo a considerar.

Luego, las densidades alcanzadas, por el Grupo 1 de muestras, en distintos tiempos para frecuencias de vibrado iguales a 60, 30 y 15 Hz se presentan de manera gráfica en la Figura 4.12, Figura 4.13 y Figura 4.14, respectivamente

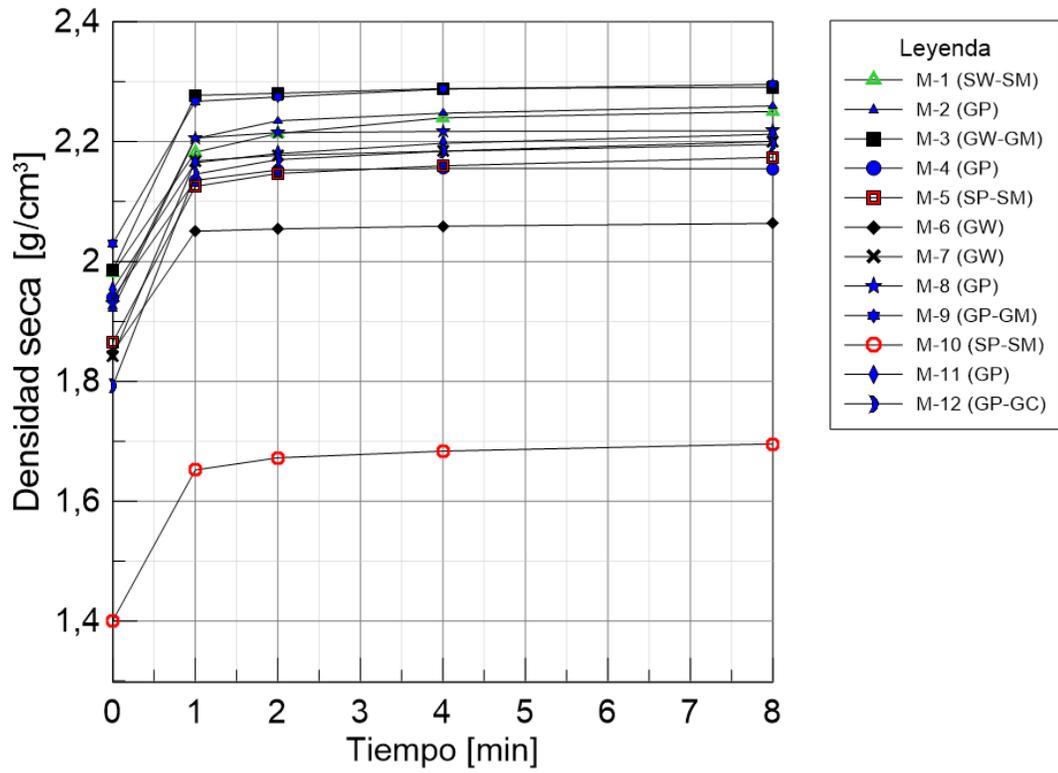


Figura 4.12: Resultados densidades secas vibradas a una frecuencia de 60 Hz.

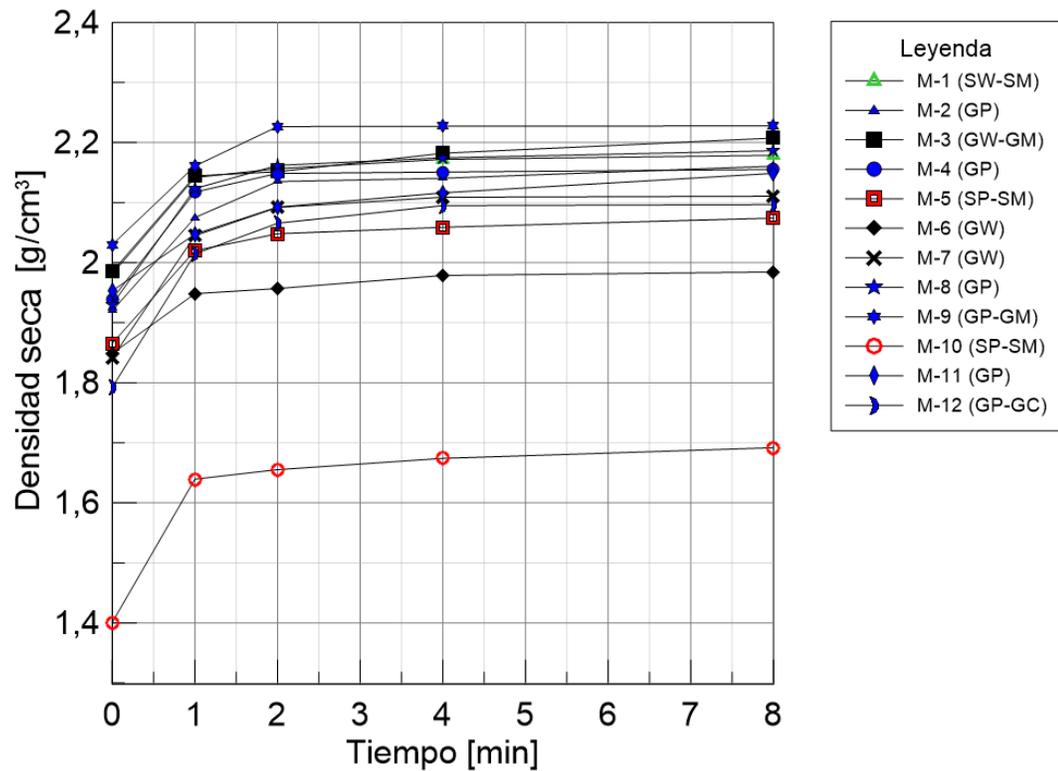


Figura 4.13: Resultados densidades secas vibradas a una frecuencia de 30 Hz.

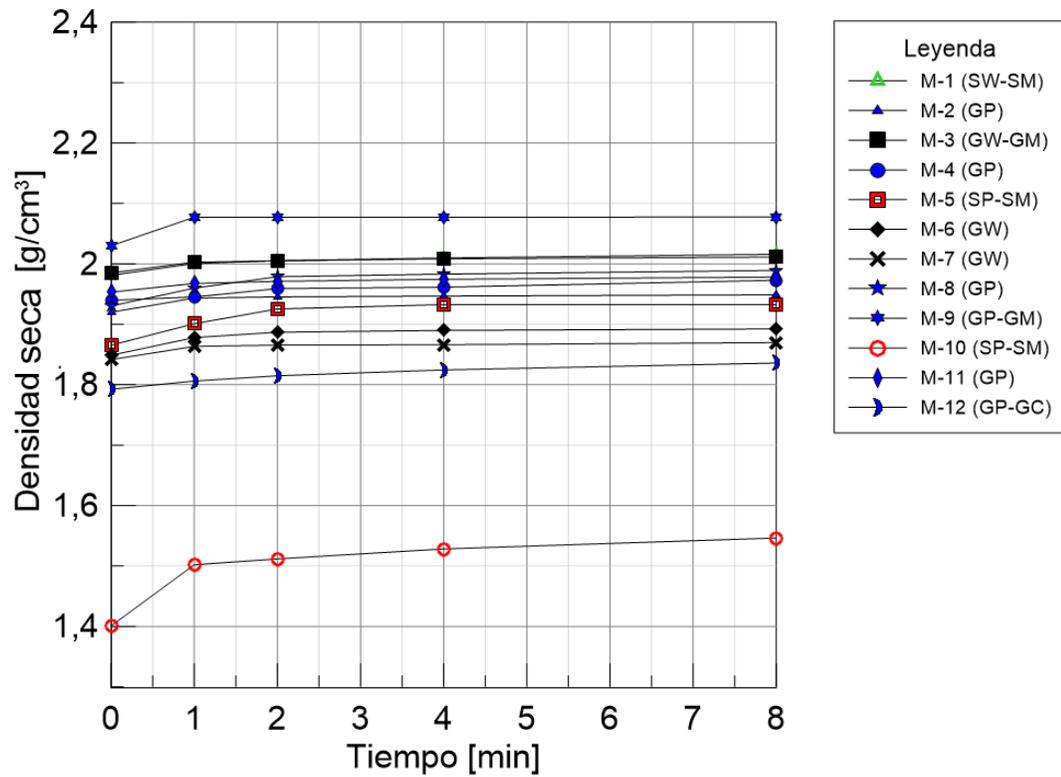


Figura 4.14: Resultados densidades secas vibradas a una frecuencia de 15 Hz.

De la misma manera son presentadas las densidades relativas en la Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17.

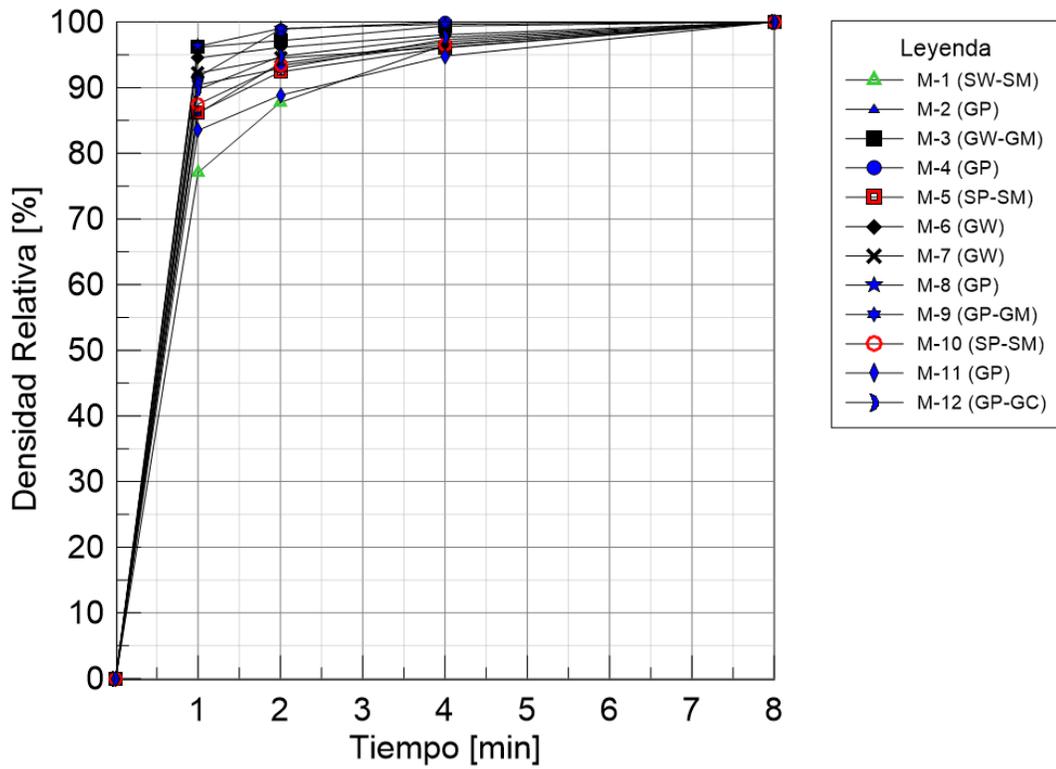


Figura 4.15: Resultados Densidades Relativas vibradas a una frecuencia de 60 Hz.

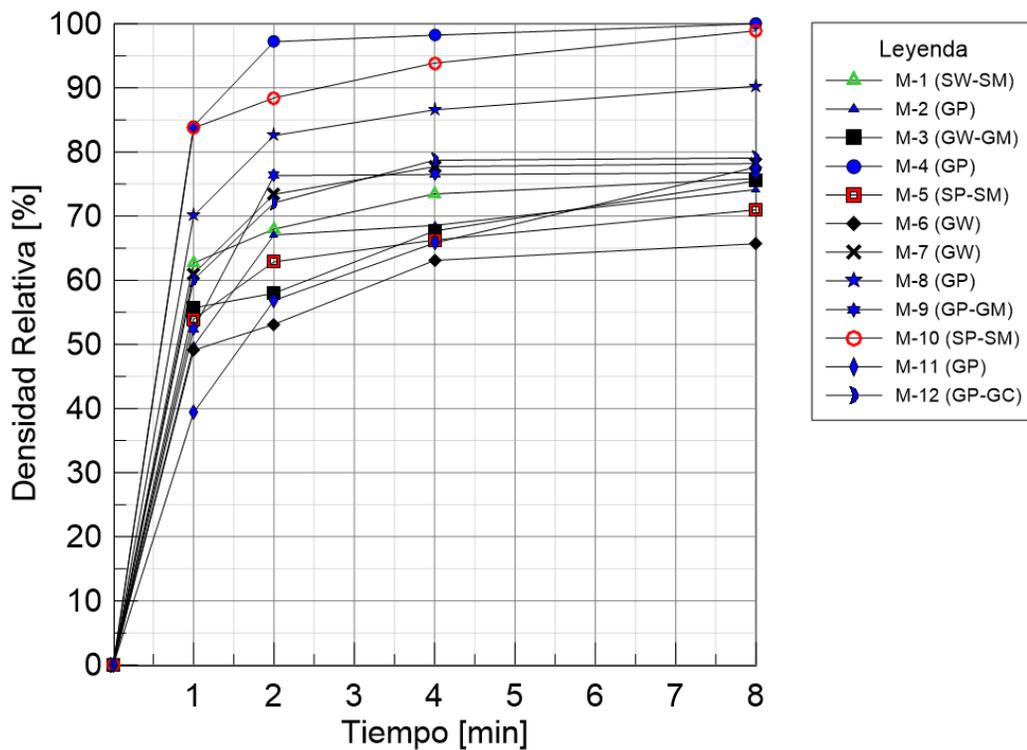


Figura 4.16: Resultados Densidades Relativas vibradas a una frecuencia de 30 Hz.

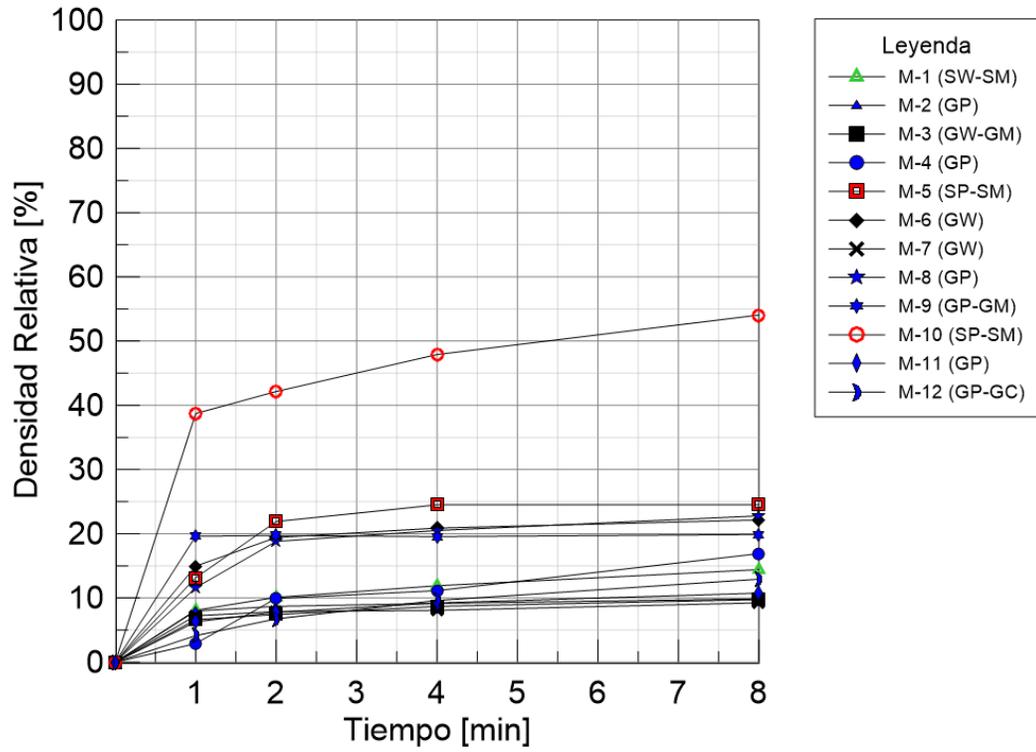


Figura 4.17: Resultados Densidades Relativas vibradas a una frecuencia de 15 Hz.

5. Análisis y discusión de resultados

En el presente capítulo se estudian las densidades alcanzadas en las distintas combinaciones de tiempo y frecuencia de vibrado, de modo de poder proponer 3 configuraciones de estas variables para la elaboración de probetas durante el ensayo CBR.

Además, se analizan los resultados de manera de poder corroborar o descartar las correlaciones entre los distintos parámetros indicados anteriormente o identificar nuevas conexiones que puedan existir, junto con estudiar cómo estas variables influyen en la densidad relativa alcanzada por los materiales a las distintas configuraciones de vibrado.

5.1. Curvas granulométricas

En primer lugar, las curvas granulométricas de las muestras del Grupo 1 y Grupo 2 se comparan con las bandas granulométricas, especificadas por MOP (2018), para materiales utilizados como sub-base y base, como se indica en la Figura 5.1 y Figura 5.2.

Cabe señalar que las bandas para sub-base y base corresponde a los valores de TM-50a y TM-50b, respectivamente, indicados en la Tabla 3.4.

A partir de la Figura 5.1 se observa que la mayoría de los materiales pertenecientes al Grupo 1, contienen partículas más grandes al tamaño máximo establecido por las bandas granulométricas, tanto para sub-bases como bases. Además, se observa que las curvas de dos muestras clasificadas como arenas difieren ampliamente de las bandas.

En relación al Grupo 2, en la Figura 5.2, se aprecia que las curvas de los cuatro materiales se ajustan bastante bien a las bandas granulométricas para sub-base y base, pero contienen una porción de partículas más grandes al tamaño máximo permitido.

Luego, se comparan las curvas y bandas granulométricas considerando solamente la fracción menor al tamiz 3/4" (19 mm) utilizada para el ensayo CBR, para las muestras del Grupo 1 y Grupo 2 en la Figura 5.3 y Figura 5.4, respectivamente.

En la Figura 5.3 se observa que, del Grupo 1, dos muestras clasificadas como arenas difieren ampliamente de las bandas granulométricas para sub-base y base y una muestra clasificada como grava contiene una fracción fuera de estas bandas. Con respecto a las muestras del Grupo 2, en la Figura 5.4 se aprecia que todos los materiales están contenidos dentro de las bandas especificadas para sub-base y base.

Por lo tanto, la mayoría de las muestras utilizadas en la investigación se aproxima, en características granulométricas, a los materiales utilizados como sub-base o base según MOP (2018), especialmente en las fracciones menores al tamiz 3/4" (19 mm), pero a los cuales no es posible determinar, según normativa, el valor de CBR.

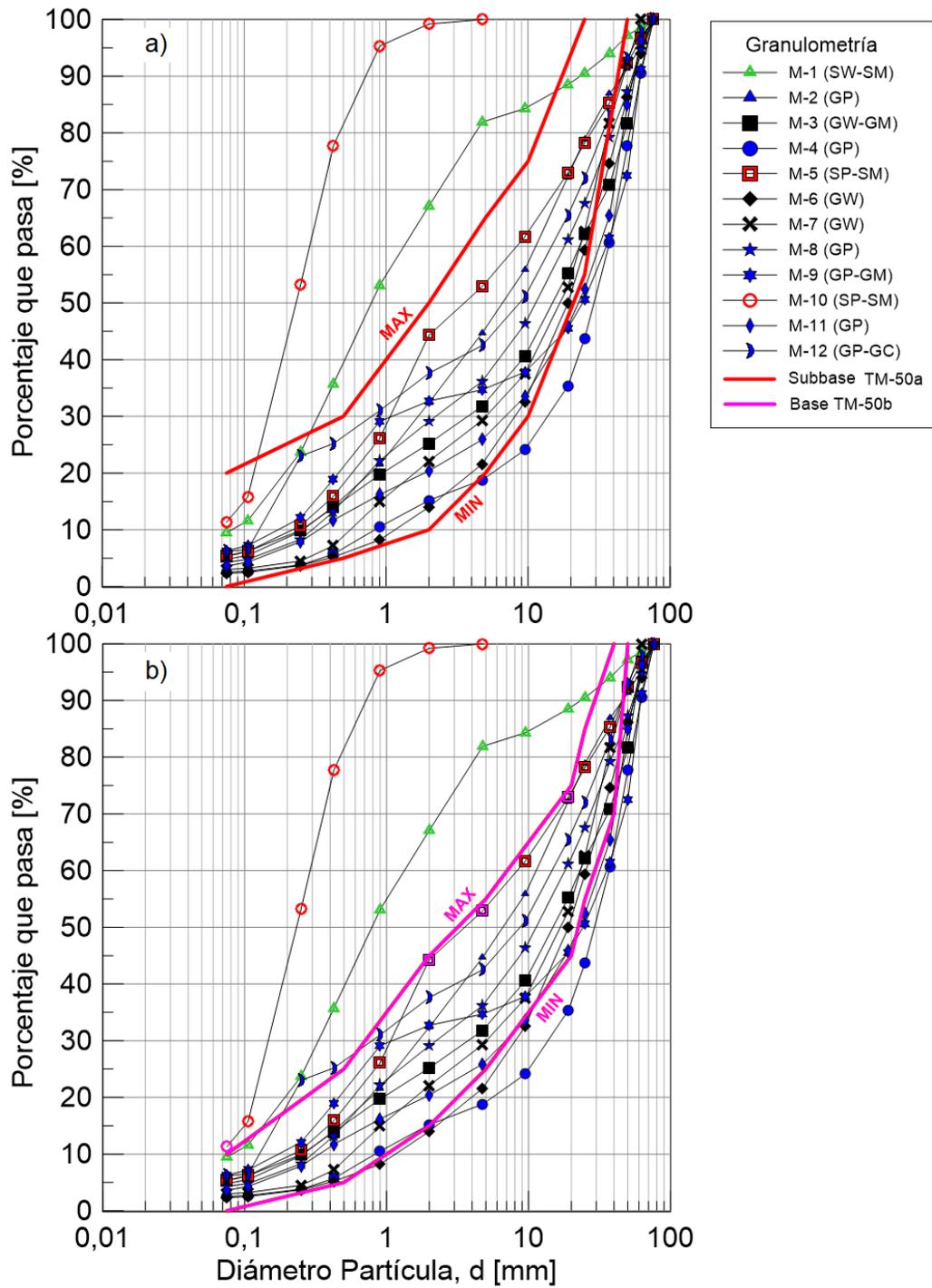


Figura 5.1: Comparación curvas granulométricas Grupo 1 vs bandas granulométricas especificadas según MOP (2018). a) Sub-base, b) Base

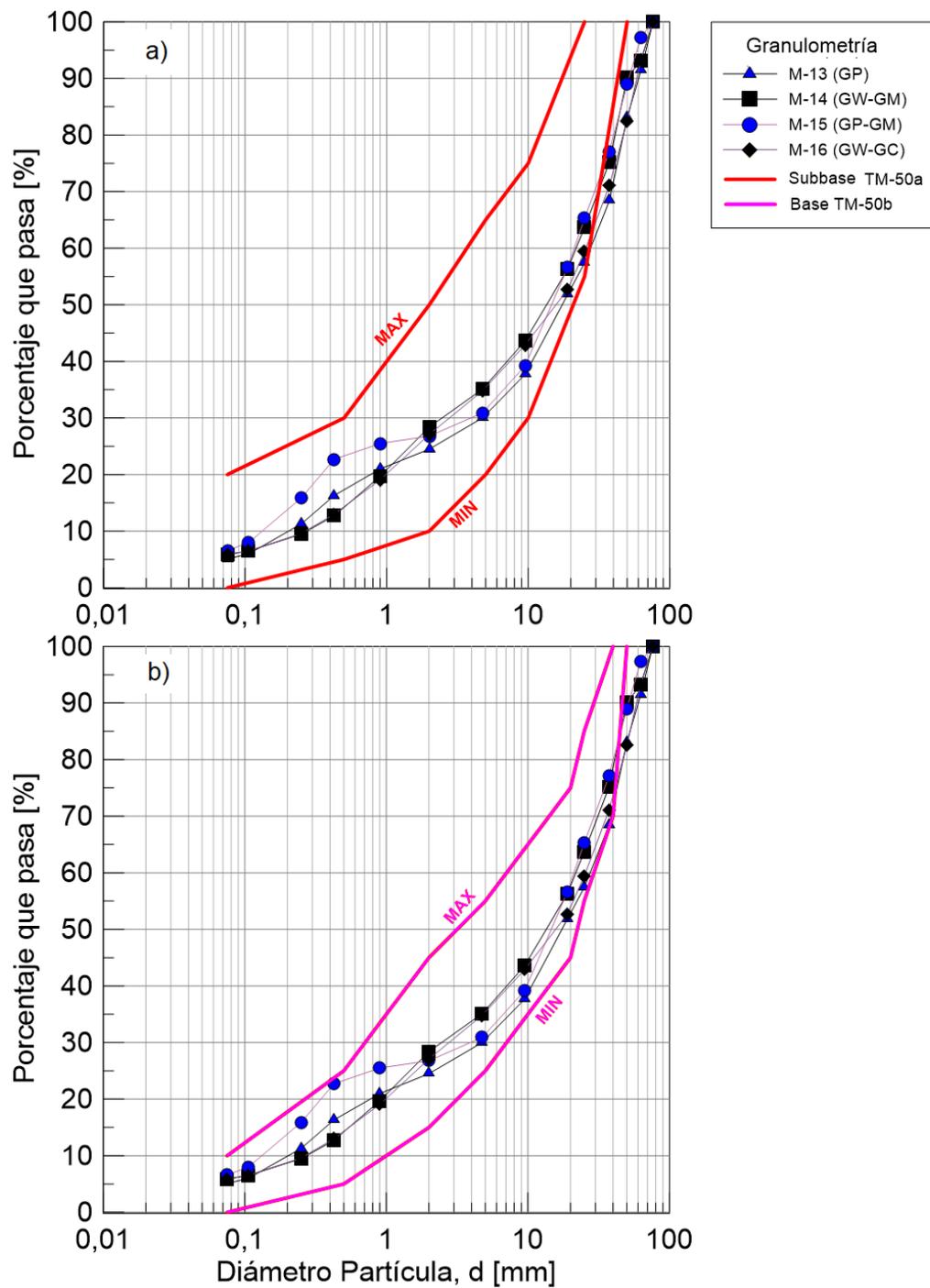


Figura 5.2: Comparación curvas granulométricas Grupo 2 vs bandas granulométricas especificadas según MOP (2018). a) Sub-base, b) Base.

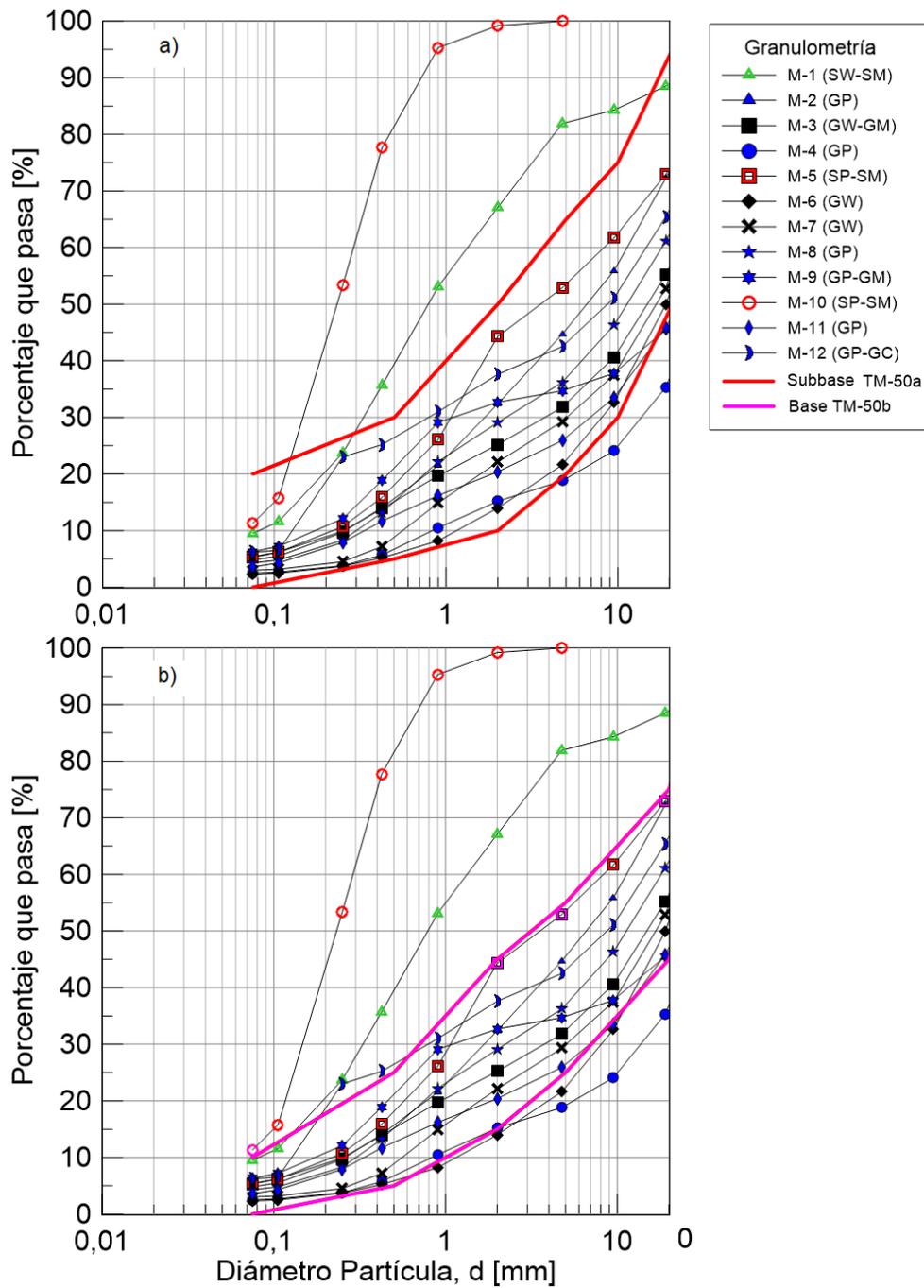


Figura 5.3: Comparación curvas granulométricas Grupo 1 cortadas en tamiz 3/4" vs bandas granulométricas especificadas según MOP (2018). a) Sub-base, b) Base.

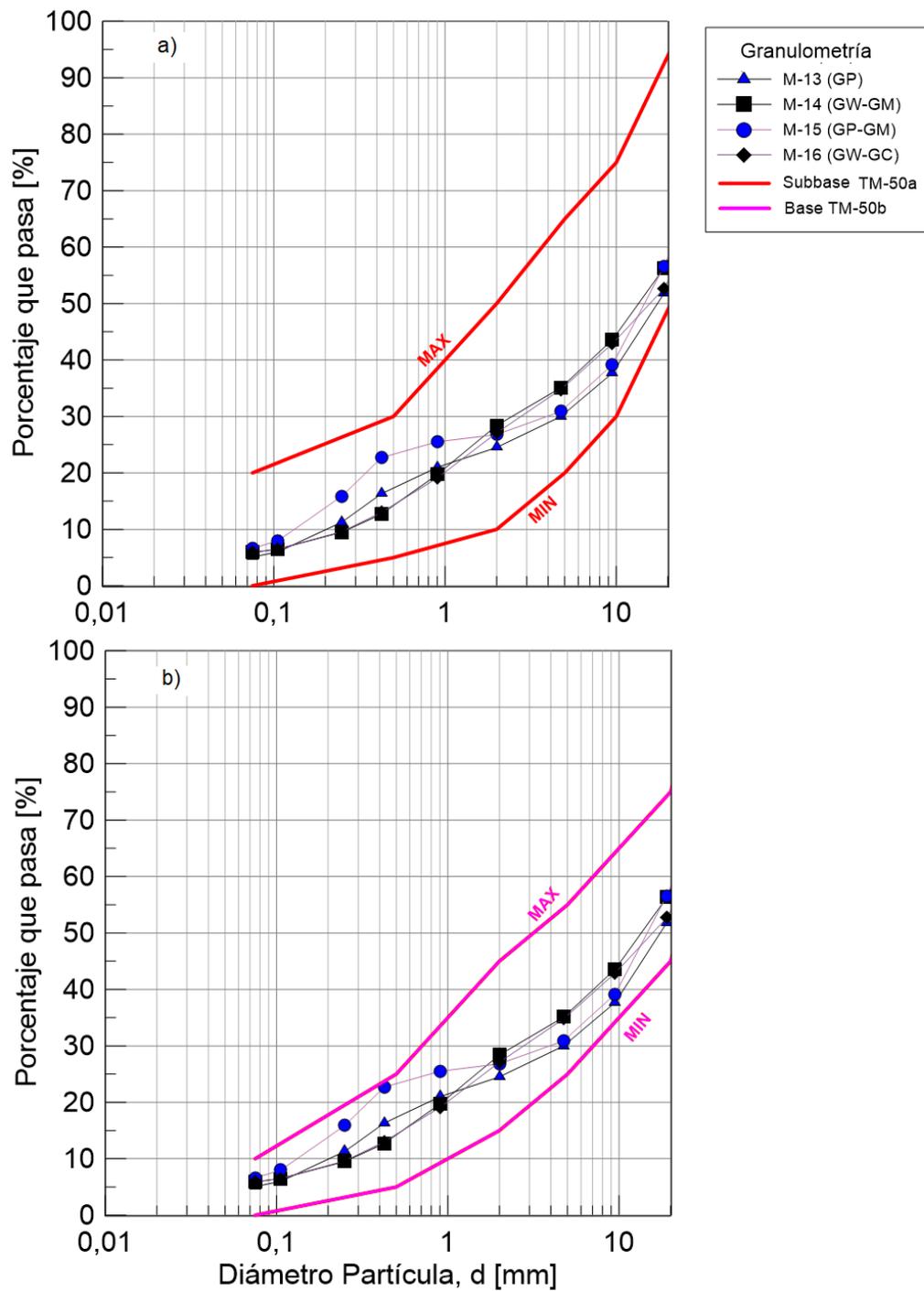


Figura 5.4: Comparación curvas granulométricas Grupo 2 cortadas en tamiz 3/4" vs bandas granulométricas especificadas según MOP (2018). a) Sub-base, b) Base.

5.2. Curvas de densidad según tiempo y frecuencia en mesa vibratoria

En primer lugar, a partir de los resultados de las densidades alcanzadas, por el Grupo 1 de muestras, a diferentes frecuencias y tiempos de vibrado, presentados en la Figura 4.12, Figura 4.13 y Figura 4.14, se aprecia un comportamiento no lineal, con respecto al tiempo, donde no existen aumentos significativos de la densidad a partir del minuto 4 de vibrado, aproximadamente, en todas las frecuencias estudiadas. Esto concuerda con los estudios de Pettibone & Hardin (1964), los que indicaron que, a partir de cierto tiempo de vibración, los materiales no presentan una mayor densificación.

Cabe señalar, que la mayoría de los valores de las densidades se encuentran en un rango acotado, en todos los casos estudiados, a excepción de la muestra M-10, correspondiente a una arena pobremente gradada, SP-SM, la cual presenta valores significativamente menores al resto. Esto podría deberse a que el tamaño máximo de partículas en este material es de 5 mm, como se aprecia en su curva granulométrica presentada en la Figura 4.6, a diferencia del resto que presentan partículas de gran tamaño, por lo tanto, los resultados correspondientes a este material no serán considerados durante el análisis.

Con respecto a los resultados de las densidades relativas presentados en la Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17, se confeccionan histogramas para cada configuración de tiempo y frecuencia de vibrado, como se muestra en la Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7, donde los datos se ajustan a una distribución normal, determinando los valores de la media y desviación estándar que se presentan en la Tabla 5.1, Tabla 5.2 y Tabla 5.3.

Para el caso de frecuencia de vibrado igual a 15 Hz, se realizan dos análisis. En el primero se contempla el total de muestras y en el segundo no se consideran los resultados de la muestra M-10.

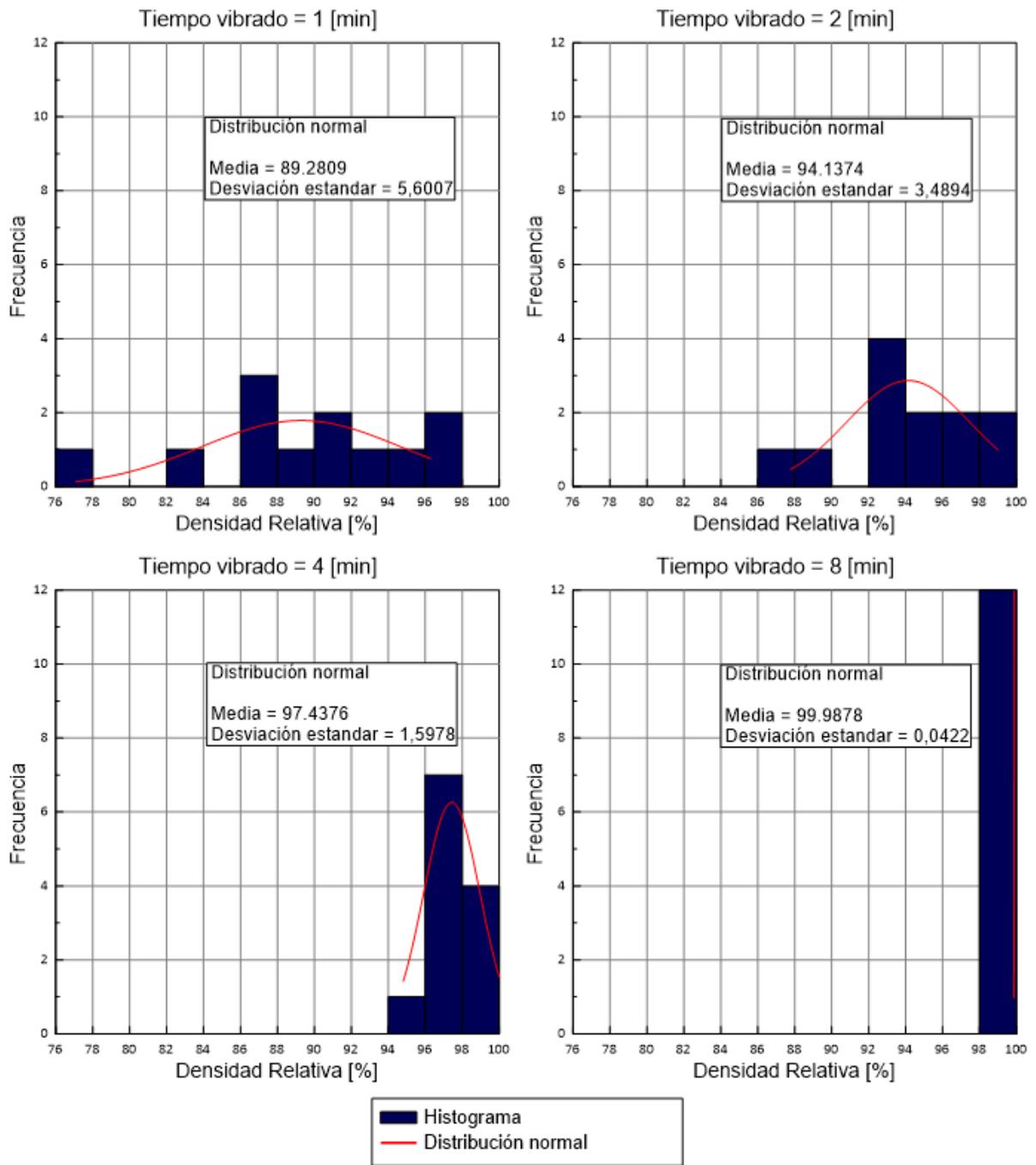


Figura 5.5: Histogramas de densidades relativas para distintos tiempos a una frecuencia de 60 Hz.

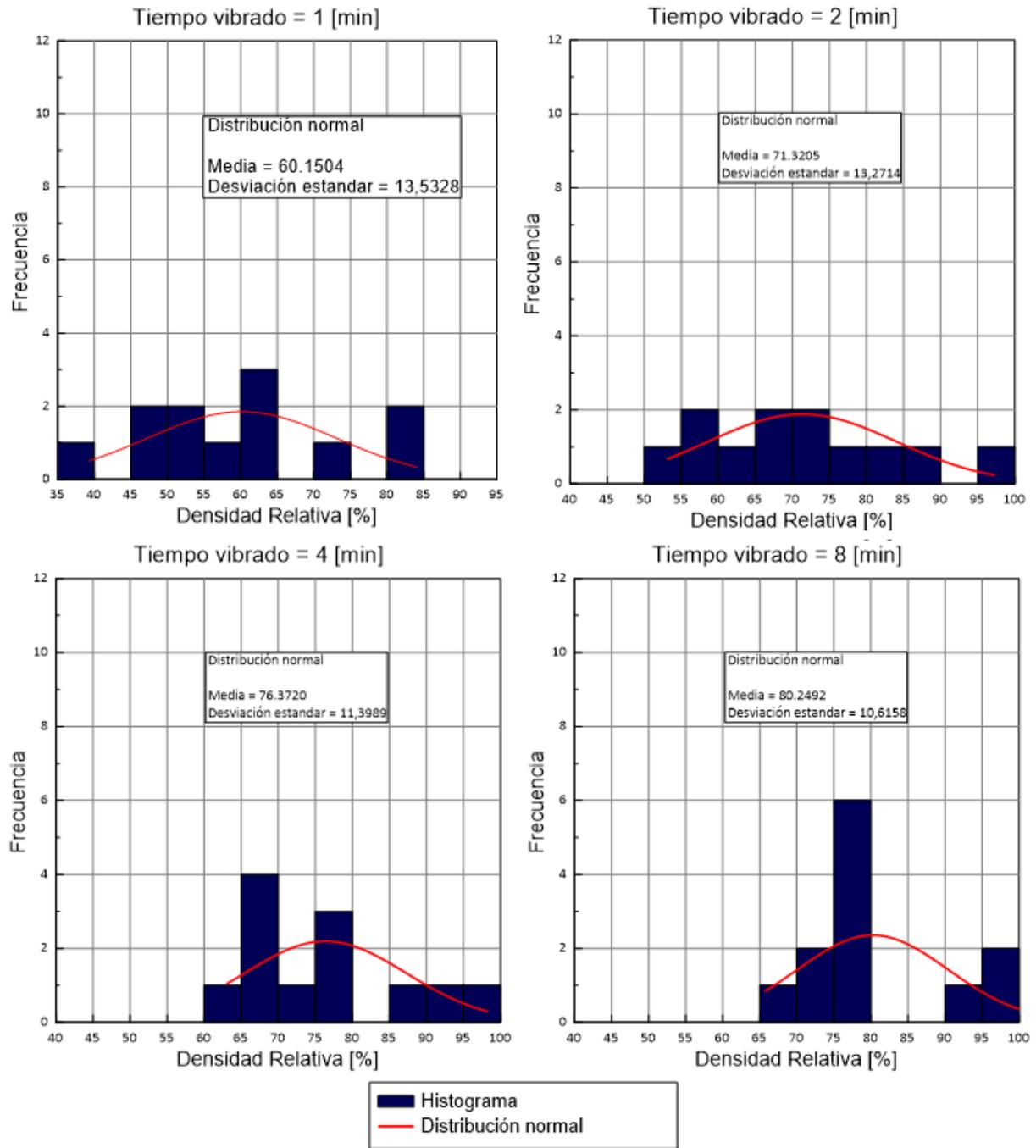


Figura 5.6: Histogramas de densidades relativas para distintos tiempos a una frecuencia de 30 Hz.

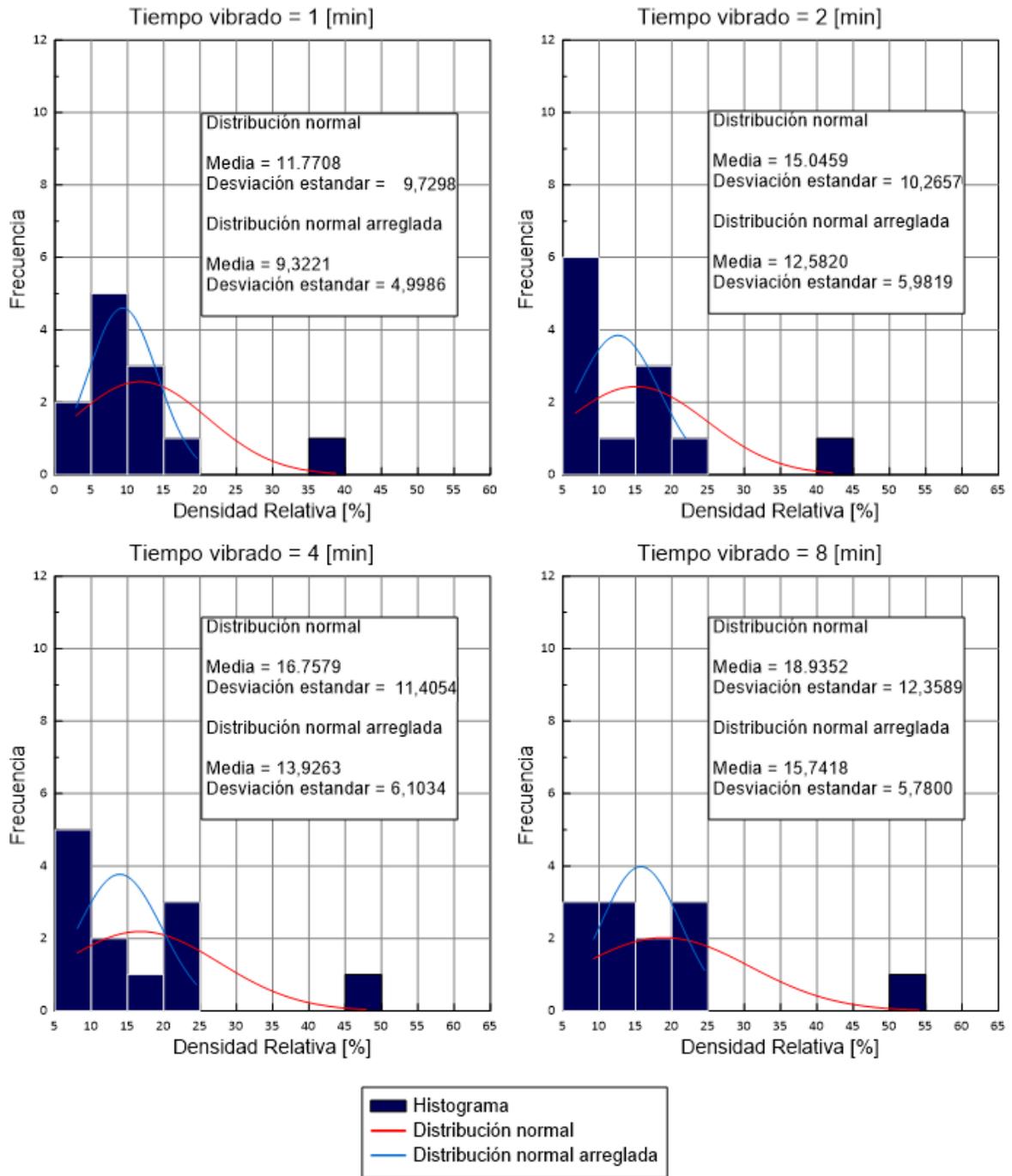


Figura 5.7: Histogramas de densidades relativas para distintos tiempos a una frecuencia de 15 Hz.

Tabla 5.1: Resultados análisis de histogramas para frecuencia de vibrado de 60 Hz.

Tiempo [min]	Media [%]	Desviación estándar [%]
1	89,28	5,60
2	94,13	3,49
4	97,43	1,60
8	99,99	0,04

Tabla 5.2: Resultados análisis de histogramas para frecuencia de vibrado de 30 Hz.

Tiempo [min]	Media [%]	Desviación estándar [%]
1	60,15	13,50
2	71,32	13,27
4	76,37	11,40
8	80,25	10,62

Tabla 5.3: Resultados análisis de histogramas para frecuencia de vibrado de 15 Hz.

Tiempo [min]	Total de muestras		Sin muestra M-10	
	Media [%]	Desviación estándar [%]	Media [%]	Desviación estándar [%]
1	11,77	9,73	9,32	5,00
2	15,05	10,27	12,58	5,98
4	16,76	11,41	13,92	6,10
8	18,94	12,36	15,74	5,78

A partir de los resultados, se puede señalar que:

- Para las vibraciones a una frecuencia de 60 Hz a distintos tiempos se obtienen valores típicos de densidades relativas entre DR = 80 y 100 % con bajos valores de desviación estándar, los que disminuyen para mayores tiempos.
- Las vibraciones a una frecuencia de 30 Hz, presentan la mayor dispersión de los resultados, obteniéndose típicamente valores de densidad relativa entre DR = 60 y 90 %, sólo en algunos casos entre DR = 39 y 60%.

- Las vibraciones a una frecuencia de 15 Hz, presentan resultados de densidad relativa en un rango acotado, donde los valores típicos se encuentran entre DR = 7 y 24%, sin considerar la muestra M-10, con excepción de las vibradas durante 1 minuto, que entrega resultados entre DR = 3 y 7%.

Luego, en función de los resultados anteriormente señalados se proponen 3 configuraciones preliminares de tiempo y frecuencia de vibrado para confeccionar las probetas a utilizar durante el ensayo CBR:

- a) La primera configuración corresponde a probetas que podrán ser compactadas por vibración a una densidad relativa igual al 100 %, la cual se logra vibrando el material durante 8 minutos a 60 Hz.
- b) La segunda configuración apunta a obtener un DR cercano al 80 %, el cual se alcanza con 8 minutos a una frecuencia de 30 Hz.
- c) La tercera configuración pretende obtener una densidad relativa menor, por lo que se considera 2 minutos a 15 Hz, con la cual se obtiene, según los análisis de histogramas realizados previamente, un DR cercano al 15 % y presenta una baja dispersión.

En relación a las tolerancias, para los tiempos de vibrado, éstas se determinan manteniendo la relación entre el tiempo de vibrado utilizado para determinar la densidad máxima y la tolerancia respectiva, indicado en la norma ASTM D4253-16e¹. Por lo tanto, la tolerancia para una vibración durante 2 min corresponde a $\pm 0,07$ min. De igual manera, se determinan las tolerancias para las distintas frecuencias de vibrado, por lo tanto, las tolerancias para las frecuencias de 60, 30 y 15 Hz son ± 2 , ± 1 y $\pm 0,5$ Hz, respectivamente.

A modo de resumen, las configuraciones indicadas junto a las tolerancias se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Configuraciones preliminares de tiempo y frecuencia para confección de probetas para ensayo CBR.

Configuración	Tiempo [min]	Frecuencia [Hz]
1	$8 \pm 0,25$	60 ± 2
2	$8 \pm 0,25$	30 ± 1
3	$2 \pm 0,07$	$15 \pm 0,5$

Posteriormente, se determinan las densidades relativas alcanzadas en las tres configuraciones señaladas anteriormente, para los 4 materiales correspondientes al segundo grupo de muestras, la cuales son: M-13; M-14; M-15 y M-16.

Los resultados de estos ensayos se muestran en la Figura 5.8 junto a la Tabla 5.5, donde se indican los valores promedios y desviaciones.

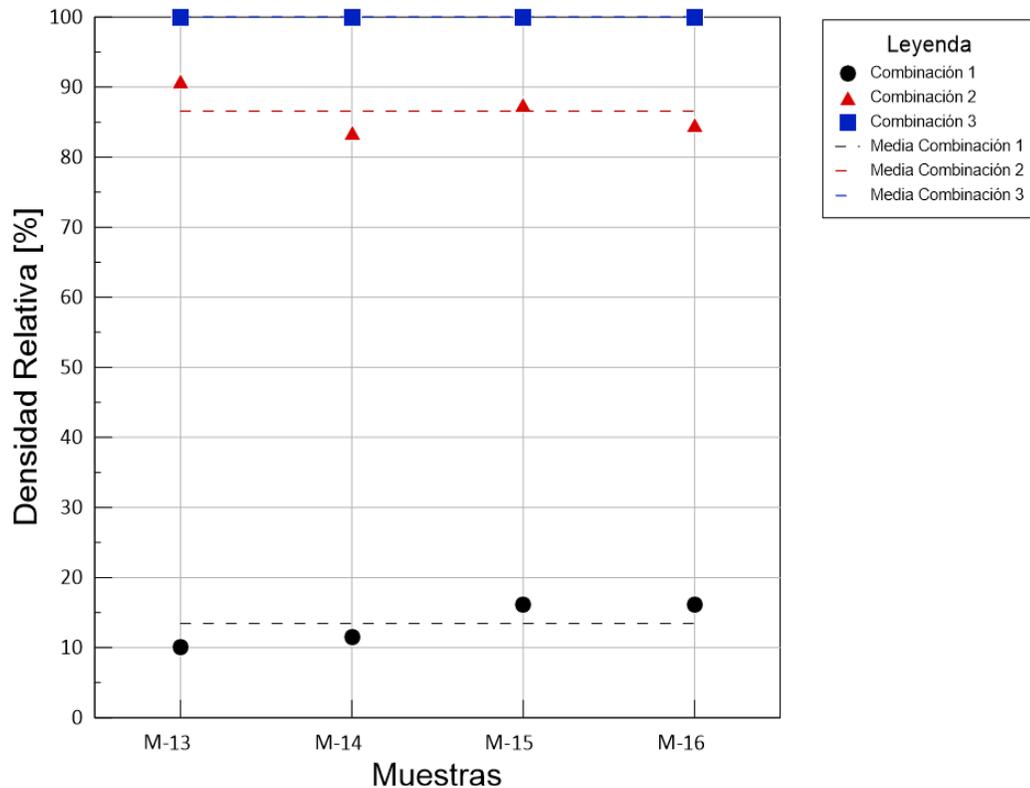


Figura 5.8: Densidades relativas alcanzadas en las distintas configuraciones para el Grupo 2 de muestras.

Aquí se aprecia que en la configuración 2 se obtienen valores mayores al esperado, donde la media es de 86 % del DR, superando en un 6 % el valor objetivo, pero dentro del rango de dispersión para esta configuración expuesto en la Tabla 5.2.

En relación a la configuración 3, se obtiene una media del 13 % del DR, 2 % menor que el esperado, pero dentro del rango de dispersión para esta configuración expuesto en la Tabla 5.2.

Cabe señalar, que en las distintas configuraciones se obtuvieron valores consistentes, con bajos valores en la dispersión.

Tabla 5.5: Densidades relativas alcanzadas en las distintas configuraciones para el Grupo 2 de muestras.

Muestras	Densidad Relativa [%]		
	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3
M-13	100,00	90,84	10,13
M-14	100,00	83,44	11,42
M-15	100,00	87,49	16,14
M-16	100,00	84,55	16,08
Media	100,00	86,58	13,44
Desviación estándar	0,00	3,32	3,13

Con estas configuraciones de vibrado es posible obtener un set de 3 probetas con distintas densidades, con las cuales se puede realizar el ensayo de penetración CBR para una densidad específica, realizando una interpolación lineal entre los resultados.

Sin embargo, estas configuraciones producen un gran intervalo de densidades sin información, entre 80 y 15 % de DR, por lo que realizar una interpolación lineal en este rango implica incertidumbre en el resultado, implicando determinar una nueva configuración de vibrado para obtener una densidad dentro de este intervalo con el objetivo de disminuir el error.

5.3. Correlación entre densidad máxima y mínima

Se grafican los valores de las densidades máximas secas del total de los materiales sin considerar la muestra M-10, frente a las densidades mínimas secas alcanzadas de los distintos materiales, categorizados según la clasificación USCS.

Aquí se realiza una regresión lineal entre las densidades, la cual queda definida en la Ecuación (5.1), donde el ajuste presenta un bajo valor en el coeficiente de correlación. Sin embargo, se puede apreciar una tendencia de mayores valores de densidades máximas secas para densidades mínimas secas más altas.

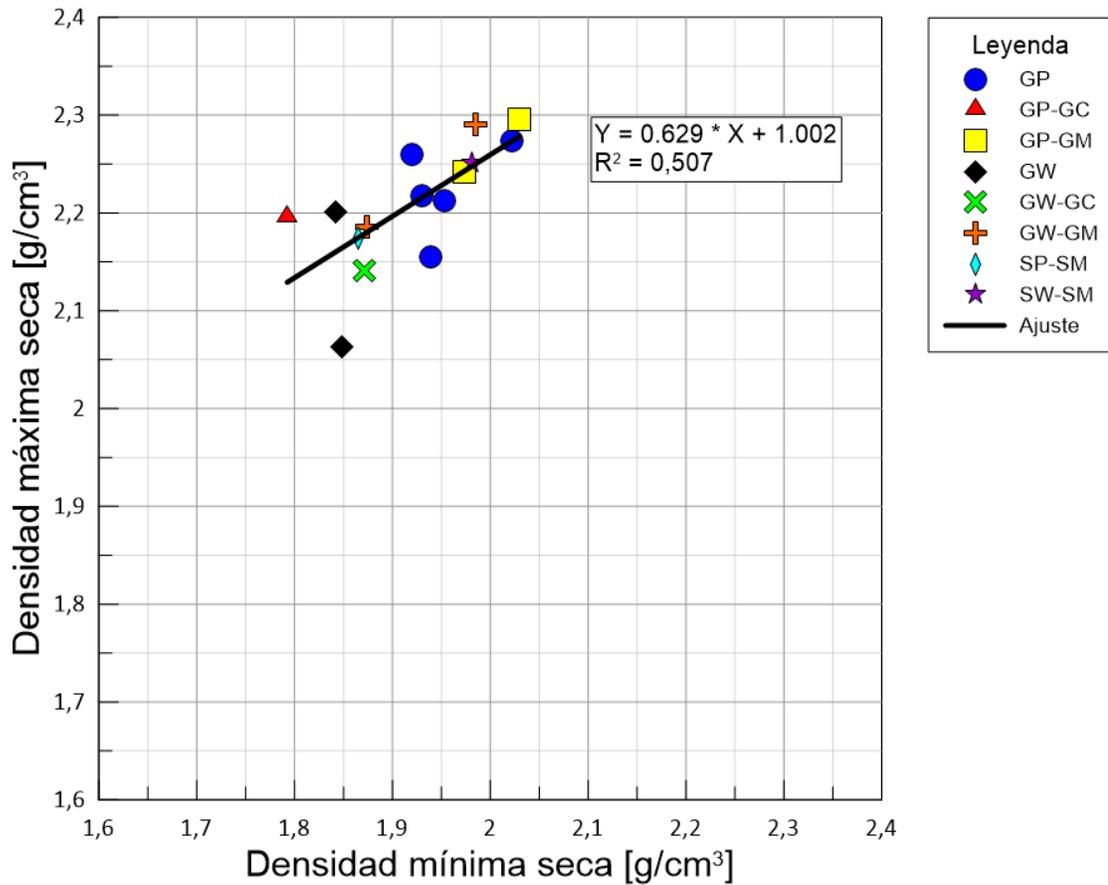


Figura 5.9: Correlación lineal entre la densidad máxima seca, $\gamma_{d \max}$, y densidad mínima seca, $\gamma_{d \min}$, sin considerar muestra M-10.

$$\gamma_{max} = 0,629 \gamma_{min} + 1,002 \quad \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (5.1)$$

En términos de índice de vacío, se comparan los valores de e_{\min} versus e_{\max} y se contrastan con los resultados obtenidos por otros autores para distintos tipos de materiales, como se expone en la Figura 5.10.

Nuevamente se realiza una regresión lineal a partir de los resultados, la cual queda definida según la Ecuación (5.2), donde el ajuste presenta una bajo valor en el coeficiente de correlación. Sin embargo, los resultados concuerdan con los expuestos por De La Hoz (2007), obteniendo valores de e_{\min} y e_{\max} para gravas en el mismo rango y una relación directa entre estas variables.

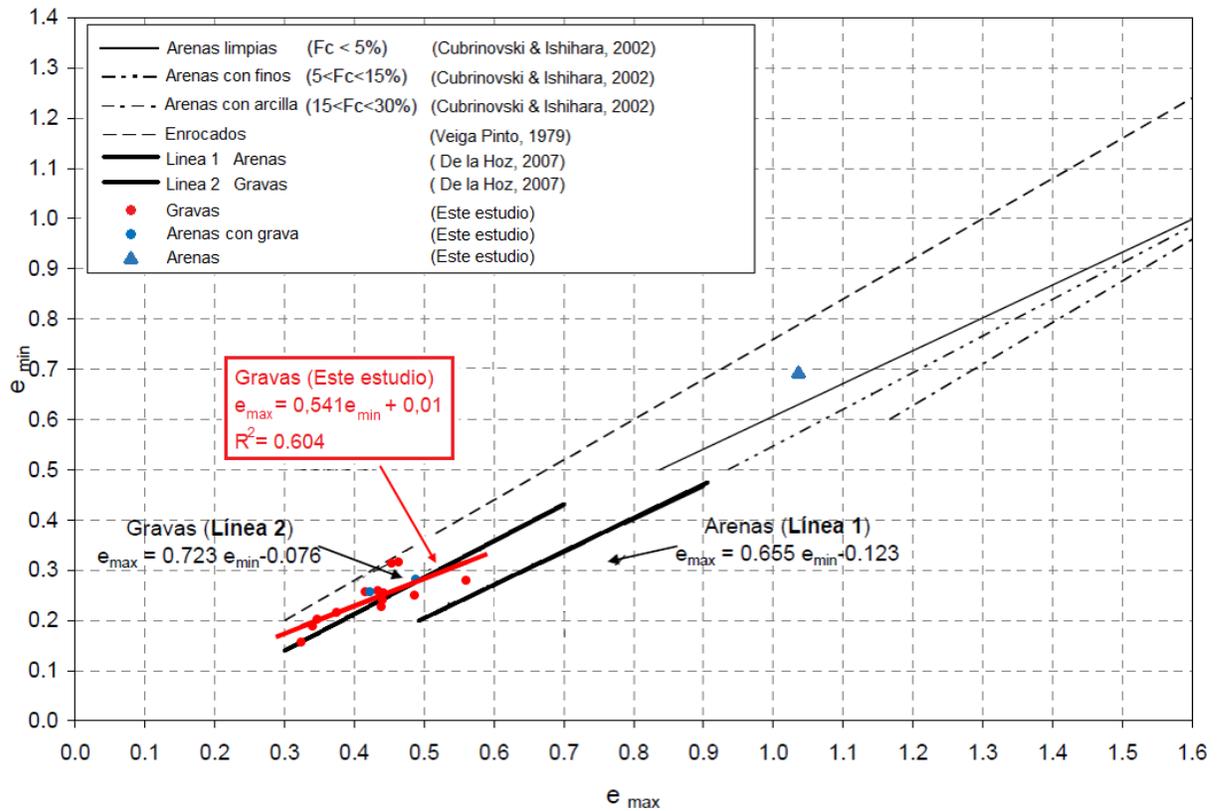


Figura 5.10: Comparación resultados obtenidos del total de muestras entre índice de vacío mínimo, e_{min} , vs índice de vacío máximo, e_{max} , y diferentes autores.

$$e_{min} = 0,541 e_{max} + 0,01 \quad \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (5.2)$$

5.4. Influencia de la gradación en la densidad y densidad relativa

- **Coficiente de uniformidad C_u**

En primer lugar, se grafican las densidades máximas secas alcanzadas por el total de materiales, sin considerar la muestra M-10, versus los coeficientes de uniformidad de las curvas granulométricas de cada material como se aprecia en la Figura 5.11.

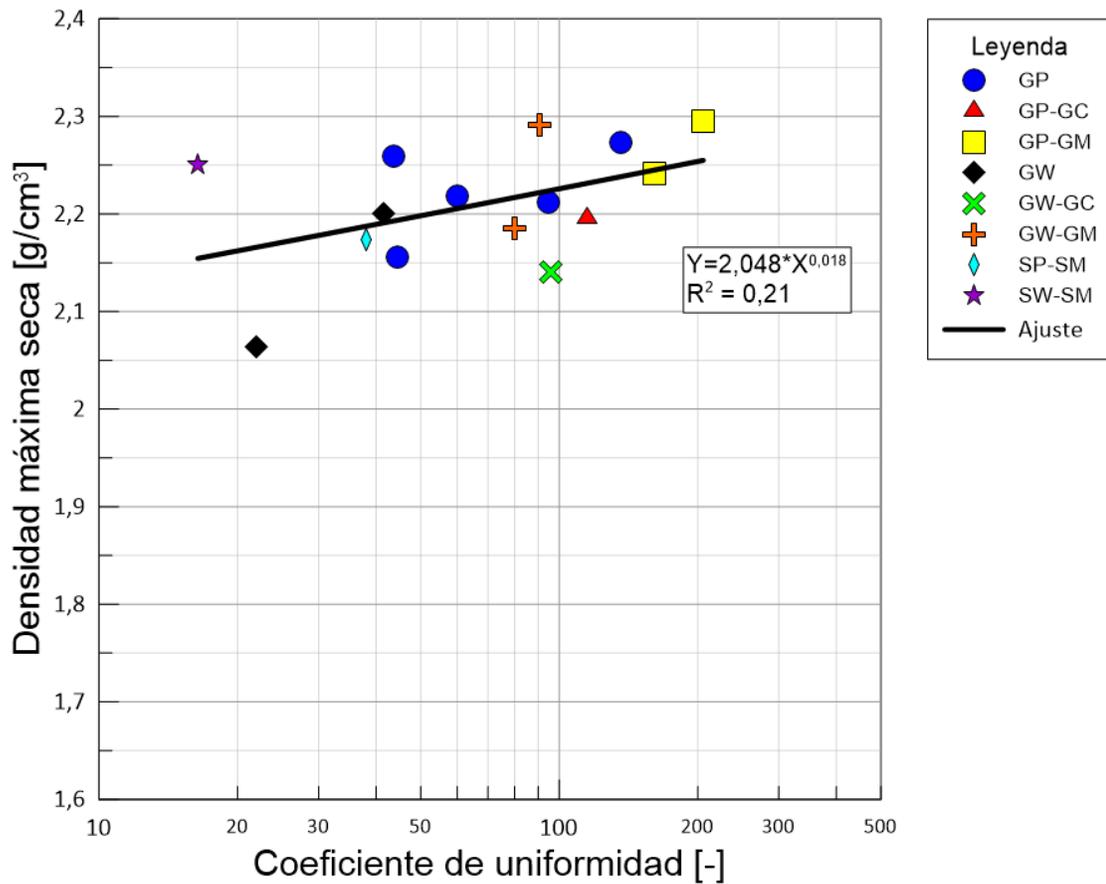


Figura 5.11: Correlación entre la densidad máxima seca, $\gamma_{d \max}$, y el coeficiente de uniformidad, C_u , sin considerar muestra M-10.

A partir de la figura anterior se observa que no es posible establecer una clara relación entre estas variables, donde los valores presentan una gran dispersión que se ve reflejada en un coeficiente de correlación bajo para el ajuste realizado.

En la Figura 5.12, estos mismos resultados se contrastan con los presentados por Kezdi (1979). Aquí, se logra apreciar que los valores de coeficiente de uniformidad obtenidos se encuentran en un rango acotado, a diferencia de los presentados por el autor que cubren un rango mayor. Sin embargo, se ajustan bastante bien a la curva propuesta por dicho autor.

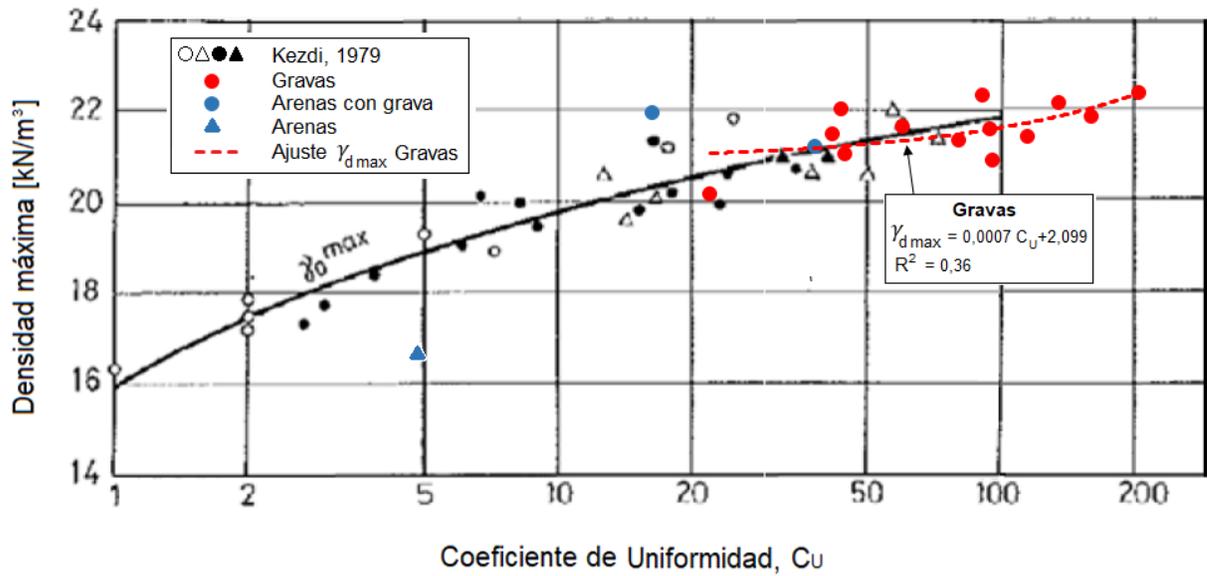


Figura 5.12: Comparación resultados obtenidos de densidad máxima del total de muestras vs coeficiente de uniformidad y Kezdi (1979).

Luego, se realiza una comparación de los resultados en términos de índices de vacíos mínimo y máximo con respecto a investigaciones realizadas anteriormente por diferentes autores.

En la Figura 5.13 se contrastan los resultados obtenidos de índice de vacío mínimo y máximo en función del coeficiente de uniformidad con los presentados por Youd (1973). En este gráfico se puede observar que los valores de C_U obtenidos se encuentran en un rango de valores mayores en relación a los presentados por el autor, el cual expone una relación inversa entre estos parámetros. Sin embargo, se puede deducir que para valores mayores de C_U los índices de vacío máximo y mínimo tienden a converger a valores únicos.

Esto último también se logra apreciar en la Figura 5.14, en la cual se contrastan los resultados obtenidos con los exhibidos por Biarez (1994), donde compara valores de e_{\min} versus un rango mayor de valores de C_U .

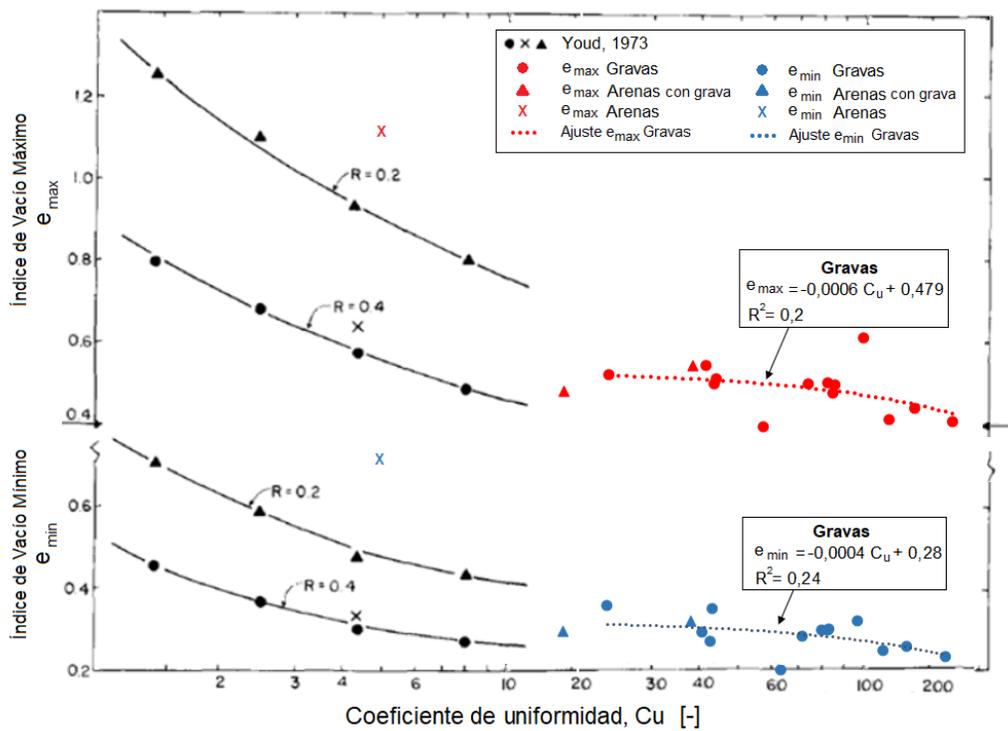


Figura 5.13: Comparación resultados obtenidos de índices de vacíos mínimo y máximo del total de muestras vs coeficiente de uniformidad y Youd (1973).

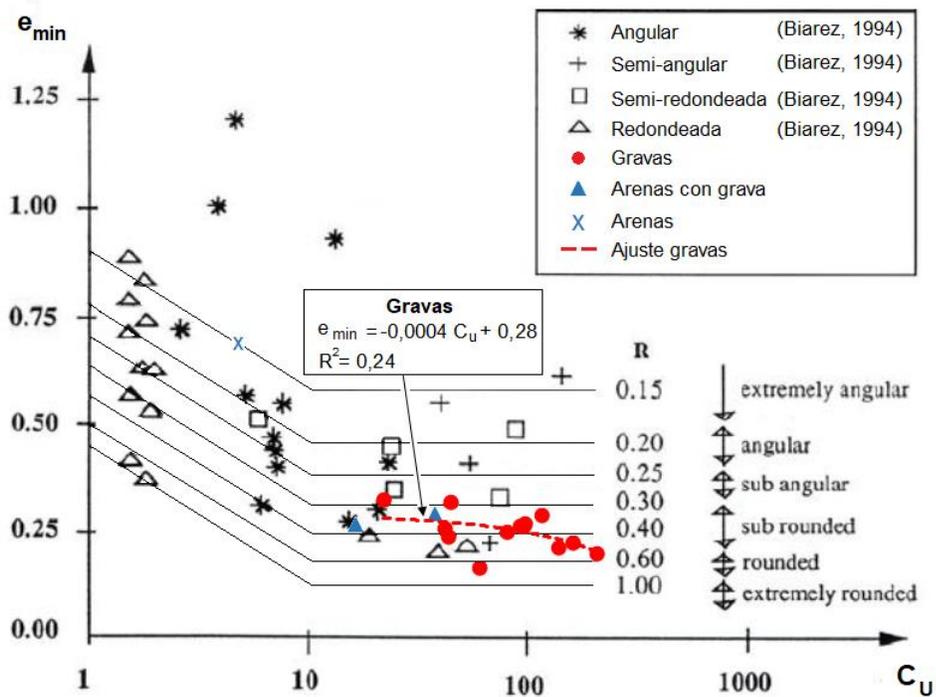


Figura 5.14: Comparación resultados obtenidos de índice de vacío mínimo del total de muestras vs coeficiente de uniformidad y Biarez (1994).

Por último, en la Figura 5.15, se compara la densidad relativa alcanzada por los materiales del Grupo 1, sin considerar la muestra M-10, para las diferentes configuraciones de vibrado versus los valores del coeficiente de uniformidad.

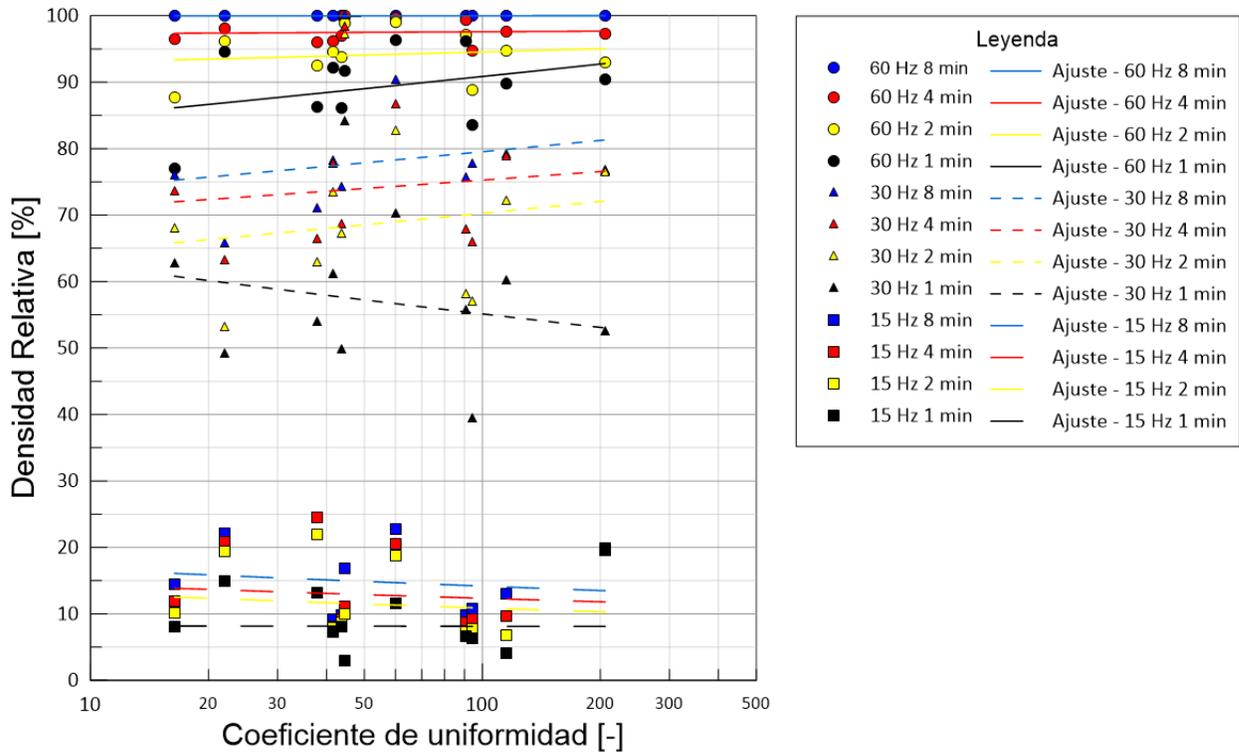


Figura 5.15: Densidad relativa del Grupo 1, sin muestra M-10, para las distintas configuraciones de vibrado versus coeficiente de uniformidad.

A partir del gráfico anterior, no es posible observar tendencia alguna entre estas variables, donde los valores exhiben una gran dispersión, por ejemplo, para la frecuencia de vibrado igual a 30 Hz. Además, los ajustes no presentan un comportamiento único, los cuales pueden ser ascendentes, descendentes o sin cambios ante el aumento del coeficiente de uniformidad.

- **Coeficiente de curvatura C_c**

A continuación, se grafican los valores de los coeficientes de curvatura, C_c , versus la densidad máxima seca alcanzadas por el total de materiales, sin considerar la muestra M-10, como se muestra en la Figura 5.16. A partir de este gráfico, no se aprecia alguna relación directa entre estos parámetros, donde $\gamma_{d \max}$ alcanza valores aleatorios independiente de C_c y la clasificación del material.

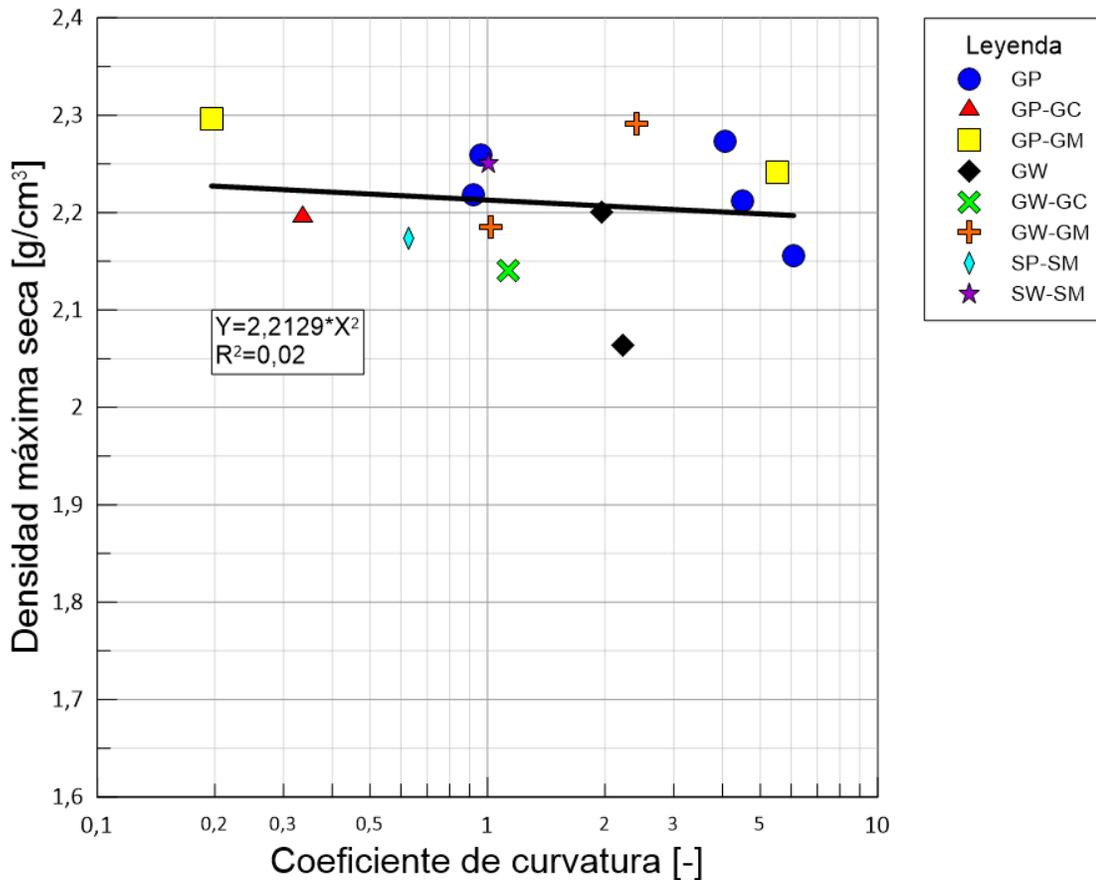


Figura 5.16: Densidad máxima seca, $\gamma_{d\max}$, versus coeficiente de curvatura, C_c , sin considerar muestra M-10.

Luego, en la Figura 5.17, se compara la densidad relativa alcanzada por los materiales del Grupo 1, sin considerar la muestra M-10, para las diferentes configuraciones de vibrado versus los valores del coeficiente de curvatura.

Al igual que el caso anterior, no es posible observar tendencia alguna entre estas variables, donde los valores exhiben una gran dispersión, por ejemplo, para la frecuencia de vibrado igual a 30 Hz, además, los ajustes no presentan un comportamiento único. Por ejemplo, para las vibraciones a 60 Hz la densidad relativa no sufre cambios ante el aumento del coeficiente de curvatura. Para 30 Hz, los ajustes presentan pendientes positivas, a diferencia de los ajustes realizados a las vibraciones a 15 Hz, los cuales exhiben pendientes negativas.

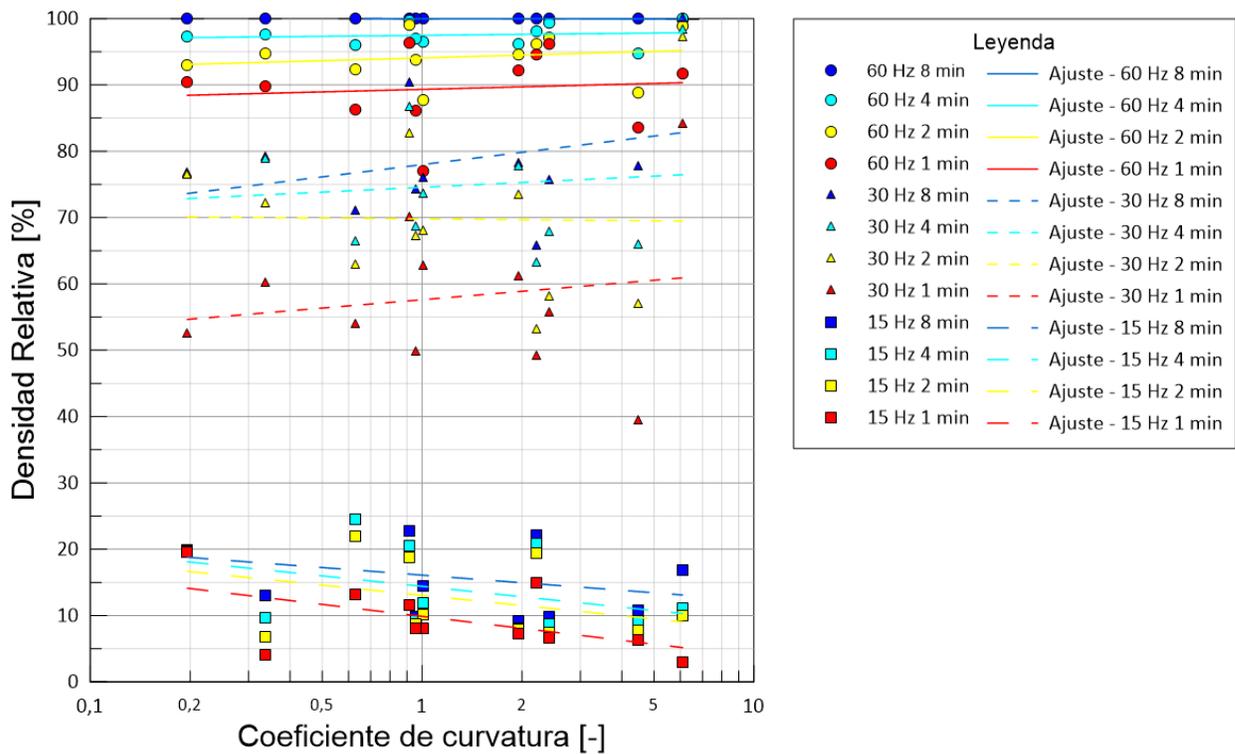


Figura 5.17: Densidad relativa del Grupo 1, sin considerar muestra M-10, para las distintas configuraciones de vibrado versus coeficiente de curvatura.

- **Tamaño de grano medio d_{50}**

En primer lugar, se grafican las densidades máximas secas, $\gamma_{d \max}$, alcanzadas por el total de materiales, sin considerar la muestra M-10, versus el tamaño de grano medio d_{50} de cada material como se muestra en la Figura 5.18.

A partir de este gráfico no es posible definir una clara relación entre estas variables, donde materiales con tamaño de grano medio d_{50} similares presentan una gran diferencia en el valor de densidad máxima seca alcanzada.

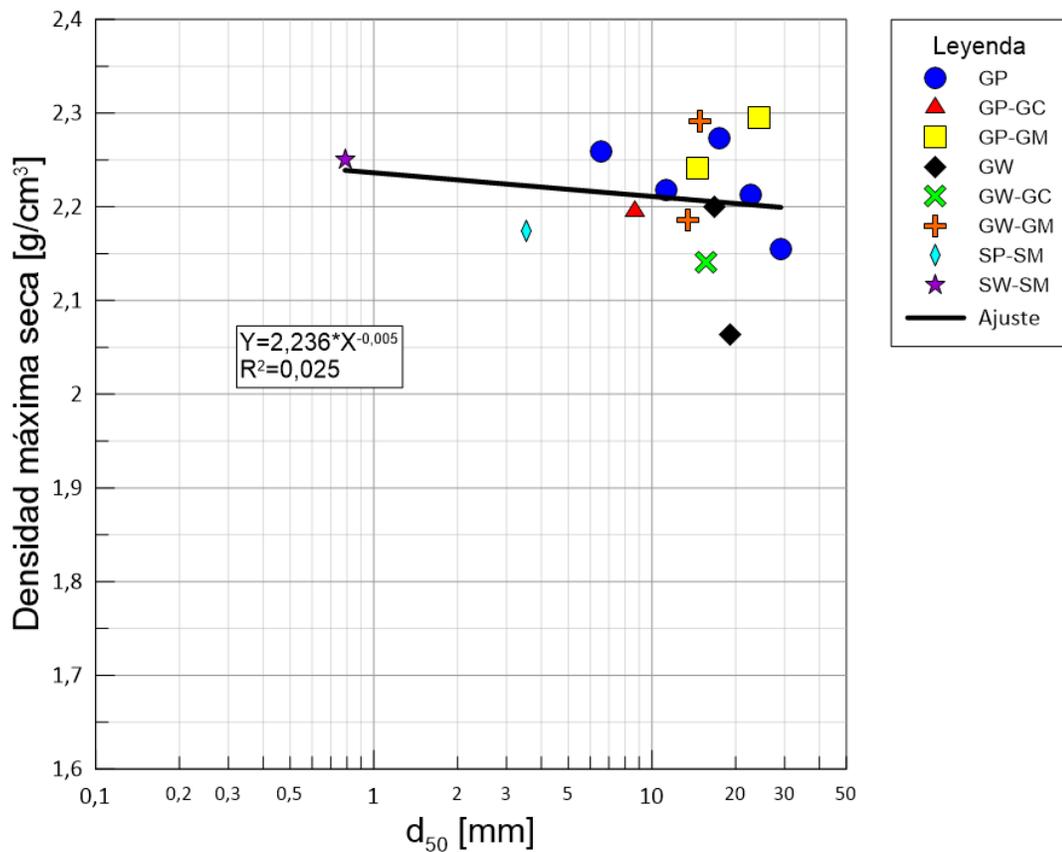


Figura 5.18: Densidad máxima seca, $\gamma_{d \max}$, versus diámetro característico d_{50} , sin considerar muestra M-10.

Luego, en la Figura 5.19, se contrastan los resultados obtenidos de índice de vacío mínimo y máximo del total de muestras en función del tamaño de grano medio con los presentados por Youd (1973). Aquí, se logra apreciar que los valores de d_{50} obtenidos se encuentran en un rango mayor en relación a los presentados por el autor. Sin embargo, no es posible deducir alguna relación entre estas variables.

En la Figura 5.20 se realiza una nueva comparación de los resultados obtenidos con respecto a la investigación realizada por Cubrinovski & Ishihara (2002). Los valores conseguidos se encuentran dentro del rango esperado por los autores para los materiales correspondiente a gravas, los cuales no presentan un comportamiento determinado a diferencia de los resultados correspondientes a materiales arenosos.

Posteriormente, en la Figura 5.21 se contrastan los resultados con los presentados por Miura et al. (1997). Aquí se observa que los valores obtenidos para d_{50} son mayores a los presentados por dichos autores, donde e_{\min} y e_{\max} se mantienen casi constantes

con el incremento del tamaño de grano medio, a diferencia de la relación inversa expresada por Miura et al. (1997), entre estas variables.

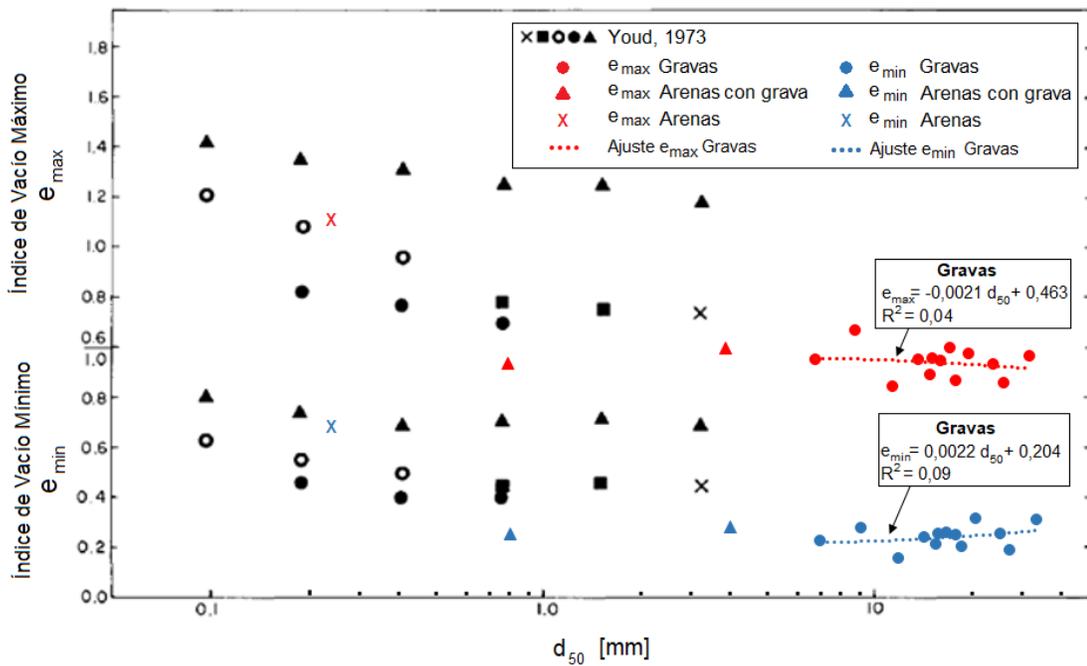


Figura 5.19: Comparación resultados obtenidos de índices de vacíos mínimo y máximo del total de muestras vs d_{50} y Youd (1973).

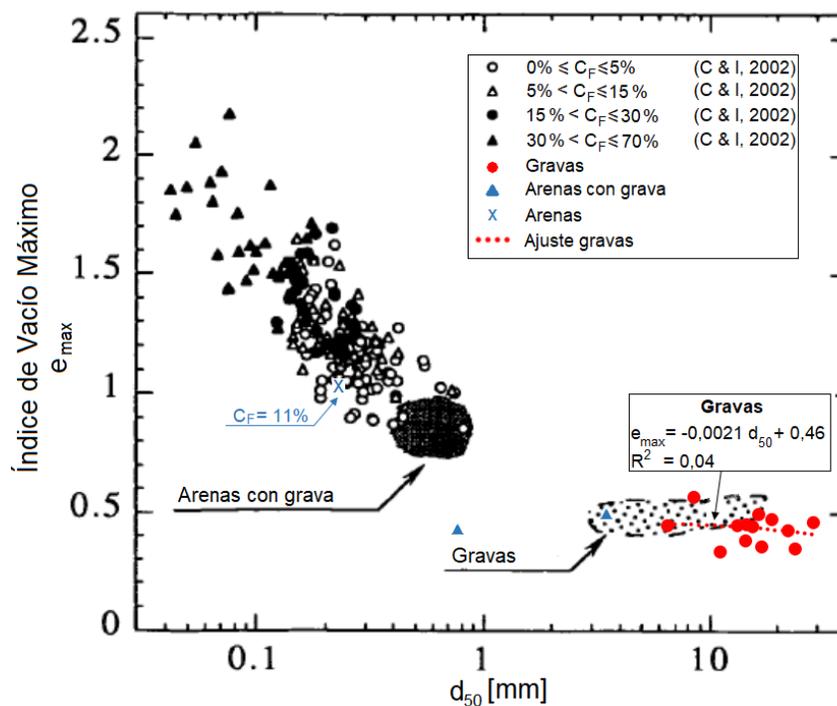


Figura 5.20: Comparación resultados obtenidos de índice de vacío máximo del total de muestras vs d_{50} y Cubrinovski & Ishihara (2002).

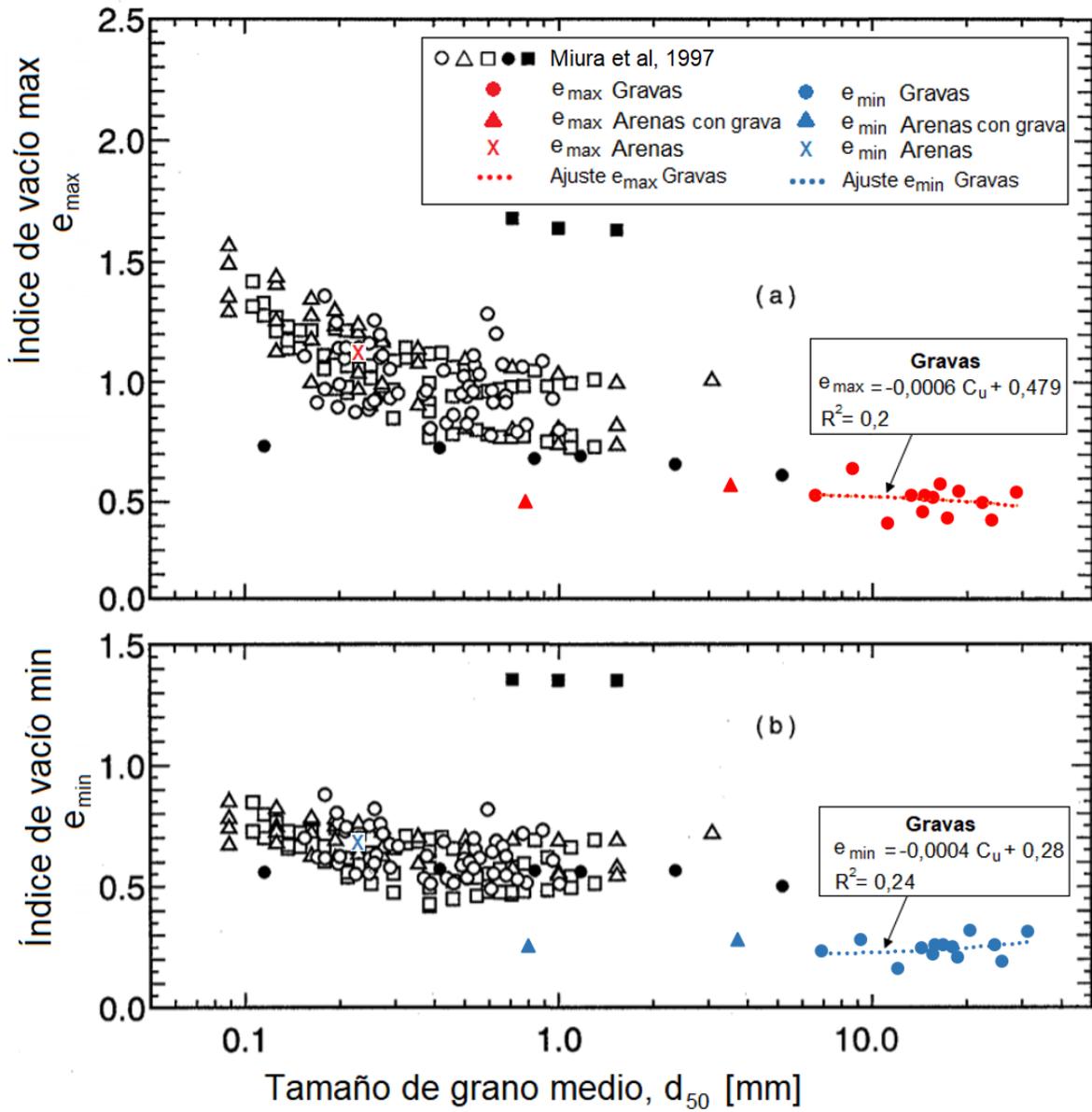


Figura 5.21: Comparación resultados obtenidos de índice de vacío máximo del total de muestras vs d_{50} y Miura et al. (1997).

Por último, en la Figura 5.22, se compara la densidad relativa alcanzada por los materiales del Grupo 1, sin considerar la muestra M-10, para las diferentes configuraciones de vibrado versus los valores del tamaño de grano medio d_{50} .

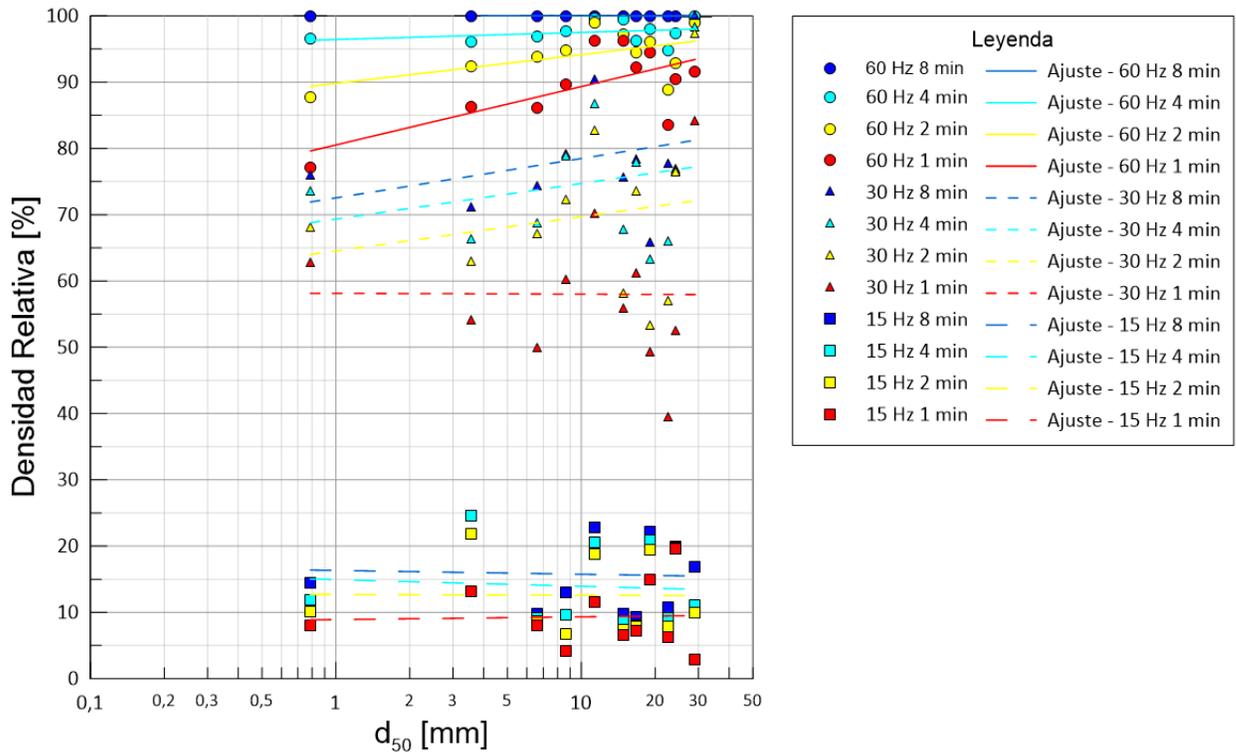


Figura 5.22: Densidad relativa del Grupo 1, sin muestra M-10, para las distintas configuraciones de vibrado versus d_{50} .

Al igual que el caso anterior, no es posible observar tendencia alguna entre estas variables, donde los valores exhiben una gran dispersión, principalmente para vibraciones a 30 y 15 Hz. Además, los ajustes no presentan un comportamiento único. Por ejemplo, a 30 y 60 Hz los ajustes pueden ser ascendentes o sin cambios ante el aumento del tamaño de grano medio, a diferencia de los ajustes realizados a las vibraciones a 15 Hz, los cuales exhiben pendientes casi nulas.

5.5. Influencia del contenido de finos en la densidad y densidad relativa

En primer lugar, se grafican las densidades máximas secas alcanzadas por el total de materiales, sin considerar la muestra M-10, versus los contenidos de fino presentes en cada material como se aprecia en la Figura 5.23.

Los valores conseguidos se encuentran dentro del rango esperado por los autores para los materiales correspondiente a gravas, los cuales no presentan un comportamiento determinado a diferencia de los resultados correspondientes a materiales arenosos.

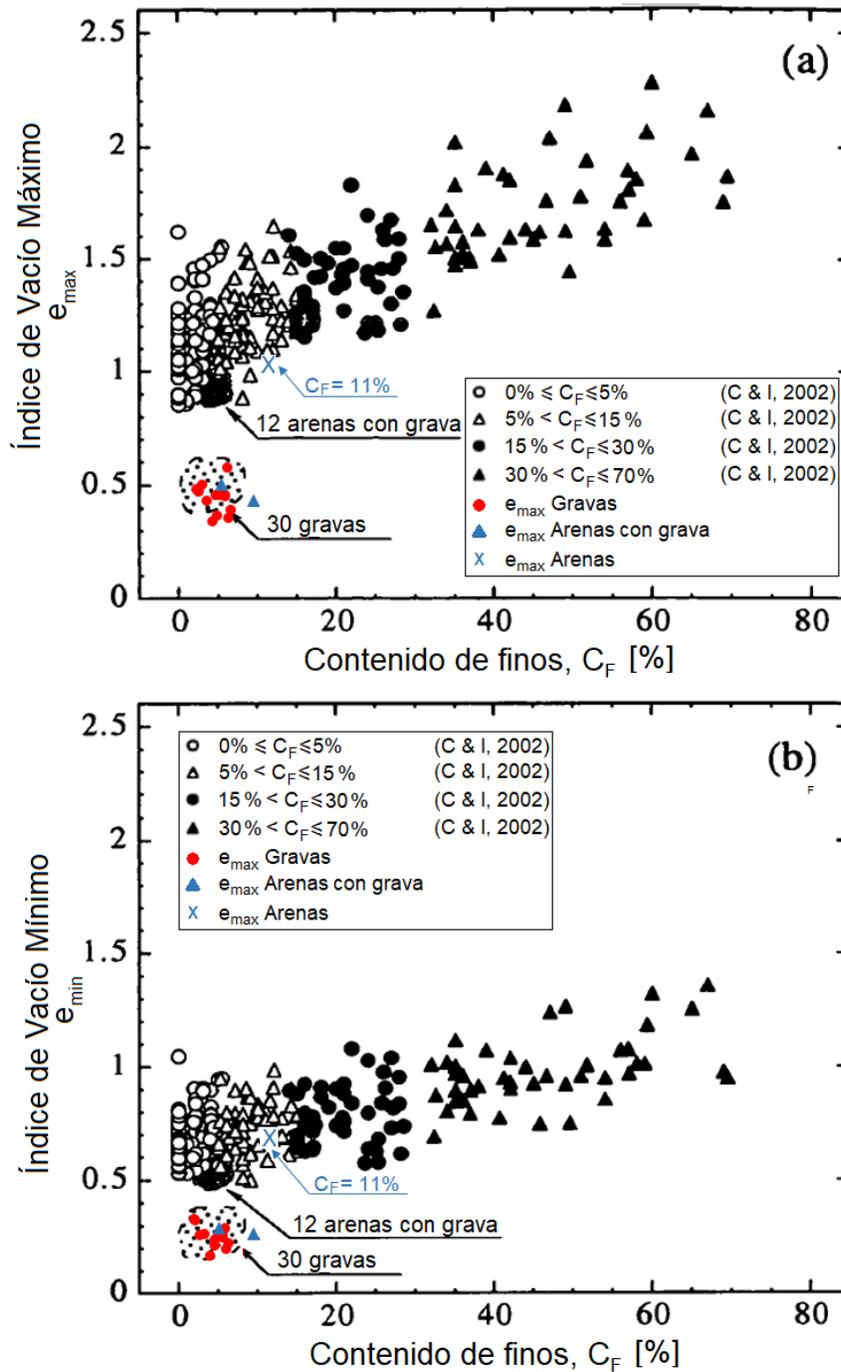


Figura 5.24: Comparación resultados obtenidos de índices de vacíos máximo y mínimo del total de muestras vs C_F y Cubrinovski & Ishihara (2002).

Por último, en la Figura 5.25, se compara la densidad relativa alcanzada por los materiales para las diferentes configuraciones de vibrado versus porcentajes de contenido de finos presentes en los materiales.

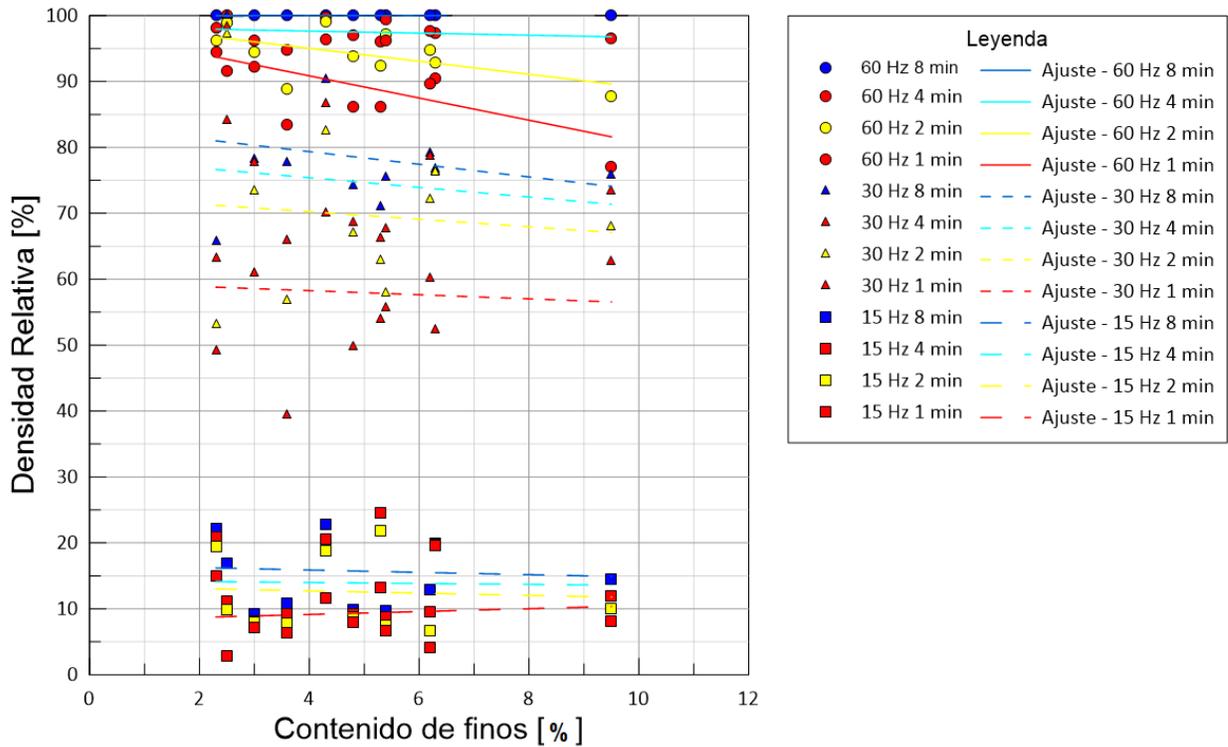


Figura 5.25: Densidad relativa del Grupo 1, sin muestra M-10, para las distintas configuraciones de vibrado versus porcentaje de contenido de finos.

Al igual que los casos anteriores, no es posible observar tendencia alguna entre estas variables, donde los valores exhiben una gran dispersión, principalmente para vibraciones a 30 Hz. Además, los ajustes no presentan un comportamiento único. Por ejemplo, a 30 y 60 Hz los ajustes pueden ser descendentes o sin cambios ante el aumento del tamaño de grano medio, a diferencia de los ajustes realizados a las vibraciones a 15 Hz, los cuales exhiben pendientes casi nulas.

5.6. Discusión de la configuración de vibrado propuesta

A partir de los resultados de las densidades relativas alcanzadas, por el Grupo 1 de muestras, a diferentes frecuencias y tiempos de vibrado, junto con el análisis de los respectivos histogramas confeccionados, se observaron valores de DR consistentes en ciertas configuraciones de vibrado, para casi todas las muestras, indistinto de la clasificación USCS del material, a excepción de la muestra M-10, la cual corresponde a una arena con tamaño máximo de partícula igual a 5 mm. En consecuencia, se proponen 3 arreglos de tiempo y frecuencia de vibrado, que se muestran en la Tabla 5.4. para la confección de probetas, a distintas densidades, utilizadas en un ensayo CBR,

Por otro lado, se analizó la influencia de ciertas características de los materiales, coeficiente de uniformidad, coeficiente de curvatura, tamaño de grano medio y contenido de finos, sobre las densidades relativa alcanzadas por los distintos materiales del Grupo 1 para las distintas configuraciones de vibrados. No obstante, no fue posible identificar correlaciones entre estas variables.

Finalmente, las configuraciones de vibrado para la confección de probetas durante el ensayo CBR sobre suelos con bajo contenido de fino propuestas en este estudio, corresponden a las expresadas en la Tabla 5.4, indistinto de la clasificación USCS del material y las características granulométricas que presente.

6. Procedimiento propuesto

A continuación, se detalla el procedimiento propuesto para determinar la razón de soporte, CBR, en suelos granulares con un C_F menor al 12% compactados y ensayados en laboratorio, indicando los aparatos necesarios, el acondicionamiento de muestras, la confección de las probetas, el proceso de inmersión y penetración junto a la expresión de los resultados.

1. Aparatos y accesorios

Las especificaciones corresponden, principalmente, a las detalladas por MOP (2018).

1.1. Prensa de ensayo: Está conformada por un marco de carga con una capacidad mínima de 44,5 kN y una gata mecánica capaz de desplazar una base metálica rígida a una velocidad uniforme y sin pulsaciones, de 1,27 mm/min, contra el pistón de penetración. Este último debe estar equipado con un dispositivo indicador de carga de una capacidad mínima de 26,7 kN, que permita registrar lecturas con una resolución mínima de 50 N. El pistón debe llevar, además sujeto a él, un dial de penetración graduado en milésimas de pulgada (0,025 mm), Figura 6.3.

1.2. Pistón de penetración: Metálico, cilíndrico, de $49,6 \pm 0,1$ mm de diámetro y una longitud no inferior a 101,6 mm, Figura 6.4.

1.3. Moldes: Metálicos, cilíndricos, con un diámetro interno de $152,4 \pm 0,7$ mm y una altura de $177,8 \pm 0,5$ mm. Deben tener un collar de extensión metálico de 50,8 mm de altura los cuales deben presentar dos pares de orejas para fijarse a los elementos verticales de la base y al tubo guía. Además de una placa base metálica de 9,5 mm de espesor con perforaciones de un diámetro menor o igual que 1,6 mm.

1.4. Cargas: Para cada molde se debe disponer de una carga metálica anular y varias cargas ranuradas de $2,27 \pm 0,05$ kg, Figura 6.4.

1.5. Aparato medidor de expansión:

- a) Una placa metálica de $149,2 \pm 1,6$ mm de diámetro por cada molde con perforaciones de 1,6 mm de diámetro. Debe tener un vástago ajustable de metal en el centro, con un sistema de tornillo y contratuerca que permita regular y fijar su altura, Figura 6.4.
- b) Un trípode metálico, cuyas patas puedan apoyarse en el borde del molde, y que lleve montado en el centro un calibre comparador con indicador dial que presente una resolución de lectura 0,025 mm. El vástago debe desplazarse

libremente y coincidir con el de la placa de forma tal que permita controlar la posición de ésta y medir el hinchamiento, Figura 6.6.

1.6. Mesa vibratoria: Mesa de acero de aproximadamente 750 mm x 750 mm, apoyada sobre amortiguadores y montada sobre piso de hormigón. Presenta un vibrador electromecánico de una masa neta igual o mayor a 45 kg. Debe ser capaz de vibrar verticalmente, con el conjunto de aparatos ensamblado como se muestra en la Figura 3.8, de forma sinusoidal con una doble amplitud (de pick a pick) entre 0,05 y 0,33 mm a una frecuencia de 60 Hz. Además, se puede ajustar la frecuencia de vibración entre 0 y 60 Hz desde la caja de control, Figura 3.10.

1.7. Tubo guía: Metálico, cilíndrico, de $49,6 \pm 0,1$ mm de diámetro y una longitud no inferior a 152,4 mm. Además debe presentar un par de orejas para ser fijado al molde, Figura 6.6.

1.8. Sobrecarga y placa base: Corresponden a las especificadas en Figura 3.10 para molde de 2,8 litros.

1.9. Otros:

- a) Tambor o depósito de capacidad suficiente para la inmersión de los moldes en agua, ubicado en un lugar tal que ésta no alcance su punto de congelación.
- b) Horno con circulación de aire y temperatura regulable, que permita el secado de muestras a $110 \pm 5^\circ \text{C}$.
- c) Balanza de 30 kg de capacidad y resolución 1 g.
- d) Balanza de 2 kg con capacidad y resolución 0,1 g.
- e) Tamices 3" (75 mm) y 3/4" (19 mm).
- f) Pailas, recipientes, poruñas, reglas, brochas, discos papel filtro, cronómetro, embudo, etc.

2. Acondicionamiento de muestras

Se prepara una muestra de un tamaño aproximado a 80 kg. Mediante cuarteo se obtiene una porción de 40 kg aproximadamente. Pasar el material a través del tamiz 3/4" (20 mm), descartando el material retenido. Dividir en 3 porciones representativas y dejar secar en horno a una temperatura de $60 \pm 5^\circ \text{C}$, hasta alcanzar masa constante.

3. Confección de probetas

Determinar masa, M_{mol} , y volumen, V_{mol} , de los moldes a utilizar.

Fijar cada molde junto a su collar y placa base correspondiente y colocar un disco de papel filtro al interior del molde sobre la placa.

Depositar el material seco al interior del molde mediante el mismo método utilizado para confección de probetas en el ensayo de densidad mínima descrito en 3.3.7, depositándolo tan suelto como sea posible, hasta que el nivel del material quede cercano al borde superior del collar. El aparato de llenado viene dado por el tamaño máximo de partículas que pase a través del tamiz 3/4" (20 mm) según lo señalado en la Tabla 3.9.

Cada probeta es compactada a distintas densidades mediante el uso de la mesa vibratoria.

Colocar la placa base de acero sobre la superficie del suelo girándolo ligeramente varias veces para que exista un contacto uniforme entre la placa y el material. Fijar el molde sobre la mesa con dos pernos de anclajes en las perforaciones del elemento de base del molde

Situar el tubo guía, sobre el borde del collar de modo que las paredes internas de estos queden alineadas. Fijar los elementos a través de dos pernos y tuercas como se muestra en la Figura 6.7. Ubicar la sobrecarga sobre la placa base al interior del tubo guía.

La configuración de frecuencia y tiempo de vibrado es diferente para cada probeta, de manera de obtener 3 densidades distintas. Las configuraciones junto a la tolerancia se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Configuraciones de tiempo y frecuencia para confección de probetas para ensayo CBR.

Configuración	Tiempo [min]	Frecuencia [Hz]
1	$8 \pm 0,25$	60 ± 2
2	$8 \pm 0,25$	30 ± 1
3	$2 \pm 0,07$	$15 \pm 0,5$

Terminado el proceso de vibrado, retirar el tubo guía y la sobrecarga. Separar el molde de la mesa vibratoria. Retirar la placa base junto con el collar de extensión y enrasar cuidadosamente el suelo compactado con una regla al nivel del borde superior del molde. De haber quedado algún hueco en la superficie por la eliminación de material grueso, este se rellena con material fino bajo 5 mm.

Determinar la masa del conjunto base perforada, molde y suelo compactado, M_{m+cs} .

Colocar un disco de papel filtro en la superficie del material, junto a al vástago ajustable y la sobrecarga anular. Agregar la carga anular y luego las ranuradas en múltiplos de 5 lb (2,27 kg) hasta producir una sobrecarga equivalente al peso del pavimento u otra carga especificada sobre el material de estudio. Si no se especifica dicha carga se utiliza una de 10 lb (4,54 kg).

Si la muestra es sometida a inmersión, realizar lecturas de hinchamiento con el trípode para medir la expansión antes se sumergir las probetas. El proceso de introducir los moldes al agua debe ser de manera lenta y lo más cuidadosamente posible, para evitar perturbaciones en el material debido al rápido ingreso de agua en los espacios vacíos. Las probetas deben quedar completamente sumergidas a un nivel de agua constante y sobre un soporte permitiendo el libre acceso del agua hacia la probeta por la parte inferior de ésta.

Medir el hinchamiento de la probeta junto al tiempo de inmersión transcurrido. Luego, se construye un gráfico, donde en el eje de las abscisas se indica el tiempo de inmersión transcurrido y en el eje de las ordenadas la expansión de cada probeta. El periodo de inmersión finaliza cuando se alcance una deformación constante, el cual no puede ser menor a 24 h.

Finalizado el periodo de inmersión, dejar drenar a través de las perforaciones de la placa base durante al menos 15 min. Posteriormente de retiran las cargas y la placa para determinar la masa del molde con el suelo húmedo, M_{m+ch} .

Calcular el porcentaje de expansión con respecto a la altura inicial de la probeta, h_m , según la Ecuación (6.1)

$$\text{Porcentaje de expansión} = \frac{\text{expansión}}{h_m} \times 100 \quad (6.1)$$

4. Penetración

Colocar la probeta en la prensa de ensaye y asentar el pistón de penetración con la menor carga posible, la cual no debe exceder en ningún caso de 45 N, junto con establecer los medidores de carga y deformación en cero.

Aplicar la carga en el pistón de penetración a una velocidad de 1,27 mm/min. Paralelamente se registran las lecturas de carga en los siguientes niveles de carga: 0,64; 1,3; 1,9; 2,5; 3,2; 3,8; 4,45; 5,1; 7,6; 10,1 y 12,7 mm.

Anotar la carga máxima alcanzada, registrando la penetración a la que se produce, si esto ocurre a una penetración menor que 12,7 mm.

Retirar el suelo del molde y obtener una muestra de masa acorde al tamaño máximo de partícula presente en la probeta, según la Tabla 6.2, para determinar la humedad.

Tabla 6.2: Tamaño mínimo de muestra para determinar humedad.

Tamaño máximo de partículas [mm]	Tamaño mínimo de la muestra [g]
19	900
12,5	750
5	500
2	100
0,5	10

5. Presentación de resultados

Determinar la tensión de penetración en MPa, σ_i , a partir de las cargas aplicadas, F_i , junto al área de la sección transversal del pistón, A_p , según la Ecuación (6.2).

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_p} \quad [MPa] \quad (6.2)$$

Elaborar las curvas de tensión versus deformación de cada probeta en un mismo gráfico, donde en el eje de las abscisas se indica la penetración y en eje de las ordenadas la tensión.

En ciertas ocasiones, esta curva puede ser cóncava hacia arriba inicialmente, en tales casos el origen se corrige trazando una recta tangente a la mayor pendiente de la curva y se establece el nuevo punto cero en la intersección entre esta tangente y el eje de las abscisas, tal como se señala en la Figura 6.1. Por consiguiente, el valor buscado se encontrará desplazado en la misma distancia en la que se traslada el origen, como se indica en la misma imagen.

Determinar los valores de tensión correspondientes a las penetraciones de 1" y 2" (2,54 y 5,08 mm). Además, se calculan las razones de soporte, CBR, para cada tensión según las Ecuaciones (6.3) y (6.4), respectivamente. Este procedimiento se realiza para las tres probetas ensayadas.

$$CBR_{0,1''} = \frac{\sigma_i [MPa]}{6,9 [MPa]} \times 100 \quad [\%] \quad (6.3)$$

$$CBR_{0,2''} = \frac{\sigma_i [MPa]}{10,3 [MPa]} \times 100 \quad [\%] \quad (6.4)$$

Calcular las densidades secas, ρ_d , de las probetas compactadas antes de la inmersión según la Ecuaciones (6.5) y (6.6), y después de la inmersión a través de las Ecuaciones (6.7) y (6.8).

$$\rho_s = \frac{M_{sc}}{V_{mol}} \quad \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (6.5)$$

$$M_{cs} = M_{m+cs} - M_{mol} \quad (6.6)$$

$$\rho_h = \frac{M_{hc}}{V_{mol}} \quad \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (6.7)$$

$$M_{ch} = M_{m+ch} - M_{mol} \quad (6.8)$$

Determinar la densidad seca a partir del porcentaje de humedad mediante la Ecuación (2.10).

Debido a que un porcentaje importante de la muestra no se considera al pasarlo por tamiz 3/4", las densidades de las probetas alcanzadas durante el vibrado presentan una variación considerable en relación a las densidades que se obtienen en terreno contemplando la totalidad del suelo.

Por lo tanto, se debe realizar una corrección a través del método proporcionado por la ASTM en su norma denominada D4718/D4718M-15 "Corrección de peso unitario y contenido de agua para suelos que contienen partículas de gran tamaño".

Determinar la masa seca de la fracción fina y la masa de sobretamaño que presente la muestra, es decir, bajo y sobre el tamiz 3/4" (20 mm), y se registran como M_{DF} y M_{DC} , respectivamente.

Calcular los porcentajes de fracción fina, P_F , y sobretamaño, P_C , correspondientes a las fracciones pasante y retenido en 3/4" de la muestra, mediante las Ecuaciones (6.9) y (6.10).

$$P_F = \frac{M_{DF}}{M_{DF} + M_{DC}} \quad [-] \quad (6.9)$$

$$P_C = \frac{M_{DC}}{M_{DF} + M_{DC}} \quad [-] \quad (6.10)$$

A partir de la densidad seca de las probetas, ρ_{DF} , se determina la densidad seca correspondiente a la totalidad del suelo, ρ_{DT} , según la Ecuación (6.11).

$$\rho_{DT} = \frac{\rho_{DF} G_M \rho_w}{\rho_{DF} P_C + G_M \rho_w P_F} \quad \left[\frac{gr}{cm^3} \right] \quad (6.11)$$

Donde:

G_M = Gravedad específica de la fracción sobretamaño.

ρ_w = Densidad del agua (1 g/cm³).

Finalmente, se elaboran las curvas CBR versus la densidad seca, de manera independiente para cada nivel de penetración, 0,1" y 0,2" , para obtener la razón de soporte correspondiente a una densidad seca asociada a un porcentaje de la densidad relativa específica, determinada a cierto valor de penetración, como se muestra en la Figura 6.2.

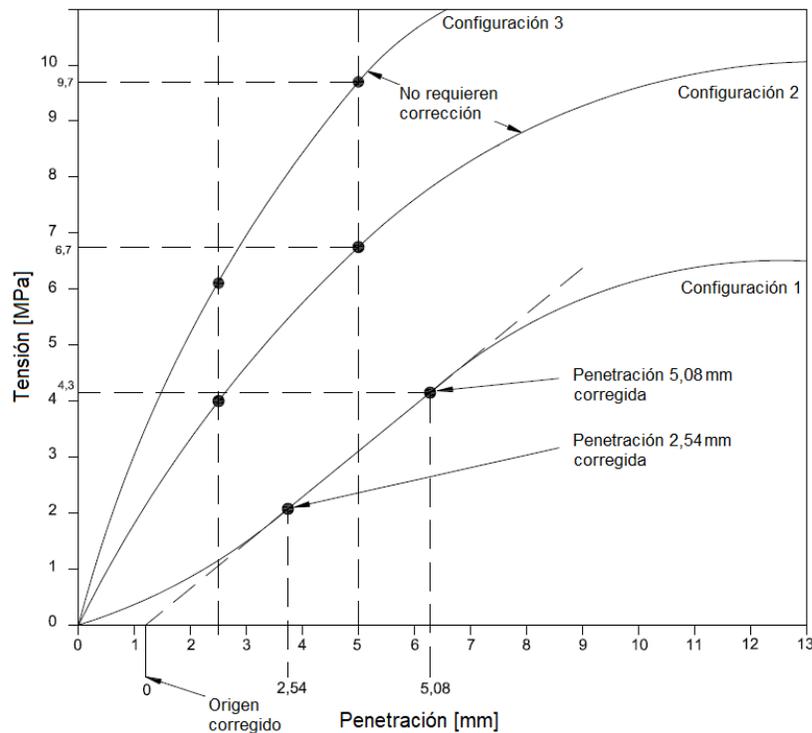


Figura 6.1: Corrección curva tensión-deformación (MOP,2018).

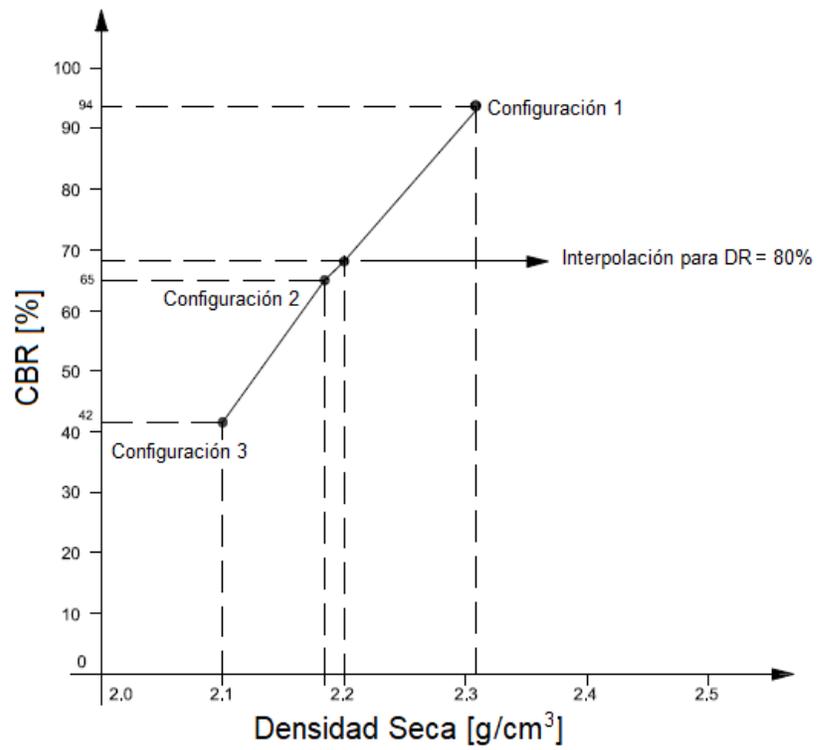
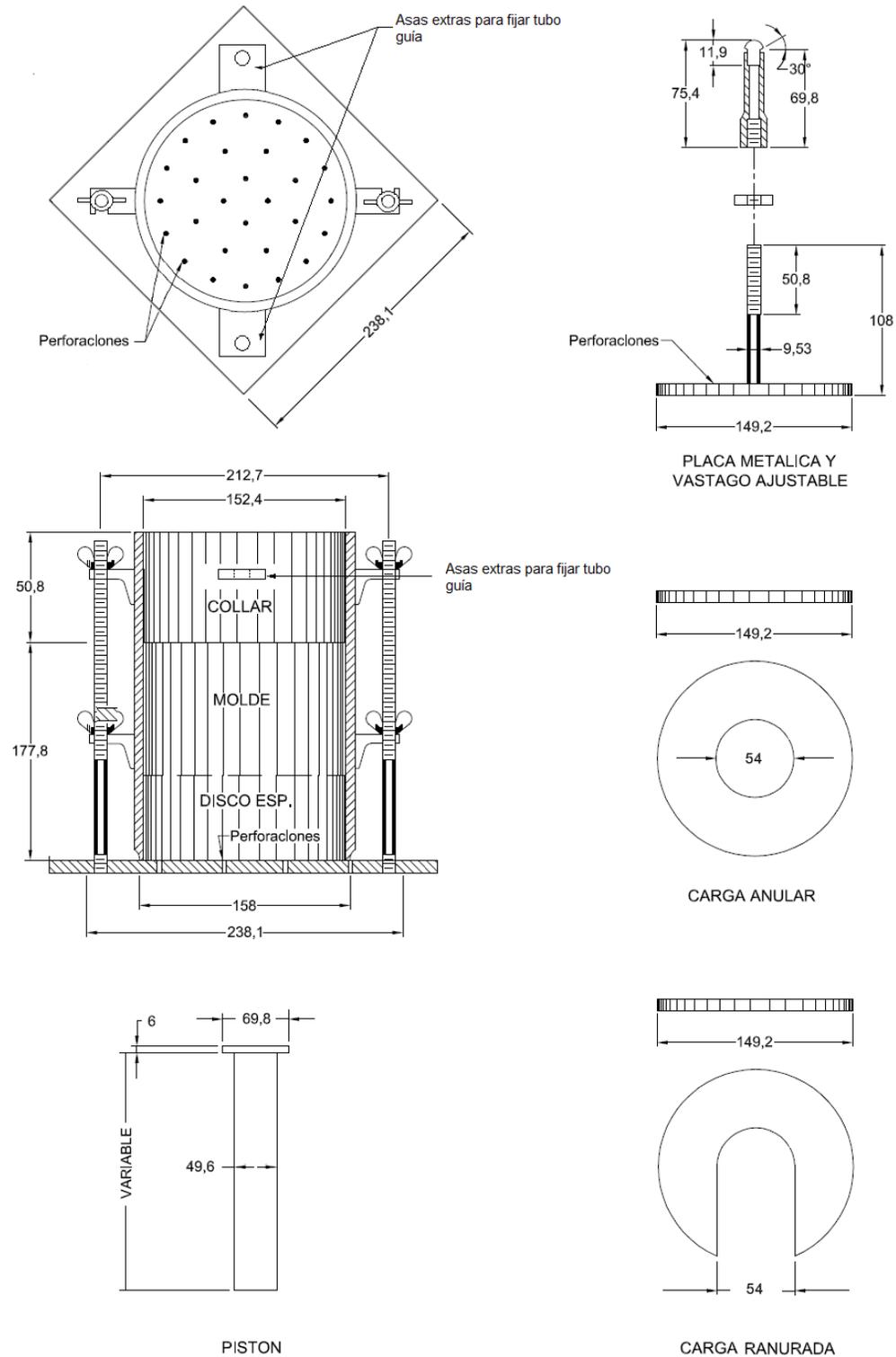


Figura 6.2: Razón de soporte, CBR, para una densidad específica.



Figura 6.3: Prensa ensayo CBR (Eliza Díaz, 2020).

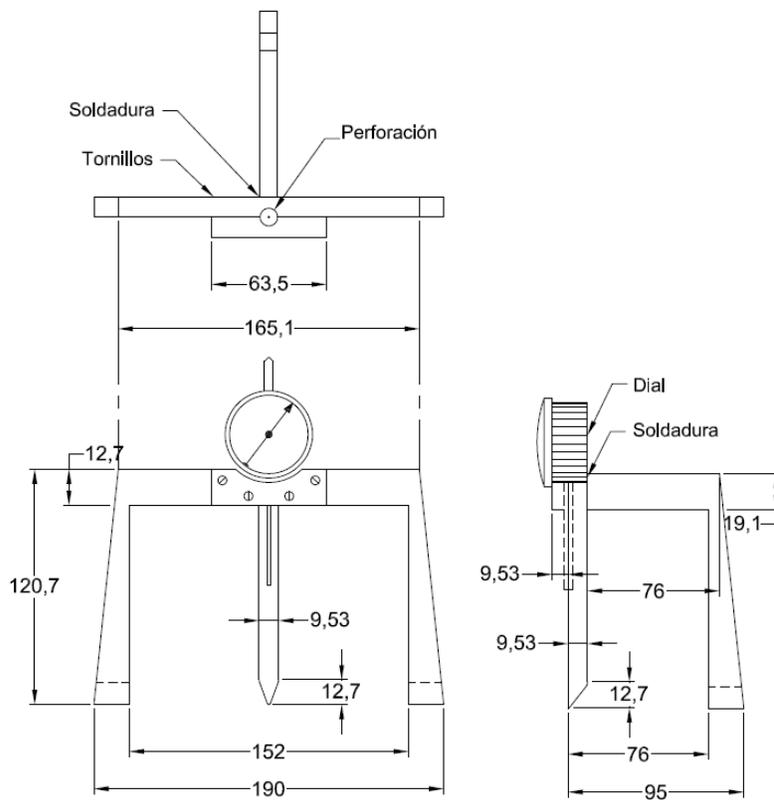


Dimensiones en milímetros.

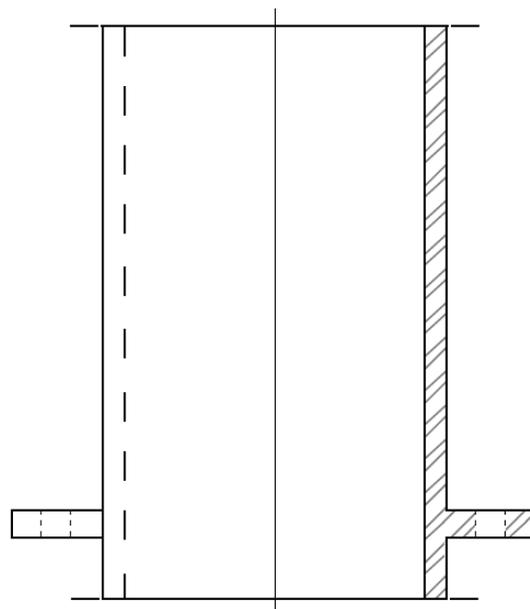
Figura 6.4: Moldes, cargas y pistón para ensayo CBR vibrado.



Figura 6.5: Molde y collar para ensayo CBR vibrado, equipo AJGEOTECH.



TRIPODE PARA MEDIR LA EXPANSION



TUBO GUIA

Dimensiones en milímetros.

Figura 6.6: Elemento de medición y tubo guía para ensayo CBR vibrado.



Figura 6.7: Montaje molde, collar y tubo guía ensayo CBR vibrado, equipo AJGEOTECH.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

A partir de la revisión bibliográfica y los resultados experimentales realizados en la presente investigación, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Las normativas, nacional e internacional consultadas, no definen un procedimiento para desarrollar CBR en suelos que poseen un bajo contenido de fino, menor a un 12%, en los cuales no es posible obtener una curva definida de relación humedad-densidad debido a la naturaleza de las partículas, las cuales deben ser compactadas mediante vibración y no por golpes.
- Existen suelos granulares con bajo C_F que potencialmente pueden ser utilizados como material base o sub-base en un proyecto de pavimentación, los cuales cumplen con las bandas granulométricas especificadas por el MOP en el Manual de Carreteras, Tabla 3.4, pero no se puede determinar, según normativa, la razón de soporte CBR, parámetro adoptado ampliamente para la evaluación de materiales empleados en este tipo de proyectos.
- Existen distintas variables involucradas durante la prueba de densidad máxima en suelos granulares mediante el uso de una mesa vibratoria, las cuales corresponden a frecuencia y tiempo de vibrado, amplitud de onda y sobrecarga. Sin embargo, las más importantes para evaluar la energía aplicada obteniendo distintas densidades corresponden a tiempo y frecuencia.
- La densidad no presenta un comportamiento definido frente a distintas frecuencias de vibrado para un material en particular, donde se obtienen resultados muy similares para frecuencias de 20 y 30 Hz, al igual que para 40, 50 y 60 Hz. Sin embargo, esto no se puede generalizar para todo tipo de material granular.
- En relación a la variable tiempo de vibrado, la densidad presenta un comportamiento no lineal, lo cual se observó en distintos tipos de suelos, donde el mayor porcentaje de densificación se produce durante el primer minuto de vibrado, y a partir del minuto 4, aproximadamente, no se producen aumentos significativos, validando los estudios realizados por Pettibone & Hardin (1964).
- Con respecto a las densidades relativas, éstas presentan un comportamiento similar a las densidades secas, obteniéndose resultados consistentes en la mayoría de las muestras para las diferentes combinaciones tiempo y frecuencia de vibrado, a excepción de algunos materiales. Esta consistencia de los resultados fue verificada por el segundo grupo de muestras, las que exhiben una baja

desviación en relación a las densidades relativas definidas como objetivo con el primer grupo de muestras ensayadas.

- La reproducibilidad de los resultados de la densidad relativa en distintos materiales, permite proponer tres configuraciones de frecuencia y tiempo de vibrados para confeccionar probetas a distintos niveles de densificación, para ser utilizadas en un ensayo CBR, las cuales se presentan en la Tabla 7.1, junto al porcentaje de DR esperado.

Tabla 7.1 Configuraciones de tiempo y frecuencia para confección de probetas para ensayo CBR y DR esperado.

Configuración	Tiempo [min]	Frecuencia [Hz]	DR esperado [%]
1	$8 \pm 0,25$	60 ± 2	100
2	$8 \pm 0,25$	30 ± 1	80
3	$2 \pm 0,07$	$15 \pm 0,5$	15

- A partir de estas tres configuraciones, a distintos niveles de energía, se obtiene un rango de densidades con las cuales se puede determinar el valor de CBR para una densidad seca en particular, realizando una interpolación lineal entre los resultados. No obstante, existe un gran intervalo de densidad sin información, entre 15 y 80 % de DR, por lo que realizar una interpolación lineal en este rango implica incertidumbre en el resultado. Por lo tanto, es primordial determinar una nueva configuración de tiempo y frecuencia para obtener una densidad dentro de éste intervalo y así mejorar la resolución de valores de DR que se pueden alcanzar según las configuraciones de vibrado antes propuestas.
- De forma complementaria, no fue posible identificar correlaciones entre las características de los materiales, C_u , C_c , d_{50} , C_F , y las densidades relativas alcanzadas para las distintas combinaciones de tiempo y frecuencias, por lo tanto, se mantendrán las mismas configuraciones de vibrado propuestas en la Tabla 7.1 para todos los materiales. Esto implica que, en ciertos suelos, las densidades alcanzadas en el set de configuraciones puedan diferir de la densidad relativa esperada para la configuración de vibrado utilizada. Por esto es necesario estudiar un mayor número y variedad de materiales, de forma de obtener configuraciones de vibrado acorde a las características de cada suelo a ensayar.
- A partir de los análisis realizados, según la cantidad de muestras ensayadas, no es posible establecer de forma categórica correlaciones entre las características de los materiales, C_u , C_c , d_{50} , C_F , y los índices de vacíos mínimo y máximo en suelos gravosos como las identificadas por diversos trabajos de investigación

realizados anteriormente para suelos arenosos. Sin embargo, los resultados se ajustan de manera positiva a las correlaciones, curvas y tendencias indicadas por distintos autores en materiales similares a los ensayados en este estudio.

- Finalmente, en la presente investigación se presenta una metodología para la ejecución de ensayos CBR en suelos granulares con un bajo contenido de fino, donde el modo de confeccionar las probetas es acorde a la naturaleza de las partículas de este tipo de materiales. La metodología se basa en configuraciones de vibrado a distintos niveles de frecuencia y tiempo, para alcanzar un amplio rango de Densidades Relativas, que permiten evaluar CBR para condiciones naturales de los materiales, o bien, a la densidad de diseño dada por la compactación en terreno.
- Es importante que se tenga en consideración que, dado que la preparación de muestras en el molde de CBR considera sólo partículas hasta 3/4" (19 mm) según la normativa actual, se deberán realizar los escalamientos de densidad mediante el método proporcionado por la ASTM en su norma denominada D4718/D4718M-15 "Corrección de peso unitario y contenido de agua para suelos que contienen partículas de gran tamaño".

7.2. Recomendaciones

A continuación, se presentan recomendaciones a considerar para el desarrollo de futuras investigaciones relacionadas:

- Determinar las densidades intermedias a un mayor número de materiales, de manera de poder identificar correlaciones entre las características de los suelos y las densidades relativas alcanzadas para las distintas combinaciones de tiempo y frecuencias de vibrado.
- Determinar las densidades a distintas combinaciones de tiempo y frecuencia de vibrado en materiales granulares con bajo porcentaje de fino, mediante uso de mesa vibratoria, cortando el material a través de tamiz 3/4" (19 mm) y utilizando el molde estandarizado para el ensayo CBR.
- Ajustar las configuraciones propuestas de tiempo y frecuencia para la confección de probetas, a partir de las características de los materiales y los resultados de las densidades utilizando el molde de CBR.
- Determinar las densidades vibradas utilizando la totalidad del material, mediante el molde grande descrito en la norma ASTM D4253-16e¹, y considerando la fracción pasante el tamiz 3/4" (19 mm), utilizando el molde CBR, comparando estos resultados frente a los determinados teóricamente a través del método de

corrección de densidades descrito en la norma ASTM D4718-15, analizando la aplicabilidad de éste.

- Estudiar variaciones de los resultados de ensayo CBR, en los tipos de suelos estudiados, que puedan existir considerando la fracción menor a 3/4" (19 mm) con respecto a la totalidad del material.

8. Bibliografía

1. AMERICAN SOCIETY for testing and Materials. 2000. Standard Test Method for Classification of soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). D2487-00. ASTM.
2. AMERICAN SOCIETY for testing and Materials. 2006. Standard Test Method for Using Significant Digits in Geotechnical Data. D6026-06. ASTM.
3. AMERICAN SOCIETY for testing and Materials. 2007a. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56.000ft-lbf/ft³ (2.700 kN-m/m³)). D1557-12e¹. ASTM.
4. AMERICAN SOCIETY for testing and Materials. 2007b. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12.400ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). D698-12. ASTM.
5. AMERICAN SOCIETY for testing and Materials. 2009. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place. D4429-09a. ASTM.
6. AMERICAN SOCIETY for testing and Materials. 2015. Standard Test Methods for Correction for Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles. D4718/D4718M-15. ASTM.
7. AMERICAN SOCIETY for testing and Materials. 2016a. Standard Test Methods for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. D1883-16. ASTM.
8. AMERICAN SOCIETY for testing and Materials. 2016b. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Wight of soils using a vibratory Table. D4253-16e¹. ASTM.
9. AMERICAN SOCIETY for testing and Materials. 2016c. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Wight of soils and calculation of Relative Density. D4254-16. ASTM.
10. BESIO, G & DORADOR, L. 2013. Some considerations about geotechnical characterization on soils with oversize. 5th International Young Geotechnical Engineering Conference. France.
11. BIAREZ, J. & HICHER, P. 1994. Elementary mechanics of soil behaviour: saturated remoulded soils. Rotterdam, Balkema. p. 186.

12. BRITISH STANDARDS. 1990. Methods of test for Soils for civil engineering purposes Part 4: Compaction-related tests. BS1377-4:1990. BSI. pp. 15-22, 30-39.
13. BRITISH STANDARDS. 1990. Methods of test for Soils for civil engineering purposes Part 9: In-situ tests. BS1377-9:1990. BSI. pp. 15-22, 29-32.
14. BUDHU, M. 2011. Soil Mechanics and Foundations. John Wiley & Sons, Inc.
15. CUBRINOVSKI, M. & ISHIHAR, K. 2002. Maximum and minimum void ratio characteristics of sands. Japanese Geotechnical Society, 42(6), pp. 65-78.
16. CUMBERLEDGE, G & COMINSKY, R. 1973. Maximum density determination of subbase materials. Evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesionless soils, ASTM STP 653, American Society for Testing and Materials. pp. 141-155.
17. DE LA HOZ, K. 2007. Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Ingeniería Geotécnica. Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Chile.
18. DORADOR, L & RIQUELME, J. 2014. Metodología para determinar densidades máxima y mínima en suelos granulares gruesos a partir de ensayos de laboratorio de escala reducida. 8° Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Sociedad Chilena de Geotecnia.
19. ELIZA DIAZ Compañía LTDA, 2020. Prensa CBR manual (Nacional). Disponible en: <https://ediaz.cl/productos/> [Consulta: 23 marzo 2020].
20. ENDECOTTS. 2015. Test Sieving Manual. Endecotts Ltd, p. 47.
21. HARDIN, J. & PETTIBONE, H. 1964. Research on vibratory maximum density test for cohesionless soils. 67th Annual Meeting American Society for Testing and Materials. Chicago, USA.
22. INDUSLAB, 2020. Matraz aforado 100ml. con tapón de plástico-LBY. Disponible en: <https://induslab.cl/producto/matraz-aforado-100ml-con-tapon-de-plastico/> [Consulta: 17 febrero 2020].
23. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 1976. Tamices de ensayo de tela de alambre y de plancha perforada – Dimensiones nominales de abertura. NCh1022.Of76. INN.

24. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 1977. Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. NCh165.Of77. INN. pp. 1-9.
25. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 1979a. Mecánica de suelos – Determinación de la densidad de partículas sólidas. NCh1532.Of79. INN.
26. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 1979b. Mecánica de suelos – Determinación de la humedad. NCh1515.Of79. INN.
27. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 1979c. Mecánica de suelos – Límites de consistencia – Parte 1: Determinación del límite líquido. NCh1517/1.Of79. INN
28. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 1979d. Mecánica de suelos – Límites de consistencia – Parte 2: Determinación del límite plástico. NCh1517/2.Of79. INN.
29. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 2008. Mecánica de suelos – Relaciones humedad/densidad – Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 460 mm de caída. NCh1534/2.Of2008. INN.
30. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 2009a. Mecánica de suelos – Determinación de la densidad en suelos no cohesivos – Parte 1: Densidad máxima usando mesa vibratoria. NCh1726.Of80. INN.
31. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 2009b. Mecánica de suelos – Determinación de la densidad en suelos no cohesivos – Parte 2: Densidad mínima. NCh1726.Of80. INN.
32. INSTITUTO NACIONAL de Normalización. 2010. Mecánica de suelos – Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio. NCh1852.Of2010. INN.
33. JOHNSTON, M. 1973. Laboratory studies of maximum and minimum dry densities of cohesionless soils. Evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesionless soils, ASTM STP 653, American Society for Testing and Materials. pp. 133-140.
34. KEZI, A. 1979. Soil Physics. Amsterdam: Elsevier.
35. MIURA, K., et al. 1997. Physical characteristics of sands with different primary properties, Japanese Geotechnical Society, 37(3), pp. 53-64
36. MINISTERIO DE EDUCACIÓN, Currículum Nacional. 2020. Mapa con División político administrativa. MINEDUC. Disponible en:

<https://curriculumnacional.mineduc.cl/614/w3-article-26936.html> [Consulta 25 febrero 2020].

37. MINISTERIO DE MINERÍA, Servicio Nacional de Geología y Minería. 2020. Portal Geológico Minero GEOMIN. Geología Básica. SERNAGEOMIN. Disponible en: <http://portalgeo.sernageomin.cl/Visor/> [Consulta 25 febrero 2020].
38. MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, Dirección General de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. 2018. Manual de Carreteras. MOP-DGOP-Chile. pp. 105-168.
39. TAVENAS, F & LA ROCHELLE, P. 1972. Accuracy of relative density measurements. *Geotechnique*, 22(4), pp. 459-562.
40. VEIGA PINTO, A. 1979. Características de resistência e deformabilidade de enrocamentos. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*.
41. VILLALOBOS, F. 2014. *Mecánica de Suelos*. Editorial Universidad Católica de Santísima Concepción
42. YOUNG, T. 1973. Factors controlling maximum and minimum densities of sands. Evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesionless soils, ASTM STP 653, American Society for Testing and Materials. pp. 98-112.

Notación

A	Peso muestra total
A_p	Área de la sección transversal del pistón ensayo CBR
B	Peso sobretamaño
C	Peso inicial que pasa tamiz N°4 (5 mm)
C'	Peso seco post cuarteo que pasa tamiz N°4 (5 mm)
C''	Peso seco post cuarteo y lavado que pasa tamiz N°4 (5 mm)
CBR	California Bearing Ratio
$CBR_{0,1''}$	Razón de soporte correspondiente a una penetración de 1" (2,54 mm)
$CBR_{0,2''}$	Razón de soporte correspondiente a una penetración de 2" (5,08 mm)
C_c	Coefficiente de curvatura
C_F	Contenido de finos
C_U	Coefficiente de uniformidad
D	Peso seco inicial retenido en tamiz N°4 (5 mm)
D'	Peso seco lavado retenido en tamiz N°4 (5 mm)
d_1	Diámetro partícula conocido anterior al diámetro buscado
d_{10}	Diámetro por el cual pasa un 10 % en masa de la muestra
d_2	Diámetro partícula conocido posterior al diámetro buscado
d_{30}	Diámetro por el cual pasa un 30 % en masa de la muestra
d_{60}	Diámetro por el cual pasa un 60 % en masa de la muestra
DR	Densidad Relativa
d_x	Diámetro por el cual pasa un x % en masa de la muestra
e	Índice de vacíos
e_{max}	Índice de vacíos máximo
e_{min}	Índice de vacíos mínimo
F_i	Fuerza de penetración en instante i
G_s	Gravedad específica
G_M	Gravedad específica de la fracción sobretamaño
h_m	Altura probeta CBR
IP	Índice de Plasticidad
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico

M_{cs}	Masa suelo compactado seco en molde CBR
M_{ch}	Masa suelo compactado húmedo en molde CBR
M_{DC}	Masa retenida en tamiz 3/4 (20 mm)
M_{DF}	Masa pasante de tamiz 3/4 (20 mm)
m_h	Masa suelo húmedo
M_i	Masa retenida en tamiz i
M_m	Masa de muestra y agua
M_{m+cs}	Masa de molde CBR y suelo compactado seco
M_{m+ch}	Masa de molde CBR y suelo compactado húmedo
M_{mol}	Masa molde CBR
m_r	Masa recipiente
m_s	Masa suelos seco
n	Porosidad
ND	No determinado
NP	No plástico
P_1	Porcentaje asociado al diámetro d1
P_2	Porcentaje asociado al diámetro d2
P_C	Porcentaje fracción retenida en tamiz 3/4" (20 mm)
P_F	Porcentaje fracción pasante de tamiz 3/4" (20 mm)
P_x	Porcentaje asociado al diámetro dx
R_i	Porcentaje retenido en tamiz i
S	Saturación
ST	Sobretamaño
V	Volumen total
V_a	Volumen aire
V_{mol}	Volumen molde CBR
V_s	Volumen de sólidos
V_v	Volumen de vacíos
V_w	Volumen de agua
W	Peso total
w	Humedad
W_s	Peso sólidos
W_w	Peso agua
Z	Peso muestra total seca a tamizar

γ	Peso unitario
γ_d	Peso unitario seco
$\gamma_{d \max}$	Peso unitario seco máximo
$\gamma_{d \min}$	Peso unitario seco mínimo
γ_{sat}	Peso unitario saturado
γ_w	Peso unitario agua
γ_0	Peso unitario agua a 4°C
ρ_d	Densidad seca
ρ_{DF}	Densidad seca de la fracción retenida en tamiz 3/4" (20 mm)
ρ_{DT}	Densidad seca del total de la muestra
σ_i	Tensión de penetración en instante i

Apéndice A

Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (USCS)

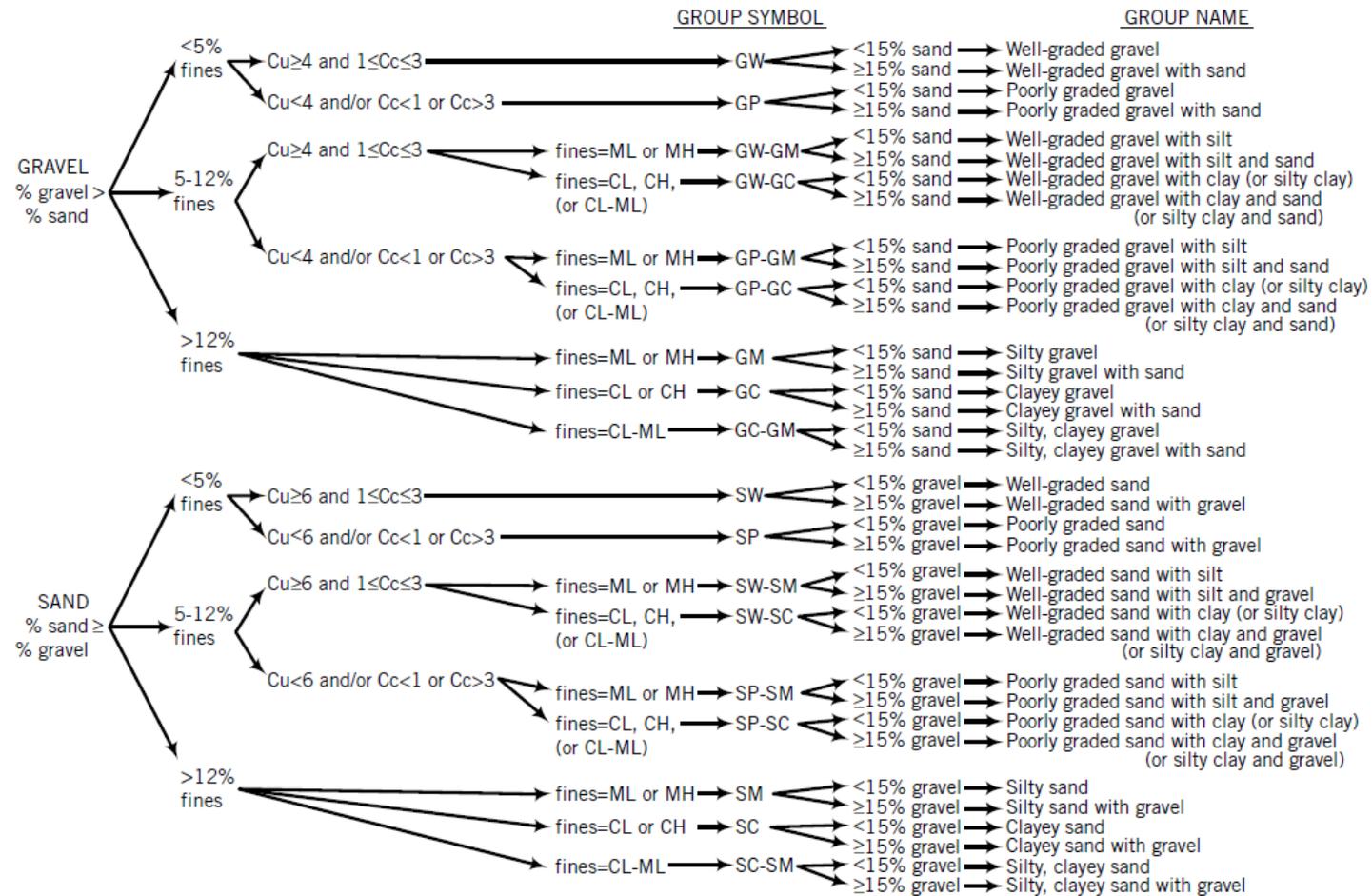


Figura 0.1: Diagrama de flujo para clasificar suelos de grano grueso (más del 50 % en masa de las partículas es retenido en el tamiz N°200 (0.075 mm) (ASTM-D-2487, 2000).

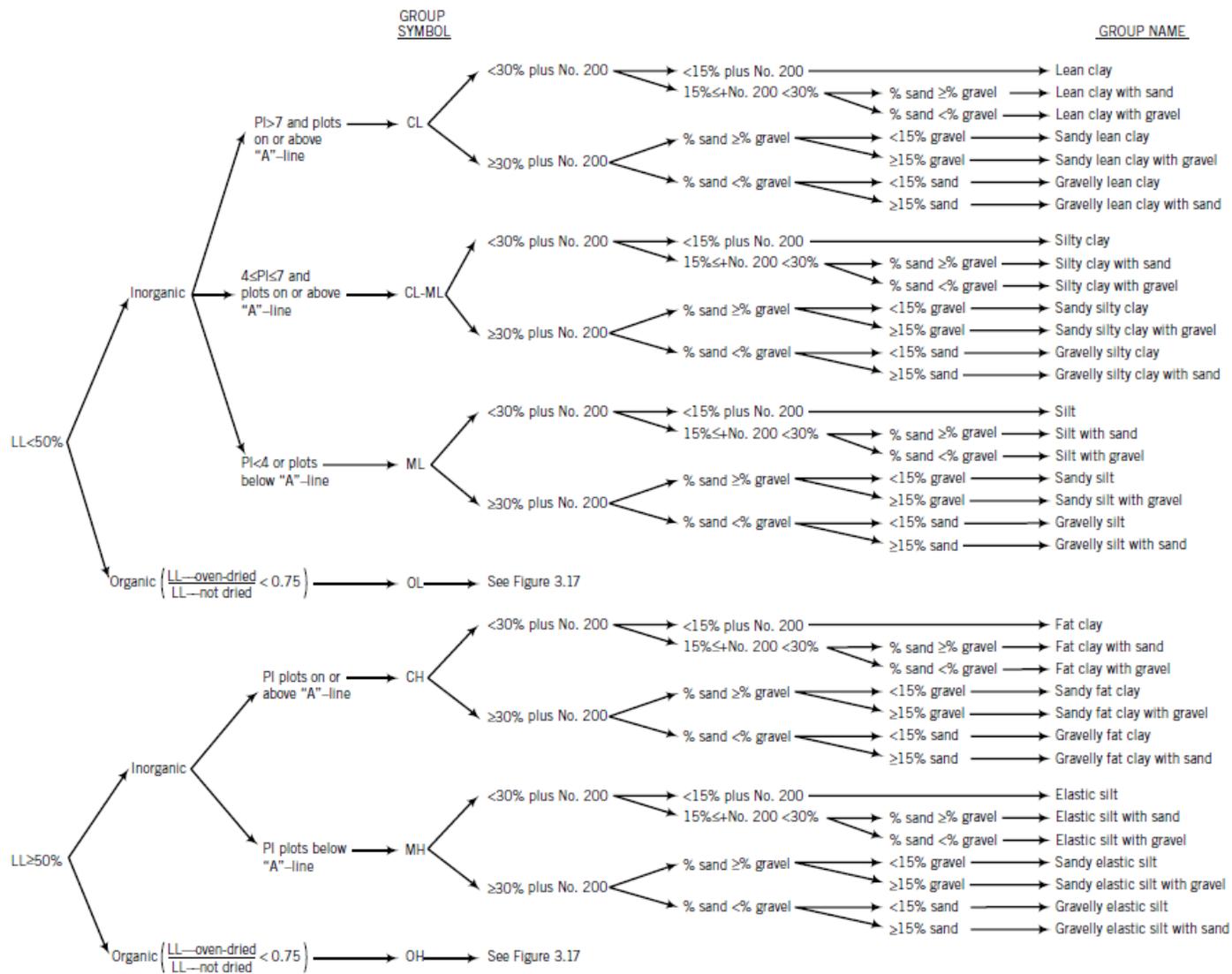


Figura 0.2: Diagrama de flujo para clasificar suelos de grano fino (50 % o más en masa de las partículas pasa el tamiz N°200 (0.075 mm) (ASTM-D-2487, 2000).

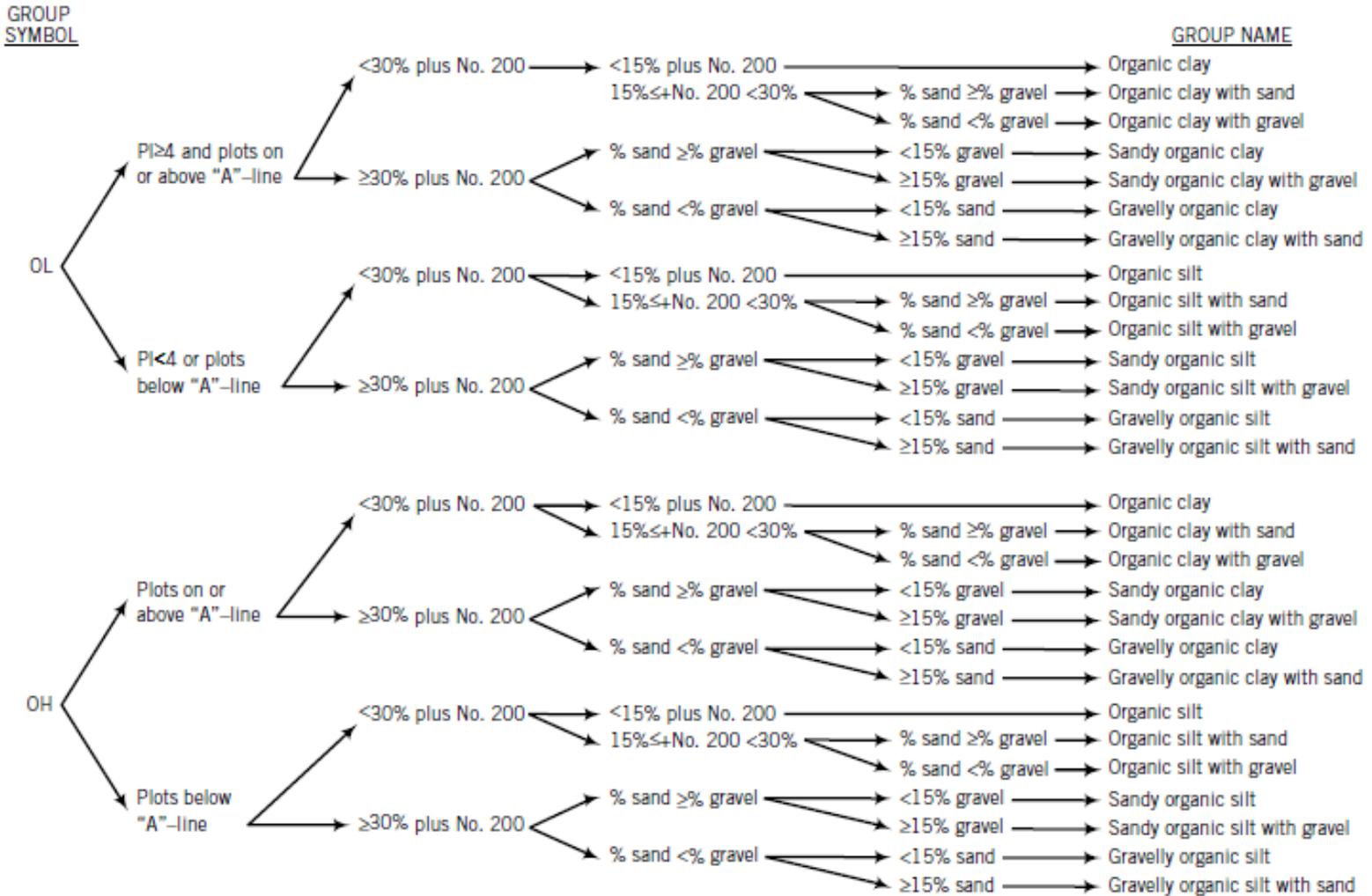


Figura 0.3: Diagrama de flujo para clasificar suelos orgánicos de grano fino (50 % o más en masa de las partículas pasa el tamiz N°200 (0.075 mm) (ASTM-D-2487, 2000).

Anexo A

Resultados ensayos de laboratorio

Tabla 0.1: Resultados ensayos granulometría.

ID Muestra	Sobrete maño [%]	% pasa 3"	% pasa 2 1/2"	% pasa 2"	% pasa 1 1/2"	% pasa 1"	% pasa 3/4"	% pasa 3/8"	% pasa #4	% pasa #10	% pasa #20	% pasa #40	% pasa #60	% pasa #140	% pasa #200	TMA Obs [mm]
M-1	0	100	98,6	97,2	94	90,5	88,5	84,3	81,9	67,1	53,1	35,7	23,7	11,6	9,5	95
M-2	0	100	95,4	91,3	86,9	78,9	72,2	55,9	44,7	32,4	21,5	14,1	9,7	5,5	4,8	91
M-3	9,93	100	96,8	81,7	70,8	62,1	55,2	40,6	31,8	25,2	19,7	13,9	9,9	6,2	5,4	103
M-4	0	100	90,6	77,8	60,6	43,7	35,3	24,1	18,8	15,2	10,5	5,7	3,8	2,7	2,5	88
M-5	0	100	96,6	92,3	85,3	78,2	72,9	61,7	52,9	44,3	26,1	15,9	10,7	6,2	5,3	91
M-6	0	100	94	86,2	74,6	59,4	49,9	32,6	21,6	14	8,2	5,2	3,7	2,5	2,3	94
M-7	0	-	100	92,3	81,7	62,6	52,8	37,5	29,3	22,1	14,9	7,2	4,5	3,2	3	71
M-8	0	100	94,7	87,2	79,2	67,6	61,1	46,3	36,2	29,1	22,2	13,2	8,3	4,8	4,3	85
M-9	5,45	100	91,2	72,4	61,4	50,6	45,5	37,8	34,7	32,7	29,1	18,9	12,1	7,2	6,3	120
M-10	0	-	-	-	-	-	-	-	100	99,2	95,3	77,7	53,3	15,8	11,3	4
M-11	6,15	100	96,3	85	65,4	52,4	45,8	33,5	25,9	20,4	16,2	11,7	7,9	4,3	3,6	0
M-12	0	100	98	93,1	83,1	72	65,4	51,1	42,5	37,6	31	25,2	23	6,5	6,2	85
M-13	6,88	100	91,4	83,1	68,4	57,4	51,8	37,7	30	24,5	21	16,3	11,3	6	4,9	109
M-14	2,52	100	93,2	90,1	75,2	63,7	56,3	43,6	35,1	28,4	19,7	12,7	9,5	6,5	5,9	98
M-15	0	100	97,3	89	77,1	65,3	56,6	39,2	30,9	26,8	25,5	22,7	15,9	8	6,6	91
M-16	0	100	93,3	82,5	71,1	59,4	52,7	42,9	34,8	27,1	19,1	13	9,6	6,5	5,9	75

Tabla 0.2: Resultados ensayos densidades intermedias.

No. Muestra		M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10	M-11	M-12
Frecuencia [Hz]	Tiempo [min]	γ [gr/cm ³]											
60	0	1,981	1,920	1,985	1,939	1,865	1,848	1,841	1,930	2,030	1,400	1,953	1,792
	1	2,182	2,205	2,277	2,135	2,125	2,050	2,167	2,206	2,267	1,652	2,165	2,145
	2	2,213	2,234	2,280	2,152	2,146	2,054	2,177	2,214	2,274	1,672	2,180	2,169
	4	2,239	2,247	2,288	2,155	2,159	2,059	2,184	2,217	2,287	1,683	2,197	2,183
	8	2,250	2,259	2,290	2,154	2,173	2,063	2,200	2,218	2,295	1,695	2,212	2,195
30	0	1,981	1,920	1,985	1,939	1,865	1,848	1,841	1,930	2,030	1,400	1,953	1,792
	1	2,141	2,075	2,144	2,117	2,020	1,948	2,045	2,123	2,161	1,639	2,047	2,014
	2	2,156	2,135	2,151	2,148	2,048	1,957	2,092	2,162	2,226	1,655	2,092	2,065
	4	2,172	2,140	2,182	2,151	2,059	1,978	2,108	2,174	2,227	1,674	2,116	2,095
	8	2,178	2,160	2,207	2,155	2,074	1,984	2,110	2,186	2,227	1,691	2,148	2,096
15	0	1,981	1,920	1,985	1,939	1,865	1,848	1,841	1,930	2,030	1,400	1,953	1,792
	1	2,000	1,943	2,002	1,945	1,901	1,878	1,863	1,959	2,077	1,502	1,967	1,806
	2	2,005	1,945	2,005	1,959	1,925	1,886	1,865	1,978	2,077	1,511	1,971	1,814
	4	2,009	1,946	2,008	1,961	1,932	1,889	1,866	1,983	2,077	1,528	1,974	1,824
	8	2,015	1,948	2,011	1,972	1,932	1,892	1,869	1,989	2,077	1,546	1,978	1,836

Tabla 0.3: Resultados densidades relativas.

No. Muestra		M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10	M-11	M-12
Frecuencia [Hz]	Tiempo [min]	DR [%]											
60	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	77,08	86,08	96,16	91,63	86,21	94,52	92,23	96,30	90,42	87,48	83,50	89,70
	2	87,76	93,75	97,15	98,91	92,41	96,14	94,50	99,01	92,94	93,40	88,85	94,78
	4	96,53	96,95	99,39	100,0	96,06	98,07	96,17	99,68	97,31	96,59	94,80	97,66
	8	100,0	100,0	100,0	99,85	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
30	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	62,69	49,74	55,68	84,03	53,92	49,09	60,98	70,07	52,37	83,73	39,34	60,11
	2	67,98	67,05	57,97	97,19	62,87	53,12	73,41	82,56	76,31	88,42	56,85	72,06
	4	73,46	68,56	67,69	98,22	66,26	63,10	77,71	86,56	76,49	93,86	65,81	78,70
	8	75,84	74,15	75,50	100,0	70,97	65,70	78,18	90,26	76,75	98,90	77,64	79,06
15	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	8,08	7,98	6,61	2,90	13,15	14,95	7,22	11,59	19,61	38,70	6,28	4,13
	2	10,08	8,69	7,42	9,92	21,90	19,41	7,88	18,81	19,73	42,15	7,79	6,73
	4	11,89	9,14	8,68	11,13	24,50	20,88	8,08	20,49	19,55	47,90	9,20	9,60
	8	14,40	9,85	9,73	16,89	24,53	22,15	9,22	22,78	19,87	54,06	10,76	12,92