



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**ESTUDIO DE CORRELACIONES PARA DENSIDAD RELATIVA Y  
RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS GRANULARES GRUESOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**JOSÉ IGNACIO RIQUELME OLIVARES**

**PROFESOR GUIA:  
LEONARDO DORADOR ORTIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ROBERTO GESCHE SCHULER  
CESAR PASTEN PUCHI**

**SANTIAGO DE CHILE  
ABRIL 2016**

## **ESTUDIO DE CORRELACIONES PARA DENSIDAD RELATIVA Y RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS GRANULARES GRUESOS**

En el marco de la presente investigación, se estudió la influencia de la densidad relativa en la resistencia al corte para materiales granulares gruesos. La finalidad de este estudio es establecer en primer lugar, una metodología que permita estimar la densidad relativa en materiales granulares gruesos a partir de resultados de ensayos de densidad máxima y mínima de laboratorio convencionales. Para ello se realizó una intensa búsqueda en la literatura técnica, lo cual permitió generar una base de datos sólida, que a su vez, fue utilizada en establecer correlaciones para estimar los índices de vacíos máximos y mínimos utilizando el coeficiente de uniformidad. Estas correlaciones permitieron conseguir el objetivo de construir una metodología que estima la densidad relativa en suelos gruesos.

Otro objetivo de este estudio es el de incorporar nuevos datos a los ábacos de resistencia utilizados para materiales granulares gruesos. Para ello se realizó una búsqueda en la literatura técnica de todos los ensayos triaxiales de grandes dimensiones publicados hasta ahora, con lo cual fue posible construir un nuevo ábaco de resistencia. Posteriormente se aplicó la metodología de estimación de la densidad relativa a aquellos datos recopilados para el ábaco de resistencia.

Como resultado de aplicar la metodología propuesta, esta se ajustó de muy buena forma, entregando resultados coherentes, y en la mayoría de los casos permitió estimar la densidad relativa a la que fueron ensayadas las muestras en celdas triaxiales de gran escala. Además se logró comprobar las tendencias de comportamientos propuestas por otros autores, por ejemplo que para un mismo nivel de confinamiento el ángulo de fricción que presenta una probeta densa es mayor al que presenta una probeta en estado suelto, o también que para un mismo estado inicial de densidad al aumentar el nivel de confinamiento el ángulo de fricción interna que presenta el material tiende a disminuir.

Por último, se establecen rangos de variaciones en el ángulo de fricción interna que podrían presentar los materiales para distintos niveles de confinamiento y diferente en densidad relativa, discriminando en curvas granulométricas uniformes y bien graduadas. Queda en evidencia que los fenómenos de resistencia al corte y densidad relativa dependen de varios factores que no fueron necesariamente considerados en esta investigación y sería interesante estudiar la influencia de estos en el futuro.

*... Dedicado a mis padres Ximena y Manuel.*

# TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
1.3 Resumen de Capítulos .....	5
1.3.1 Capítulo 1: Introducción .....	5
1.3.2 Capítulo 2: “Marco Teórico” .....	5
1.3.3 Capítulo 3: “Correlaciones para Densidad Relativa” .....	5
1.3.4 Capítulo 4: “Actualización ábaco de Resistencia al Corte” .....	5
1.3.5 Capítulo 5: “Conclusiones” .....	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 Introducción .....	6
2.2 Densidad relativa .....	7
2.2.1 Conceptos generales .....	7
2.2.2 Densidad relativa en suelos gruesos .....	9
2.3 Resistencia al corte .....	11
2.3.1 Métodos de escalamiento.....	11
2.3.1.1 Método de corte.....	12
2.3.1.2 Método de corte y reemplazo .....	12
2.3.1.3 Método de la matriz.....	13
2.3.1.4 Método de las gradaciones paralelas .....	14
2.3.2 Equipos triaxiales de grandes dimensiones en el mundo .....	15
2.3.3 Estudios realizados en equipos triaxiales de grandes dimensiones .....	15
2.3.4 Evolución del ábaco de resistencia al corte .....	18
CAPÍTULO 3. CORRELACIONES PARA DENSIDAD RELATIVA.....	24
3.1 Introducción .....	24
3.2 Recopilación y tratamiento de datos .....	25
3.2.1 Recopilación de datos .....	25
3.2.2 Clasificación y manejo de datos .....	26
3.2.2.1 Clasificación por $d_{50}$ .....	27
3.2.2.2 Clasificación para arenas.....	28
3.2.2.3 Clasificación por forma de partículas.....	28
3.2.2.4 Clasificación por ( $d_{max}$ ) .....	29

3.3	Correlaciones propuestas .....	30
3.3.1	Correlaciones $C_u - e_{min}$ .....	30
3.3.2	Correlaciones $e_{min} - e_{max}$ .....	32
3.4	Metodología para estimar la densidad relativa de materiales granulares gruesos .....	33
3.4.1	Clasificación de la muestra.....	33
3.4.2	Escalamiento de curvas granulométricas.....	33
3.4.3	Uso de correlación $C_u - e_{min}$ .....	34
3.4.4	Uso de correlación $e_{min} - e_{max}$ .....	35
3.4.5	Construcción de grafico $d_{max}$ vs $e$ .....	35
3.4.6	Extrapolación y obtención de DR.....	35
CAPÍTULO 4. ACTUALIZACIÓN ÁBACO DE RESISTENCIA AL CORTE .....		37
4.1	Introducción .....	37
4.2	Recopilación y tratamiento de datos .....	38
4.2.1	Recopilación de datos .....	38
4.2.2	Generación de base de datos, clasificación y manejo de datos .....	38
4.3	Incorporación de nuevos datos publicados al Ábaco de Leps .....	39
4.4	Incorporación de la densidad relativa al ábaco de Leps .....	43
4.4.1	Uso de la Metodología propuesta de capítulo 3 .....	43
4.4.2	Ajuste de la metodología propuesta .....	50
4.5	Ábaco de resistencia al corte.....	56
4.5.1	Incorporación de la densidad relativa al ábaco de resistencia al corte .....	56
4.5.2	Reducción del ángulo de fricción por efecto de la densidad relativa .....	65
4.5.3	Reducción del ángulo de fricción por efecto de la densidad relativa según tipo de curva granulométrica .....	68
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....		69
5.1	Resumen.....	69
5.2	Conclusiones .....	70
5.2.1	Correlaciones para densidad relativa.....	70
5.2.2	Metodología para estimar la densidad relativa a partir de ensayos a menor escala .....	70
5.2.3	Resistencia al corte y actualización de ábacos existentes.....	71
5.3	Limitaciones y Trabajos Futuros .....	72
5.3.1	Limitaciones del trabajo .....	72
5.3.2	Recomendaciones para trabajos futuros .....	72
SIMBOLOGÍA .....		73
BIBLIOGRAFÍA .....		75

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Relación entre $e_{min}$ y $e_{max}$ (De la Hoz, 2007).....	4
Figura 1.2: Ábaco de Leps (Leps, 1970). .....	4
Figura 2.1: Diagramas de fase (Wesley, 2009).....	7
Figura 2.2: Esquema de mesa vibratoria con un molde ensamblado (ASTM D4253-00).....	8
Figura 2.3: Relación entre $e_{min}$ y $e_{max}$ (Veiga Pinto, 1979) encontrada en (De Almeida, 2001). .....	10
Figura 2.4: Relación $e_{min}$ y $e_{max}$ (Dorador & Besio, 2013). .....	10
Figura 2.5: Esquema sobre-tamaños en modelo de la matriz (Craig, 2004).....	13
Figura 2.6: Ábaco de Leps modificado (Indraratna, et al., 1993) .....	18
Figura 2.7: Ángulo de fricción secante $\varphi_{sec}$ vs Tensión Normal $\sigma_n$ ordenados por forma de partículas (Douglas, 2002).....	19
Figura 2.8: Ángulo de fricción secante $\varphi_{sec}$ vs Tensión Normal $\sigma_n$ ordenados por tipo de roca (Douglas, 2002). .....	19
Figura 2.9: Ángulo de fricción secante $\varphi_{sec}$ vs Tensión Normal $\sigma_n$ ordenados por coeficiente de uniformidad (Douglas, 2002).....	20
Figura 2.10: Ángulo de fricción secante $\varphi_{sec}$ vs Tensión Normal $\sigma_n$ ordenados por tamaño máximo de partículas (Douglas, 2002).....	20
Figura 2.11: Ángulo de fricción secante $\varphi_{sec}$ vs Tensión Normal $\sigma_n$ ordenados por contenido de finos (Douglas, 2002).....	21
Figura 2.12: Ángulo de fricción secante $\varphi_{sec}$ vs Tensión Normal $\sigma_n$ ordenados por resistencia a la compresión simple UCS (Douglas, 2002). .....	21
Figura 2.13: Ángulo de fricción secante $\varphi_{sec}$ vs Tensión Normal $\sigma_n$ (Contreras, 2011). .....	22
Figura 2.14: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ (Ovalle, et al., 2014b) .....	23
Figura 3.1: Clasificación según $d_{50}$ (Elaboración propia). .....	27
Figura 3.2: Clasificación para arenas (Elaboración propia). .....	28
Figura 3.3: Clasificación por forma de partículas (Elaboración propia).....	29
Figura 3.4: Clasificación por tamaño máximo de partículas (Elaboración propia). .....	30
Figura 3.5: Correlaciones para $C_u-e_{min}$ (Elaboración propia).....	31
Figura 3.6: Correlaciones para $e_{min}-e_{max}$ (Elaboración propia).....	32
Figura 3.7: Escalamiento de granulometrías.....	34
Figura 3.8: Gráfico $d_{max}$ vs $e$ . .....	36
Figura 4.1: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Nueva data.....	40
Figura 4.2: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Ensayos Triaxiales considerados. ....	41

Figura 4.3: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Ensayos Triaxiales en lastre. ....	42
Figura 4.4: Resumen metodología aplicada.....	44
Figura 4.5: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Clasificación según estado de Densidad Relativa (Elaboración propia). ....	57
Figura 4.6: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Clasificación según estado de Densidad Relativa materiales de Lastre (Elaboración propia). ....	57
Figura 4.7: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Clasificación según estado de Densidad Relativa. a) Lastre CAD parallel psd b) Lastre CAD truncated psd c) Caliza La Angostura (granulometría A) d) Caliza La Angostura (granulometría B).....	59
Figura 4.8: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Clasificación según estado de Densidad Relativa. a) Rockfill Crushed Basalt Rock b) Dredger Tailings Oroville Dam Material c) Filita Chivor (granulometría A) d) Filita Chivor (granulometría B).....	60
Figura 4.9: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Clasificación según estado de Densidad Relativa. a) Rockfill Pyramid Dam (Quarry Basted) b) Rockfill Quartzite Shale Trois Vallées STV c) Granodiorita M1 d) Grava y Arena La Angostura (granulometría natural) (Elaboración propia). ....	61
Figura 4.10: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Clasificación según estado de Densidad Relativa. a) Grava y Arena La Angostura (granulometría A) b) Pizarra El Granero (granulometría A) c) Pizarra El Granero (granulometría B) d) Pórfido M2. ....	63
Figura 4.11: $\varphi_{max}$ vs $\sigma_n$ Clasificación según estado de Densidad Relativa. Rockfill Calcareous Prefontaines CP.....	64
Figura 4.12: $\Delta\varphi$ vs $\sigma_n$ para rangos de $\Delta DR\%$ (Elaboración propia).....	67
Figura 4.13: a) $\Delta\varphi$ vs $\sigma_n$ para rangos de $\Delta DR\%$ uniformes $Cu < 4$ b) $\Delta\varphi$ vs $\sigma_n$ para rangos de $\Delta DR\%$ bien graduados $Cu > 4$ (Elaboración propia). ....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1: Equipos triaxiales de grandes dimensiones en el mundo. ....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2.2: Resumen de investigaciones realizadas en equipos triaxiales de grandes dimensiones.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 3.1: Trabajos utilizados para obtención de base de datos.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3.2: Propiedades de material (ejemplo).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3.3: <math>C_u</math> de granulometrías escaladas. ....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3.4: <math>e_{min}</math> obtenido de Ec. (3.3).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3.5: <math>e_{max}</math> obtenido de Ec. (3.6).....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 3.6: <math>e_{min}</math> y <math>e_{max}</math> buscados. ....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 4.1: Trabajos utilizados como referencia. ....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4.2: Resultados DR metodología propuesta.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 4.3: Resultados DR metodología propuesta ajustada por forma de partículas. ....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4.4: Ensayos realizados a distintas densidades relativas e igual confinamiento. ....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla A - 1: Base de datos para correlaciones de densidad relativa.....</i>	<i>2</i>



# CAPÍTULO 1.

## INTRODUCCIÓN

---

---

### 1.1 Motivación

En ingeniería geotécnica, los suelos granulares gruesos por ejemplo enrocados, lastres de minería, suelos fluviales y aluviales con bolones, tienen la dificultad de ser caracterizados correctamente debido al tamaño de sus partículas, las cuales pueden superar 1 m de diámetro. Estos sobre-tamaños de partículas dificultan el muestreo y la conducción de ensayos de laboratorio estandarizados (granulometría, densidades mínima y máxima, ensayos de resistencia al corte, entre otros).

Considerando únicamente los ensayos para caracterizar el rango de densidades (mínima y máxima) de materiales granulares gruesos, existe escasa investigación al respecto y sólo es posible mencionar algunos trabajos como: (Marsal, 1973), (De la Hoz, 2007) y (Dorador & Besio, 2013). En general, se conocen los parámetros que gobiernan el empaquetamiento de materiales granulares gracias a estudios en Arena y Gravas (Kezdi, 1979), (Biarez & Hicher, 1997), (Cubrinovski & Ishihara, 2002) y (De la Hoz, 2007) pero no se han corroborado estos estudios en suelos granulares gruesos.

Además, no existe una metodología estándar que permita evaluar los valores de densidades mínima y máxima precisos, en materiales granulares gruesos, por lo cual, el parámetro de la Densidad Relativa en general es omitido en la mayoría de los estudios geotécnicos profesionales que involucran materiales granulares gruesos. El no conocer el grado de compactación del

*Marco Teórico*

material limita considerablemente la caracterización geotécnica de este tipo de materiales ya que el porcentaje de Densidad Relativa (DR%) está relacionado directamente con la resistencia al corte y la deformación del material frente a esfuerzos de corte y compresión.

Por otro lado, el ábaco de Leps (1970) es una correlación utilizada ampliamente en obras civiles y mineras para obtener la resistencia al corte de enrocados (ángulo de fricción máximo secante). Los parámetros de entrada son la presión normal a la cual está sometida el material y el grado de resistencia, gradación y densidad del enrocado (Alta, media o baja). Los datos (aproximadamente 100 ensayos triaxiales CID) considerados en este ábaco son principalmente resultados de ensayos triaxiales de gran escala conducidos por Raúl Marsal en México en los años 60, publicados en (1965) y (1967).

Aunque el ábaco de Leps (Figura 1.2) tiene aceptación en ingeniería civil o minería, existen ciertas razones por la cual debería ser actualizado.

- Desde 1970 a la fecha, nuevos aparatos triaxiales de grandes dimensiones han sido creados y nuevos datos han sido publicada hasta hoy en día. El autor estima que son entre 100 a 200 nuevos resultados de ensayos triaxiales publicados a la fecha.
- La gran mayoría de los datos considerados en el ábaco son en realidad ángulos de fricción secante máximos (peak), ya que una importante cantidad de estos ensayos experimentaron dilatación durante su ejecución (rockfill de alta resistencia y en estado denso). El problema que aparece, por ejemplo en la industria minera, es que los lastres estériles y lixiviados, rellenos, entre otros se encuentran muchas veces en estado suelto (ya que se depositan por volteo) o poseen una competencia que conlleva a un comportamiento contractivo, y por lo tanto una carencia de ángulo de fricción peak. Esto último quiere decir que el ábaco de Leps sobre-estimaría en cierta medida la resistencia de materiales granulares gruesos depositados por volteo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Estudiar la influencia de la densidad relativa en la resistencia al corte de enrocados y suelos granulares gruesos.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Crear un ábaco para suelos gruesos y enrocados que relacione la densidad mínima y máxima con los parámetros geotécnicos: Coeficiente de Uniformidad ( $C_U$ ), Tamaño máximo del material ( $d_{100}$ ) y forma de partículas. Se pretende generalizar el ábaco creado para arenas tal como se muestra en Figura 1.1 (De la Hoz, 2007)
- Actualizar el Abaco de Leps, considerando nueva data de ensayos triaxiales de grandes dimensiones desde 1970 hasta la fecha e incluyendo el parámetro de densidad relativa en estos (ver figura 1.2)

Marco Teórico

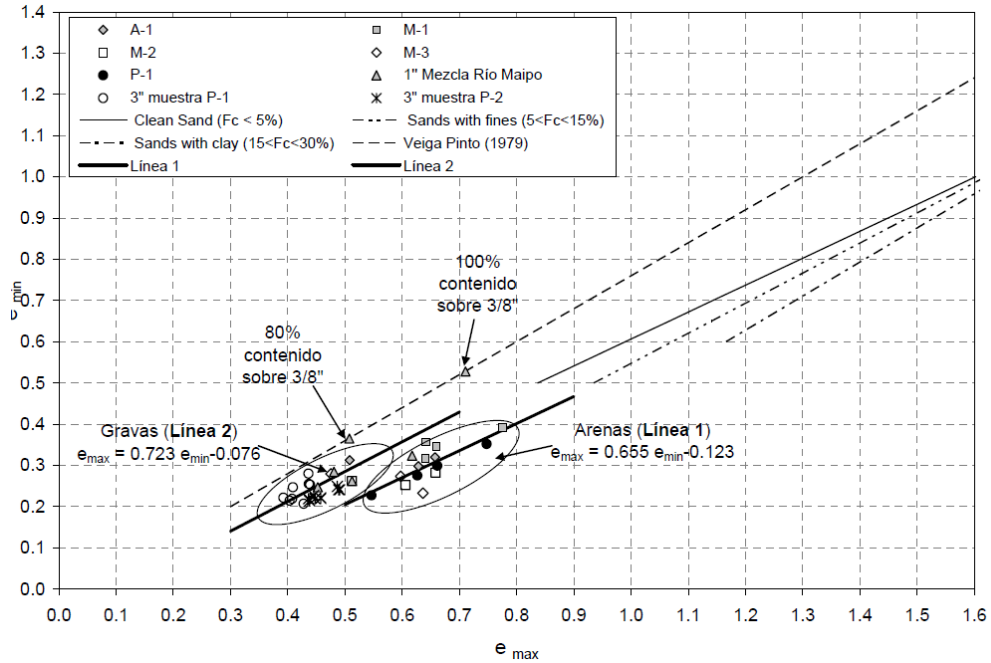


Figura 1.1: Relación entre  $e_{min}$  y  $e_{max}$  (De la Hoz, 2007).

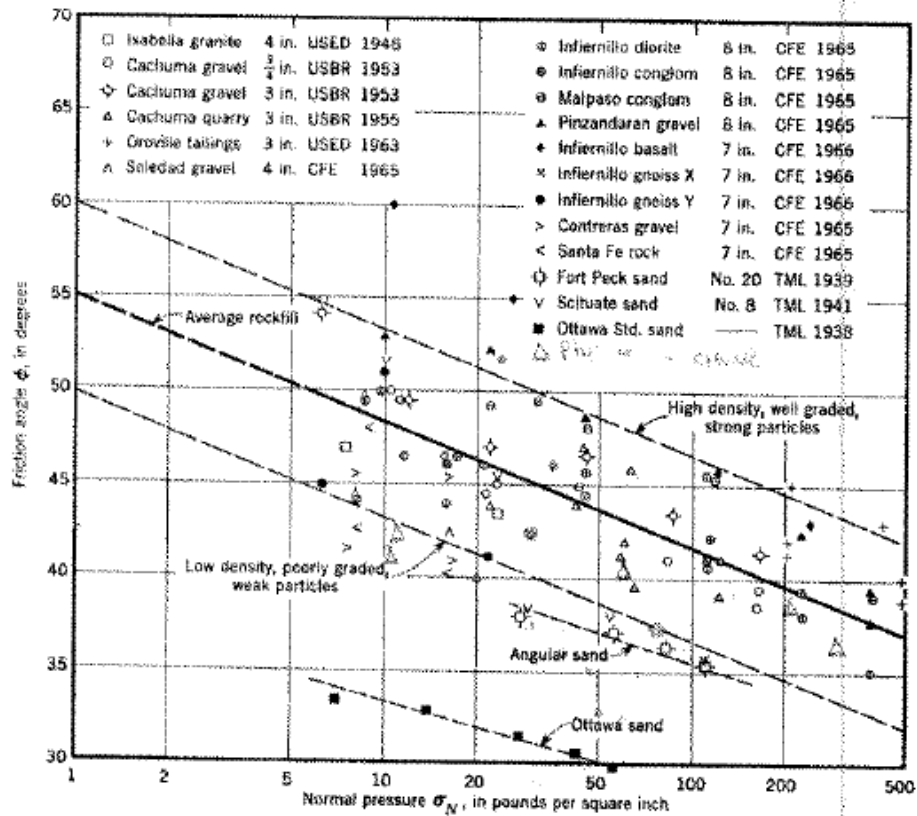


Figura 1.2: Ábaco de Leps (Leps, 1970).

## **1.3 Resumen de Capítulos**

### **1.3.1 Capítulo 1: Introducción**

En el capítulo 1 se da a conocer un resumen de la motivación que da pie a esta investigación, además del objetivo principal de estudiar la influencia de la densidad relativa en la resistencia al corte de enrocados y suelos granulares gruesos. Además se presenta un resumen de los capítulos que componen esta investigación.

### **1.3.2 Capítulo 2: “Marco Teórico”**

En el capítulo 2 se dan a conocer las bases teóricas en las cuales se apoyan las hipótesis de este trabajo de investigación, realizando una revisión bibliográfica relacionada con el tema a tratar. El capítulo se divide en dos unidades; una centrada en la densidad relativa y otra en resistencia al corte, esta última determinada principalmente en ensayos triaxiales CID (Consolidado isotrópicamente drenado) de gran escala.

### **1.3.3 Capítulo 3: “Correlaciones para Densidad Relativa”**

En el capítulo 3 se presentan correlaciones para estimar las densidades mínimas y máximas de materiales granulares gruesos que fueron obtenidas a partir de datos de densidades máximas y mínimas obtenidos desde la literatura técnica. Además se presenta una metodología que permite estimar la densidad relativa de estos materiales granulares gruesos.

### **1.3.4 Capítulo 4: “Actualización ábaco de Resistencia al Corte”**

En el capítulo 4 se presenta una actualización del ábaco de resistencia al corte propuesto por Leps en 1970 incluyendo resultados de ensayos triaxiales de gran escala según diversos trabajos reportados en la literatura técnica. Además se presenta una nueva gráfica que incluye el efecto de la densidad relativa en la resistencia al corte con el objeto de presentar una nueva herramienta que permita mejorar los diseños de proyectos de ingeniería civil y minera que involucran materiales granulares gruesos.

### **1.3.5 Capítulo 5: “Conclusiones”**

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones, limitaciones de la investigación y las perspectivas para futuros trabajos.

## CAPÍTULO 2.

# MARCO TEÓRICO

---

---

### 2.1 Introducción

Esta sección resume la información sobre la cual se apoya este trabajo. Se incluye información introductoria referente a los dos grandes temas que se tratarán en esta investigación: la *densidad relativa* y la *resistencia al corte* de materiales granulares gruesos.

En cuanto a la densidad relativa se mencionan algunos de los trabajos más importantes realizados en este ámbito aunque la mayoría de ellos están centrados en arenas. En estos trabajos se presentan los parámetros más relevantes que gobiernan el empaquetamiento de materiales granulares, disposición o formas de acomodo de partículas, aunque esto no se ha corroborado en estudios sobre materiales granulares gruesos.

Por otro lado también se mencionan los principales trabajos realizados en el ámbito de la caracterización geotécnica de materiales granulares gruesos y la determinación de la resistencia al corte mediante ensayos triaxiales CID de gran escala. Además se presentan algunos de los equipos que existen alrededor del mundo.

## 2.2 Densidad relativa

### 2.2.1 Conceptos generales

La composición de un suelo puede ser en dos o tres fases; si el suelo está completamente seco, los vacíos que están entre partículas sólidas están rellenos solo con aire mientras que cuando los vacíos están rellenos solo con agua se dice que el suelo está saturado. Cuando presenta tres fases, es decir, los vacíos están rellenos por aire y agua se dice que el suelo está parcialmente saturado.

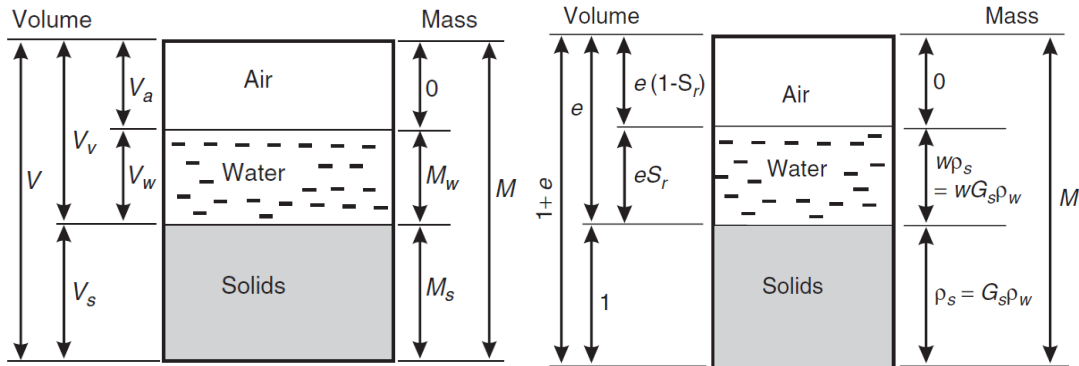


Figura 2.1: Diagramas de fase (Wesley, 2009).

En caso de suelos granulares como arenas y gravas se utiliza el concepto de densidad relativa (DR) o índice de densidad (ID), para expresar la relación entre el índice de vacíos in-situ o de una muestra ( $e$ ) y los valores  $e_{\max}$  y  $e_{\min}$ .

$$DR(\%) = \frac{(e_{\max} - e)}{(e_{\max} - e_{\min})} 100. \quad (2.1)$$

La densidad relativa de un suelo en el estado más denso posible ( $e=e_{\min}$ ) es 100% y para el estado más suelto posible ( $e=e_{\max}$ ) es 0%. Estos rangos dependen del método seleccionado para realizar las pruebas.

Marco Teórico

Los métodos estándar más conocidos para determinar las densidades mínimas y máximas son el método japonés (JSSMFE) y método estándar de ASTM- American Society of Testing Materials. (D4253-00 y D4254-00).

El método japonés, consiste introducir el material a un molde de acero mediante capas, generalmente diez, y por cada capa realizar 100 golpes al molde para producir vibraciones que permitan la mejor acomodación de los granos.

En el método estándar de ASTM la densidad máxima es determinada usando una mesa vibratoria, que debe ser montada en un piso de concreto para no transmitir vibraciones a otras áreas de prueba. Moldes rígidos de forma cilíndrica son ensamblados a la mesa y estos contienen la muestra a la que se determinará la densidad máxima. La mesa debe ser capaz de vibrar verticalmente alcanzando amplitudes de desplazamientos de  $0.33 \pm 0.05$  mm a una frecuencia de 60 Hz, o bien,  $0.48 \pm 0.05$  mm a 50 Hz. Mayores detalles del procedimiento que se debe realizar para determinar la densidad máxima son entregados en la norma ASTM D4253-00.

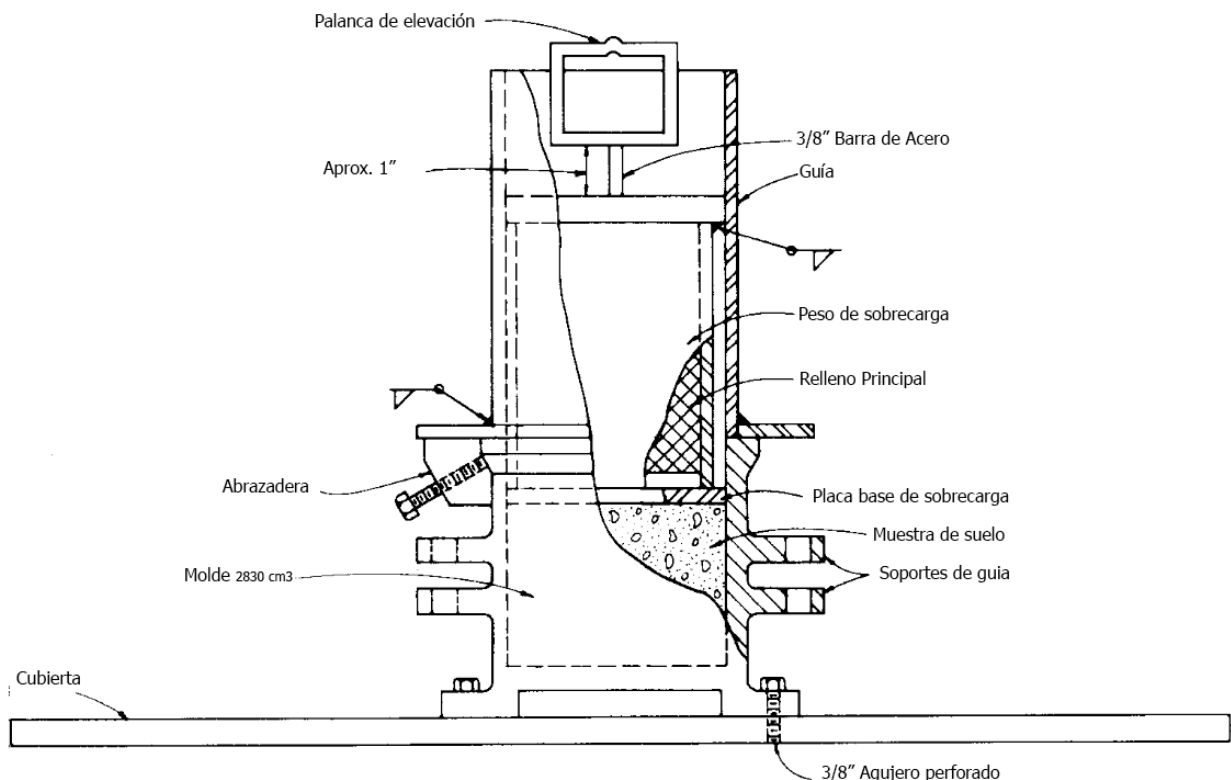


Figura 2.2: Esquema de mesa vibratoria con un molde ensamblado (ASTM D4253-00).



*Marco Teórico*

Para el caso de la densidad mínima se utilizan también moldes rígidos donde se deposita la muestra a través de una boquilla con una altura de caída no mayor a una pulgada permitiendo un flujo continuo de partículas de suelo al molde. Mayores detalles del procedimiento pueden ser encontrados en la norma ASTM D4254-00.

Si se tiene el valor de la gravedad específica ( $G_s$ ) fácilmente a partir de relaciones de fase se obtiene el índice de vacíos ( $e$ ) porque se relaciona con la densidad seca in situ o de una muestra a partir de la siguiente ecuación:

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (2.2)$$

$\gamma_w$  = peso específico del agua.

$\gamma_d$  = Peso específico del suelo seco.

Todos los aspectos de estabilidad de suelos (capacidad de soporte, estabilidad de taludes, resistencia a la penetración, por nombrar algunos) dependen de la resistencia al corte del suelo.

(Marsal & Reséndiz, 1975), (Biarez & Hicher, 1994), (Mohammadzadeh, 2010), entre otros, concuerdan que la resistencia al corte depende de propiedades tales como la dureza de partículas, la gradación, la forma de partículas y de variables de estado tales como la humedad, la fábrica, la densidad inicial, la temperatura, el nivel de tensiones y la trayectoria de tensiones.

Este trabajo se enfoca principalmente en el efecto de la densidad inicial y del nivel de tensiones en la resistencia al corte y la disminución del ángulo de fricción, de forma similar a lo realizado por Leps en 1970.

### **2.2.2 Densidad relativa en suelos gruesos**

Existen diversos estudios donde se han realizado significativos intentos de determinar el comportamiento de suelos granulares. Autores como (Ishihara, 1996) y (Biarez & Hicher, 1997) son algunos de los más importantes en esta materia. Lamentablemente en su mayoría los análisis fueron realizados en suelos granulares finos con tamaños máximos de partículas menores a 76

mm (3”). En materiales granulares más gruesos, tales como enrocados de canteras, o lastres mineros no existe abundante investigación, por lo tanto resulta importante corroborar si los resultados obtenidos en suelos granulares finos son extrapolables para materiales granulares gruesos como los mencionados anteriormente.

Por simplicidad es mejor trabajar con los índices de vacíos para obtener correlaciones, tal como lo hicieron en sus trabajos (Cubrinovski & Ishihara, 2002) y (De la Hoz, 2007), además de (Dorador & Besio, 2013).

Estudios previos han intentado establecer correlaciones entre el índice de vacíos máximo  $e_{max}$  y el índice de vacíos mínimo  $e_{min}$ . Autores como (Veiga Pinto, 1979) y (Cubrinovski & Ishihara, 2002) propusieron una correlación lineal entre estos dos parámetros y un trabajo posterior (De la Hoz, 2007) permitió incluir una correlación similar aplicada en gravas (ver figura 1.1). Además se ha podido identificar tendencias a partir de variaciones en el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y el  $D_{50}$ . Según lo anterior, al aumentar el  $C_u$  los valores de  $e_{min}$  y  $e_{max}$  disminuyen, mientras que granulometrías con mayores  $D_{50}$  tienden a disminuir levemente el valor de  $e_{max}$  (Dorador & Besio, 2013).

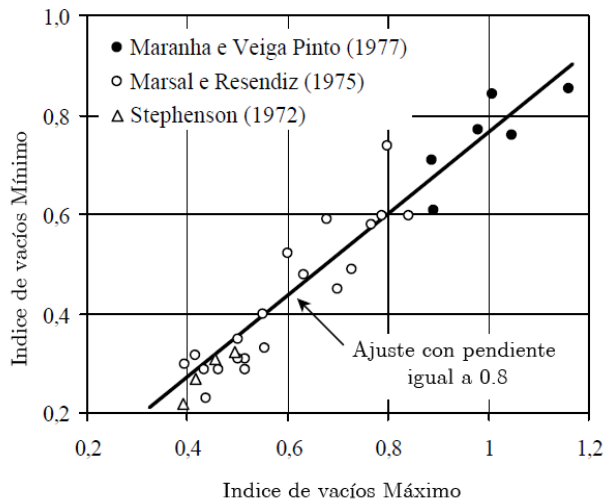


Figura 2.3: Relación entre  $e_{min}$  y  $e_{max}$  (Veiga Pinto, 1979) encontrada en (De Almeida, 2001).

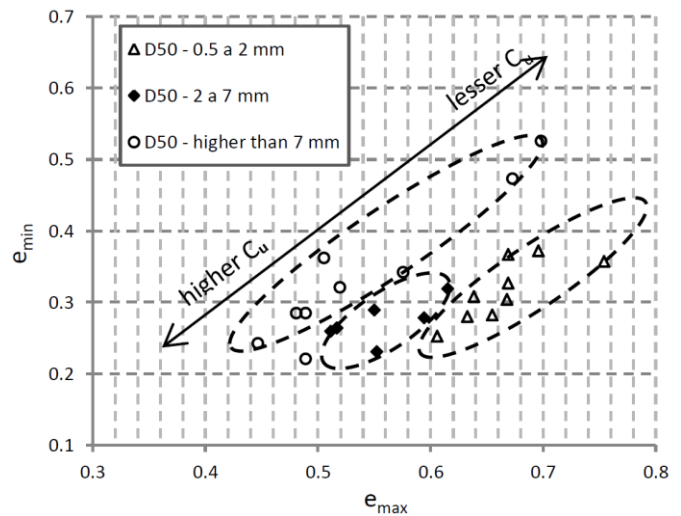


Figura 2.4: Relación  $e_{min}$  y  $e_{max}$  (Dorador & Besio, 2013).

Teniendo en cuenta todo el conocimiento que existe en suelos granulares de tamaño arena, y a partir de las extrapolaciones de densidades mínimas y máximas que proponen (Dorador & Besio, 2013) surge una de las hipótesis que sirven de base para la investigación que se desarrolla en los próximos capítulos. Utilizar correlaciones que permitan estimar la densidad relativa de materiales granulares gruesos, a partir de resultados provenientes de ensayos en equipos convencionales disponibles en la literatura técnica.

## **2.3 Resistencia al corte**

Autores como (Marsal et al., 1965), (Marachi, et al., 1972), (Leps, 1970), (Indraratna, et al., 1993), (De Almeida, 2001) han estudiado la resistencia al corte de materiales granulares principalmente por su importante rol en muchos aspectos de estabilidad de suelos, por ejemplo en capacidad de soporte, estabilidad de taludes, resistencia a la penetración por nombrar algunos.

Existen algunos casos donde para estudiar la resistencia al corte se han ejecutado ensayos in situ, por ejemplo los realizados en Chile por Issa Kort, Ortigosa y Musante para estudiar la grava de Santiago durante la construcción del metro en el año 1979, sin embargo, no es común contar con los recursos para realizar ensayos a gran escala ya sea in situ o en laboratorio.

En general estudios de resistencia al corte para proyectos de ingeniería profesional se realizan en cajas de corte directo de dimensiones 30 cm x 30 cm y en equipos triaxiales que permiten probetas de hasta 15 cm de diámetro por 30 de altura, admitiendo un tamaño máximo de partículas de 1" (25,4 mm), y así cumplir con la relación  $D/t_{\max} \geq 6$  tal como propuso (Fragaszy, et al., 1992). Por lo tanto cuando se requiere caracterizar un suelo muy grueso lo usual es recurrir a métodos de escalamiento de granulometrías.

### **2.3.1 Métodos de escalamiento**

Existen cuatro métodos propuestos por autores en el pasado, el método de corte, el método de corte y reemplazo, el método de la matriz y el método de las curvas homotéticas o gradaciones paralelas.

### **2.3.1.1 Método de corte**

También conocida como Scalping technique consiste en extraer las partículas de diámetro mayor según el tamaño máximo deseado, y de esta manera tomar el nuevo valor de tamaño máximo como el 100% pasante; puede repetirse el procedimiento cuantas veces quiera y formar una serie de curvas granulométricas. Este método fue presentado por (Zeller & Wullimann, 1957), con el objeto de estudiar la dependencia de la resistencia al corte en función de la porosidad y el tamaño máximo de la muestra para una presión de confinamiento constante en materiales para un embalse. Como resultado, para una misma porosidad la resistencia al corte aumenta con la disminución del tamaño de partículas.

(Al-Hussaini, 1983) realizó un procedimiento similar en un material de tipo basalto chancado, con ensayos triaxiales de distintos diámetros de probeta, concluyendo que la resistencia al corte se incrementa al aumentar el tamaño máximo de partículas.

En las dos investigaciones mencionadas las conclusiones son diferentes, en la primera la resistencia al corte disminuye al aumentar el tamaño de partículas y en la segunda ocurre lo contrario. Esto se puede atribuir a varios factores, por ejemplo, cambios en la forma de las partículas, cambios en la distribución granulométrica, pasar de bien graduada a mal graduada, diferencia en la dureza de las partículas o rugosidad.

(De la Hoz, 2007) realizó una serie de ensayos triaxiales CID, de forma similar a lo realizado por (Al-Hussaini, 1983), en grava del río Maipo cortada a 3/8" (9.50mm). Como resultado se obtuvo que la muestra cortada posee menor ángulo de fricción peak que la muestra original, sin embargo el módulo de deformación  $E_{50}$  es mayor en la muestra cortada. Lo que presenta una limitación importante en el método. (Dorador, 2010) también realizó ensayos triaxiales CID utilizando este método para una grava del río Aconcagua cortada bajo un tamaño de #4 (4.75mm) obteniendo la misma conclusión de De la Hoz. Ambos autores recomiendan el uso del método de corte hasta un porcentaje de sobre-tamaño del 20%.

### **2.3.1.2 Método de corte y reemplazo**

El método de corte y reemplazo consiste en retirar todas las partículas de sobre-tamaño deseadas o que no pueden ser ensayadas en el equipo convencional y reemplazarlas por un porcentaje igual en peso de partículas de menor tamaño. Este método se fundamenta sobre la

hipótesis de que los resultados de los ensayos en probetas pequeñas del material alterado o nuevo son comparables a los obtenidos por ensayos a mayor escala efectuados en el material original.

(Donaghe & Torrey, 1979) realizaron ensayos triaxiales no drenados en probetas de 38.1 cm de altura y 15.2 cm de diámetro, e incorporando diferentes porcentajes de grava entre 20% y 60% y presiones de confinamiento entre 4.1 kg/cm<sup>2</sup> y 13.8 kg/cm<sup>2</sup>. Como conclusión de la investigación realizada por (Donaghe & Torrey, 1979), el método de corte y reemplazo presenta mejores resultados para granulometrías a escala real que contienen más de un 40% de grava, lo cual limita la utilización del método.

### 2.3.1.3 Método de la matriz

Propuesto por (Fragaszy, et al., 1992) consiste en una metodología basándose en la hipótesis en que la resistencia al corte de un material con bajo porcentaje de gravas es controlado por la matriz del suelo y no por las partículas de sobre tamaño que están inmersas. Por lo tanto al ensayar la matriz en equipos triaxiales convencionales se puede caracterizar todo el material.

En el modelo existen dos condiciones para las partículas de sobre-tamaño; 1) cuando las partículas de sobre-tamaño se encuentran en contacto y la matriz rellena el espacio que se genera entre ellas y 2) las partículas de sobre-tamaño se encuentran flotando dentro de la matriz. Ambas condiciones se encuentran esquematizadas en la figura 2.5.

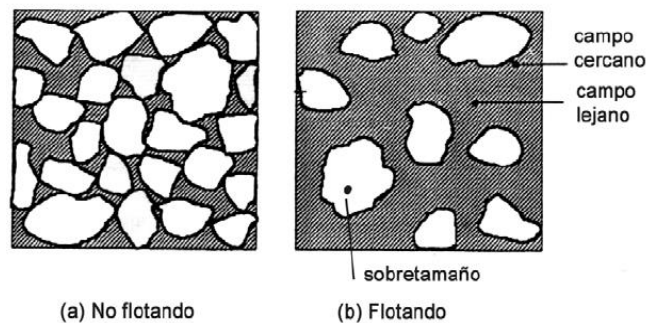


Figura 2.5: Esquema sobre-tamaños en modelo de la matriz (Craig, 2004).

La limitación que presenta este método es que sólo sirve para probetas en las que las partículas de sobre-tamaño se encuentren flotando dentro de la matriz. Ésta condición depende de

la granulometría, el porcentaje de sobre-tamaño y la interacción de las partículas, por lo tanto al aumentar el contenido de sobre-tamaño, las partículas grandes tienden a tener contacto entre ellas y la condición de flotación de las partículas figura 2.5 (b) deja de cumplirse.

#### **2.3.1.4 Método de las gradaciones paralelas**

También conocido como el método de las curvas homotéticas, es uno de los más utilizados, fue propuesto por Lowe en 1964. Consiste en construir granulometrías paralelas manteniendo el tamaño máximo de las partículas dentro de la proporción 1/5 a 1/6 del diámetro de la probeta a ensayar en los equipos de grandes dimensiones disponibles.

Diferentes autores han utilizado este procedimiento en investigaciones de diversa índole, entre ellos se encuentran (Marachi, et al., 1972), (Thiers & Donovan, 1981), Lee (1986), Baladi et al. (1988), (Gesche, 2002), (Varadajan, et al., 2003), (De la Hoz, 2007), (Dorador, 2010) y (Besio, 2012).

Dentro de las ventajas de este método se puede mencionar la conservación de los índices granulométricos  $C_u$  y  $C_c$ , en las granulometrías homotéticas.

El método se ajusta muy bien cuando la curva granulométrica del material es bien graduada, es decir con un  $C_u$  alto, y el porcentaje de finos menor al 10% para todas las curvas homotéticas, y en general al construir curvas paralelas los resultados de ángulos de fricción que se obtienen son muy similares para todas las muestras ensayadas.

La principal limitación que presenta este método es que cuando el porcentaje de finos es mayor a un 10%, ya sea en la curva granulométrica original o en las curvas homotéticas, la metodología no funciona muy bien. Esto se atribuye a que la contribución a la resistencia al corte del material grueso disminuye, lo que conlleva a una disminución del ángulo de fricción y así, el diseño geotécnico es conservador (De la Hoz, 2007). Además debe considerarse que cuando se realiza un escalamiento muy grande de tamaño, es decir, la nueva granulometría es demasiado fina en comparación a la original, la forma y la resistencia de las partículas del material puede cambiar debido al efecto de escala con lo cual el material reducido que se está tratando de modelar en el estudio resulta muy distinto al original.

### 2.3.2 Equipos triaxiales de grandes dimensiones en el mundo

Un equipo triaxial es considerado de grandes dimensiones cuando el diámetro de la probeta que admite es mayor a 150 mm que es valor máximo comúnmente utilizado para el estudio de la resistencia al corte de suelos granulares.

Algunos de los equipos triaxiales de grandes dimensiones en el mundo son presentados en la tabla 2.1

Tabla 2.1: Equipos triaxiales de grandes dimensiones en el mundo.

Laboratorio	Diámetro Muestra (mm)	País
University of Cataluña	300	Spain
Geodelft	400	Netherlands
The university of Karlsruhe	800	Germany
University of Berkeley	915	USA
University of Nantes	1000	France
Missouri Institute of science and technology	420	USA
University of Nottingham	300	UK
University of Chile (Idiem)	1000	Chile
Norwegian University of science and technology	500	Norway
National laboratory of Civil engineering	300	Portugal
Building and Housing Research Center (BHRC), Tehran	300	Iran

### 2.3.3 Estudios realizados en equipos triaxiales de grandes dimensiones

Algunos de los estudios realizados en equipos triaxiales de grandes dimensiones se presentan en la tabla 2.2. Esta tabla fue construida en base a la información reportada por (De Almeida, 2001), (Ionescu, 2004), (Ovalle, et al., 2014b), entre otros.

Tabla 2.2: Resumen de investigaciones realizadas en equipos triaxiales de grandes dimensiones.

N°	Autor	Año	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Comentario	País
1	Holtz and Gibbs	1956	229	572	Arena y grava, $d_{max}$ 76 mm $\sigma_{3max}$ 689 kPa	USA
2	Zeller and Wullimann	1957	480	-	Material presa de Göschenenalp	Suecia

Marco Teórico

Nº	Autor	Año	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Comentario	País
3	Schultze	1957	500	1250	Material pizarra Greywacke, grava, balasto $d_{max}$ 150 mm $\sigma_{3max}$ 147 kPa	
4	Shultze and Coesfeld	1961	500	1250	Material pizarra Greywacke, grava, balasto $d_{max}$ 150 mm $\sigma_{3max}$ 147 kPa	
5	Hall and Gordon	1963	460	-	Material presa Isabella $\sigma_{3max}$ 100kPa	USA
6	Lowe	1964	300	-	Material presa Shihmen	USA
7	Leussink	1965	1000	1800	Caracterización de resistencia al corte, ruptura factor de escala $\sigma_{3max}$ 2500 kPa	Alemania
8	Marsal	1965	1130	2500	Material presa El Infiernillo $d_{max}$ 77-205 mm $\sigma_{3max}$ 2500 kPa	México
9	Marsal	1967	200	500	Material Diorita y basalto $\sigma_{3max}$ 4900 kPa	México
10	Fumagalli	1969	510	-	Estudio efecto de escala $d_{max}$ 260 mm	Italia
11	Leslie	1969	300	-	Estudia efecto tamaño máximo de partículas $\sigma_{3max}$ 4000 kPa	USA
12	Marachi et al.	1972	915	2290	Caracterización de resistencia al corte y deformación de basalto y bombas $d_{max}$ 153mm $\sigma_{3max}$ 5200 kPa	USA
13	Becker et al.	1972	915	2290	Caracterización de resistencia al corte y deformación de basalto y bombas $d_{max}$ 153mm $\sigma_{3max}$ 5200 kPa	USA
14	Charles	1973	230	500	Material presa Scammonde (basalto, arenisca y pizarra) $d_{max}$ 38 mm $\sigma_{3max}$ 695 kPa	Inglaterra
15	Marsal	1973	1130	2500	Material gneiss granítico $\sigma_{3max}$ 2500 kPa	México
16	Shenton	1975	230	385	Material Caliza $d_{max}$ 38 mm $\sigma_{3max}$ 78 kPa	
17	Olowokere	1975	225	450	Dolomita, escoria, caliza $d_{max}$ 38 mm $\sigma_{3max}$ 311 kPa	
18	Valstand and Strom	1976	500	1000	Material gneiss granítico $d_{max}$ 80 mm $\sigma_{3max}$ 2500 kPa	
19	Rico et al.	1977	190	380	Material basalto $d_{max}$ 38 mm $\sigma_{3max}$ 150 kPa	
20	Charles and Watts	1980	230	500	Estudia efecto de la tensión de confinamiento $\sigma_{3max}$ 400 kPa	Inglaterra
21	Thiers and Donovan	1981	380	-	Material presa Little Blue Run	USA
22	Parkin and Adikari	1981	380	800	Material Riolita $d_{max}$ 90 mm $\sigma_{3max}$ 1400 kPa	
23	Alva-Hurtado and Selig	1981	152	381	Material balasto $d_{max}$ 30 mm $\sigma_{3max}$ 138 kPa	
24	Veiga Pinto	1982	300	700	Material presas Beliche y El piedras $\sigma_{3max}$ 2500 kPa	Portugal
25	Portilla et al.	1985	230	450	Estudia resistencia al corte $\sigma_{3max}$ 1000 kPa	España
26	Lee	1986	300	600	Material greywacke $d_{max}$ 76 mm $\sigma_{3max}$ 589 kPa	



Marco Teórico

N°	Autor	Año	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Comentario	País
27	Brow	1988	230	-	Material presa Evretou (Chipre)	Inglaterra
28	Soriano	1989	230	450	Estudia resistencia al corte $\sigma_{3max}$ 1000 kPa	España
29	Indraratna et al.	1993	300	600	Material presa Chiew Larn (Tailandia) Greywacke $d_{max}$ 76 mm $\sigma_{3max}$ 589 kPa	India
30	Marcu et al.	1994	250	500	Material esquisto, arenisca, grava y arena $d_{max}$ 50 mm $\sigma_{3max}$ 1000 kPa	
31	De la Hoz	2007	600	120	Estimación de parámetros de resistencia al corte, ensayos triaxiales en gravas del Río Maipo $\sigma_{3max}$ 400 kPa	Chile
32	Bard et al.	2007	1000	1800	Estudia Lastre ROM y Lixiviado mediante ensayos triaxiales CID y CIU $\sigma_{3max}$ 2500 kPa	Chile
33	Linero et al.	2007	1000	1800	Ensayos triaxiales CID lastres pórfidos y granodiorita chancados	Chile
34	Palma et al.	2009	1000	1800	Ensayos triaxiales CID $\sigma_{3max}$ 2500 kPa y ensayos odométricos en lastres	Chile
35	Dorador	2010	1000	1800	Triaxiales CID en enrocados con partículas sanas y meteorizadas	Chile
35	Contreras	2011	1000	1800	Lastre proveniente de tronaduras, ensayos triaxiales $\sigma_{3max}$ 2500 kPa	Chile
36	Hu et al.	2011	1000	1500	Tamaño de probetas tres diámetros (100 mm; 500 mm y 1000 mm) $\sigma_{3max}$ 350 kPa	Francia
37	Bard et al.	2012	1000	1800	Estudia Lastre ROM y Lixiviado mediante ensayos triaxiales $\sigma_{3max}$ 2500 kPa	Chile
38	Ovalle et al.	2014	1000	1500	Estudia efecto tamaño de partículas en enrocados $d_{max}$ 160 mm $\sigma_{3max}$ 400 kPa	Francia

Los estudios realizados por Marsal (1965, 1967 y 1973) en México, Marachi et al., 1972 y Becker et al, 1972 en Estados Unidos, Dorador (2010), Contreras (2011), y otros en Chile; Hu et al., (2011) y Ovalle et al., (2014) en Francia se caracterizan por presentar diámetros de probeta cercanos a 1000 mm permitiendo un tamaño máximo de partículas del orden de 150 a 200 mm.

Por otro lado el resto de los trabajos resumidos en la tabla 2.2 utilizaron materiales con  $d_{max}$  entre 40 y 80 mm lo que podría introducir diferencias por efectos de escala al realizar comparaciones de resultados. (Ovalle, et al., 2014b).

**2.3.4 Evolución del ábaco de resistencia al corte**

El ábaco presentado por Leps (figura 1.2) es muy usado en la actualidad para la caracterización geotécnica de materiales gruesos, debido a las dificultades tanto económicas como técnicas que existen para poder realizar ensayos triaxiales de grandes dimensiones.

Con el paso del tiempo diversos autores han tratado de realizar aportes y actualizaciones en esta materia.

(Indraratna, et al., 1993) estableció un nuevo límite inferior tal como muestra la figura 2.7 además de agregar nuevos datos obtenidos de ensayos triaxiales sobre enrocado de tipo Greywacke.

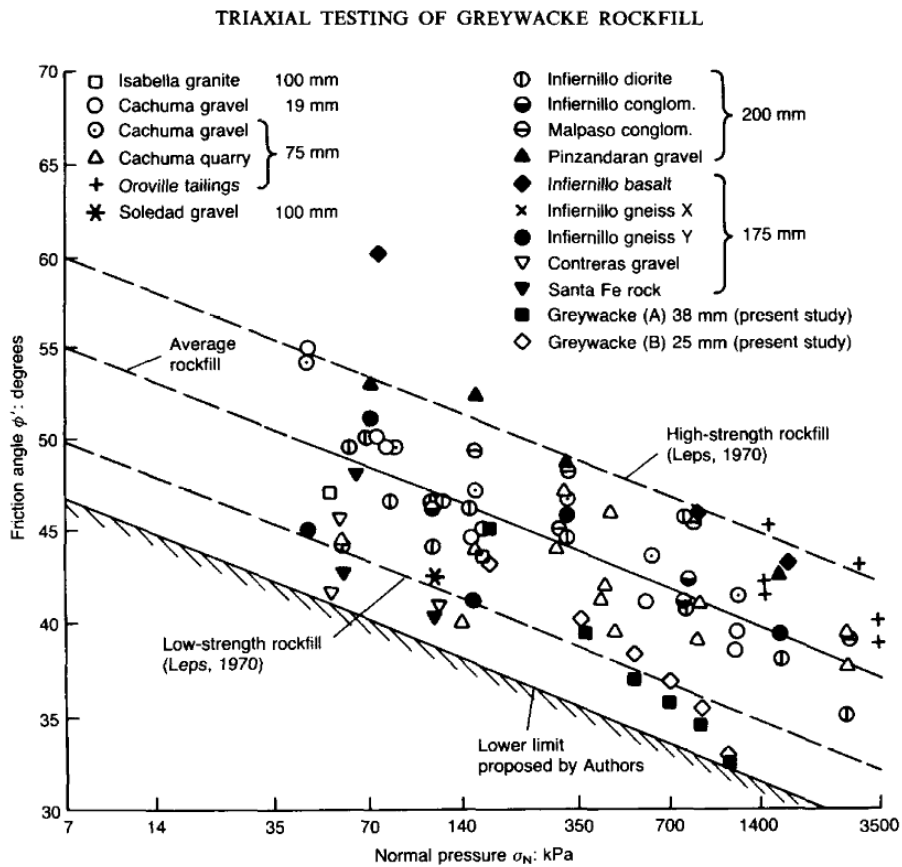


Figura 2.6: Ábaco de Leps modificado (Indraratna, et al., 1993)

(Douglas, 2002) realizó un acucioso estudio de la resistencia al corte de macizos rocosos, en el cual dedica un capítulo a la resistencia al corte de enrocados e incorpora varios factores que

Marco Teórico

pueden influir en la resistencia al corte tales como la forma de partículas, tipo de roca (litología), coeficiente de uniformidad, tamaño máximo de partículas y porcentaje de finos.

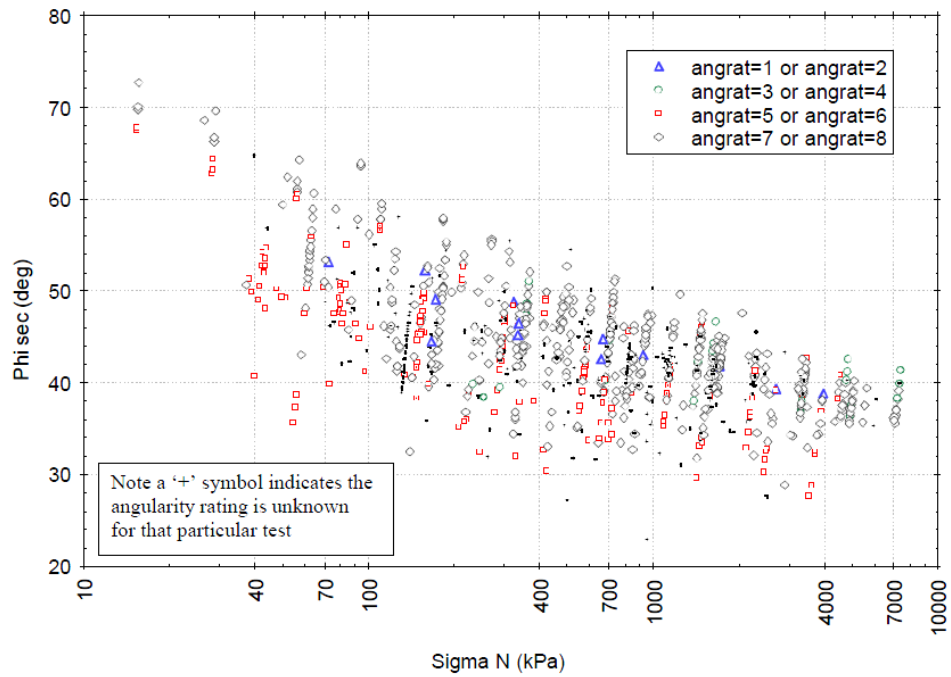


Figura 2.7: Ángulo de fricción secante  $\phi_{sec}$  vs Tensión Normal  $\sigma_n$  ordenados por forma de partículas (Douglas, 2002).

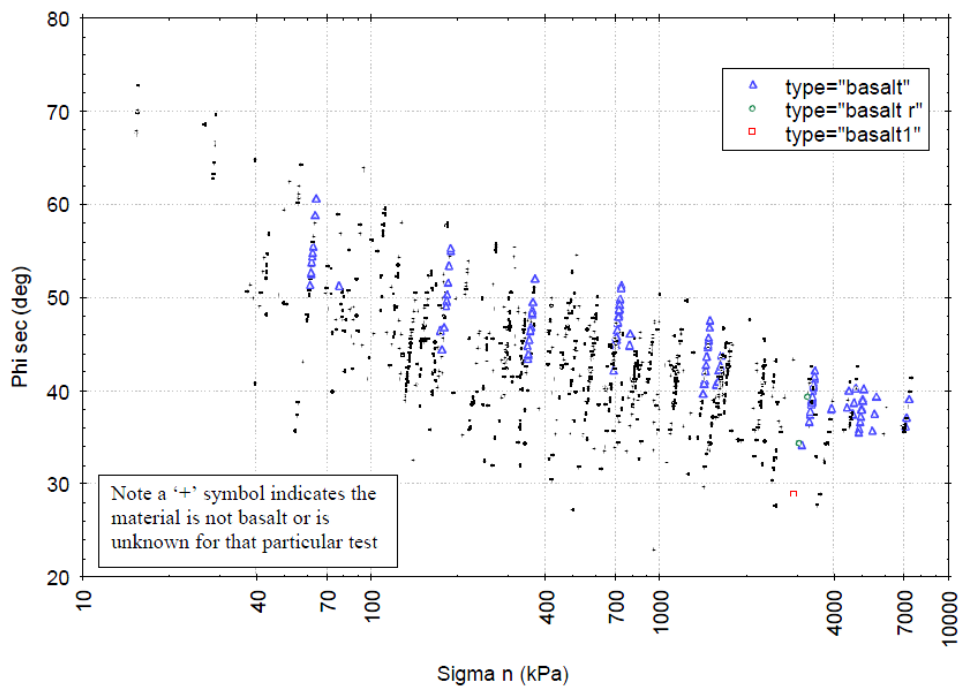


Figura 2.8: Ángulo de fricción secante  $\phi_{sec}$  vs Tensión Normal  $\sigma_n$  ordenados por tipo de roca (Douglas, 2002).

Marco Teórico

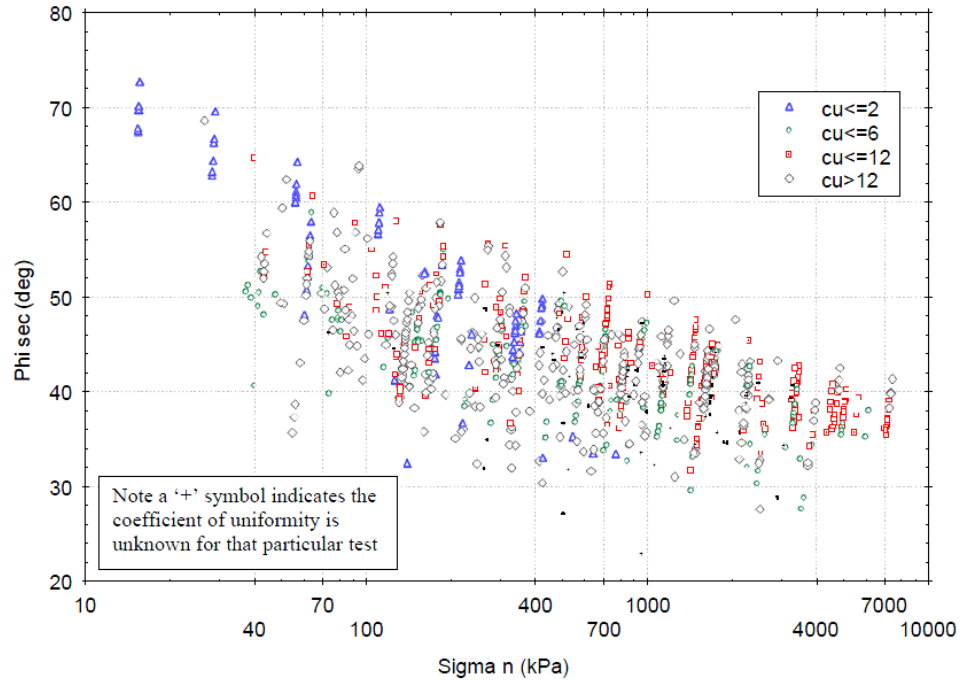


Figura 2.9: Ángulo de fricción secante  $\phi_{sec}$  vs Tensión Normal  $\sigma_n$  ordenados por coeficiente de uniformidad (Douglas, 2002).

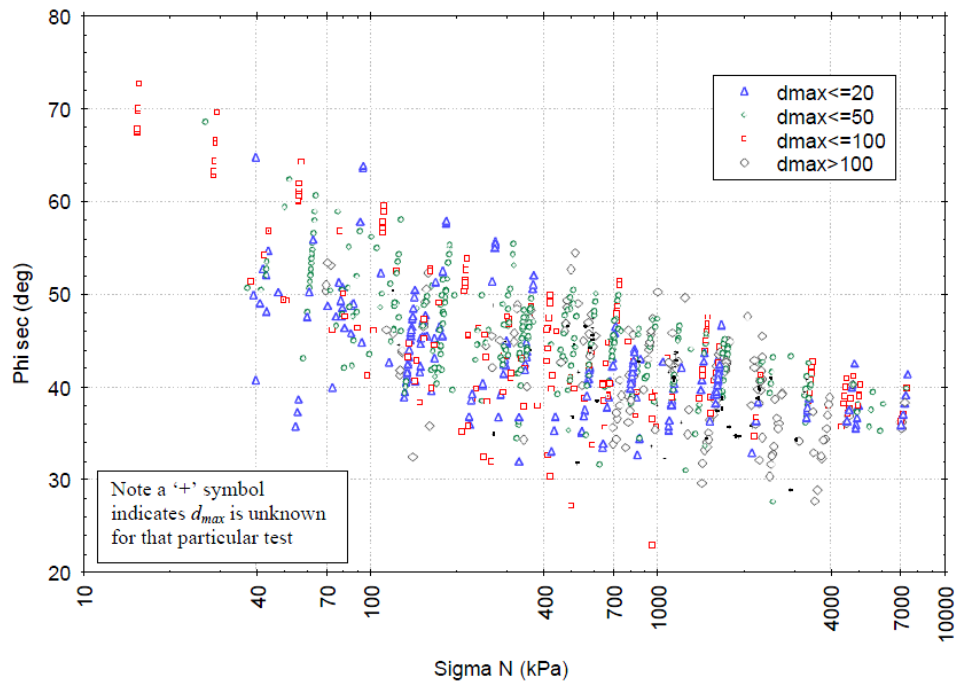


Figura 2.10: Ángulo de fricción secante  $\phi_{sec}$  vs Tensión Normal  $\sigma_n$  ordenados por tamaño máximo de partículas (Douglas, 2002).

Marco Teórico

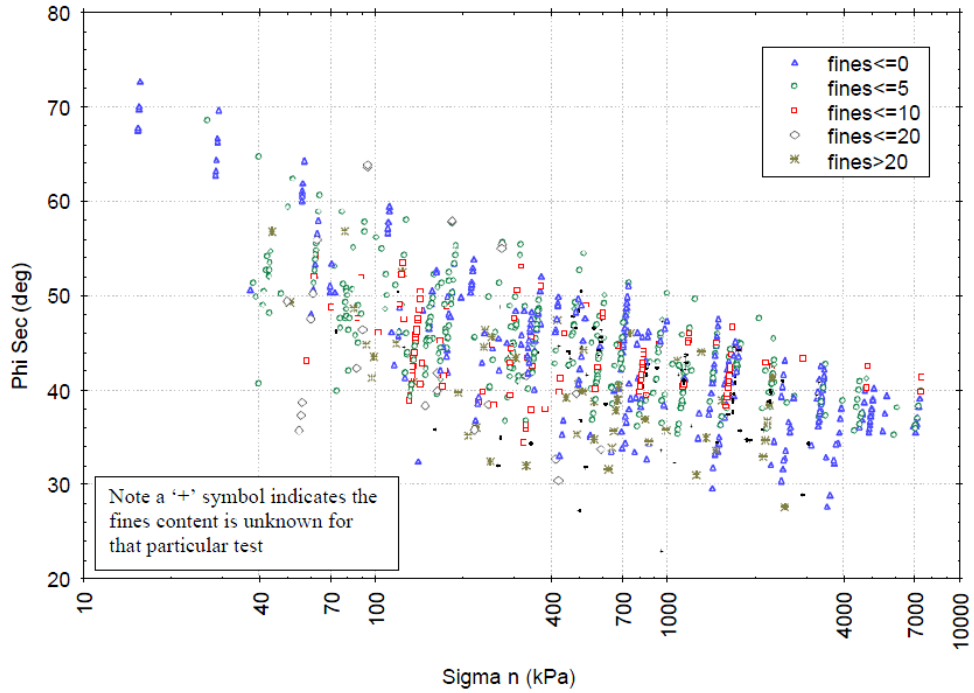


Figura 2.11: Ángulo de fricción secante  $\phi_{sec}$  vs Tensión Normal  $\sigma_n$  ordenados por contenido de finos (Douglas, 2002).

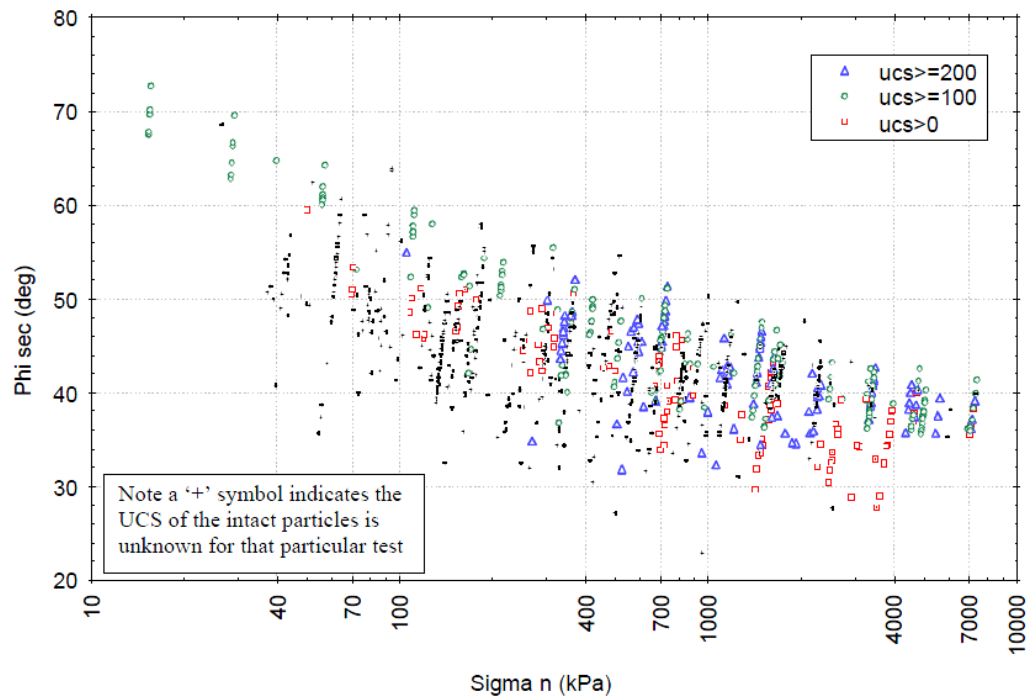


Figura 2.12: Ángulo de fricción secante  $\phi_{sec}$  vs Tensión Normal  $\sigma_n$  ordenados por resistencia a la compresión simple UCS (Douglas, 2002).

(Contreras, 2011) también realizó aportes dentro de su estudio de caracterización de resistencia al corte de materiales de lastre.

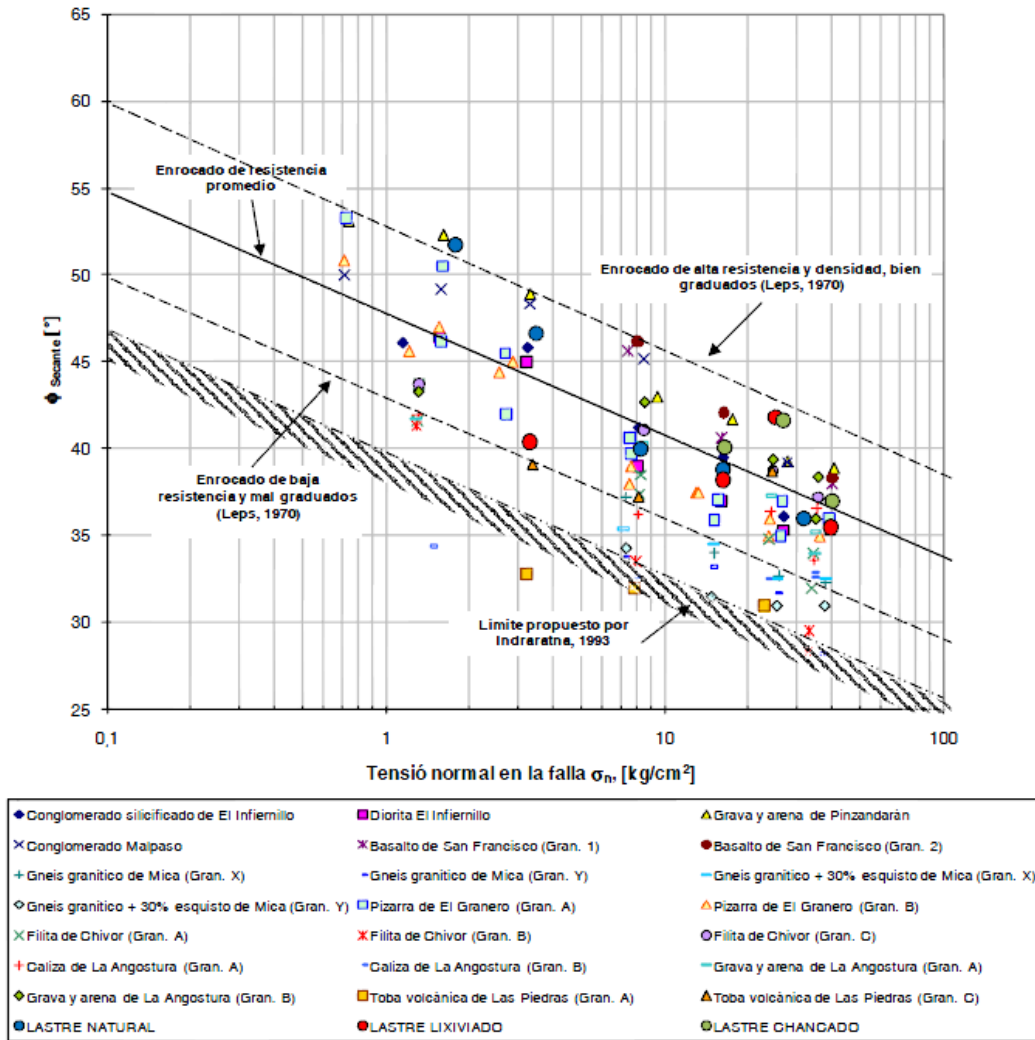
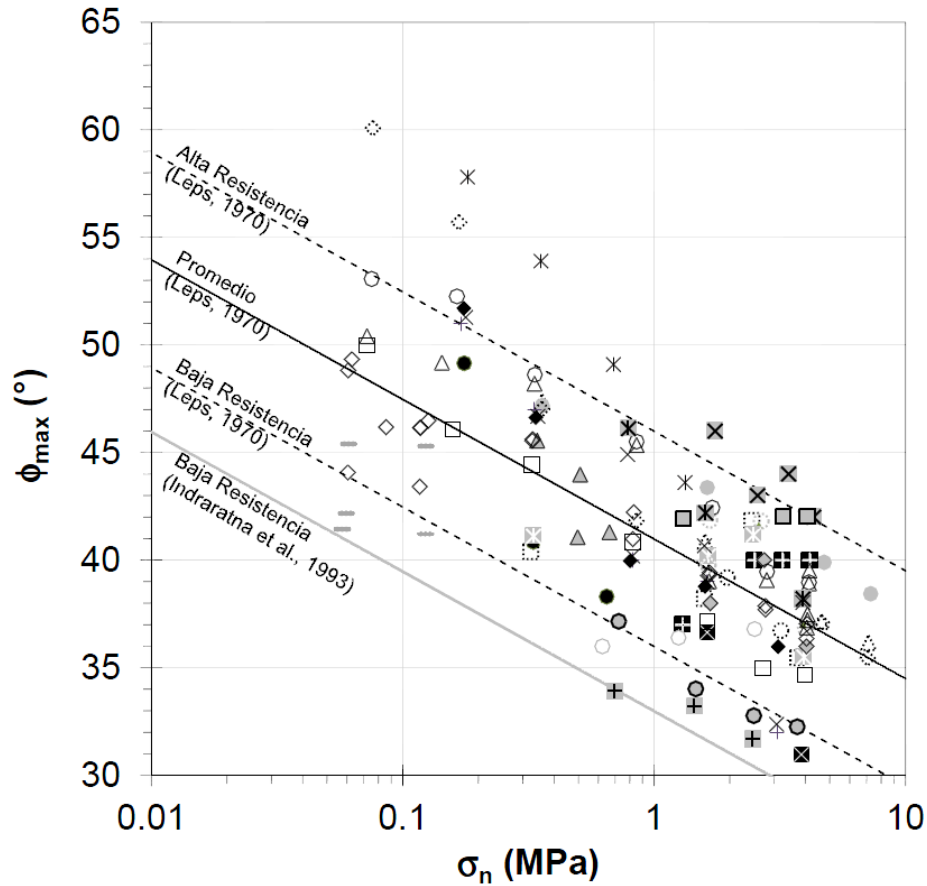


Figura 2.13: Ángulo de fricción secante  $\phi_{sec}$  vs Tensión Normal  $\sigma_n$  (Contreras, 2011).

Por último (Ovalle, et al., 2014b) realizó una recopilación de datos de ensayos triaxiales en suelos gruesos realizados hasta la fecha principalmente en Chile (IDIEM, Universidad de Chile) y Francia (Ecole Centrale Nantes).

Marco Teórico



- ▲ Lastre Chancado / 200 (mm) [9]
- ⊠ Lastre Lixiviado / 200 (mm) [2]
- ⊙ Lastre ROM chancado / 200 (mm) [2]
- ⊚ Basalto Infiernillo (seco) / 200 (mm) [22]
- Enrocado Lixiviado / 175 (mm) [11]
- Material Presa Oroville / 152 (mm) [20]
- ▲ Esquistos Trois Vallées M2 / 160 (mm) [25]
- + Estéril Andina granul. paralela / 200 (mm) [19]
- ⊠ Lastre Andina pórfidos M2 / 152 (mm) [26]
- ⊚ Lastre Lixiviado / 200 (mm) [9]
- ⊚ Basalto Chancado / 152 (mm) [20]
- ⊚ Material Presa Pyramid / 152 (mm) [20]
- Calcareo de Préfontaines M2 / 160 (mm) [15]
- ⊠ Lastre Andina granodioritas M1 / 152 (mm) [26]
- ◆ Lastre Natural / 200 (mm) [9]
- × Lastre Mina ROM / 200 (mm) [2]
- ⊚ Lastre Lixiviado granul. Cortada / 200 (mm) [2]
- ⊠ Basalto Infiernillo / 200 (mm) [22]
- ⊚ Grava arenosa P1 / 100 (mm) [10]
- ◇ Estéril Anđina granul. cortada / 200 (mm) [19]
- El Infiernillo Diorita Cantera N5 (seco) / 200 (mm) [21]
- ⊚ Grava de Contreras (seco) / 200 (mm) [21]
- ⊠ Basalto San Francisco grad. 2 / 200 (mm) [23]
- ⊠ Gneiss Granítico Mica grad. Y / 200 (mm) [23]
- ◇ Enrocado El Infiernillo (seco) / 200 (mm) [21]
- △ Conglomerado de Malpaso (seco) / 200 (mm) [21]
- Grava arenosa de Pinzandarán (seco) / 200 (mm) [23]
- Gneiss Granítico Mica grad. X / 200 (mm) [23]
- × Basalto San Francisco grad. 1 / 200 (mm) [23]

Figura 2.14:  $\phi_{max}$  vs  $\sigma_n$  (Ovalle, et al., 2014b)

## CAPÍTULO 3.

# CORRELACIONES PARA

# DENSIDAD RELATIVA

---

### 3.1 Introducción

Con el objetivo de establecer correlaciones que permitan estimar la densidad relativa a partir de ensayos de densidad mínima y máxima se realizó una búsqueda de estudios de ingeniería geotécnica que tengan datos de densidad máxima, peso específico máximo ( $\gamma_{\max}$ ), densidad mínima, peso específico mínimo ( $\gamma_{\min}$ ), índice de vacíos máximo ( $e_{\max}$ ), índice de vacíos mínimo ( $e_{\min}$ ), gravedad específica ( $G_s$ ), granulometría, y aquellos parámetros que podrían ser relevantes. Con toda esta información se generó una base de datos, la cual fue clasificada por tipo de material, tamaño máximo, origen de material, coeficiente de uniformidad y forma de partículas (angulosidad). La gran mayoría de los ensayos recolectados fueron realizados según las normas ASTM D4253 y ASTM D4254, sin embargo también se complementa la base de datos con ensayos de densidad mínima y máxima realizados a gran escala usando martillos vibratorios en moldes de acero gigantes (Marsal & Resendiz, 1975) (Contreras, 2011), (Besio, 2012).



## **3.2 Recopilación y tratamiento de datos**

Para la construcción de la base de datos se extrajeron datos de diferentes publicaciones presentes en la literatura técnica. Debido a los diversos objetivos que presentan cada una de las investigaciones, no es de gran interés para ellos reportar los datos de ensayos de densidad mínima o máxima, forma de partículas o coeficiente de uniformidad, incluso algunos autores no reportan en sus publicaciones las distribuciones granulométricas y solo presentan el porcentaje de gravas, arenas y finos. Esto representa una dificultad para la recopilación y posterior interpretación de información.

### **3.2.1 Recopilación de datos**

La búsqueda a partir de los trabajos publicados en la literatura técnica concluyó con la obtención de 146 datos, entre los cuales se presentan diversos.

Los resultados de ensayos de densidad mínima y máxima, dependiendo del autor en los diversos trabajos, pueden ser presentados como índices de vacíos ( $e_{\min}$ ,  $e_{\max}$ ), como densidades ( $\rho_{\min}$ ,  $\rho_{\max}$ ) o como pesos unitarios ( $\gamma_{\min}$ ,  $\gamma_{\max}$ ). Por lo cual, para simplificar el manejo de los datos, todos los resultados fueron traspasados a  $e_{\min}$  y  $e_{\max}$  usando relaciones de fase básicas (formula 2.2). Los datos fueron traspasados a índices de vacíos ( $e_{\min}$ ,  $e_{\max}$ ) además con la intención de comparar las correlaciones que se determinen en esta investigación con trabajos anteriores como los realizados por (Cubrinovski & Ishihara, 2002), (Veiga Pinto, 1979), (Cho, et al., 2006), (De la Hoz, 2007) y (Dorador & Besio, 2013).

La base de datos no ha sido incluida en este capítulo debido a su extensión, sin embargo, en el anexo A aparece íntegramente (ver Tabla A-1).

En la Tabla 3.1 se presentan las principales investigaciones de donde se obtuvieron los resultados que componen la base de datos.

Correlaciones para Densidad Relativa  
 Tabla 3.1: Trabajos utilizados para obtención de base de datos.

Autor	Año	Material	$d_{max}$ (mm)	$C_u$	Forma partícula
De Almeida	2001	Enrocados	12.7-152.4	2.4-36	sa-a
De la Hoz	2007	Gravas fluviales	4.75-100	1.7-28.3	sr-r
Gesche	2003	Gravas fluviales	9.5-85	6.6-64.9	sr-r
Fox	2011	Lastre	25	9.1-21.6	a
Kuenza, et al.	2004	Arenas con partículas de grava	4.8	2.5-16.6	r
Simoni y Houlsby	2004	Mezclas de arena y grava	6.0-20	1.6-14.5	sr-r
Marsal	1963	Enrocados	178-203	2-100	sr-sa-a
Dorador	2010	Gravas fluviales	25	2.4-15.9	sr
Al-Hussaini	1983	Grava chancada (Basalto)	6.4-76.2	3.3-11.6	a
Bui	2009	Arenas	1-2.5	1-1.5	sr-r
El Dine, et al.	2010	Arenas con inclusiones de grava	1	1.5	r
Contreras	2011	Lastre	177.8	9.1-17.4	sa
Hara, et al.	2012	Arenas con grava	26.5	23.4-90.3	r
Besio	2012	Mármol negro tronado	3.9	39.7	sa
Kokusho,T	2008	Gravas y arenas	2-26.2	1.7-28.6	sr

Dónde:

$d_{max}$ : Tamaño máximo de partículas

sa: sub-angular

a: angular

sr: sub-redondeado

r: redondeado

### 3.2.2 Clasificación y manejo de datos

Con toda la información disponible los datos se agruparon y clasificaron según diversos criterios: tamaño máximo de partículas ( $d_{max}$ ), tamaño medio de partículas ( $d_{50}$ ), tipo de material, forma de partículas, etc.

### 3.2.2.1 Clasificación por $d_{50}$

Los datos que contaban con información de tamaño medio de partículas ( $d_{50}$ ) se clasificaron en tres grupos, el primero para  $d_{50}$  en 0 y 2 mm, el segundo para  $d_{50}$  entre 2 y 7 mm y el tercero para  $d_{50}$  mayor a 7 mm. El criterio de clasificación se realizó para comparar con los resultados propuestos por (Dorador & Besio, 2013).

Según la tendencia de la figura 3.1 es que para un mismo valor de  $e_{min}$  cuando el  $d_{50}$  aumenta el valor de  $e_{max}$  disminuye. Además, los valores que experimentan menores  $e_{min}$  y  $e_{max}$  son aquellos que presentan un valor de coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) mayor. Esto concuerda con lo propuesto por (Dorador & Besio, 2013).

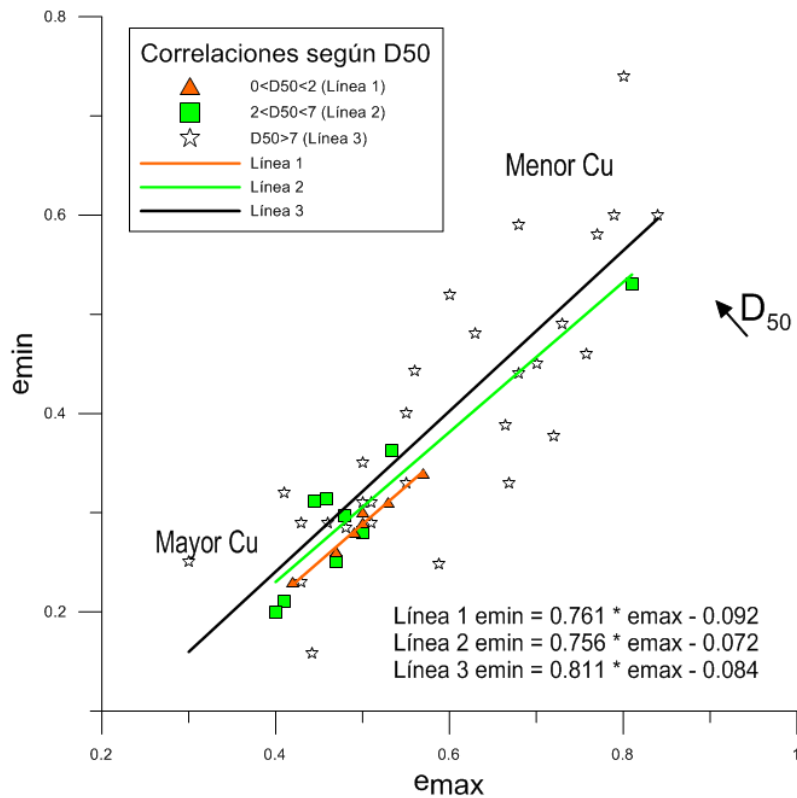


Figura 3.1: Clasificación según  $d_{50}$  (Elaboración propia).

### 3.2.2.2 Clasificación para arenas

A pesar que el objetivo de este estudio no es establecer correlaciones para arenas, aprovechando la información recopilada se agruparon los datos con tamaño máximo de partículas 4 mm con lo cual se obtuvo una correlación para este tipo de materiales sin tener en cuenta la forma de partículas ni el origen. La figura 3.2 muestra la correlación propuesta para arenas.

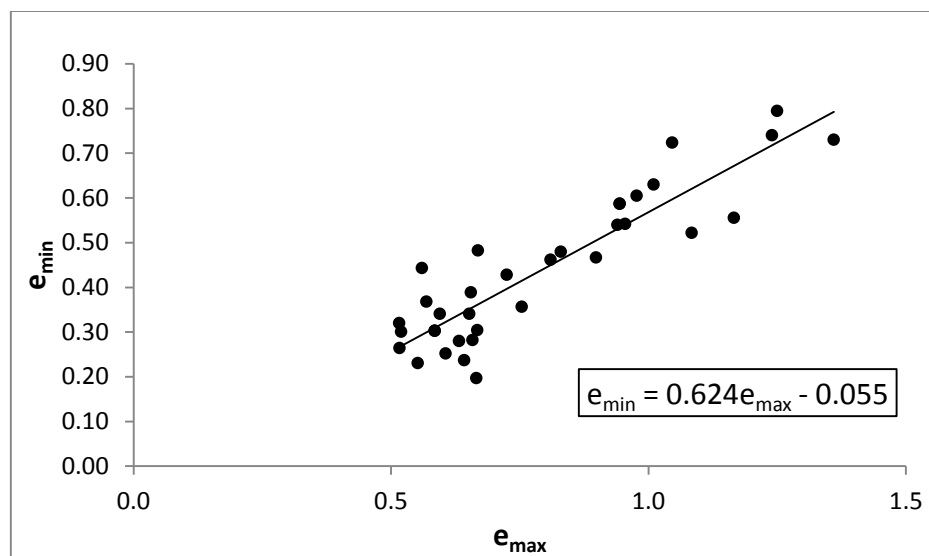


Figura 3.2: Clasificación para arenas (Elaboración propia).

### 3.2.2.3 Clasificación por forma de partículas

Para estudiar el efecto que provoca la forma de las partículas se realizó una clasificación en dos grandes grupos, por un lado sub-redondeado a redondeado (sr-r) y por el otro lado sub-angular a angular (sa-a). En este caso la comparación se realizó en base al coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ), el cual es aceptado como un buen parámetro para determinar el índice de vacíos mínimo ( $e_{min}$ ) asociado a la densidad máxima. (Kezdi, 1979) y (Biarez & Hicher, 1997) propusieron correlaciones entre  $C_u$  y  $e_{min}$  en sus investigaciones.

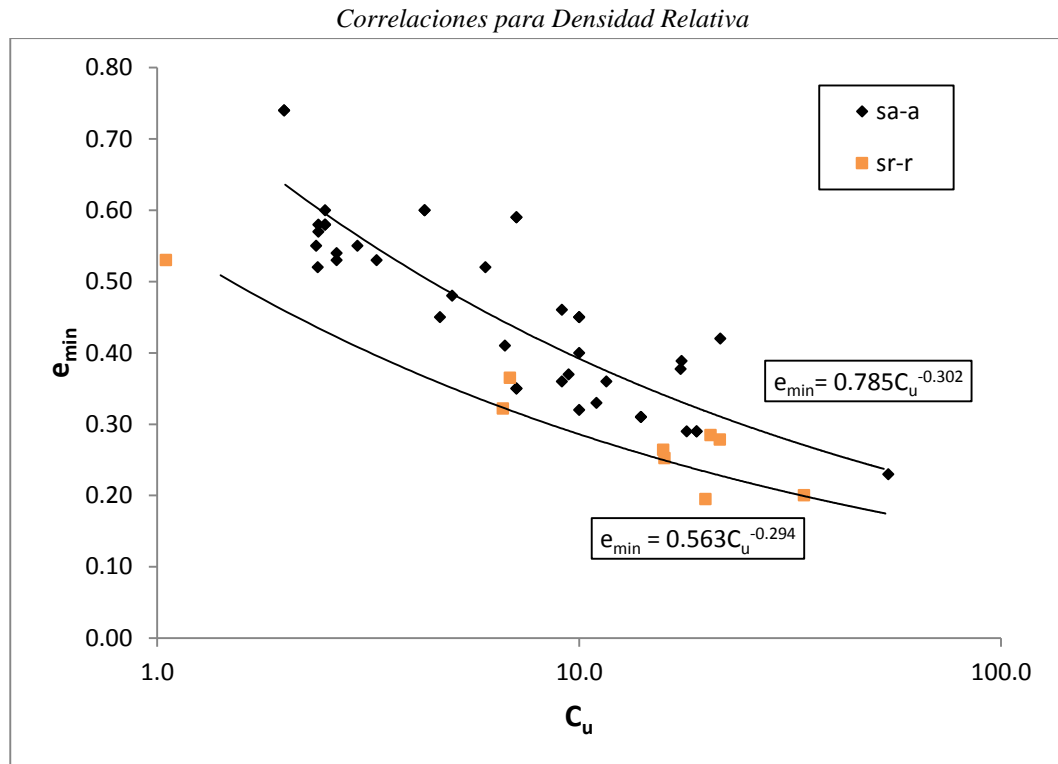


Figura 3.3: Clasificación por forma de partículas (Elaboración propia).

En la figura 3.3 se puede observar que para un valor de  $C_u$  fijo,  $e_{min}$  es menor para los materiales que presentan partículas sub-redondeadas a redondeadas. Este comportamiento concuerda con lo que se espera pues uno de los factores que gobiernan el empaquetamiento o forma de acomodo de partículas es la forma (angulosidad y esfericidad), mientras más redondeado es la forma de los granos mayor es la densidad que se alcanza. (Youd, 1973), (Holubec & D'Appolonia, 1973), (Dickin, 1973) y (Gomaa & Abdelrahman, 2007) mencionan este efecto en sus investigaciones realizadas en arenas.

#### 3.2.2.4 Clasificación por ( $d_{max}$ )

Los datos fueron separados en grupos según el tamaño máximo de partículas que presentan excluyendo los materiales que clasifican como arena. El primer grupo considera los datos con tamaño máximo de partículas 19.1 mm, el segundo para materiales con tamaño máximo entre 19.1 y 38.1 mm y el tercer grupo para aquellos materiales que presentan tamaño máximo de partículas mayor a 38.1 mm.

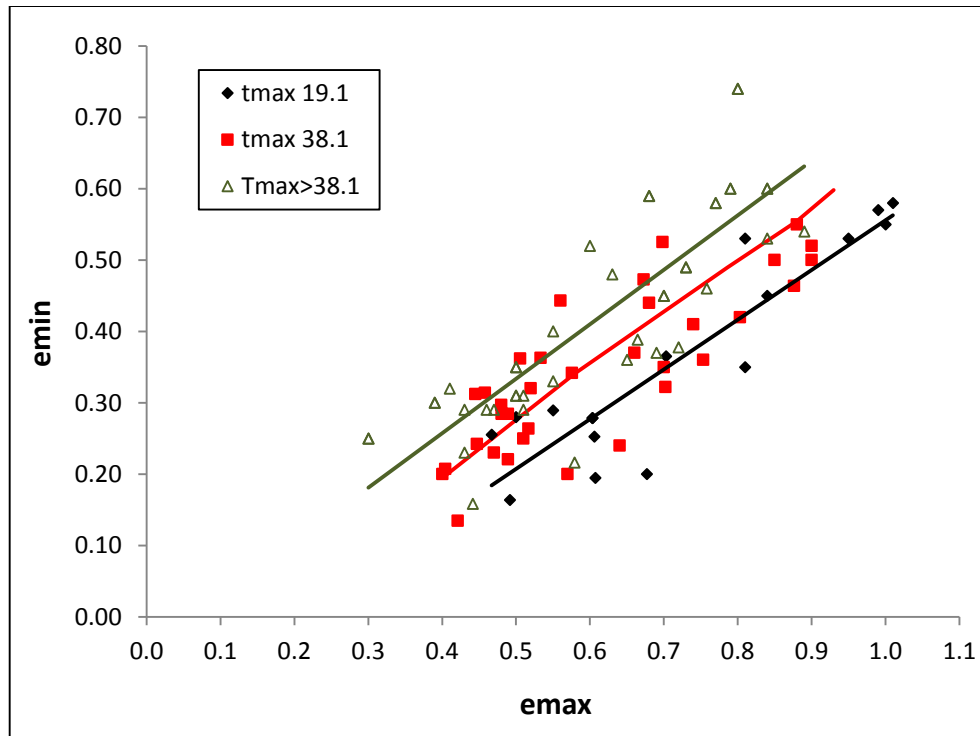


Figura 3.4: Clasificación por tamaño máximo de partículas (Elaboración propia).

Al igual que en la sección 3.2.2.1 la tendencia que muestra la gráfica es que al aumentar el tamaño de partículas para un determinado valor de  $e_{\min}$  el valor de  $e_{\max}$  disminuye.

### 3.3 Correlaciones propuestas

Luego de procesar todos los datos disponibles y a partir de todas las clasificaciones realizadas se proponen correlaciones para determinar  $e_{\min}$  a partir de  $C_u$  y también para  $e_{\max}$  y  $e_{\min}$ . Estas correlaciones tienen como objetivo final ser utilizadas para construir una metodología que permita estimar las densidades mínimas y máximas de materiales granulares gruesos en aquellos casos en que no sea posible realizar ensayos estándares.

#### 3.3.1 Correlaciones $C_u - e_{\min}$

Existe una estrecha relación entre el coeficiente de uniformidad y el índice de vacíos mínimo (Biares & Hicher, 1997), (Simoni & Houlsby, 2006), (Gomaa & Abdelrahman, 2007),

Correlaciones para Densidad Relativa

(Kokusho & Fujikura, 2008) y (Dorador & Besio, 2013) proponen correlaciones entre estos parámetros, obteniendo como resultado que  $C_u$  es inversamente proporcional a  $e_{min}$ , lo que se traduce en que materiales con alto  $C_u$  se asocian a mayores niveles de compactación (Ovalle, et al., 2014b).

De acuerdo a la clasificación realizada en la sección 3.2.2.3 se logra establecer una banda, donde el límite superior representa los valores asociados a forma de partículas sub-angulares a angulares y el límite inferior representa los valores asociados a forma de partículas sub-redondeadas a redondeadas. Además se propone una correlación entre estos parámetros que sea representativa de la banda encontrada, con el objeto de utilizar esa correlación cuando no se tiene información disponible acerca de la forma de partículas que posee el material a analizar.

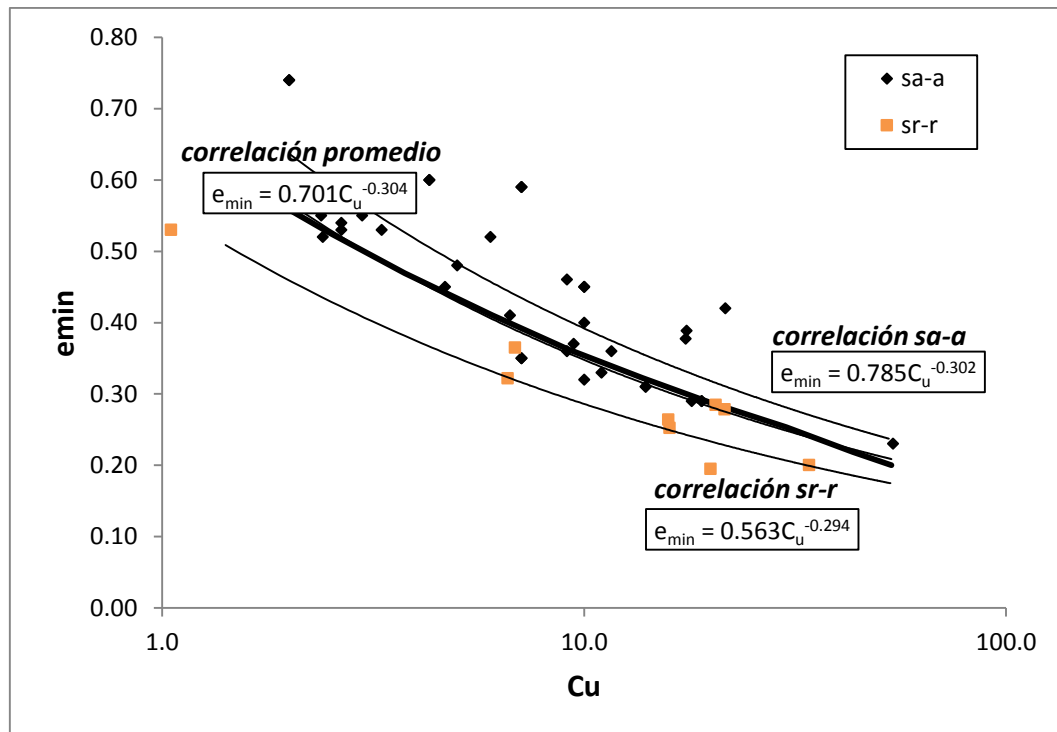


Figura 3.5: Correlaciones para  $C_u$ - $e_{min}$  (Elaboración propia).

A continuación se presentan las correlaciones propuestas por el autor.

Correlación sa-a:  $e_{min} = 0.785 C_u^{-0.302}$  (3.1)

Correlación sr-r:  $e_{min} = 0.563 C_u^{-0.294}$  (3.2)

Correlación promedio:  $e_{min} = 0.701 C_u^{-0.304}$  (3.3)

Correlaciones para Densidad Relativa

3.3.2 Correlaciones  $e_{min}$  -  $e_{max}$

Utilizando las clasificaciones por tamaño máximo de partículas, se proponen correlaciones para  $e_{min}$  -  $e_{max}$  de forma similar a lo que sugieren (Veiga Pinto, 1979), (De la Hoz, 2007) y (Dorador & Besio, 2013).

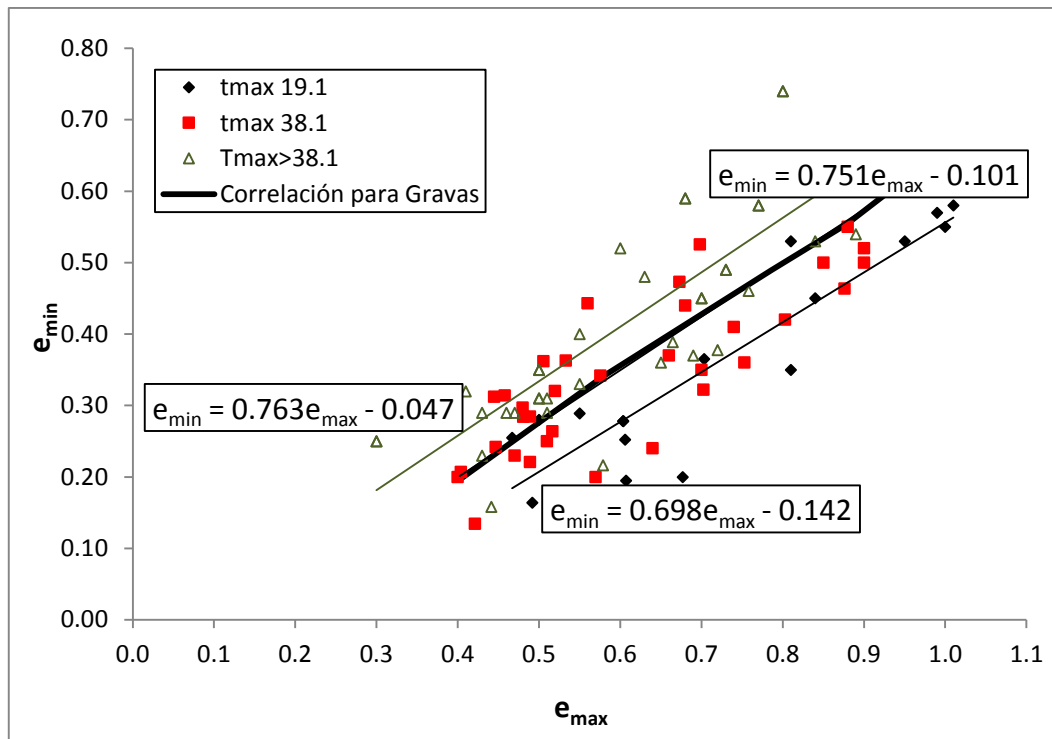


Figura 3.6: Correlaciones para  $e_{min}$ - $e_{max}$  (Elaboración propia).

De forma similar a lo obtenido en la sección 3.3.1 se realiza un ajuste lineal, de acuerdo a la tendencia identificada por otros autores, y se establece una banda, donde el límite superior representa los valores asociados a tamaño máximo de partículas superior a 38.1 mm y el límite inferior representa los valores asociados al tamaño máximo de partículas hasta 19.1 mm. Además se propone una correlación entre estos parámetros que sea representativa de la banda encontrada.

Correlación  $t_{max}$  19.1 mm:  $e_{min} = 0.698 e_{max} - 0.142$  (3.4)

Correlación  $t_{max}>38.1$  mm:  $e_{min} = 0.763 e_{max} - 0.047$  (3.5)

Correlación promedio:  $e_{min} = 0.751 e_{max} - 0.101$  (3.6)



### 3.4 Metodología para estimar la densidad relativa de materiales granulares gruesos

A partir de las correlaciones propuestas en la sección 3.3, se propone una metodología para estimar la densidad relativa de suelos granulares gruesos, los cuales no pueden ser testeados con aparatos convencionales según los métodos estándares en equipos convencionales. Los pasos a seguir se presentan en el ejemplo a continuación.

#### 3.4.1 Clasificación de la muestra

Realizar una clasificación completa de la muestra, obteniendo curva granulométrica (in situ, macro-granulometría), densidad o peso unitario in-situ con un método adecuado, por ejemplo, mediante el método de reemplazo de agua y posteriormente en laboratorio la determinación de la gravedad específica  $G_s$ .

En la tabla 3.2 se presenta un ejemplo con un material representativo

Tabla 3.2: Propiedades de material (ejemplo).

$G_s$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e
2.75	21.1	0.303

#### 3.4.2 Escalamiento de curvas granulométricas

En este paso, se propone un método de escalamiento de granulometrías, similar al de las curvas homotéticas, pero con algunas modificaciones. Se requiere que la curva granulométrica original sea escalada a tamaños máximos de 38.1 mm, 19.1mm y 4.76 mm. Para realizar este escalamiento, se fija el tamaño mínimo de la granulometría original ( $d_0$ ) pero a su vez el tamaño máximo ( $d_{max}$ ) se traslada en el eje de la abscisa (en este caso de 150 mm) hacia los tres tamaños máximos mencionados anteriormente y así los diferentes tamaños de las partículas de la granulometría original se reducen de manera proporcional al tamaño que estas poseen, tal como se observa en la Figura 7. El resultado de este escalamiento son tres nuevas granulometrías con diferente  $C_u$  tal como se muestra en la tabla 3.3.

Correlaciones para Densidad Relativa

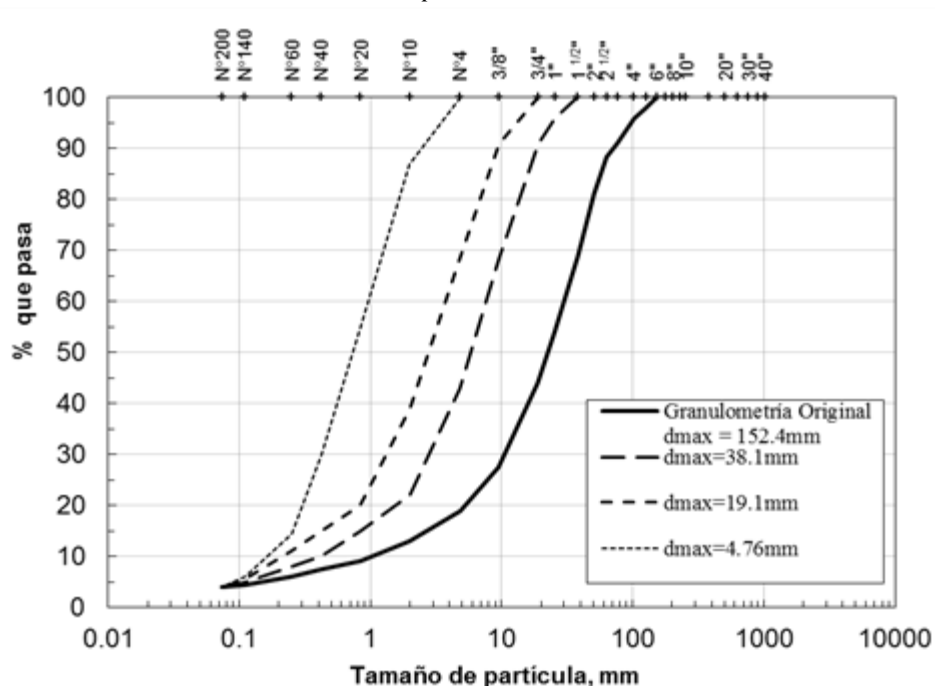


Figura 3.7: Escalamiento de granulometrías.

Considerando el ejemplo se obtienen los coeficientes de uniformidad de las tres curvas homotéticas:

Tabla 3.3:  $C_u$  de granulometrías escaladas.

$d_{max}$ (mm)	$C_u$
4.76	4.5
19.1	19.5
38.1	20.2

### 3.4.3 Uso de correlación $C_u - e_{min}$

Con el  $C_u$  de cada curva escalada usar la Ec. (3.3) o ingresar a la Fig. 3.5.

Tabla 3.4:  $e_{min}$  obtenido de Ec. (3.3).

$d_{max}$ (mm)	$e_{min}$
4.76	0.444
19.1	0.284
38.1	0.281

Correlaciones para Densidad Relativa

**3.4.4 Uso de correlación  $e_{min}$ -  $e_{max}$**

Usando el valor de  $e_{min}$  obtenido en el punto 3.4.3 usar la Ec. (3.6) o ingresar a la Fig. 3.6 para así obtener el  $e_{max}$ .

Tabla 3.5:  $e_{max}$  obtenido de Ec. (3.6).

$d_{max}$ (mm)	$e_{max}$
4.76	0.726
19.1	0.513
38.1	0.509

**3.4.5 Construcción de grafico  $d_{max}$  vs e**

Usando los valores de  $e_{min}$  y  $e_{max}$  determinados en los puntos 3.4.3 y 3.4.4 construir un gráfico de tamaño máximo ( $d_{max}$ ) vs índice de vacíos (e) como el de la figura 3.8 y realizar un ajuste potencial para ambos casos.

**3.4.6 Extrapolación y obtención de DR**

Con el ajuste realizado en el punto 3.4.5 y el tamaño máximo de partícula de la granulometría original obtener los valores de  $e_{min}$  y  $e_{max}$  buscados. Luego usando la Ec. 2.1 y el valor de densidad seca in situ calcular el valor de densidad relativa (DR).

En el ejemplo los valores calculados a partir de la extrapolación aparecen en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6:  $e_{min}$  y  $e_{max}$  buscados.

$d_{max}$ (mm)	$e_{min}$	$e_{max}$
152.4	0.191	0.377

Usando la Ec. (2.1) se obtiene el siguiente DR del ejemplo indicado.

$$DR(\%) = \frac{(0.377 - 0.303)}{(0.377 - 0.191)} 100 = 39.8\% \quad (3.6)$$

Correlaciones para Densidad Relativa

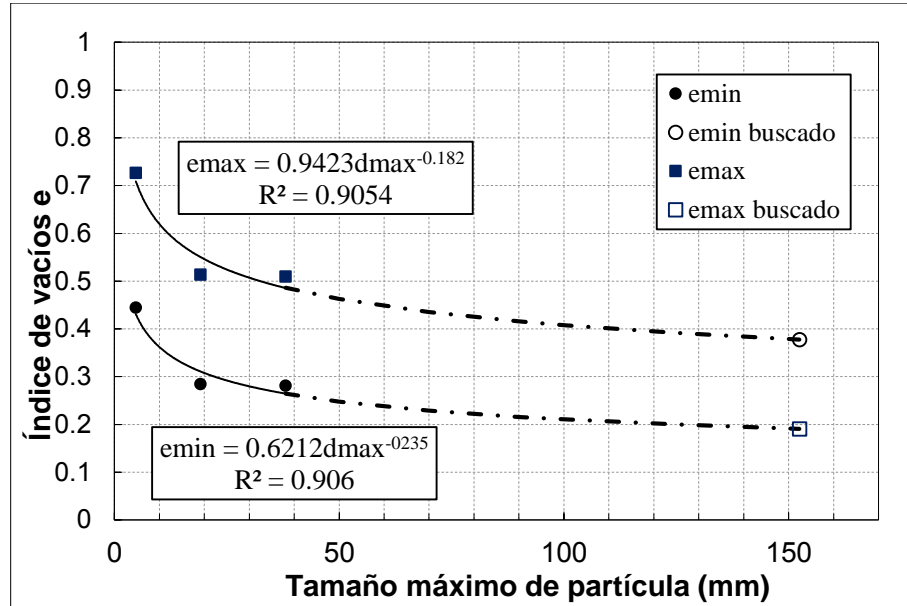


Figura 3.8: Gráfico  $d_{max}$  vs  $e$ .

Esta metodología representa una herramienta útil para estimar el comportamiento de materiales granulares gruesos, porque permite saber si el material está en estado suelto, denso o en un estado intermedio. Además los costos que involucran son bajos, pues solo se debe incurrir en gastos para ensayos básicos de clasificación de muestras. La metodología es fácil de utilizar y se pueden utilizar tanto los gráficos como las ecuaciones propuestas.

En un principio se recomienda extrapolar para tamaño máximo de partículas hasta 8” correspondiente al límite máximo de tamaño de partículas que se han utilizado en ensayos triaxiales de gran escala.

Para validar esta metodología propuesta y hasta que límite de tamaño máximo de partículas se puede extrapolar sería de gran utilidad construir un equipo de densidad máxima y mínima que permita ensayar muestras con  $d_{max}$  mayores, por ejemplo hasta 4” (100 mm) un valor intermedio entre lo máximo que sugiere esta metodología propuesta.

## CAPÍTULO 4.

# ACTUALIZACIÓN ÁBACO DE RESISTENCIA AL CORTE

---

---

### 4.1 Introducción

Debido a las dificultades para caracterizar materiales granulares gruesos que se han evidenciado a lo largo de este trabajo, es muy común que hasta el día de hoy se utilice el ábaco de Leps para estimar la resistencia al corte. El ábaco data de 1970 y Leps relaciona el ángulo de fricción interna y la tensión de confinamiento de materiales gruesos sobre los cuales se realizaron ensayos triaxiales de grandes dimensiones principalmente realizados por Marsal entre 1965 y 1967.

Con el paso del tiempo autores como (Indraratna, et al., 1993) (Douglas, 2002) (Contreras, 2011) y (Ovalle, et al., 2014b) han realizado aportes e intentos por mejorar el ábaco original.

Este capítulo incorpora la metodología utilizada para reunir datos de ensayos triaxiales presentes en la literatura técnica, su procesamiento y la incorporación de la metodología para determinar la densidad relativa de materiales granulares gruesos a partir de correlaciones presentadas en el capítulo 3, con el fin de presentar un nuevo ábaco que permita relacionar el ángulo de fricción interna, la presión de confinamiento y la densidad relativa.

## **4.2 Recopilación y tratamiento de datos**

En la literatura técnica existente se realizó una búsqueda de ensayos triaxiales de grandes dimensiones con el objetivo de incorporar nuevos datos al gráfico que originalmente fue propuesto por Leps y posteriormente fue modificado por (Indraratna, et al., 1993), (Contreras, 2011) entre otros.

### **4.2.1 Recopilación de datos**

Siguiendo una metodología similar a la recolección de datos para densidad relativa, se realizó una búsqueda profunda en la literatura de ensayos triaxiales de grandes dimensiones y se separaron en dos grandes grupos, uno para probetas hasta 30 cm x 60 cm y el otro para probetas con dimensiones cercanas a 100 cm x 200 cm.

Teniendo en cuenta que la mayoría de los datos que aparecen en el ábaco de resistencia de Leps y sus posteriores modificaciones son con datos de triaxiales con probetas con diámetros cercanos a 100 cm y también debido al gran número de datos en el ábaco se decidió no considerar en esta ocasión los valores para ensayos con probetas cercanas a 30 cm, con tamaño máximo de partículas de 2" (50 mm aproximadamente).

### **4.2.2 Generación de base de datos, clasificación y manejo de datos**

Los datos recopilados fueron clasificados según tamaño de probeta, relación de aspecto (H/D), tamaño máximo, forma de partículas y tipo de material entre otros.

Debido a que no fue posible obtener para todos los casos los datos de todos los criterios de clasificación, solo fueron considerados un total de 171 ensayos triaxiales CID de grandes dimensiones.

Los principales trabajos de donde fueron obtenidos los ensayos se presentan en la Tabla 4.1

Tabla 4.1: Trabajos utilizados como referencia.

N°	Autor	Año	Título
1	Marachi et al.	1969	Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials
2	Marsal	1980	Contribución a la Mecánica de Medios Granulares
3	De La Hoz	2007	Estimación de los Parámetros de Resistencia al Corte en Suelos Granulares Gruesos
4	Bard et al.	2007	Comportamiento de Lastre ROM Sometido a Altas Presiones
5	Linero et al.	2007	Geotechnical Characterisation of Waste Material in Very High Dumps with Large Scale Triaxial Testing
6	Verdugo et al.	2007	Evaluación de Parámetros Geomecánicos de Suelos Gruesos
7	Palma et al.	2009	Caracterización Geotécnica de Materiales de Lastre en Botaderos de Gran Altura Mediante Ensayos Triaxiales y Odométricos de Gran Tamaño
8	Contreras	2011	Comportamiento Friccionante de Materiales Granulares Gruesos
9	Besio	2012	Uso del Método de las Curvas Homotéticas en la Representación de Ensayos Monotónicos y Cíclicos en Suelos Gruesos
10	Ovalle et al.	2013	The Effect of Size on the Strength of Coarse Rock Aggregates and Large Rockfill Samples Through Experimental Data

### 4.3 Incorporación de nuevos datos publicados al Ábaco de Leps

Los datos procesados en esta investigación fueron incluidos en la Figura 4.1, cuya información no está incluida en el gráfico de Leps de 1970. La mayoría de estos datos son pertenecientes a los trabajos N° 3 al N°10 de la Tabla 4.1. Es importante destacar que existen muchos datos que no fueron considerados debido a que no se tiene información de las densidades de montaje, índice de vacíos inicial, distribución granulométrica, etc.

La Figura 4.2 muestra  $\phi_{\max}$  vs  $\sigma_n$  considerando todos los datos antiguos y nuevos para los cuales se tiene la información necesaria con la que se aplicará la metodología propuesta en capítulos anteriores, para incorporar el factor densidad relativa al ábaco de resistencia.

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

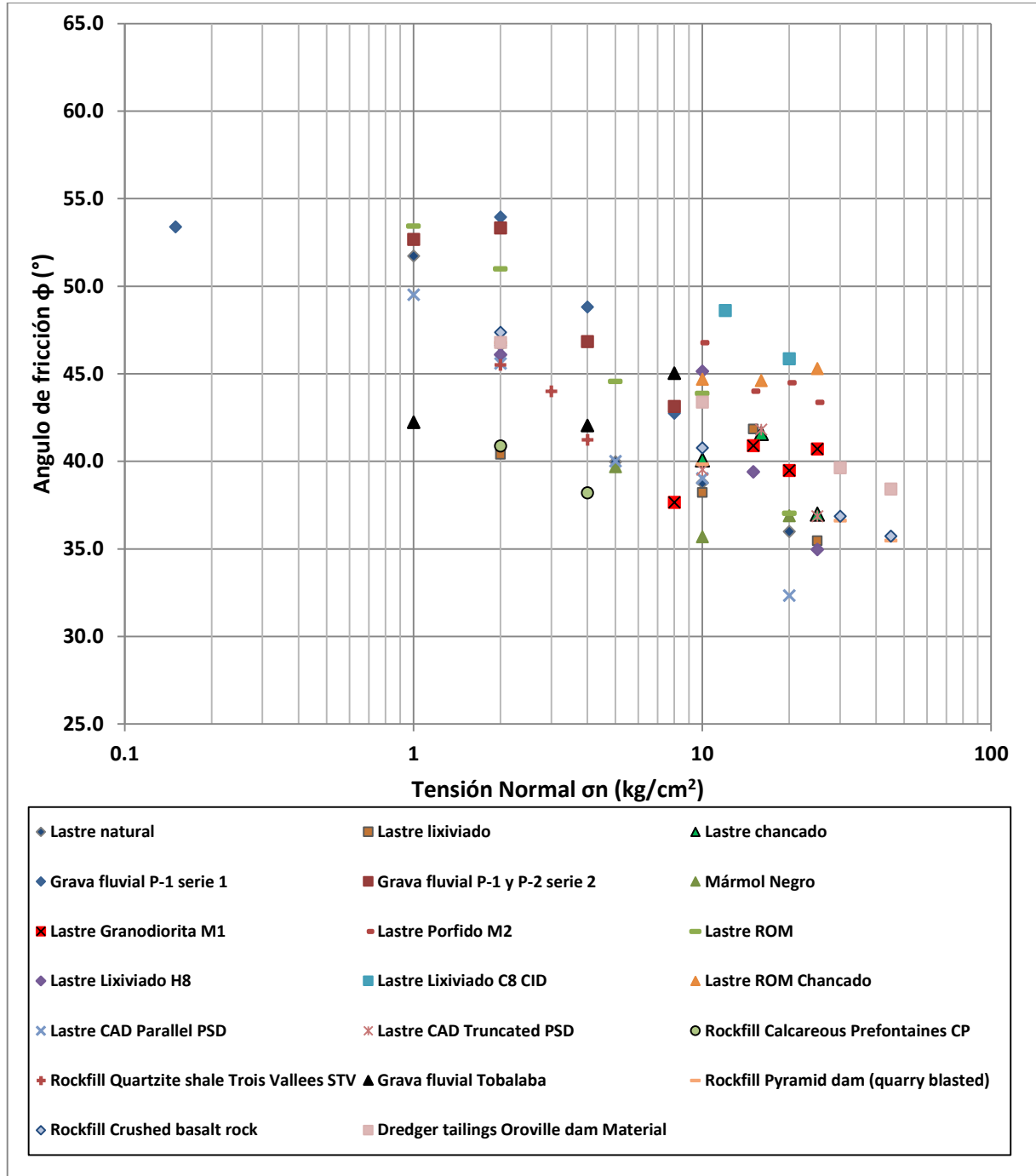


Figura 4.1:  $\phi_{max}$  vs  $\sigma_n$  Nueva data.





Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

Debido al rol importante que ocupa la minería en nuestro país, quizás es conveniente mostrar por separado los materiales de lastre producto de procesos mineros, el cual se dispone generalmente en botaderos que pueden llegar a grandes alturas y dimensiones.

La caracterización de materiales gruesos de lastre en Chile ha sido un tema de estudio en los últimos 10 años. Por ejemplo, (Bard, et al., 2007) (Linero, et al., 2007) (Palma, et al., 2009) y (Contreras, 2011) realizaron grandes avances en la materia, permitiendo mejorar herramientas para el diseño y construcción de grandes botaderos.

La Figura 4.3 muestra los datos obtenidos de estas investigaciones y como referencia los límites impuestos por (Leps, 1970) e (Indraratna, et al., 1993). Se debe notar que existen algunos resultados por sobre el límite superior impuesto por Leps en 1970, todos ellos corresponden a ensayos triaxiales CID con tamaño de probetas 100 cm x 180 cm, realizados en lastres provenientes de Codelco División Andina (CAD) y Angloamerican División Los Bronces, dos minas que se ubican en un mismo sector en las cercanías de Santiago.

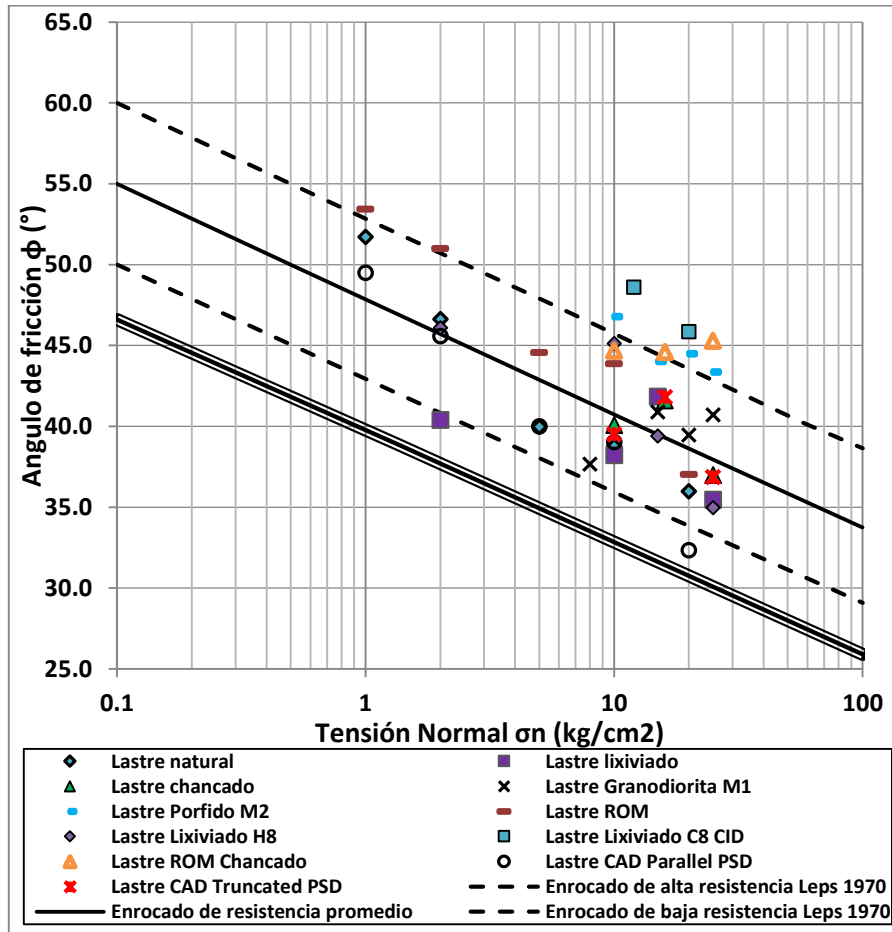


Figura 4.3:  $\phi_{max}$  vs  $\sigma_n$  Ensayos Triaxiales en lastre.

## **4.4 Incorporación de la densidad relativa al ábaco de Leps**

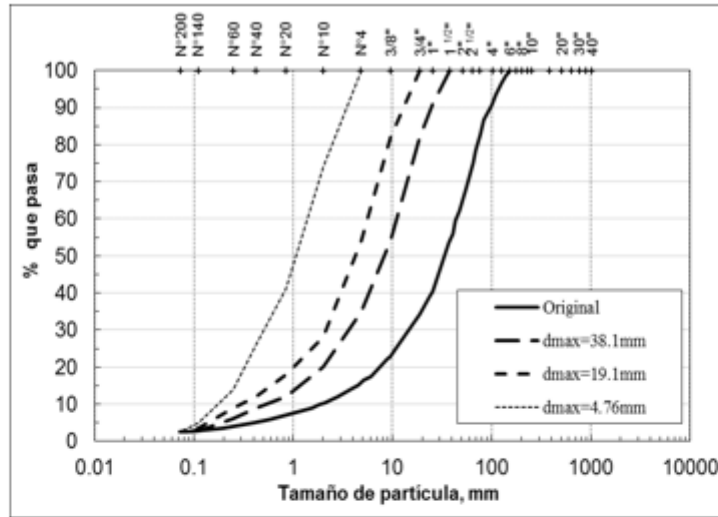
Con la intención de incorporar la densidad relativa al ábaco de resistencia de Leps, se utilizó la metodología propuesta en el capítulo 3 de este trabajo. La condición principal necesaria para estimar la densidad relativa es tener el índice de vacíos inicial ( $e_i$ ) para cada probeta y la granulometría.

### **4.4.1 Uso de la Metodología propuesta de capítulo 3**

La metodología propuesta para estimar la densidad relativa en materiales granulares gruesos requiere la distribución granulométrica del material, la cual se debe escalar a tres tamaños máximos (38.1 mm, 19.1 mm y 4.76 mm). Posteriormente se calcula el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) a cada una de las tres curvas escaladas y usando las correlaciones propuestas (ecuaciones 3.3 y 3.6) se determinan los valores de densidad máxima y mínima. Luego se realiza un ajuste potencial y se extrapola al tamaño máximo original de la muestra.

La figura 4.1 muestra un resumen de la metodología aplicada a un lastre denominado M2 Pórfido encontrado en (Linero, et al., 2007) . Para este ejemplo el tamaño máximo de partículas de la granulometría original es 152.4 mm.

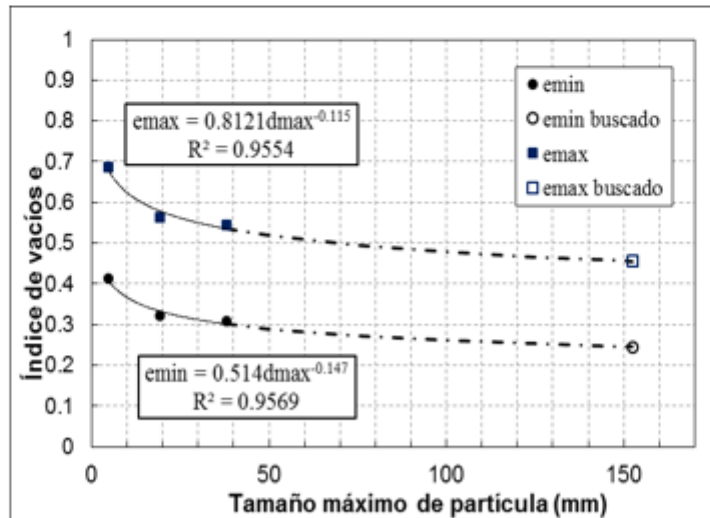
Muestra	Lastre M2 Pórfido (sa-a)
d <sub>max</sub> [mm]	152.4
Referencia	Palma et al. 2009



d <sub>max</sub> (mm)	Cu
4.76	8.3
19.1	19.3
38.1	22.0

d <sub>max</sub> (mm)	e <sub>min</sub>
4.76	0.414
19.1	0.321
38.1	0.309

d <sub>max</sub> (mm)	e <sub>max</sub>
4.76	0.686
19.1	0.562
38.1	0.546



Resultados buscados asociados al tamaño máximo de partículas d<sub>max</sub> = 152.4 mm.

e <sub>min</sub>	0.246
e <sub>max</sub>	0.456

Figura 4.4: Resumen metodología aplicada.

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

En el anexo B se encuentra el detalle para todos los casos donde fue aplicada la metodología.

Para cada ensayo se estimó su densidad relativa, conociendo el índice de vacíos inicial ( $e_i$ ) y los  $e_{max}$  y  $e_{min}$  determinados con la metodología propuesta. Además se estimó la compacidad distinguiendo tres estados: Suelto para DR% menor a 30, medio para DR% entre 30 y 70, y denso para mayor a 70. Los resultados obtenidos a partir de aplicar la metodología se presentan en la Tabla 4.2

Tabla 4.2: Resultados DR metodología propuesta.

N°	Muestra	FP	Cu	$e_i$	$e_{min}$	$e_{max}$	DR%	Estado
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.243	0.454	<u>-2.6</u>	Suelto
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.243	0.454	<u>-2.6</u>	Suelto
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.243	0.454	<u>-2.6</u>	Suelto
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.243	0.454	<u>-2.6</u>	Suelto
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.243	0.454	<u>-2.6</u>	Suelto
8	Lastre lixiviado	a	17.5	0.449	0.243	0.454	2.5	Suelto
8	Lastre lixiviado	a	17.5	0.449	0.243	0.454	2.5	Suelto
8	Lastre lixiviado	a	17.5	0.449	0.243	0.454	2.5	Suelto
8	Lastre lixiviado	a	17.5	0.449	0.243	0.454	2.5	Suelto
8	Lastre chancado	a	9.1	0.492	0.282	0.508	7.1	Suelto
8	Lastre chancado	a	9.1	0.492	0.282	0.508	7.1	Suelto
8	Lastre chancado	a	9.1	0.492	0.282	0.508	7.1	Suelto
9	Tronado Mármol negro 5	a	37.5	0.295	0.186	0.375	42.2	Medio
9	Tronado Mármol negro 10	a	37.5	0.295	0.186	0.375	42.2	Medio
9	Tronado Mármol negro 20	a	37.5	0.295	0.186	0.375	42.2	Medio
7	Lastre Granodiorita M1	a	3	0.390	0.226	0.427	18.4	Suelto
7	Lastre Granodiorita M1	a	3	0.360	0.226	0.427	33.3	Medio
7	Lastre Granodiorita M1	a	3	0.330	0.226	0.427	48.3	Medio
7	Lastre Granodiorita M1	a	3	0.330	0.226	0.427	48.3	Medio
7	Lastre Pórfido M2	a	8	0.370	0.217	0.42	24.6	Suelto
7	Lastre Pórfido M2	a	8	0.350	0.217	0.42	34.5	Medio
7	Lastre Pórfido M2	a	8	0.330	0.217	0.42	44.3	Medio
7	Lastre Pórfido M2	a	8	0.320	0.217	0.42	49.3	Medio
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.231	0.436	<u>-25.2</u>	Suelto
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.231	0.436	<u>-25.2</u>	Suelto
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.231	0.436	<u>-25.2</u>	Suelto
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.231	0.436	<u>-25.2</u>	Suelto
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.231	0.436	<u>-25.2</u>	Suelto
4	Lastre Lixiviado H8	a	14.4	0.488	0.254	0.469	<u>-8.7</u>	Suelto

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

N°	Muestra	FP	Cu	e <sub>i</sub>	e <sub>min</sub>	e <sub>max</sub>	DR%	Estado
4	Lastre Lixiviado H8	a	14.4	0.488	0.254	0.469	<u>-8.7</u>	Suelto
4	Lastre Lixiviado H8	a	14.4	0.488	0.254	0.469	<u>-8.7</u>	Suelto
4	Lastre Lixiviado H8	a	14.4	0.488	0.254	0.469	<u>-8.7</u>	Suelto
4	Lastre Lixiviado C8 CID	a	137.2	0.488	0.141	0.309	<u>-106.3</u>	Suelto
4	Lastre Lixiviado C8 CID	a	137.2	0.488	0.141	0.309	<u>-106.3</u>	Suelto
4	Lastre ROM Chancado	a	10.8	0.488	0.246	0.462	<u>-11.9</u>	Suelto
4	Lastre ROM Chancado	a	10.8	0.488	0.246	0.462	<u>-11.9</u>	Suelto
4	Lastre ROM Chancado	a	10.8	0.488	0.246	0.462	<u>-11.9</u>	Suelto
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.450	0.262	0.484	15.3	Suelto
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.440	0.262	0.484	19.8	Suelto
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.430	0.262	0.484	24.3	Suelto
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.390	0.262	0.484	42.3	Medio
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.340	0.262	0.484	64.9	Medio
5	Lastre CAD Truncated PSD	a	9	0.440	0.298	0.529	38.5	Medio
5	Lastre CAD Truncated PSD	a	9	0.370	0.298	0.529	68.8	Medio
5	Lastre CAD Truncated PSD	a	9	0.360	0.298	0.529	73.2	Denso
10	Rockfill Calcareous Prefontaines CP	sa	2	0.890	0.57	0.892	0.6	Suelto
10	Rockfill Calcareous Prefontaines CP	sa	2	0.860	0.57	0.892	9.9	Suelto
10	Rockfill Quartzite shale Trois Vallees STV	a	2	0.510	0.379	0.64	49.8	Medio
10	Rockfill Quartzite shale Trois Vallees STV	a	2	0.530	0.379	0.64	42.1	Medio
10	Rockfill Quartzite shale Trois Vallees STV	a	2	0.530	0.379	0.64	42.1	Medio
1	Rockfill Pyramid dam (quarry blasted)	a	7.8	0.444	0.338	0.585	57.1	Medio
1	Rockfill Pyramid dam (quarry blasted)	a	7.8	0.451	0.338	0.585	54.3	Medio
1	Rockfill Pyramid dam (quarry blasted)	a	7.8	0.446	0.338	0.585	56.3	Medio
1	Rockfill Pyramid dam (quarry blasted)	a	7.8	0.436	0.338	0.585	60.3	Medio
1	Rockfill Crushed basalt rock	a	7.8	0.421	0.338	0.585	66.4	Medio
1	Rockfill Crushed basalt rock	a	7.8	0.431	0.338	0.585	62.3	Medio
1	Rockfill Crushed basalt rock	a	7.8	0.433	0.338	0.585	61.5	Medio
1	Rockfill Crushed basalt rock	a	7.8	0.421	0.338	0.585	66.4	Medio
1	Dredger tailings Oroville dam Material	sr	30.8	0.214	0.225	0.433	<u>105.3</u>	Denso
1	Dredger tailings Oroville dam Material	sr	30.8	0.227	0.225	0.433	99.0	Denso
1	Dredger tailings Oroville dam Material	sr	30.8	0.224	0.225	0.433	<u>100.5</u>	Denso
1	Dredger tailings Oroville dam Material	sr	30.8	0.220	0.225	0.433	<u>102.4</u>	Denso
2	Rockfill M1 basaltos triturados	a	19	0.300	0.22	0.421	60.2	Medio
2	Rockfill M1 basaltos triturados	a	19	0.300	0.22	0.421	60.2	Medio
2	Rockfill M1 basaltos triturados	a	19	0.300	0.22	0.421	60.2	Medio
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.256	0.474	11.0	Suelto
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.256	0.474	11.0	Suelto
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.256	0.474	11.0	Suelto
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.256	0.474	11.0	Suelto
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.256	0.474	11.0	Suelto

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

N°	Muestra	FP	Cu	e <sub>i</sub>	e <sub>min</sub>	e <sub>max</sub>	DR%	Estado
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.256	0.474	11.0	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.284	0.511	4.8	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.284	0.511	4.8	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.284	0.511	4.8	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.284	0.511	4.8	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.284	0.511	4.8	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.284	0.511	4.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.199	0.394	7.2	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.199	0.394	7.2	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.199	0.394	7.2	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.199	0.394	7.2	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.199	0.394	7.2	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.199	0.394	7.2	Suelto
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 1)	a	11	0.350	0.276	0.501	67.1	Medio
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 1)	a	11	0.350	0.276	0.501	67.1	Medio
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 1)	a	11	0.350	0.276	0.501	67.1	Medio
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 2)	a	18	0.370	0.21	0.408	19.2	Suelto
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 2)	a	18	0.370	0.21	0.408	19.2	Suelto
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 2)	a	18	0.370	0.21	0.408	19.2	Suelto
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. X)	sa	14	0.320	0.184	0.372	27.7	Suelto
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. X)	sa	14	0.320	0.184	0.372	27.7	Suelto
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. X)	sa	14	0.320	0.184	0.372	27.7	Suelto
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. X)	sa	14	0.320	0.184	0.372	27.7	Suelto
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. Y)	sa	2.5	0.620	0.497	0.793	58.4	Medio
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. Y)	sa	2.5	0.620	0.497	0.793	58.4	Medio
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. Y)	sa	2.5	0.620	0.497	0.793	58.4	Medio
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. Y)	sa	2.5	0.620	0.497	0.793	58.4	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.317	0.555	27.3	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.317	0.555	27.3	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.317	0.555	27.3	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.317	0.555	27.3	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.317	0.555	27.3	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.317	0.555	27.3	Suelto

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

N°	Muestra	FP	Cu	e <sub>i</sub>	e <sub>min</sub>	e <sub>max</sub>	DR%	Estado
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.317	0.555	27.3	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.317	0.555	<u>-60.9</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.317	0.555	<u>-60.9</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.317	0.555	<u>-60.9</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.317	0.555	<u>-60.9</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.317	0.555	<u>-60.9</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.426	0.702	40.6	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.426	0.702	40.6	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.426	0.702	40.6	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.426	0.702	40.6	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.426	0.702	40.6	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.426	0.702	40.6	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.426	0.702	40.6	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.426	0.702	40.6	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	a	4.3	0.690	0.426	0.702	4.3	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	a	4.3	0.690	0.426	0.702	4.3	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	a	4.3	0.690	0.426	0.702	4.3	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	a	4.3	0.690	0.426	0.702	4.3	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.313	0.549	<u>-13.1</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.313	0.549	<u>-13.1</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.313	0.549	<u>-13.1</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.313	0.549	<u>-13.1</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.313	0.549	<u>-13.1</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, suelto)	a	7.1	0.630	0.313	0.549	<u>-34.3</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, suelto)	a	7.1	0.630	0.313	0.549	<u>-34.3</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, suelto)	a	7.1	0.630	0.313	0.549	<u>-34.3</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. B, denso)	a	2	0.740	0.514	0.821	26.4	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. B, denso)	a	2	0.740	0.514	0.821	26.4	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. B, denso)	a	2	0.740	0.514	0.821	26.4	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. B, suelto)	a	2	0.800	0.514	0.821	6.8	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. C, denso)	a	10	0.310	0.174	0.35	22.7	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. C, denso)	a	10	0.310	0.174	0.35	22.7	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. C, denso)	a	10	0.310	0.174	0.35	22.7	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. C, denso)	a	10	0.310	0.174	0.35	22.7	Suelto
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, denso)	a	7.1	0.370	0.313	0.549	75.8	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, denso)	a	7.1	0.370	0.313	0.549	75.8	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, denso)	a	7.1	0.370	0.313	0.549	75.8	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, denso)	a	7.1	0.370	0.313	0.549	75.8	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, suelto)	a	7.1	0.440	0.313	0.549	46.2	Medio
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, denso)	a	2	0.570	0.514	0.821	81.8	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, denso)	a	2	0.570	0.514	0.821	81.8	Denso



Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

N°	Muestra	FP	Cu	$e_i$	$e_{min}$	$e_{max}$	DR%	Estado
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, denso)	a	2	0.570	0.514	0.821	81.8	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, denso)	a	2	0.570	0.514	0.821	81.8	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, suelto)	a	2	0.730	0.514	0.821	29.6	Suelto
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, denso)	sr	7.1	0.310	0.313	0.549	<u>101.3</u>	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, denso)	sr	7.1	0.310	0.313	0.549	<u>101.3</u>	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, denso)	sr	7.1	0.310	0.313	0.549	<u>101.3</u>	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, denso)	sr	7.1	0.310	0.313	0.549	<u>101.3</u>	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, suelto)	sr	7.1	0.380	0.313	0.549	71.6	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, denso)	sr	16	0.250	0.271	0.491	<u>109.5</u>	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, denso)	sr	16	0.250	0.271	0.491	<u>109.5</u>	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, denso)	sr	16	0.250	0.271	0.491	<u>109.5</u>	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, denso)	sr	16	0.250	0.271	0.491	<u>109.5</u>	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, suelto)	sr	16	0.300	0.271	0.491	86.8	Denso
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. A, compacto)	a	6	0.520	0.313	0.549	12.3	Suelto
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. A, compacto)	a	6	0.520	0.313	0.549	12.3	Suelto
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. A, compacto)	a	6	0.520	0.313	0.549	12.3	Suelto
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. C, compacto)	a	54	0.280	0.174	0.35	39.8	Medio
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. C, compacto)	a	54	0.280	0.174	0.35	39.8	Medio
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. C, compacto)	a	54	0.280	0.174	0.35	39.8	Medio

Los datos subrayados presentes en la Tabla 4.2 corresponden a casos en que la metodología no se ajusta bien, es decir aparecen resultados con DR% negativos o mayores a 100. Este fenómeno resulta esperable considerando que para este caso no se han considerado varios factores que podrían afectar los valores de  $e_{min}$  y  $e_{max}$ , tales como la forma de partículas y la rugosidad por nombrar algunos.

#### 4.4.2 Ajuste de la metodología propuesta

Con el objetivo de disminuir los casos donde no se ajusta bien la metodología, se decidió incorporar las correlaciones que incorporan la forma de partículas y fueron propuestas en el capítulo 3, ecuación 3.1 para aquellas muestras con forma de partículas sub-angulares a angulares y ecuación 3.2 para las muestras con partículas sub-redondeadas a redondeadas.

Los resultados obtenidos a partir de aplicar la metodología con las modificaciones mencionadas se presentan en la Tabla 4.3 y en el anexo C se encuentra el detalle para todos los casos donde fue aplicada la metodología con el ajuste realizado.

Tabla 4.3: Resultados DR metodología propuesta ajustada por forma de partículas.

N°	Muestra	FP	Cu	$e_i$	$e_{min}$	$e_{max}$	DR%	Estado
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.273	0.495	16.0	Suelto
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.273	0.495	16.0	Suelto
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.273	0.495	16.0	Suelto
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.273	0.495	16.0	Suelto
8	Lastre natural	a	17.4	0.459	0.273	0.495	16.0	Suelto
8	Lastre lixiviado	a	17.5	0.449	0.273	0.495	20.9	Suelto
8	Lastre lixiviado	a	17.5	0.449	0.273	0.495	20.9	Suelto
8	Lastre lixiviado	a	17.5	0.449	0.273	0.495	20.9	Suelto
8	Lastre lixiviado	a	17.5	0.449	0.273	0.495	20.9	Suelto
8	Lastre chancado	a	9.1	0.492	0.317	0.557	27.1	Suelto
8	Lastre chancado	a	9.1	0.492	0.317	0.557	27.1	Suelto
8	Lastre chancado	a	9.1	0.492	0.317	0.557	27.1	Suelto
9	Tronado Marmol negro 5	a	37.5	0.295	0.21	0.409	57.2	Medio
9	Tronado Marmol negro 10	a	37.5	0.295	0.21	0.409	57.2	Medio
9	Tronado Marmol negro 20	a	37.5	0.295	0.21	0.409	57.2	Medio
7	Lastre Granodiorita M1	a	3	0.390	0.256	0.47	37.4	Medio
7	Lastre Granodiorita M1	a	3	0.360	0.256	0.47	51.4	Medio
7	Lastre Granodiorita M1	a	3	0.330	0.256	0.47	65.4	Medio
7	Lastre Granodiorita M1	a	3	0.330	0.256	0.47	65.4	Medio
7	Lastre Porfido M2	a	8	0.370	0.246	0.456	41.0	Medio
7	Lastre Porfido M2	a	8	0.350	0.246	0.456	50.5	Medio
7	Lastre Porfido M2	a	8	0.330	0.246	0.456	60.0	Medio
7	Lastre Porfido M2	a	8	0.320	0.246	0.456	64.8	Medio
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.261	0.475	<u>-5.9</u>	Suelto
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.261	0.475	<u>-5.9</u>	Suelto
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.261	0.475	<u>-5.9</u>	Suelto
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.261	0.475	<u>-5.9</u>	Suelto
4	Lastre ROM	a	11.6	0.488	0.261	0.475	<u>-5.9</u>	Suelto

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

N°	Muestra	FP	Cu	$e_i$	$e_{min}$	$e_{max}$	DR%	Estado
4	Lastre Lixiviado H8	a	14.4	0.488	0.285	0.511	10.4	Suelto
4	Lastre Lixiviado H8	a	14.4	0.488	0.285	0.511	10.4	Suelto
4	Lastre Lixiviado H8	a	14.4	0.488	0.285	0.511	10.4	Suelto
4	Lastre Lixiviado H8	a	14.4	0.488	0.285	0.511	10.4	Suelto
4	Lastre Lixiviado C8 CID	a	137.2	0.488	0.154	0.334	<u>-85.3</u>	Suelto
4	Lastre Lixiviado C8 CID	a	137.2	0.488	0.154	0.334	<u>-85.3</u>	Suelto
4	Lastre ROM Chancado	a	10.8	0.488	0.279	0.505	7.7	Suelto
4	Lastre ROM Chancado	a	10.8	0.488	0.279	0.505	7.7	Suelto
4	Lastre ROM Chancado	a	10.8	0.488	0.279	0.505	7.7	Suelto
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.450	0.297	0.529	34.1	Medio
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.440	0.297	0.529	38.4	Medio
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.430	0.297	0.529	42.7	Medio
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.390	0.297	0.529	59.9	Medio
5	Lastre CAD Parallel PSD	a	16	0.340	0.297	0.529	81.5	Denso
5	Lastre CAD Truncated PSD	a	9	0.440	0.335	0.579	57.0	Medio
5	Lastre CAD Truncated PSD	a	9	0.370	0.335	0.579	85.7	Denso
5	Lastre CAD Truncated PSD	a	9	0.360	0.335	0.579	89.8	Denso
10	Rockfill Calcareous Prefontaines CP	sa	2	0.890	0.639	0.984	27.2	Suelto
10	Rockfill Calcareous Prefontaines CP	sa	2	0.860	0.639	0.984	35.9	Medio
10	Rockfill Quartzite shale Trois Vallees STV	a	2	0.510	0.422	0.704	68.8	Medio
10	Rockfill Quartzite shale Trois Vallees STV	a	2	0.530	0.422	0.704	61.7	Medio
10	Rockfill Quartzite shale Trois Vallees STV	a	2	0.530	0.422	0.704	61.7	Medio
1	Rockfill Pyramid dam (quarry blasted)	a	7.8	0.444	0.382	0.64	76.0	Denso
1	Rockfill Pyramid dam (quarry blasted)	a	7.8	0.451	0.382	0.64	73.3	Denso
1	Rockfill Pyramid dam (quarry blasted)	a	7.8	0.446	0.382	0.64	75.2	Denso
1	Rockfill Pyramid dam (quarry blasted)	a	7.8	0.436	0.382	0.64	79.1	Denso
1	Rockfill Crushed basalt rock	a	7.8	0.421	0.382	0.64	84.9	Denso
1	Rockfill Crushed basalt rock	a	7.8	0.431	0.382	0.64	81.0	Denso
1	Rockfill Crushed basalt rock	a	7.8	0.433	0.382	0.64	80.2	Denso
1	Rockfill Crushed basalt rock	a	7.8	0.421	0.382	0.64	84.9	Denso
1	Dredger tailings Oroville dam Material	sr	30.8	0.214	0.188	0.383	86.7	Denso
1	Dredger tailings Oroville dam Material	sr	30.8	0.227	0.188	0.383	80.0	Denso
1	Dredger tailings Oroville dam Material	sr	30.8	0.224	0.188	0.383	81.5	Denso
1	Dredger tailings Oroville dam Material	sr	30.8	0.220	0.188	0.383	83.6	Denso
2	Rockfill M1 basaltos triturados	a	19	0.300	0.248	0.46	75.5	Denso
2	Rockfill M1 basaltos triturados	a	19	0.300	0.248	0.46	75.5	Denso
2	Rockfill M1 basaltos triturados	a	19	0.300	0.248	0.46	75.5	Denso
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.288	0.516	28.9	Suelto

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

N°	Muestra	FP	Cu	e <sub>i</sub>	e <sub>min</sub>	e <sub>max</sub>	DR%	Estado
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.288	0.516	28.9	Suelto
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.288	0.516	28.9	Suelto
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.288	0.516	28.9	Suelto
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.288	0.516	28.9	Suelto
2	Rockfill Conglomerado silificado de El Infiernillo	a	10	0.450	0.288	0.516	28.9	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.319	0.559	24.6	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.319	0.559	24.6	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.319	0.559	24.6	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.319	0.559	24.6	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.319	0.559	24.6	Suelto
2	Rockfill Diorita de El Infiernillo	a	5	0.500	0.319	0.559	24.6	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Grava y arena de Pinzandarán	sr-sa	100	0.340	0.175	0.36	10.8	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.224	0.429	23.9	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.224	0.429	23.9	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.224	0.429	23.9	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.224	0.429	23.9	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.224	0.429	23.9	Suelto
2	Rockfill Conglomerado de Mal Paso	a	63	0.380	0.224	0.429	23.9	Suelto
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 1)	a	11	0.350	0.312	0.549	84.0	Denso
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 1)	a	11	0.350	0.312	0.549	84.0	Denso
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 1)	a	11	0.350	0.312	0.549	84.0	Denso
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 2)	a	18	0.370	0.237	0.443	35.4	Medio
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 2)	a	18	0.370	0.237	0.443	35.4	Medio
2	Rockfill Basalto de San Francisco (gran. 2)	a	18	0.370	0.237	0.443	35.4	Medio
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. X)	sa	14	0.320	0.208	0.403	42.6	Medio
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. X)	sa	14	0.320	0.208	0.403	42.6	Medio
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. X)	sa	14	0.320	0.208	0.403	42.6	Medio
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. X)	sa	14	0.320	0.208	0.403	42.6	Medio
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. Y)	sa	2.5	0.620	0.558	0.875	80.4	Denso
2	Rockfill Gneis granítico de Mica (gran. Y)	sa	2.5	0.620	0.558	0.875	80.4	Denso

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

N°	Muestra	FP	Cu	$e_i$	$e_{min}$	$e_{max}$	DR%	Estado
2	Rockfill Gneis granitico de Mica (gran. Y)	sa	2.5	0.620	0.558	0.875	80.4	Denso
2	Rockfill Gneis granitico de Mica (gran. Y)	sa	2.5	0.620	0.558	0.875	80.4	Denso
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.357	0.609	47.2	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.357	0.609	47.2	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.357	0.609	47.2	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.357	0.609	47.2	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.357	0.609	47.2	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.357	0.609	47.2	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	a	10	0.490	0.357	0.609	47.2	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.357	0.609	<u>-36.1</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.357	0.609	<u>-36.1</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.357	0.609	<u>-36.1</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.357	0.609	<u>-36.1</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	a	10	0.700	0.357	0.609	<u>-36.1</u>	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.479	0.772	62.1	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.479	0.772	62.1	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.479	0.772	62.1	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.479	0.772	62.1	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.479	0.772	62.1	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.479	0.772	62.1	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.479	0.772	62.1	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	a	4.3	0.590	0.479	0.772	62.1	Medio
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	a	4.3	0.690	0.479	0.772	28.0	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	a	4.3	0.690	0.479	0.772	28.0	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	a	4.3	0.690	0.479	0.772	28.0	Suelto

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

N°	Muestra	FP	Cu	$e_i$	$e_{min}$	$e_{max}$	DR%	Estado
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	a	4.3	0.690	0.479	0.772	28.0	Suelto
2	Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	a	4.3	0.690	0.479	0.772	28.0	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.351	0.601	8.4	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.351	0.601	8.4	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.351	0.601	8.4	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.351	0.601	8.4	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	a	7.1	0.580	0.351	0.601	8.4	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, suelto)	a	7.1	0.630	0.351	0.601	<u>-11.6</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, suelto)	a	7.1	0.630	0.351	0.601	<u>-11.6</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. A, suelto)	a	7.1	0.630	0.351	0.601	<u>-11.6</u>	Suelto
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. B, denso)	a	2	0.740	0.577	0.906	50.5	Medio
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. B, denso)	a	2	0.740	0.577	0.906	50.5	Medio
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. B, denso)	a	2	0.740	0.577	0.906	50.5	Medio
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. B, suelto)	a	2	0.800	0.577	0.906	32.2	Medio
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. C, denso)	a	10	0.310	0.196	0.379	37.7	Medio
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. C, denso)	a	10	0.310	0.196	0.379	37.7	Medio
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. C, denso)	a	10	0.310	0.196	0.379	37.7	Medio
2	Rockfill Filita de Chivor (gran. C, denso)	a	10	0.310	0.196	0.379	37.7	Medio
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, denso)	a	7.1	0.370	0.351	0.601	92.4	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, denso)	a	7.1	0.370	0.351	0.601	92.4	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, denso)	a	7.1	0.370	0.351	0.601	92.4	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, denso)	a	7.1	0.370	0.351	0.601	92.4	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. A, suelto)	a	7.1	0.440	0.351	0.601	64.4	Medio
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, denso)	a	2	0.570	0.577	0.906	<u>102.1</u>	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, denso)	a	2	0.570	0.577	0.906	<u>102.1</u>	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, denso)	a	2	0.570	0.577	0.906	<u>102.1</u>	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, denso)	a	2	0.570	0.577	0.906	<u>102.1</u>	Denso
2	Rockfill Caliza La angostura (gran. B, suelto)	a	2	0.730	0.577	0.906	53.5	Medio
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, denso)	sr	7.1	0.310	0.258	0.477	76.3	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, denso)	sr	7.1	0.310	0.258	0.477	76.3	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, denso)	sr	7.1	0.310	0.258	0.477	76.3	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, denso)	sr	7.1	0.310	0.258	0.477	76.3	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. A, suelto)	sr	7.1	0.380	0.258	0.477	44.3	Medio
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, denso)	sr	16	0.250	0.225	0.43	87.8	Denso

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

N°	Muestra	FP	Cu	$e_i$	$e_{min}$	$e_{max}$	DR%	Estado
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, denso)	sr	16	0.250	0.225	0.43	87.8	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, denso)	sr	16	0.250	0.225	0.43	87.8	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, denso)	sr	16	0.250	0.225	0.43	87.8	Denso
2	Grava y arena de La Angostura (gran. natural, suelto)	sr	16	0.300	0.225	0.43	63.4	Medio
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. A, compacto)	a	6	0.520	0.351	0.601	32.4	Medio
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. A, compacto)	a	6	0.520	0.351	0.601	32.4	Medio
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. A, compacto)	a	6	0.520	0.351	0.601	32.4	Medio
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. C, compacto)	a	54	0.280	0.196	0.379	54.1	Medio
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. C, compacto)	a	54	0.280	0.196	0.379	54.1	Medio
2	Toba volcánica de Las Piedras (gran. C, compacto)	a	54	0.280	0.196	0.379	54.1	Medio

Al observar los resultados se aprecia que al incluir las correlaciones para  $C_u-e_{min}$  que incorporan la forma de partículas la metodología se ajusta de mejor forma y los valores que quedan fuera de los rangos para DR%, es decir entre 0 y 100 son menos en cantidad, por lo tanto para la inclusión del parámetro de DR% al ábaco de resistencia de Leps se tomarán en cuenta los valores que aparecen en la Tabla 4.3.

## **4.5 Ábaco de resistencia al corte**

### **4.5.1 Incorporación de la densidad relativa al ábaco de resistencia al corte**

Para incorporar el efecto de la densidad relativa al ábaco de resistencia se clasificaron los datos en Denso, Medio y Suelto siguiendo los resultados de la Tabla 4.3. De los 171 datos considerados 41 clasifican como Denso, 59 como Medio y 71 como Suelto, en este caso se consideran todos los datos incluyendo aquellos donde la metodología propuesta no se ajusta de buena forma. De los 171 datos considerados un total de 19 datos no se ajustan dentro de los rangos entre 0 % y 100 %, de ellos 15 datos corresponden a valores negativos asociados a un estado suelto y 4 datos mayores a 100 % (Caliza La Angostura granulometría B, denso 102.1 %) los cuales están asociados a un estado denso.

La figura 4.5 Muestra la distribución de datos según el estado inicial de las muestras ensayadas en un gráfico tensión normal vs ángulo de fricción.

Para el caso de los materiales de lastre de un total de 42 datos 3 clasifican como Denso, 13 como Medio y 26 como Suelto. En este caso la metodología no se ajusta dentro de los parámetros en 7 casos, los cuales todos presentan densidades relativas negativas, es decir tienden a estar en estado suelto.

La figura 4.6 muestra la distribución de los datos correspondientes a lastres clasificados según el estado inicial de las muestras ensayadas en un gráfico tensión normal vs ángulo de fricción.



Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

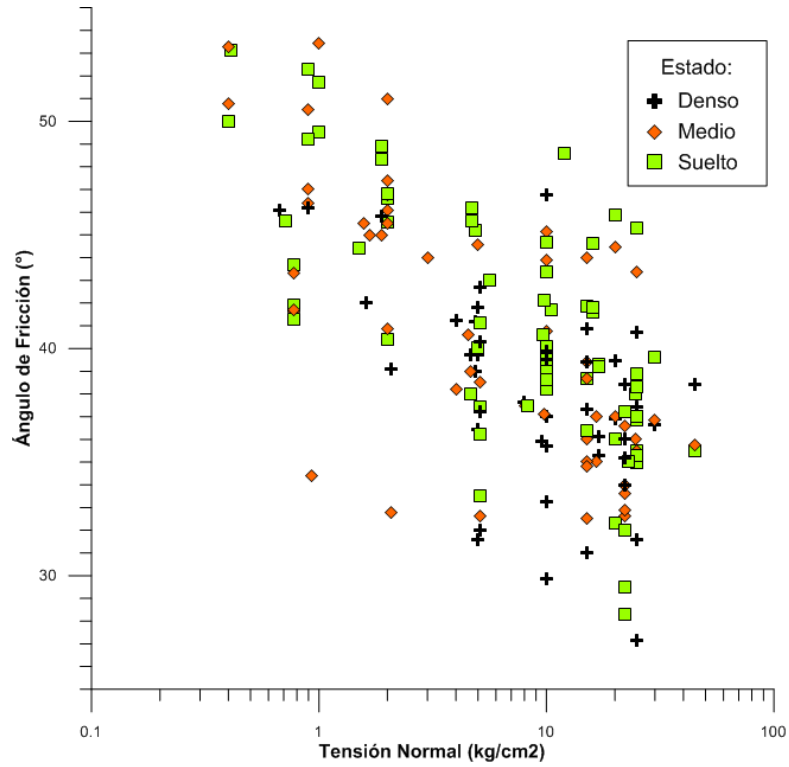


Figura 4.5:  $\varphi_{max}$  vs  $\sigma_n$  Clasificación según estado de Densidad Relativa (Elaboración propia).

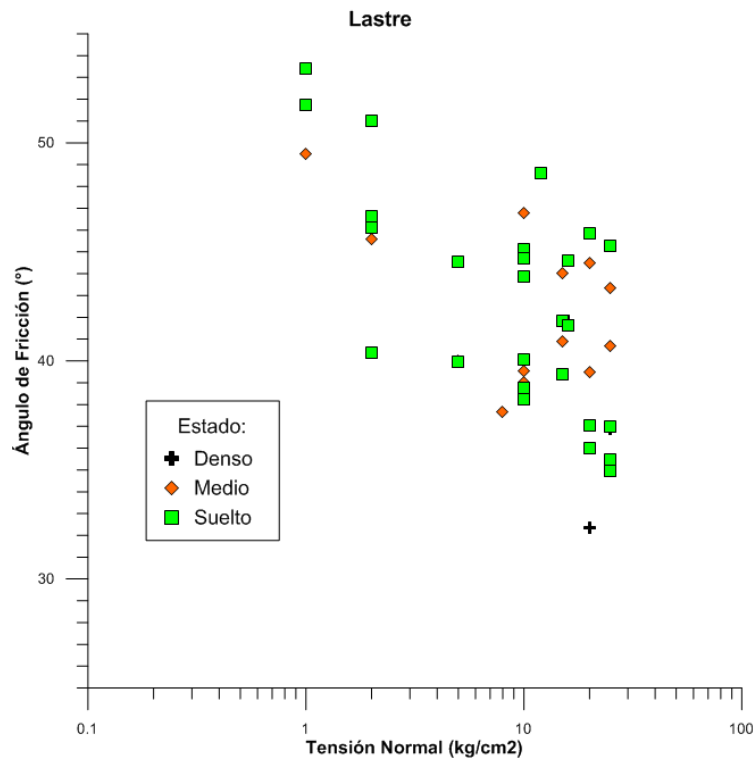


Figura 4.6:  $\varphi_{max}$  vs  $\sigma_n$  Clasificación según estado de Densidad Relativa materiales de Lastre (Elaboración propia).

En las figuras 4.5 y 4.6 no se puede apreciar una tendencia clara en relación a la influencia de la densidad relativa. Este resultado se explicaría en que la resistencia al corte depende de muchos factores tales como, el origen y composición de los granos, forma de partículas, disposición granulométrica, presión de confinamiento, rugosidad, entre otros.

Por esta razón resulta complejo realizar comparaciones con tantos datos disponibles debido a la gran variedad de materiales presente. Solo en caso de tener ensayos de un mismo material se podría realizar la comparación debido a que en cada caso se mantienen fijos ciertos factores que influyen el comportamiento de la muestra, el origen del material, la forma de partículas, la granulometría, etc. De esta forma sólo se tienen dos elementos variables: la presión de confinamiento y el índice de vacíos inicial.

Luego, para todos los casos donde se tienen datos con distintos índices de vacíos iniciales, se graficaron siguiendo el mismo formato que las figuras 4.5 y 4.6 con la clasificación de estado de densidad relativa a partir de la metodología propuesta. Las figuras 4.7 a 4.11 muestran estos casos, cada dato presenta una etiqueta con el valor de índice de vacíos inicial ( $e_i$ ).

En general cuando se tiene un mismo material con probetas a igual índice de vacíos, cuando aumenta la presión de confinamiento el ángulo de fricción disminuye. Pero cuando se aumenta la presión de confinamiento y se disminuye el índice de vacíos inicial (es decir, la muestra está más densa) el ángulo de fricción puede aumentar o disminuir dependiendo de cómo se relacionan estos factores.

Por ejemplo en la figura 4.7a Lastre CAD parallel psd, se tienen tres probetas ensayadas a 1, 2 y 5 kgf/cm<sup>2</sup> de confinamiento, con índices de vacíos de 0.45, 0.44 y 0.43 respectivamente, lo que representa una densidad relativa entre el 34 % y 42% donde el ángulo de fricción disminuye de 49.5° a 45.6° y después a 40° (entre 4° a 5° por tramo). Luego para una presión de confinamiento de 10 kgf/cm<sup>2</sup> y un índice de vacíos igual a 0.39 correspondiente a 59.9% de densidad relativa el ángulo de fricción disminuye a 39°, es decir 1° con respecto a la presión de confinamiento anterior, es decir, se aprecia la influencia del estado inicial de la probeta, al ser más densa presenta menor disminución del ángulo de fricción.

En la figura 4.7b Lastre CAD truncated psd, ocurre algo similar donde incluso al aumentar la presión de confinamiento el ángulo de fricción aumenta debido a que la probeta está con un índice de vacíos menor, ósea está más densa.

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

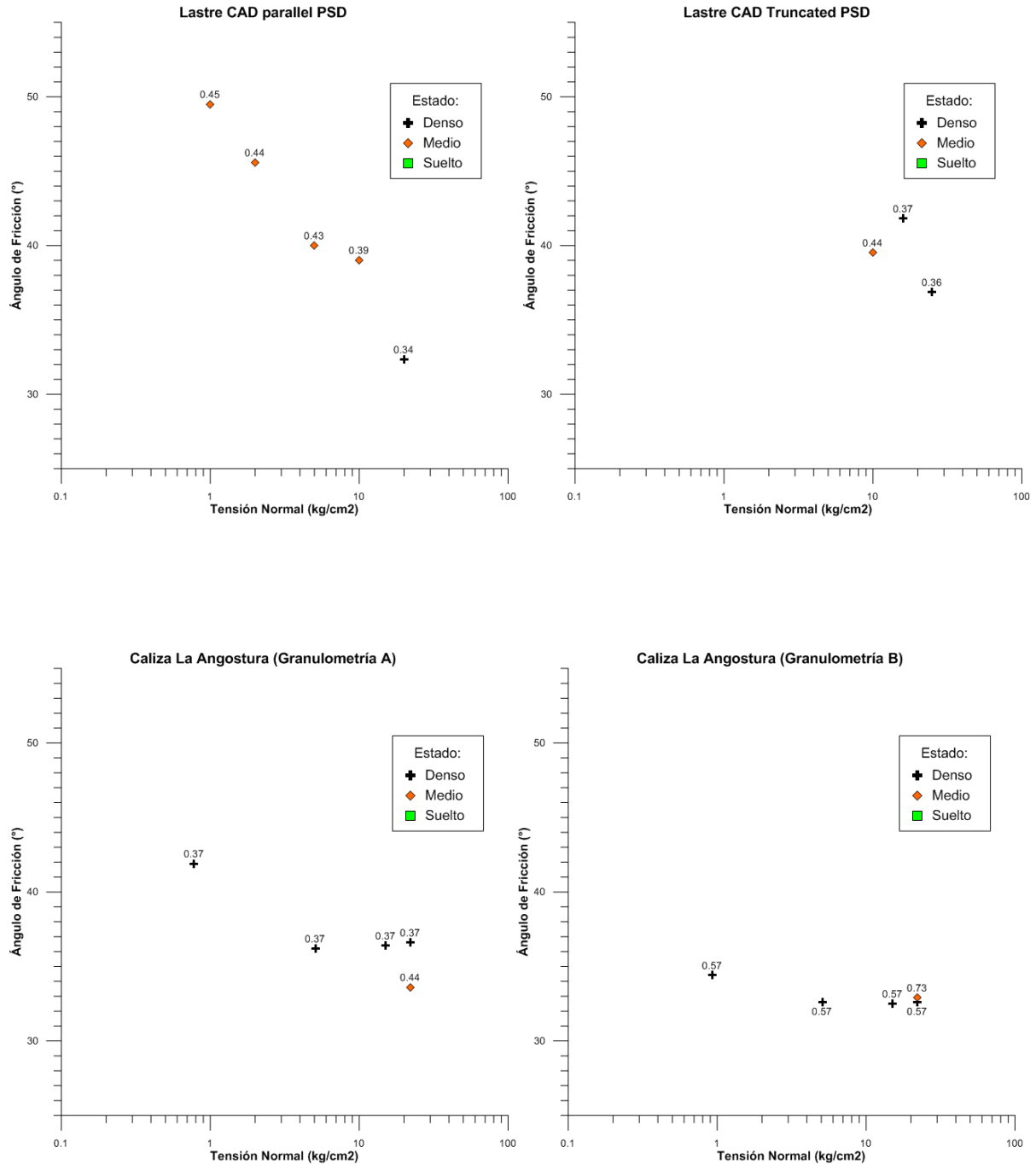


Figura 4.7:  $\phi_{max}$  vs  $\sigma_n$  Clasificación según estado de Densidad Relativa. a) Lastra CAD parallel psd b) Lastra CAD truncated psd c) Caliza La Angostura (granulometría A) d) Caliza La Angostura (granulometría B).

(Elaboración propia)

En la figura 4.7c Caliza La Angostura (granulometría A), se tiene otro ejemplo donde se aprecia la influencia del estado inicial de la muestra, aquellas con índice de vacíos inicial igual a 0.37 clasifican como densas (92 % DR) y la que presenta un índice de vacíos igual a 0.44 clasifica como medio (64 % DR), para un mismo nivel de confinamiento, 22 kgf/cm<sup>2</sup>, el ángulo

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

de fricción disminuye de 36.6° a 33.6°. Sin embargo en la figura 4.7d Caliza La Angostura (granulometría B), este efecto no se aprecia con claridad e incluso la muestra que presenta un estado medio (54 % DR) tiene un ángulo de fricción levemente mayor a la que tiene un estado denso (102 % DR).

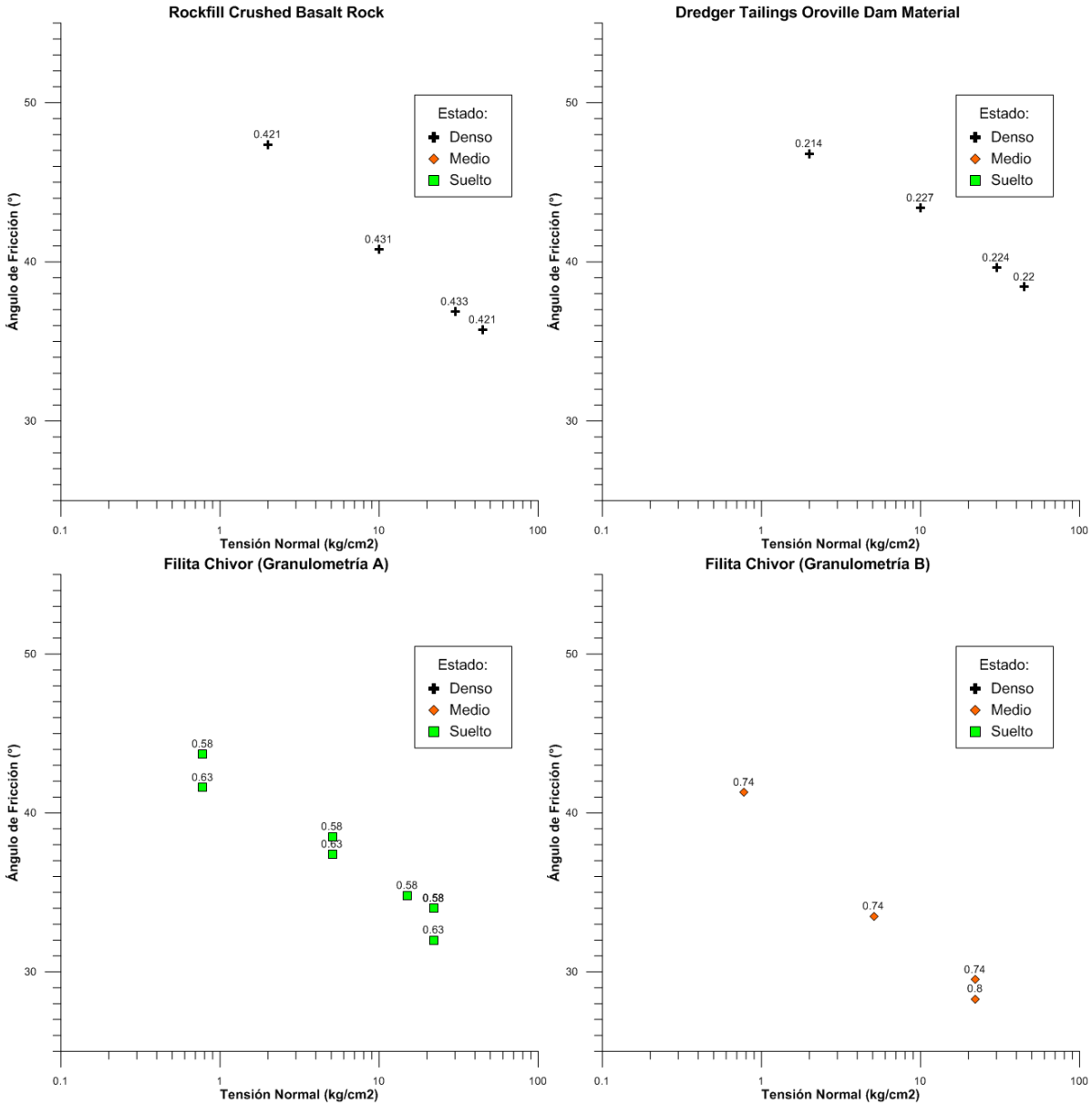


Figura 4.8:  $\phi_{max}$  vs  $\sigma_n$  Clasificación según estado de Densidad Relativa. a) Rockfill Crushed Basalt Rock b) Dredger Tailings Oroville Dam Material c) Filita Chivor (granulometría A) d) Filita Chivor (granulometría B). (Elaboración propia)

En las figuras 4.8a y 4.8b Rockfill Crushed Basalt Rock y Dredger Tailings Oroville Dam Material respectivamente se tienen muestras con DR% inicial entre 80-87 lo que representa un estado denso, el ángulo de fricción disminuye a medida que la tensión de confinamiento aumenta.

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

En la figura 4.8c Filita Chivor (Granulometría A) sólo se tienen muestras en estado suelto. Para este caso, la metodología de estimación de la densidad relativa no se ajusta de buena manera, porque se tienen muestras con DR% entre -11 y 8. Sin embargo para un mismo nivel de tensión de confinamiento se aprecia la tendencia esperada, es decir, para un mismo nivel de confinamiento las muestras que presentan mayor DR% inicial también alcanzan un ángulo de fricción mayor.

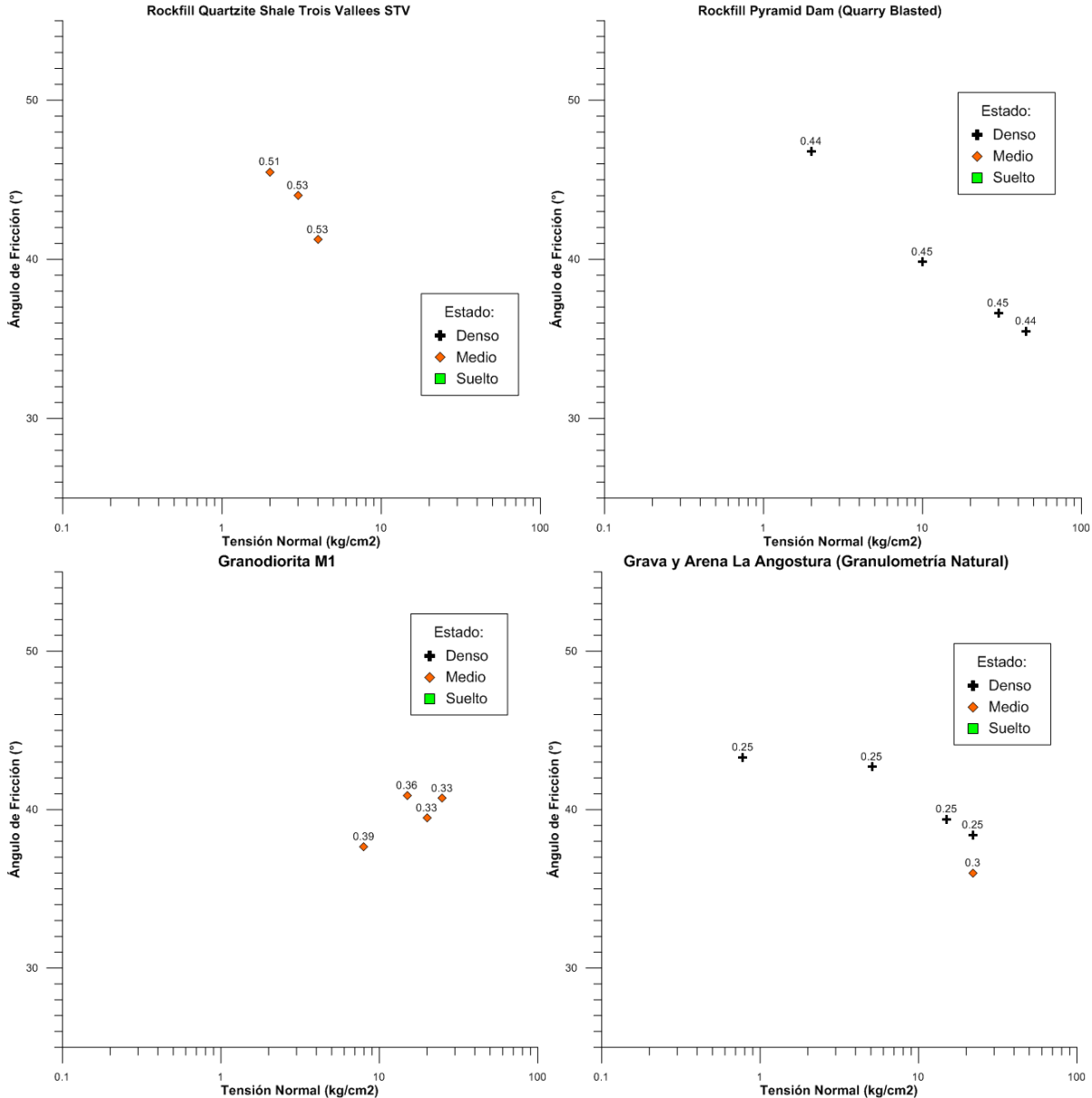


Figura 4.9:  $\phi_{max}$  vs  $\sigma_n$  Clasificación según estado de Densidad Relativa. a) Rockfill Pyramid Dam (Quarry Basted) b) Rockfill Quartzite Shale Trois Vallées STV c) Granodiorita M1 d) Grava y Arena La Angostura (granulometría natural) (Elaboración propia).

*Actualización Ábaco de Resistencia al Corte*

Lo mismo ocurre en la figura 4.8d Filita Chivor (Granulometría B) para un nivel de confinamiento de 22 kgf/cm<sup>2</sup> la muestra con DR% inicial de 50 alcanza un ángulo de fricción 1.2° mayor a la muestra con DR% inicial 32.

En la figura 4.9a Rockfill Pyramid Dam (Quarry Blasted) para muestras en estado denso con DR% entre 73 y 79 solo se aprecia el efecto de disminución del ángulo de fricción con el aumento de la tensión de confinamiento. El mismo efecto se aprecia en la figura 4.9b Rockfill Quartzite Shale Trois Vallées STV con DR% entre 62 y 69 donde sólo se aprecia disminución del ángulo de fricción con el aumento del confinamiento.

En la figura 4.9c Lastre Granodiorita M1 la probeta ensayada a menor nivel de confinamiento presenta un ángulo de fricción considerablemente menor pero su DR% es cercano a 37, lo que es considerablemente más suelto que las otras probetas que presentan DR% entre 51 y 65.

En la figura 4.9d Grava y Arena de La Angostura (Granulometría Natural) nuevamente se aprecia que para un confinamiento de 22 kgf/cm<sup>2</sup> al pasar de un DR% 88 a uno de 63 el ángulo de fricción disminuye 2.4°.

En la figura 4.10a Grava y Arena de La Angostura (Granulometría A) ocurre el mismo efecto para un confinamiento de 22 kgf/cm<sup>2</sup> al pasar de un DR% 76 a uno de 44, ya que el ángulo de fricción disminuye 1.2°.

En las figuras 4.10b y 4.10c Pizarra El Granero (Granulometría A) y Pizarra El Granero (Granulometría B) respectivamente es donde mejor se aprecia la influencia de la densidad relativa inicial, donde para un mismo nivel de confinamiento la probeta en estado inicial más denso alcanza un ángulo de fricción mayor.

En la figura 4.10d Lastre Pórfido M2 para un nivel de confinamiento de 15 kgf/cm<sup>2</sup> con un DR% de 50 se tiene un ángulo de fricción de 44°, luego para un nivel de confinamiento de 20 kgf/cm<sup>2</sup> con un DR% de 60 se tiene un ángulo de fricción de 44.5°, lo que representa un leve aumento de 0.5° con un incremento de 10 en DR%.

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

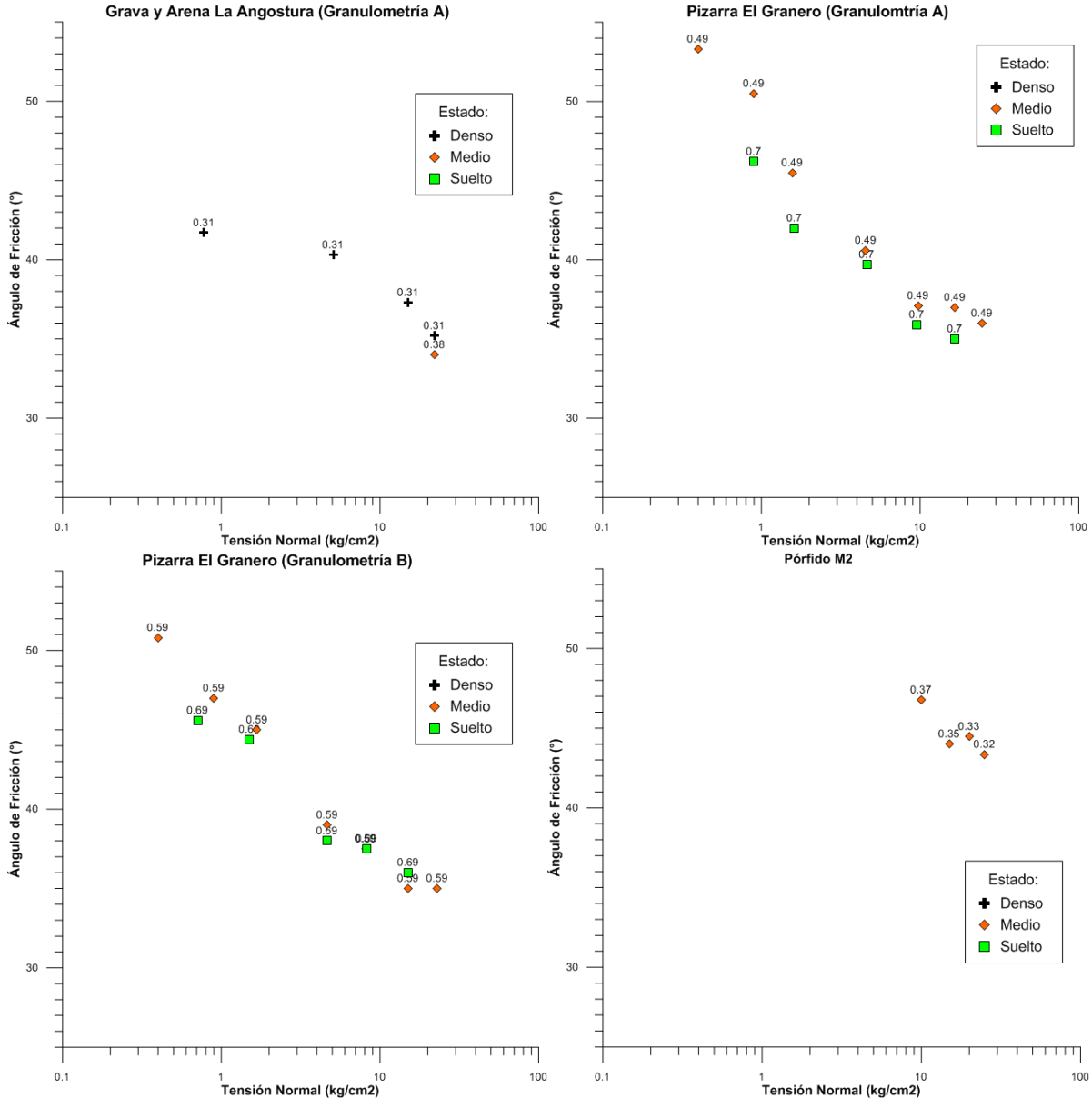


Figura 4.10:  $\varphi_{max}$  vs  $\sigma_n$  Clasificación según estado de Densidad Relativa. a) Grava y Arena La Angostura (granulometría A) b) Pizarra El Granero (granulometría A) c) Pizarra El Granero (granulometría B) d) Pórfido M2. (Elaboración propia)

En la figura 4.11 Rockfill Calcareus Prefontaines CP para dos muestras con tensiones de confinamiento 2 y 4 kgf/cm<sup>2</sup> con DR% 27 y 36 respectivamente, sólo se observa la disminución del ángulo de fricción al aumentar la tensión de confinamiento, el efecto de la densidad relativa no es tan evidente en este caso.

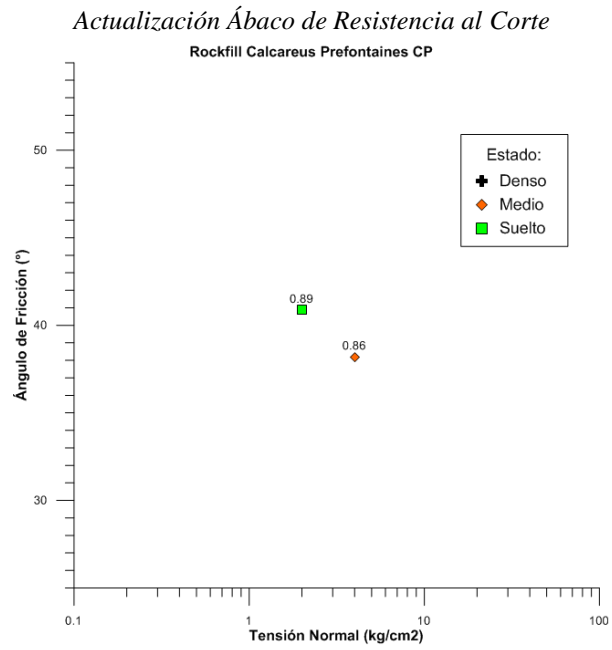


Figura 4.11:  $\varphi_{max}$  vs  $\sigma_n$  Clasificación según estado de Densidad Relativa. Rockfill Calcareous Prefontaines CP. (Elaboración propia)



#### 4.5.2 Reducción del ángulo de fricción por efecto de la densidad relativa

A partir de lo observado en las figuras 4.7 a 4.11 es posible realizar una estimación de la disminución del ángulo de fricción por efecto de la densidad relativa. Para ello se consideraron todas las muestras que fueron ensayadas para un mismo nivel de confinamiento con distintas densidades relativas iniciales. En total se consideraron 18 casos, los cuales son presentados en la Tabla 4.4

Tabla 4.4: Ensayos realizados a distintas densidades relativas e igual confinamiento.

Muestra	$\sigma_3$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Phi [°]	DR%	Estado	$\Delta$ Phi [°]	$\Delta$ DR%	$\sigma_3$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
Rockfill Caliza La angostura (gran. A, denso)	22.1	36.6	92.4	Denso	3.0	28.0	22.1
Rockfill Caliza La angostura (gran. A, suelto)	22.1	33.6	64.4	Medio			
Rockfill Caliza La angostura (gran. B, denso)	22.1	32.6	102.1	Denso	-0.3	48.6	22.1
Rockfill Caliza La angostura (gran. B, suelto)	22.1	32.9	53.5	Medio			
Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	0.78	43.7	8.4	Suelto	2.1	20.0	0.78
Rockfill Filita de Chivor (gran. A, suelto)	0.78	41.6	-11.6	Suelto			
Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	5.08	38.5	8.4	Suelto	1.1	20.0	5.08
Rockfill Filita de Chivor (gran. A, suelto)	5.08	37.4	-11.6	Suelto			
Rockfill Filita de Chivor (gran. A, denso)	22.1	34.0	8.4	Suelto	2.0	20.0	22.1
Rockfill Filita de Chivor (gran. A, suelto)	22.1	32.0	-11.6	Suelto			
Rockfill Filita de Chivor (gran. B, denso)	22.1	29.5	50.5	Medio	1.2	18.2	22.1
Rockfill Filita de Chivor (gran. B, suelto)	22.1	28.3	32.2	Medio			
Grava y arena de La Angostura (gran. A, denso)	22.1	35.2	76.3	Denso	1.2	32.0	22.1
Grava y arena de La Angostura (gran. A, suelto)	22.1	34.0	44.3	Medio			
Grava y arena de La Angostura (gran. natural, denso)	22.1	38.4	87.8	Denso	2.4	24.4	22.1
Grava y arena de La Angostura (gran. natural, suelto)	22.1	36.0	63.4	Medio			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	0.9	50.5	47.2	Medio	4.3	83.3	0.9

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

Muestra	$\sigma_3$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Phi [°]	DR%	Estado	$\Delta$ Phi [°]	$\Delta$ DR%	$\sigma_3$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	0.9	46.2	-36.1	Suelto			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	1.57	45.5	47.2	Medio	3.5	83.3	1.595
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	1.62	42.0	-36.1	Suelto			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	4.55	40.6	47.2	Medio	0.9	83.3	4.585
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	4.62	39.7	-36.1	Suelto			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	9.73	37.1	47.2	Medio	1.2	83.3	9.64
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	9.55	35.9	-36.1	Suelto			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, denso)	16.6	37.0	47.2	Medio	2.0	83.3	16.6
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. A, suelto)	16.6	35.0	-36.1	Suelto			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	0.9	47.0	62.1	Medio	1.4	34.1	0.805
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	0.71	45.6	28.0	Suelto			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	1.68	45.0	62.1	Medio	0.6	34.1	1.595
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	1.51	44.4	28.0	Suelto			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	4.66	39.0	62.1	Medio	1.0	34.1	4.655
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	4.65	38.0	28.0	Suelto			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	8.11	37.5	62.1	Medio	0.0	34.1	8.175
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	8.24	37.5	28.0	Suelto			
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, denso)	15.1	35.0	62.1	Medio	-1.0	34.1	15.1
Rockfill Pizarra de El Granero (gran. B, suelto)	15.1	36.0	28.0	Suelto			

Luego es posible construir la figura 4.12 con los datos de la Tabla 4.4 realizando una discretización para tres rangos de  $\Delta$ DR%. Los rangos seleccionados son 0-20, 20-40 y 40-100.

Actualización Ábaco de Resistencia al Corte

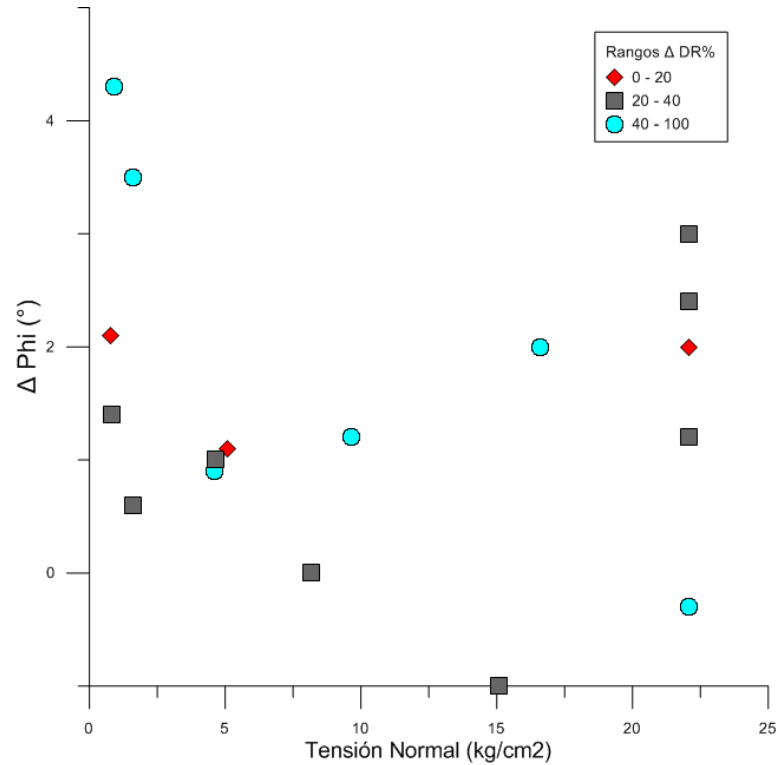


Figura 4.12:  $\Delta\phi$  vs  $\sigma_n$  para rangos de  $\Delta DR\%$  (Elaboración propia).

En la Figura 4.12 se puede observar que para niveles de confinamiento menores a 2 kgf/cm<sup>2</sup> y diferencias de DR% menores a 40 el ángulo de fricción puede disminuir entre 1° y 2° mientras que para diferencias de DR% mayores el ángulo de fricción puede disminuir hasta en 4°. Para niveles de confinamiento mayor no se puede apreciar una tendencia clara, aunque en general los ángulos de fricción pueden disminuir entre 1° y 3°. Se debe mencionar que en dos de los casos al aumentar la densidad relativa inicial de la muestra el ángulo de fricción disminuye, es decir para un mismo nivel de confinamiento la probeta más densa presenta un ángulo de fricción levemente más bajo que la probeta más suelta. En el caso de Caliza La Angostura Granulometría B a 22 kgf/cm<sup>2</sup> de confinamiento con  $\Delta DR\%$  igual a 48.6 el ángulo de fricción de la probeta más suelta es 0.3° mayor y para el caso de Pizarra de El Granero Granulometría B a 15 kgf/cm<sup>2</sup> de confinamiento con  $\Delta DR\%$  igual a 34.1 el ángulo de fricción de la probeta más suelta es 1° mayor.

Esto puede explicarse por diferentes motivos, tales como errores en la toma de datos de laboratorio o en la interpretación de los datos.

### 4.5.3 Reducción del ángulo de fricción por efecto de la densidad relativa según tipo de curva granulométrica

Sobre los datos de la Tabla 4.4 se realizó una clasificación según el tipo de curva granulométrica; se ha considerado como uniforme aquellas curvas que presentan un coeficiente de uniformidad menor a 4 y como bien graduado aquellas con coeficiente de uniformidad mayor a 4.

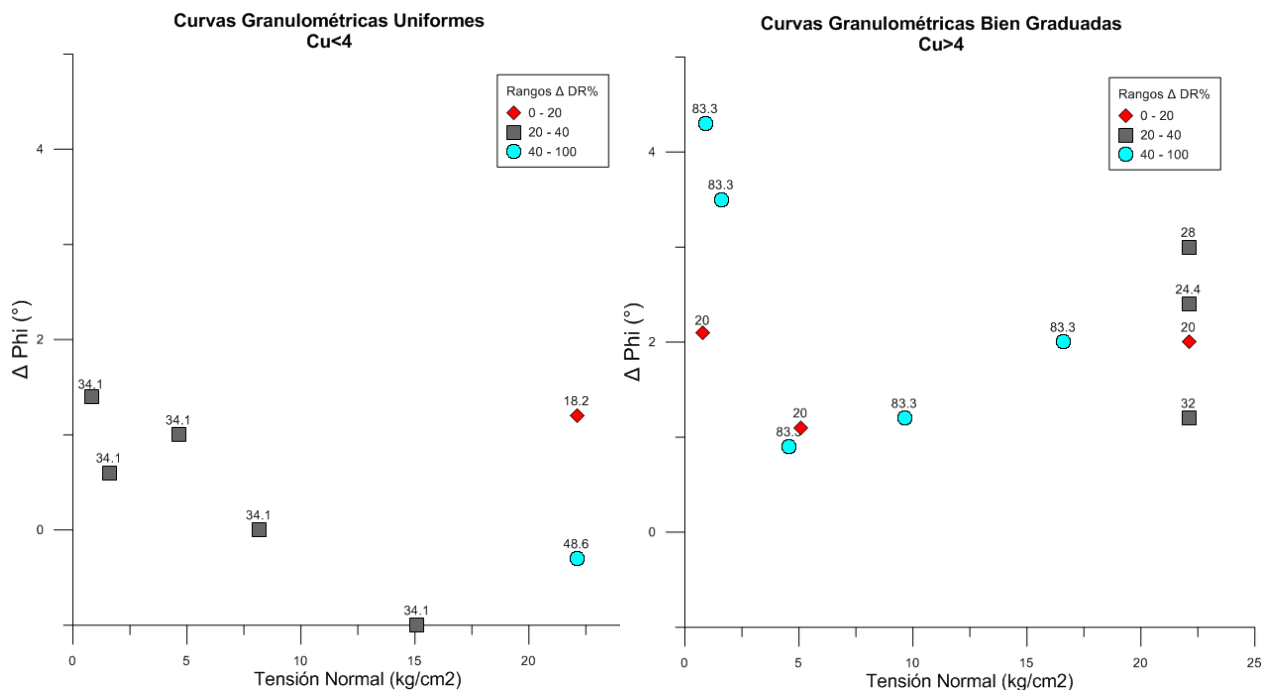


Figura 4.13: a)  $\Delta\phi$  vs  $\sigma_n$  para rangos de  $\Delta DR\%$  uniformes  $Cu < 4$  b)  $\Delta\phi$  vs  $\sigma_n$  para rangos de  $\Delta DR\%$  bien graduados  $Cu > 4$  (Elaboración propia).

La figura 4.13a muestra las curvas uniformes, y se aprecia una menor variación del ángulo de fricción en comparación a la figura 4.13b que muestra las curvas granulométricas bien graduadas, donde las variaciones del ángulo de fricción para bajos niveles de confinamiento pueden llegar hasta 4 grados.

## **CAPÍTULO 5.**

# **CONCLUSIONES**

---

### **5.1 Resumen**

En este trabajo de título se estudió la densidad relativa en medios granulares gruesos y como se relaciona con la resistencia al corte. Para ello se estableció una metodología que permite estimar la densidad relativa de suelos gruesos a partir de ensayos convencionales. Esta metodología se ajustó satisfactoriamente en la mayoría de los casos en que fue aplicada, es decir, los valores determinados de densidad relativa están en el rango entre 0 y 100%. Además en los casos en que fue posible comparar con la descripción según estado de compacidad de los diferentes autores, concuerdan en su mayoría a la clasificación realizada en este trabajo.

Por otro lado se estudió la resistencia al corte de materiales granulares gruesos, donde se realizó una recopilación de ensayos triaxiales de grandes dimensiones presentes en la literatura técnica para formar una base de datos.

*Conclusiones*

Finalmente usando la base de datos confeccionada se pudo estimar el efecto de la densidad relativa en la resistencia al corte de materiales gruesos. Como resultado se logró confeccionar diferentes gráficas que pueden ser usadas para estimar ángulos de fricción a distintos niveles de confinamiento y densidades relativas.

## **5.2 Conclusiones**

### **5.2.1 Correlaciones para densidad relativa**

Se ha realizado una extensa búsqueda de ensayos de densidad relativa publicados en diferentes trabajos de investigación, tesis, publicaciones y revistas científicas. Para utilizar estas correlaciones se requiere que presenten al menos la curva granulométrica de las muestras asociadas para formar una base de datos.

La base de datos confeccionada fue utilizada para establecer correlaciones para índice de vacíos máximos y mínimos, tamaño máximo de partículas, forma de partículas y coeficiente de uniformidad.

### **5.2.2 Metodología para estimar la densidad relativa a partir de ensayos a menor escala**

Usando las correlaciones obtenidas para densidad relativa, se estableció una metodología que permite estimar la densidad relativa de materiales granulares gruesos, para los cuales no es posible realizar ensayos de densidad relativa estándar, a partir de ensayos de escala reducida.

Esto es posible si se tiene solamente la curva granulométrica original del material grueso, la densidad in-situ y la gravedad específica de partículas sólidas ( $G_s$ ). A partir de estos parámetros y usando relaciones de fase es posible trabajar con índices de vacíos para utilizar las correlaciones obtenidas.

En un primer intento utilizando correlaciones promedio se tuvo que para algunos casos la metodología no se ajustó en los rangos esperados y se obtuvo valores negativos asociados a materiales sueltos y también valores mayores a 100% asociados a materiales densos.

Para mejorar el ajuste de la metodología se utilizaron correlaciones para  $C_u-e_{min}$  que incorporan la forma de partículas lo que permitió reducir el número de casos en que no se ajustó bien la metodología.

*Conclusiones*

Finalmente la metodología propuesta logró ajustarse de buena manera en la mayoría de los casos en que fue aplicada, con resultados entre 0 y 100%, a pesar de que ésta no considera algunos factores que se pueden considerar relevantes en la determinación de la densidad relativa, tales como son rugosidad, dureza, esfericidad, origen y litología.

### **5.2.3 Resistencia al corte y actualización de ábacos existentes**

Los mayores esfuerzos en estudiar la resistencia al corte de materiales granulares gruesos mediante ensayos triaxiales de grandes dimensiones se realizaron en la década de los 60's y 70's, (Leps, 1970) conformó un ábaco de resistencia utilizando los datos de ensayos triaxiales realizados en su mayoría por Raúl Marsal, en una cámara que admite probetas de 113 cm de diámetro por 250 cm de alto. El ábaco presentado por (Leps, 1970) hasta el día de hoy es utilizado para realizar diseños de obras de grandes dimensiones que involucran materiales granulares gruesos.

En años posteriores se han realizados diversas investigaciones que involucran ensayos triaxiales de grandes dimensiones, que han sido publicados en diversas revistas, congresos y pueden ser encontrados en la literatura técnica.

En este trabajo se ha realizado una extensa búsqueda de ensayos triaxiales de gran escala en la literatura técnica con el objetivo de incorporar estos resultados al ábaco original propuesto por (Leps, 1970).

Además se ha propuesto la incorporación del efecto de la densidad relativa en la resistencia al corte, para esto se han generado gráficos que muestran la tensión de confinamiento versus el ángulo de fricción distinguiendo por clase el estado inicial de la probeta (Denso, Medio y Suelto) determinado a partir de utilizar la metodología propuesta para estimar la densidad relativa.

A partir de toda la información disponible no se logró separar claramente el efecto que puede producir grado de densidad relativa en los enrocados del ábaco de Leps, lo cual implica que otros efectos podrían ser más determinantes en la resistencia al corte, tales como el tipo de roca (intrusiva, sedimentaria, metamórfica, etc.), la granulometría o la resistencia a la a la compresión simple (UCS) de la roca intacta.

## **5.3 Limitaciones y Trabajos Futuros**

### **5.3.1 Limitaciones del trabajo**

Dentro de las limitaciones más importantes de este trabajo está la dificultad de encontrar información disponible. Dependiendo del objetivo de cada investigación los autores no siempre reportan todos los datos necesarios para poder aplicar la metodología expuesta en este trabajo.

La metodología para estimar densidades relativas no considera algunos factores que pueden influir en este fenómeno, tales como la rugosidad, esfericidad, origen y litología.

Dentro de los alcances de este trabajo sólo se considera recopilación bibliográfica para la obtención de datos y creación de la base de datos. Ensayos de laboratorio propios no fueron contemplados.

### **5.3.2 Recomendaciones para trabajos futuros**

Se recomienda estudiar la influencia de la rugosidad, esfericidad, origen y litología en la determinación de densidad relativa, a través de ensayos de laboratorio, con el fin de mejorar las correlaciones propuestas en este trabajo.

Teniendo en cuenta que los costos de realizar ensayos triaxiales de grandes dimensiones son extremadamente elevados se recomienda realizar pruebas enfocadas a estudiar el efecto de la densidad relativa en la resistencia al corte en probetas de 15 cm x 30 cm, a distintas densidades iniciales para varios niveles de confinamiento, en materiales diversos, tales como lastres, enrocados, gravas fluviales, materiales provenientes de tronadura, etcétera. Con el objetivo de determinar variaciones del ángulo de fricción en función de la diferencia de densidad relativa para distintos niveles de confinamiento, lo que podría resultar en una mejora importante a la figura 4.12 de este trabajo.

Se sugiere construir un equipo para determinar densidad máxima y mínima con moldes más grandes a los utilizados comúnmente, que permitan ensayar muestras con tamaño de partículas mayores para determinar hasta donde es válido extrapolar los resultados obtenidos en este trabajo.



# **SIMBOLOGÍA**



## Simbología

$C_u$	: Coeficiente de uniformidad.
$C_c$	: Coeficiente de curvatura.
cm	: Centímetros.
$D_{10}$	: Diámetro para el cual el 10 % del suelo es de menor tamaño.
$D_{30}$	: Diámetro para el cual el 30 % del suelo es de menor tamaño.
$D_{50}$	: Diámetro para el cual el 50 % del suelo es de menor tamaño.
$D_{60}$	: Diámetro para el cual el 60 % del suelo es de menor tamaño.
$d_{100}$	: Diámetro para el cual el 100 % del suelo es de menor tamaño.
$d_{max}$	: Tamaño máximo de partículas.
DR	: Densidad Relativa o Compacidad Relativa.
DR%	: Porcentaje de densidad relativa.
e	: Índice o relación de vacíos.
$e_{max}$	: Índice de vacíos del suelo para la densidad o compacidad mínima.
$e_{min}$	: Índice de vacíos del suelo para la densidad o compacidad máxima.
kg	: Kilogramos.
kgf	: Kilogramos fuerza.
kN	: Kilonewton.
m	: Metros.
M	: Masa.
$M_w$	: Masa de agua.
$M_s$	: Masa de suelo.
n	: Porosidad.
N	: Newton.
S	: Grado de saturación del suelo.
$t_{max}$	: Tamaño máximo de partículas.
V	: Volumen.
$V_a$	: Volumen de aire.
$V_w$	: Volumen de agua.
$V_s$	: Volumen de suelo.
w	: Humedad.
$W_w$	: Peso de agua.
$W_s$	: Peso de suelo.
$\rho_w$	: Densidad del agua.
$\rho_s$	: Densidad del suelo.
$\rho_{max}$	: Densidad máxima.
$\rho_{min}$	: Densidad mínima.
$\gamma_w$	: Peso específico del agua.
$\gamma_d$	: Peso específico del suelo seco.
$\gamma_{max}$	: Peso específico de suelo en su estado más compacto.
$\gamma_{min}$	: Peso específico de suelo en su estado más suelto.
FP	: Forma de partículas
a	: Forma de partículas angular
sa	: Forma de partículas sub-angular
r	: Forma de partículas redondeado
sr	: Forma de partículas sub-redondeado

# **BIBLIOGRAFÍA**



Bibliografía

1. Al-Hussaini, M., 1983. Effect of particle size and strain conditions on the strength of crushed basalt. *Canadian geotechnical journal* vol.20, pp. 706-717.
2. ASTM- American Society for Testing Materials, 2000. *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using vibratory table. Designation: D 4253-00.* s.l.:s.n.
3. ASTM- American Society for Testing Materials, 2000. *Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. Designation: D 4254-00.* s.l.:s.n.
4. Bard, E. y otros, 2007. Comportamiento de Lastre ROM Sometido a Altas Presiones. VI Congreso Chileno de Geotecnia, Valparaíso, Chile.
5. Besio, G., 2012. Uso del Método de las Curvas Homotéticas en la Representación de Ensayos Monotónicos y Cíclicos en Suelos Gruesos. *Memoria ingeniero civil. FCFM. Universidad de Chile.*
6. Biarez, J. & Hicher, P.-Y., 1994. *Elementary mechanics of soil behaviour. Saturated remoulded soils.* Rotterdam: A. A. Balkema.
7. Biarez, J. & Hicher, P., 1997. Influence de la granulométrie et de son évolution par ruptures de grains sur le comportement mécanique de atériaux granulaires. *Revue Française de Génie Civil*, 1(4), pp. 353-367.
8. Bui, M., 2009. Influence of some particle characteristics on the small strain response of granular materials. *PhD Thesis. School of civil engineering and the environment. University of Southampton.*
9. Cho, G.-C., Dodds, J. & Santamarina, J. C., 2006. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness and Strength - Natural and Crushed Sands-. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5), pp. 591-602.
10. Contreras, L., 2011. Comportamiento Friccionante de Materiales Granulares Gruesos. *Tesis Magister. FCFM. Universidad de Chile.*
11. Craig, R., 2004. *Craig's soil mechanics.* s.l.:Seventh edition, Spon Press.
12. Cubrinovski, M. & Ishihara, K., 2002. Maximum and minimum void ratio characteristics of sands. *Soils and foundations*, 42(6), pp. 65-78.
13. Das, B. M., 2001. Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Cuarta Edición. International Thomson Editores.
14. De Almeida, P., 2001. Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos. *Tesis (PhD). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.*
15. De la Hoz, K., 2007. Estimación de los Parámetros de Resistencia al Corte en Suelos Granulares Gruesos. *Tesis de Ingeniero Civil y Magister.FCFM. Universidad de Chile.*
16. Dickin, E., 1973. Influence of Grain Shape and Size upon the Limiting Porsities of Sands. *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, ASTM STP523, American Society for Testing and Materials*, pp. 113-120.

*Bibliografía*

17. Donaghe, R. & Torrey, V., 1979. Scalping and replacement effects on strength parameters of earth-rock mixtures. *Proc. Conf. on Design Parameters in Geotechnical Engineering, London. Vol.2*, pp. 29-34.
18. Dorador, L., 2010. Análisis experimental de las metodologías de curvas homotéticas y corte en la evaluación de propiedades geotecnicas de suelos gruesos.. *Tesis de Ingeniero Civil y magister. FCFM. Universidad de Chile*.
19. Dorador, L. & Besio, G., 2013. some considerations about geotechnical characterization on soils with oversize. *Fifth international young geotechnical engineering conference*.
20. Douglas, K. J., 2002. The Shear Strength of Rock Masses. *PhD thesis, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia*.
21. El Dine, B. y otros, 2010. Mechanical characterization of matrix coarse-grained soils with a large-sized triaxial device. *Canadian geotechnical journal n°47*, pp. 425-438.
22. Fox, Z., 2011. Critical state, dilatancy and particle breakage of mine waste rock. *Master of Science Thesis. Colorado State University*.
23. Fragaszy, R., Su, J., Siddiqi, F. & Ho, C., 1992. Modeling strength sandy gravel. *Journal of Geotechnical Engineering*, , 118(6), pp. 920-935.
24. Gesche, R., 2002. Metodología de evaluación de parámetros de resistencia al corte de suelos granulares gruesos. *Tesis de Ingeniero Civil. FCFM. Universidad de Chile*.
25. Gomaa, Y. & Abdelrahman, G., 2007. Correlations Between Relative Density and Compaction Test Parameters. *Twelfth International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering*.
26. Hara, T., Toyota, H., Takada, S. & Nakamura, K., 2012. Liquefaction characteristic of intermediate soil including gravel. *15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon. Portgal*.
27. Holubec, I. & D'Appolonia, E., 1973. Effect of Particle Shape on the Engineering Properties of Granular Soils. *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, ASTM STP523, American Society for Testing and Materials*, pp. 304-318.
28. Indraratna, L., Wijewardena, S. & Balasubramaniam, A., 1993. Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill. *Géotechnique 43, n°1*, pp. 37-51.
29. Ionescu, D., 2004. Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast. *PhD thesis, Civil Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong*.
30. Ishihara, K., 1996. *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. s.l.:Clarendon press - Oxford.
31. Kezdi, A., 1979. *Soil physics*. Amsterdam: Elsevier.
32. Kokusho, T. & Fujikura, Y., 2008. Effect of Particle Gradation on Seepage Failure in Granular soils. *Fourth International Conference on Scour and Erosion*.
33. Kort, I., Musante, H. & Fahrenkrog, C., 1979. In-situ mechanical properties measurements of gravelly soil used in an interaction and foundation model for the Santiago Metro. *Proceedings of the 6th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lima, Perú, Volumen 2*, pp. 217-224.

*Bibliografía*

34. Kuenza, K., Towhata, I., Orense, R. & Wassan, T., 2004. Undrained torsional shear test on gravelly soils. *Landslides* n°3, pp. 185-194.
35. Lambe, W. & Whitman, R., 2010. *Mecánica de suelos*. 2a ed. México D.F: Limusa.
36. Lee, Y. H., 1986. Strength and deformation characteristics of rockfill. *Thesis Ph.D. Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand*.
37. Leps, T., 1970. Review of shearing strength of rockfill. *Proceedings of ASCE, Soil Mechanics Journal, Vol 4*, pp. 1159-1170.
38. Linero, S., Palma, C. & Apablaza, R., 2007. Geotechnical Characterisation of Waste Material in Very High Dumps with Large Scale Triaxial Testing. *Proceedings of the International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, 12-14 September 2007, Perth, Australia*, pp. 59-75.
39. Marachi, D., Chan, C. & Seed, H., 1972. Evaluation of properties of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(1), pp. 95-114.
40. Marachi, D., Chan, C., Seed, H. & Duncan, J., 1969. Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials. *Report NO. TE-69-5 to State of California Department of Water Resources*.
41. Marsal et al., 1965. Research on the behaviour of the granular material and rockfill samples. *Comision Federal de Electricidad, Mexico*.
42. Marsal, R., 1967. Large scale testing of rockfill materials. *ASCE Journal of the soil mechanics and foundation division, Vol 93. USA*.
43. Marsal, R., 1973. Mechanical properties of rockfill. Encontrado en : Hirschfeld,R. y Poulos,S.,*Embankment-dam engineering: Casagrande Volumen. New York .Wiley*, p. 454.
44. Marsal, R., 1980. Contribución a la Mecánica de Medios Granulares. *Comisión nacional de electricidad. D.F. Mexico*.
45. Marsal, R. & Resendiz, D., 1975. *Presas de tierra y enrocamiento*. Ed. Limusa. pp 229-236 Mexico: s.n.
46. Marsal, R. & Reséndiz, D., 1975. *Presas de tierra y enrocamiento Vol.2. Editorial Limusa. México*.
47. Mohammadzadeh, H., 2010. Evaluation of grading effect on behaviour of rockfill materials via large-scale experiments. *World Applied Science Journal*, 11(3), pp. 330-337.
48. Ovalle, C. y otros, 2014b. Una revisión de ensayos triaxiales en suelos gruesos y enrocados. *VIII Congreso Cileño de Ingeniería Geotécnica*.
49. Ovalle, C., Frossard, E., Dano, C. & Hicher, P., 2014a. Efectos de tamaño en el comportamientomecánico de enrocados. *VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*.
50. Ovalle, C. y otros, 2013. The Effect of Size on the Strength of Coarse Rock Aggregates and Large Rockfill Samples Through Experimental Data. *Acta Mechanica*, 225(8), pp. 2199-2216.
51. Palma, C., Linero, S. & Apablaza, R., 2009. Caracterización Geotécnica de Materiales de Lastre en Botaderos de Gran Altura Mediante Ensayos Triaxiales y Odométricos de Gran Tamaño. *III Conferencia Sudamericana de Ingenieros Geotécnicos, Córdoba, Argentina*.

*Bibliografía*

52. Simoni, A. & Houlsby, G. T., 2006. The Direct Shear Strength and Dilatancy of Sand-Gravel Mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, Volumen 24, pp. 523-549.
53. Thiers, G. & Donovan, T., 1981. Field density, gradation, and triaxial testing of large-size rockfill for Little Blue Run Dam. Laboratory shear strength of soil, ASTM STP 740, R.N.Yong and F.C. Townsend, Eds.. *American Society for Testing and Materials*, pp. 315-325.
54. Tosun, H., Mirata, T., Mollamahmutoglu, M. & Çolakoglu, N., 1999. Shear Strength of Gravel and Rockfill Measured in Triaxial and Prismatic Wedge Shear Tests. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Paper N°.9903*.
55. Varadajan, A., Sharma, K., Venkatachalam, K. & Gupta, K., 2003. Testing and Modeling two rockfill materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(3), pp. 206-218.
56. Veiga Pinto, A., 1979. Características de Resistência e Deformabilidade de Enrocamentos. *Geotecnia*, Issue 27, pp. 3-41.
57. Verdugo, R., Peters, G. & Bejarano, I., 2007. Evaluación de Parametros Geomecánicos de Suelos Gruesos. *VI Congreso Chileno de Geotecnia, Valparaíso, Chile*.
58. Wesley, L. D., 2009. *Fundamentals of soil mechanics for sedimentary and residual soils*. New Jersey: Wiley.
59. Youd, T., 1973. Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands. *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, ASTM STP523, American Society for Testing and Materials*, pp. 98-112.
60. Zeller, J. & Wullimann, D., 1957. The shear strength of the shell materials for the Göschenenealp Dam, Switzerland. *4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres*, Volumen 2, pp. 399-415.

# **ANEXO A**

---

**Base de datos utilizada para la obtención de  
correlaciones de densidad relativa**



Anexo A

Tabla A - 1: Base de datos para correlaciones de densidad relativa.

N°	Nombre	emin	emax	Cu	dmax	FP
1	unoxidized vinini GW	0.36	0.75	9.1	25	a
2	oxidized vinini GW	0.42	0.80	21.6	25	a
3	0% gravas 92.92%arena 7.08%finos	0.74	1.24	2.5	2	r
4	0% gravas 83.63%arena 6.37%finos	0.69	1.13	2.7	4.76	r
5	0% gravas 74.34%arena 5.66%finos	0.64	1.02	3.2	4.76	r
6	0% gravas 65.05%arena4.95%finos	0.59	0.91	3.8	4.76	r
7	0% gravas 55.75%arena 4.25%finos	0.53	0.80	16.6	4.76	r
8	gravel g06	0.26	0.47	1.7	6	sr
9	gravel g20	0.21	0.40	2.3	20	sr
10	sand	0.38	0.62	3.9	2	r
11	G0610	0.34	0.57	4.1	6	r
12	G0620	0.31	0.53	4.7	6	r
13	G0630	0.29	0.50	5.6	6	r
14	G0635	0.28	0.49	6.2	6	r
15	G0640	0.26	0.47	7.4	6	r
16	G0650	0.25	0.47	11.4	6	r
17	G0660	0.28	0.50	11.1	6	sr
18	G06	0.53	0.81	1.6	6	sr
19	G2020	0.30	0.50	4.6	20	r
20	G2030	0.26	0.47	5.5	20	r
21	G2040	0.23	0.42	7.2	20	r
22	G2050	0.21	0.41	13.8	20	r
23	G2060	0.20	0.40	14.5	20	sr
24	G20	0.44	0.68	2.4	20	sr
25	Conglomerado silificado de El Infiernillo	0.40	0.55	10.0	203	sa
26	Diorita de El Infiernillo	0.48	0.63	5.0	203	sa
27	Grava y arena de Pinzadarán	0.29	0.43	100.0	203	sr
28	Conglomerado de Malpaso	0.31	0.51	63.0	203	sr
29	Basalto de San Francisco (gran 1)	0.33	0.55	11.0	200	a
30	Basalto de San Francisco (gran 2)	0.29	0.46	18.0	200	a
31	Gneis granítico de Mica (gran. X)	0.31	0.50	14.0	178	sa
32	Gneis granítico de Mica (gran. Y)	0.58	0.77	2.5	178	sa
33	Gneis granítico + 30% esquisto de Mica (gran. X)	0.29	0.51	19.0	178	sa
34	Gneis granítico + 30% esquisto de Mica (gran. Y)	0.60	0.79	2.5	178	sa
35	Pizarra de El Granero (gran. A) denso	0.45	0.70	10.0	200	a
36	Pizarra de El Granero (gran. A) Suelto	0.45	0.70	10.0	200	a
37	Pizarra de El Granero (gran. B) denso	0.60	0.84	4.3	200	a
38	Pizarra de El Granero (gran. B) Suelto	0.60	0.84	4.3	200	a

Anexo A

39	Filita de Chivor (gran. A) denso	0.59	0.68	7.1	200	a
40	Filita de Chivor (gran. A) Suelto	0.59	0.68	7.1	200	a
41	Filita de Chivor (gran. B) denso	0.74	0.80	2.0	200	a
42	Filita de Chivor (gran. B) Suelto	0.74	0.80	2.0	200	a
43	Filita de Chivor (gran.C) denso	0.32	0.41	10.0	200	a
44	Caliza de la Angostura (gran. A) denso	0.35	0.50	7.1	200	sa
45	Caliza de la Angostura (gran. A) suelto	0.35	0.50	7.1	200	sa
46	Caliza de la Angostura (gran. B) denso	0.49	0.73	2.0	200	sa
47	Caliza de la Angostura (gran. B) suelto	0.49	0.73	2.0	200	sa
48	Grava y arena de La Angostura (gran. A) denso	0.30	0.39	7.1	200	sr
49	Grava y arena de La Angostura (gran. A) suelto	0.30	0.39	7.1	200	sr
50	Grava y arena de La Angostura (gran. Natural) denso	0.25	0.30	16.0	200	sr
51	Grava y arena de La Angostura (gran. Natural) suelto	0.25	0.30	16.0	200	sr
52	Toba volcanica de Las Piedras (gran. A)	0.52	0.60	6.0	200	sa
53	Toba volcanica de Las Piedras (gran. C)	0.23	0.43	54.0	200	sa
54	crushed basalt 6.4-0.6	0.53	0.95	3.3	6.4	a
55	crushed basalt 12.7-0.6	0.45	0.84	4.7	12.7	a
56	crushed basalt 25.4-0.6	0.41	0.74	6.7	25.4	a
57	crushed basalt 50.8-0.6	0.37	0.69	9.4	50.8	a
58	crushed basalt 76.2-0.6	0.36	0.65	11.6	76.2	a
59	GB	0.53	0.69	1.0	0.972	r
60	LBSB (Leighton Buzzard Sand fraction B)	0.48	0.83	1.5	1.14	r
61	LBSE (Leighton Buzzard Sand fraction E)	0.63	1.01	1.5	1.14	r
62	Fine Nugget	0.74	1.24	1.3	2.47	r
63	Coarse Glitter	0.73	1.36	1.3	2.43	sr
64	Fontainebleau sand	0.54	0.94	1.5	1	r
65	3_AASHTO A-2-7 (1)	0.35	0.81		5	sa
66	Lastre natural GP	0.38	0.72	17.4	177.8	sa
67	Lastre Lixiviado GP	0.39	0.66	17.5	177.8	sa
68	Lastre Chancado GW	0.46	0.76	9.1	177.8	sa
69	Homotetica P-1 tmax 100	0.16	0.44	27.6	100	sr
70	Homotetica P-1 tmax 25	0.23	0.55	28.3	25	sr
71	Homotetica P-1 tmax 12.7	0.28	0.63	25.1	12.7	sr
72	Homotetica P-1 tmax 9.5	0.30	0.67	18.9	9.5	sr
73	Homotetica P-1 tmax 4.76	0.36	0.75	9.4	4.76	sr
74	Homotetica M-2 tmax 25	0.26	0.52	15.9	25	sr
75	Homotetica M-2 tmax 12.7	0.25	0.61	15.9	12.7	sr
76	Homotetica M-2 tmax 4.75	0.28	0.66	13.7	4.75	sr
77	Homotetica M-3 tmax 25	0.28	0.48	21.0	25	sr
78	Homotetica M-3 tmax 12.7	0.28	0.60	21.0	12.7	sr
79	Homotetica M-3 tmax 4.75	0.24	0.64	20.8	4.75	sr
80	Material 1 basalto Marsal	0.29	0.47	19.0	178	a

Anexo A

81	Material 2 gneiss granitico X	0.31	0.50	14.0	178.00	sa
82	Material 3 Gneiss granitico Y	0.58	0.77	2.5	178	sa
83	Basalto Marimbondo Campo 25 años d50=103	0.53	0.84	2.7	152.4	a
84	Basalto Marimbondo Campo 25 años d50=26	0.52	0.90	2.4	38.10	a
85	Basalto Marimbondo Campo 25 años d50=12	0.58	1.01	2.4	19.10	a
86	Basalto Pedreira intacto 0 años d50=103	0.54	0.89	2.7	152.40	sa
87	Basalto Pedreira intacto 0 años d50=26	0.25	0.51	2.4	38.10	sa
88	Basalto Pedreira intacto 0 años d50=22	0.50	0.90	36.0	38.10	sa
89	Basalto Pedreira intacto 0 años d50=16	0.55	0.88	2.4	25.40	sa
90	Basalto Pedreira intacto 0 años d50=12	0.57	0.99	2.4	19.10	sa
91	Basalto Pedreira intacto 0 años d50=8	0.55	1.00	3.0	12.70	sa
92	Granito Serra da Mesa Sao d50=103	0.60	0.79	2.7	152.40	sr
93	Granito Serra da Mesa Sao d50=26	0.50	0.85	2.4	38.10	sr
94	Granito Serra da Mesa Sao d50=22	0.23	0.47	36.0	25.40	sr
95	Basalto Marimbondo Campo 25 años D50=26	0.37	0.66	2.4	38.10	a
96	Basalto Pedreira Intacto 0 años D50=26	0.35	0.70	2.4	38.10	sa
97	Granito Serra da Mesa Sao D50=26	0.24	0.64	2.4	38.10	sr
98	Hirogawa Sample A Fc=18% Uc=91.1	0.56	1.17	90.3	26.5	r
99	Hirogawa Sample B Fc=0% Uc=23.8	0.52	1.08	23.4	26.5	r
100	Escalado H-3	0.20	0.67	39.7	3.9	sa
101	G0	0.59	0.94	3.0	2.00	sr
102	G10	0.46	0.81	3.3	26.20	sr
103	G20	0.43	0.73	6.9	26.20	sr
104	G30	0.39	0.66	8.5	26.20	sr
105	G40	0.30	0.59	13.6	26.20	sr
106	G50	0.30	0.52	23.3	26.20	sr
107	G60	0.30	0.48	26.7	26.20	sr
108	G70	0.31	0.45	28.6	26.20	sr
109	G80	0.31	0.46	17.5	26.20	sr
110	G90	0.36	0.53	4.3	26.20	sr
111	G100	0.44	0.56	3.8	26.20	sr
112	TY	0.61	0.98	1.7	0.41	sr
113	T1	0.80	1.25	1.7	0.41	sr
114	T2	0.59	0.94	3.3	2.00	sr
115	T3	0.47	0.90	4.4	4.76	sr
116	T4	0.34	0.65	8.5	9.60	sr
117	T5	0.30	0.59	13.6	26.00	sr
118	T6	0.72	1.05	1.7	0.87	sr
119	T7	0.34	0.60	8.3	26.00	sr
120	T8	0.54	0.96	2.1	4.76	sr
121	T9	0.32	0.52	5.6	26.00	sr
122	T10	0.37	0.57	5.1	26.00	sr

Anexo A

123	T11	0.48	0.67	2.2	9.60	sr
124	T12	0.44	0.56	3.8	26.00	sr
125	A1-1	0.32	0.52	8.1	37.5	sr
126	A1-2	0.29	0.55	8.9	12.5	sr
127	M1-1	0.32	0.70	6.6	37.5	r
128	M1-2	0.37	0.70	6.9	12.5	r
129	M2-1	0.26	0.52	15.8	25	r
130	M2-2	0.25	0.61	15.9	12.5	r
131	M3-1	0.28	0.48	20.5	25	r
132	M3-2	0.28	0.60	21.6	12.5	r
133	SCA-1	0.20	0.57	34.1	37.5	r
134	SCA-2	0.19	0.61	19.9	19.1	r
135	SCA-3	0.20	0.68	7.8	9.52	r
136	SCB-1	0.13	0.42	64.9	37.5	sr
137	SCB-2	0.16	0.49	33.6	19.1	sr
138	SCB-3	0.22	0.58	18.7	85	sr
139	65%ST	0.22	0.49	15.9	25	sr
140	80%ST	0.34	0.58	6.5	25	sr
141	100%ST	0.47	0.67	2.4	25	sr
142	Hom 1"	0.46	0.88	5.3	25	sr
143	40%ST	0.24	0.45	24.7	25	sr
144	60%ST	0.28	0.49	21.3	25	sr
145	80%ST	0.36	0.51	8.4	25	sr
146	100%ST	0.53	0.70	1.7	25	sr

Dónde:

$d_{max}$ : Tamaño máximo de partículas

sa: sub-angular

a: angular

sr: sub-redondeado

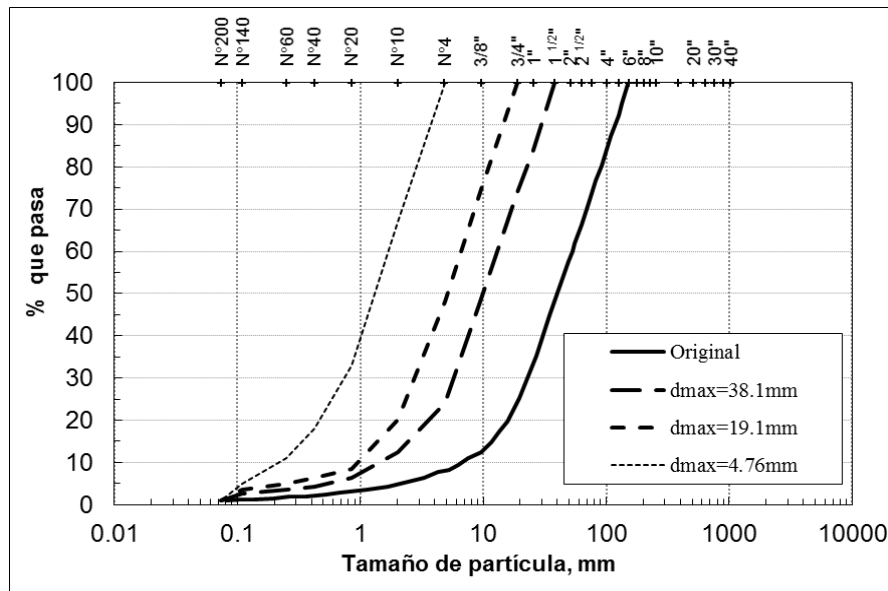
r: redondeado

# **ANEXO B**

---

**Uso de la metodología Propuesta**

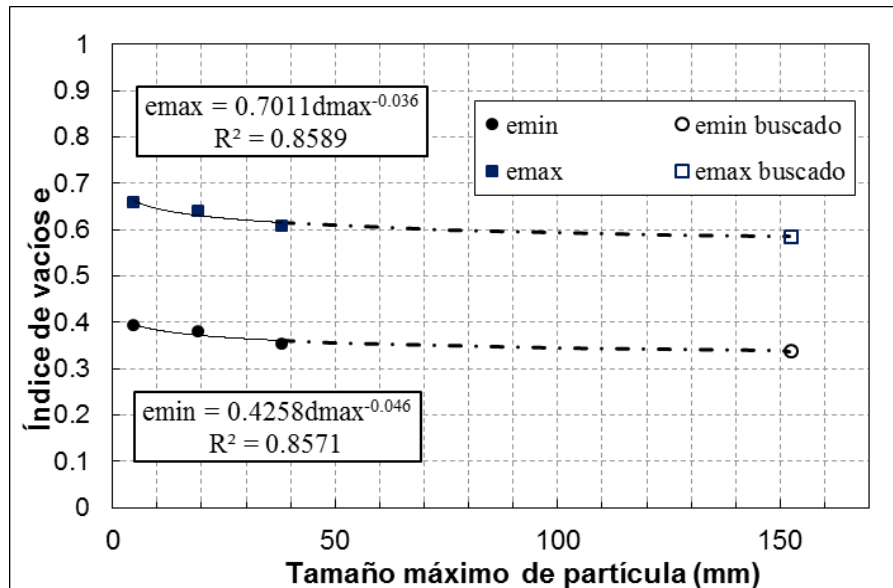
Muestra	Pyramid dam & Crushed basalt
dmax [mm]	152.4
Referencia	Marachi et al. 1969



dmax (mm)	Cu
4.76	6.7
19.1	7.4
38.1	9.3

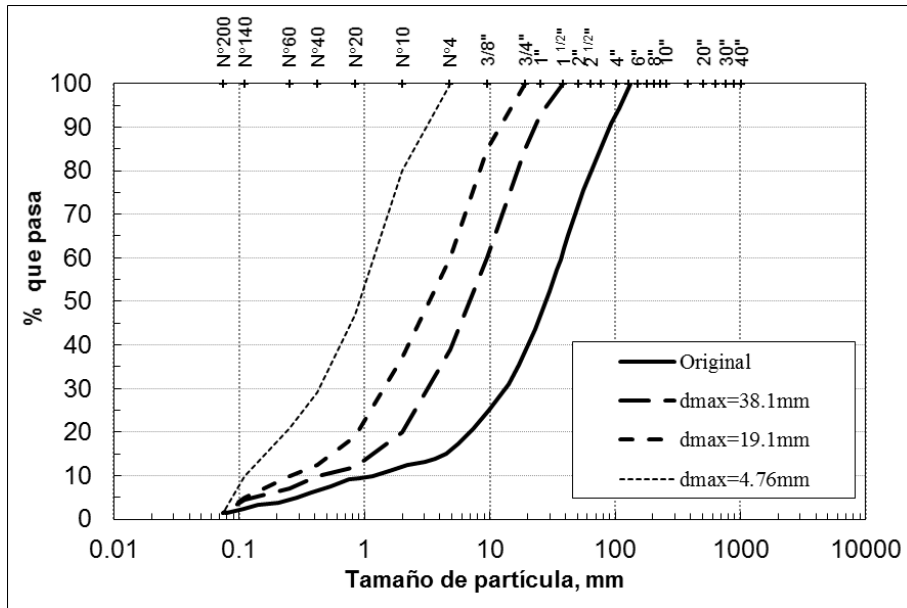
dmax (mm)	emin
4.76	0.394
19.1	0.381
38.1	0.355

dmax (mm)	emax
4.76	0.659
19.1	0.642
38.1	0.608



emin	0.338
emax	0.585

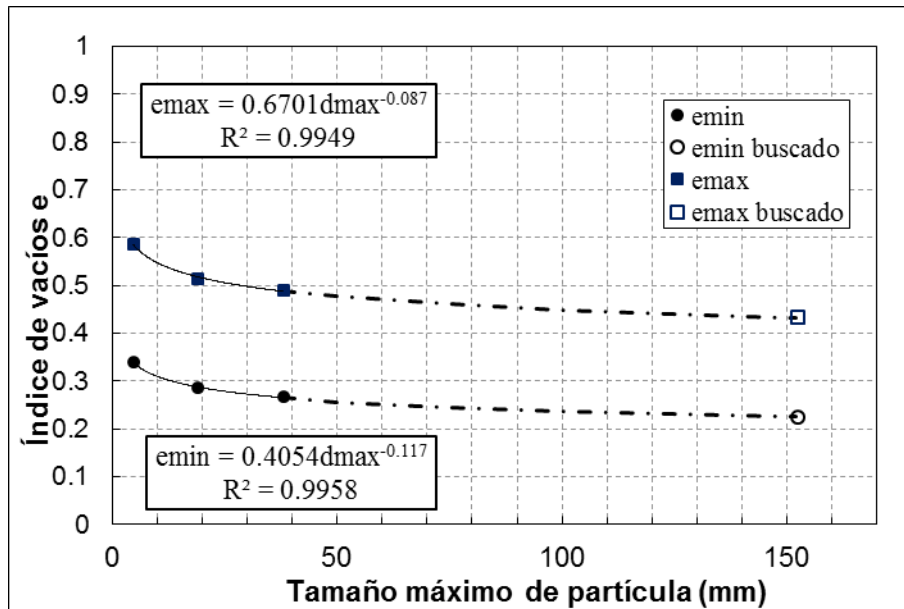
Muestra	Oroville dam
dmax [mm]	152.4
Referencia	Marachi et al. 1969



dmax (mm)	Cu
4.76	10.9
19.1	19.4
38.1	24.0

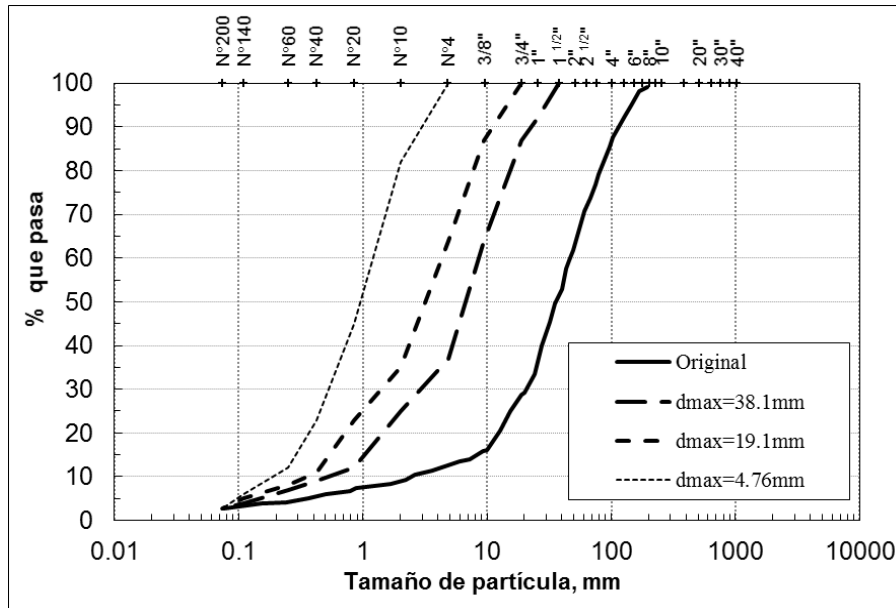
dmax (mm)	emin
4.76	0.339
19.1	0.285
38.1	0.267

dmax (mm)	emax
4.76	0.586
19.1	0.514
38.1	0.490



emin	0.225
emax	0.433

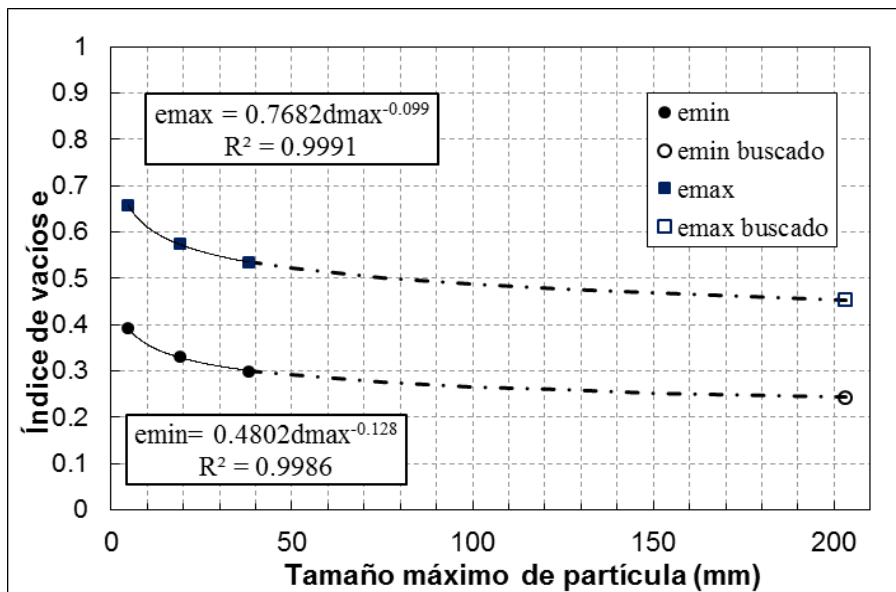
Muestra	Lastre natural y lixiviado
dmax [mm]	203.2
Referencia	Contreras 2011



dmax (mm)	Cu
4.76	6.8
19.1	11.8
38.1	16.4

dmax (mm)	emin
4.76	0.392
19.1	0.331
38.1	0.300

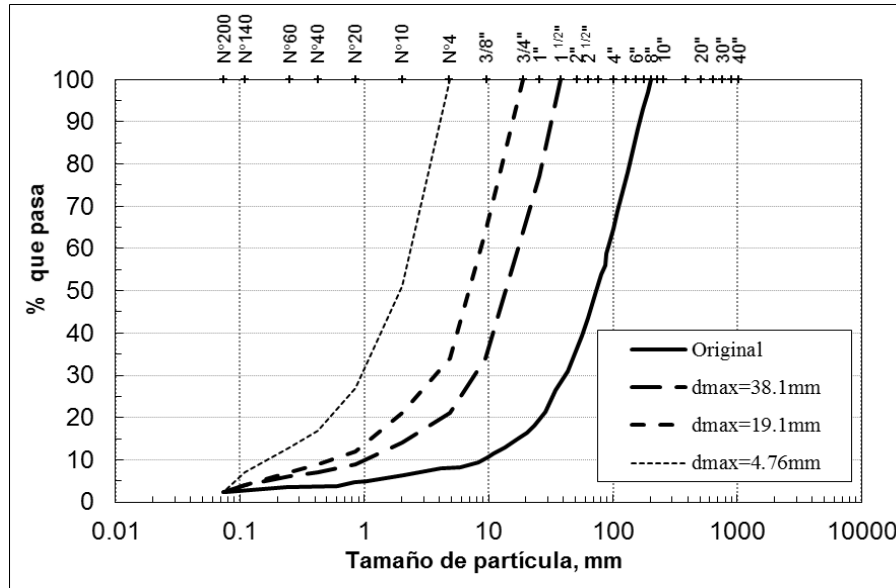
dmax (mm)	emax
4.76	0.657
19.1	0.575
38.1	0.534



emin	0.243
emax	0.454



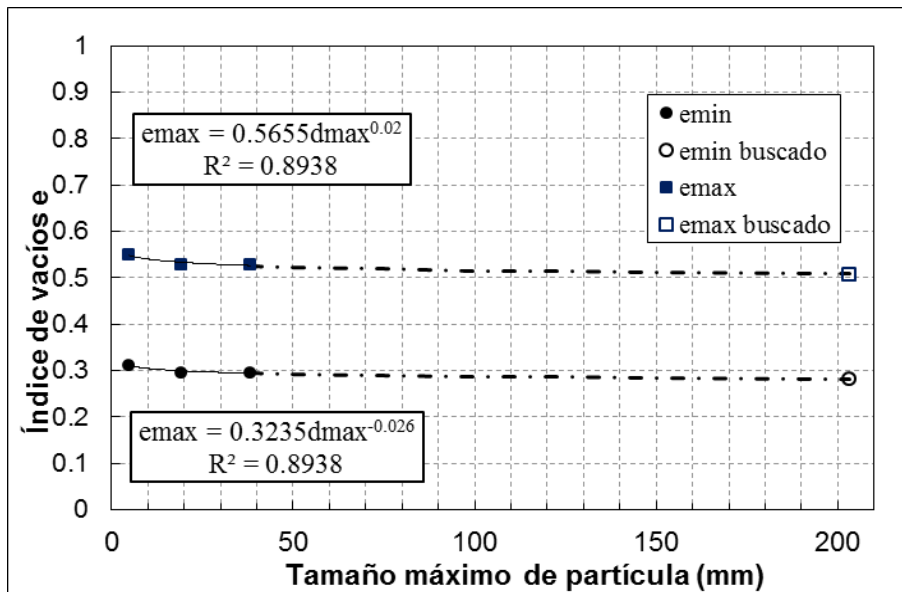
Muestra	Lastre chancado
dmax [mm]	203.2
Referencia	Contreras 2011



dmax (mm)	Cu
4.76	14.4
19.1	17.0
38.1	17.0

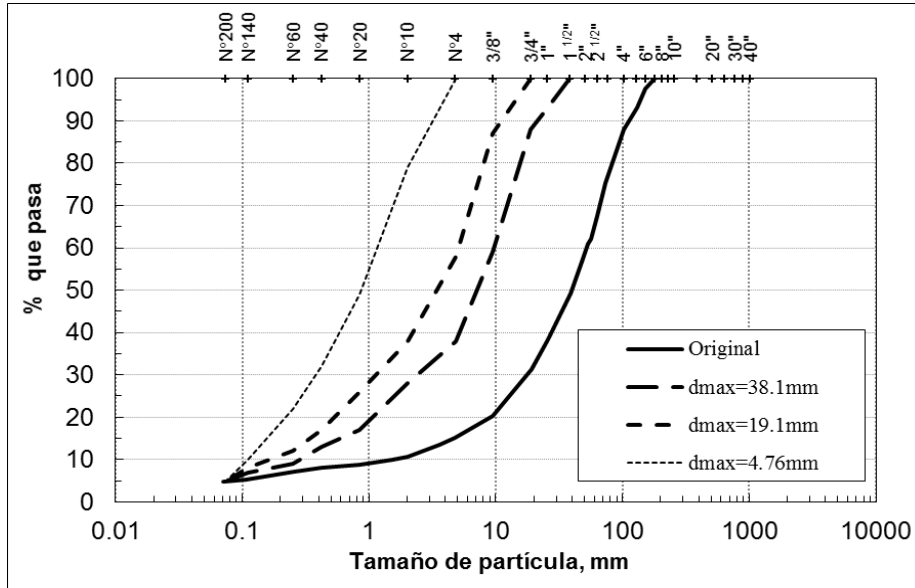
dmax (mm)	emin
4.76	0.312
19.1	0.296
38.1	0.296

dmax (mm)	emax
4.76	0.550
19.1	0.529
38.1	0.529



emin	0.282
emax	0.508

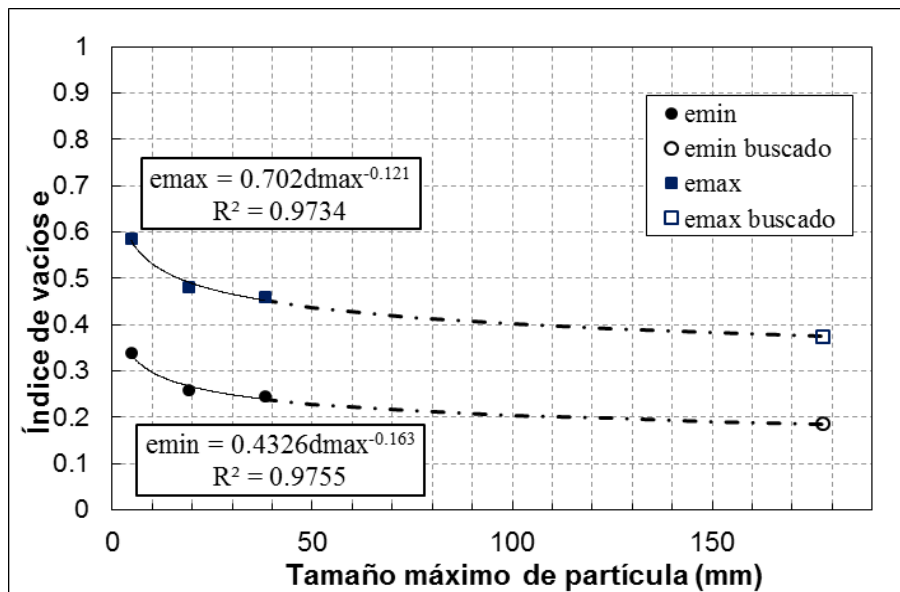
Muestra	Mármol Negro
dmax [mm]	177.8
Referencia	Besio 2012



dmax (mm)	Cu
4.76	10.9
19.1	26.3
38.1	32.1

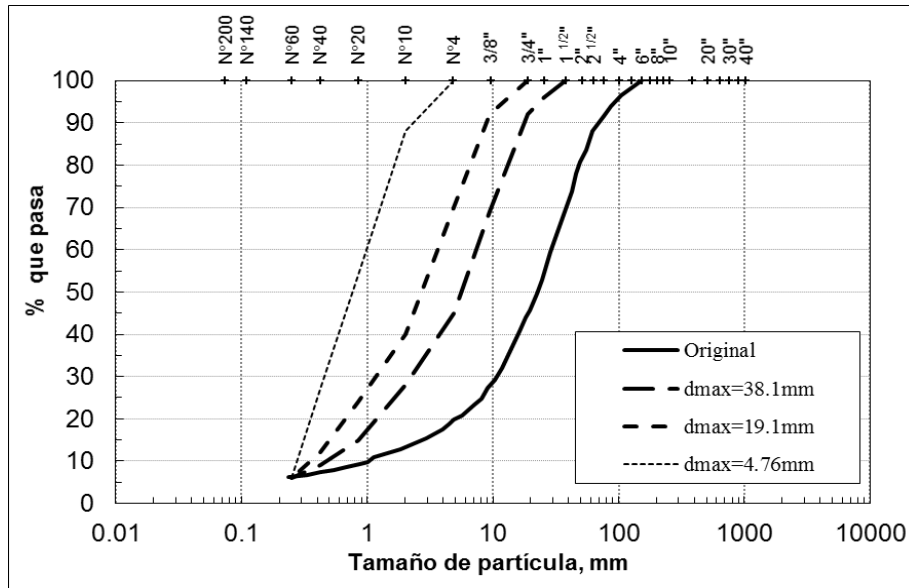
dmax (mm)	emin
4.76	0.339
19.1	0.259
38.1	0.244

dmax (mm)	emax
4.76	0.586
19.1	0.480
38.1	0.460



emin	0.186
emax	0.375

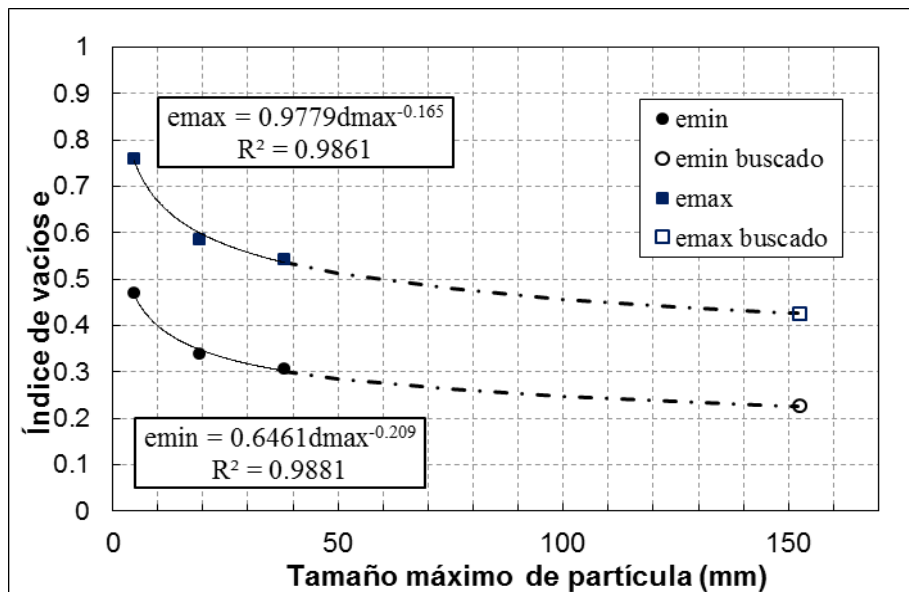
Muestra	Lastre M1 Granodiorita
dmax [mm]	152.4
Referencia	Palma et al. 2009



dmax (mm)	Cu
4.76	3.7
19.1	10.9
38.1	15.0

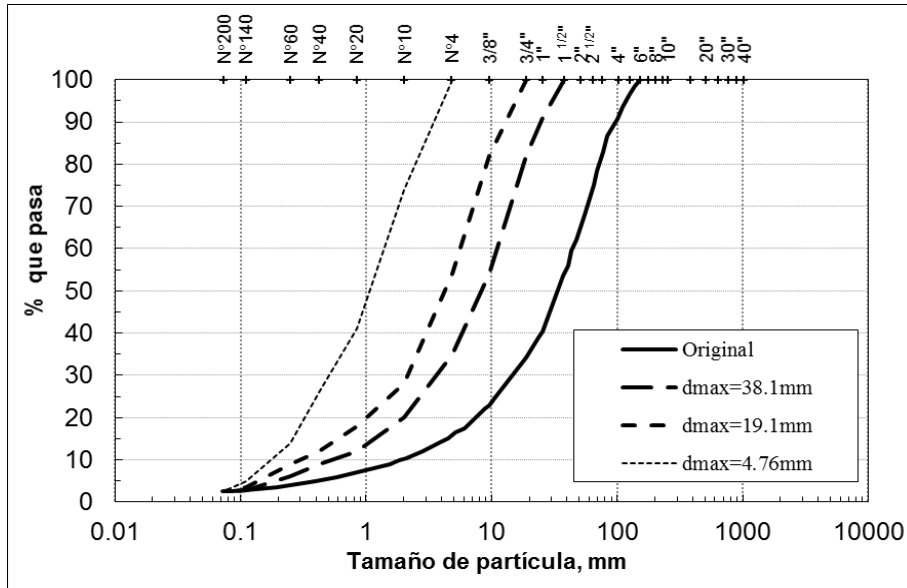
dmax (mm)	emin
4.76	0.471
19.1	0.339
38.1	0.308

dmax (mm)	emax
4.76	0.762
19.1	0.587
38.1	0.544



emin	0.226
emax	0.427

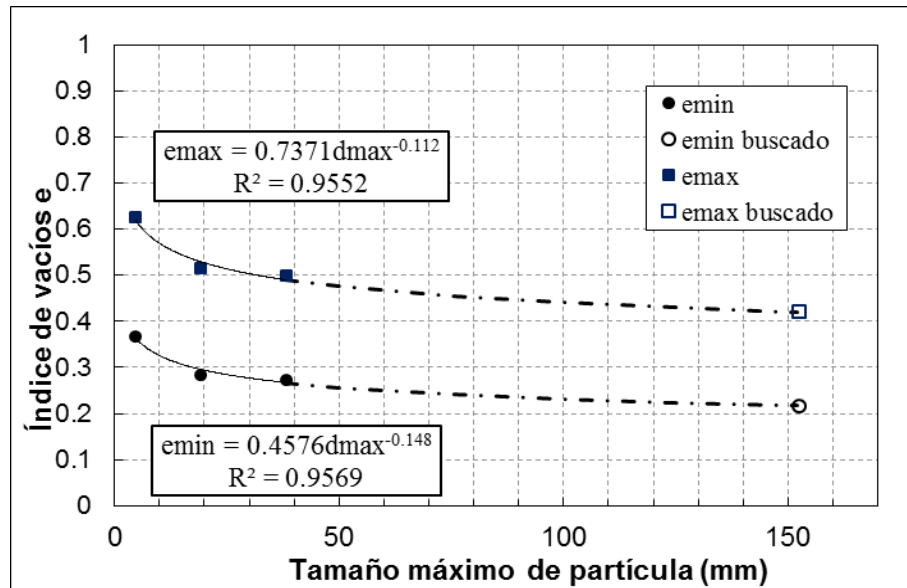
Muestra	Lastre M2 Pórfido
dmax [mm]	152.4
Referencia	Palma et al. 2009



dmax (mm)	Cu
4.76	8.3
19.1	19.3
38.1	22.0

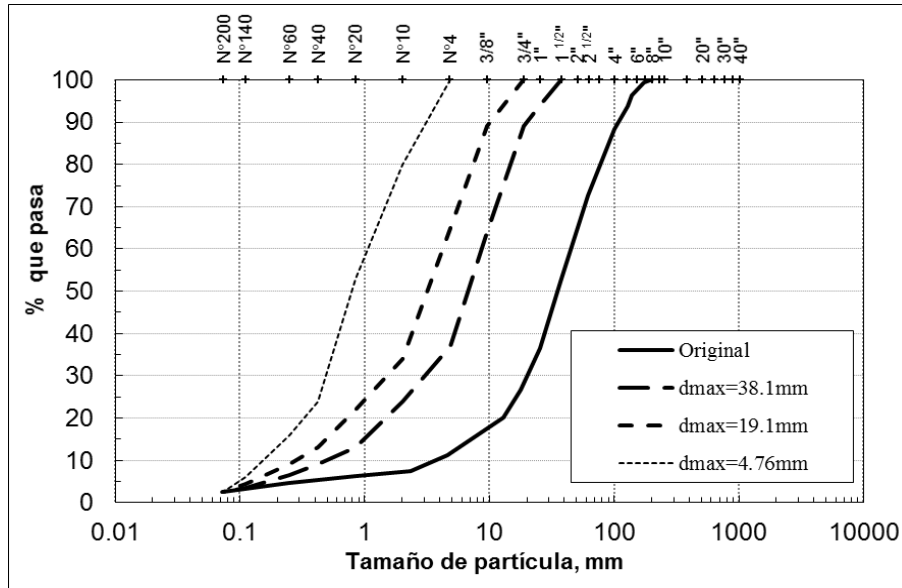
dmax (mm)	emin
4.76	0.368
19.1	0.285
38.1	0.274

dmax (mm)	emax
4.76	0.625
19.1	0.514
38.1	0.499



emin	0.217
emax	0.420

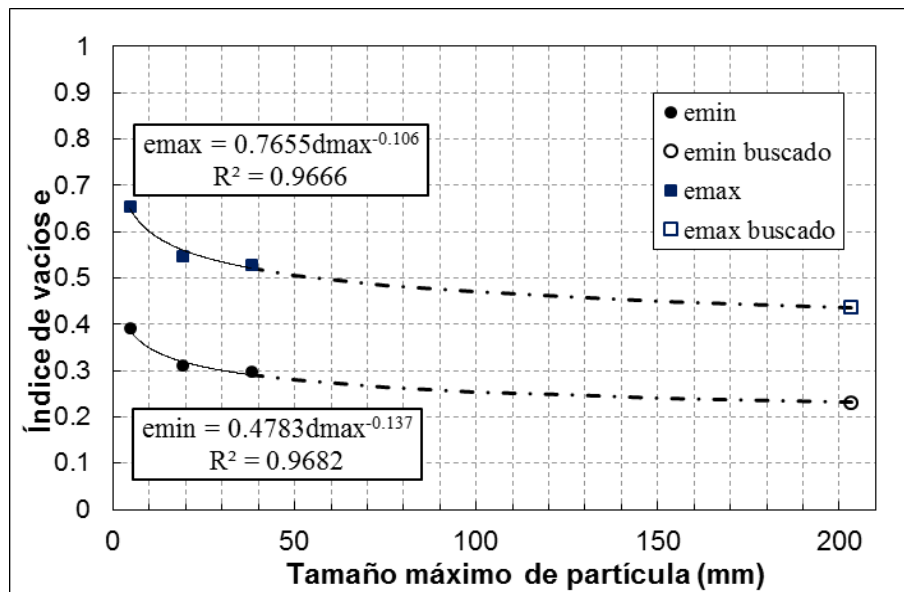
Muestra	Lastre ROM
dmax [mm]	203.2
Referencia	Bard et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	6.9
19.1	14.7
38.1	17.0

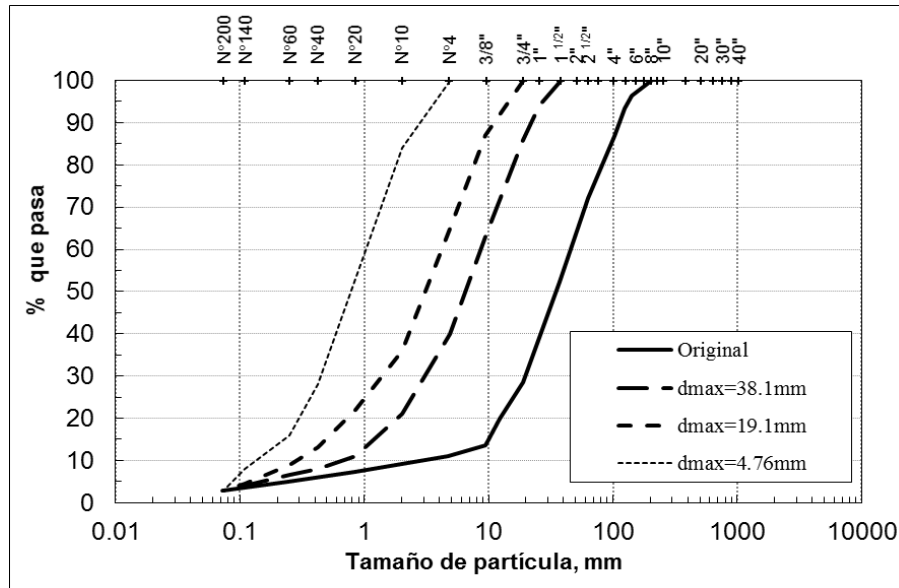
dmax (mm)	emin
4.76	0.390
19.1	0.310
38.1	0.296

dmax (mm)	emax
4.76	0.654
19.1	0.547
38.1	0.529



emin	0.231
emax	0.436

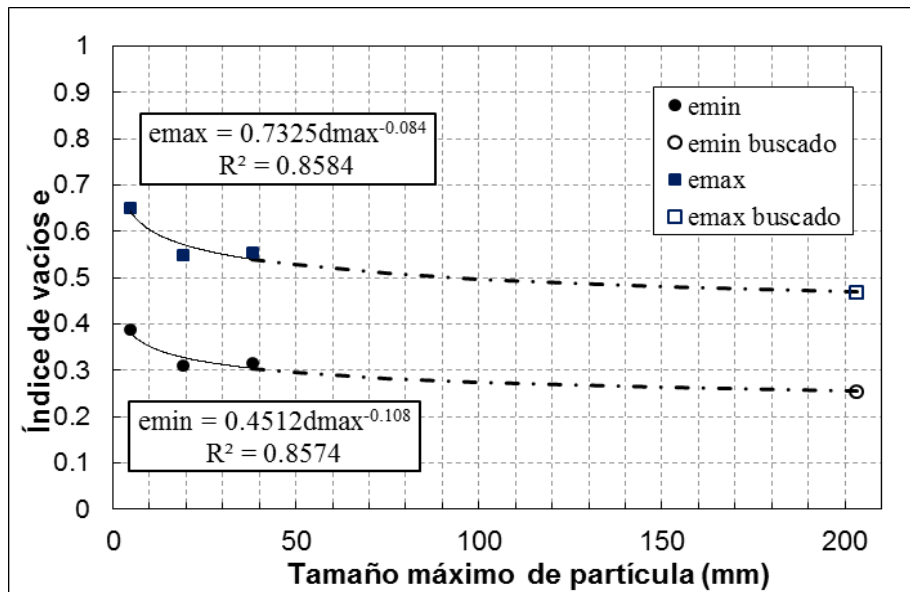
Muestra	Lastre Lixiviado H8
dmax [mm]	203.2
Referencia	Bard et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	7.0
19.1	14.5
38.1	13.8

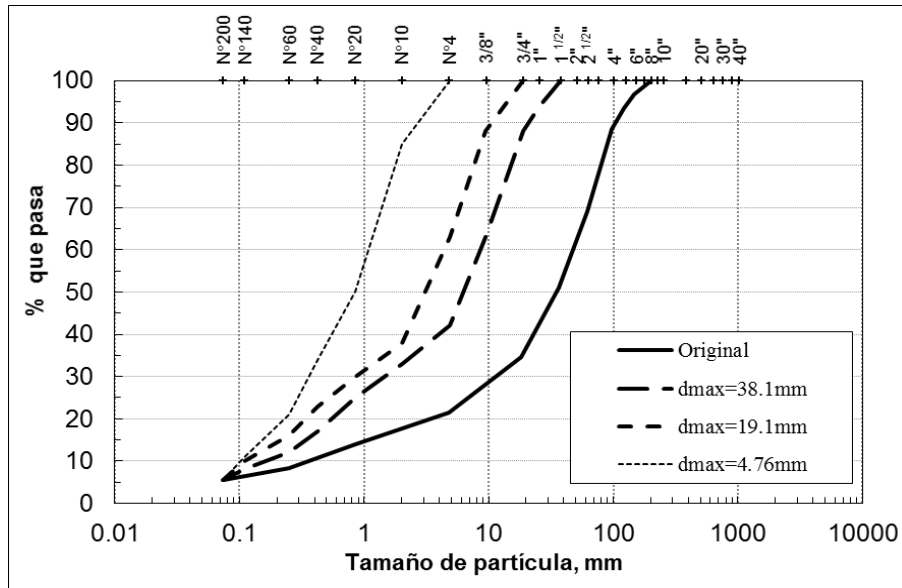
dmax (mm)	emin
4.76	0.388
19.1	0.311
38.1	0.315

dmax (mm)	emax
4.76	0.651
19.1	0.549
38.1	0.555



emin	0.254
emax	0.469

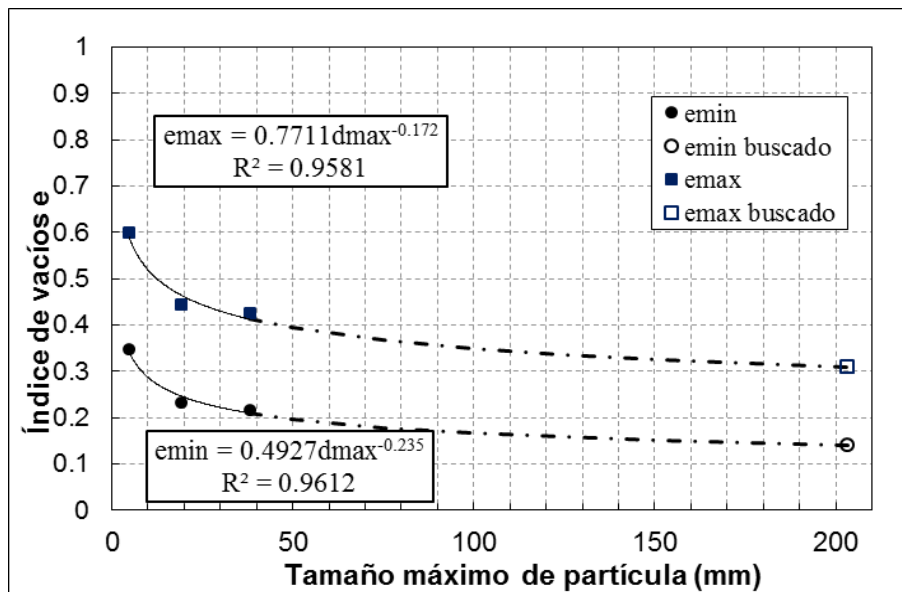
Muestra	Lastre Lixiviado C8
dmax [mm]	203.2
Referencia	Bard et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	10.0
19.1	37.5
38.1	46.8

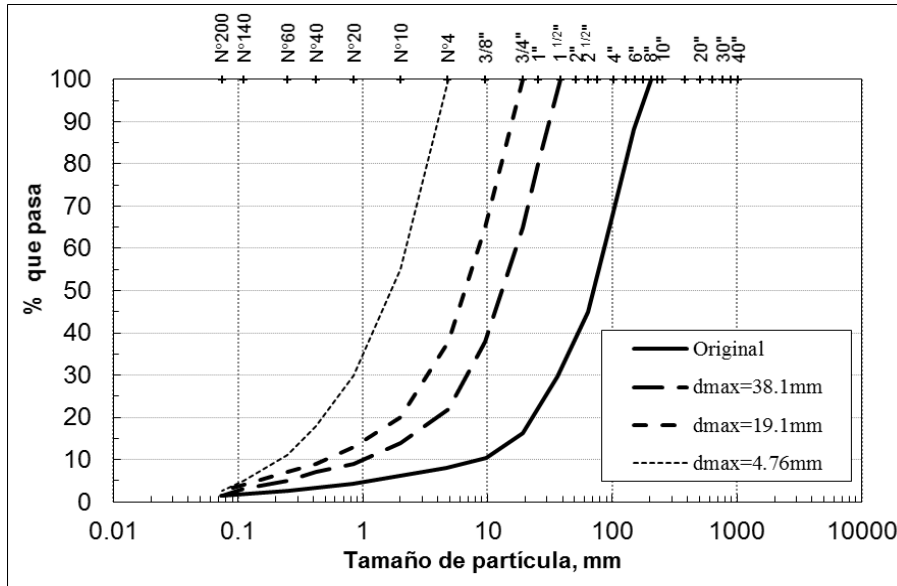
dmax (mm)	emin
4.76	0.348
19.1	0.233
38.1	0.218

dmax (mm)	emax
4.76	0.598
19.1	0.445
38.1	0.425



emin	0.141
emax	0.309

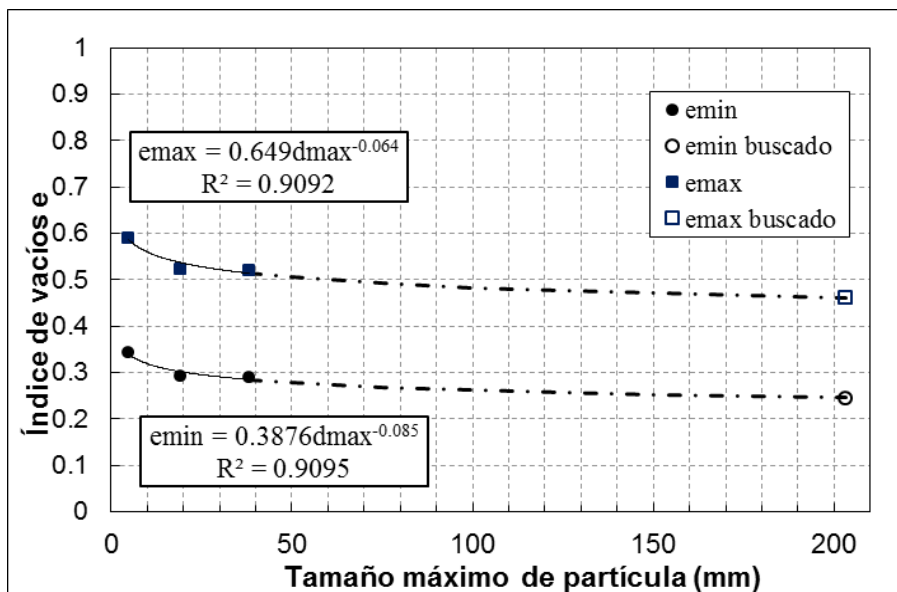
Muestra	Lastre ROM Chancado
dmax [mm]	203.2
Referencia	Bard et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	10.5
19.1	17.7
38.1	18.0

dmax (mm)	emin
4.76	0.343
19.1	0.293
38.1	0.291

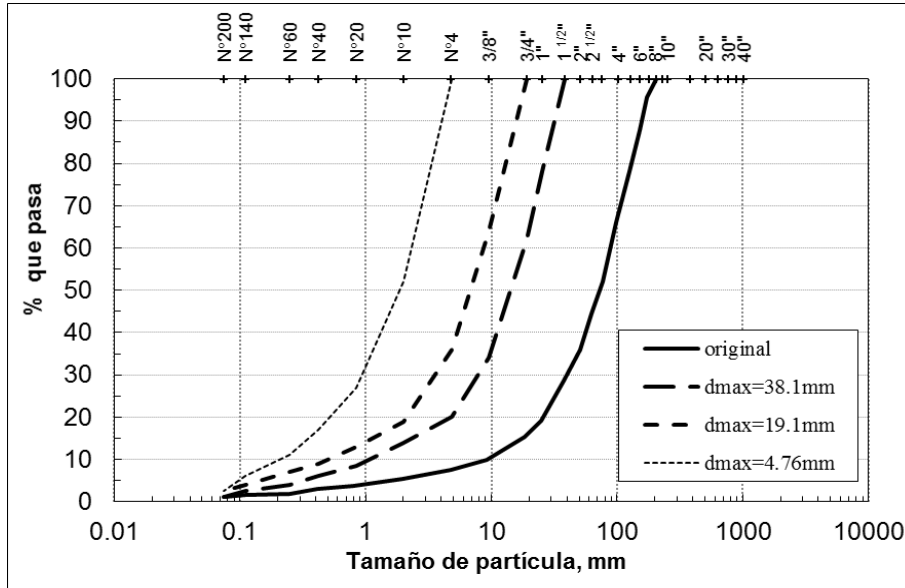
dmax (mm)	emax
4.76	0.592
19.1	0.524
38.1	0.522



emin	0.246
emax	0.462



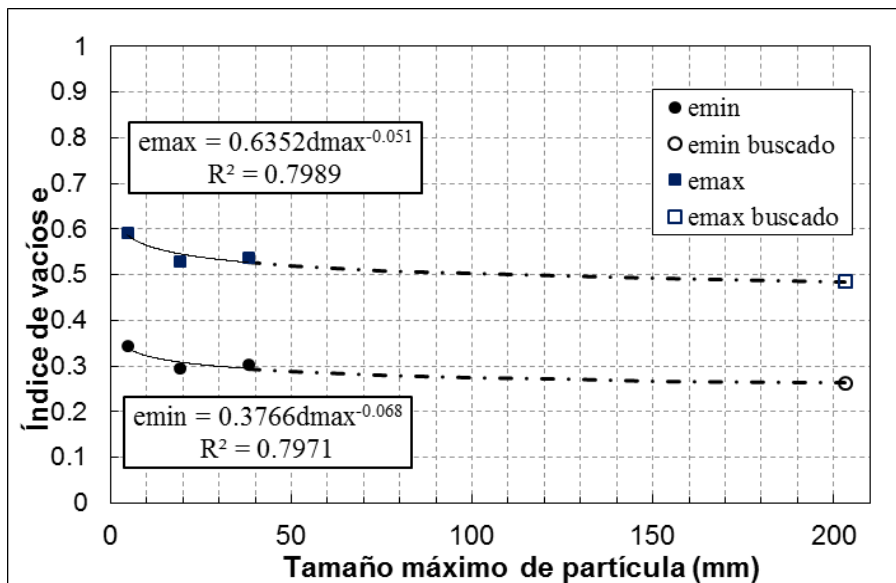
Muestra	Lastre CAD Parallel psd
dmax [mm]	203.2
Referencia	Linero et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	10.4
19.1	17.0
38.1	15.8

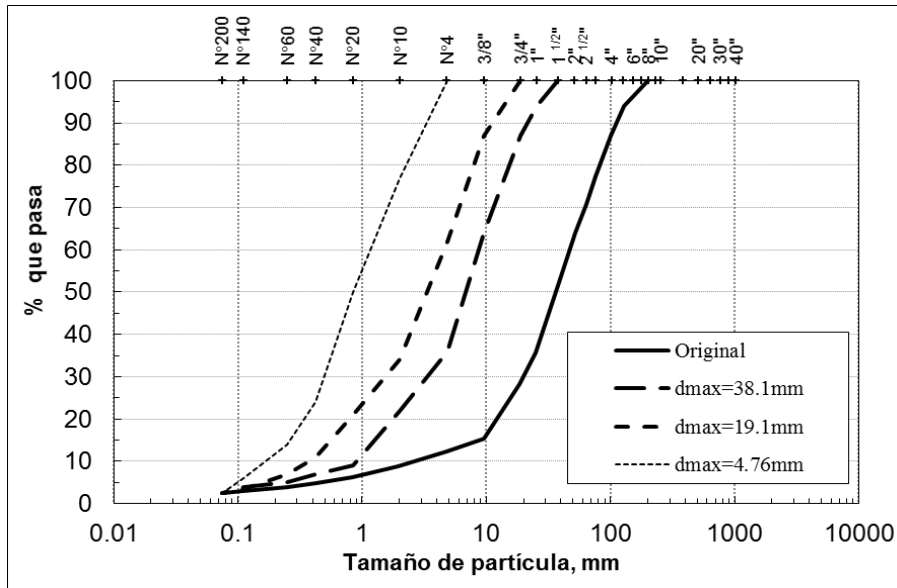
dmax (mm)	emin
4.76	0.344
19.1	0.296
38.1	0.303

dmax (mm)	emax
4.76	0.592
19.1	0.529
38.1	0.538



emin	0.262
emax	0.484

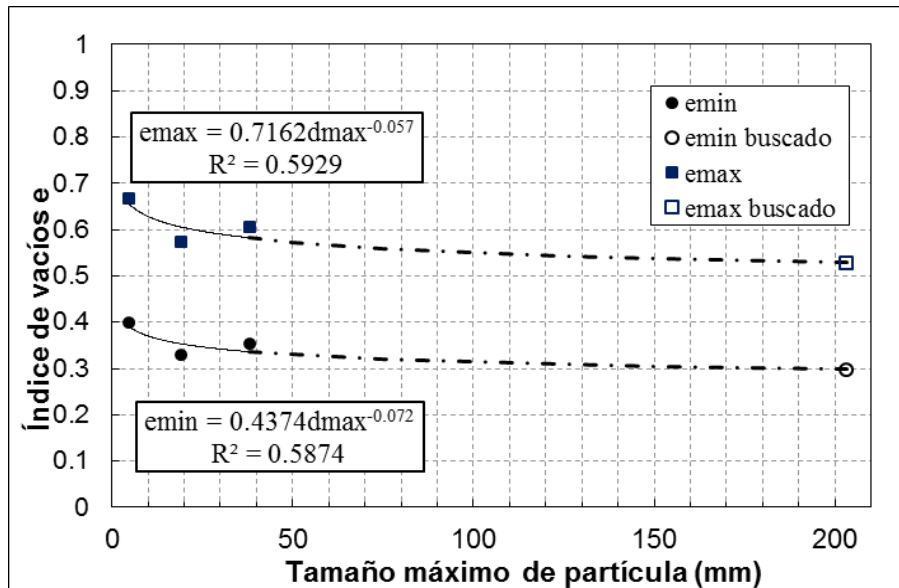
Muestra	Lastre truncated psd
dmax [mm]	203.2
Referencia	Linero et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	6.3
19.1	12.1
38.1	9.6

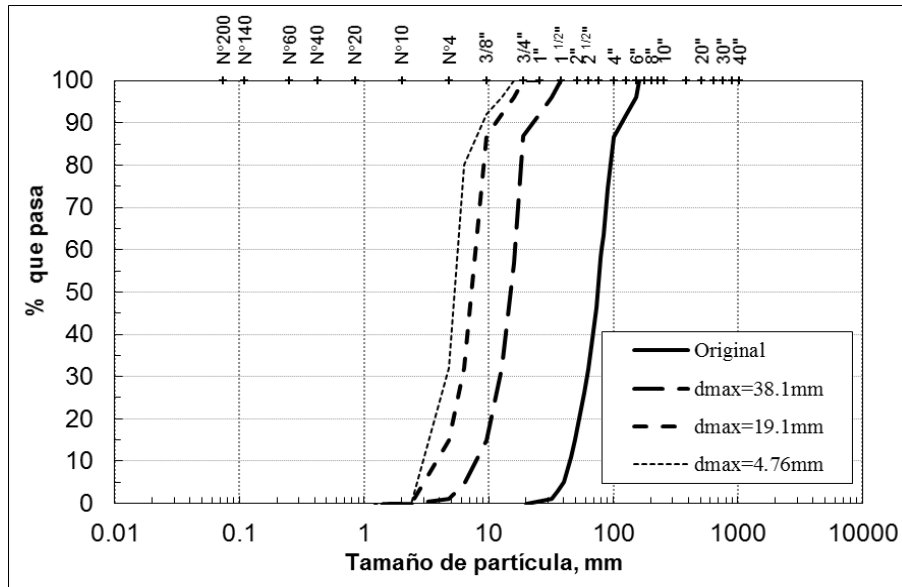
dmax (mm)	emin
4.76	0.400
19.1	0.328
38.1	0.353

dmax (mm)	emax
4.76	0.668
19.1	0.572
38.1	0.605



emin	0.298
emax	0.529

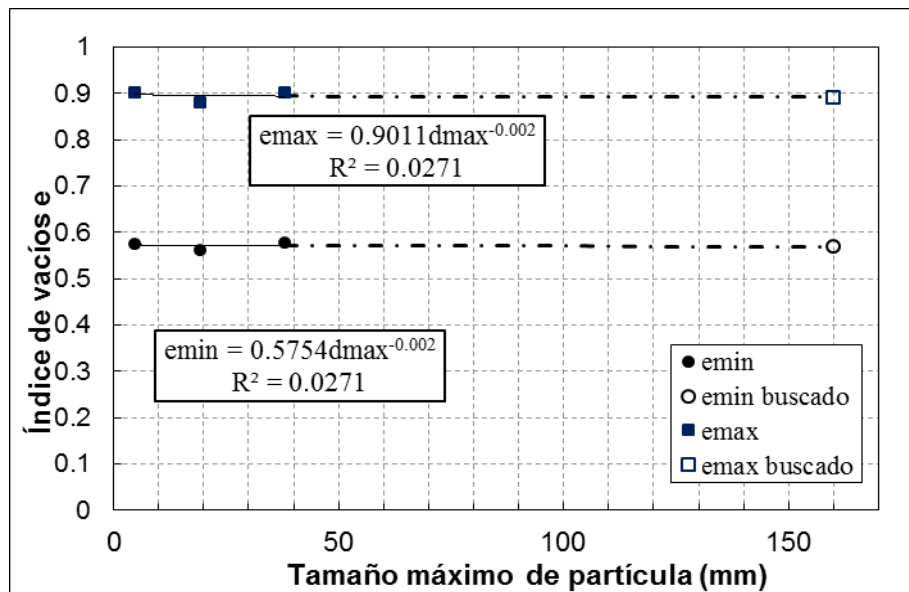
Muestra	Calcareous Rockfill from Prefontaines (CP)
dmax [mm]	160
Referencia	Ovalle et al. 2013



dmax (mm)	Cu
4.76	1.9
19.1	2.1
38.1	1.9

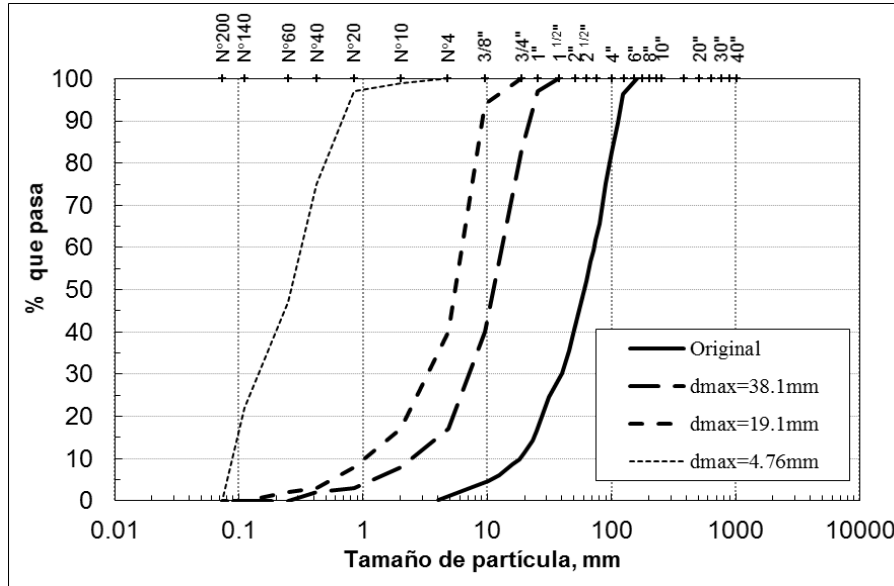
dmax (mm)	emin
4.76	0.577
19.1	0.561
38.1	0.577

dmax (mm)	emax
4.76	0.903
19.1	0.882
38.1	0.903



emin	0.570
emax	0.892

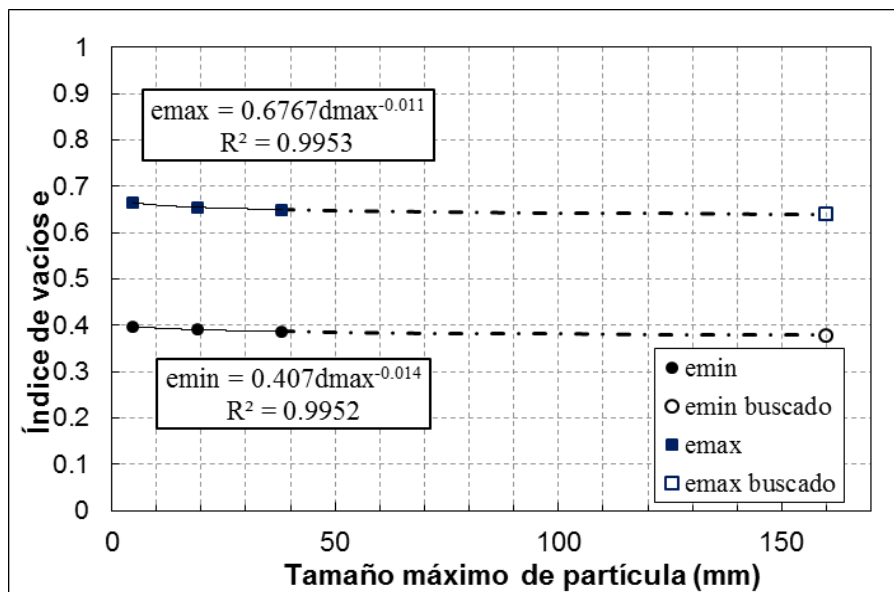
Muestra	Quartzite Shale Rockfill Trois Vallées (STV)
dmax [mm]	160
Referencia	Ovalle et al. 2013



dmax (mm)	Cu
4.76	6.4
19.1	6.8
38.1	7.1

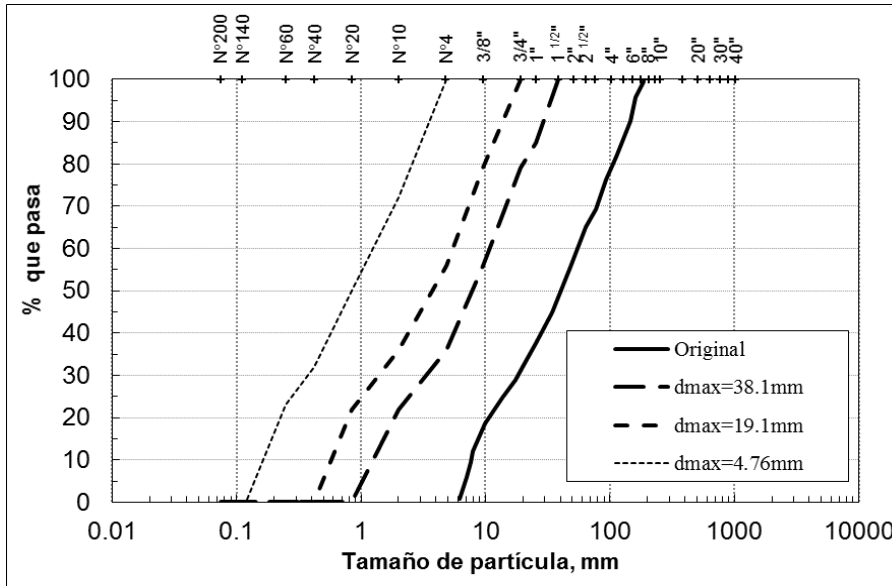
dmax (mm)	emin
4.76	0.398
19.1	0.391
38.1	0.386

dmax (mm)	emax
4.76	0.665
19.1	0.656
38.1	0.649



emin	0.379
emax	0.640

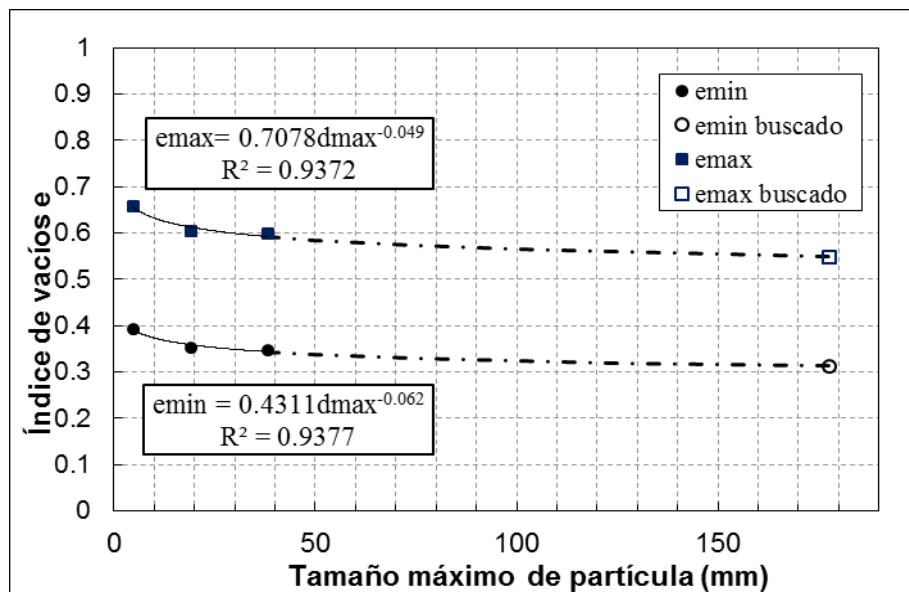
Muestra	Gran. A (Caliza, Arena y Grava La Angostura, Filita Chivor)
dmax [mm]	177.8
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	6.7
19.1	9.6
38.1	10.0

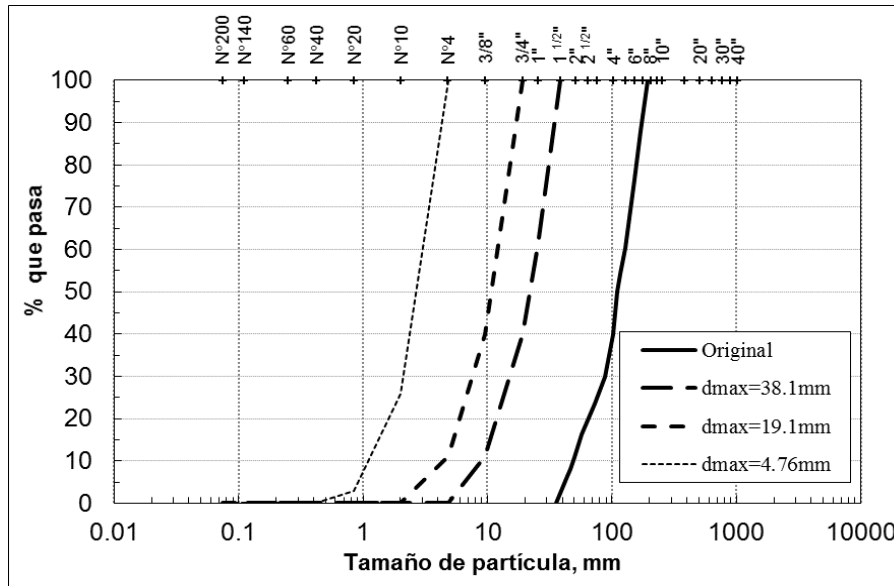
dmax (mm)	emin
4.76	0.394
19.1	0.352
38.1	0.348

dmax (mm)	emax
4.76	0.659
19.1	0.603
38.1	0.598



emin	0.313
emax	0.549

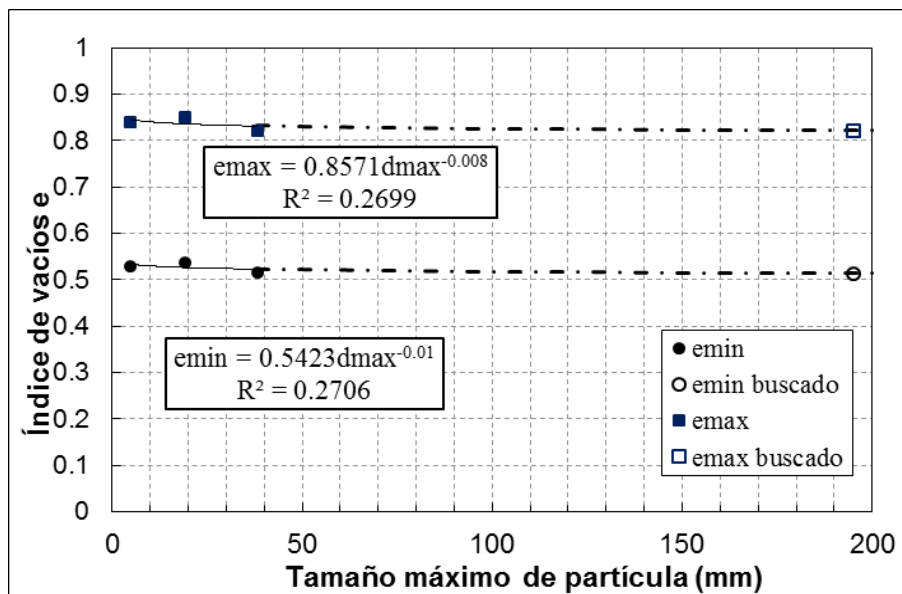
Muestra	Gran. B (Caliza, Arena y Grava La Angostura, Filita Chivor)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	2.5
19.1	2.4
38.1	2.7

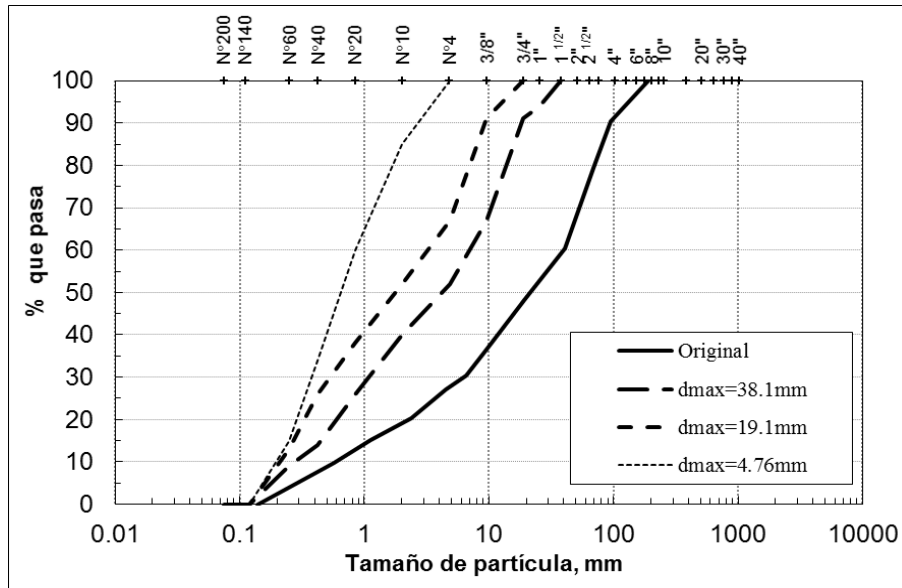
dmax (mm)	emin
4.76	0.530
19.1	0.537
38.1	0.516

dmax (mm)	emax
4.76	0.841
19.1	0.850
38.1	0.822



emin	0.514
emax	0.821

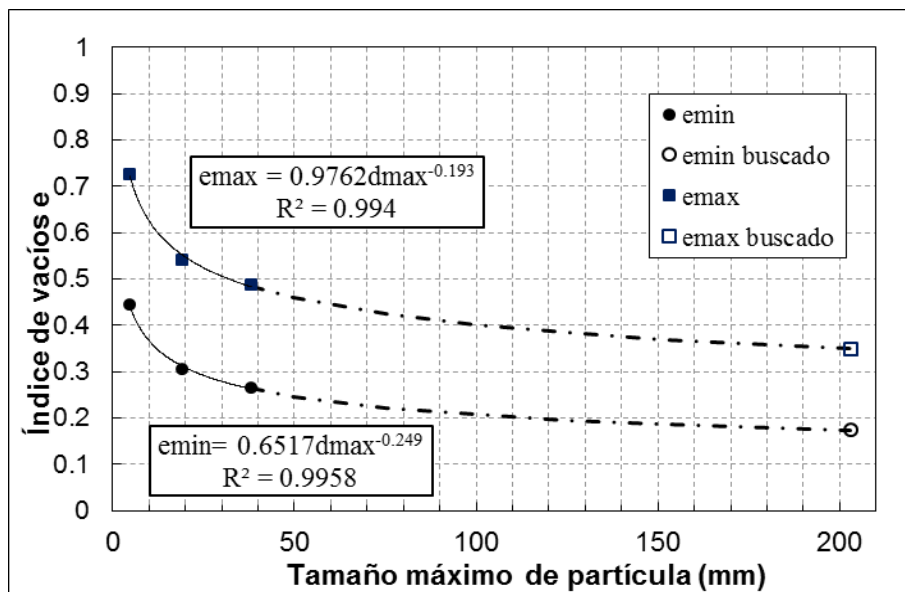
Muestra	Gran. C (Filita Chivor, Toba de Las Piedras)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	4.5
19.1	15.2
38.1	24.1

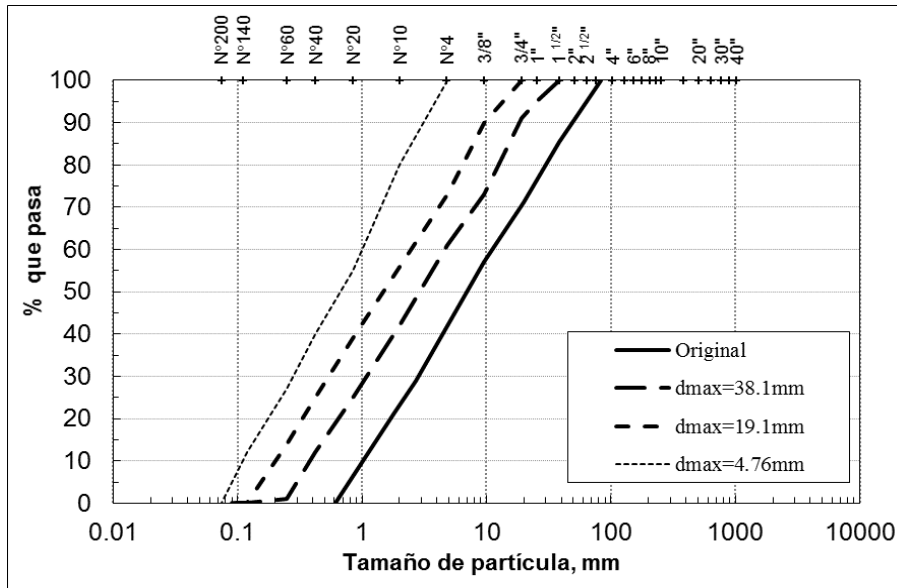
dmax (mm)	emin
4.76	0.444
19.1	0.306
38.1	0.266

dmax (mm)	emax
4.76	0.727
19.1	0.543
38.1	0.489



$e_{min}$	0.174
$e_{max}$	0.350

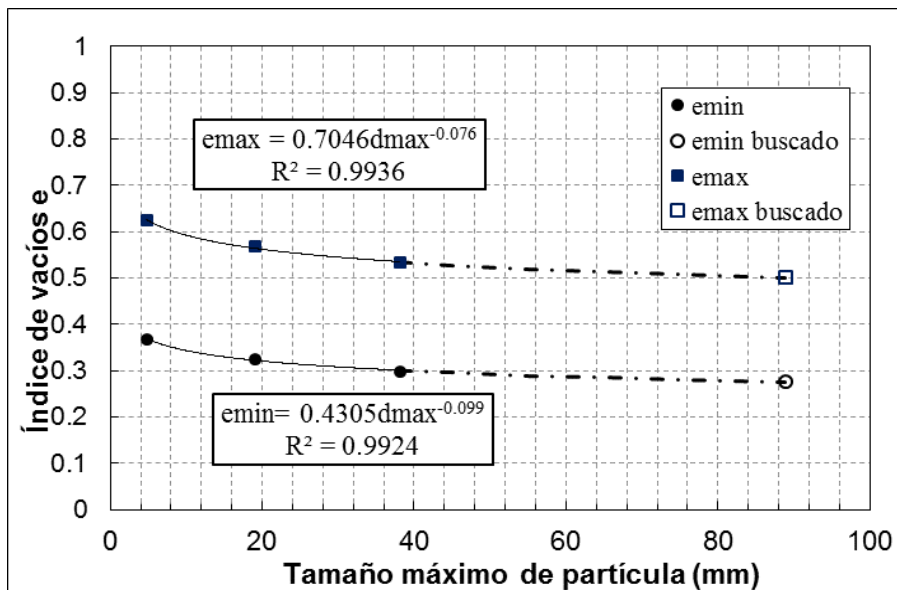
Muestra	Basalto de San Francisco granulometría 1
dmax [mm]	88.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	8.3
19.1	12.5
38.1	16.6

dmax (mm)	emin
4.76	0.368
19.1	0.325
38.1	0.299

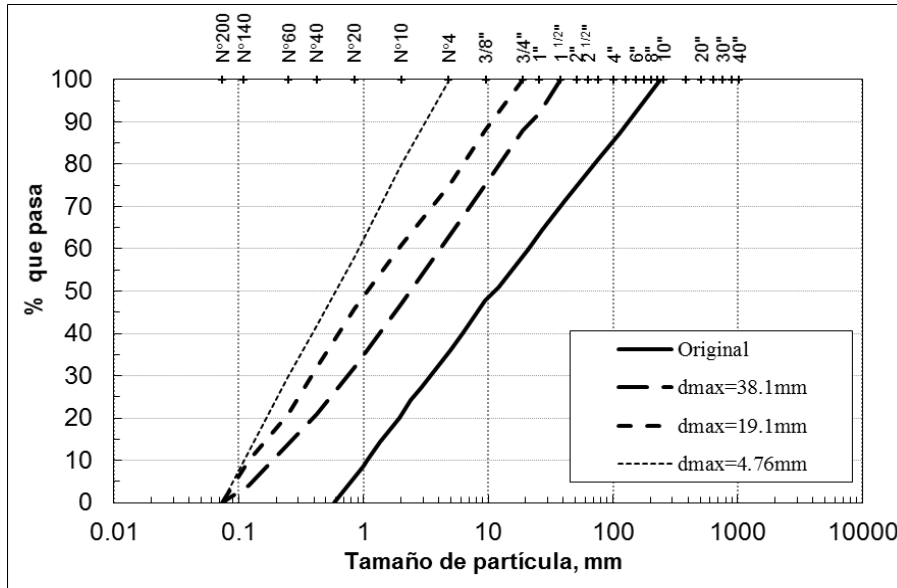
dmax (mm)	emax
4.76	0.625
19.1	0.568
38.1	0.532



emin	0.276
emax	0.501



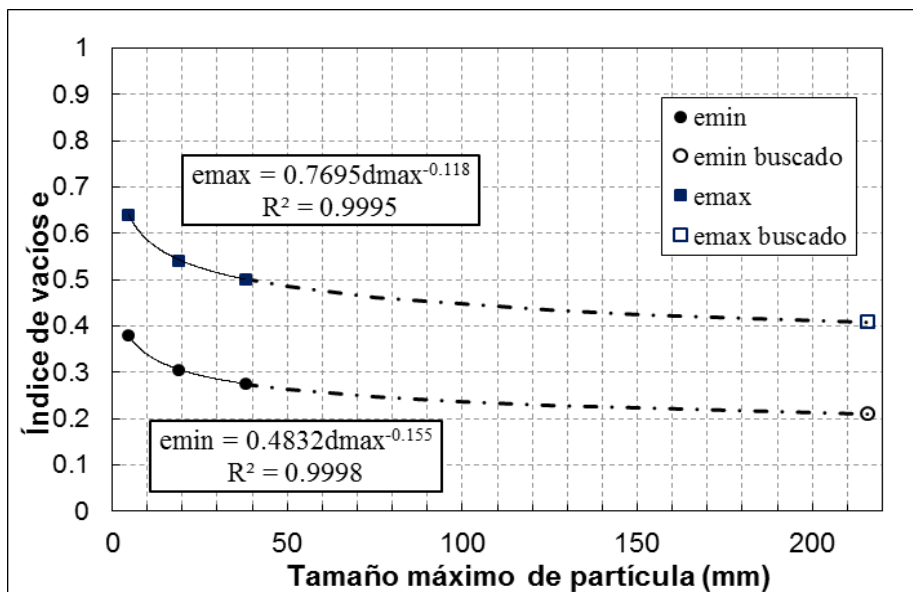
Muestra	Basalto San Francisco granulometría 2
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	7.5
19.1	15.4
38.1	21.6

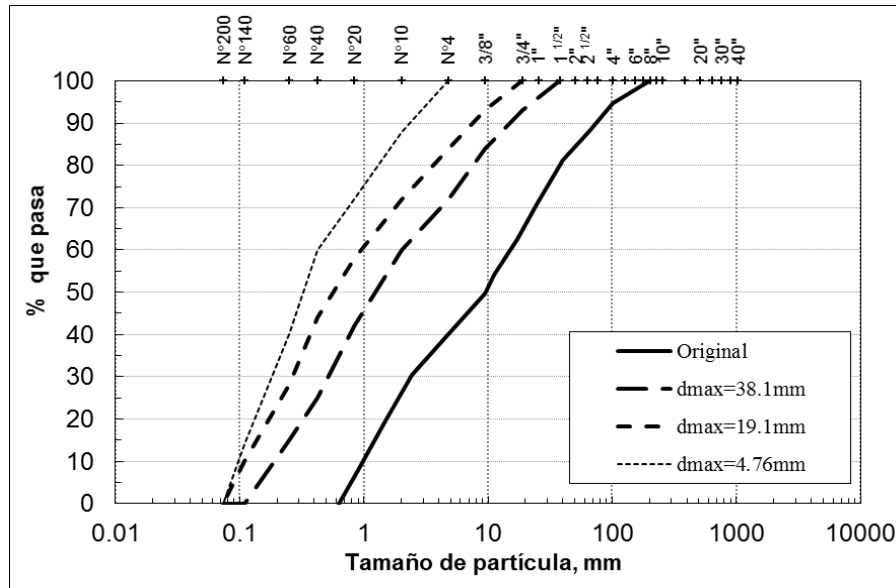
dmax (mm)	emin
4.76	0.380
19.1	0.305
38.1	0.275

dmax (mm)	emax
4.76	0.641
19.1	0.541
38.1	0.502



emin	0.210
emax	0.408

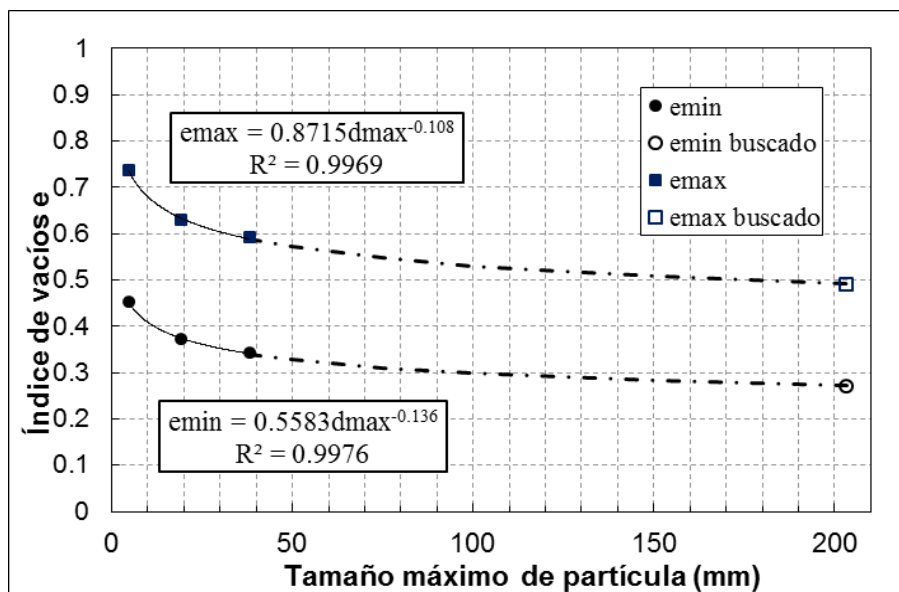
Muestra	Grava La Angostura granulometría natural
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	4.2
19.1	8.1
38.1	10.5

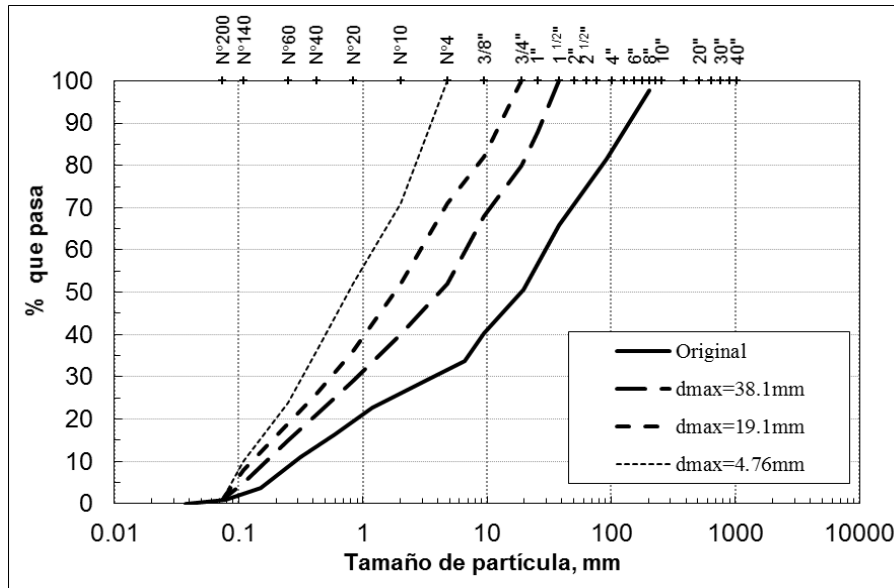
dmax (mm)	emin
4.76	0.453
19.1	0.371
38.1	0.343

dmax (mm)	emax
4.76	0.738
19.1	0.629
38.1	0.591



emin	0.271
emax	0.491

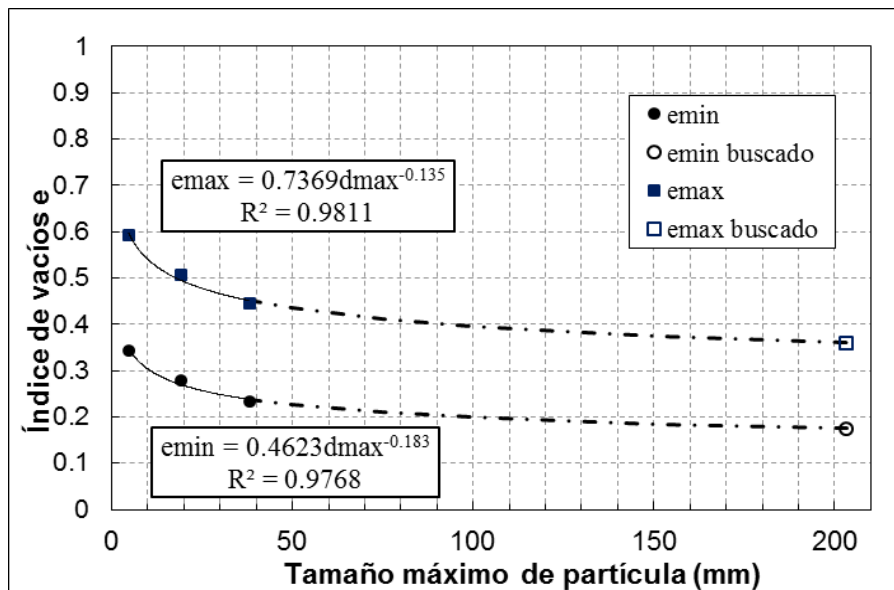
Muestra	Grava Pinzandarán
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	10.4
19.1	20.7
38.1	37.8

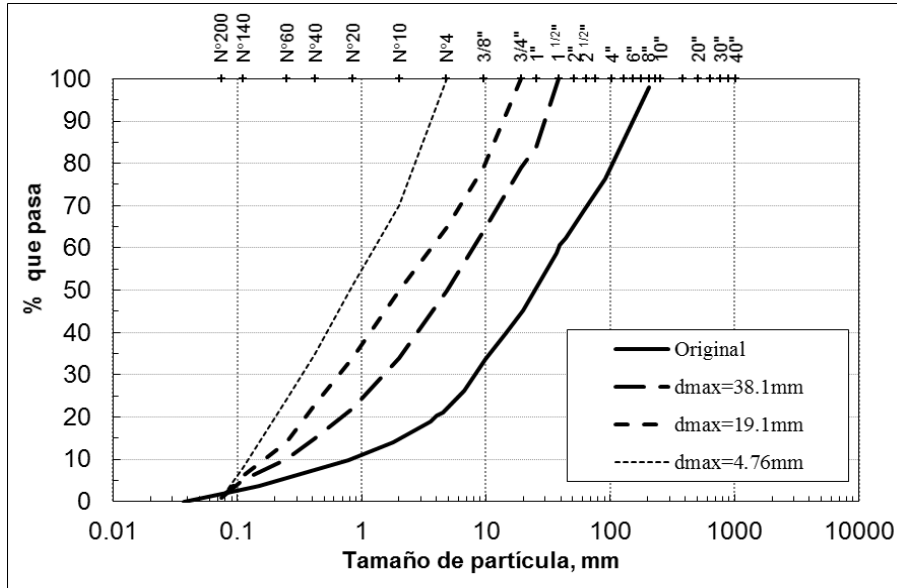
dmax (mm)	emin
4.76	0.344
19.1	0.279
38.1	0.232

dmax (mm)	emax
4.76	0.593
19.1	0.506
38.1	0.444



emin	0.175
emax	0.360

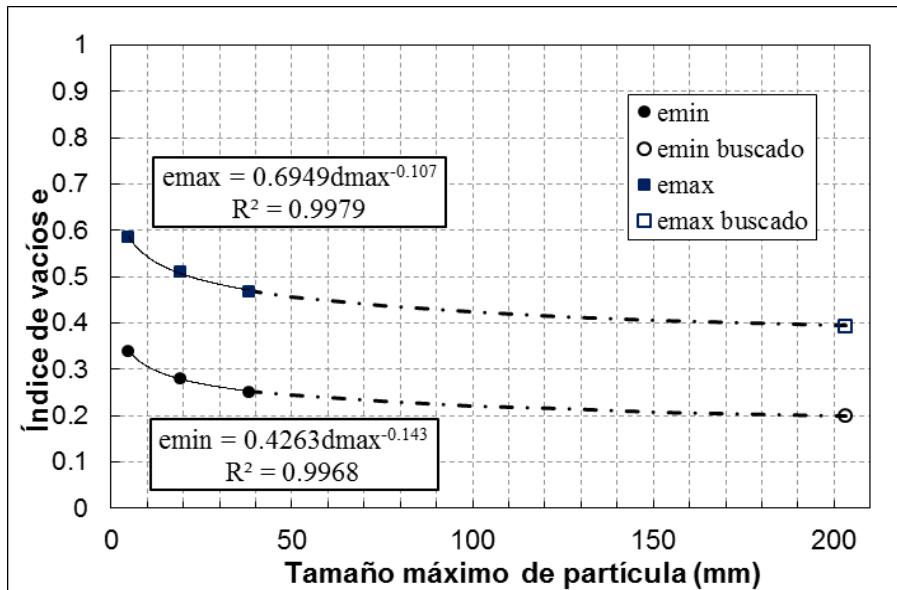
Muestra	Conglomerado de Malpaso
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	10.8
19.1	20.0
38.1	29.2

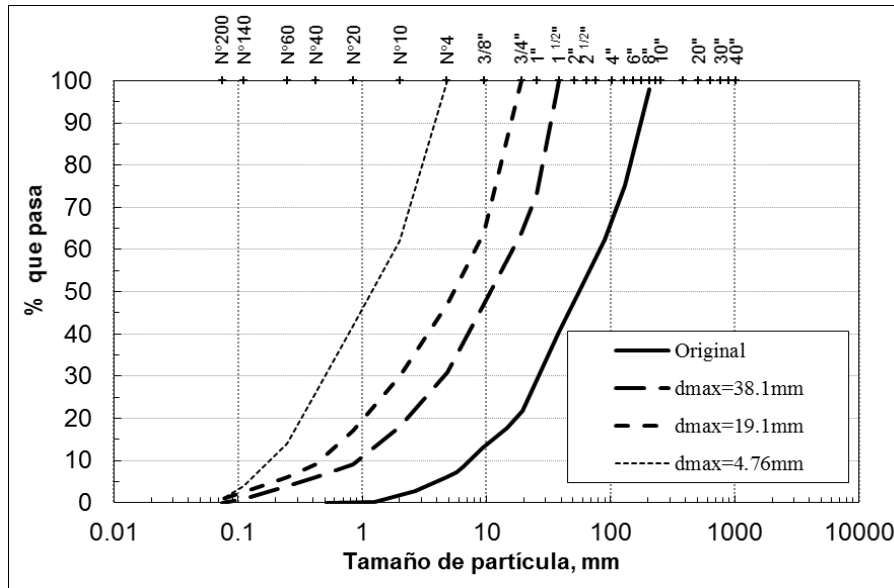
dmax (mm)	emin
4.76	0.340
19.1	0.282
38.1	0.251

dmax (mm)	emax
4.76	0.587
19.1	0.510
38.1	0.469



emin	0.199
emax	0.394

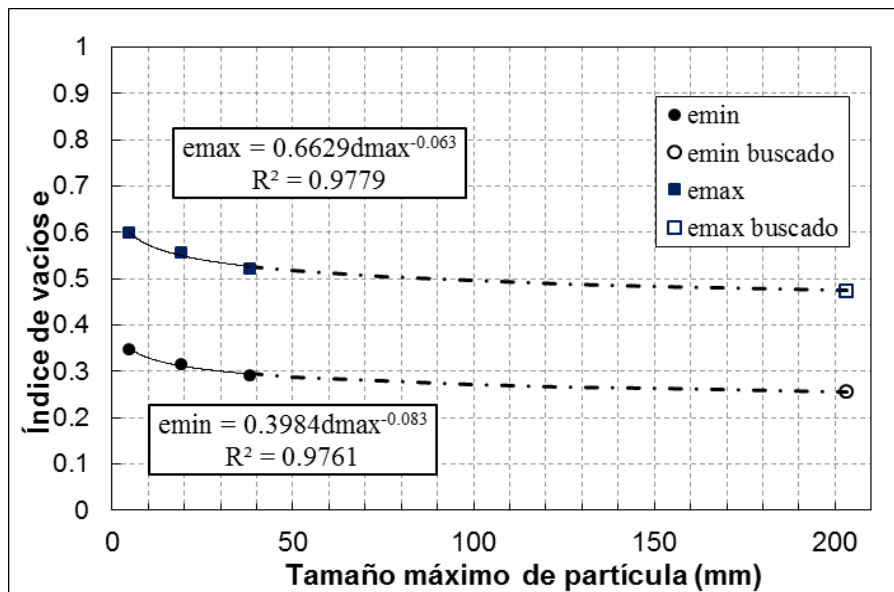
Muestra	Conglomerado Silicificado El Infiernillo
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	10.0
19.1	13.7
38.1	18.0

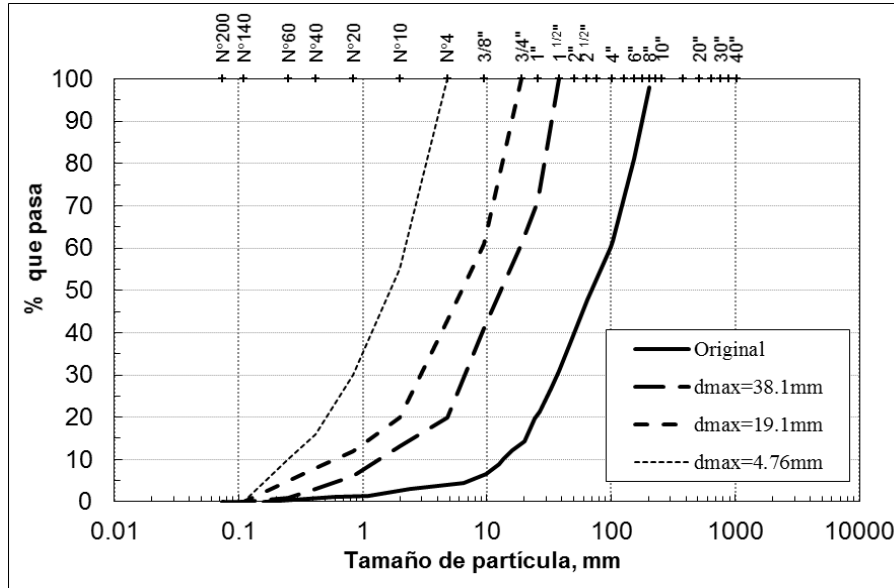
dmax (mm)	emin
4.76	0.348
19.1	0.316
38.1	0.291

dmax (mm)	emax
4.76	0.598
19.1	0.556
38.1	0.522



emin	0.256
emax	0.474

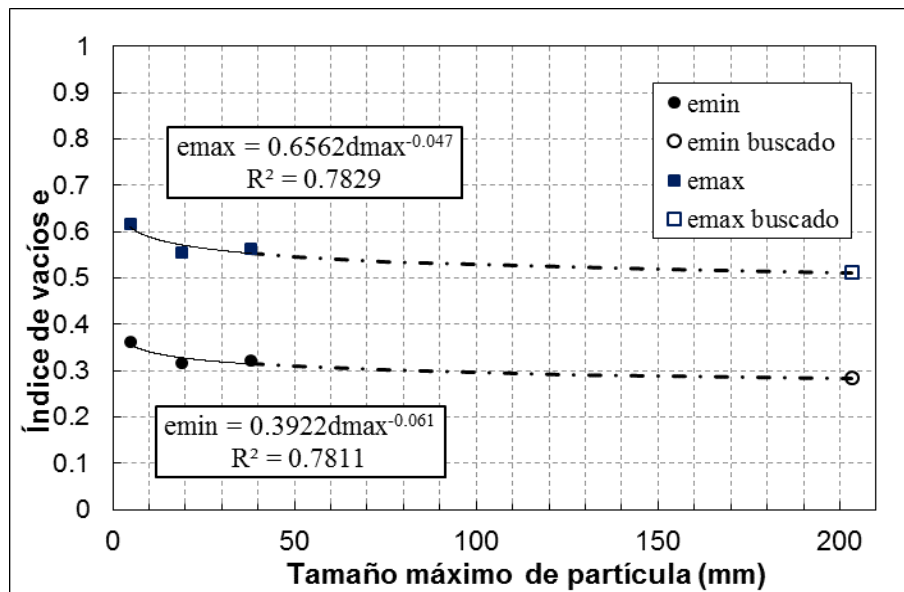
Muestra	Diorita de El Infiernillo
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	8.8
19.1	13.8
38.1	12.9

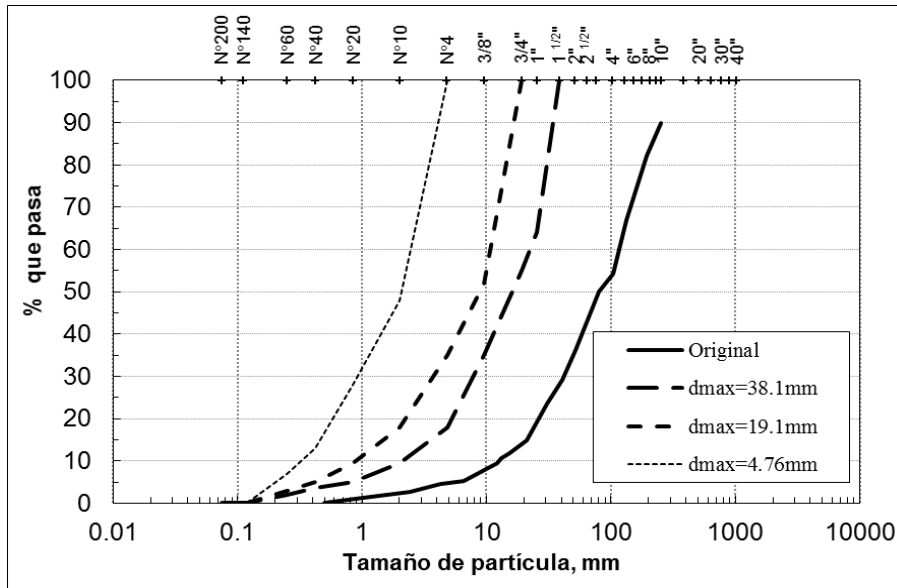
dmax (mm)	emin
4.76	0.361
19.1	0.315
38.1	0.322

dmax (mm)	emax
4.76	0.616
19.1	0.555
38.1	0.564



emin	0.284
emax	0.511

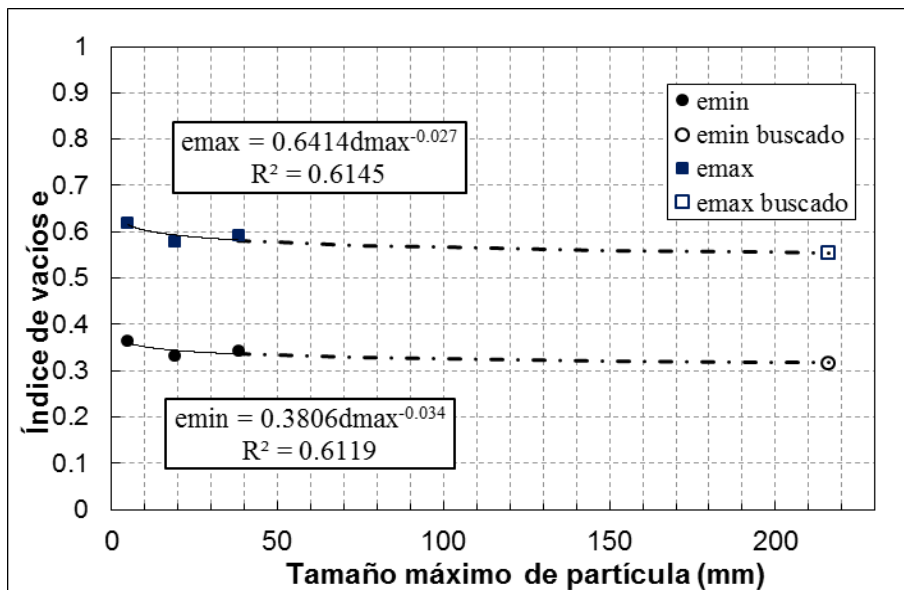
Muestra	Pizarra de El Granero granulometría A
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	8.6
19.1	11.6
38.1	10.5

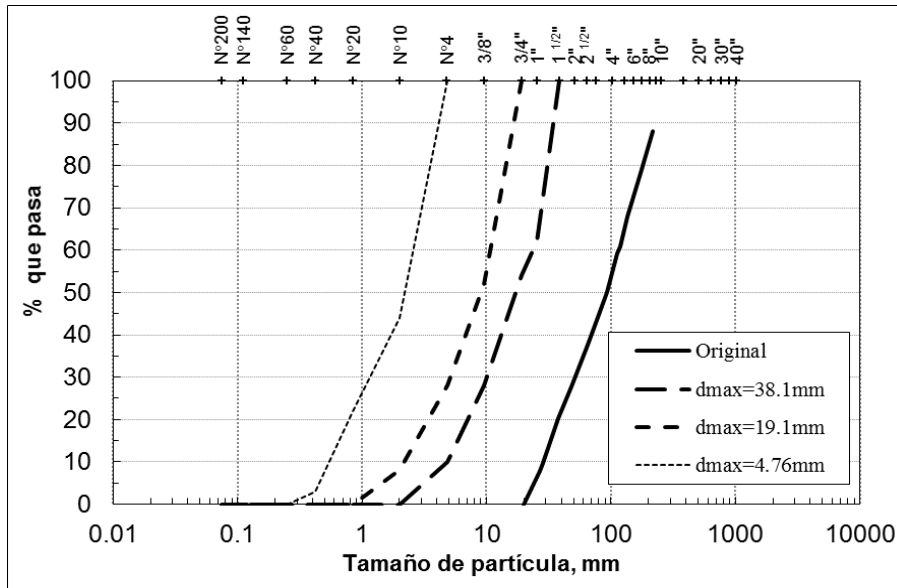
dmax (mm)	emin
4.76	0.365
19.1	0.333
38.1	0.343

dmax (mm)	emax
4.76	0.620
19.1	0.578
38.1	0.592



emin	0.317
emax	0.555

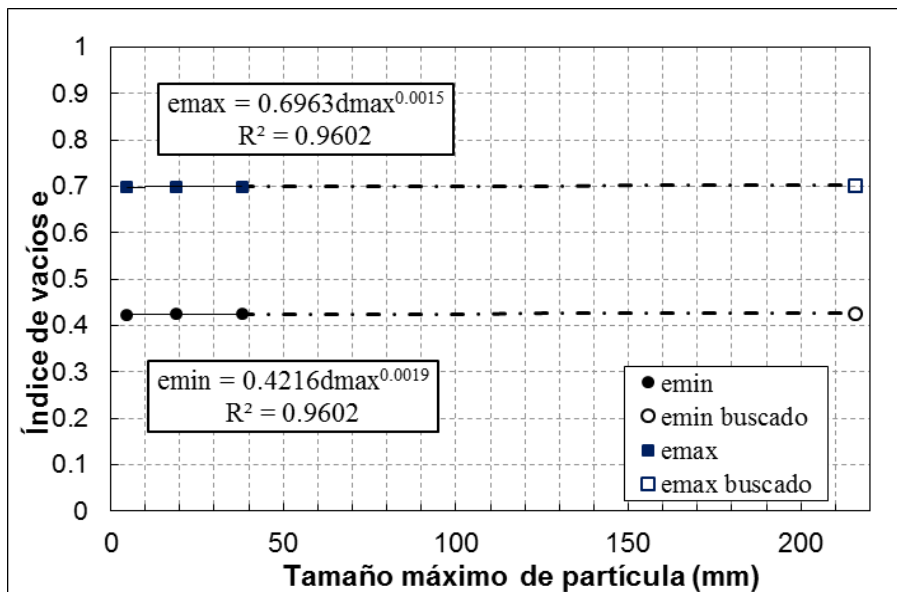
Muestra	Pizarra de El Granero granulometría B
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	5.3
19.1	5.2
38.1	5.2

dmax (mm)	emin
4.76	0.423
19.1	0.424
38.1	0.424

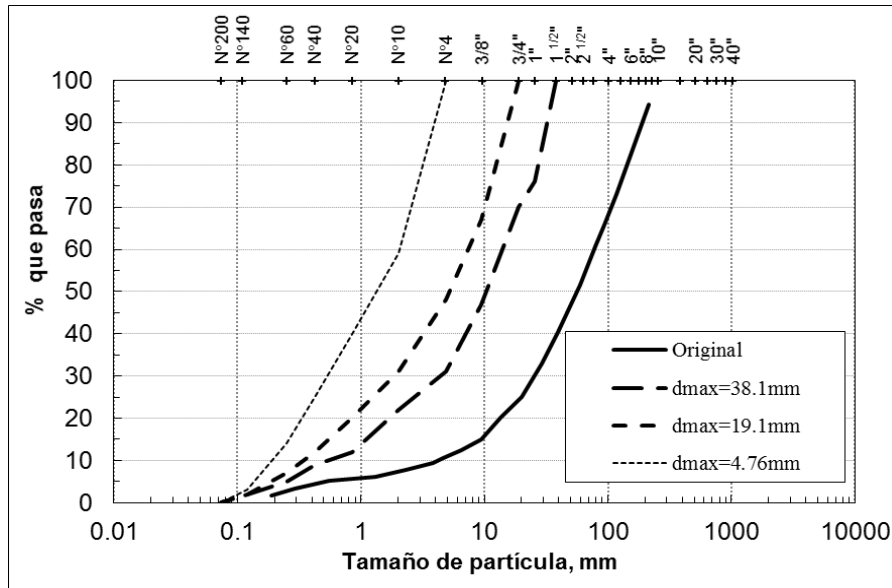
dmax (mm)	emax
4.76	0.698
19.1	0.700
38.1	0.700



emin	0.426
emax	0.702



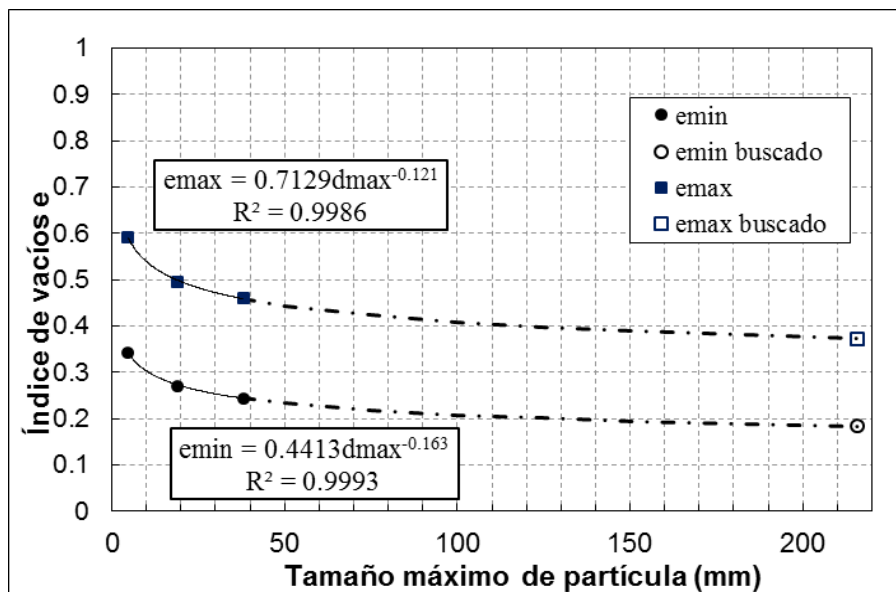
Muestra	Gneis granítico de Mica granulometría X
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	10.5
19.1	22.7
38.1	32.0

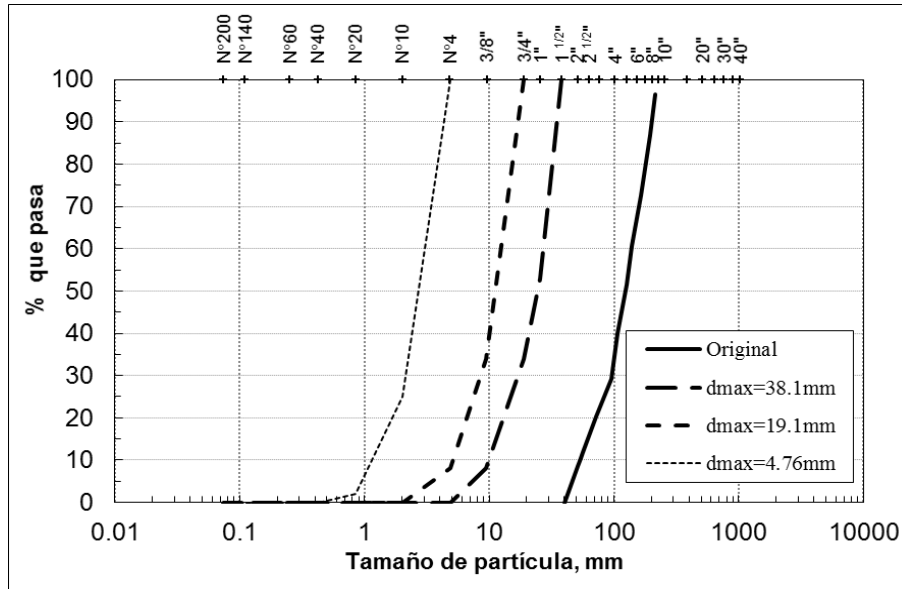
dmax (mm)	emin
4.76	0.343
19.1	0.271
38.1	0.244

dmax (mm)	emax
4.76	0.591
19.1	0.496
38.1	0.460



emin	0.184
emax	0.372

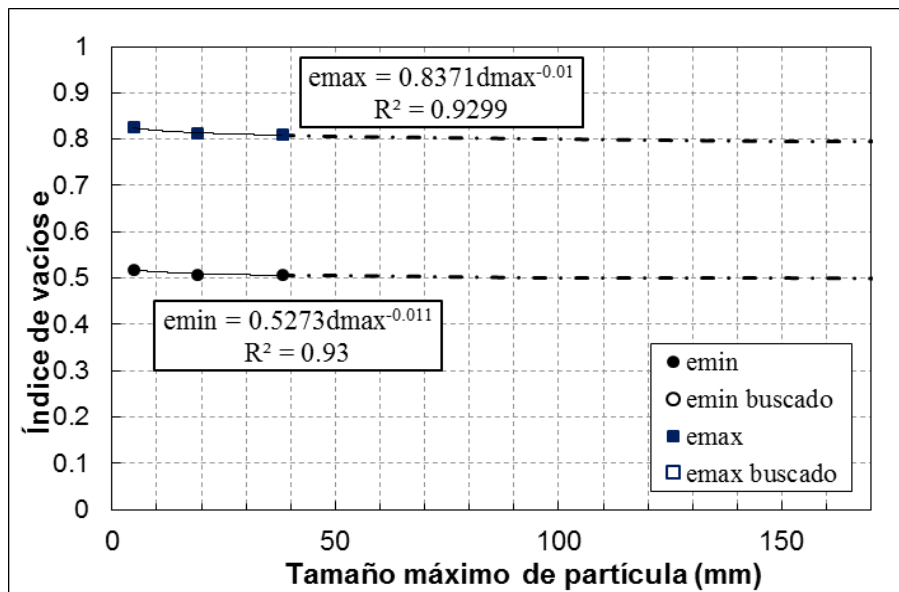
Muestra	Gneis granítico de Mica granulometría Y
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	2.7
19.1	2.9
38.1	2.9

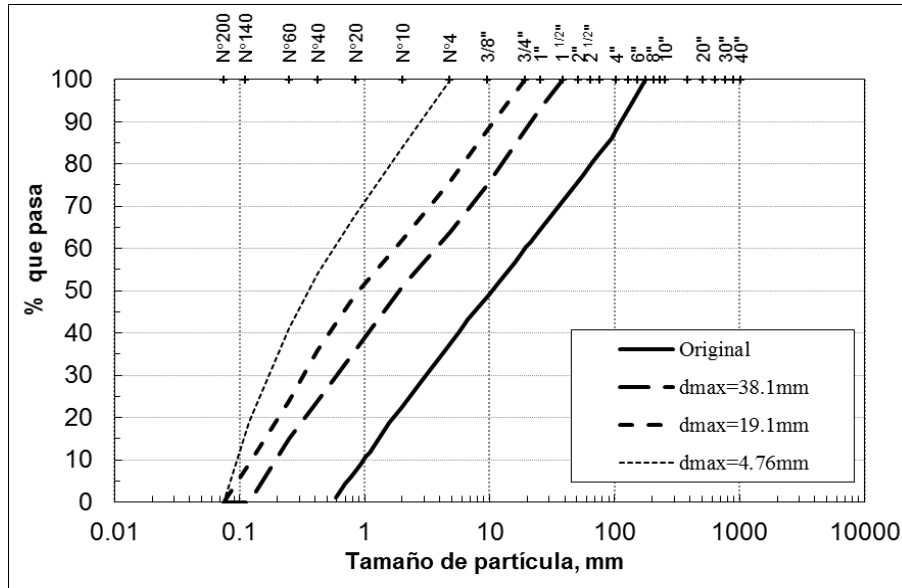
dmax (mm)	emin
4.76	0.519
19.1	0.508
38.1	0.507

dmax (mm)	emax
4.76	0.826
19.1	0.811
38.1	0.810



emin	0.497
emax	0.793

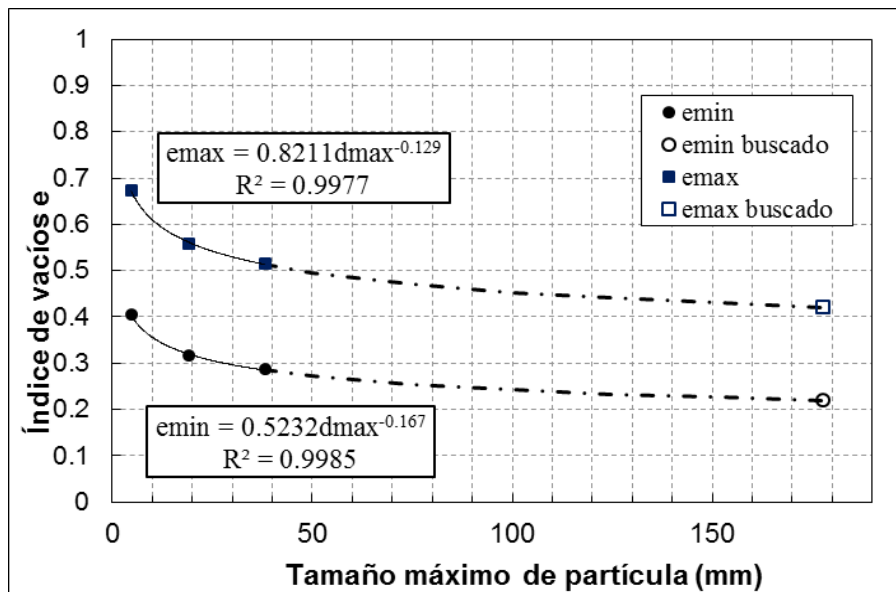
Muestra	Material 1 Basalto
dmax [mm]	177.8
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	6.1
19.1	13.6
38.1	19.0

dmax (mm)	emin
4.76	0.404
19.1	0.317
38.1	0.286

dmax (mm)	emax
4.76	0.673
19.1	0.557
38.1	0.516



emin	0.220
emax	0.421

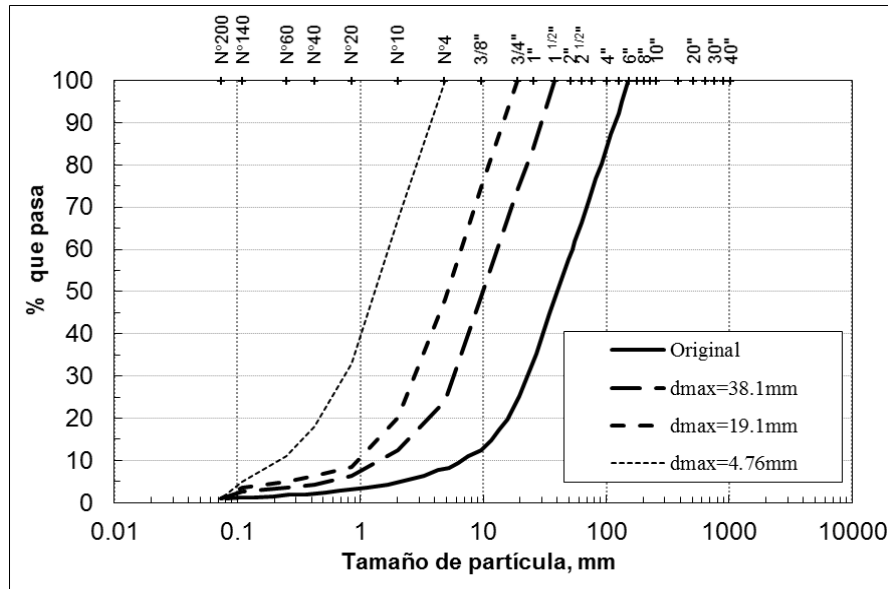
# **ANEXO C**

---

---

## **Uso de la Metodología Propuesta Ajuste con Forma de Partículas**

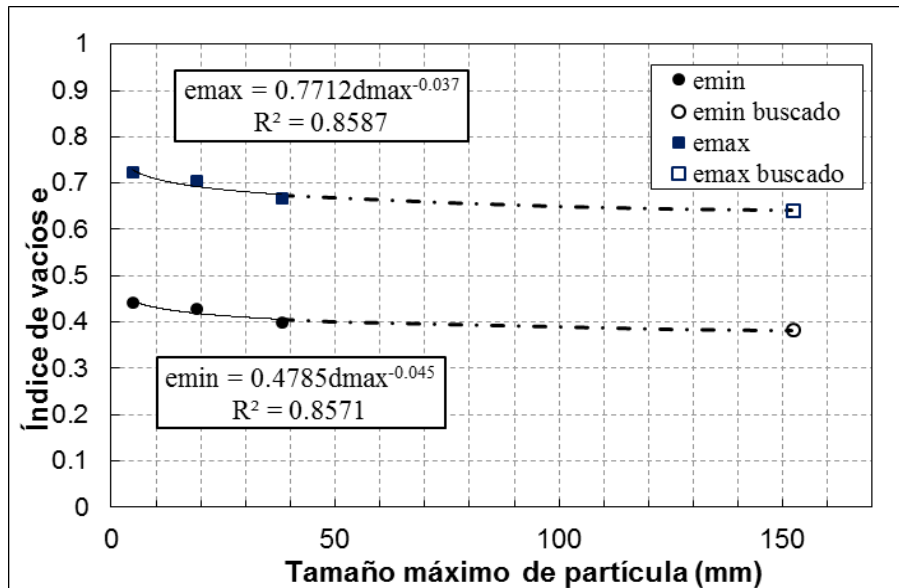
Muestra	Pyramid dam & Crushed basalt (sa-a)
dmax [mm]	152.4
Referencia	Marachi et al. 1969



dmax (mm)	Cu
4.76	6.7
19.1	7.4
38.1	9.3

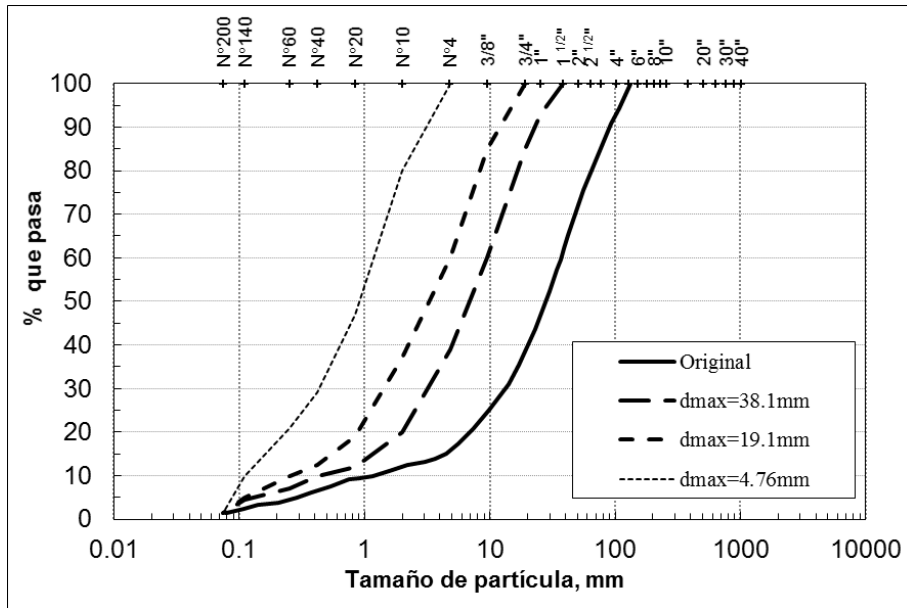
dmax (mm)	emin
4.76	0.443
19.1	0.428
38.1	0.400

dmax (mm)	emax
4.76	0.724
19.1	0.705
38.1	0.667



emin	0.382
emax	0.640

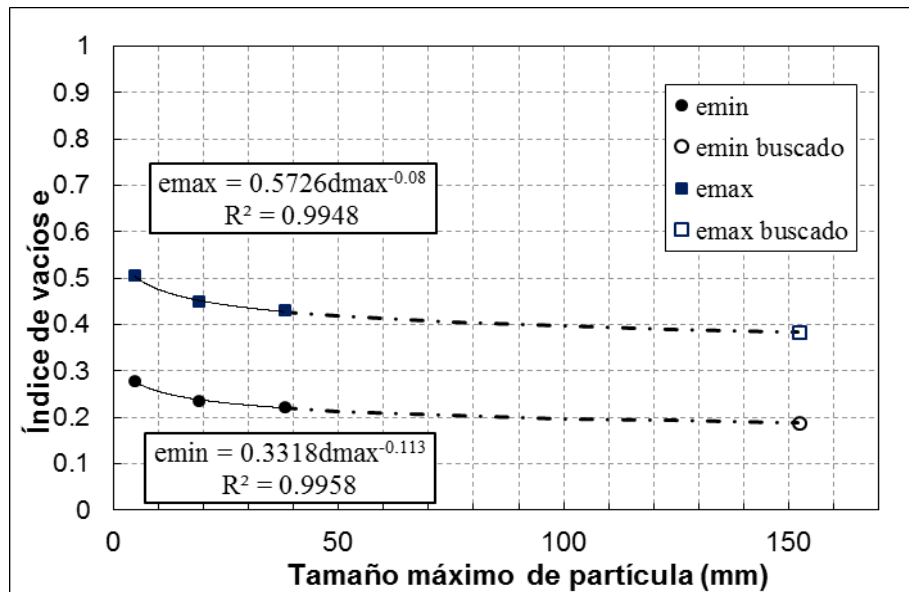
Muestra	Oroville dam (sr-r)
dmax [mm]	152.4
Referencia	Marachi et al. 1969



dmax (mm)	Cu
4.76	10.9
19.1	19.4
38.1	24.0

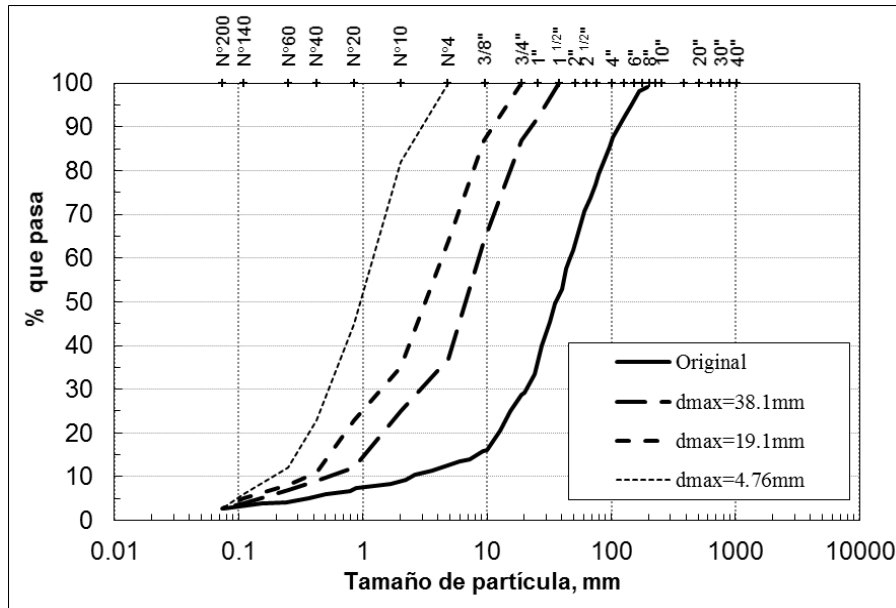
dmax (mm)	emin
4.76	0.279
19.1	0.236
38.1	0.221

dmax (mm)	emax
4.76	0.506
19.1	0.449
38.1	0.429



emin	0.188
emax	0.383

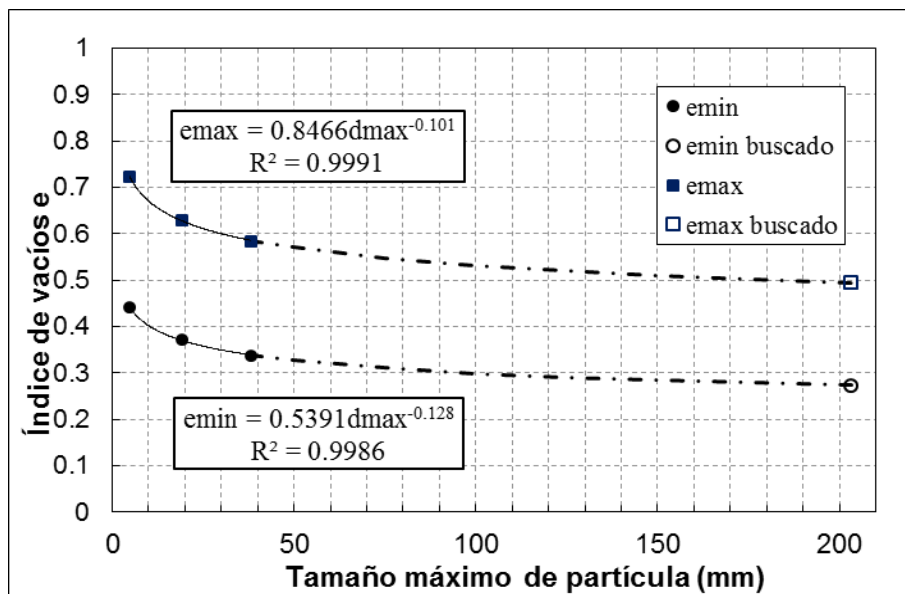
Muestra	Lastre natural y lixiviado (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Contreras 2011



dmax (mm)	Cu
4.76	6.8
19.1	11.8
38.1	16.4

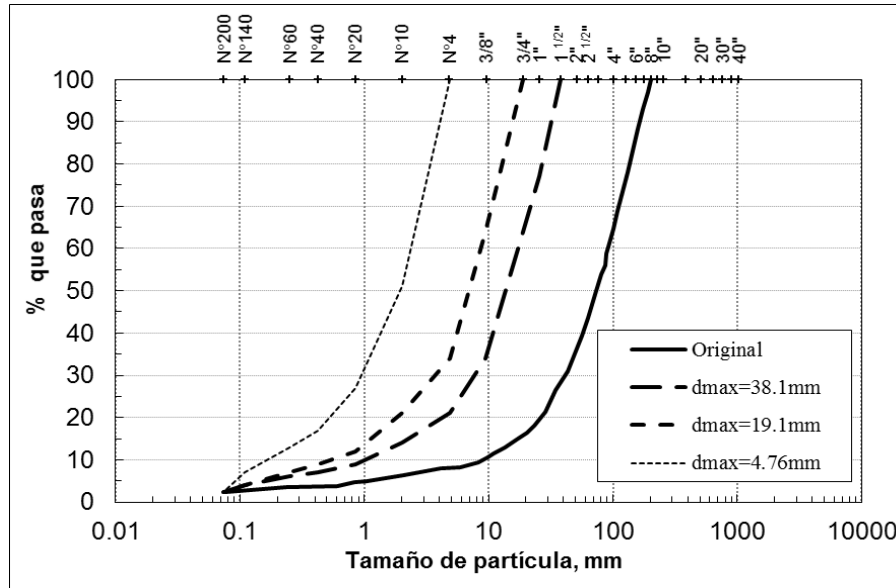
dmax (mm)	emin
4.76	0.441
19.1	0.372
38.1	0.337

dmax (mm)	emax
4.76	0.722
19.1	0.630
38.1	0.584



emin	0.273
emax	0.495

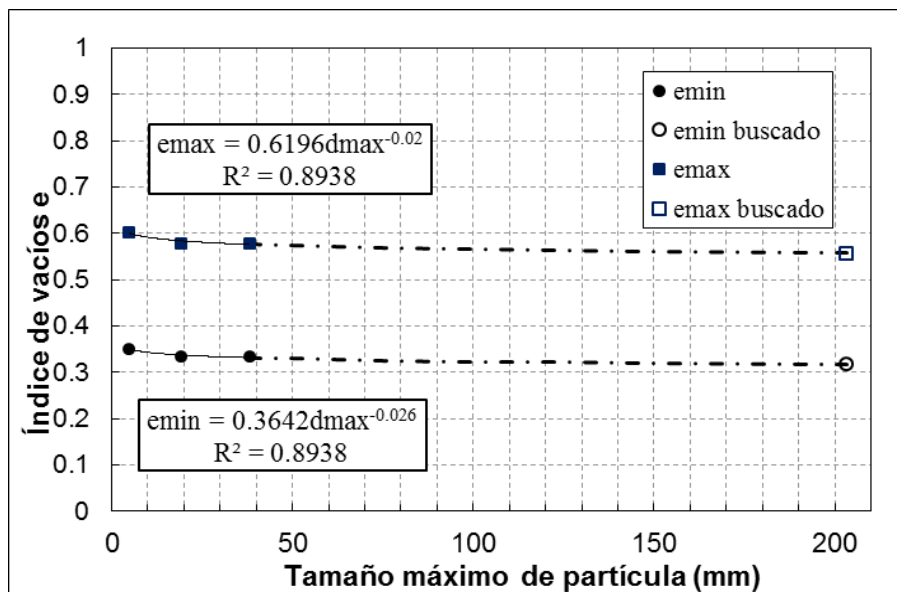
Muestra	Lastre chancado (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Contreras 2011



dmax (mm)	Cu
4.76	14.4
19.1	17.0
38.1	17.0

dmax (mm)	emin
4.76	0.351
19.1	0.334
38.1	0.334

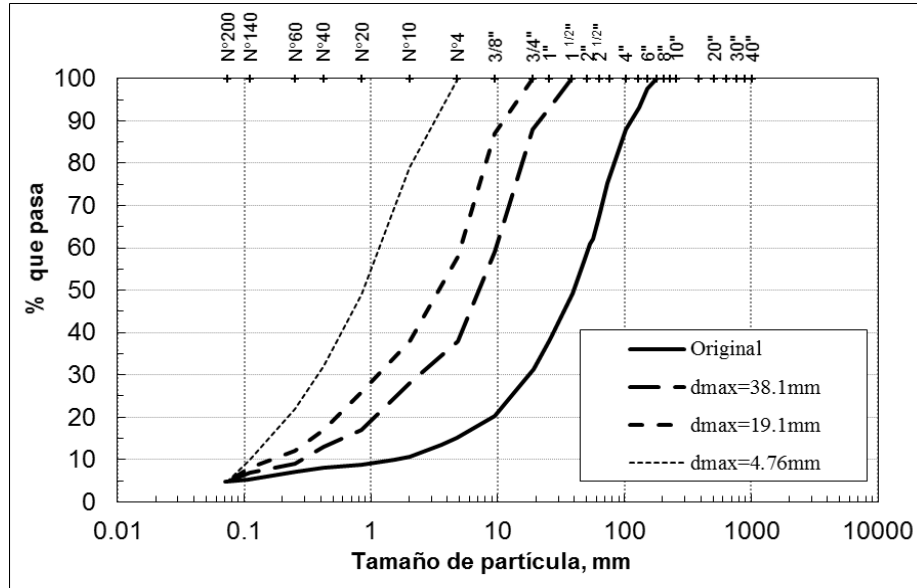
dmax (mm)	emax
4.76	0.602
19.1	0.579
38.1	0.579



emin	0.317
emax	0.557



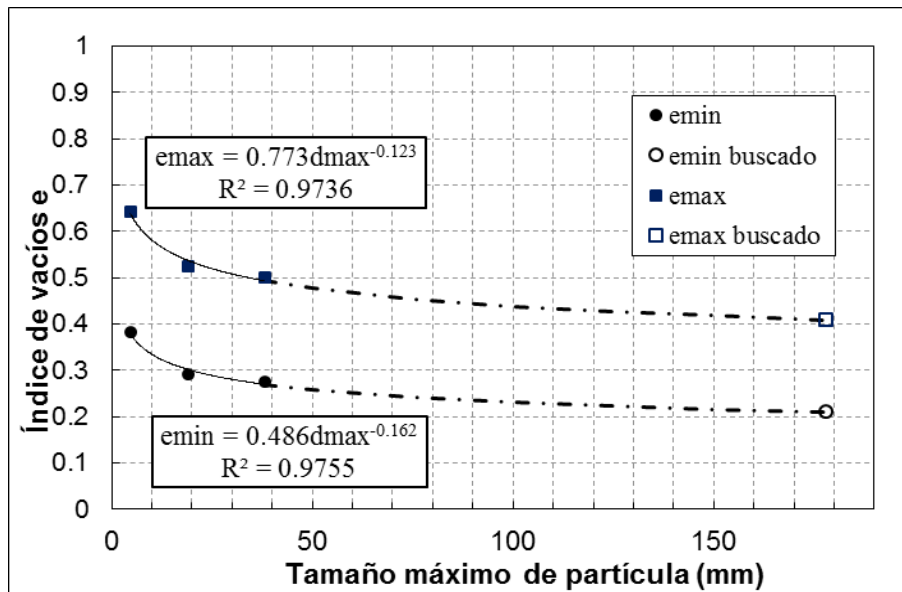
Muestra	Mármol Negro (sa-a)
dmax [mm]	177.8
Referencia	Besio 2012



dmax (mm)	Cu
4.76	10.9
19.1	26.3
38.1	32.1

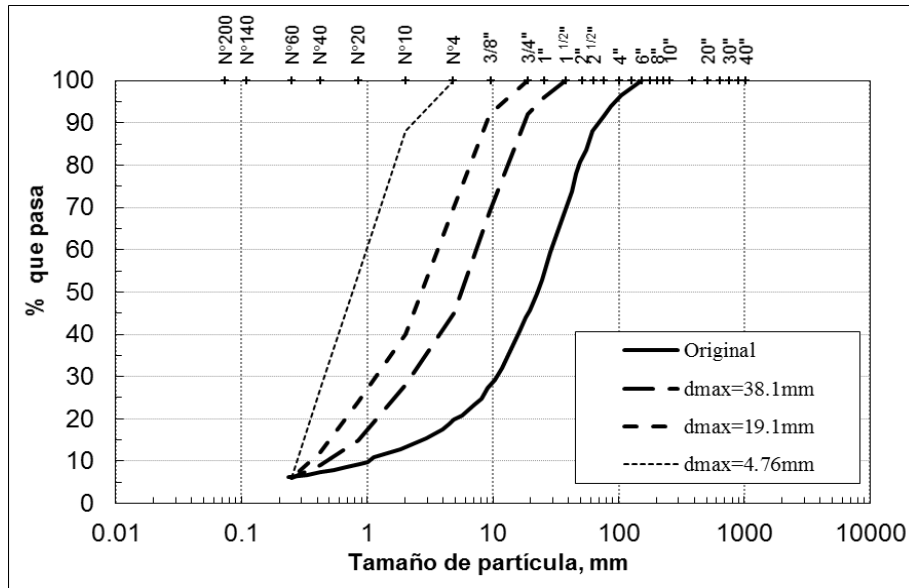
dmax (mm)	emin
4.76	0.381
19.1	0.292
38.1	0.275

dmax (mm)	emax
4.76	0.643
19.1	0.524
38.1	0.501



emin	0.210
emax	0.409

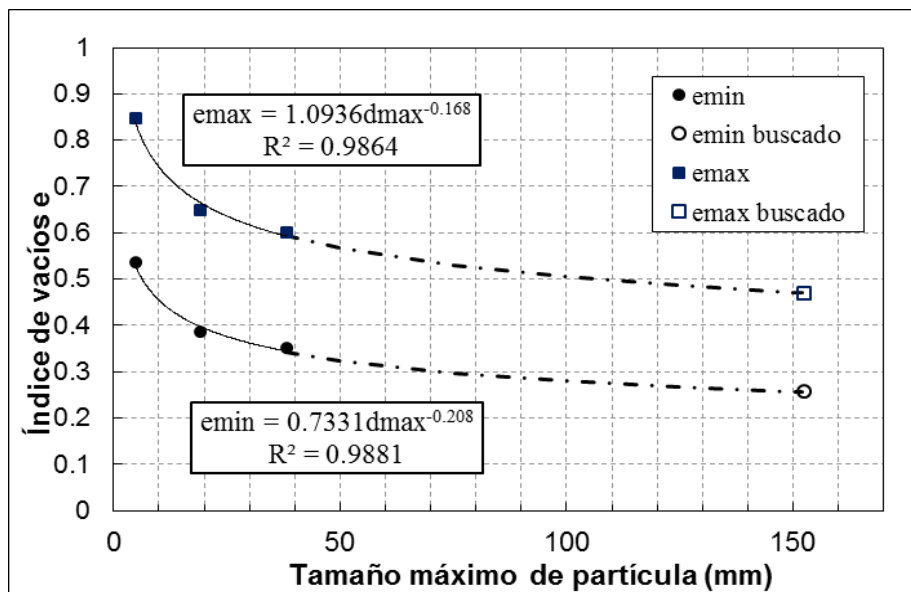
Muestra	Lastre M1 Granodiorita (sa-a)
dmax [mm]	152.4
Referencia	Palma et al. 2009



dmax (mm)	Cu
4.76	3.7
19.1	10.9
38.1	15.0

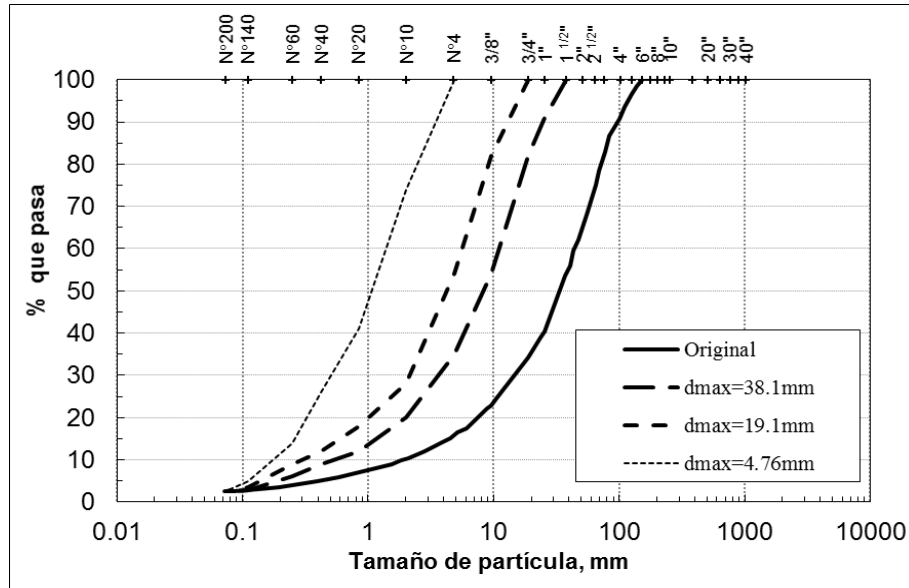
dmax (mm)	emin
4.76	0.535
19.1	0.387
38.1	0.351

dmax (mm)	emax
4.76	0.848
19.1	0.650
38.1	0.602



emin	0.256
emax	0.470

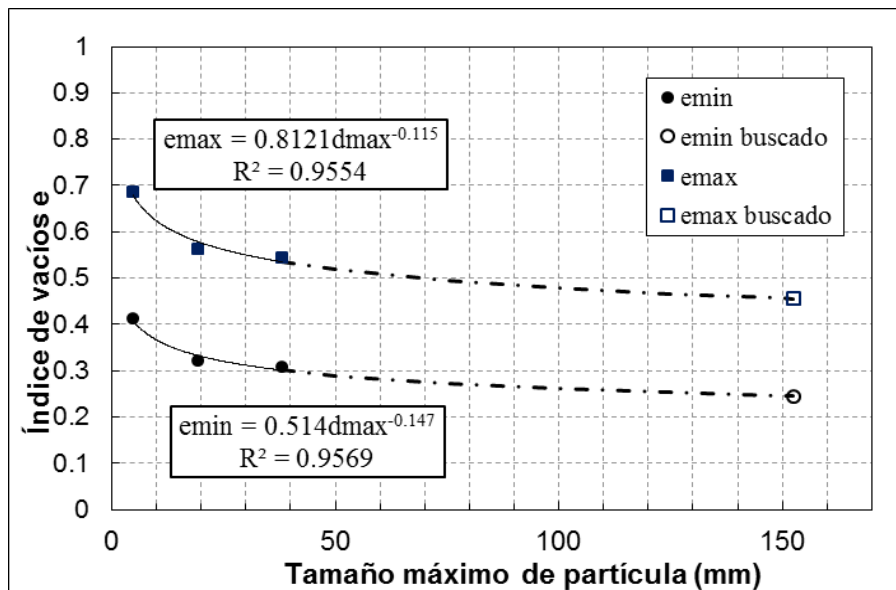
Muestra	Lastre M2 Pórfido (sa-a)
dmax [mm]	152.4
Referencia	Palma et al. 2009



dmax (mm)	Cu
4.76	8.3
19.1	19.3
38.1	22.0

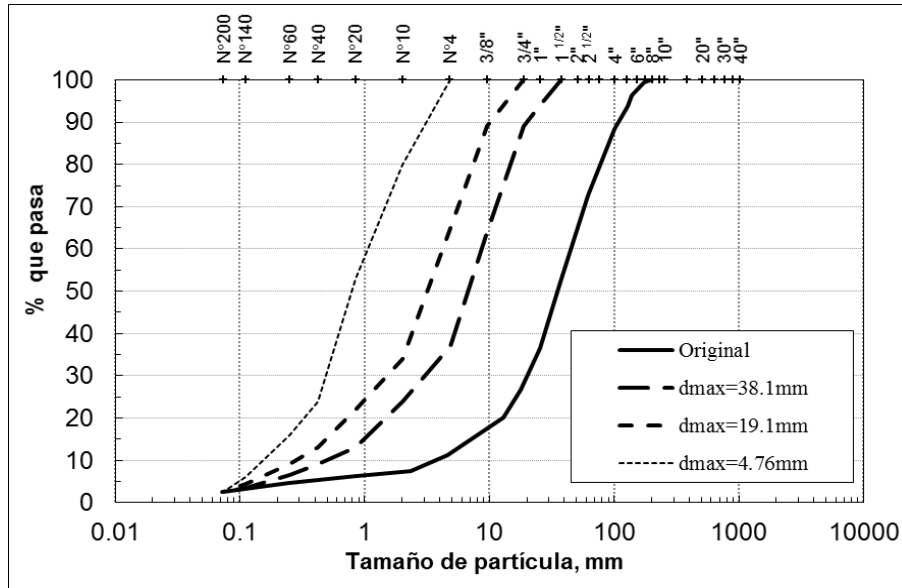
dmax (mm)	emin
4.76	0.414
19.1	0.321
38.1	0.309

dmax (mm)	emax
4.76	0.686
19.1	0.562
38.1	0.546



emin	0.246
emax	0.456

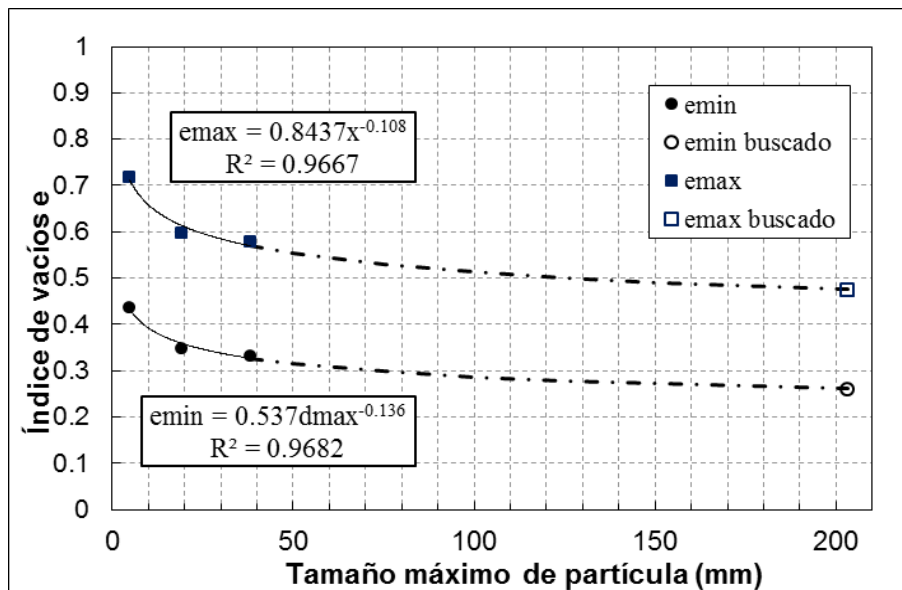
Muestra	Lastre ROM (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Bard et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	6.9
19.1	14.7
38.1	17.0

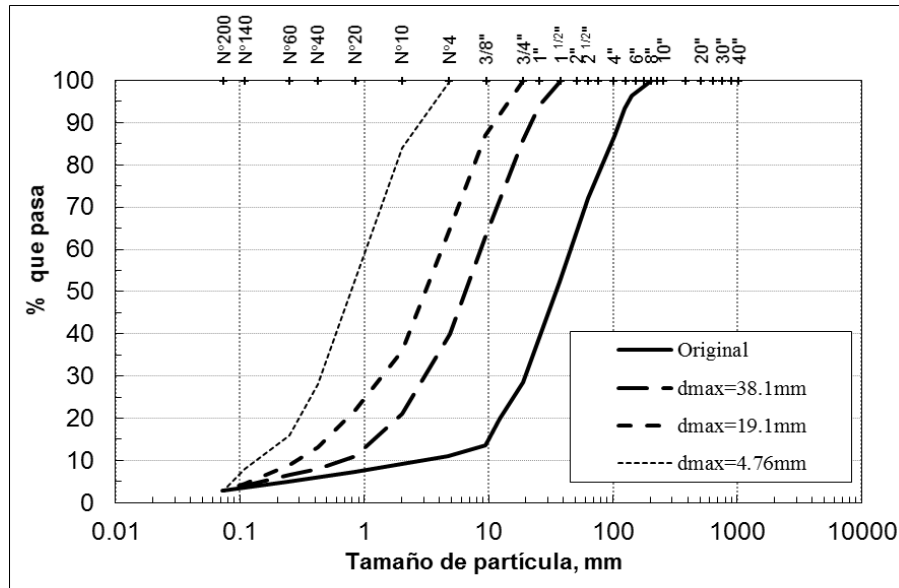
dmax (mm)	emin
4.76	0.438
19.1	0.349
38.1	0.334

dmax (mm)	emax
4.76	0.719
19.1	0.599
38.1	0.579



emin	0.261
emax	0.475

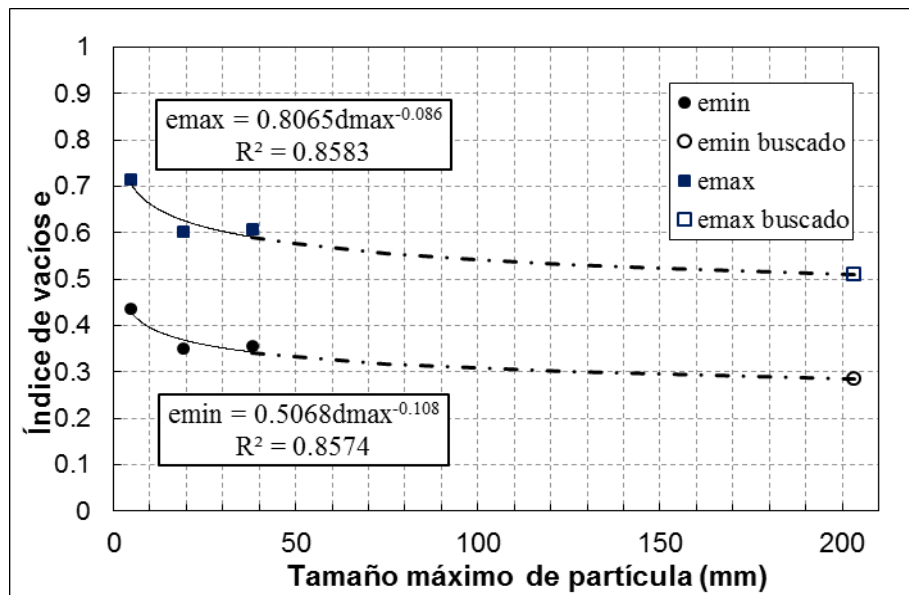
Muestra	Lastre Lixiviado H8 (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Bard et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	7.0
19.1	14.5
38.1	13.8

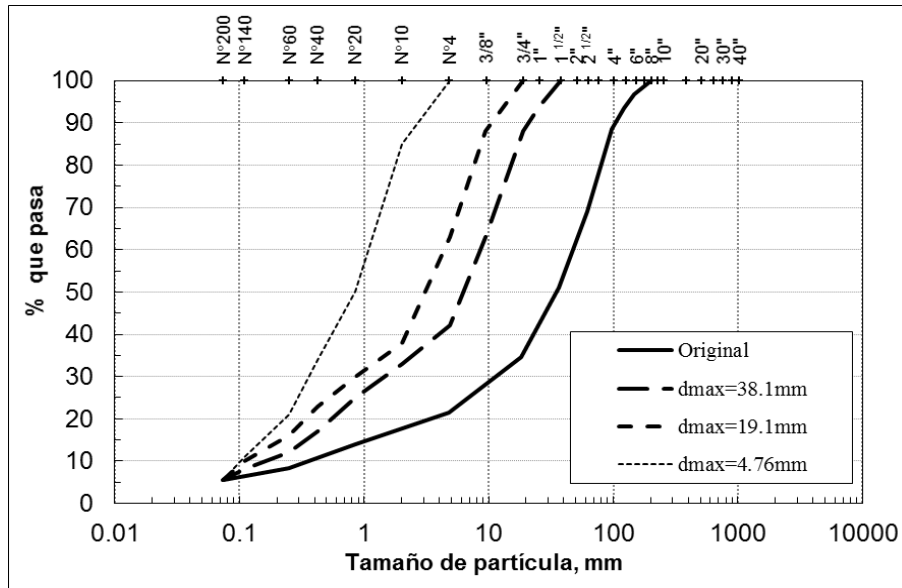
dmax (mm)	emin
4.76	0.436
19.1	0.350
38.1	0.355

dmax (mm)	emax
4.76	0.716
19.1	0.601
38.1	0.607



emin	0.285
emax	0.511

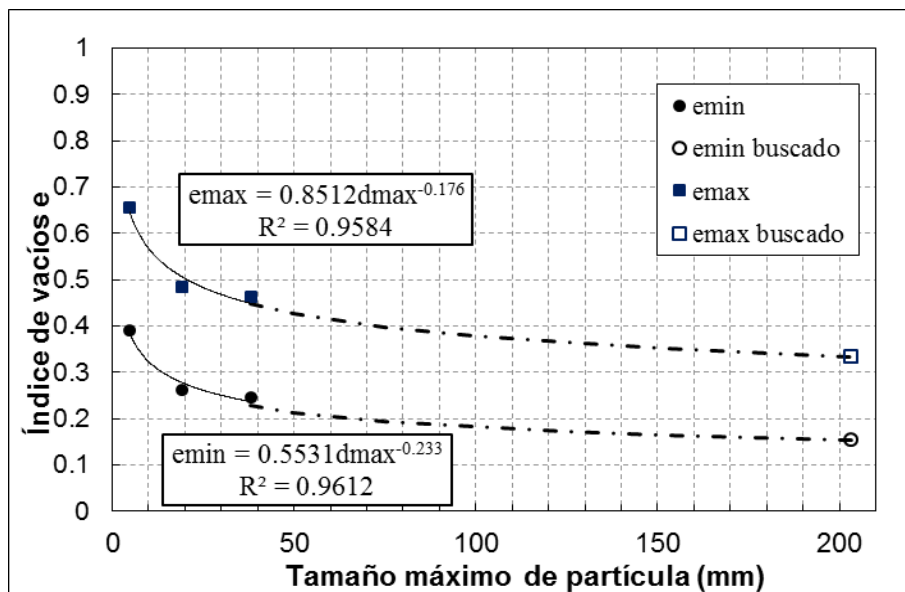
Muestra	Lastre Lixiviado C8 (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Bard et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	10.0
19.1	37.5
38.1	46.8

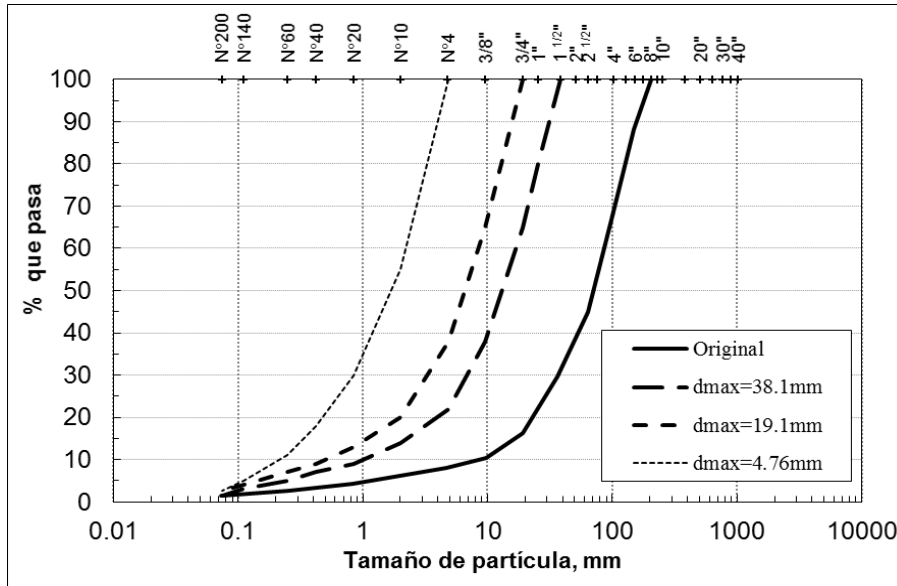
dmax (mm)	emin
4.76	0.392
19.1	0.263
38.1	0.246

dmax (mm)	emax
4.76	0.656
19.1	0.485
38.1	0.462



emin	0.154
emax	0.334

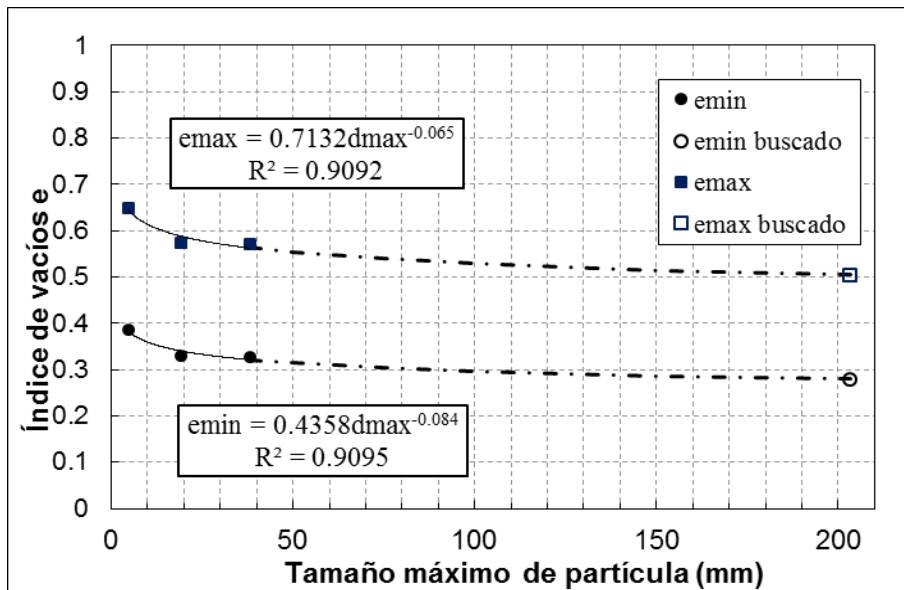
Muestra	Lastre ROM Chancado (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Bard et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	10.5
19.1	17.7
38.1	18.0

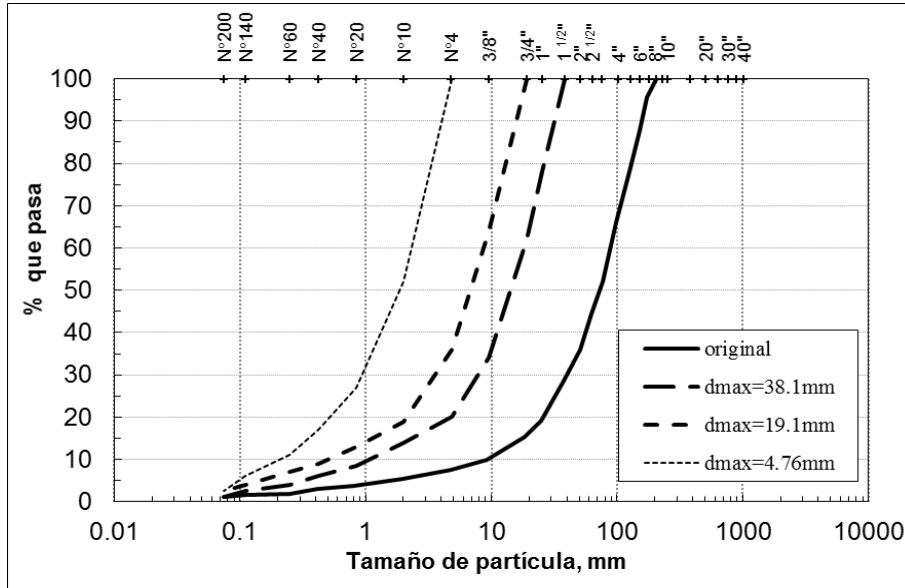
dmax (mm)	emin
4.76	0.386
19.1	0.330
38.1	0.328

dmax (mm)	emax
4.76	0.649
19.1	0.574
38.1	0.571



emin	0.279
emax	0.505

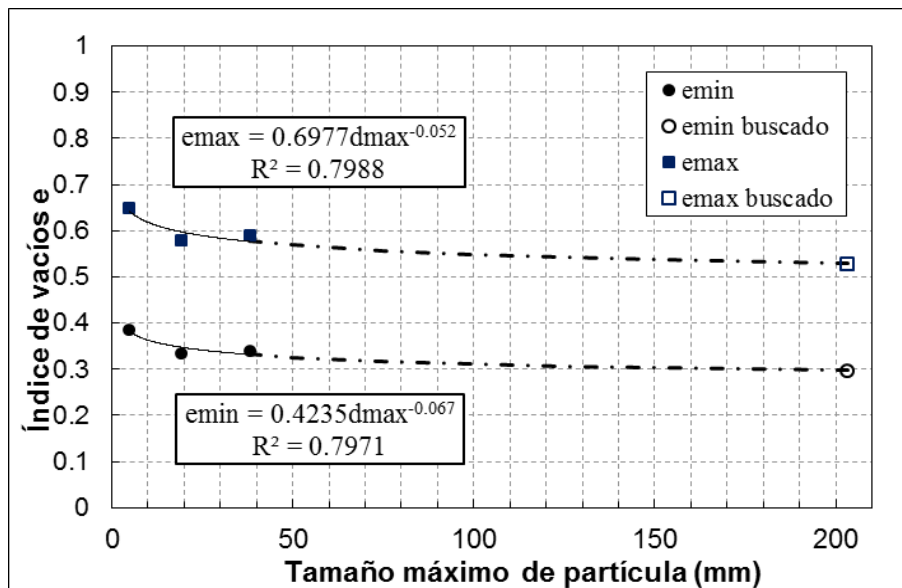
Muestra	Lastre CAD Parallel psd (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Linero et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	10.4
19.1	17.0
38.1	15.8

dmax (mm)	emin
4.76	0.387
19.1	0.334
38.1	0.341

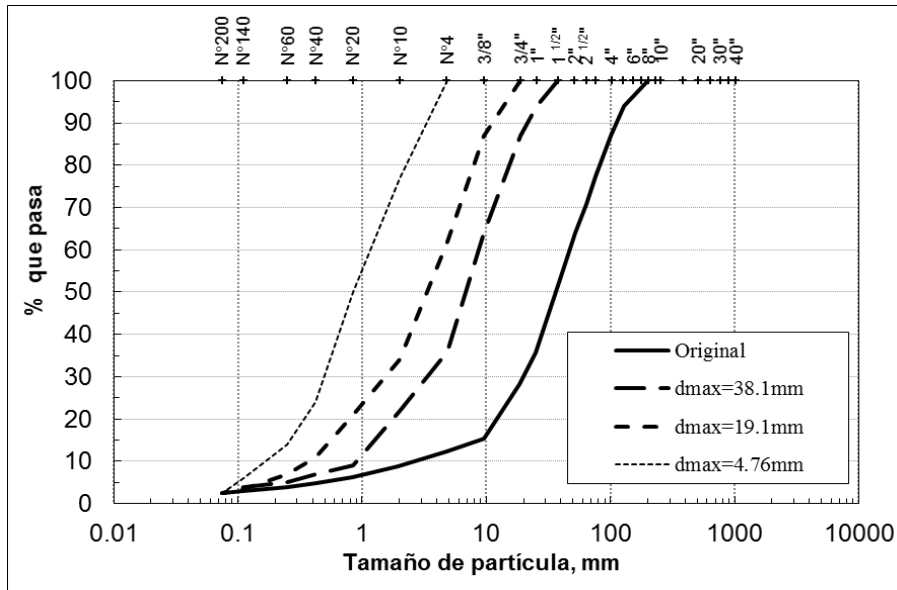
dmax (mm)	emax
4.76	0.650
19.1	0.579
38.1	0.589



emin	0.297
emax	0.529



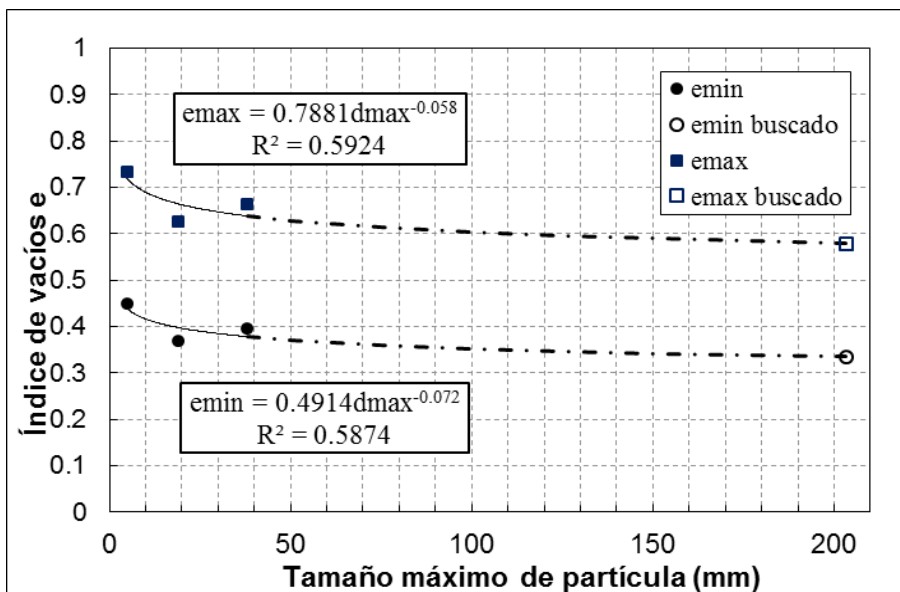
Muestra	Lastre truncated psd (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Linero et al. 2007



dmax (mm)	Cu
4.76	6.3
19.1	12.1
38.1	9.6

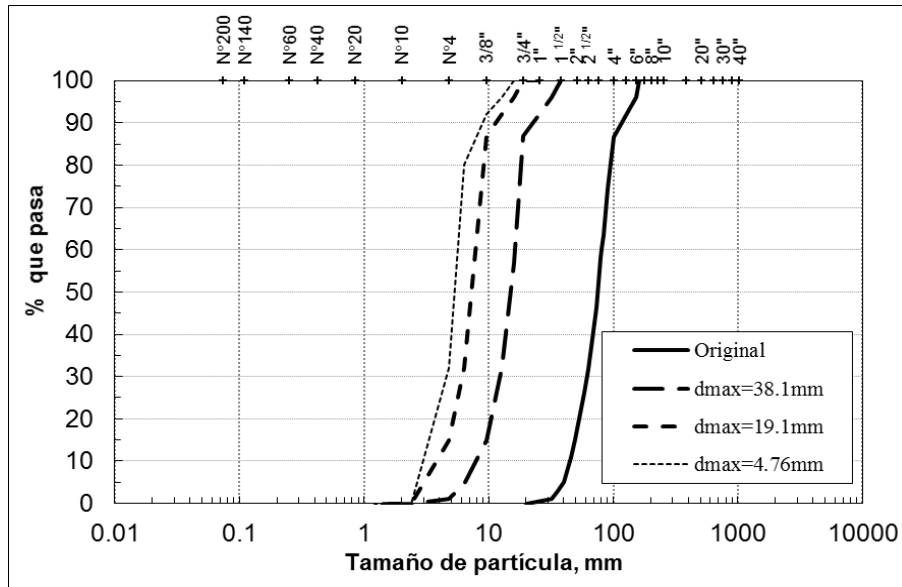
dmax (mm)	emin
4.76	0.450
19.1	0.370
38.1	0.397

dmax (mm)	emax
4.76	0.734
19.1	0.627
38.1	0.663



emin	0.335
emax	0.579

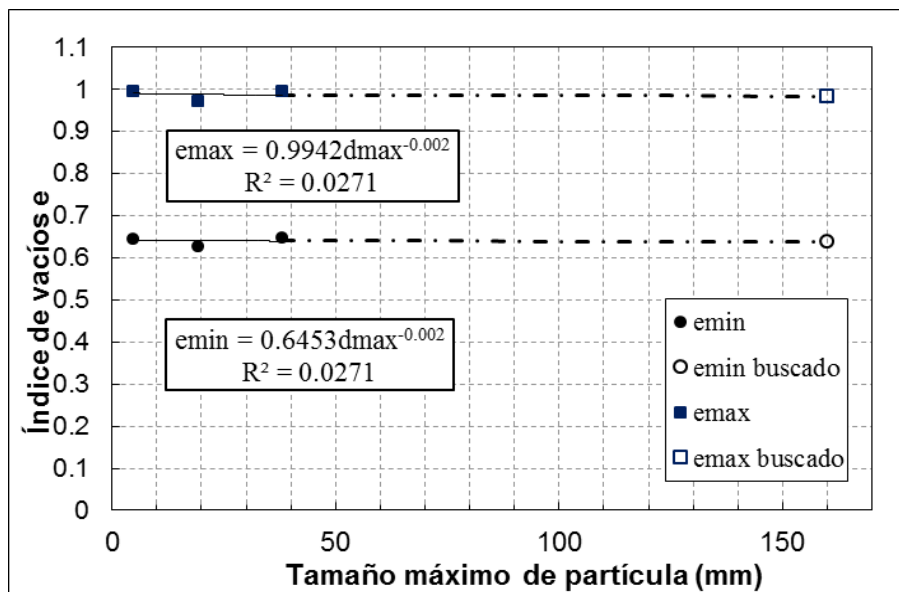
Muestra	Calcareous Rockfill from Prefontaines (CP) (sa-a)
dmax [mm]	160
Referencia	Ovalle et al. 2013



dmax (mm)	Cu
4.76	1.9
19.1	2.1
38.1	1.9

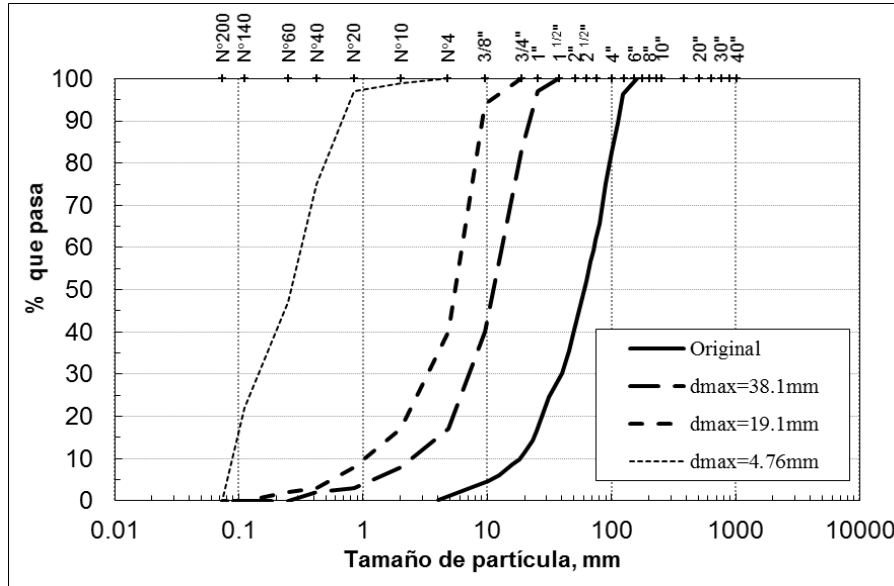
dmax (mm)	emin
4.76	0.647
19.1	0.629
38.1	0.647

dmax (mm)	emax
4.76	0.996
19.1	0.973
38.1	0.997



emin	0.639
emax	0.984

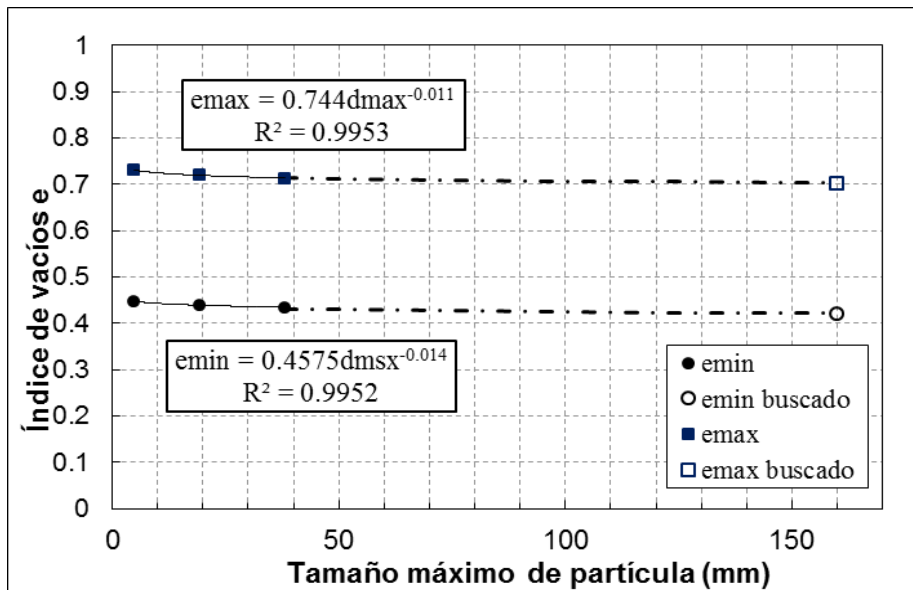
Muestra	Quartzite Shale Rockfill Trois Vallées (STV) (sa-a)
dmax [mm]	160
Referencia	Ovalle et al. 2013



dmax (mm)	Cu
4.76	6.4
19.1	6.8
38.1	7.1

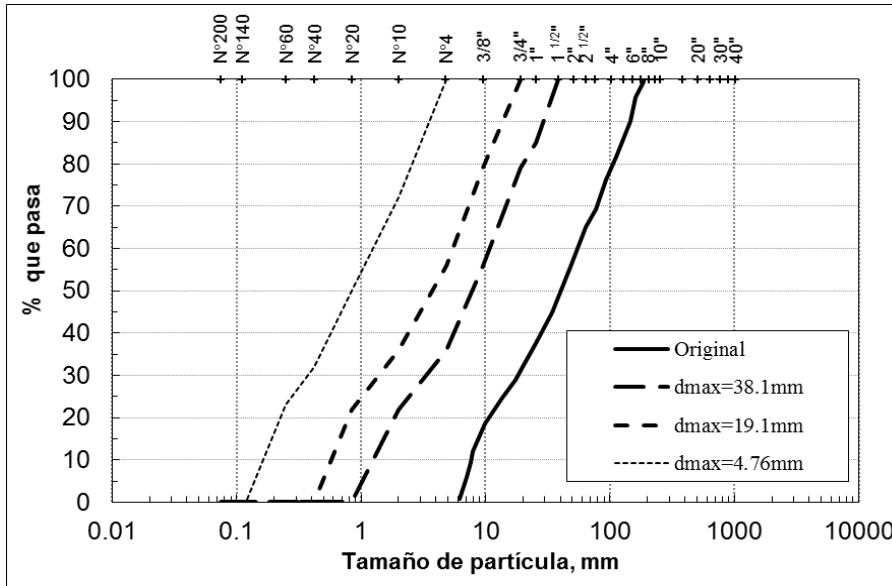
dmax (mm)	emin
4.76	0.447
19.1	0.440
38.1	0.435

dmax (mm)	emax
4.76	0.731
19.1	0.720
38.1	0.714



emin	0.422
emax	0.704

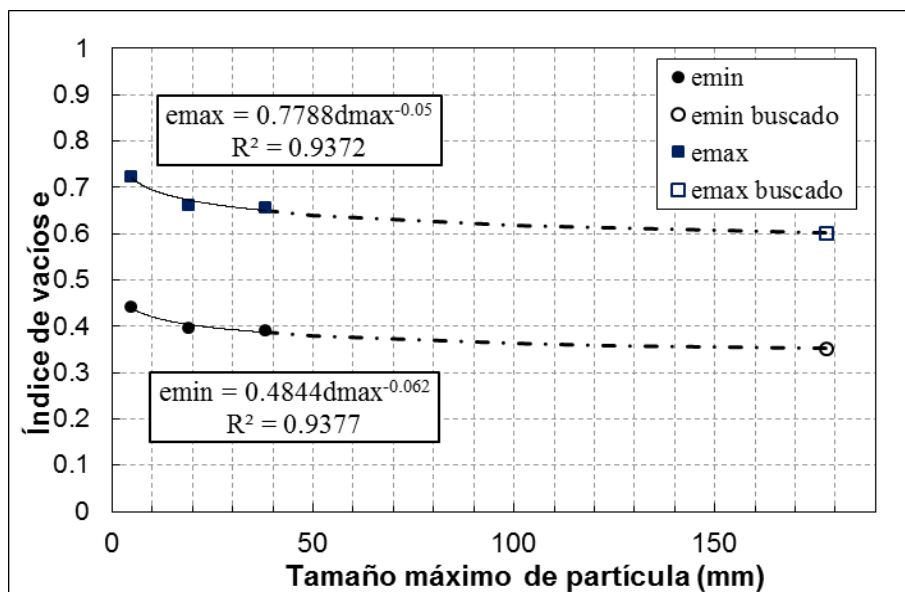
Muestra	Gran. A (Caliza, Arena y Grava La Angostura, Filita Chivor) (sa-a)
dmax [mm]	177.8
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	6.7
19.1	9.6
38.1	10.0

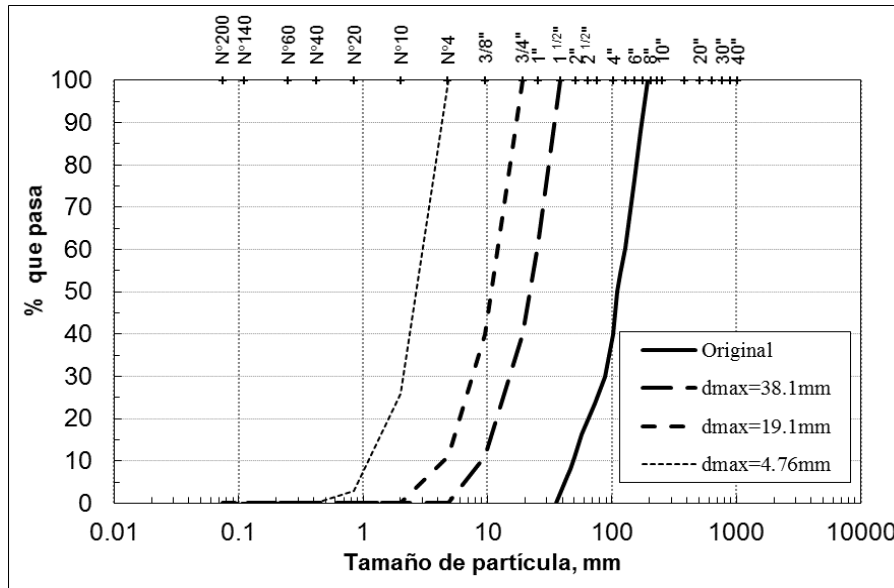
dmax (mm)	emin
4.76	0.443
19.1	0.396
38.1	0.392

dmax (mm)	emax
4.76	0.724
19.1	0.662
38.1	0.656



emin	0.351
emax	0.601

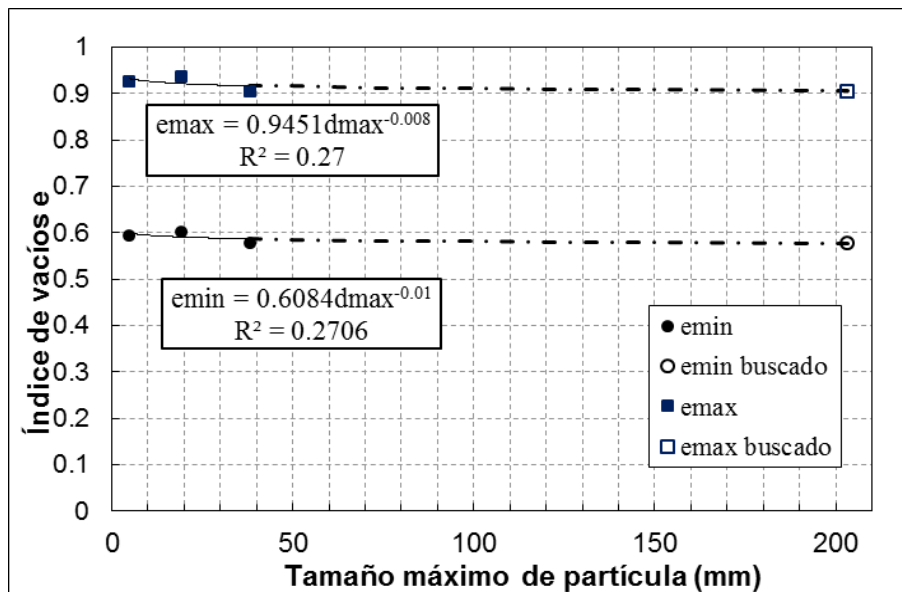
Muestra	Gran. B (Caliza La Angostura, Filita Chivor) (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	2.5
19.1	2.4
38.1	2.7

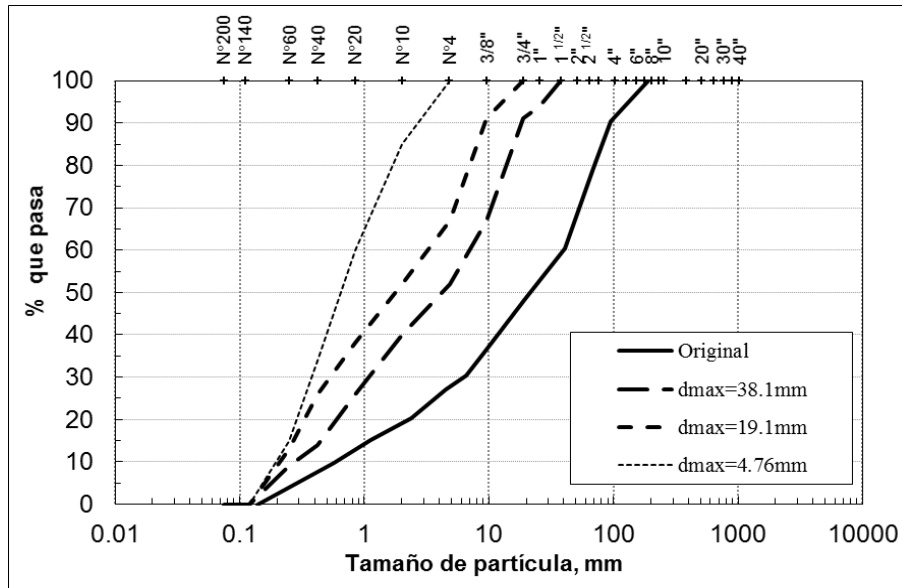
dmax (mm)	emin
4.76	0.595
19.1	0.603
38.1	0.579

dmax (mm)	emax
4.76	0.927
19.1	0.937
38.1	0.906



emin	0.577
emax	0.906

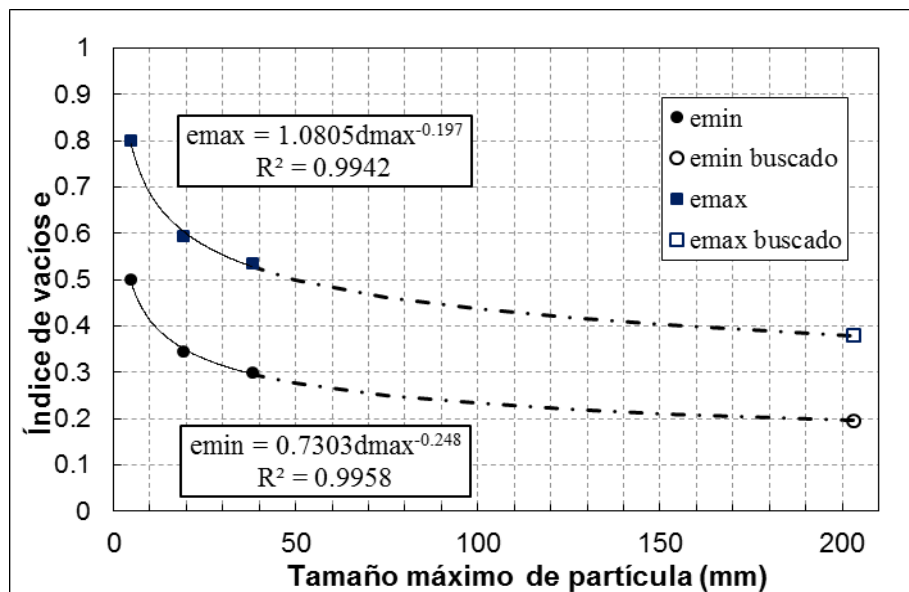
Muestra	Gran. C (Filita Chivor, Toba de Las Piedras) (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	4.5
19.1	15.2
38.1	24.1

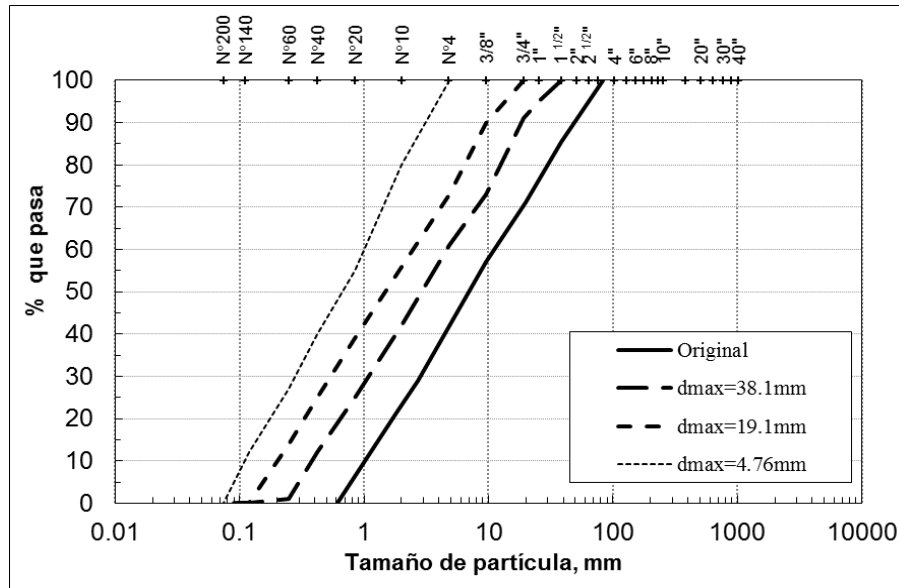
dmax (mm)	emin
4.76	0.499
19.1	0.345
38.1	0.300

dmax (mm)	emax
4.76	0.800
19.1	0.594
38.1	0.534



emin	0.196
emax	0.379

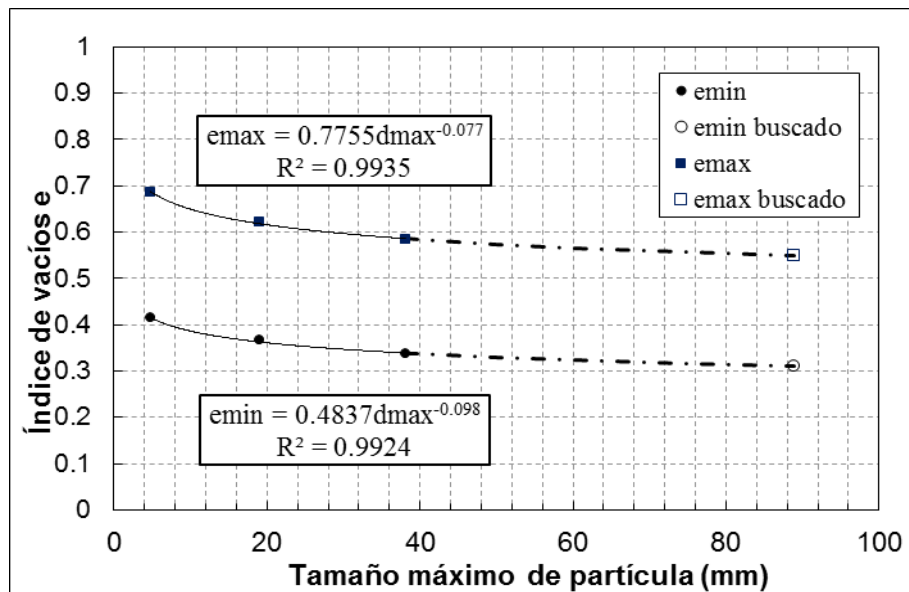
Muestra	Basalto de San Francisco granulometría 1 (sa-a)
dmax [mm]	88.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	8.3
19.1	12.5
38.1	16.6

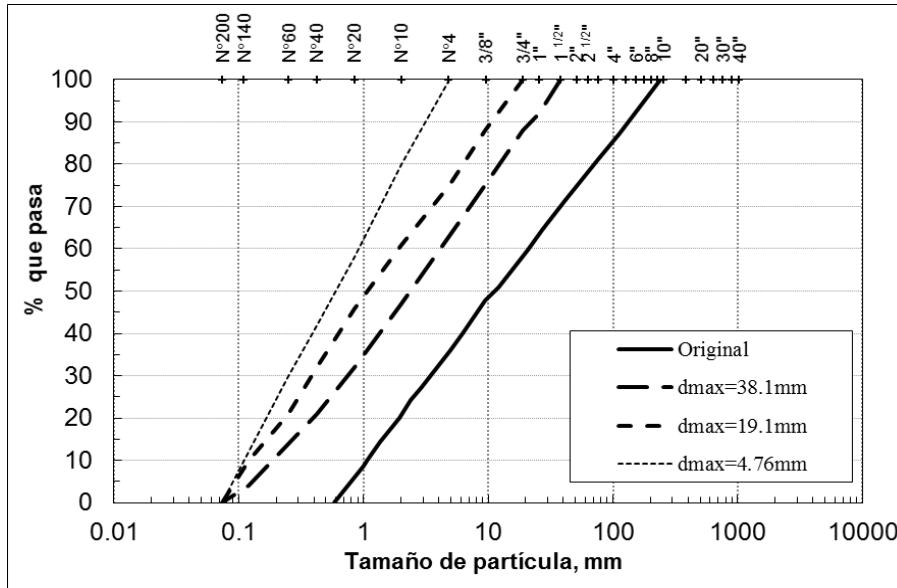
dmax (mm)	emin
4.76	0.414
19.1	0.366
38.1	0.336

dmax (mm)	emax
4.76	0.686
19.1	0.622
38.1	0.583



emin	0.312
emax	0.549

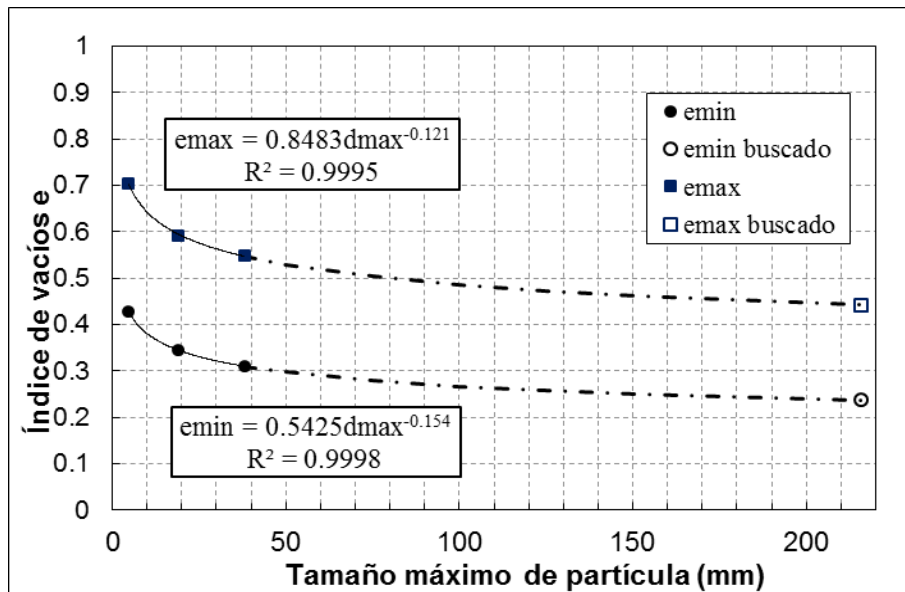
Muestra	Basalto San Francisco granulometría 2 (sa-a)
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	7.5
19.1	15.4
38.1	21.6

dmax (mm)	emin
4.76	0.427
19.1	0.344
38.1	0.310

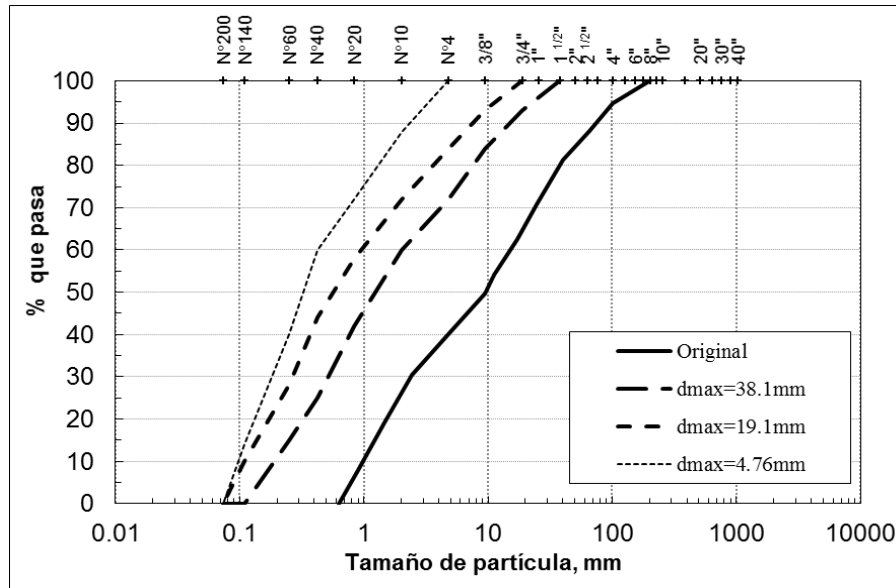
dmax (mm)	emax
4.76	0.704
19.1	0.593
38.1	0.548



emin	0.237
emax	0.443



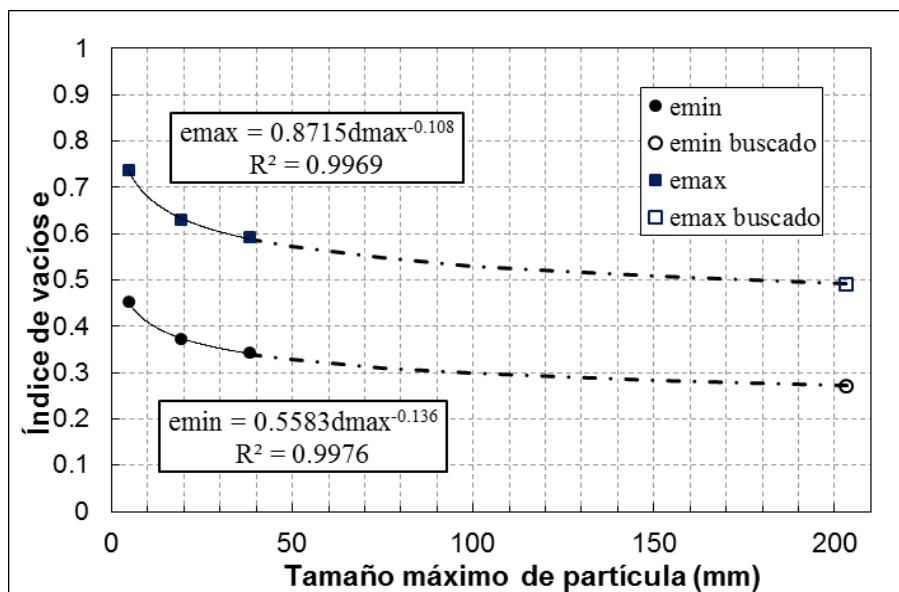
Muestra	Grava La Angostura granulometría natural (sr-r)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	4.2
19.1	8.1
38.1	10.5

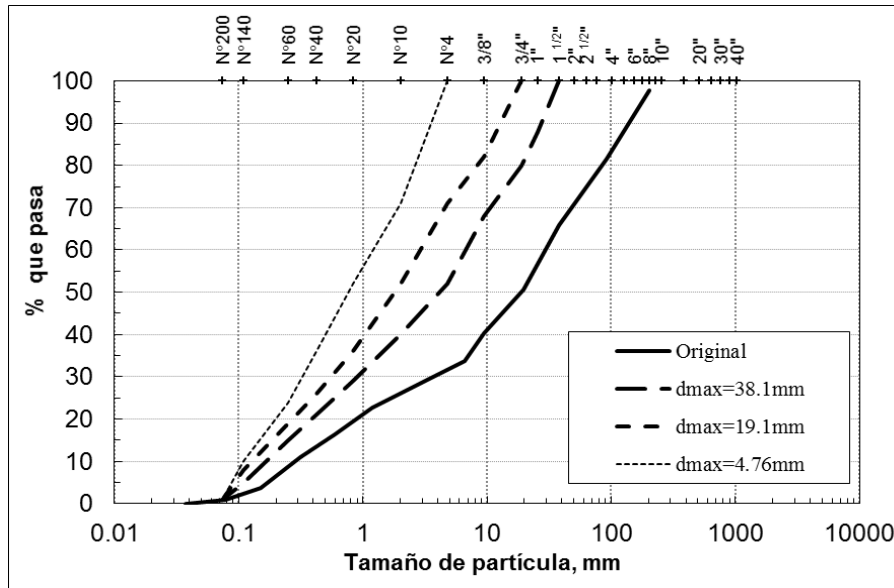
dmax (mm)	emin
4.76	0.369
19.1	0.305
38.1	0.282

dmax (mm)	emax
4.76	0.627
19.1	0.541
38.1	0.510



emin	0.225
emax	0.430

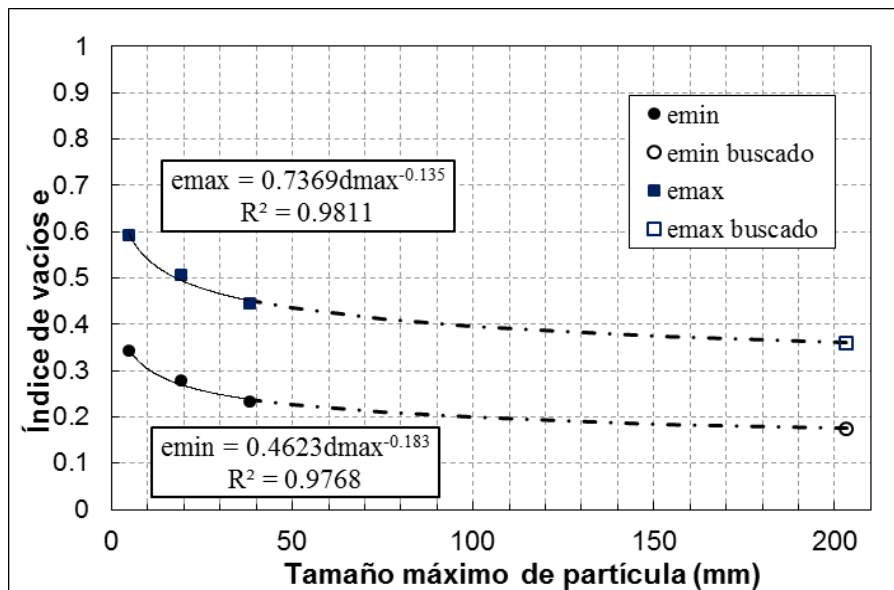
Muestra	Grava Pinzandarán
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	10.4
19.1	20.7
38.1	37.8

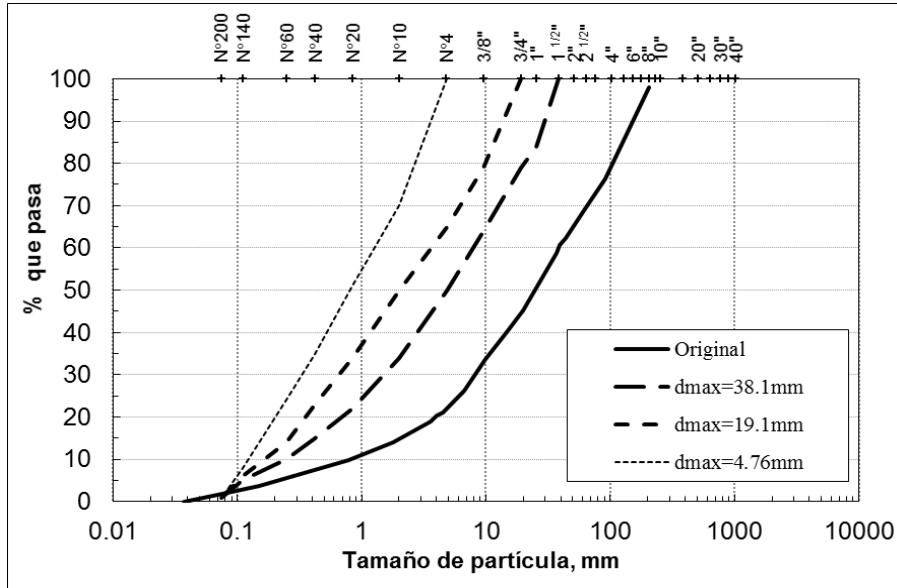
dmax (mm)	emin
4.76	0.344
19.1	0.279
38.1	0.232

dmax (mm)	emax
4.76	0.593
19.1	0.506
38.1	0.444



emin	0.175
emax	0.360

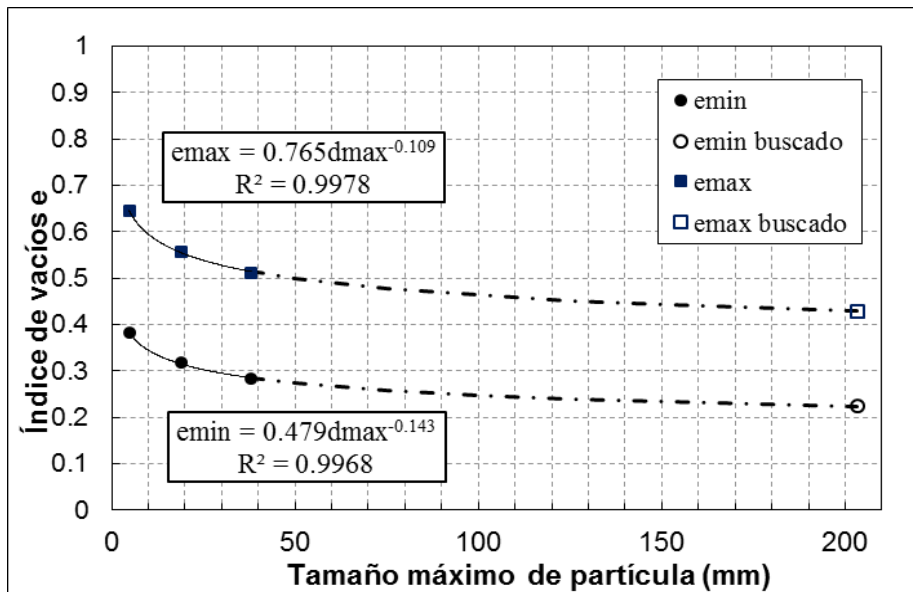
Muestra	Conglomerado de Malpaso (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	10.8
19.1	20.0
38.1	29.2

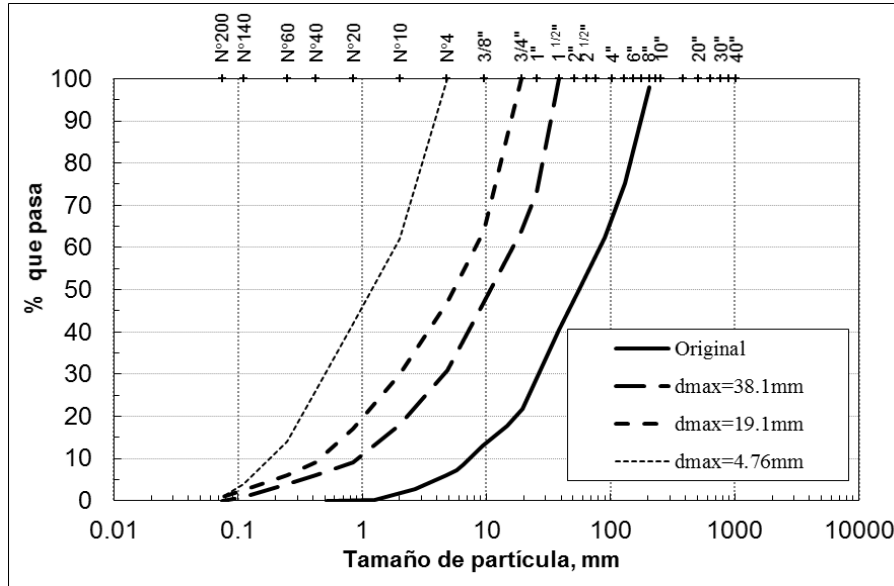
dmax (mm)	emin
4.76	0.382
19.1	0.318
38.1	0.283

dmax (mm)	emax
4.76	0.644
19.1	0.558
38.1	0.512



emin	0.224
emax	0.429

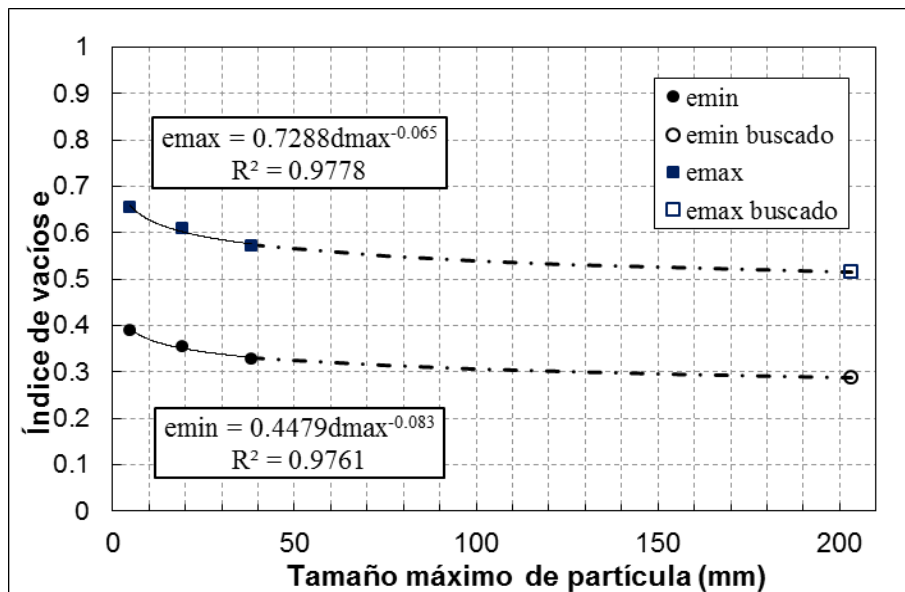
Muestra	Conglomerado Silicificado El Infiernillo (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	10.0
19.1	13.7
38.1	18.0

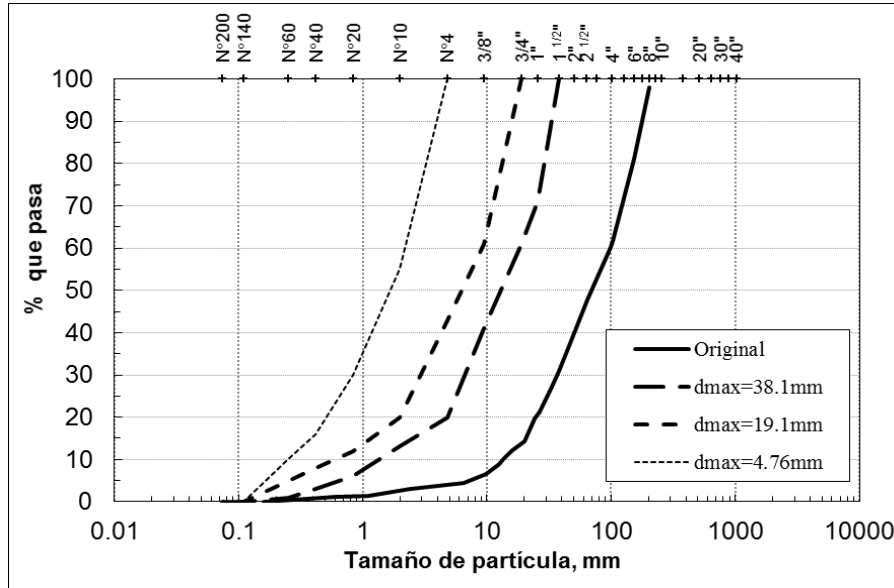
dmax (mm)	emin
4.76	0.392
19.1	0.356
38.1	0.328

dmax (mm)	emax
4.76	0.656
19.1	0.609
38.1	0.571



emin	0.288
emax	0.516

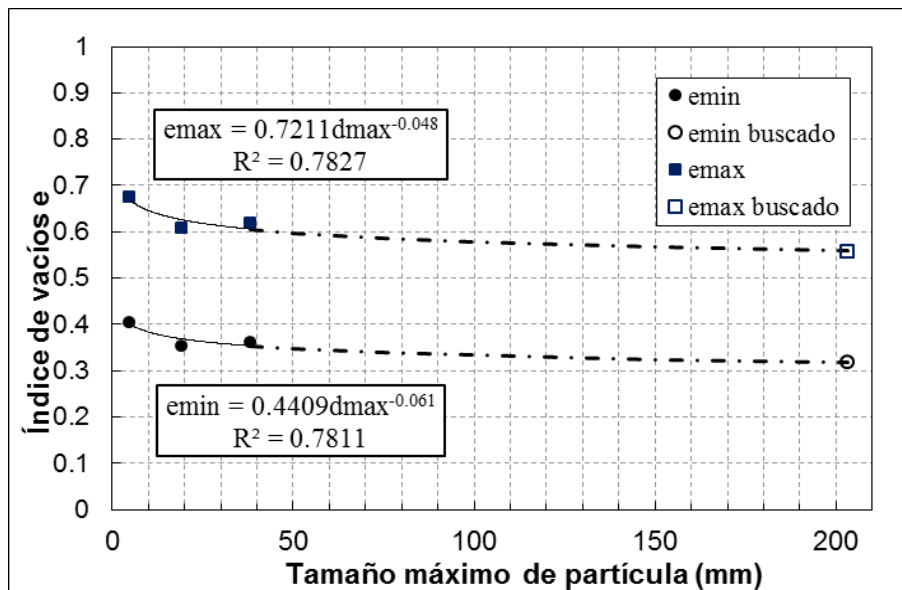
Muestra	Diorita de El Infiernillo (sa-a)
dmax [mm]	203.2
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	8.8
19.1	13.8
38.1	12.9

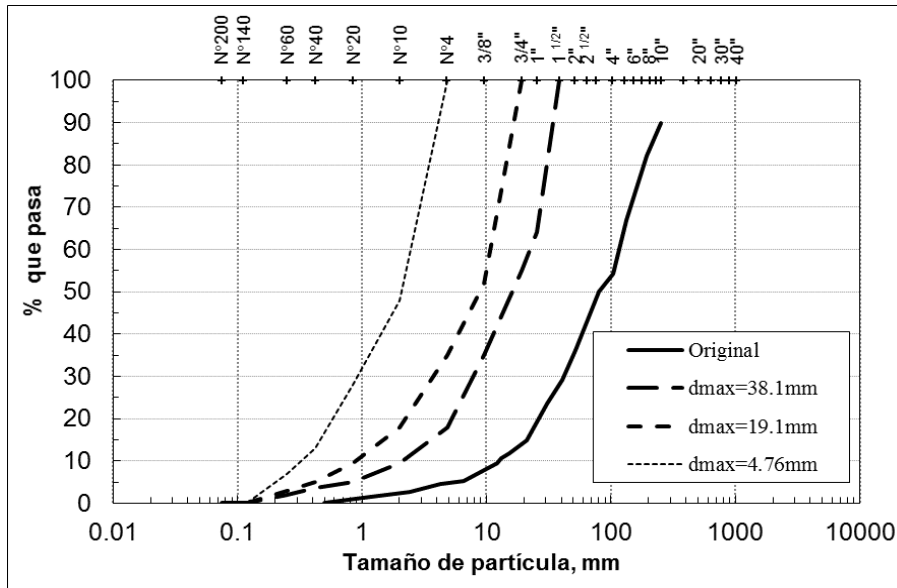
dmax (mm)	emin
4.76	0.406
19.1	0.355
38.1	0.363

dmax (mm)	emax
4.76	0.676
19.1	0.607
38.1	0.618



emin	0.319
emax	0.559

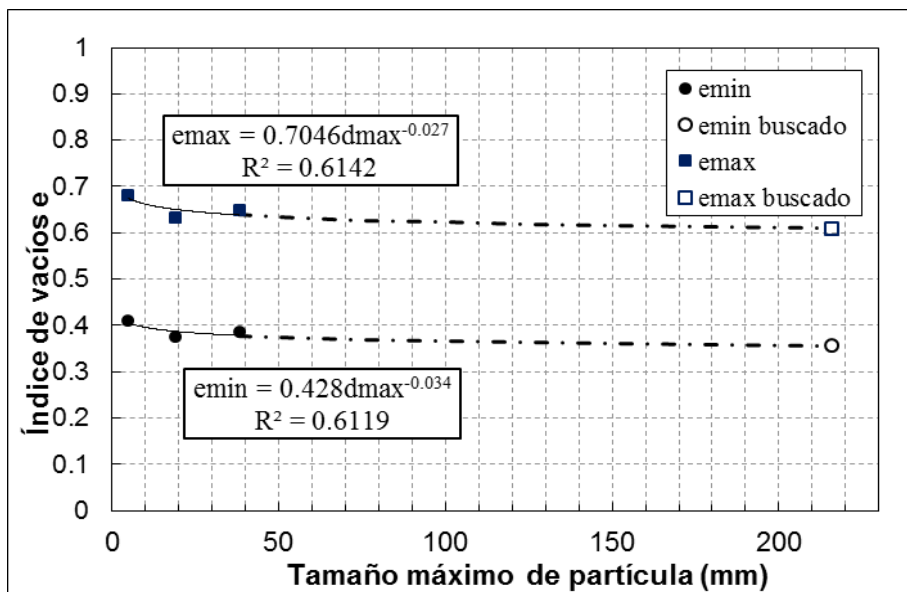
Muestra	Pizarra de El Granero granulometría A
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	8.6
19.1	11.6
38.1	10.5

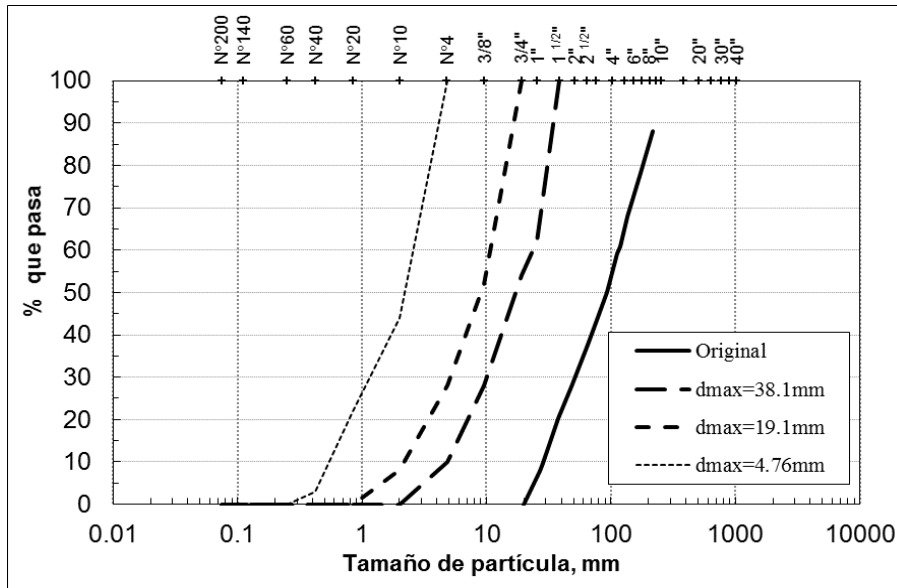
dmax (mm)	emin
4.76	0.410
19.1	0.375
38.1	0.386

dmax (mm)	emax
4.76	0.681
19.1	0.634
38.1	0.649



emin	0.357
emax	0.609

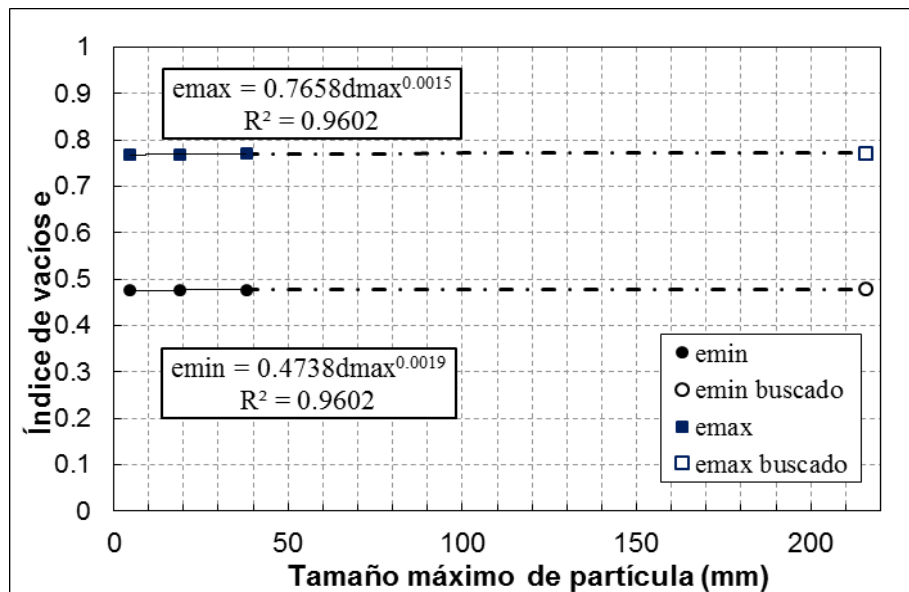
Muestra	Pizarra de El Granero granulometría B (sa-a)
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	5.3
19.1	5.2
38.1	5.2

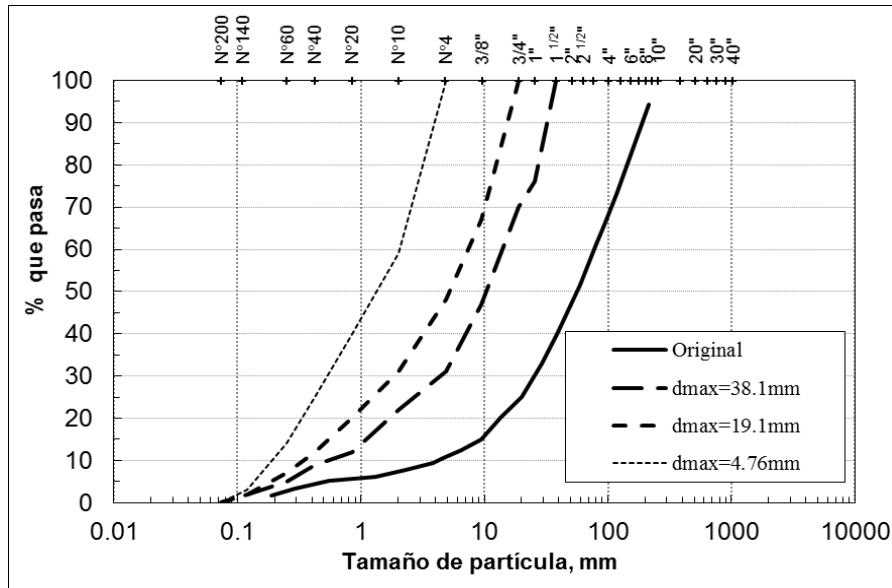
dmax (mm)	emin
4.76	0.475
19.1	0.477
38.1	0.477

dmax (mm)	emax
4.76	0.768
19.1	0.770
38.1	0.770



emin	0.479
emax	0.772

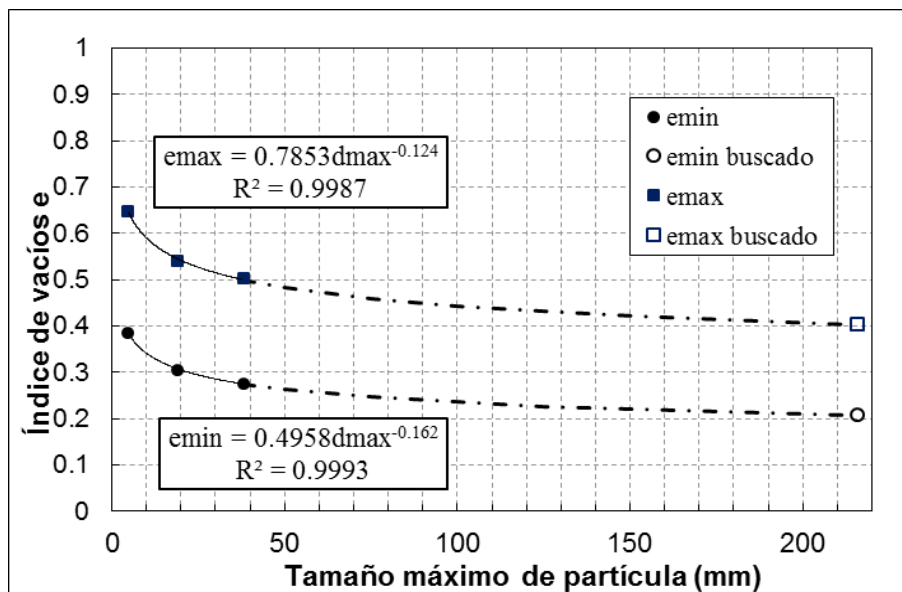
Muestra	Gneis granítico de Mica granulometría X (sa-a)
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	10.5
19.1	22.7
38.1	32.0

dmax (mm)	emin
4.76	0.386
19.1	0.306
38.1	0.276

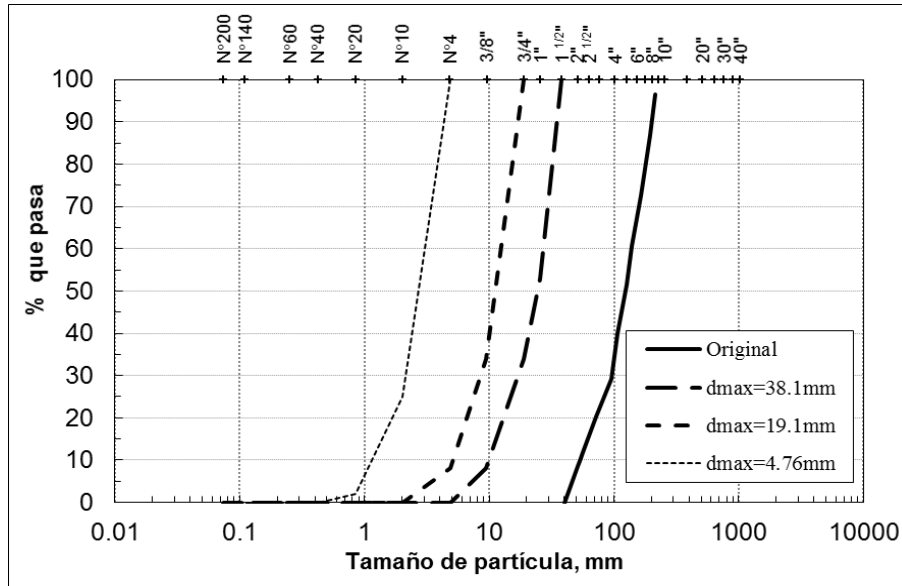
dmax (mm)	emax
4.76	0.648
19.1	0.542
38.1	0.502



emin	0.208
emax	0.403



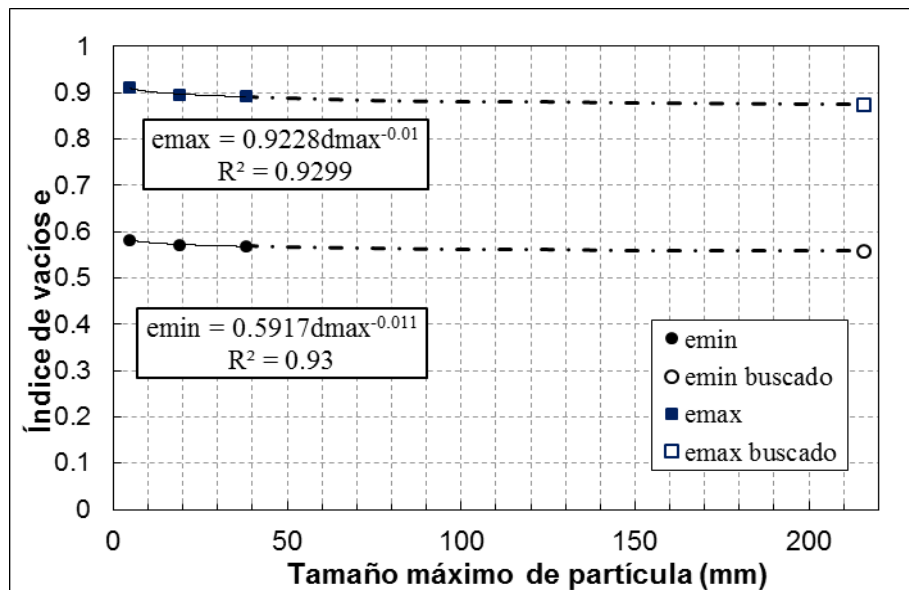
Muestra	Gneis granítico de Mica granulometría Y (sa-a)
dmax [mm]	215.9
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	2.7
19.1	2.9
38.1	2.9

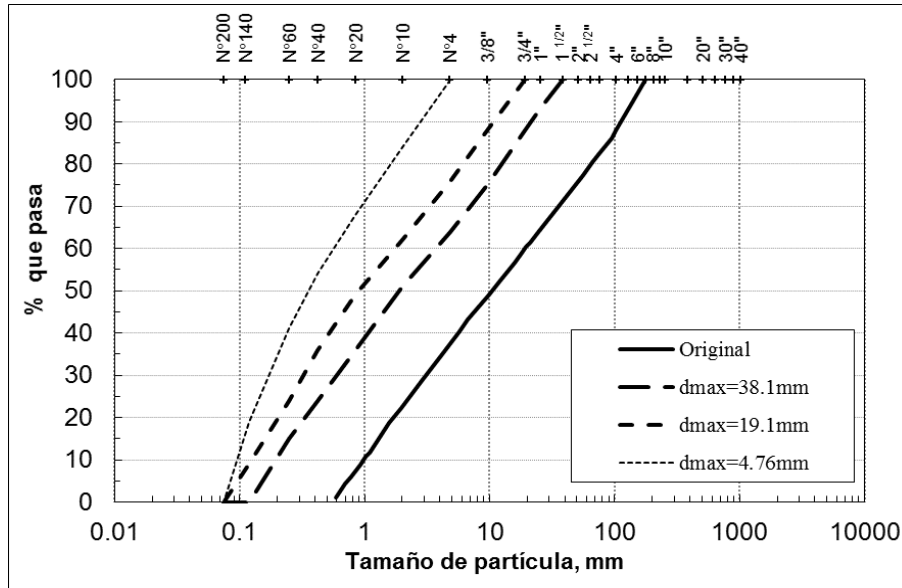
dmax (mm)	emin
4.76	0.582
19.1	0.570
38.1	0.569

dmax (mm)	emax
4.76	0.910
19.1	0.894
38.1	0.893



emin	0.558
emax	0.875

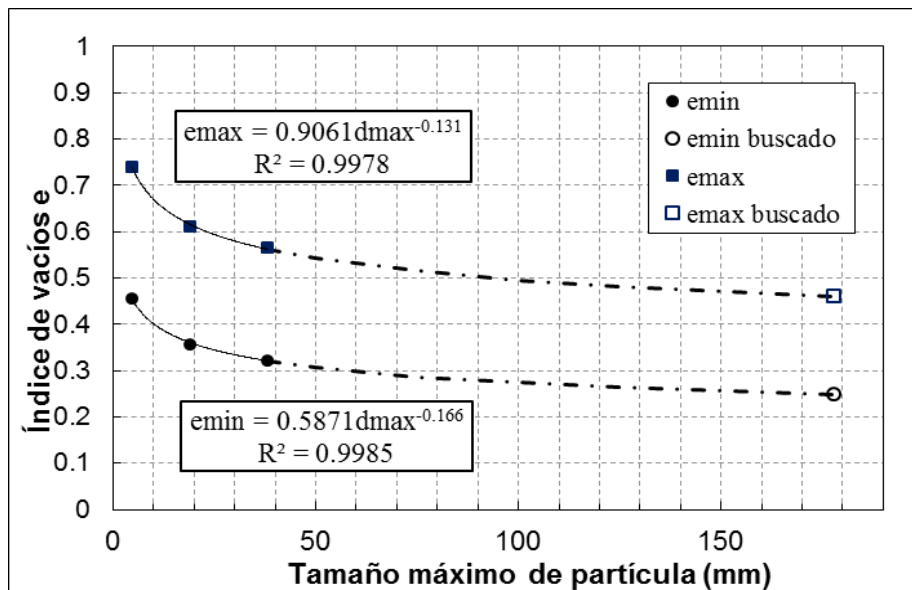
Muestra	Material 1 Basalto
dmax [mm]	177.8
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	6.1
19.1	13.6
38.1	19.0

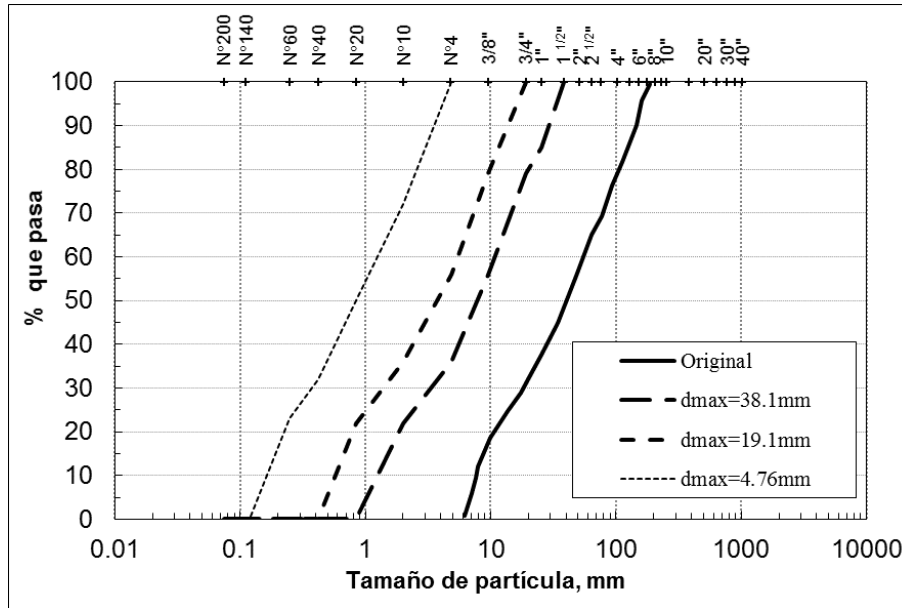
dmax (mm)	emin
4.76	0.454
19.1	0.357
38.1	0.323

dmax (mm)	emax
4.76	0.740
19.1	0.610
38.1	0.564



emin	0.248
emax	0.460

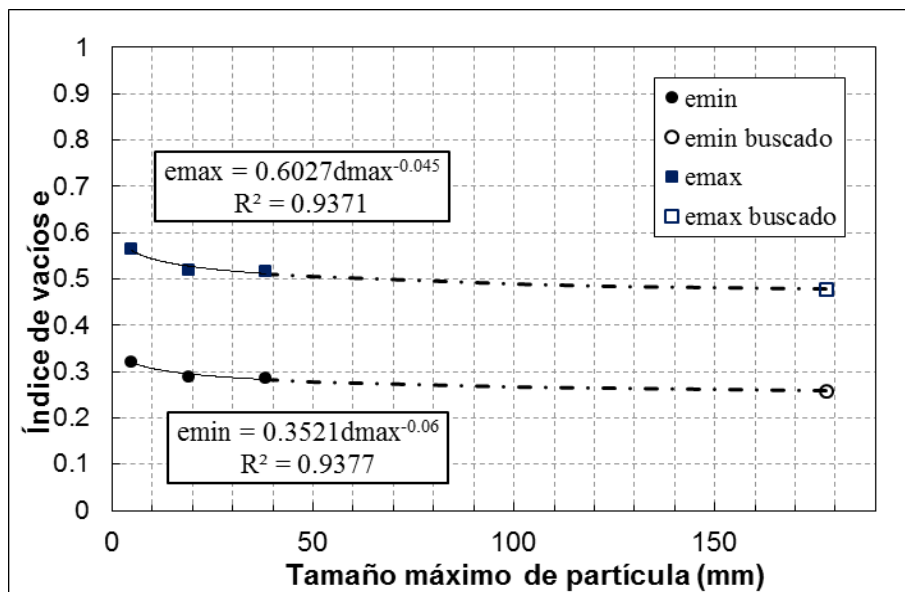
Muestra	Gran. A (Caliza, Arena y Grava La Angostura, Filita Chivor) (sr-r)
dmax [mm]	177.8
Referencia	Marsal 1980



dmax (mm)	Cu
4.76	6.7
19.1	9.6
38.1	10.0

dmax (mm)	emin
4.76	0.322
19.1	0.289
38.1	0.286

dmax (mm)	emax
4.76	0.564
19.1	0.520
38.1	0.516



emin	0.258
emax	0.477