



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

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y ROTURA DE PARTÍCULAS DE
MATERIALES QUEBRADOS DEL PROYECTO CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEO
(PMCHS) USANDO EL MÉTODO DE GRADACIÓN PARALELA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL,
MENCION EN ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

FELIPE PATRICIO URBINA ESPINOSA

PROFESOR GUÍA:

LEONARDO DORADOR ORTIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CÉSAR PASTÉN PUCHI

KAREM DE LA HOZ ÁLVAREZ

SANTIAGO DE CHILE

2015

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil.
POR: Felipe Patricio Urbina Espinosa
FECHA: 13/10/2015
PROFESOR GUÍA: Sr. Leonardo Dorador O.

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y ROTURA DE PARTÍCULAS DE
MATERIALES QUEBRADOS DEL PROYECTO CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEO
(PMCHS) USANDO EL MÉTODO DE GRADACIÓN PARALELA**

El gran tamaño de partículas de algunos materiales granulares gruesos dificulta la determinación de su resistencia al corte y características de deformación con ensayos geotécnicos de dimensiones convencionales. Esto es lo que motiva la utilización de técnicas de escalamiento de las muestras, como el método de gradación paralela también conocido como método de curvas homotéticas. Al hacer un escalamiento, es importante considerar el efecto de la rotura de partículas, ya que este es un fenómeno que controla el comportamiento de los materiales granulares.

En este trabajo se aplica el método de gradación paralela en el análisis de la resistencia, compresibilidad y rotura de partículas de materiales quebrados del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS). Para esto se ensayan 3 muestras tronadas de material grueso de PMCHS en el equipo triaxial de gran escala de IDIEM con probetas de 60 y 100 cm de diámetro. Estos resultados son comparados con ensayos triaxiales convencionales utilizando muestras de granulometría paralela asociadas a probetas de diámetro 5, 10 y 15 cm, sometidas a consolidación isotrópica entre 1 y 20 kg/cm². Esta caracterización geotécnica se complementa con ensayos de densidad máxima y mínima y ensayos de compresión simple de partículas individuales.

Los resultados de este estudio experimental indican que a través de las muestras escaladas es posible tener un buen acercamiento a la resistencia de la muestra gruesa (original). Sin embargo la rotura de partículas presenta una marcada diferencia entre las muestras escaladas y la muestra original, por lo cual se recomienda el uso de 3 muestras escaladas de diferente tamaño medio para así poder extrapolar la rotura de partículas de la muestra original.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
2	Objetivos	2
3	Revisión Bibliográfica	3
3.1	Resistencia al corte de los suelos granulares gruesos	3
3.2	Propiedades intrínsecas y de estado de los suelos granulares gruesos y su influencia en la respuesta al corte	4
3.2.1	Tamaño de partículas	4
3.2.2	Forma de partículas.....	6
3.2.3	Granulometría.....	9
3.2.4	Índice de vacíos y densidad relativa	12
3.2.5	Nivel de tensiones	13
3.3	Rotura de partículas	16
3.3.1	Mecanismos de Rotura.....	16
3.3.2	Métodos para cuantificar la rotura de partículas	18
3.4	Método de gradación paralela.....	20
3.4.1	Factores que afectan la efectividad de la gradación paralela	21
4	Materiales quebrados estudiados	25
4.1	Material pórfido este sericítico (PES)	25
4.2	Material pórfido este potásico (PEK)	28
4.3	Mezcla PES-PEK al 50% en peso.....	32
5	Equipos triaxiales y metodología de ensayos	35
5.1	Equipos triaxiales	35
5.1.1	Equipos triaxiales convencionales	35
5.1.2	Equipo triaxial de altas presiones	35
5.1.3	Equipo triaxial para grandes partículas de IDIEM.....	36
5.2	Metodología de ensayos	38
5.2.1	Ensayos escalados de tamaño convencional	38
5.2.2	Ensayos escalados de grandes dimensiones	41
5.3	Equipo de Carga Puntual	47
6	Resultados	51

6.1	Resultados Material PES	51
6.1.1	Comportamiento tensión-deformación.....	51
6.1.2	Envolvente de falla	56
6.1.3	Resistencia individual de partículas.....	59
6.1.4	Rotura de Partículas	61
6.2	Resultados material PEK	64
6.2.1	Comportamiento tensión deformación y deformación volumétrica	64
6.2.2	Envolvente de Falla	69
6.2.3	Resistencia individual de partículas.....	73
6.2.4	Rotura de partículas	74
6.3	Resultados Material mezcla 50/50	77
6.3.1	Comportamiento tensión-deformación.....	77
6.3.2	Envolvente de Falla	82
6.3.3	Rotura de partículas	85
7	Discusión y Análisis de Resultados.....	90
7.1	Comparación de resultados mecánicos y de rotura	90
7.1.1	Comparación entre materiales.....	90
7.1.2	Comparación entre escalamientos	94
7.2	Evaluación de ajuste y predicción de envolventes	95
7.3	Estimación de rotura de granulometrías con mayor D_{max}	99
7.4	Comparación de resultados con literatura.....	102
7.5	Análisis de metodología de determinación de densidad mínima.....	108
8	Conclusiones y Recomendaciones	110
8.1	Conclusiones.....	110
8.2	Recomendaciones.....	111
9	Bibliografía	112
10	Anexos	116
10.1	Detalle de ensayos	116

Índice de Tablas

Tabla 4-1. Factores de escala, material PES	26
Tabla 4-2. Caracterización granulométrías, material PES.....	26
Tabla 4-3. Factores de escala, material PEK	29
Tabla 4-4. Caracterización granulométrías, material PEK.....	29
Tabla 4-5. Parámetros de caracterización de la granulometría material combinado	32
Tabla 5-1. Plan de ensayos convencionales	39
Tabla 5-2. Etapas de armado de probeta 15 x 30. (a) colocación de material. (b). sellado primera membrana. (c) colocación de recubrimiento. (d) colocación y sellado de segunda membrana.	40
Tabla 5-3. Plan de ensayos de grandes dimensiones.....	42
Tabla 6-1. Densidad seca post-consolidación material PES	51
Tabla 6-2. Parámetros geomecánicos de material PES.....	57
Tabla 6-3. Parámetros de envolvente Mohr-Coulomb.....	57
Tabla 6-4. Parámetros de envolvente no lineal, Material PES	58
Tabla 6-5. Envolvente no lineal p-q, material PES	58
Tabla 6-6. Predicción de ángulo de fricción máximo a presión de confinamiento 20 [kg/cm ²], material PES.....	58
Tabla 6-7. Parámetros I_{s50} y UCS estimado, Material PES.....	60
Tabla 6-8. Densidad seca post consolidación material PEK	64
Tabla 6-9. Parámetros geomecánicos, material PEK.....	71
Tabla 6-10. Parámetros Mohr-Coulomb, material PEK	71
Tabla 6-11. Parámetros envolvente no lineal (De Mello 1977), material PEK.....	71
Tabla 6-12. Parámetros envolvente no lineal p-q, Material PEK.....	72
Tabla 6-13. Predicción de ángulo de fricción máximo a confinamiento 20 [kg/cm ²].....	72
Tabla 6-14. Parámetros I_{s50} y UCS estimado, material PEK.....	74
Tabla 6-15. Densidad seca post consolidación material combinado	77
Tabla 6-16. Resumen de propiedades geomecánicas, material Combinado	83
Tabla 6-17. Parámetros de envolvente de falla Mohr-Coulomb	83
Tabla 6-18. Parámetros de envolvente no lineal (De Mello 1977), material Combinado	84
Tabla 6-19. Parámetros de envolvente no lineal en espacio p-q, material Combinado.....	84

Tabla 6-20. Estimación de ángulo de fricción máximo a una presión de confinamiento de 20 [kg/cm ²], material Combinado	84
Tabla 7-1. Diferencia de ángulo de fricción en homotéticas respecto a D _{max} = 12,7 [mm]	94
Tabla 7-2. Diferencia de ángulo de fricción respecto a D _{max} = 25 [mm]	95
Tabla 7-3. Comparación de ángulos de fricción a 20 [kg/cm ²]	97
Tabla 7-4. Comparación de resultados y envolvente no lineal	98
Tabla 7-5. Extrapolación de rotura relativa (Br) para mayores D _{max}	101
Tabla 7-6. Resultados de determinación de densidad mínima.....	109

Índice de Figuras

Figura 3-1. Componentes del ángulo de fricción (Mitchell, 1993).....	3
Figura 3-2. Ángulo de fricción máximo para dos D_{max} y distintas presiones de confinamiento (Ovalle et al. 2014).....	6
Figura 3-3. Clasificación de forma de partículas Krumbein y Sloss (1963)	6
Figura 3-4. Forma, redondez y textura superficial de una partícula. Tomado de Dodds (2003).....	7
Figura 3-5. Efecto de angulosidad en resistencia al corte (Santamarina y Cho, 2004)	8
Figura 3-6. Efecto de granulometría en resistencia al corte (Al-Hussaini 1983).....	10
Figura 3-7. Efecto del coeficiente de uniformidad en ángulo de fricción (Ovalle et al. 2014)	10
Figura 3-8. Relación entre índice de vacíos y C_u (Dorador 2010).....	11
Figura 3-9. Efecto del índice de vacíos en la resistencia al corte (Ovalle et al. 2014)....	12
Figura 3-10. Efecto del índice de vacíos (Santamarina y Cho 2004)	13
Figura 3-11. Efecto del confinamiento (Lee y Seed 1967, tomado de Verdugo y Hoz 2006)	14
Figura 3-12. Resultados de ensayos triaxiales CID en suelos granulares gruesos (Ovalle et al. 2014)	15
Figura 3-13. Efectos de conminución. Adaptado de Unland (2007)	17
Figura 3-14. Parámetros de rotura (Lade, Yamamuro, y Bopp 1997)	19
Figura 3-15. Presiones de contacto en un set de esferas bajo compresión (Lowe 1964)	21
Figura 3-16. Resultados Para material P-1 (De la Hoz 2007)	23
Figura 3-17. Resultados de ensayos para distintas durezas de un mismo material (Dorador 2010).....	24
Figura 4-1. Muestra de material PES en distintos tamaños	25
Figura 4-2. Granulometrías original y homotéticas para material PES.....	27
Figura 4-3. Granulometría homotética PES de gran escala, probeta 60x120, $D_{max} = 100$ [mm]	27
Figura 4-4. Densidades mínima y máxima, material PES	28
Figura 4-5. Muestra de material PEK en distintos tamaños	29
Figura 4-6. Granulometrías original y homotéticas para material PEK.....	30

Figura 4-7. Granulometría ensayo de gran escala material PEK, probeta 100x180, material PEK	31
Figura 4-8. Densidades seca mínima y seca máxima, material PEK	32
Figura 4-9. Granulometrías homotéticas, material combinado	33
Figura 4-10. Granulometría probeta de gran escala, material combinado	33
Figura 4-11. Densidades seca máxima y seca mínima, material combinado	34
Figura 5-1. Equipo triaxial de gran escala (Verdugo et al. 2007).....	37
Figura 5-2. Panel de control de triaxial de gran escala (Verdugo et al. 2007).....	38
Figura 5-3. Disposición de partículas en ensayo 1	43
Figura 5-4. Preparación de capa en ensayo 1	43
Figura 5-5. (a) Zonas de probeta con punzonamiento (b) Colocación de segunda membrana (c) Probeta terminada.....	44
Figura 5-6. Disposición de partículas en ensayo 2	45
Figura 5-7. Preparación de capa en ensayo 2.....	45
Figura 5-8. Preparación de capa en ensayo 3.....	46
Figura 5-9. Clasto retenido en tamiz 3" rodeado de partículas retenidas en tamiz 1"	46
Figura 5-10. Equipo de carga puntual	47
Figura 5-11. Restricciones geométricas en ensayo de carga puntual (ASTM D5731-08)	49
Figura 5-12. Modos de falla aceptados (a) (b) (c) y rechazados (d) (ASTM D5731-08).	50
Figura 6-1. Resultados ensayo triaxial de gran escala en material PES	52
Figura 6-2. Resultados de triaxiales homotéticos convencionales, material PES	53
Figura 6-3. Ensayos en granulometría $D_{max} = 4,75$ [mm] a distintas presiones de confinamiento	54
Figura 6-4. Comparación de curvas de tensión – deformación a 20 [kg/cm ²] de presión de confinamiento, material PES	55
Figura 6-5. Ángulo de fricción secante máximo v/s confinamiento	56
Figura 6-6. Módulo de deformación v/s Confinamiento	57
Figura 6-7. Estimación de ángulo de fricción máximo con envolvente no lineal Material PES	59
Figura 6-8. Parámetro I_s en función del diámetro	60
Figura 6-9. Granulometría post-ensayo $D_{max} = 100$ [mm] y $\sigma = 20$ [kg/cm ²].	61

Figura 6-10. Granulometrías post-ensayos $D_{max} = 25$ [mm].....	62
Figura 6-11. Granulometrías post-ensayos $D_{max} = 12,7$ [mm].....	62
Figura 6-12. Granulometrías post-ensayos $D_{max} = 4,75$ [mm].....	63
Figura 6-13. Rotura relativa de Hardin, material PES	64
Figura 6-14. Resultados ensayo triaxial gigante en material PEK.....	65
Figura 6-15. Resultados de ensayos triaxiales convencionales, material PEK	66
Figura 6-16. Ensayos $D_{max} = 4,75$ [mm], material PEK	68
Figura 6-17. Comparación de curvas de tensión – deformación a 20 [kg/cm ²] de confinamiento	69
Figura 6-18. Ángulo de fricción máximo v/s confinamiento, material PEK	70
Figura 6-19. E_{50} v/s confinamiento, material PEK	70
Figura 6-20. Ejemplo de Envolvente no lineal De Mello (1977), material PEK.....	72
Figura 6-21. Envolvente no lineal p-q, material PEK.....	73
Figura 6-22. Parámetro I_s en función del diámetro	74
Figura 6-23. Granulometría post-ensayo $D_{max} = 150$ [mm] y $\sigma_3 = 20$ [kg/cm ²], material PEK.....	74
Figura 6-24. Granulometrías post-ensayo $D_{max} = 25$ [mm].....	75
Figura 6-25. Granulometrías post-ensayo $D_{max} = 12,7$ [mm].....	75
Figura 6-26. Granulometrías post-ensayo $D_{max} = 4,75$ [mm].....	76
Figura 6-27. Rotura relativa.....	77
Figura 6-28. Resultados ensayo triaxial de gran escala en material combinado.....	78
Figura 6-29. Resultados de ensayos homotéticos, material Combinado.....	79
Figura 6-30. Ensayos en granulometría menor $D_{max} = 4,75$ [mm] a distintos confinamientos, material Combinado	80
Figura 6-31. Comparación de resultados de ensayos triaxiales en muestras de $D_{max} = 100$ [mm] y $D_{max} = 4,75$ [mm], material Combinado	81
Figura 6-32. Ángulo de fricción máximo en función de presión de confinamiento, material Combinado	82
Figura 6-33. Módulo E_{50} en función de presión de confinamiento	83
Figura 6-34. Granulometría post-ensayo de gran escala, material Combinado	85
Figura 6-35. Granulometría post-ensayo en zonas de probeta de gran escala, material Combinado.....	86

Figura 6-36. Partículas retenidas en 3" tras ensayo (zona superior).....	86
Figura 6-37. Partículas retenidas en 3" tras ensayo (zona inferior).....	87
Figura 6-38. Evidencias de rotura (a) Material PES (b) Material PEK (c) pulverización de partícula	87
Figura 6-39. Granulometrías post-ensayo $D_{max} = 25$ [mm].....	88
Figura 6-40. Granulometrías post-ensayo $D_{max} = 12,7$ [mm].....	88
Figura 6-41. Granulometrías post-ensayo $D_{max} = 4,75$ [mm].....	89
Figura 6-42. Rotura relativa de Hardin, material Combinado	89
Figura 7-1. Comparación de caída de ángulo de fricción máximo en materiales (a) $D_{max} = 25$ [mm] (b) $D_{max} = 12,7$ [mm] (d) $D_{max} = 4,75$ [mm]	92
Figura 7-2. Comparación de rotura de partículas en materiales (a) $D_{max} = 12,7$ [mm] (b) $D_{max} = 25$ [mm] (d) $D_{max} = 4,75$ [mm].....	93
Figura 7-3. Rotura relativa de Einav (2007).....	94
Figura 7-4. Ajuste de envolvente no lineal (De Mello, 1977) $D_{max} = 4,75$ [mm] a) PES (b) PEK (d) Combinado	96
Figura 7-5. Ajuste envolvente no lineal p-q, material PEK	97
Figura 7-6. Estimación de resistencia a 20 [kg/cm ²] para las distintas granulometrías homotéticas, material PEK.....	98
Figura 7-7. Estimación de rotura material PES	100
Figura 7-8. Estimación de rotura material PEK	100
Figura 7-9. Estimación de rotura material combinado	101
Figura 7-10. Comparación de resultados, material PES	103
Figura 7-11. Comparación de resultados, material PEK	104
Figura 7-12. Comparación de resultados, material Combinado	105
Figura 7-13. Comparación de rotura con otros materiales	106
Figura 7-14. Comparación de módulo de deformación E50 para (a) PES, (b) PEK, (c) 50/50	107
Figura 7-15. Embudo largo en molde de ensayos de densidad.	108

1 Introducción

En minería de hundimiento masivo, (*block/panel caving*), los materiales quebrados corresponden a conjuntos de bloques sueltos además de gravas e incluso arenas que se generan debido al proceso de fragmentación del macizo rocoso, durante su socavación y hundimiento. En general, estos materiales, luego de desprenderse del macizo rocoso quedan apilados in-situ en columnas de altura variable que sobrepasan los 200 metros en el largo plazo (Moss 2011), y son extraídos desde la base de la columna, específicamente desde puntos de extracción. El tamaño de los bloques que componen este material puede llegar a ser de varios metros, lo cual dificulta su análisis geotécnico. En este sentido, el método de gradación paralela (curvas homotéticas) es una alternativa razonable para estimar la resistencia, compresibilidad y rotura de partículas de estos materiales quebrados.

El método de gradación paralela ha sido propuesto y aplicado con éxito en estudios de suelos granulares gruesos y enrocados (Lowe 1964, Gesche 2002, De la Hoz 2007). Estas investigaciones han mostrado que se logra equivalencia entre los parámetros mecánicos de la muestra gruesa y la escalada. Sin embargo, De la Hoz (2007) y Dorador (2010) señalan que algunos parámetros intrínsecos del material tal como la forma o dureza entre las partículas gruesas y de menor tamaño deben ser equivalentes para una correcta estimación. Besio (2012) además señala que el índice de vacíos de la muestra escalada debería ser mayor a la del material grueso para así utilizar este método de manera eficiente.

A su vez, se ha observado que la rotura de partículas además de depender de la compresibilidad del suelo granular grueso, es controlada por diferentes parámetros como la dureza, forma, tamaño, distribución de tamaños, nivel de esfuerzo, humedad, entre otros (Lee y Farhoomand 1967, Vesic y Clough 1968, Hardin 1985). El fenómeno de la rotura de partículas es particularmente significativo en estos materiales provenientes de extracción minera, ya que las unidades litológicas que pueden tener estos materiales quebrados (especialmente del proyecto PMCHS) corresponderían a

rocas con alteraciones y que no han sufrido algún proceso de desgaste y meteorización física, tal como ocurre en suelos transportados (D'espessailles 2014).

2 Objetivos

Objetivo General:

- Estudiar la efectividad del método de gradación paralela para determinar la resistencia al corte, compresibilidad y rotura de partículas de 3 materiales quebrados provenientes de minería por hundimiento utilizando probetas de 5, 10, 15, 60 y 100 cm de diámetro.

Objetivos Específicos:

- Determinar las propiedades de resistencia de 3 materiales quebrados utilizando el triaxial de grandes dimensiones ($d = 100$ cm y $d = 150$ cm).
- Caracterizar geotécnicamente 3 materiales (Gravas y arenas pobremente graduadas) en cuanto a granulometría, densidades mínimas y máximas, gravedad específica y ensayos de compresión simple a partículas.
- Determinar la resistencia, compresibilidad y rotura de partículas en probetas escaladas mediante ensayos triaxiales CID en base a probetas entre 5 y 15 cm de diámetro y confinamientos entre 1 y 20 kg/cm². Así se podrán comparar estos resultados con los ensayos triaxiales de grandes dimensiones de 100 cm y 60 cm de diámetro.
- Proponer un modelo de predicción de rotura para muestras de mayor tamaño mediante de muestras escaladas.
- Analizar el comportamiento tensión deformación y cambio volumétrico de estos materiales.

3 Revisión Bibliográfica

3.1 Resistencia al corte de los suelos granulares gruesos

A fin de utilizar materiales granulares gruesos en obras de ingeniería civil es necesario caracterizar sus propiedades de resistencia. Distintas formas se han propuesto para modelar la resistencia al corte de un suelo, siendo la forma más común la utilización del criterio Mohr-Coulomb el cual corresponde a una envolvente de falla lineal. Según este criterio en la resistencia de un suelo existe una componente de cohesión del suelo (c) y una componente de fricción ϕ , la cual es proporcional al esfuerzo normal sobre la superficie (σ).

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

En los suelos granulares se ha observado que la componente de cohesión es prácticamente nula, aunque se puede observar que para tensión normal nula existe resistencia al corte lo cual puede ser explicado por el fenómeno de trabazón mecánica o interlocking (Mitchell 1993).

Por otro lado, al parámetro de fricción aportan principalmente los fenómenos de fricción pura entre partículas, dilatación, y reacomodo (Rowe 1962) entre otros, como se puede observar en la Figura 3-1 (Mitchell 1993).

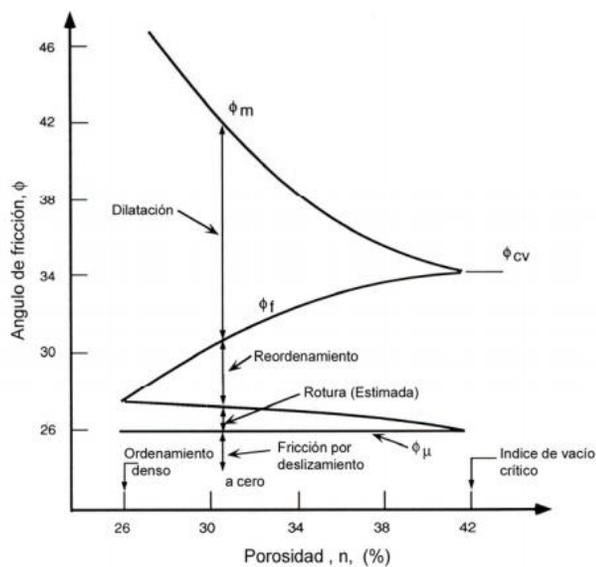


Figura 3-1. Componentes del ángulo de fricción (Mitchell, 1993)

De los resultados de estudios en suelos granulares gruesos en la década de 1960 (Marsal et al. 1965) se ha observado que el comportamiento de resistencia resulta diferente a la recta del criterio Mohr-Coulomb, ya que al aumentar la tensión normal la resistencia al corte sufre una degradación influenciada por distintos factores que se discuten más adelante. De esta forma, la envolvente de falla llega a tener una forma curva la cual ha sido modelada por distintos autores como Sarac y Popovic (1985), Indraratna et al. (1998) y Doruk (1991). De Mello (1977) propone la envolvente de falla no lineal para enrocados.

$$\tau = A \cdot \left[\frac{\sigma_n'}{1 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} \right]^b \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Dónde:

A: Resistencia al corte para un esfuerzo normal de 1 [kg/cm²]

b: Parámetro no lineal que indica la degradación de la resistencia

3.2 Propiedades intrínsecas y de estado de los suelos granulares gruesos y su influencia en la respuesta al corte

Las propiedades de un suelo se dividen en aquellas que le son propias y las que dependen de la condición física a la que está sometido (Been y Jefferies 1991). Las primeras son llamadas propiedades intrínsecas mientras las segundas se conocen como condiciones de estado. En este capítulo se revisará la relevancia de estas propiedades en la resistencia al corte.

3.2.1 Tamaño de partículas

La resistencia de una partícula es menor a medida que su tamaño aumenta. Esto se debe a la probabilidad de encontrar defectos en ella al aumentar su tamaño (Griffith 1921). Lo anterior induce la probabilidad de rotura de partículas lo que conlleva la

disminución de la resistencia al corte. Frossard et al. (2013) muestra la relación existente entre la resistencia de la partícula individual y la resistencia del ensamblaje granular, con lo que se puede concluir que para mayores tamaños de partículas se observarán menores resistencias al corte. Sin embargo, la base de datos existente respecto a este punto es limitada debido a que los reportes de ensayos granulares gruesos por lo general no van acompañados de la resistencia individual de las partículas.

La Figura 3-2 muestra la influencia del tamaño en la resistencia de materiales provenientes de roca calcárea (CP) y roca pizarra de cuarcita (STV) de tamaños máximos 40 mm (CP1 y STV1) y 160 mm (CP2 y STV2), como al disminuir el tamaño máximo de partícula aumenta el ángulo de fricción máximo.

Los estudios de Frossard et al. (2013) y Ovalle et al. (2014) presentan un método para incluir el efecto de escala integrando la teoría de resistencia individual de partículas en función del tamaño (Weibull 1951) y la envolvente no lineal de un suelo.

Otros autores como Marachi et al. (1972) y Marsal (1973) también concluyeron que a mayor tamaño de partículas se tendrá menor resistencia al corte.

La influencia del tamaño será más evidente en aquellos materiales que provengan de rocas con gran cantidad de vetillas e imperfecciones, en contraste por ejemplo con partículas fluviales.

En resumen, se espera que para mayores tamaños de partículas en materiales quebrados, la tendencia sea una menor resistencia al corte.

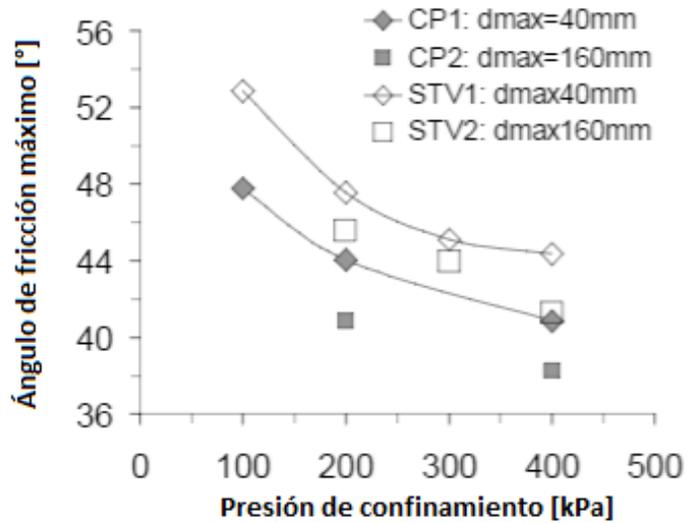


Figura 3-2. Ángulo de fricción máximo para dos Dmax y distintas presiones de confinamiento (Ovalle et al. 2014)

3.2.2 Forma de partículas

Una de las alternativas más comunes para analizar la forma de una partícula es compararla visualmente con tablas como la propuesta por Krumbein y Sloss (1963) la cual se muestra en la Figura 3-3. Esta se basa en los conceptos de esfericidad de una partícula y la redondez de sus bordes.

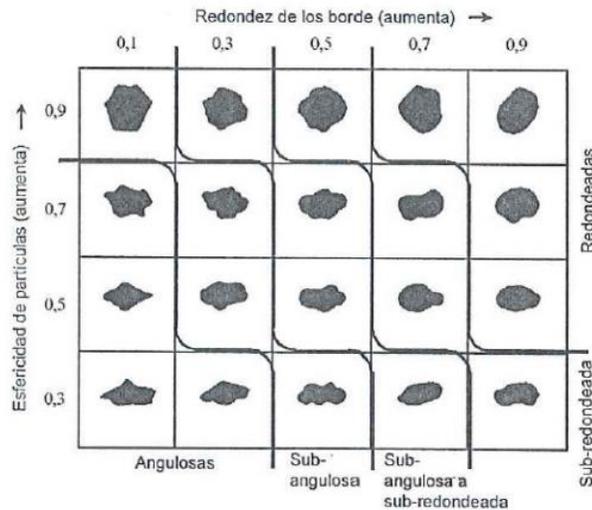


Figura 3-3. Clasificación de forma de partículas Krumbein y Sloss (1963)

Estudios más recientes definen la forma de una partícula a partir de tres parámetros independientes que son forma u esfericidad, redondez de los bordes y la textura de la superficie.

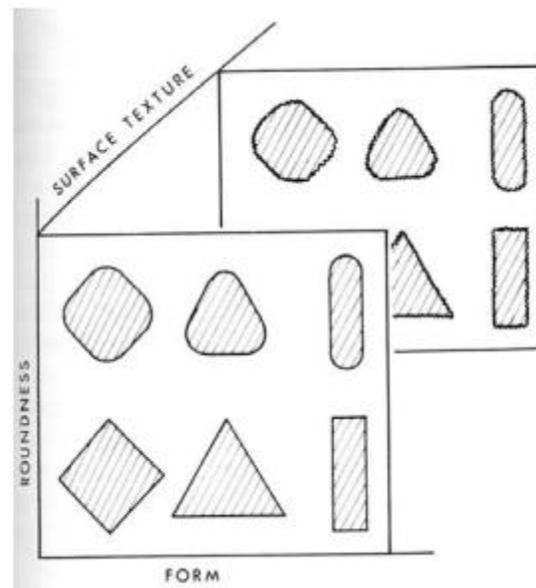


Figura 3-4. Forma, redondez y textura superficial de una partícula. Tomado de Dodds (2003)

Santamarina y Cho (2004) destacan que estos tres parámetros afectan el comportamiento de un suelo. La angulosidad (Figura 3-5) dificulta la rotación entre partículas, la rugosidad impide el deslizamiento y ambos aumentan la dilatancia de un suelo que es un componente importante en el ángulo de fricción. También estos parámetros impiden el movimiento relativo entre partículas, siendo necesaria una mayor energía para provocar deformación. La forma afectará a la dilatancia local y con esto al ángulo de fricción máximo dependiendo de la orientación de su radio de aspecto con relación a la dirección del corte, teniéndose que en un arreglo de partículas elípticas se cumple que $\tan(\Psi) = L_N/L_T \cdot \tan(30^\circ)$ donde L_N y L_T son los largos en las direcciones normal y tangencial, respectivamente (Santamarina y Cho 2004).

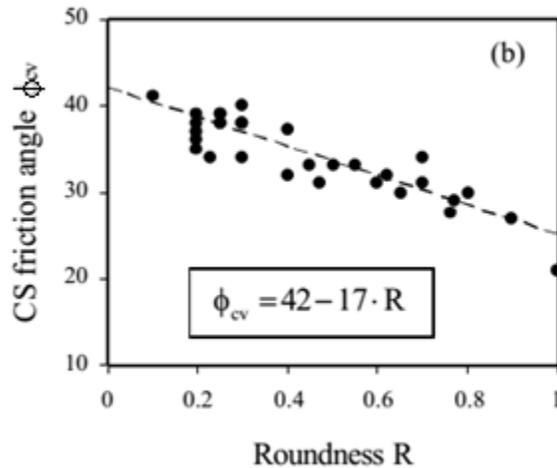


Figura 3-5. Efecto de angulosidad en resistencia al corte (Santamarina y Cho, 2004)

Estudios empíricos muestran que la forma angular y subangular de las partículas tiene un efecto en el aumento de la resistencia al corte. Por ejemplo, los resultados de Holtz y Gibbs (1956) muestran que especímenes con alta angulosidad tienen un efecto significativo en las características friccionales del material.

Lee y Farhoomand (1967) mostraron además un aumento en la compresibilidad de muestras con partículas angulares. Sin embargo, para confinamientos muy altos el efecto de la angulosidad se ve disminuido debido a la rotura de los bordes de los granos.

Marsal (1967) utilizando un confinamiento bajo (1 kg/cm^2) comparó resultados de ensayos realizados a partículas angulosas de El Infiernillo de 7" con partículas redondeadas de igual tamaño y observó que las primeras poseían un ángulo de fricción 10° a 15° mayor a las segundas.

En el punto de la rugosidad, un interesante estudio fue realizado por Vallerga et al. (1957) en el que compararon la resistencia de bolitas de vidrio lisas, con bolitas de vidrio desgastadas con ácido. Estas últimas caracterizadas por una mayor rugosidad en su superficie. Sus resultados mostraron una diferencia en el ángulo de fricción de hasta 8° a favor de las bolitas con superficie rugosa. Es de esperar que el efecto de la rugosidad sea más considerable en materiales con granulometrías de menor tamaño,

debido a un efecto de escala en el cual para un macro bloque puede tener menor importancia.

De lo anterior se concluye que la resistencia al corte aumenta con una superficie rugosa, con la angulosidad y con una forma alargada si su largo mayor coincide con la dirección de la aplicación del corte.

3.2.3 Granulometría

La granulometría determina las fuerzas que dominan a nivel de partículas, el empaquetamiento interpartículas y debido a esto el comportamiento a gran escala de los suelos (Santamarina y Cho 2004). La granulometría suele ser caracterizada por los parámetros coeficiente de uniformidad (C_u), coeficiente de concavidad (C_c) y diámetro superior al 50% (D_{50}).

Holtz y Gibbs (1956) mostraron que en suelos fluviales la combinación de grava y arena afectaba la resistencia máxima de forma que al incrementar la cantidad de gravas la resistencia aumenta hasta un límite. Luego de este umbral un incremento de grava puede mantener la resistencia o disminuirla.

Cea et al. (1994) presentan resultados de material de escolleras en los que simultáneamente estudian el efecto del tamaño máximo y de coeficiente de uniformidad, siendo evidente que un mayor coeficiente de uniformidad genera ángulos de fricción mayores. Lo mismo se observa de los estudios de Al-Hussaini (1983) donde estudiando basalto triturado de densidad media y alta obtuvo que en 5 granulometrías el ángulo de fricción aumenta junto con el coeficiente de uniformidad. Lee y Farhoomand (1967) también mostraron que la compresibilidad y rotura de una muestra mejor graduada es menor.

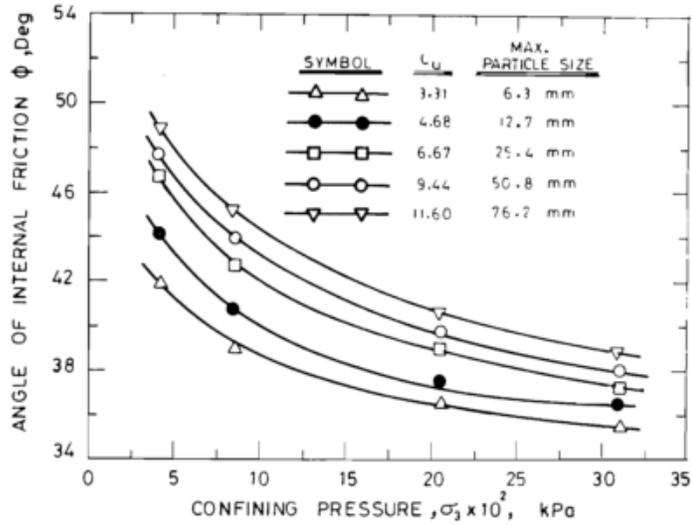


Figura 3-6. Efecto de granulometría en resistencia al corte (Al-Hussaini 1983)

De la recopilación realizada por Ovalle et al. (2014) en ensayos a suelos granulares gruesos se observa claramente la tendencia a aumentar el ángulo de fricción máximo con un aumento del coeficiente de uniformidad.

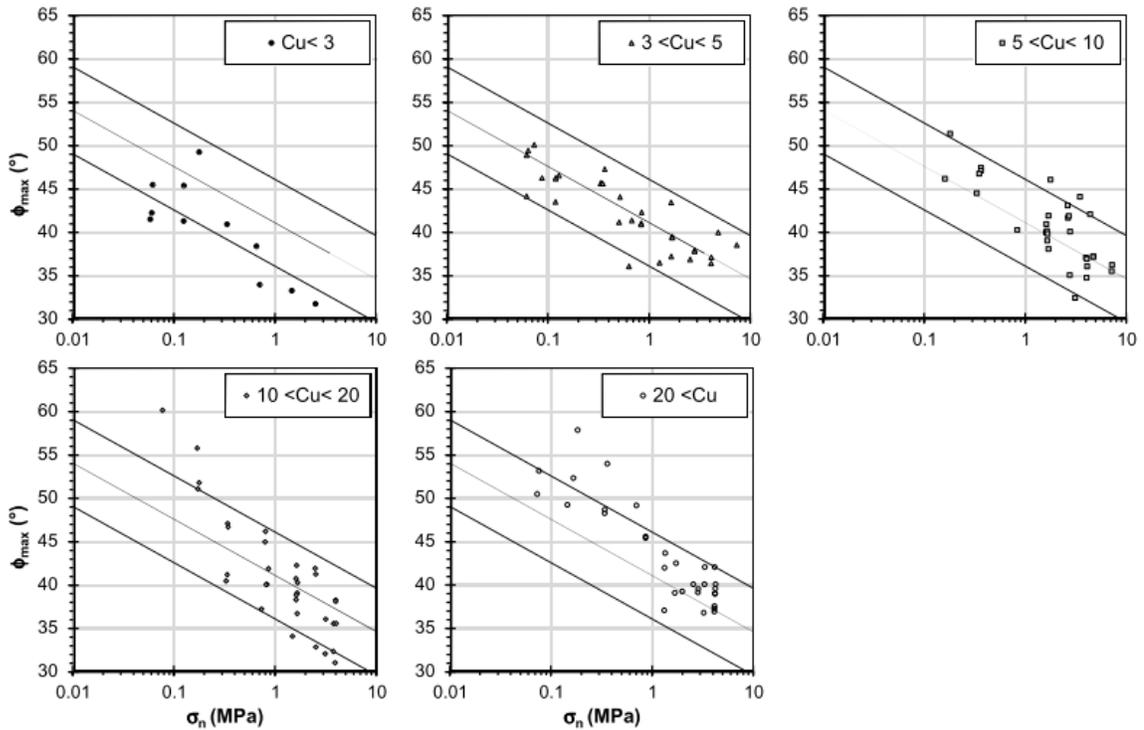


Figura 3-7. Efecto del coeficiente de uniformidad en ángulo de fricción (Ovalle et al. 2014)

Además de lo anterior, es sabido que la granulometría tiene relación con la densidad máxima de un suelo (Kezdi 1979). Siguiendo esta idea, Dorador (2010) analiza los datos de índices de vacíos mínimos y máximos disponibles obteniendo ajustadas correlaciones con el coeficiente de uniformidad, añadiendo la influencia del tamaño de partículas en la densidad mínima.

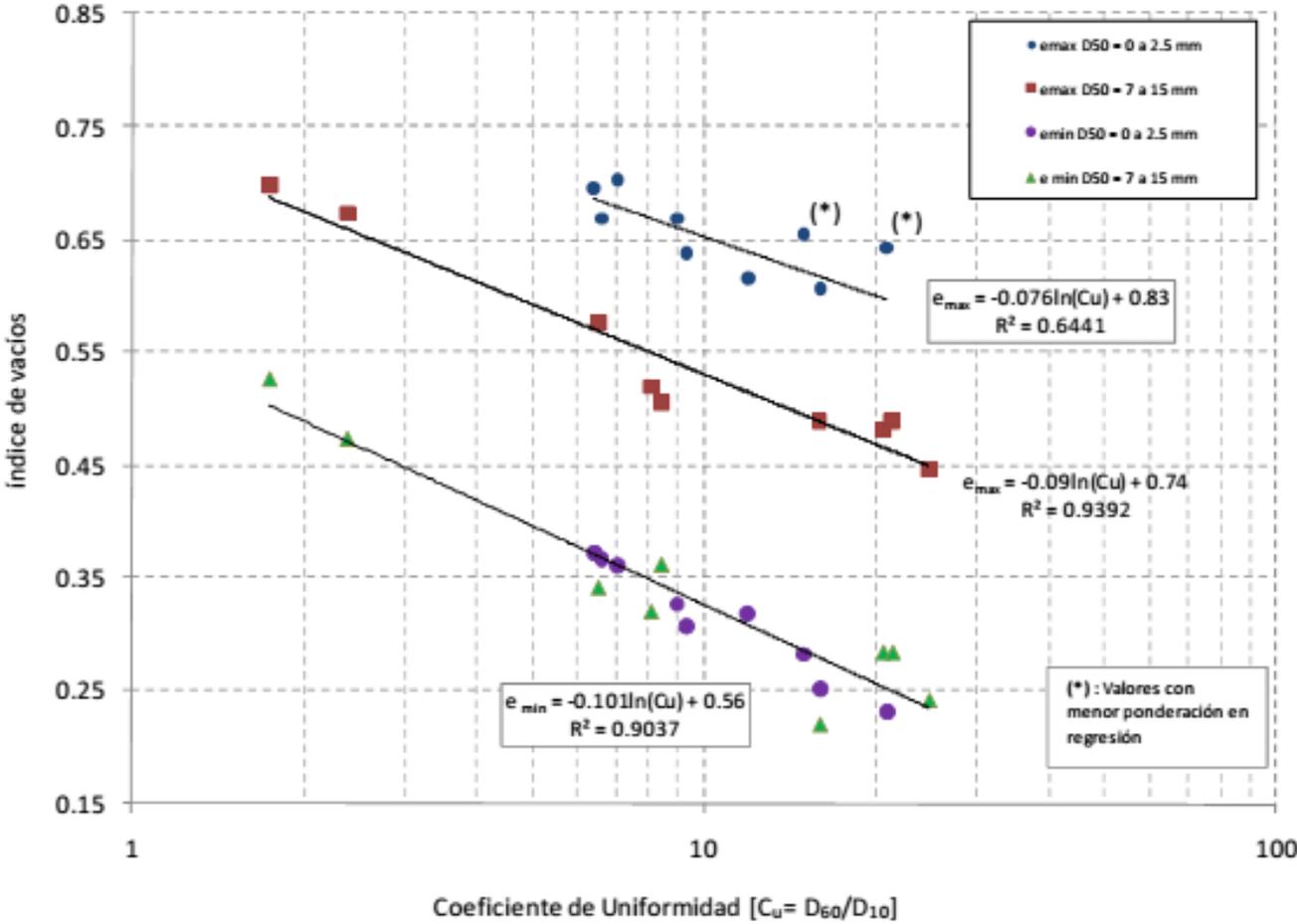


Figura 3-8. Relación entre índice de vacíos y Cu (Dorador 2010)

A partir de lo anterior se concluye que un menor coeficiente de uniformidad de la granulometría disminuye la resistencia al corte y aumenta la compresibilidad.

3.2.4 Índice de vacíos y densidad relativa

En la literatura técnica relacionada a ensayos de suelos granulares gruesos existe escasa información acerca de la densidad relativa de estos, debido principalmente a la dificultad de estimar los parámetros de densidad mínima y máxima.

Ante esta situación, en la compilación realizada por Ovalle et al. (2014) se incluyó solo el efecto del índice de vacíos percibiéndose la tendencia de un aumento en el ángulo de fricción máximo al disminuir el índice de vacíos como se observa en la Figura 3-9.

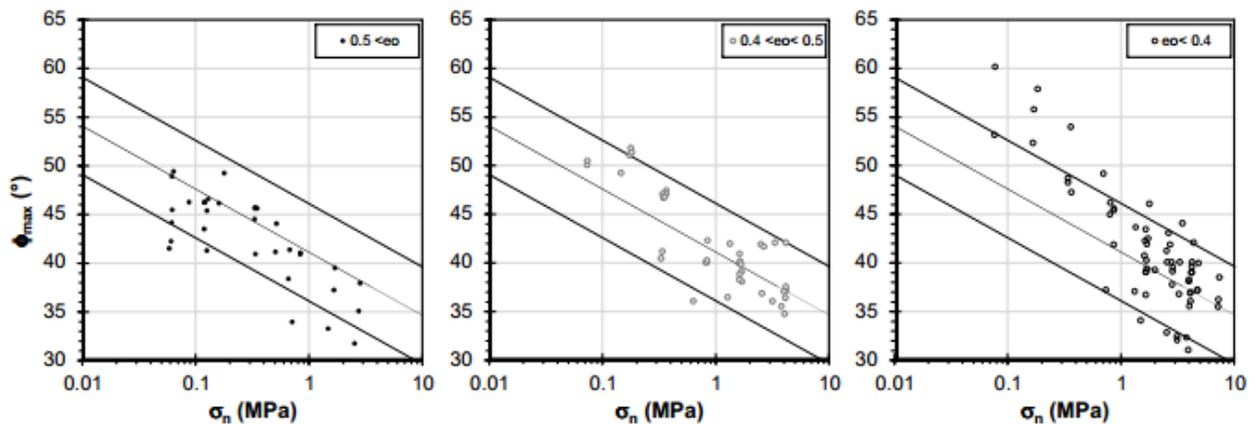


Figura 3-9. Efecto del índice de vacíos en la resistencia al corte (Ovalle et al. 2014)

Santamarina y Cho (2004) indican que un menor índice de vacíos conlleva un mayor número de contacto, frustra la rotación entre partículas (Figura 3-10) y será necesario mayor deslizamiento entre partículas y dilatación para reducir el número de contacto. Debido a esto, se espera un mayor ángulo de fricción máximo para un estado más denso, sin embargo la resistencia residual debiese ser igual tanto para un estado denso como para uno suelto Koener (1970). Sin embargo, en suelos gruesos debido a la rotura de partícula esta condición puede cambiar, como los muestran los resultados de Al-Hussaini (1983) que presenta mayor resistencia en basalto triturado denso en comparación al mismo material con densidad media.

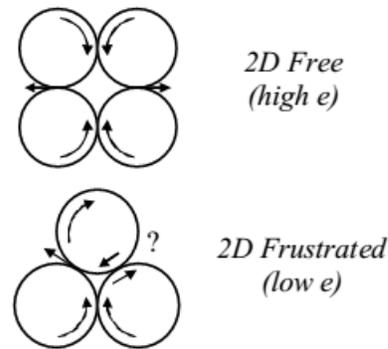


Figura 3-10. Efecto del índice de vacíos (Santamarina y Cho 2004)

En otro estudio, Riquelme y Dorador (2014) recopilan 150 datos de literatura técnica y desarrollan una metodología para estimar el índice de vacíos mínimo (e_{\min}) y máximo (e_{\max}) de una muestra con granulometría de tamaño máximo superior al admisible en laboratorios convencionales. Esto ya que observan en primer lugar la relación lineal entre e_{\min} y e_{\max} , también la dependencia de los índices de vacío límites respecto del coeficiente de uniformidad, y finalmente que el índice de vacíos máximo disminuye levemente con el aumento del tamaño máximo de partículas. A partir de estas relaciones de dependencia generan expresiones matemáticas y tendencias que pueden extrapolar los resultados de índices de vacíos de muestras escaladas a muestras de tamaños máximos de partícula mayores.

De las publicaciones citadas en esta sección se concluye que debido a la influencia de la rotura en suelos gruesos, un estado más denso produce mayores resistencias al corte.

3.2.5 Nivel de tensiones

Recordando que la forma de la envolvente de falla de los suelos granulares gruesos es una curva, es fácil observar el hecho de la dependencia de la resistencia al corte respecto al confinamiento. Los resultados de Lee y Seed (1967) muestran la degradación de la resistencia máxima al aumentar la presión de confinamiento, para una misma densidad. Leps (1970) realizó un compendio de 100 ensayos triaxiales y a partir de ellos generó un gráfico definiendo tres rectas de ángulo de fricción ϕ versus presión normal σ_n definiendo zonas de enrocados de alta resistencia, enrocados

promedios, y enrocados de partículas débiles. Aunque este fenómeno es comúnmente asociado a la rotura de partículas Contreras (2011) ha atribuido esta caída de resistencia a que la ley que relaciona la razón entre la fuerza normal con el roce mediante una constante en los materiales granulares al aumentar las presiones en realidad decrece. En base a lo anterior se recomienda que este tema relacionado a la caída de ϕ en función de σ_n sea mayormente estudiado.

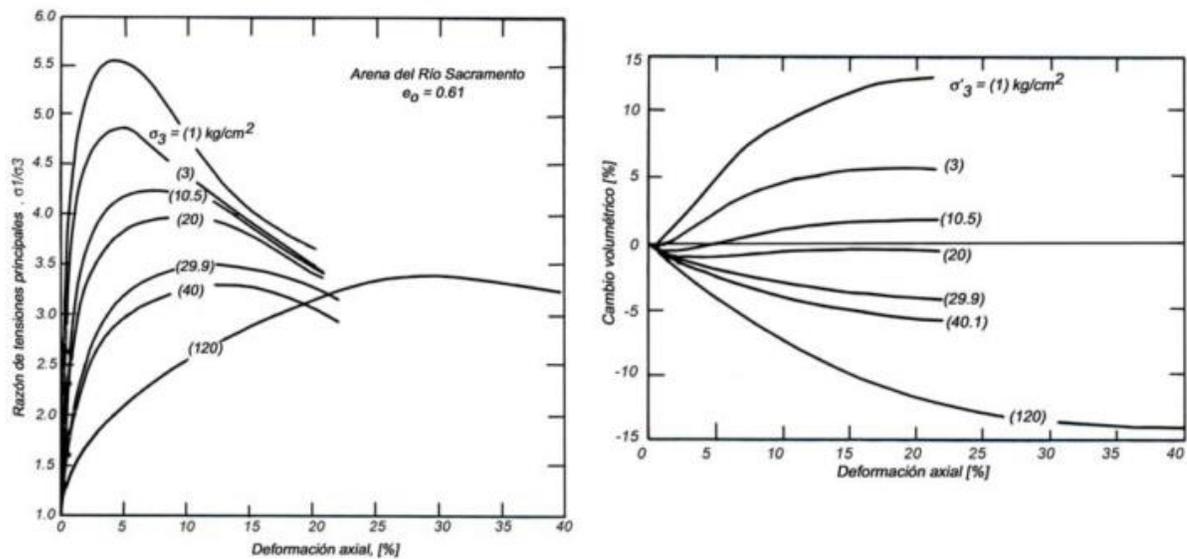


Figura 3-11. Efecto del confinamiento (Lee y Seed 1967, tomado de Verdugo y De la Hoz 2006)

Utilizando la base de datos descrita, Ovalle et al. (2014) ampliaron con resultados recientes de ensayos de grandes dimensiones realizados en Chile y Francia con tamaño máximo desde 100 [mm], actualizando el gráfico original de Leps. Este gráfico se presenta en la Figura 3-12 en el que la leyendo indica la procedencia de los materiales junto con el tamaño máximo de partículas en su granulometría (D_{100}).

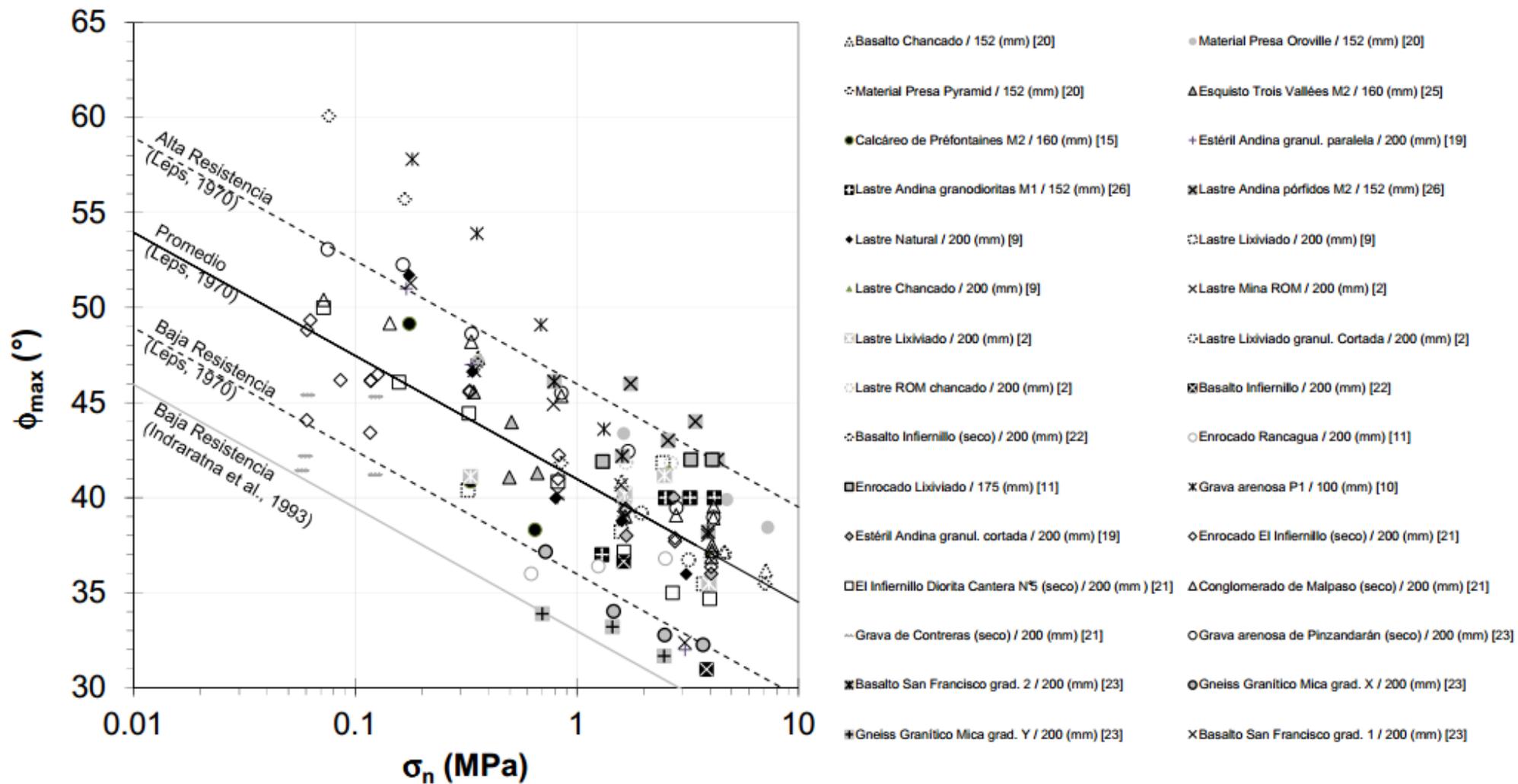


Figura 3-12. Resultados de ensayos triaxiales CID en suelos granulares gruesos (Ovalle et al. 2014)

3.3 Rotura de partículas

La rotura de partículas en materiales granulares es un proceso mecánico en el cual, tras recibir una cantidad suficiente de energía la partícula original falla dividiéndose en fragmentos. En un arreglo granular las fuerzas se transmiten a través de contactos en los cuales eventualmente se puede transmitir la energía suficiente para provocar rotura.

La rotura de partículas es un factor principal en el comportamiento tensión-deformación de los materiales granulares gruesos debido a que al existir rotura la gradación de la muestra mejora, y con esto la compresibilidad teniendo como efecto un descenso en el ángulo de fricción máximo.

Distintos factores afectan la cantidad de rotura existente en un ensayo triaxial, algunos de los cuales ya fueron mencionados en la sección anterior. En esta sección se añadirán resultados de estudios enfocados a los parámetros críticos que afectan la rotura, se explicarán los mecanismos de rotura y finalmente se presentarán algunos métodos para cuantificar la rotura que existen en la literatura.

Un estudio clásico de los parámetros que afectan la rotura es el presentado por Lee y Farhoomand (1967) en el cual concluye que la rotura aumenta junto con los siguientes parámetros:

- Tamaño de partículas
- Angulosidad
- Uniformidad
- Tiempo
- Estado de tensión anisotrópico (aumento de $K_c = \sigma_1/\sigma_3$)

3.3.1 Mecanismos de Rotura

La conminución se define como el proceso en que un material disminuye su tamaño. La partícula al recibir energía puede responder de distintas formas dependiendo de su forma, la cantidad de contactos presencia de planos de debilidad, entre otros factores. La Figura 3-13 (Unland 2007) presenta las distintas formas en que una partícula puede responder, a saber:

- a. Debilitación interna: Producida cuando la energía no es suficiente para generar una falla y generar una grieta
- b. Generación de grietas: la energía no es suficiente para partir completamente la partícula
- c. Rotura diametral: La energía es la suficiente para producir una separación de la partícula en 2 partes o más.
- d. Abrasión: La energía es suficiente solo para desgastar la superficie generando una gran cantidad de finos.
- e. Rotura de bordes y angulosidades: Los bordes al presentar menor área son más propensos a fallar.
- f. Escisión: Es la separación de la partícula en varios pedazos
- g. Desintegración: La energía es suficiente para desintegrar la partícula.

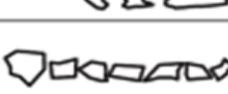
No.	Efecto	Partícula original	Partícula cargada	Resultado
a	Debilitación			
b	Agrietamiento			
c	Rotura diametral			
d	Abrasión			
e	Efecto			
f	Rotura de bordes			
g	Desintegración			

Figura 3-13. Efectos de conminución. Adaptado de Unland (2007)

3.3.2 Métodos para cuantificar la rotura de partículas

Distintos métodos han sido propuestos para medir la cantidad de rotura, siendo uno de los más simples y utilizados el propuesto por Marsal el cual consiste en sumar las diferencias positivas del peso retenido antes (W_{ki}) y después (W_{kf}) del ensayo en las mallas utilizadas para generar la granulometría.

$$\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$Bg = \sum \Delta W_{k(\text{positivos})} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Otros factores han sido propuestos también en la literatura, como son el índice de rotura de Hardin y Asce (1986) el cual se basa en la idea de que a partir de la malla #200 no existirá rotura, siendo entonces el potencial de rotura el área entre la granulometría original y la recta de la malla #200. El índice de rotura de Hardin es la relación entre el área encerrada entre las granulometrías pre y post ensayo (Rotura total) dividida en el potencial de rotura.

Otro parámetro utilizado es el definido por Lee y Farhoomand (1967) en el contexto del funcionamiento de drenes de grava después de haber sufrido rotura de partículas. Este relaciona el diámetro mayor al 15% de la granulometría antes y después de la rotura.

Un resumen de estos parámetros se presenta en la Figura 3-14. Parámetros de rotura

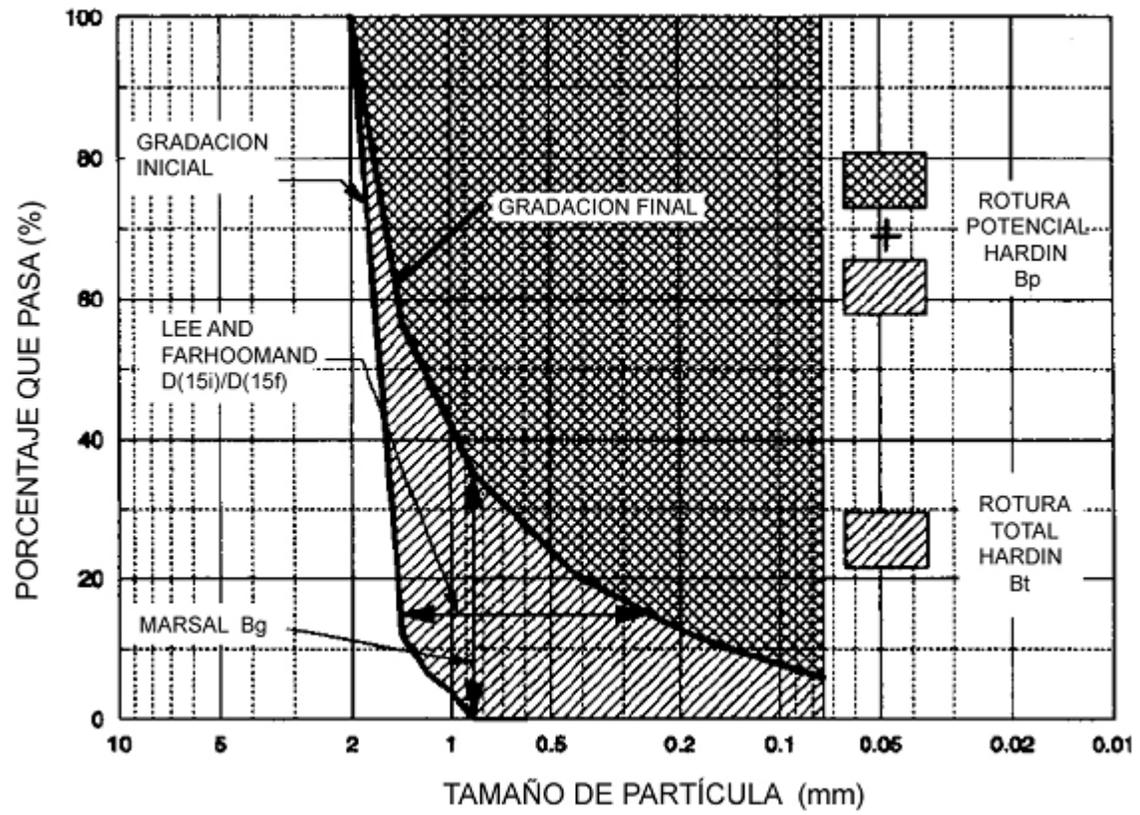


Figura 3-14. Parámetros de rotura (Lade, Yamamuro, y Bopp 1997)

3.4 Método de gradación paralela

Los grandes tamaños de partículas que pueden poseer los suelos granulares gruesos son una limitación para la determinación de la resistencia al corte en laboratorios convencionales. Aunque existen equipos triaxiales de grandes dimensiones, estos son escasos y permiten a lo sumo partículas de 7" (175 mm). Es por esto que diversas metodologías han sido propuestas para estimar la resistencia al corte entre los cuales están el método de corte (Al-Hussaini 1983) método de la distribución cuadrática del tamaño de granos (Fumagalli 1969) método de la matriz (Siddiqi 1984), y el método de gradación paralela. Este último es el más utilizado por los profesionales y es el que será abordado en esta memoria.

El método consiste en tomar la granulometría original de un suelo y desplazarla para obtener un tamaño máximo consistente con la probeta triaxial que se desee usar. De esta forma se obtienen las ventajas de conservar los coeficientes de uniformidad y concavidad de la granulometría original. Además de esto se espera que se mantengan propiedades del suelo como la dureza, forma y peso específico (Marachi, 1969).

La gradación paralela fue utilizada por primera vez por Lowe (1964) en el diseño del proyecto Shihmen Dam. En este, utilizando gravas redondeadas, Lowe tomó la granulometría original y ponderó cada tamaño por un factor de un octavo, obteniendo una nueva granulometría para usar en una probeta de diámetro 15 cm. Lowe tuvo especial cuidado en mantener las propiedades de forma y mineralogía de la muestra original y también consideró la utilización de material bajo malla #200 para modelar el "fino" de la muestra original bajo malla #30.

El fundamento teórico de la metodología propuesta por Lowe radica en que para un set de esferas la deformación y los esfuerzos de contacto máximo son independientes del tamaño máximo de partícula, dependiendo solamente del esfuerzo aplicado y las propiedades intrínsecas del material, como se muestra en la Figura 3-15.

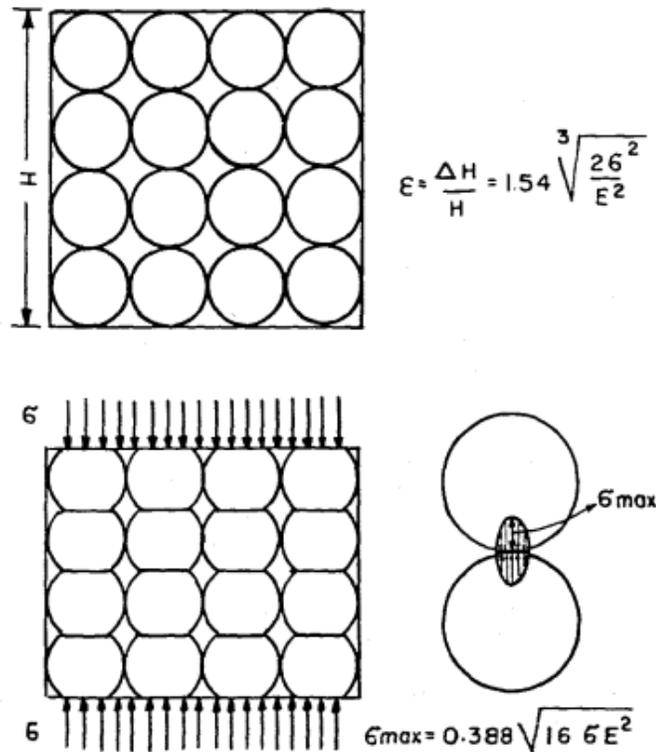


Figura 3-15. Presiones de contacto en un set de esferas bajo compresión (Lowe 1964)

Posteriormente, diversos autores han estudiado el procedimiento, entre los cuales están Marachi et al. (1972), Thiers y Donovan (1981), Gesche (2002), De la Hoz (2007), Dorador (2010), Stoeber (2012).

3.4.1 Factores que afectan la efectividad de la gradación paralela

A pesar de los buenos resultados de Lowe (1964), las investigaciones posteriores han encontrado que algunos factores alteran la eficacia del método. La influencia de algunos de estos factores es discutida a continuación.

Tamaño y rotura de partículas

Tal es el caso del tamaño de las partículas las que obviamente son reducidas al aplicar un escalamiento. Como se discutió anteriormente, a mayor tamaño se espera encontrar más imperfecciones y por lo tanto se observaría con mayor facilidad rotura de partículas en una muestra macro que en una muestra escalada, influyendo en la resistencia al corte debido a una mayor dilatancia en la muestra de menor tamaño. Estas

imperfecciones también pueden implicar variaciones en el módulo de deformación, que como se observa en la Figura 3-15 está relacionado con las presiones de contacto implicando inmediatamente diferencias entre el material original y el escalado.

Sin embargo, este fenómeno debiese ser menor en materiales isótropos, homogéneos que hayan pasado por procesos geológicos de desgaste, como los suelos aluviales y por el contrario se espera que en suelos frágiles, con presencia de vetillas y meteorización la influencia del tamaño sea notoria. Por ejemplo en los resultados de Gesche (2002) y del material A-1 de De la hoz (2007) no se observa disminución de la resistencia al corte, los cuales se caracterizan por su procedencia fluvial. Por otro lado, Marachi et al. (1972) utilizó probetas de diámetro 75 mm, 300 mm y 900 mm y encontró que la diferencia entre el ángulo de fricción de la probeta más pequeña y la más grande era de hasta 4°, siendo los resultados del escalamiento no conservadores.

Otros estudios, como los de Stoeber (2012) también concluyen que el ángulo de fricción interna disminuye con el aumento del tamaño de las partículas.

Otro caso que contradice la tendencia de las publicaciones es el estudio llevado a cabo por Cea et al. (1994) donde utilizando curvas homotéticas se encuentra que la resistencia aumenta junto al tamaño. Sin embargo en el escalamiento homotético utilizado no se mantiene el coeficiente de uniformidad, lo cual podría explicar los resultados obtenidos.

Forma de partícula

Varadarajan et al. (2003) comparó los resultados de la aplicación de la gradación paralela en suelos de dos presas en la India. El primero correspondiente a un suelo aluvial de forma redondeada y subredondeada mientras el segundo de forma angular y subangular. Sus resultados mostraron que el ángulo de fricción aumentó junto con el tamaño de partícula en el suelo redondeado, mientras para las partículas angulares se observó lo contrario.

Los resultados de De la Hoz (2007) mostraron que para dos tipos de suelo (M-2 y M-3) la resistencia al corte fue correctamente estimada con el método de gradación paralela. Sin embargo, para el material P-1 se obtuvo que la resistencia al corte mejoró junto con

el aumento de tamaño, lo cual fue atribuido a que la forma de las partículas más gruesas eran de forma tabular, y mientras las más pequeñas eran de forma subredondeada. Es interesante que en este caso las mayores resistencias se observa para la granulometría de mayor tamaño.

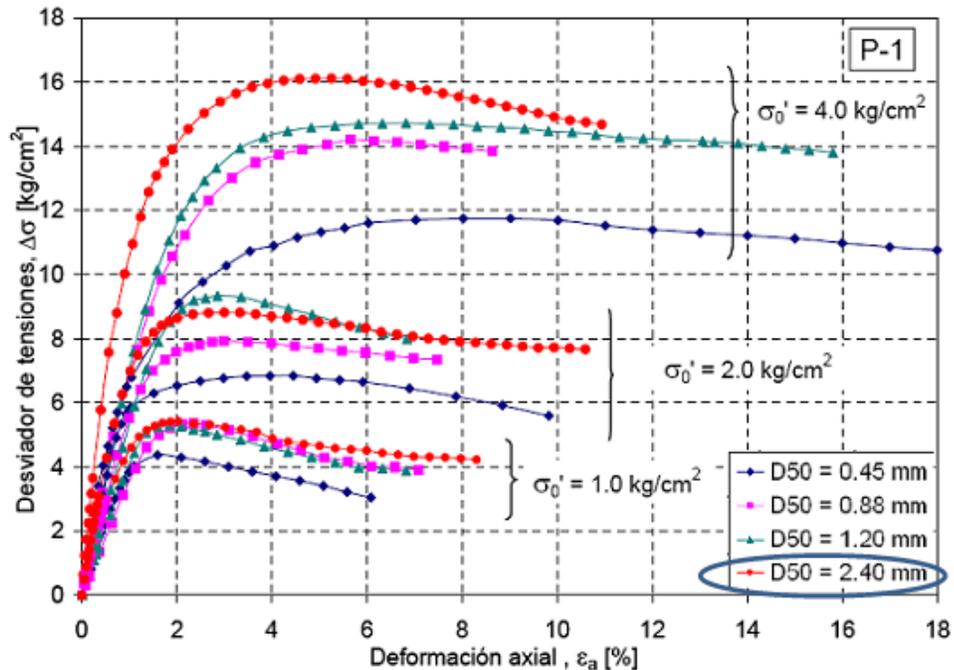


Figura 3-16. Resultados Para material P-1 (De la Hoz 2007)

Dureza

Dorador (2010) analizó el efecto de la dureza en granulometrías escaladas de dos materiales enrocados (alterado y no alterado lixiviado) encontrando que las diferencias en el ángulo de fricción alcanzaban hasta 9° a confinamientos de 1kg/cm². Debido a esto Dorador sugiere que se realicen ensayos de resistencia a las partículas de las muestras original y escalada para asegurarse de mantener la resistencia individual de las partículas.

Como se puede ver en el siguiente gráfico, un máximo mucho más notorio es alcanzado en las partículas duras, acompañado de un proceso de dilatancia. Esta dilatancia es absorbida en los ensayos con partículas blandas probablemente debido a la rotura de partículas.

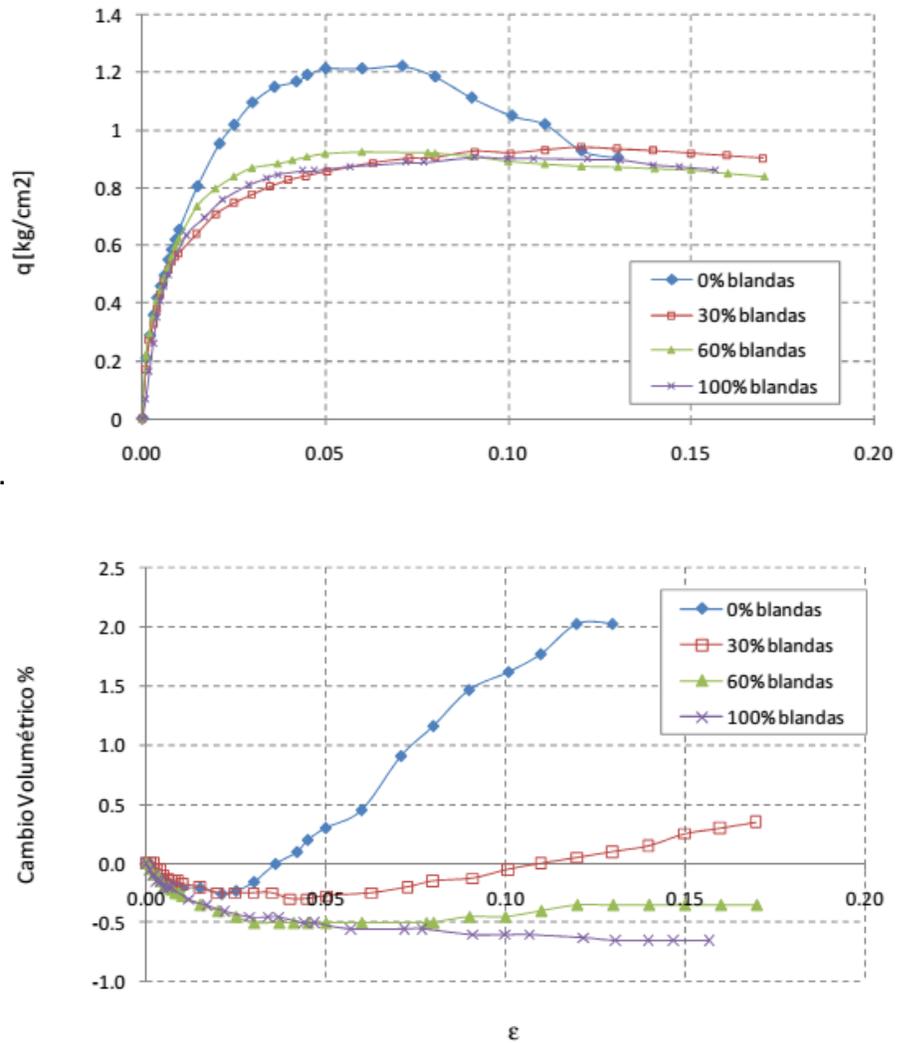


Figura 3-17. Resultados de ensayos para distintas durezas de un mismo material (Dorador 2010)

De la anterior discusión se concluye que en ocasiones la efectividad del método de gradación paralela se verá mermada ya que hay variables que no se mantendrán invariantes al realizar un escalamiento y pueden llegar a afectar notoriamente los resultados de comportamiento de un suelo.

4 Materiales quebrados estudiados

Los materiales utilizados en la investigación provienen de tronaduras de los túneles del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS). En Chuquicamata se contabilizan 12 unidades geotécnicas básicas, siendo cuatro de ellas relevantes en el proyecto subterráneo. En este estudio son utilizadas las unidades geotécnicas básicas pórfido este sericítico (PES) y pórfido este potásico (PEK). Estas han sido estudiados anteriormente por D'Espessailles (2014).

4.1 Material pórfido este sericítico (PES)

D'Espessailles (2014) en su trabajo de título define a este material como “el resultado de la imposición de la alteración sericítica-potásica a la unidad litológica Pórfido Este. Corresponde a una roca de granodiorita a monzodiorita cuarcífera de biotita”. En cuanto a su forma, las partículas son angulares y sub angulares. La gravedad específica de este material es 2,66.



Figura 4-1. Muestra de material PES en distintos tamaños

La predicción de la granulometría in situ es informada por Codelco, siendo el diámetro máximo de partícula de 2,67 [m]. Utilizando el método de gradación paralela se obtienen granulometrías para los distintos tamaños máximos admitidos por las probetas a realizar, considerando la razón entre el diámetro probeta y el tamaño máximo de partícula $D/D_{max} = 6$. Los factores de escala utilizados se muestran en la Tabla 4-1 y las granulometrías original junto con las paralelas se presentan en la Figura 4-2.

Tabla 4-1. Factores de escala, material PES

Tamaño Probeta Diámetro [cm] x altura [cm]	-	60 x 120	15 x 30	10 x 20	5 x 10
D_{max} [mm]	2673	100	25,4	12,7	4,75
Factor de escala respecto a muestra original	-	27	105,2	210,5	562,73
Factor de escala respecto a probeta más grande	-	-	3,9	7,9	21,1

Los parámetros de caracterización de la granulometría se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Caracterización granulométrías, material PES

Probeta [cm] x [cm]	Cu [-]	Cc [-]	D_{max} [mm]	D_{50} [mm]
60x120	1,71	0,96	100	45,83
15x30	1,78	0,97	25,4	8,25
10x20	1,86	0,97	12,7	4,32
5x10	1,87	0,99	4,75	1,63

Para la probeta de dimensiones 60 [cm] x 120 [cm], de densidad 1,6 [ton/m³] debido a la uniformidad de material, angulosidad, y tamaño mínimo de partículas de 1" (25 mm) el punzonamiento a producirse en las membranas de la probeta es muy alto con una gran probabilidad de rotura de esta. Por esta razón se decidió incluir en el borde exterior de la probeta una sección de material PES con partículas desde la malla #40 hasta ¾" separadas en una fracción fina y una de transición, utilizando el criterio de Kezdi (1979) para evitar la migración de finos. El criterio que se utilizó para definir el espesor de la matriz fina fue que este fuera del orden de la reducción de diámetro que ocurre en la etapa de consolidación por el cambio en el índice de vacíos, asumiendo que el cambio en la probeta en esta etapa se mantiene perfectamente cilíndrica, como sugiere la norma ASTM D4767. Para calcular a priori la variación del índice de vacíos en la consolidación se usó como referencia los resultados publicados por Palma et al. (2007) para materiales de lastre los cuales fueron interpolados al confinamiento utilizado.

De esta forma solo el material del núcleo fue considerado como la curva original considerando partículas de tamaño máximo y mínimo de 4" (100 mm) y 1" (25 mm), respectivamente. La granulometría completa junto a la del núcleo, fracción fina y transición se presentan en la Figura 4-3.

Debido a la inclusión de esta zona, el parámetro D_{50} de la granulometría es 31,2 [mm], sin embargo se considerará en este estudio el valor D_{50} del núcleo el cual se muestra en la Tabla 4-2.

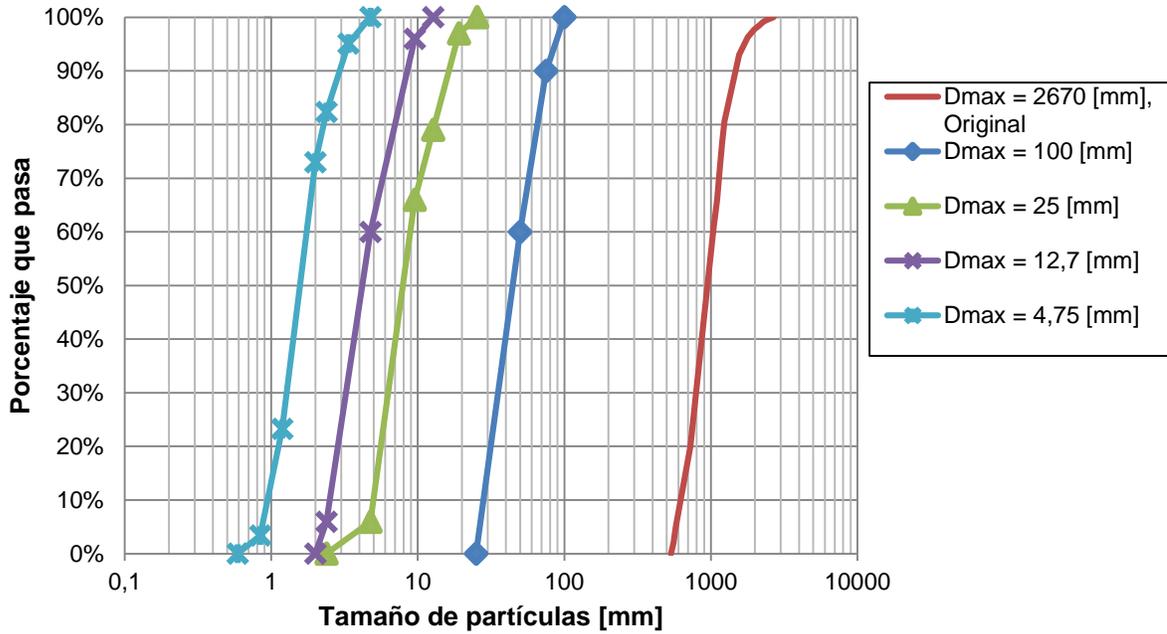


Figura 4-2. Granulometrías original y homotéticas para material PES

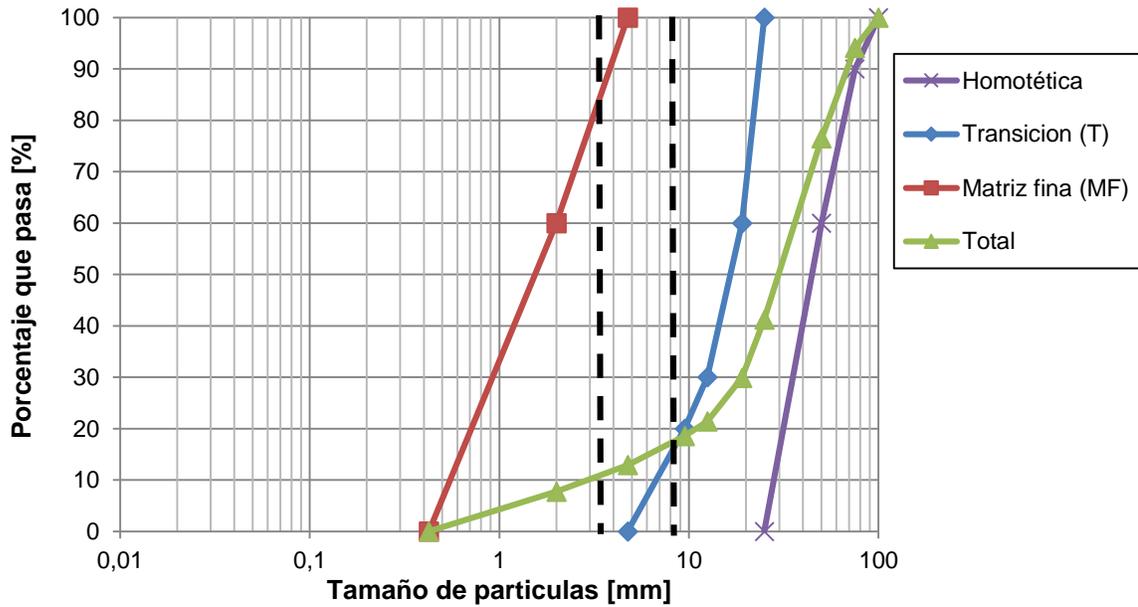


Figura 4-3. Granulometría homotética PES de gran escala, probeta 60x120, $D_{max} = 100$ [mm]

Se determinó en laboratorio las propiedades de densidad mínima y máxima de las granulometrías escaladas de tamaño convencional utilizando los estándares respectivos de la ASTM. Estas se presentan en la Figura 4-4. También se estudió la dureza individual de las partículas en la Sección 6.1.3.

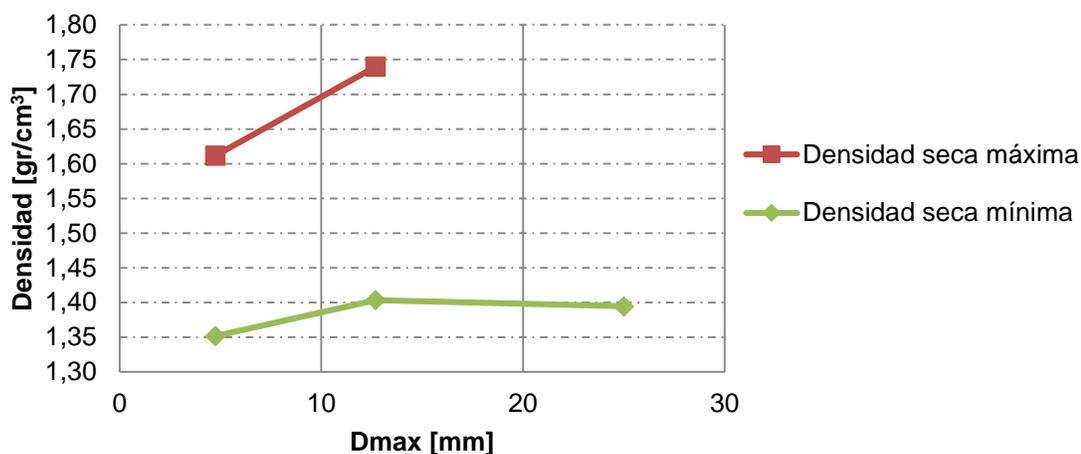


Figura 4-4. Densidades mínima y máxima, material PES

Posterior a la campaña de ensayos de esta investigación se realizaron más ensayos de densidad mínima para corroborar el método que entregue menores valores. Estos resultados se presentan en la Sección 7.5.

4.2 Material pórfido este potásico (PEK)

Según D'Espesailles (2014) “Este material procede de la unidad geotécnica Pórfido Este Potásico, la cual es el resultado de la sobre imposición de la alteración potásica a la unidad litológica Pórfido Este. Alteración potásica implica una introducción de feldspatos potásicos en la roca original.” La gravedad específica de este material es 2,64.



Figura 4-5. Muestra de material PEK en distintos tamaños

La predicción de la granulometría in situ es entregada por Codelco, siendo el diámetro máximo de partícula de 3,37 [m]. Las granulometrías original y homotéticas se presentan en la Figura 4-6. La Tabla 4-3 presenta los factores de escala para cada granulometría paralela, y en la Tabla 4-4 se encuentran los parámetros de cada una de ellas.

Tabla 4-3. Factores de escala, material PEK

Tamaño Probeta [cm] x [cm]	Original	100 x 180	15 x 30	10 x 20	5 x 10
Dmax [mm]	3368	152	25	12,7	4,75
Factor de escala respecto a muestra original	1	22	135	269	792
Factor de escala respecto a probeta más grande	-	1	6	12	36

Tabla 4-4. Caracterización granulometrías, material PEK

Tamaño Probeta [cm x cm]	Cu [-]	Cc [-]	D _{max} [mm]	D ₅₀ [mm]
100x180	2,11	1,05	152,40	47,12
15x30	1,75	0,97	25,40	8,20
10x20	1,75	0,97	12,70	4,10
5x10	1,91	1,04	4,76	1,59

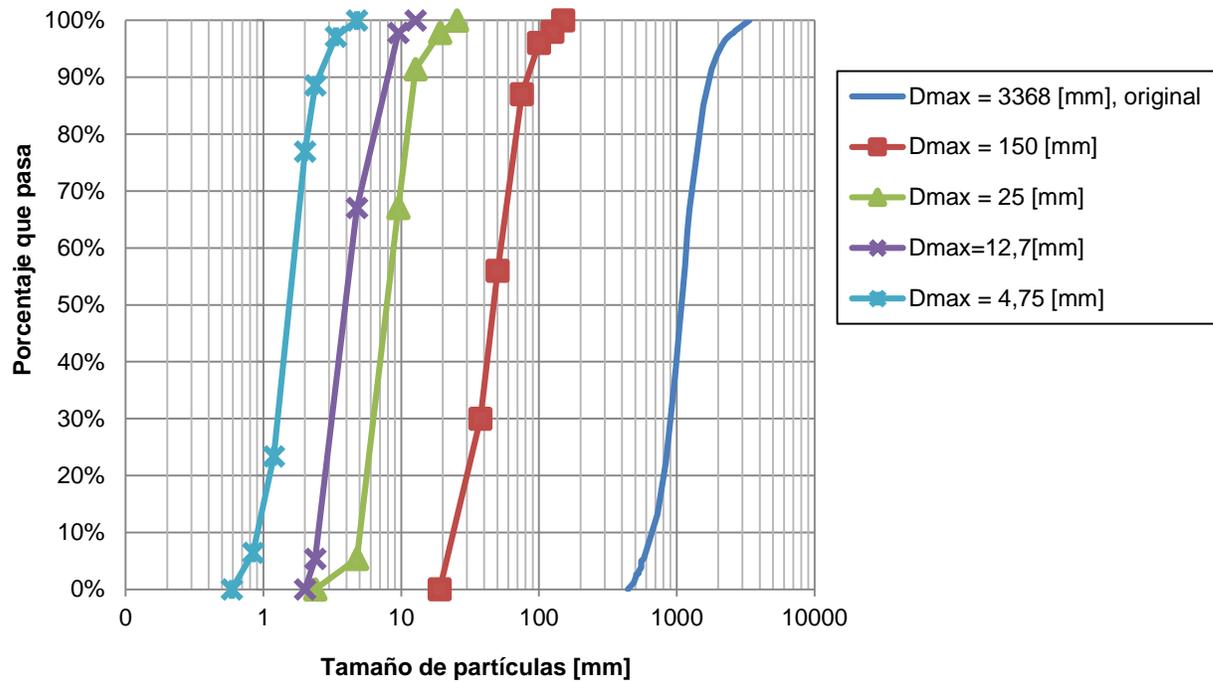


Figura 4-6. Granulometrías original y homotéticas para material PEK

Al igual que para la probeta PES de grandes dimensiones se incluyó una zona de protección de la membrana. Sin embargo debido a las dimensiones de esta probeta (100 [cm] x 180 [cm]) solo se consideró en esta sección el material pasante bajo $\frac{3}{4}$ " sin restricción de tamaño mínimo por lo que el borde tiene una granulometría estimada, mientras que el material del núcleo tuvo tamaños máximos y mínimos de 6" y $\frac{3}{4}$ ", respectivamente . La densidad de esta probeta fue 1,572 [ton/m³]

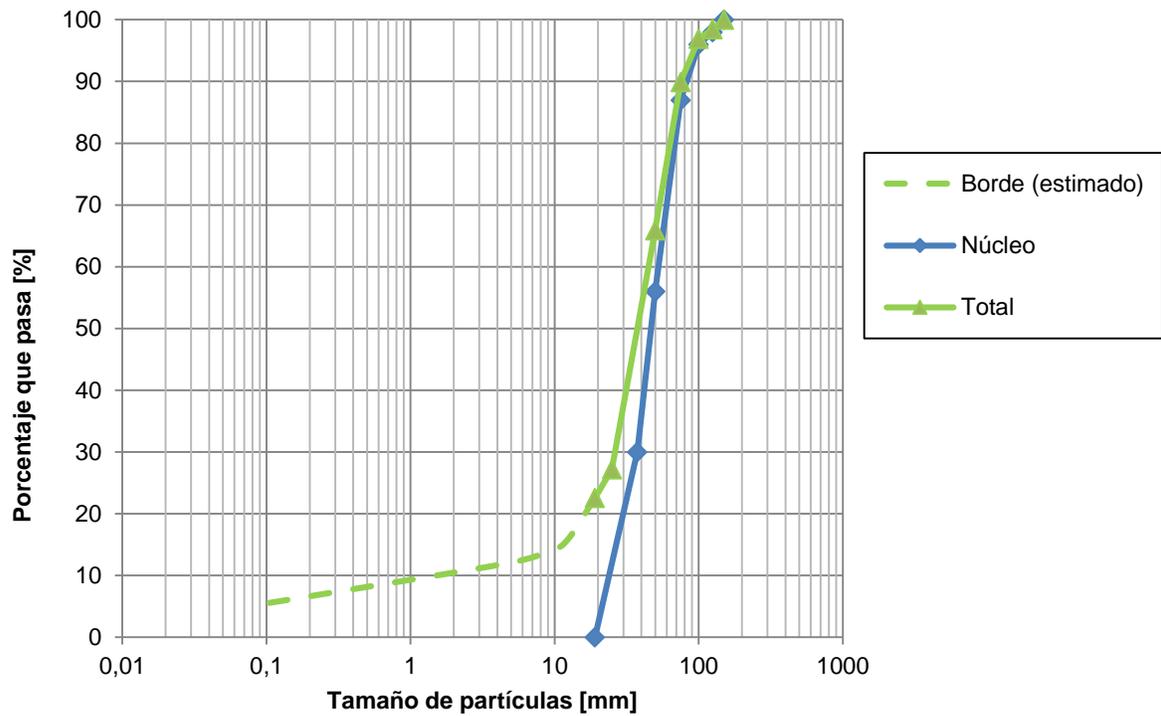


Figura 4-7. Granulometría ensayo de gran escala material PEK, probeta 100x180, material PEK

Para las granulometrías escaladas de tamaño convencional se determinaron las densidades máximas y mínimas usando los estándares respectivos de la ASTM las cuales se presentan en la Figura 4-8. Los ensayos de dureza de partículas se presentan en la Sección 6.2.3.

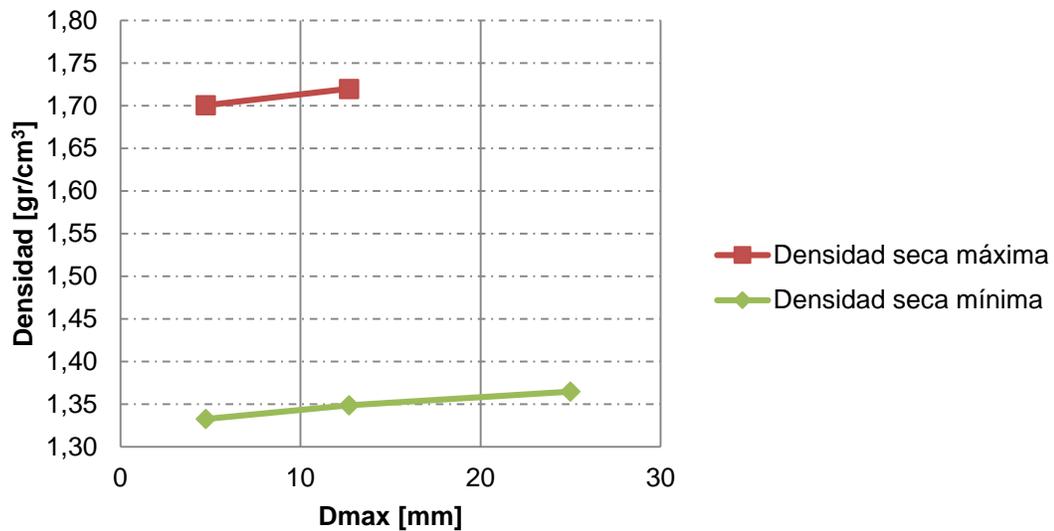


Figura 4-8. Densidades seca mínima y seca máxima, material PEK

Posterior a la campaña de ensayos de esta investigación se realizaron más ensayos de densidad mínima para corroborar el método que entregue menores valores. Estos resultados se presentan en la Sección 7.5.

4.3 Mezcla PES-PEK al 50% en peso

Se utilizó también una mezcla de los materiales PES y PEK combinados al mismo peso y respetando las granulometrías originales de cada material. Las granulometrías para cada tamaño máximo se presentan en la Figura 4-9 y sus respectivos parámetros se muestran en la Tabla 4-5. Al igual que en la granulometría del material PES, se incluyó una zona de material fino y otra de transición las cuales son detalladas en la Figura 4-10.

Tabla 4-5. Parámetros de caracterización de la granulometría material combinado

Probeta [cm x cm]	Cu [-]	Cc [-]	D _{max} [mm]	D ₅₀ [mm]
15x30	1,77	0,97	25,40	8,23
10x20	1,80	0,97	12,70	4,20
5x10	1,88	1,01	4,76	1,61
100x180	1,54	0,96	40,18	100,00

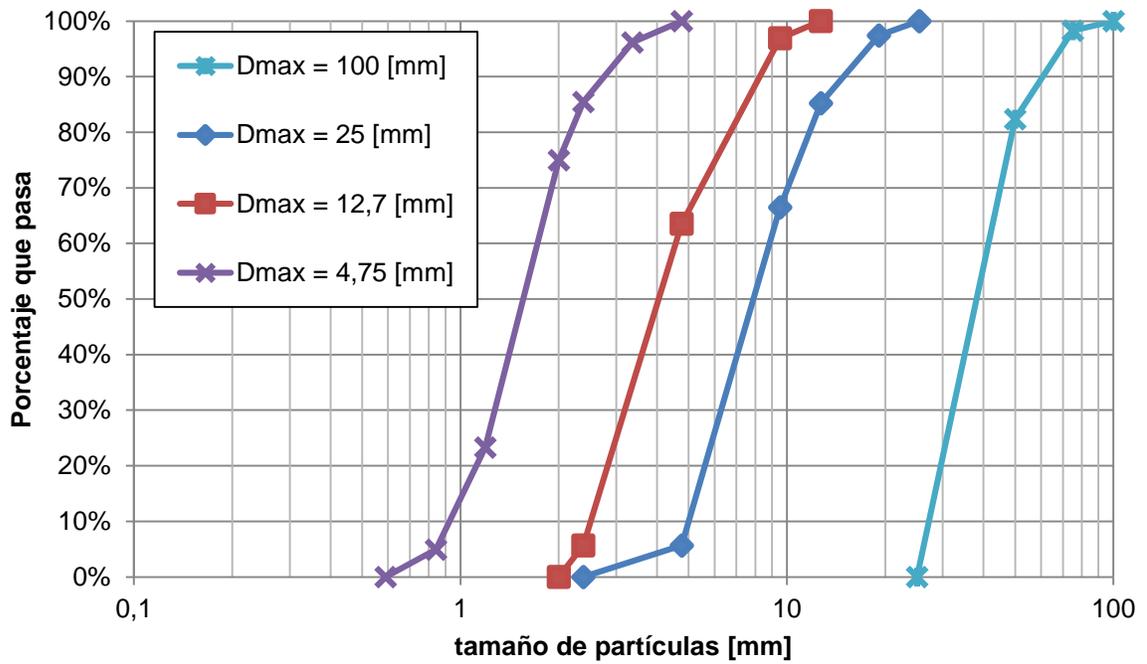


Figura 4-9. Granulometrías homotéticas, material combinado

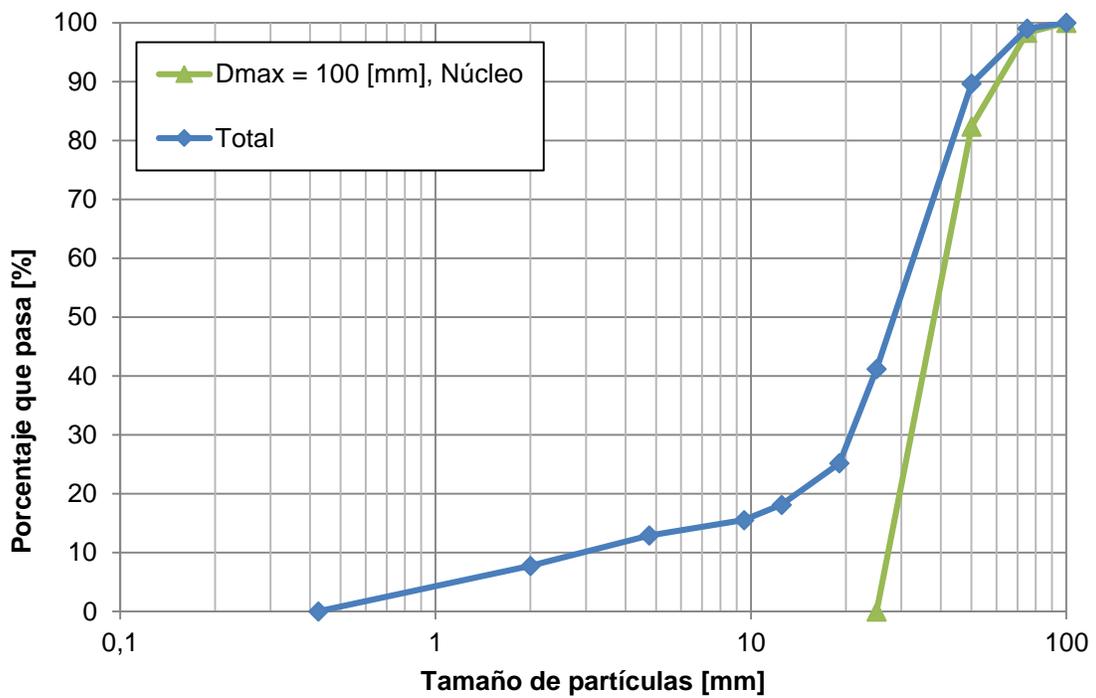


Figura 4-10. Granulometría probeta de gran escala, material combinado

Las densidades seca mínima y seca máxima de las granulometrías de tamaño convencional fueron determinadas siguiendo los estándares de la ASTM y sus valores se presentan en la Figura 4-11.

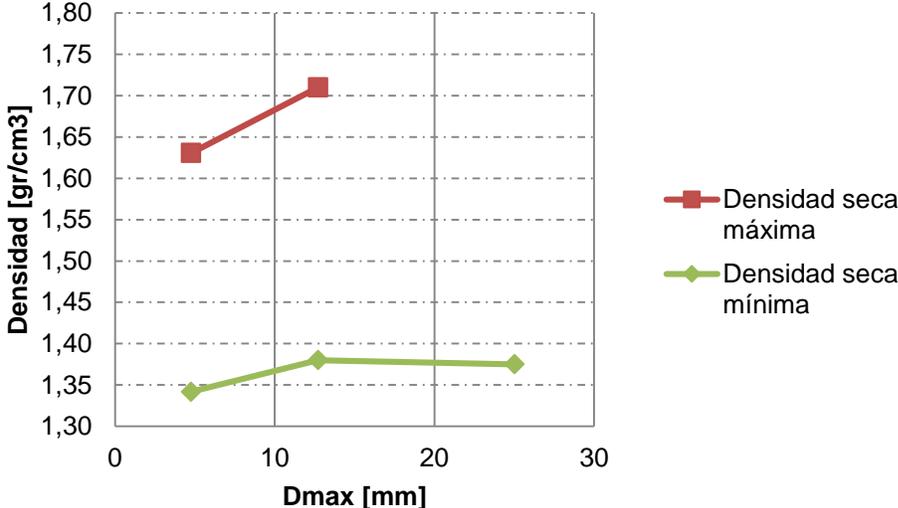


Figura 4-11. Densidades seca máxima y seca mínima, material combinado

5 Equipos triaxiales y metodología de ensayos

5.1 Equipos triaxiales

Se describen en esta sección los equipos utilizados para la investigación, los que corresponden a equipos triaxiales convencionales y el equipo de grandes dimensiones de IDIEM.

5.1.1 Equipos triaxiales convencionales

Los ensayos de tipo convencional fueron realizados en las dependencias del Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile. Los equipos están compuestos de las siguientes partes.

Panel de presiones: Marca ELE Tri-flex 2, con una capacidad de presión total de 7 [kgf/cm²] y buretas para medición de cambio volumétrico de 25 [ml]. Admite dos cámaras simultáneas.

Marco de carga: Marca Humboldt, modelo HM-3000. Resiste una carga admisible de 5 toneladas, aplicando el corte mediante velocidad controlada. La velocidad utilizada en esta investigación fue 0,4 mm/min.

Sensores: Para medir la carga vertical se utilizó un sensor KYOWA de capacidad 10 toneladas. La medición de deformación se realizó con un dial de deformaciones MITUTOYO de 50 mm de rango y precisión de 0,01 [mm]. La presión de poros es medida con un sensor de fabricación propia.

Los ensayos a confinamientos 6 [kgf/cm²] para las probetas de 15 [cm] de diámetro fueron realizadas en IDIEM.

5.1.2 Equipo triaxial de altas presiones

El equipo triaxial de altas presiones se encuentra en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile. Se presentan a continuación algunas de sus características:

- Capacidad máxima de confinamiento 60 [kg/cm²] mediante bomba de triple pistón
- Capacidad máxima de carga en corte de 20 ton
- Admite probetas de tamaños 5 [cm] x 10 [cm] y 10 [cm] x 20 [cm].
- Aplicación de corte mediante deformación controlada con un rango de velocidad de 0,12 a 0,20 [mm/min].
- Deformación axial máxima de 50 [mm]

5.1.3 Equipo triaxial para grandes partículas de IDIEM

El equipo triaxial de grandes partículas de IDIEM fue confeccionado el año 2001 atendiendo a la necesidad de ensayar muestras con un mayor tamaño de partículas. Algunas de sus características se presentan a continuación:

- Capacidad máxima de confinamiento de 30 [kgf/cm²].
- Capacidad máxima de carga en corte de 2000 ton.
- Admite probetas de tamaños 60 [cm] x 120 [cm] y 100 [cm] x 180 [cm].
- Tamaño máximo de partículas de hasta 7" (175 mm).
- Aplicación de corte mediante carga controlada.

La aplicación de la presión de cámara se realiza mediante un motor de triple pistón capaz de entregar una presión de 100 [kgf/cm²] conectado a un estanque de mil litros con el que también se realiza la saturación.

La presión de la probeta es realizada con un compresor de aire conectado sobre un estanque de 500 lts. Este a su vez es pesado con una celda de carga que permite inferir los cambios volumétricos de la probeta.

La carga axial es otorgada por cuatro gatos hidráulicos de 500 toneladas cada uno y con un rango de 40 centímetros.

Las Figuras 5-1 y 5-2 presentan un esquema de la cámara triaxial y del funcionamiento del equipo triaxial de grandes dimensiones según Verdugo et al. (2007), referencia donde se pueden encontrar más detalles.

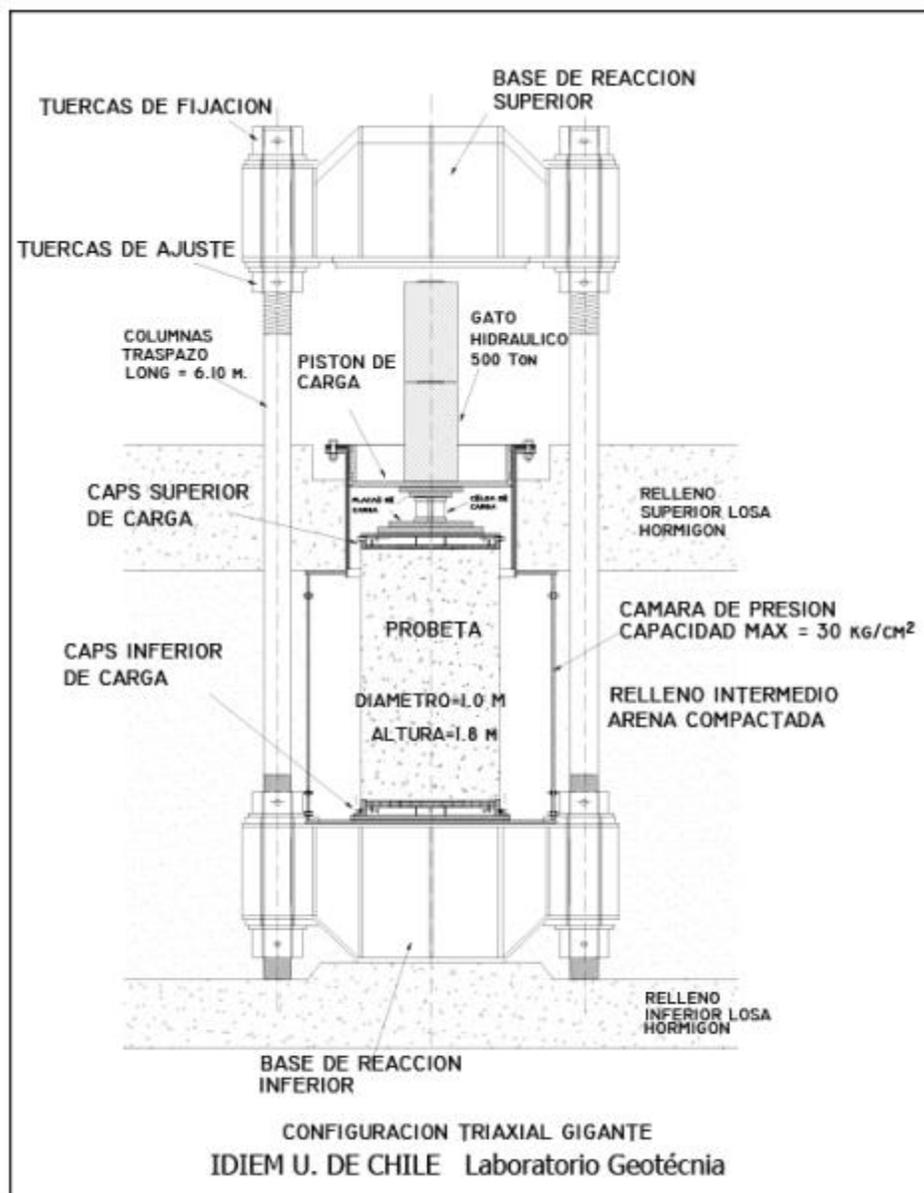


Figura 5-1. Equipo triaxial de gran escala (Verdugo et al. 2007)

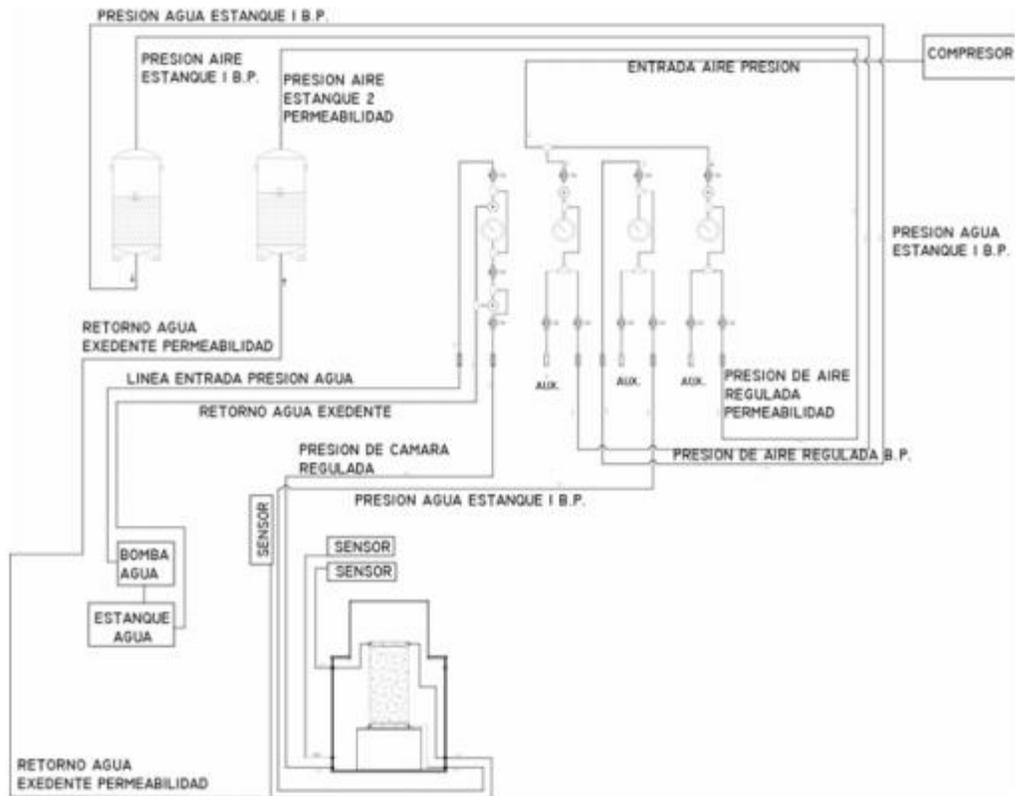


Figura 5-2. Panel de control de triaxial de gran escala (Verdugo et al. 2007)

5.2 Metodología de ensayos

A fin de estudiar la validez del método de curvas homotéticas en la determinación del comportamiento mecánico y rotura de partículas para materiales propensos a rotura se propuso un plan de ensayos que considera 33 ensayos triaxiales escalados de tamaño convencional y 3 ensayos triaxiales escalados de grandes dimensiones los cuales son fundamentados y explicados en esta sección.

5.2.1 Ensayos escalados de tamaño convencional

Para comparar los resultados de granulometrías escaladas, se realizaron ensayos triaxiales de tipo CID en probetas de tamaño 15 [cm] x 30 [cm], 10 [cm] x 20 [cm] y 5 [cm] x 10 [cm] (diámetro x altura). Para cada tamaño se realizó una serie de 1, 3 y 6 [kgf/cm²] con probetas montadas a densidad seca mínima. Además, para las probetas de tamaño 5 [cm] x 10 [cm] se realizan ensayos a altas presiones de hasta 20 [kgf/cm²] para tener una comparación directa con el confinamiento utilizado en el ensayo triaxial

gigante. Esta metodología se realiza para los materiales PES, PEK y Combinado descritos en el capítulo 4. La Tabla 5-1 presenta un resumen de los ensayos realizados.

Tabla 5-1. Plan de ensayos convencionales

Triaxial	Celda [cm]x[cm]	Confinamiento [kg/cm²]	DR [%]	Material
Convencional	5x10	1	0	PES
Convencional	5x10	3	0	PES
Convencional	5x10	6	0	PES
Convencional	10x20	1	0	PES
Convencional	10x20	3	0	PES
Convencional	10x20	6	0	PES
Convencional	15x30	1	0	PES
Convencional	15x30	3	0	PES
Convencional	15x30	6	0	PES
Convencional	5x10	1	0	PEK
Convencional	5x10	3	0	PEK
Convencional	5x10	6	0	PEK
Convencional	10x20	1	0	PEK
Convencional	10x20	3	0	PEK
Convencional	10x20	6	0	PEK
Convencional	15x30	1	0	PEK
Convencional	15x30	3	0	PEK
Convencional	15x30	6	0	PEK
Convencional	5x10	1	0	PES(50%)-PEK(50%)
Convencional	5x10	3	0	PES(50%)-PEK(50%)
Convencional	5x10	6	0	PES(50%)-PEK(50%)
Convencional	10x20	1	0	PES(50%)-PEK(50%)
Convencional	10x20	3	0	PES(50%)-PEK(50%)
Convencional	10x20	6	0	PES(50%)-PEK(50%)
Convencional	15x30	1	0	PES(50%)-PEK(50%)
Convencional	15x30	3	0	PES(50%)-PEK(50%)
Convencional	15x30	6	0	PES(50%)-PEK(50%)
Altas Presiones	5x10	20	0	PES
Altas Presiones	5x10	20	0	PEK
Altas Presiones	5x10	20	0	PES(50%)-PEK(50%)
Altas Presiones	5x10	10	0	PES
Altas Presiones	5x10	10	0	PEK
Altas Presiones	5x10	15	0	PEK

5.2.1.1 Confección de Probetas

Las etapas de la confección pueden resumirse en las siguientes:

- Armado de probeta

La probeta es armada sobre el cap inferior de la celda utilizando un molde de acero montable de tres partes dentro del cual se coloca la primera membrana. El material se coloca en ocho capas de igual peso y altura a fin de asegurar la homogeneidad de la probeta. Es importante que la cantidad de material sea justa para la densidad y volumen buscados de tal manera que no hallan excedentes ni faltantes para no afectar la granulometría.

Cuando se ha colocado todo el material se coloca el cap superior y se sella con un o-ring (anillo de goma que evita filtraciones del agua dentro de la probeta). En este punto se aplica vacío a la probeta a fin de que al sacar el molde la probeta mantenga su forma. Una vez sacado el molde se coloca una falda de saco o goma que previene que en el caso que se rompa la primera membrana no ocurra lo mismo con la siguiente. Tras esto se coloca la segunda membrana y se sella con o-rings. En las probetas 15x30 y 10x20 con presión de confinamiento de 6 kg/cm² se colocaron tres membranas.

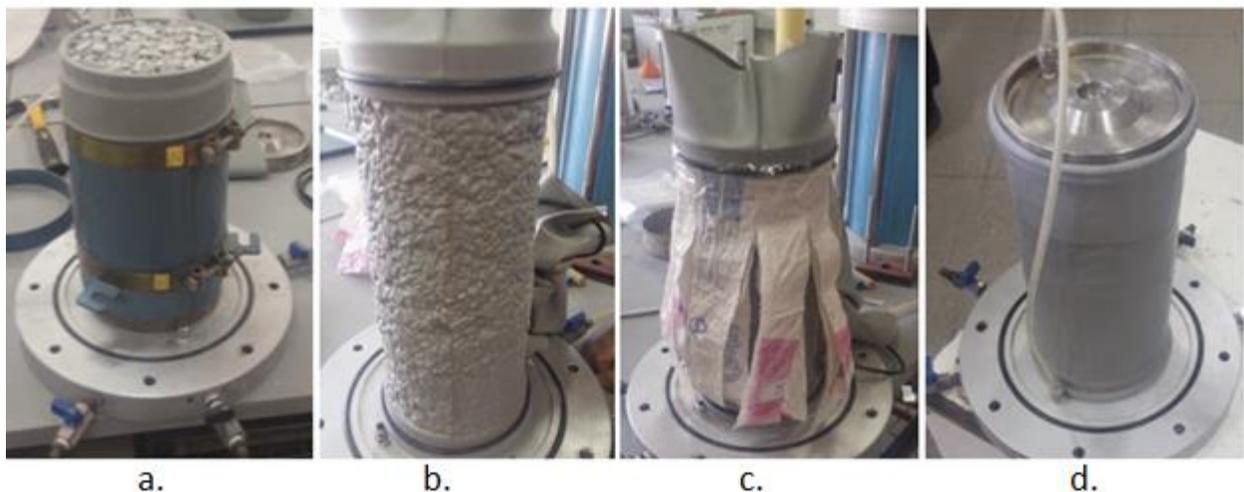


Tabla 5-2. Etapas de armado de probeta 15 x 30. (a) colocación de material. (b) sellado primera membrana. (c) colocación de recubrimiento. (d) colocación y sellado de segunda membrana.

- Saturación y aplicación de confinamiento

Previo a saturar la probeta se deja circular CO₂ por media hora. Luego de esto se procede a saturar con agua destilada y desaireada por las entradas inferiores de la probeta hasta que rebalsa por la superior por lo menos un litro, para asegurar una completa distribución del agua dentro de la probeta.

Con el drenaje de la probeta cerrado se aplica una contrapresión de 2 kg/cm² y una presión de cámara de 2,1 kg/cm². Se entrega a la cámara la presión necesaria para obtener el confinamiento efectivo deseado y en este punto se verifica que la razón entre el aumento de la presión de cámara y el aumento de la presión de poros, conocida como parámetro de Skempton sea superior al 95%.

- Consolidación

Luego de verificar la saturación se abre el drenaje de la probeta, con lo que se inicia la consolidación registrando el cambio volumétrico en el tiempo a fin de obtener la densidad a la que comienza la etapa de corte. La consolidación se da por terminada una vez que se estabiliza el cambio volumétrico. Por lo general los tiempos de consolidación bordearon los 60 minutos.

- Etapa de corte

La etapa de corte es realizada a velocidad controlada donde la velocidad elegida es 0,13% de altura de la probeta por minuto. De esta forma se alcanza el 20% de la deformación en 2 horas con 30 minutos.

Las probetas de 10 [cm] de diámetro se ensayaron a una velocidad de 0,19%.

5.2.2 Ensayos escalados de grandes dimensiones

Se realizaron en IDIEM 3 ensayos de grandes dimensiones, todos a un confinamiento de 20 [kg/cm²] buscando replicar la condición existente en el fenómeno de fragmentación secundaria. Estos se resumen en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Plan de ensayos de grandes dimensiones

Ensayo	Material	Probeta	Confinamiento [kg/cm ²]	Densidad [ton/m ³]
1	PES	60 x 120	20	1,6
2	PEK	100 x 180	20	1,57
3	50/50	60 x 120	20	1,6

5.2.2.1 Ensayo 1, material PES

El ensayo 1 fue realizado en la probeta de dimensiones 60 [cm] x 120 [cm]. La probeta es armada en un molde de acero desmontable colocado sobre el cap inferior que simula una piedra porosa y rodeando la primera membrana de caucho. Esta membrana es protegida interiormente por pedazos de geotextil de 40 [cm] x 40 [cm] los cuales son traslapados levemente. El armado de la probeta se realiza en 6 capas de igual peso y altura, todas de igual granulometría.

Como ya se había adelantado en el capítulo 4, para el montaje de la probeta de material PES se utilizaron dos capas externas para prevenir el punzonamiento y rotura de membrana. Para lograr esto se utilizaron moldes circulares de hojalata colocados durante la preparación de las capas y luego retirados. Se cuidó que el espaciamiento de estos moldes se mantuviera mediante el uso de tubos separadores para que la probeta mantuviera la simetría axial. La disposición de partículas en estas zonas y sus espesores es mostrada en la Figura 5-3 y la Figura 5-4 evidencia su disposición final durante el armado.

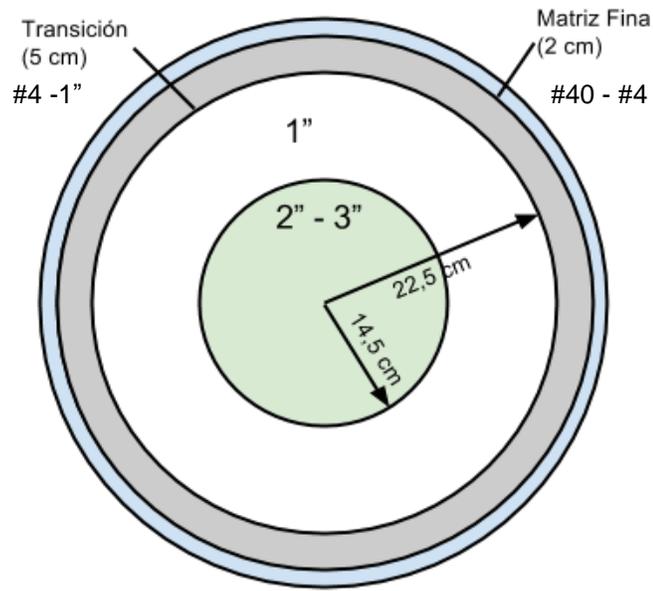


Figura 5-3. Disposición de partículas en ensayo 1



Figura 5-4. Preparación de capa en ensayo 1

Luego de colocado el material, se coloca el cap superior y se sella la probeta con collarines. Se aplica un vacío de $0,2 \text{ kgf/cm}^2$ para mantener la estabilidad de la probeta. Luego de esto se coloca una falda de geotextil a la probeta que cubre el punzonamiento

de las siguientes membranas y se refuerza con geotextil las zonas en las que se observa mayor penetración.

Una nueva membrana es colocada la cual es sellada con silicona roja y collarines. Con esto se termina el armado de la probeta la cual debe ser colocada en la cámara de grandes dimensiones por una grúa (Figura 5-5).



Figura 5-5. (a) Zonas de probeta con punzonamiento (b) Colocación de segunda membrana (c) Probeta terminada

5.2.2.2 Ensayo 2, material PEK

El ensayo 2 con material PEK fue realizado en una probeta de dimensiones 100 [cm] x 180 [cm]. El armado de la probeta es análogo al descrito para el material PES, con la disposición de material que se muestra en la Figura 5-6 cuya disposición final en la probeta se observa en la Figura 5-7.

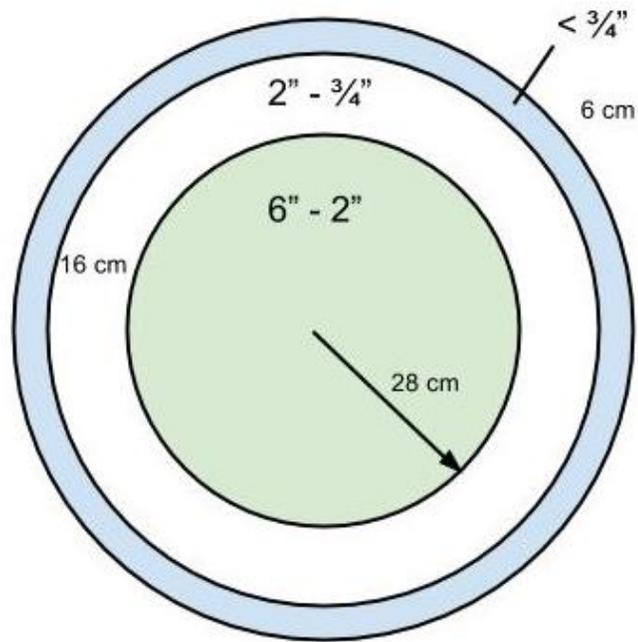


Figura 5-6. Disposición de partículas en ensayo 2



Figura 5-7. Preparación de capa en ensayo 2

5.2.2.3 Ensayo 3, material mezcla 50/50

La probeta contó con dos zonas donde cada una tuvo una disposición distinta de las partículas. La primera zona correspondió a las 3 capas inferiores de armado de la probeta con un total 60 [cm] de altura caracterizadas por la disposición esquematizada en la Figura 5-3 y mostrada en la Figura 5-8. La segunda zona comprendió las 3 capas superiores con un total de 60 [cm] de altura en las que se colocó un solo clasto retenido en 3" (75 mm) rodeado de partículas retenidas en 1" (25 mm) por capa a fin de estudiar el comportamiento de clasto mayor al ser rodeada de partículas de menor tamaño como se muestra en la Figura 5-9.



Figura 5-8. Preparación de capa en ensayo 3



Figura 5-9. Clasto retenido en tamiz 3" rodeado de partículas retenidas en tamiz 1"

5.3 Equipo de Carga Puntual

Para caracterizar el material se realizaron ensayos de resistencia individual a las partículas utilizando el equipo de carga puntual del Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile.

El aparato consiste en un marco de carga de capacidad 60 [kN], conos que transmiten la fuerza a la partícula, un sistema de medición digital de la fuerza aplicada que permite registrar el valor peak al momento de la fractura además de una regla que mide en milímetros la distancia entre los puntos de aplicación de carga (diámetro) que no debe sobrepasar los 85 [mm].



Figura 5-10. Equipo de carga puntual

La metodología seguida es la descrita en el estándar D 5731 – 02 de la ASTM para bloques irregulares.

Se seleccionó un gran número de partículas de entre $\frac{3}{4}$ " a 4" buscando en lo posible que tuvieran forma similar a un ladrillo para poder clasificarlas de mejor manera. Para cada partícula se registra peso y ancho mínimo el cual debe cumplir con las restricciones mostradas en la Figura 5-11.

La partícula es ajustada entre los conos, donde se mide su diámetro. La carga es aplicada sostenidamente mediante una palanca hidráulica buscando que la rotura se genere entre los 10 y 60 segundos. Tras esto la carga peak es registrada.

Con la información de diámetro (D) y ancho (W) se calcula el área y un diámetro equivalente (D_e) con la relación:

$$D_e^2 = \frac{4 * W * D}{\pi}$$

Para cada diámetro equivalente se tendrá entonces una fuerza de falla (P) asociada, con los que se define el Índice de carga puntual no corregido (I_s):

$$I_s = \frac{4P}{\pi D_e^2} [MPa]$$

Para cada rango de tamaños utilizado se eliminaron los dos máximos valores de I_s y los dos mínimos.

Al aumentar el diámetro de las partículas disminuye I_s de manera que al realizar un gráfico en escala doble logarítmica donde el eje de las abscisas corresponda a D_e^2 y el de las ordenadas a P se espera obtener una relación lineal. Con la correlación obtenida se puede obtener el índice de carga puntual para una partícula de diámetro 50 [mm], el cual es conocido como índice de carga puntual corregido, $I_{s(50)}$. Este parámetro es comúnmente relacionado al valor de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de un testigo de roca con la relación:

$$UCS = C \cdot I_{s(50)}$$

Donde C es un factor que depende de las características de la roca y que comúnmente va desde 16 a 24.

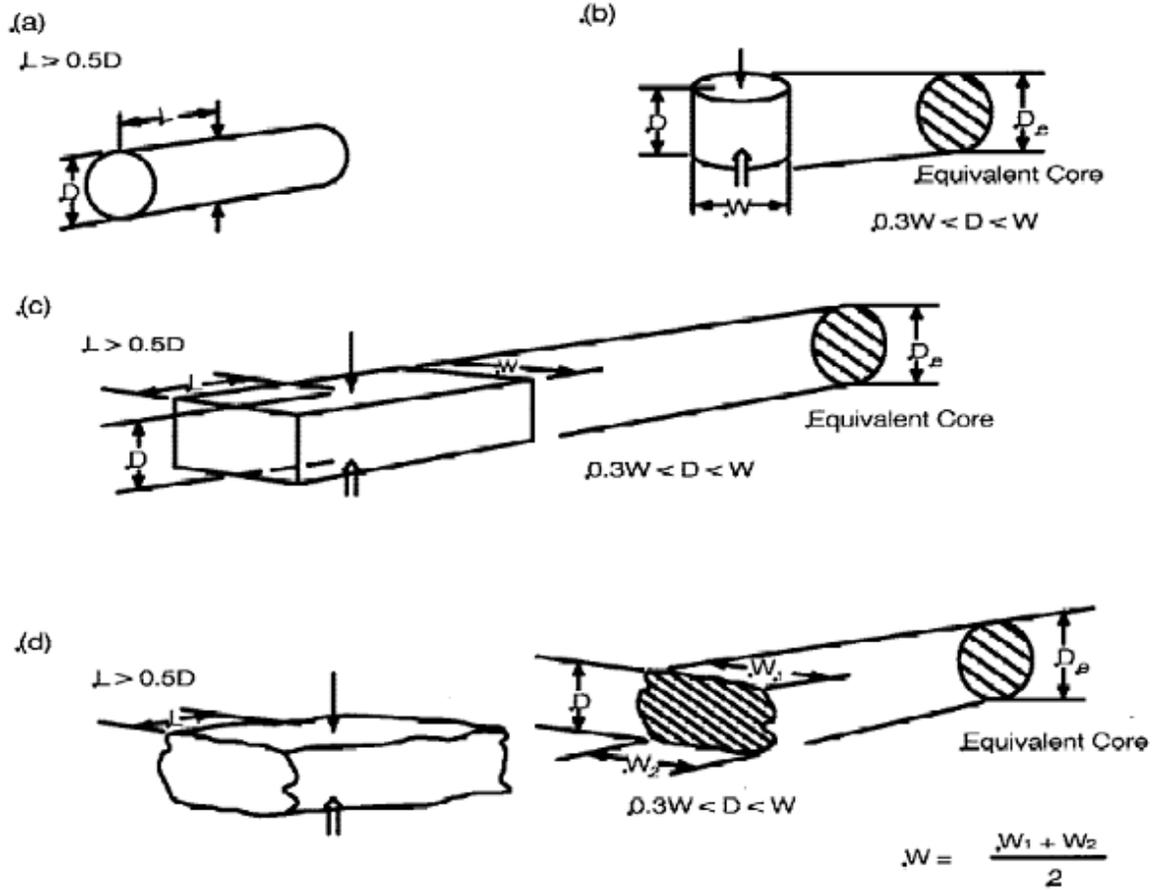


Figura 5-11. Restricciones geométricas en ensayo de carga puntual (ASTM D5731-08)

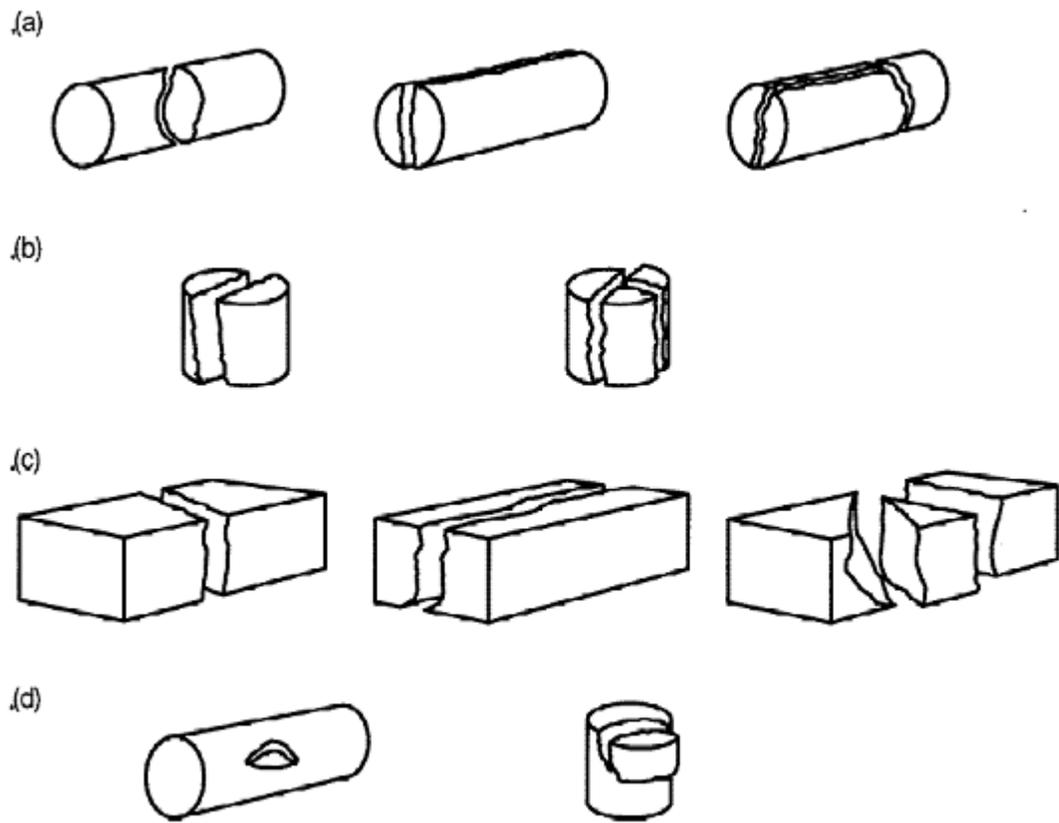


Figura 5-12. Modos de falla aceptados (a) (b) (c) y rechazados (d) (ASTM D5731-08)

6 Resultados

En este capítulo se muestran los resultados del plan de ensayos considerando la respuesta mecánica y rotura de partículas de los ensayos triaxiales de distintos tamaños para los tres materiales definidos en la sección 4, además de la resistencia individual de las partículas.

La definición de los parámetros q y p utilizados en adelante es:

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

6.1 Resultados Material PES

6.1.1 Comportamiento tensión-deformación

Las densidades secas obtenidas luego de la etapa de consolidación se presentan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Densidad seca post-consolidación material PES

D_{\max} [mm]	Densidad seca de confección [ton/m ³]	Densidad seca post consolidación [ton/m ³]				
		$\sigma_3 = 1$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 3$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 6$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 10$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 20$ [kg/cm ²]
4,75	1,352	1,379	1,395	1,409	1,426	1,505
12,7	1,404	1,428	1,432	1,463	-	-
25	1,395	1,428	1,437	1,455	-	-
100	1,600	-	-	-	-	1,790

Se presentan en la Figura 6-1 los resultados obtenidos del ensayo de grandes dimensiones, según el cual se observa un comportamiento de progresivo aumento de resistencia del material el cual no alcanza un estado residual para la deformación alcanzada en el ensayo, como también puede comprobarse en la curva de deformación volumétrica al mantener esta una pronunciada pendiente de contractiva.

En la Figura 6-2 se presentan los resultados para los ensayos convencionales con confinamientos desde 1 [kg/cm²] hasta 6 [kg/cm²] donde se puede observar que las mayores resistencias fueron alcanzadas en todos los casos por la granulometría de tamaño máximo 12,7 [mm], seguidos por las granulometría de mayor tamaño ($D_{max} = 25$ [mm]) y finalizando con las muestras con tamaño máximo 4,75 [mm]. La mayor resistencia de la granulometría $D_{max} = 12,7$ [mm] es acompañada por un marcado comportamiento menos contractivo para los confinamientos de 3 y 6 [kg/cm²] y más dilatante para el confinamiento de 1 [kg/cm²].

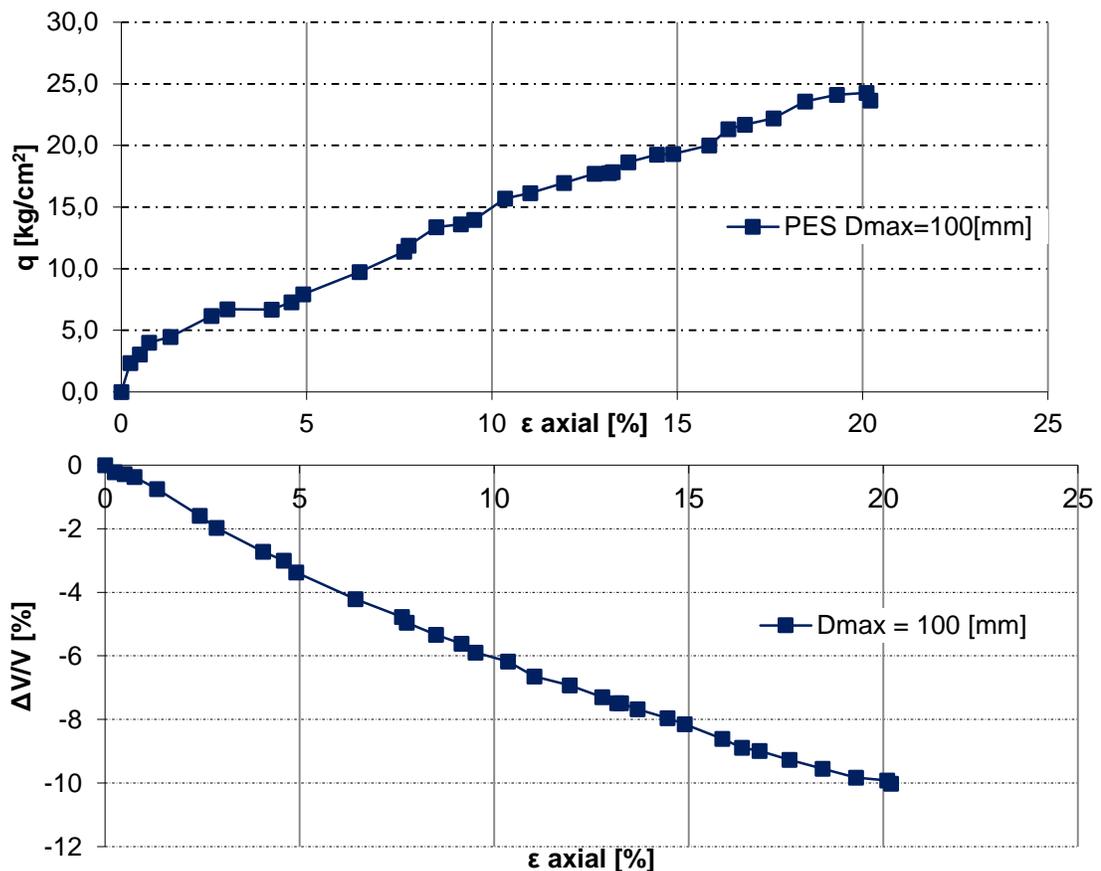


Figura 6-1. Resultados ensayo triaxial de gran escala en material PES

Debido a limitaciones de la celda para probetas de 15 [cm] de diámetro los ensayos de granulometría mayor no pudieron llegar al 20% de deformación axial. Sin embargo, las curvas se pueden extrapolar para completar la deformación y así ser comparadas con las otras granulometrías. Para esto se siguió la metodología empleada por Xiao et al.

(2015) en la que se tiende al estado crítico en la curva de resistencia y deformación volumétrica. Esta extrapolación es representada por una línea discontinua.

Se observa un aumento de la compresibilidad a medida que aumenta el confinamiento, teniéndose para los ensayos a confinamientos de 1 [kg/cm²] la existencia de dilatancia.

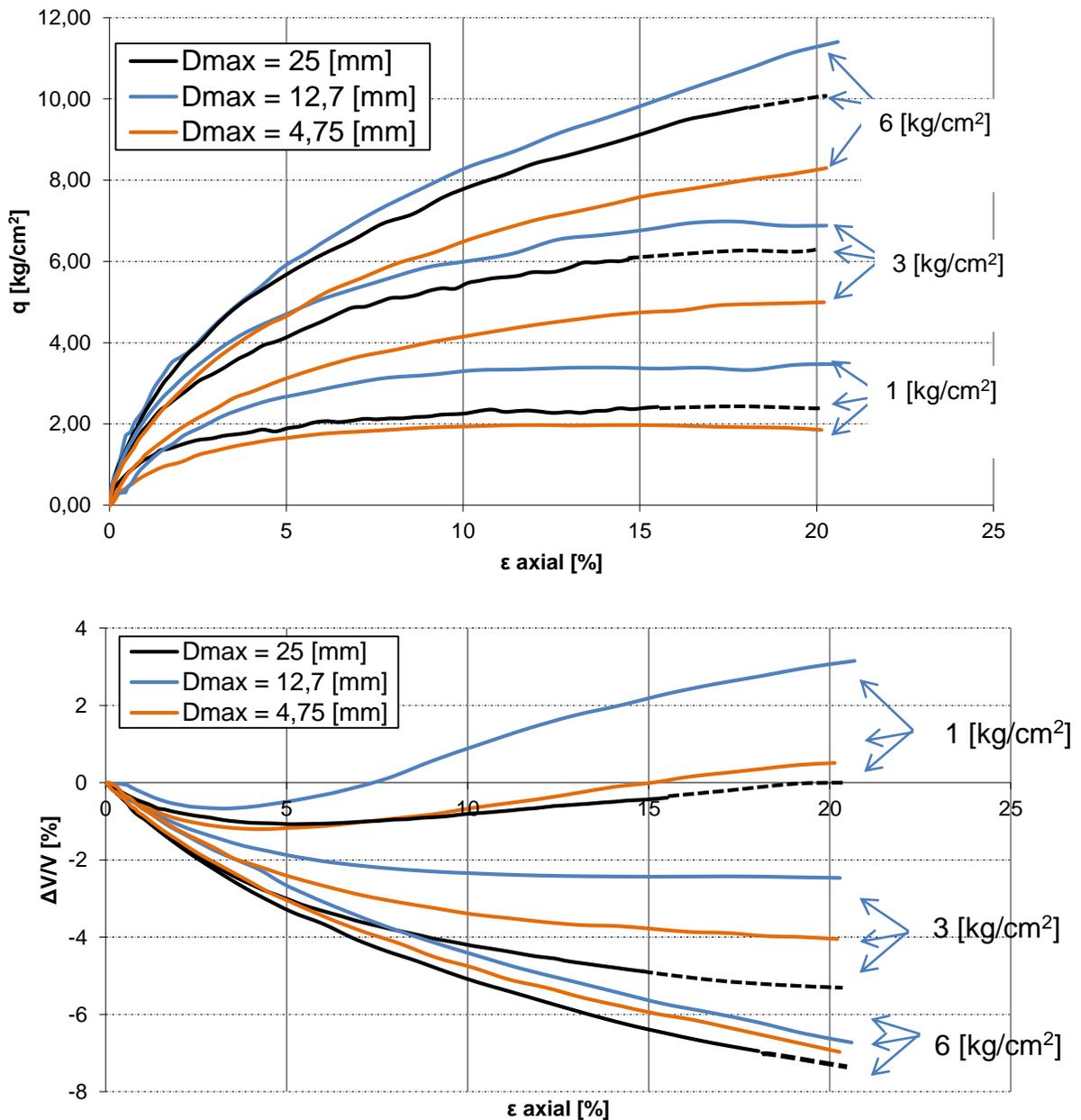


Figura 6-2. Resultados de triaxiales homotéticos convencionales, material PES

Para la granulometría menor se realizaron además ensayos de altas presiones a 10 y 20 [kg/cm²], cuyos resultados se presentan junto a los ensayos convenciones de la misma granulometría a modo de comparación. Estos resultados se muestran en la Figura 6-3.

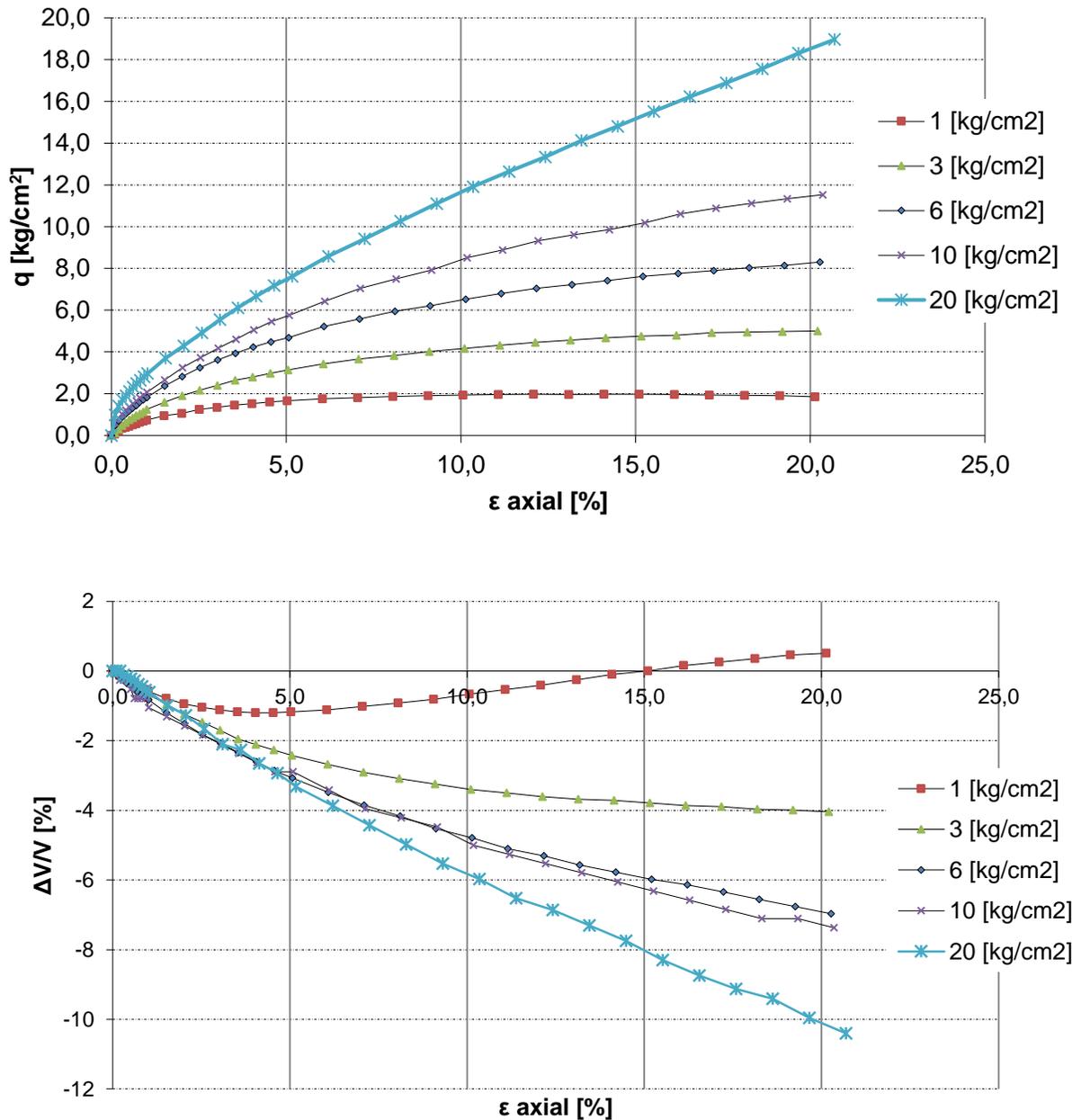


Figura 6-3. Ensayos en granulometría $D_{max} = 4,75$ [mm] a distintas presiones de confinamiento

Debido a que el ensayo de grandes dimensiones se realizó a un confinamiento de 20 [kg/cm²] puede realizarse una comparación directa con el ensayo de granulometría D_{max}

= 4,75 [mm] a la misma presión de cámara. Esta comparación se muestra en la Figura 6-4 en la que se observa que la resistencia es mayor en la probeta con granulometría $D_{max} = 100$ [mm] mientras que las deformaciones volumétricas prácticamente se superponen.

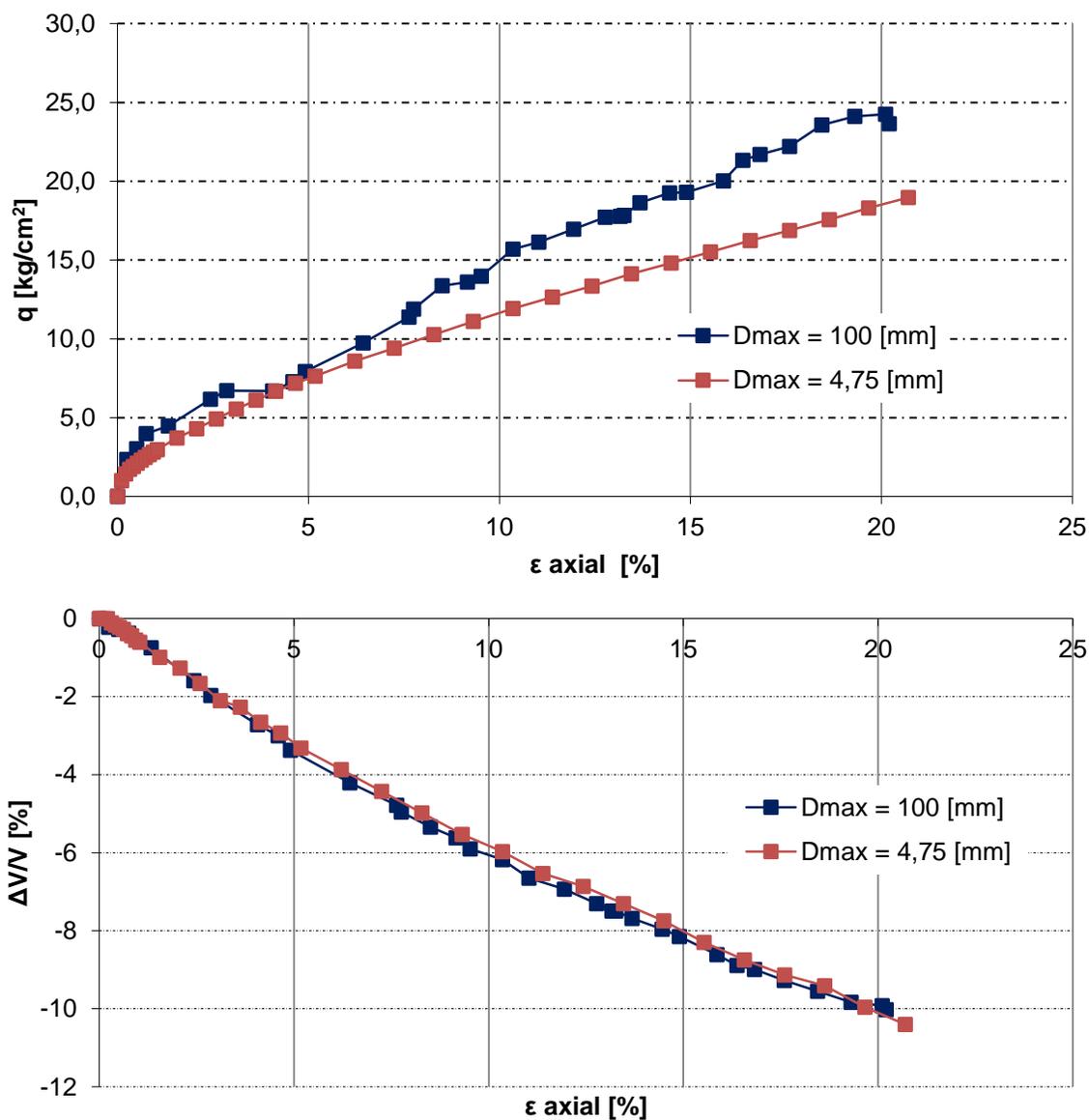


Figura 6-4. Comparación de curvas de tensión – deformación a 20 kg/cm^2 de presión de confinamiento, material PES

6.1.2 Envolvente de falla

A partir de las curvas presentadas en la sección anterior se calcula el ángulo de fricción máximo, el módulo de deformación secante a 50% de la carga máxima (E_{50}) y las envolventes de falla usando los criterios Mohr-Coulomb y no lineal.

Tal como se espera para suelos granulares gruesos, se puede observar que a medida que aumenta la presión de confinamiento existe un decaimiento del ángulo de fricción máximo como se observa en la Figura 6-5.

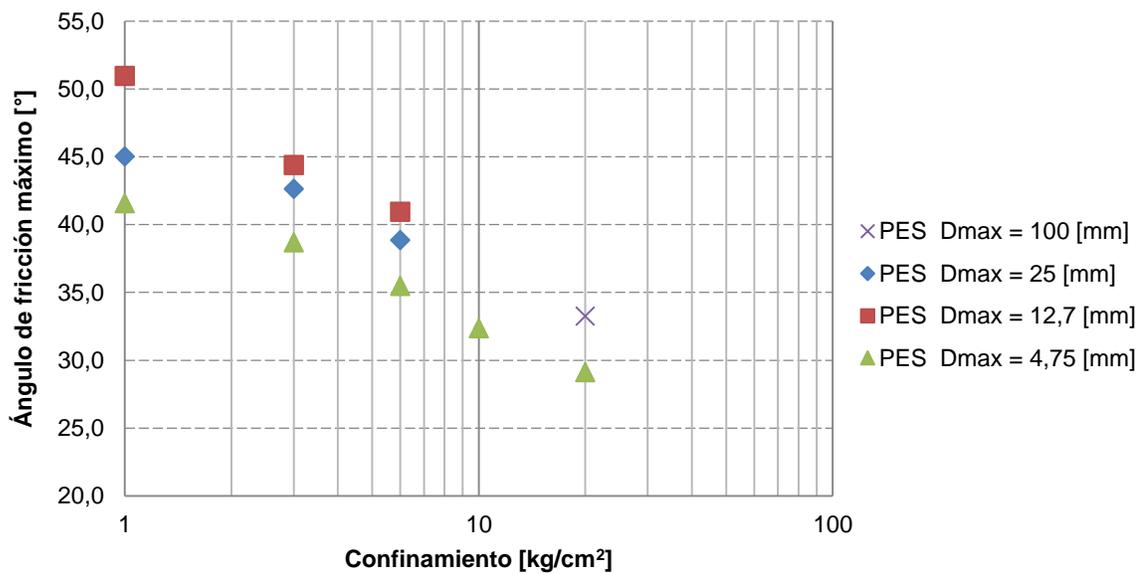


Figura 6-5. Ángulo de fricción secante máximo v/s confinamiento

Para caracterizar el comportamiento geomecánico de un material suele utilizarse también el módulo de deformación E_{50} . Estos resultados se grafican en la Figura 6-6 donde es notorio el aumento de la rigidez a mayores confinamientos, que en un gráfico bilogarítmico presenta una tendencia lineal como es de esperarse. También se observa que en general para las granulometrías de mayor tamaño tienen rigideces superiores.

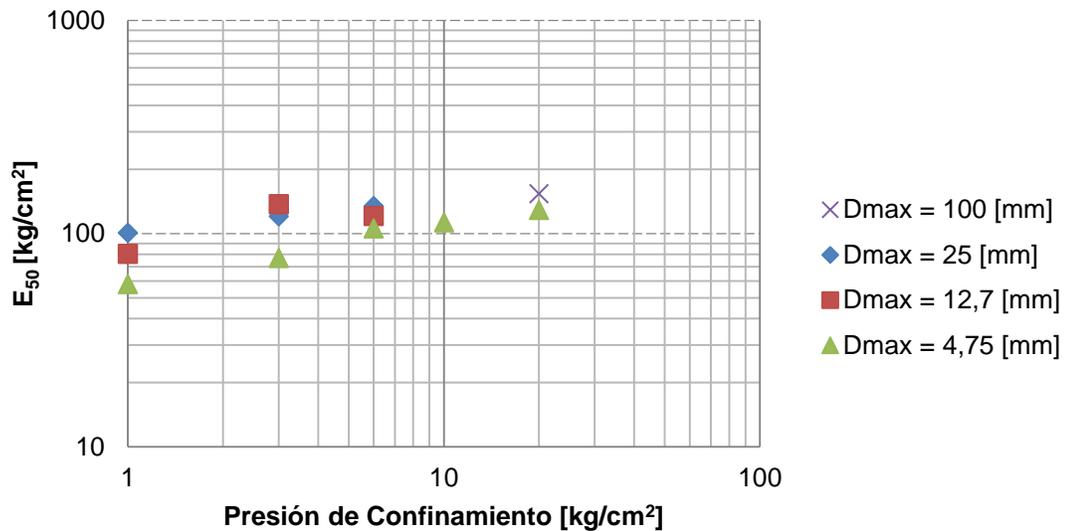


Figura 6-6. Módulo de deformación v/s Confinamiento

La Tabla 6-2 presenta un resumen de los valores de ángulo de fricción secante máximo y E_{50} .

Tabla 6-2. Parámetros geomecánicos de material PES

D_{max} [mm]	100		25		12,7		4,75	
	σ_3 [kg/cm ²]	ϕ_p [°]	E_{50} [kg/cm ²]	ϕ_p [°]	E_{50} [kg/cm ²]	ϕ_p [°]	E_{50} [kg/cm ²]	ϕ_p [°]
1	-	-	45,0	101,1	50,9	81,5	41,6	58,0
3	-	-	42,0	120,5	44,2	135,4	38,7	77,1
6	-	-	38,3	135,0	40,8	135,4	35,5	105,9
10	-	-	-	-	-	-	35,5	113,2
20	-	154,0	-	-	-	-	32,4	129,4

Si se utiliza el criterio de falla de Mohr-Coulomb se obtienen los parámetros para cada granulometría mostrados en la Tabla 6-3, donde para una correcta comparación no se consideran los ensayos de altas presiones.

Tabla 6-3. Parámetros de envolvente Mohr-Coulomb

D_{max} [mm]	Cohesión [kg/cm ²]	Ángulo de fricción [°]	R ²
25	0,69	35,1	0,9955
12,7	0,99	37,6	0,9995
4,75	0,48	33,8	0,9976

Al considerar el método de envolvente de falla no lineal propuesto por De Mello (1977) se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 6-4 donde se han utilizado los ensayos con presión de confinamiento menor o igual a 6 [kg/cm²] para comparar entre las distintas granulometrías y adicionalmente para la granulometría con D_{max} = 4,75 [mm] (indicada con un asterisco) se han determinado los parámetros incluyendo los ensayos con presión de confinamiento mayor a 6 [kg/cm²].

Tabla 6-4. Parámetros de envolvente no lineal, Material PES

D _{max} [mm]	A [kg/cm ²]	b	R ²
25	1,08	0,88	0,9986
12,7	1,38	0,79	0,9998
4,75	0,95	0,88	0,9994
4,75*	1,00	0,84	0,9987

Adicionalmente, se ha utilizado una envolvente no lineal en el espacio p-q basada en los datos de las muestras ensayadas a presión de confinamiento de 1, 3 y 6 [kg/cm²].

Tabla 6-5. Envolvente no lineal p-q, material PES

D _{max} [mm]	A' [kg/cm ²]	b'	R ²
25	1,02	0,91	0,9989
12,7	1,26	0,84	0,9999
4,75	0,92	0,91	0,9989

Con este último método se puede estimar el ángulo de fricción máximo para un confinamiento de 20 [kg/cm²] al intersectar en el espacio p-q la envolvente no lineal con la recta que define la trayectoria de esfuerzos en el ensayo a 20 [kg/cm²] a fin de compararlo con el resultado obtenido en la probeta de grandes dimensiones. La Figura 6-7 ejemplifica este criterio mostrando la envolvente de los ensayos de la granulometría D_{max} = 12,7 [mm] y se agregan también la coordenada asociada al desviador q máximo para las otras granulometrías escaladas de tamaño convencional.

Tabla 6-6. Predicción de ángulo de fricción máximo a presión de confinamiento 20 [kg/cm²], material PES

D _{max} [mm]	Ángulo de fricción máximo estimado [°]	q _{max} [kg/cm ²]
25	33,9	25,6
12,7	34,9	26,7
4,75	32,3	23,0

La predicción usando una envolvente no lineal en el espacio p-q entrega valores cercanos a los $33,2^\circ$ obtenidos en el ensayo de grandes dimensiones. La predicción de este método es discutida en la Sección 7.2.

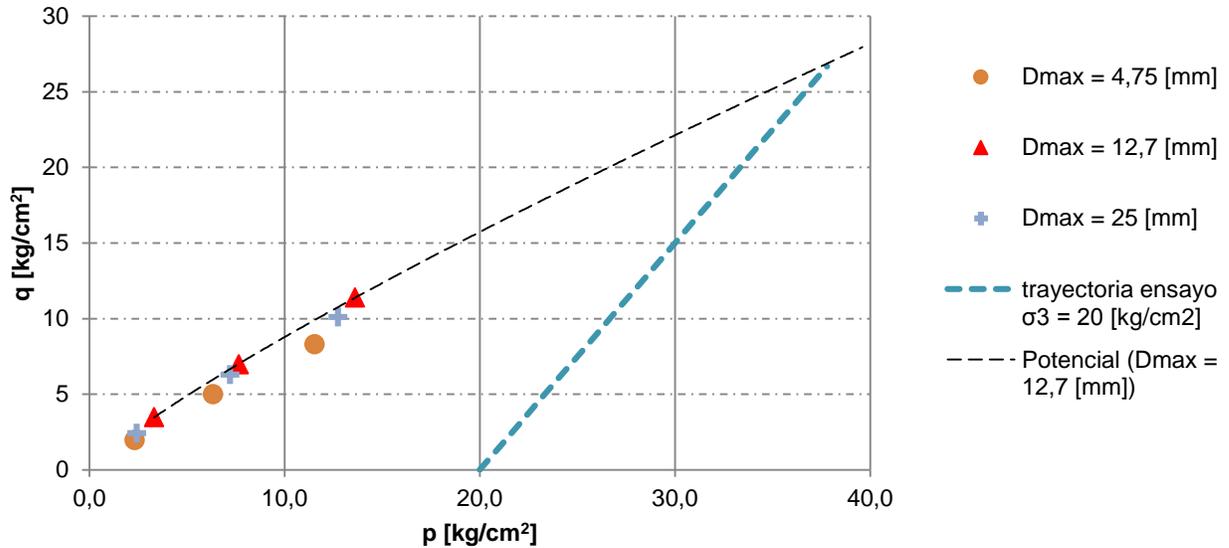


Figura 6-7. Estimación de ángulo de fricción máximo con envolvente no lineal Material PES

6.1.3 Resistencia individual de partículas

A partir de los ensayos de carga puntual se obtuvo la resistencia individual de las partículas. El primer gráfico de la Figura 6-8 muestra la totalidad de ensayos realizados, mientras en el segundo presenta un promedio por rango de diámetro de partículas. A pesar de la alta dispersión, explicada por las distintas mineralogías de cada partícula, se puede observar la caída del parámetro I_s con el aumento del diámetro. Desafortunadamente no se contó con partículas del material de todos los tamaños, por lo que se observa en el gráfico un salto de tamaños pero que mantiene la tendencia esperada.

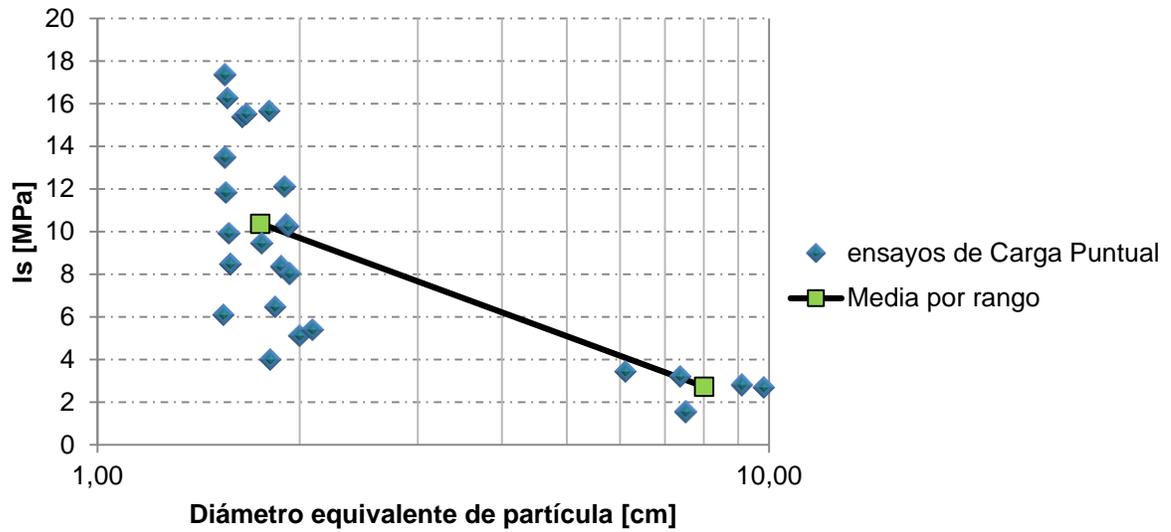


Figura 6-8. Parámetro I_s en función del diámetro

Con estos resultados, usando la metodología explicada en la sección 5.3 se calcula el parámetro I_{s50} y considerando un factor de 24 se estima la resistencia a la compresión uniaxial no confinada (UCS).

Tabla 6-7. Parámetros I_{s50} y UCS estimado, Material PES

I_{s50} [MPa]	UCS [MPa]
3,0	72,6

6.1.4 Rotura de Partículas

A continuación se presentan los resultados de rotura de partículas existente en los ensayos triaxiales realizados, mediante la comparación de las granulometrías antes y después del ensayo para las distintas granulometrías y confinamientos.

Se presenta en primer lugar en la Figura 6-9 la granulometría que se obtuvo para el ensayo de grandes dimensiones, la cual considera solo la zona definida en la sección 4.1 como núcleo, ya que al momento de desarmar la probeta se tuvo el cuidado de extraer separadamente la zona interior y exterior de la probeta realizando esto cuidadosamente con una pala pequeña.

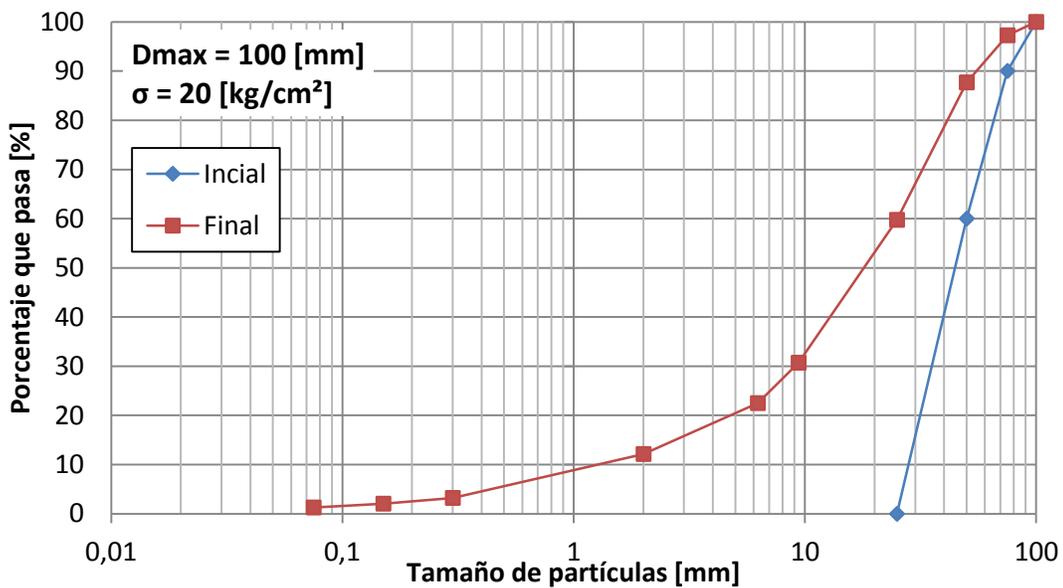


Figura 6-9. Granulometría post-ensayo $D_{max} = 100$ [mm] y $\sigma = 20$ [kg/cm²]

Se presentan en las Figuras 6-10, 6-11 y 6-12 la distribución granulométrica obtenida tras los ensayos triaxiales para cada granulometría homotética, agrupadas por tamaño máximo de partículas.

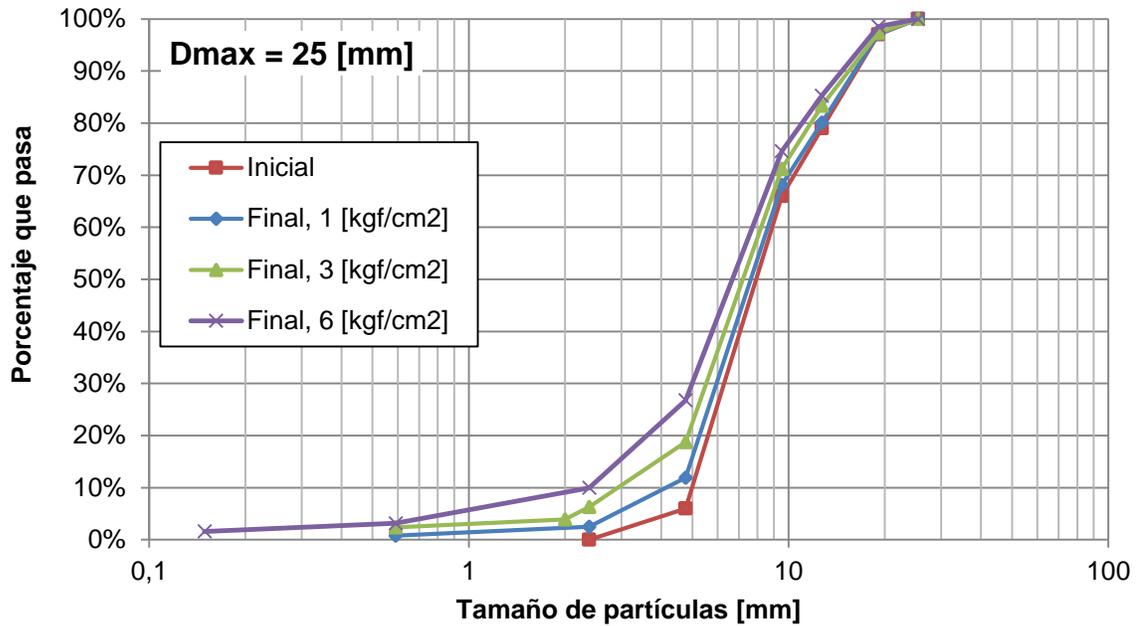


Figura 6-10. Granulometrías post-ensayos Dmax = 25 [mm]

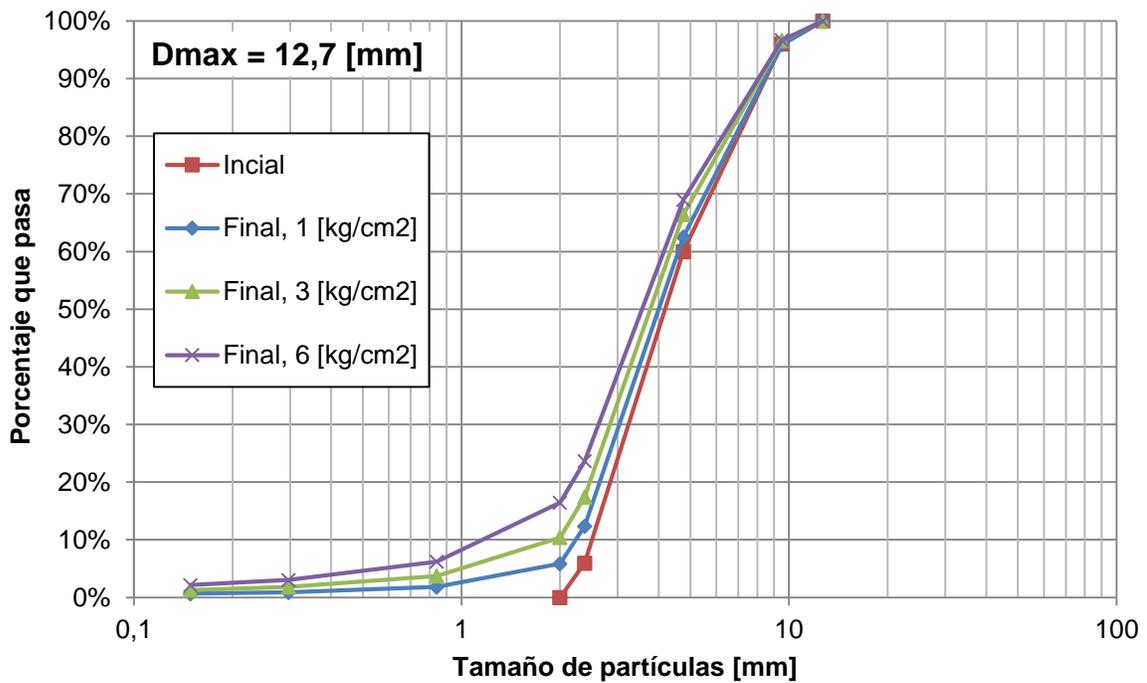


Figura 6-11. Granulometrías post-ensayos Dmax = 12,7 [mm]

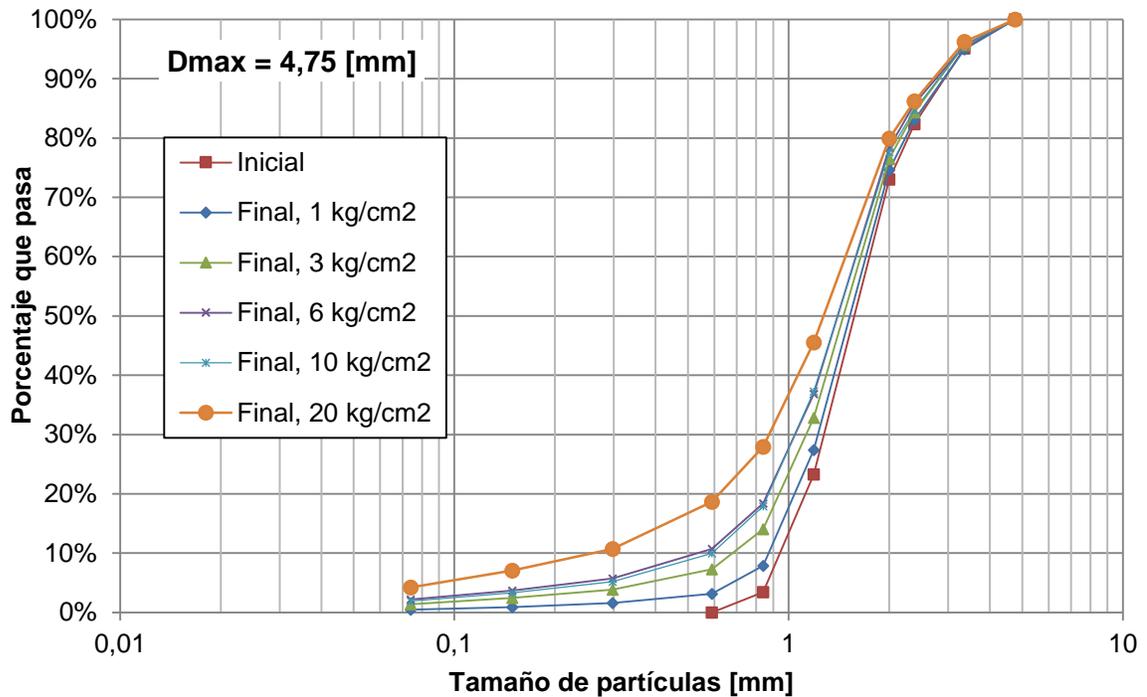


Figura 6-12. Granulometrías post-ensayos $D_{max} = 4,75$ [mm]

En todas las granulometrías se puede observar que la rotura aumenta a medida que el confinamiento es mayor. Es posible ver también que para confinamientos bajos la rotura corresponde principalmente a generación de material fino, debido principalmente a la abrasión de las zonas de contacto, en confinamientos mayores se observa rotura de granos de mayor tamaño.

Para obtener un análisis cuantitativo de la rotura se ha escogido utilizar el parámetro de rotura relativa de Hardin, el cual es graficado en la Figura 6-13 en la que se puede observar que a medida que el confinamiento aumenta, la rotura aumenta en forma no lineal.

En cuanto a la diferencia de rotura al escalar, es evidente que para las granulometrías menores la rotura disminuye. Por ejemplo se puede observar que para 6 [kg/cm²] la diferencia en rotura relativa entre la probeta con tamaño máximo 25 [mm] y 4,75 [mm] es del 7% y al comparar a una presión de 20 [kg/cm²] la probeta con tamaño máximo 100 [mm] con aquella de 4,75 [mm] la diferencia llega a ser del 29%.

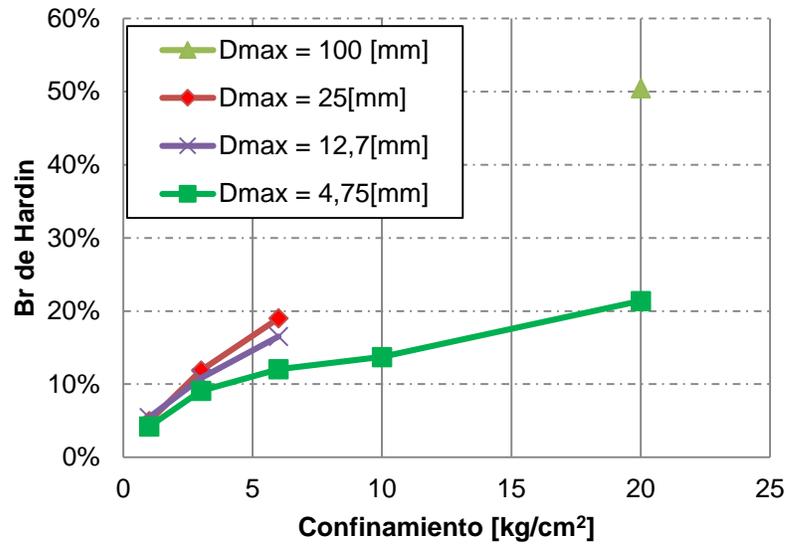


Figura 6-13. Rotura relativa de Hardin, material PES

6.2 Resultados material PEK

6.2.1 Comportamiento tensión deformación y deformación volumétrica

Las densidades secas obtenidas luego de la etapa de consolidación se presentan en la Tabla 6-8.

Tabla 6-8. Densidad seca post consolidación material PEK

Dmax [mm]	Densidad seca de confección [ton/m ³]	Densidad seca Post consolidación [ton/m ³]					
		$\sigma_3 = 1$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 3$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 6$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 10$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 15$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 20$ [kg/cm ²]
4,75	1,365	1,36	1,39	1,40	1,45	1,47	1,50
12,7	1,349	1,37	1,38	1,40	-	-	-
25	1,333	1,39	1,41	1,41	-	-	-
150	1,572	-	-	-	-	-	1,82

En la Figura 6-14 se muestra el comportamiento obtenido por la probeta de diámetro 100 [cm] en la cual se puede observar el comportamiento de aumento de resistencia del material acercándose a un comportamiento residual al final del ensayo, evidenciado por una disminución de la tasa de deformación volumétrica y a una resistencia constante desde un 18% de deformación axial.

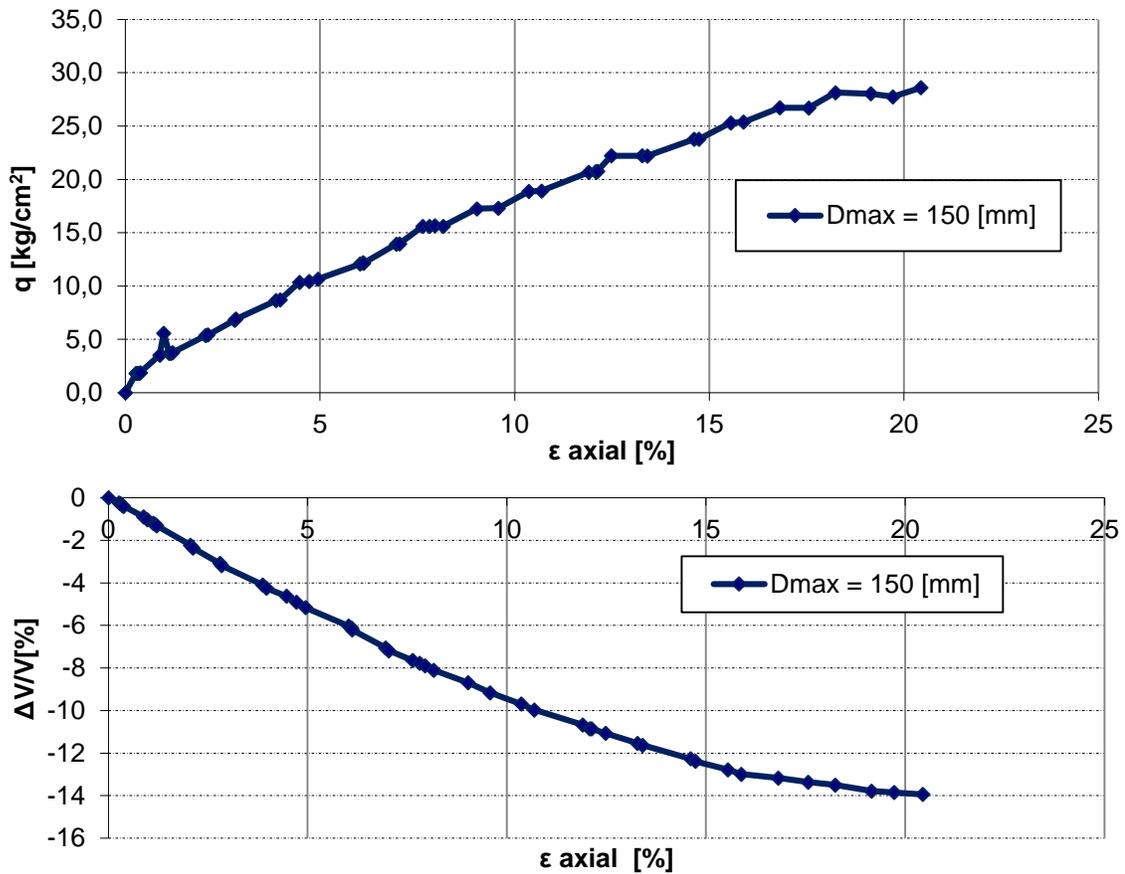


Figura 6-14. Resultados ensayo triaxial gigante en material PEK

La Figura 6-15 presenta los resultados de ensayos convencionales realizados para el material PEK. En estos se observa que la granulometría con $D_{max} = 12,7$ [mm] es la que en todos los casos alcanza mayor resistencia seguida por la granulometría $D_{max} = 25$ [mm] y finalmente es la granulometría de tamaño máximo 4,75 [mm] la que alcanza menores resistencias.

Al igual que para el material PES, para realizar comparación de las curvas de resistencia y cambio volumétrico se han extrapolado las curvas para las probetas de tamaño máximo de partícula 25 [mm].

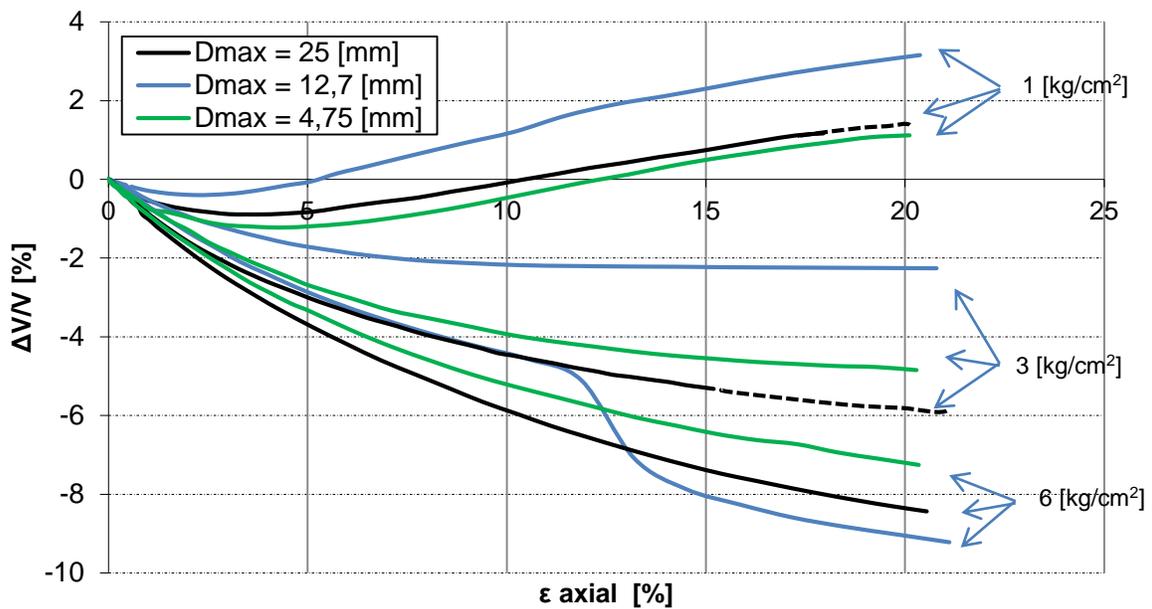
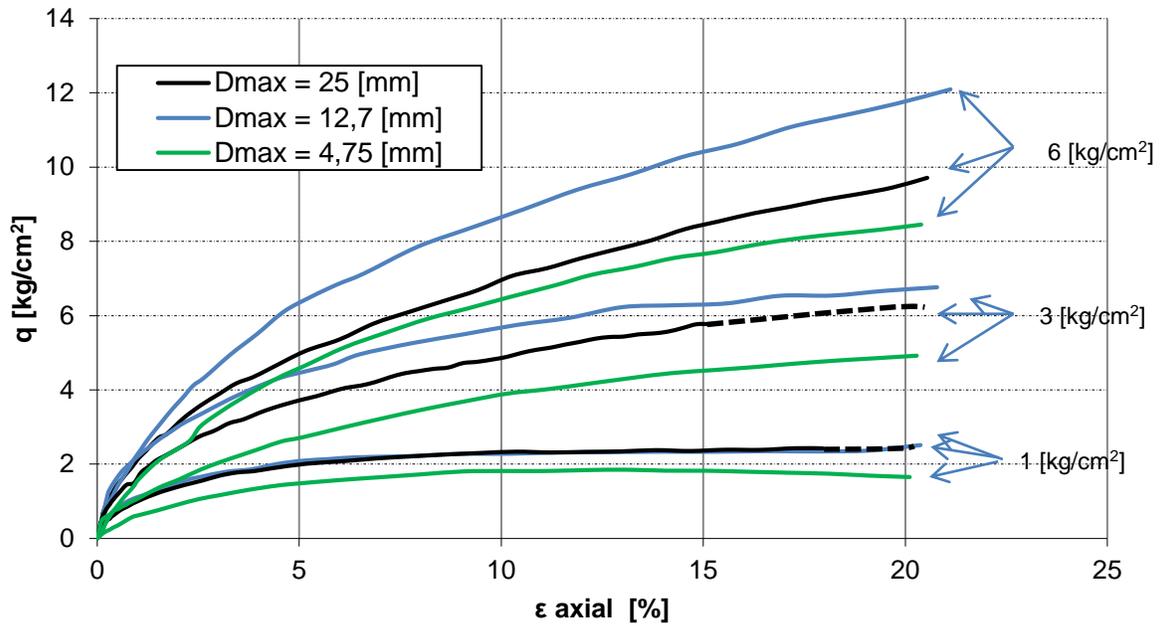


Figura 6-15. Resultados de ensayos triaxiales convencionales, material PEK

Se observa en las curvas de deformación volumétrica que las muestras de granulometría $D_{\text{max}} = 12,7$ [mm] presentan mayor dilatación.

Para la probeta de ensayada a presión de confinamiento de 6 kg/cm^2 de la granulometría $D_{\text{max}} = 12,7$ [mm] se observa un salto en la deformación volumétrica. Esta

condición parece ser explicada por una inestabilidad en el drenaje de la probeta debido a la rotura de la primera membrana y no a una condición mecánica, ya que luego se recupera la tendencia anterior al salto y la curva de resistencia no presenta cambios o irregularidades.

Para la granulometría $D_{max} = 4,75$ [mm] se efectuaron ensayos de altas presiones cuyos resultados son presentados junto con los ensayos convencionales de la misma granulometría en la Figura 6-16. En estos se puede observar como para cada aumento de confinamiento existe un aumento de resistencia del material, requiriendo cada vez de mayor deformación para alcanzar estado último.

Se observa también que para confinamientos cada vez mayores las curvas de deformación volumétrica dejan de tener diferencias notables, donde incluso las curvas para los ensayos a presión de confinamiento 15 y 20 [kg/cm²] están prácticamente superpuestas.

Como el ensayo triaxial de gran escala realizado para el material PEK tuvo presión de confinamiento de 20 [kg/cm²] es posible realizar una comparación directa entre ambos ensayos. Esta se muestra en la Figura 6-17 en la que se puede ver que la probeta de grandes dimensiones alcanza una resistencia significativamente mayor, mientras en el cambio volumétrico esta misma presenta un comportamiento marcadamente más contractivo.

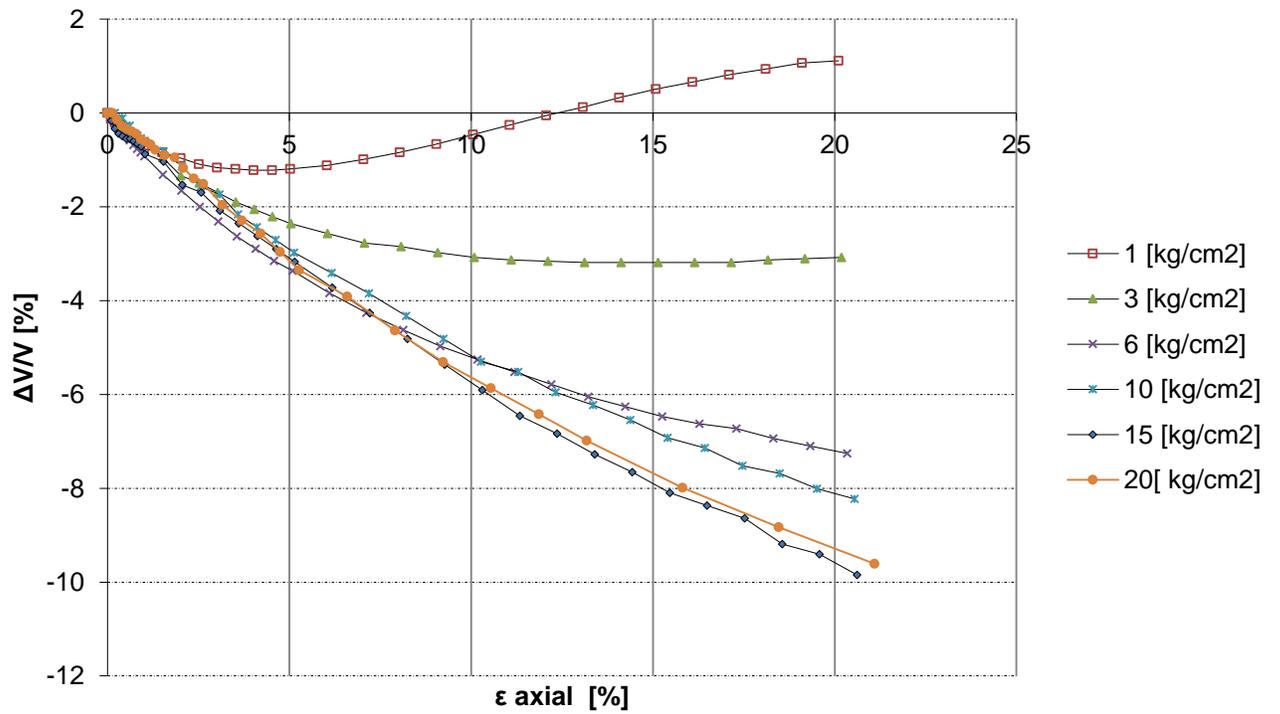
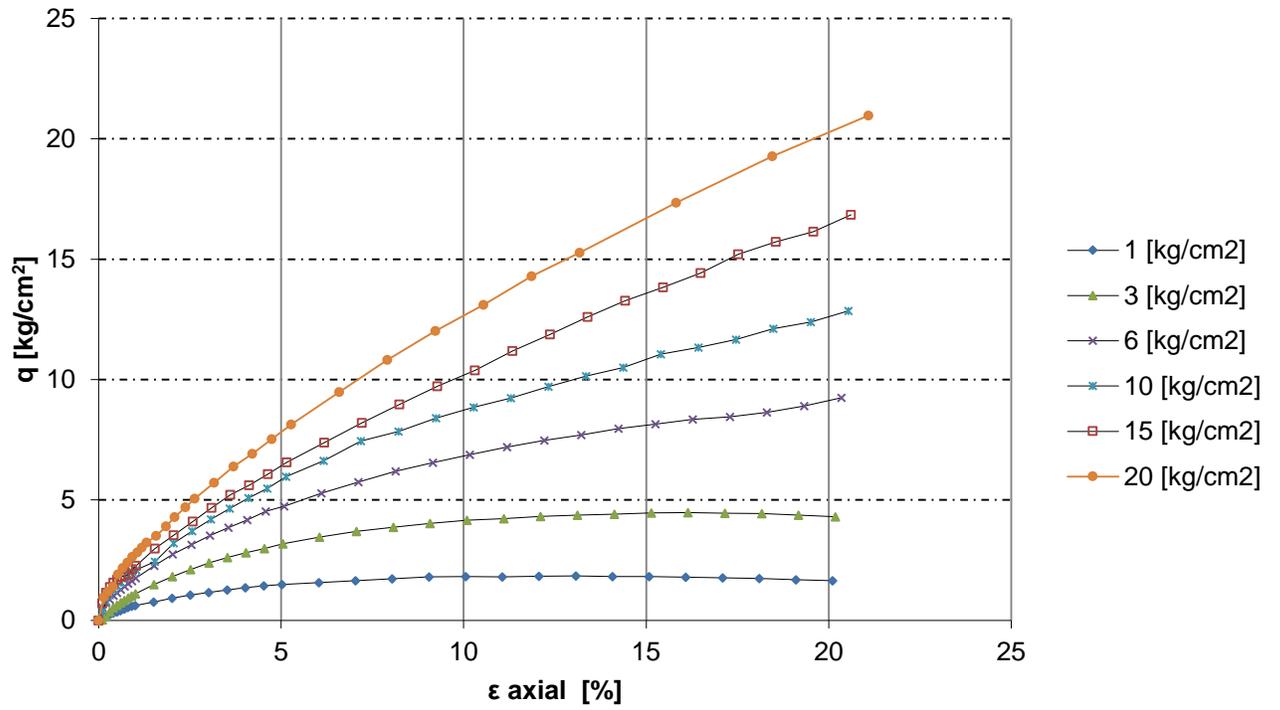


Figura 6-16. Ensayos $D_{max} = 4,75$ [mm], material PEK

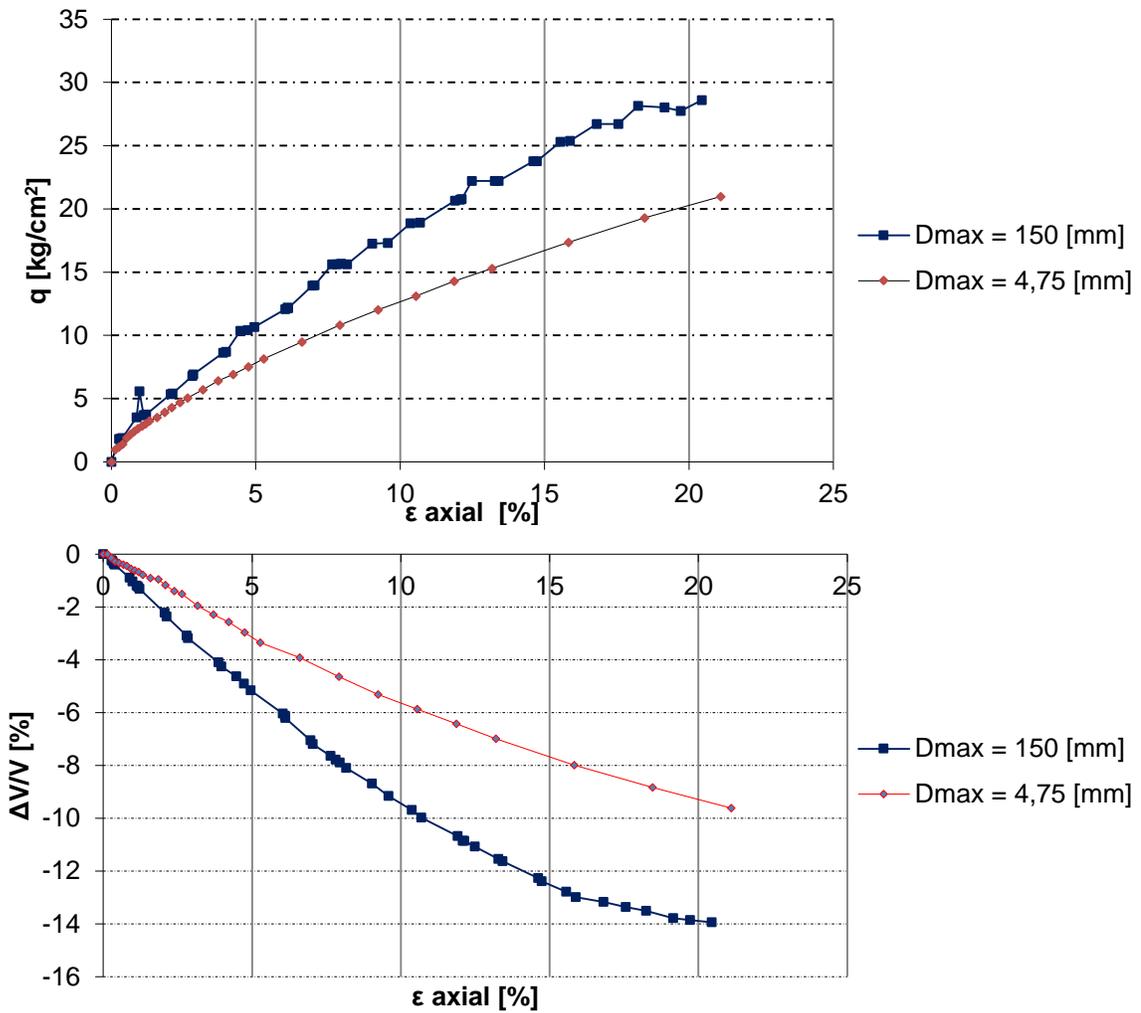


Figura 6-17. Comparación de curvas de tensión – deformación a 20 [kg/cm²] de confinamiento

6.2.2 Envoltente de Falla

A partir de las curvas de la sección anterior, se estudia el material PEK usando los parámetros ángulo de fricción máximo (ϕ_p) y módulo de deformación secante E_{50} . Además se caracteriza la envoltente de falla mediante los criterios Mohr-Coulomb y no lineal.

La Figura 6-18 presenta el ángulo de fricción máximo en función del confinamiento para todos los ensayos realizados con material PEK observándose la caída de este parámetro al aumentar el confinamiento. Se aprecia que la forma de la caída es similar en las granulometrías escaladas. Es interesante notar que la caída del ángulo de fricción para la granulometría de tamaño máximo 4,75 [mm] pareciera ser bien

representada por dos leyes de decaimiento, una en los confinamientos de 1 a 6 [kg/cm²] y otra para los confinamientos de 10 [kg/cm²] a 20 [kg/cm²].

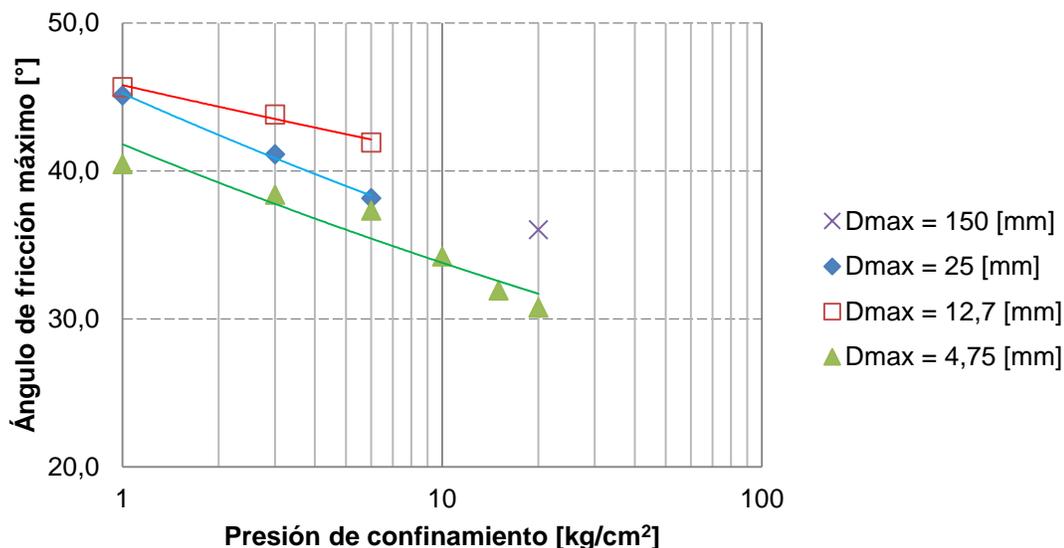


Figura 6-18. Ángulo de fricción máximo v/s confinamiento, material PEK

Se presenta también el módulo E_{50} en la Figura 6-19, donde se presenta una tendencia creciente con el aumento de la presión de confinamiento.

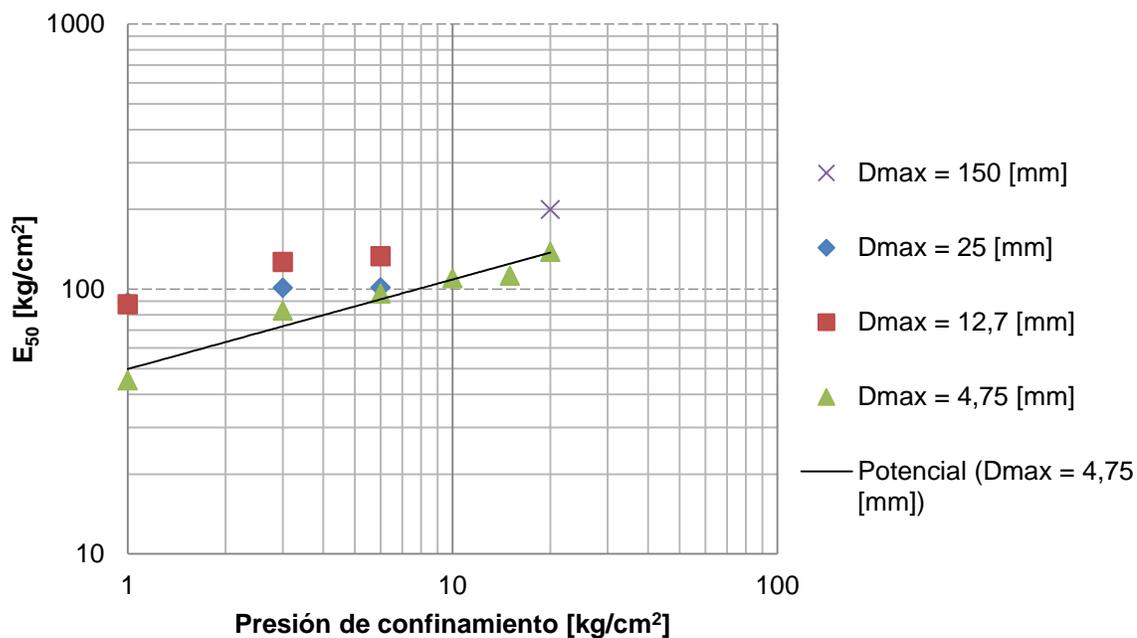


Figura 6-19. E_{50} v/s confinamiento, material PEK

La Tabla 6-9 presenta un resumen de los parámetros geomecánicos obtenidos para los ensayos triaxiales realizados en el material PEK.

Tabla 6-9. Parámetros geomecánicos, material PEK

D _{max} [mm]	150		25		12,7		4,75	
σ_3 [kg/cm ²]	ϕ_p [°]	E_{50} [kg/cm ²]						
1	-	-	45,1	89,0	45,6	87,6	40,5	45,2
3	-	-	41,1	101,0	43,7	126,5	38,4	82,7
6	-	-	38,2	101,3	41,9	132,9	37,4	96,0
10	-	-	-	-	-	-	34,2	109,8
15	-	-	-	-	-	-	31,9	112,2
20	36,1	199,6	-	-	-	-	30,8	138,3

Para caracterizar la envolvente de falla se muestra en primer lugar el criterio Mohr-Coulomb en la Tabla 6-10.

Tabla 6-10. Parámetros Mohr-Coulomb, material PEK

D _{max} [mm]	Cohesión [kg/cm ²]	Ángulo de fricción [°]	R ²
25	0,27	37,6	0,9968
12,7	0,33	41,0	0,9996
4,75	0,21	36,6	0,9999

Los parámetros para cada granulometría de la envolvente de falla no lineal propuesta por De Mello (1977) para cada granulometría utilizada se muestran en la Tabla 6-11, donde se han considerado los ensayos con presiones de confinamiento menor o igual a 6 [kg/cm²] y para la granulometría D_{max} = 4,75 [mm] también se ha incluido los parámetros de la envolvente no lineal considerando los ensayos hasta 20 [kg/cm²] de confinamiento. Esta última envolvente se muestra en la Figura 6-20.

Tabla 6-11. Parámetros envolvente no lineal (De Mello 1977), material PEK

D _{max} [mm]	A [kg/cm ²]	b	R ²
25	1,08	0,86	0,9999
12,7	1,07	0,93	0,9999
4,75	0,88	0,94	1
4,75*	0,95	0,88	0,998

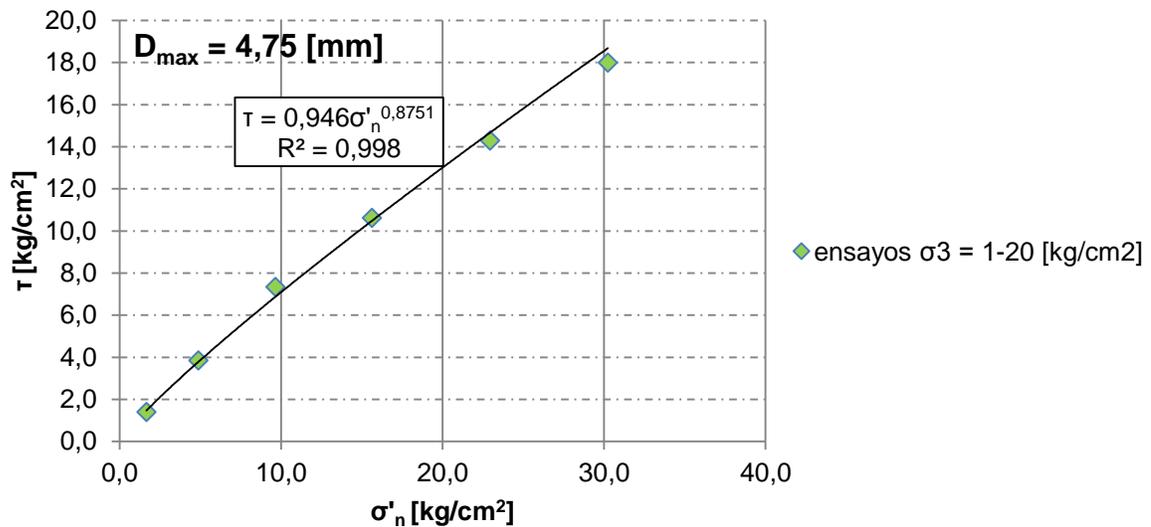


Figura 6-20. Ejemplo de Envolvente no lineal De Mello (1977), material PEK

Usando una envolvente no lineal en el espacio p-q se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 6-12.

Tabla 6-12. Parámetros envolvente no lineal p-q, Material PEK

D_{max} [mm]	A' [kg/cm ²]	b'	R^2
25	1,02	0,89	0,9999
12,7	0,99	0,95	0,9999
4,75	0,86	0,95	1

Con la envolvente en el espacio p-q se puede estimar el q_{max} asociado a un ensayo a 20 [kg/cm²] de presión de confinamiento para cada granulometría, y con esto el ángulo de fricción. (Tabla 6-13). La Figura 6-21 ejemplifica este procedimiento para la granulometría $D_{max} = 12,7$ [mm], donde también se presentan los puntos que definen la envolvente para las otras granulometrías.

Tabla 6-13. Predicción de ángulo de fricción máximo a confinamiento 20 [kg/cm²]

D_{max} [mm]	Ángulo de fricción estimado [°]	q_{max} [kg/cm ²]
25	33,9	31,9
12,7	39,9	35,7
4,75	35,3	27,5

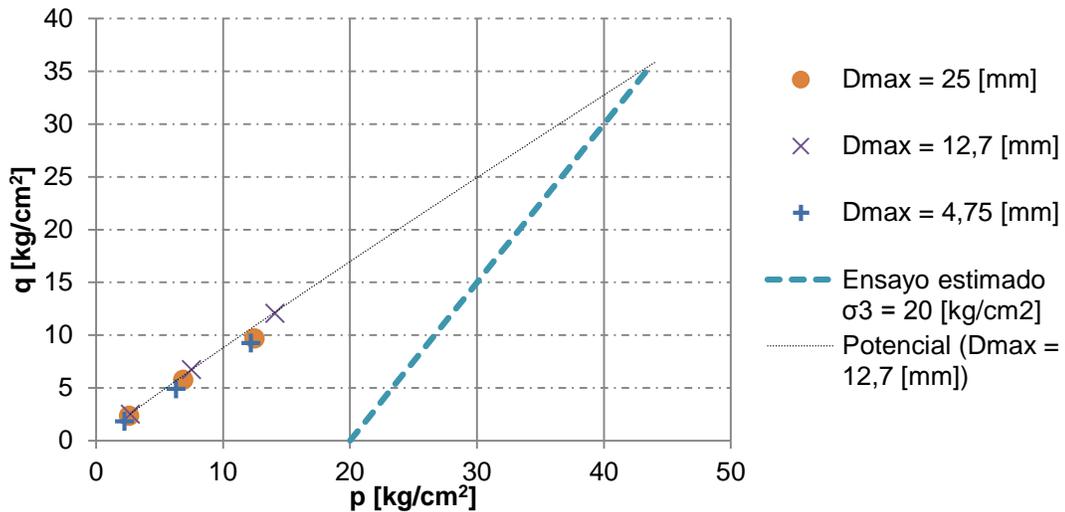


Figura 6-21. Envoltura no lineal p-q, material PEK

6.2.3 Resistencia individual de partículas

Los resultados de los ensayos de carga puntual para el material PEK se muestran en la Figura 6-22 donde se evidencia el aumento de resistencia al disminuir el tamaño de partícula. Es destacable también que la variabilidad de los resultados también sufre una disminución al aumentar el tamaño. Esto se puede relacionar a que en un análisis porcentual, la cantidad de partículas débiles en los tamaños menores es mayor, con presencia de arcillolita que no se observa en tamaños mayores.

La Tabla 6-14 presenta los parámetros I_{S50} y UCS estimados a partir de los ensayos de carga puntual asumiendo factor de 24.

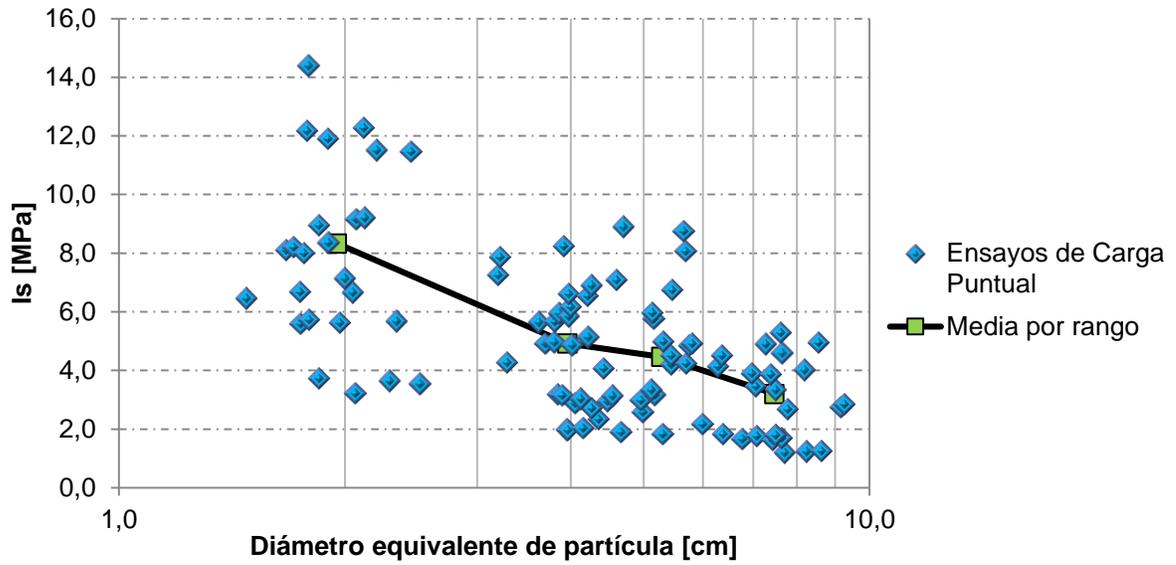


Figura 6-22. Parámetro I_s en función del diámetro

Tabla 6-14. Parámetros I_{s50} y UCS estimado, material PEK

I_{s50} [MPa]	UCS [MPa]
3,3	79,0

6.2.4 Rotura de partículas

Se presenta en la Figura 6-23 la granulometría post-ensayo obtenida en el ensayo de grandes dimensiones, la cual evidencia un mayor nivel de rotura.

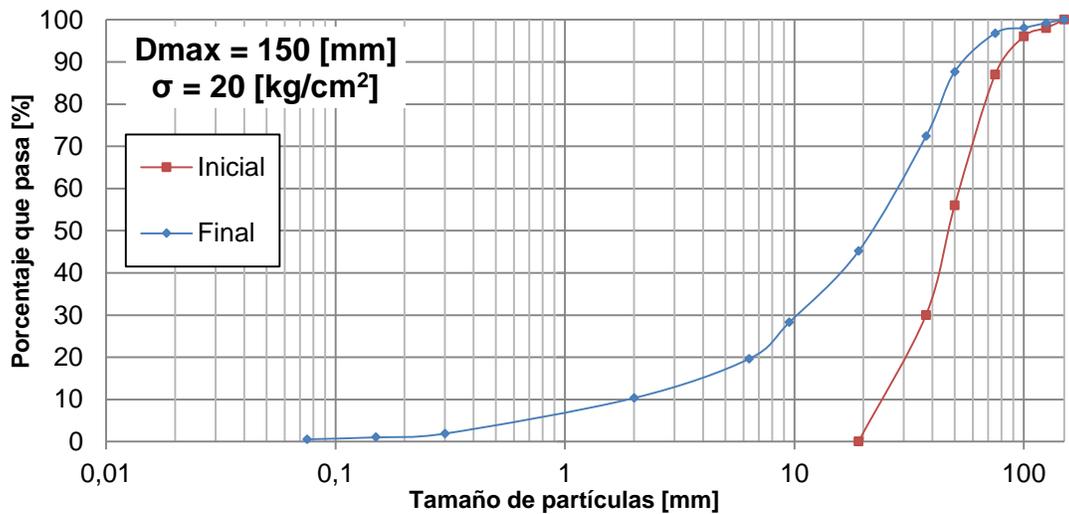


Figura 6-23. Granulometría post-ensayo $D_{max} = 150$ [mm] y $\sigma_3 = 20$ [kg/cm²], material PEK

La Figura 6-24 presenta la granulometría post ensayo de los ensayos triaxiales homotéticos con $D_{max} = 25$ [mm].

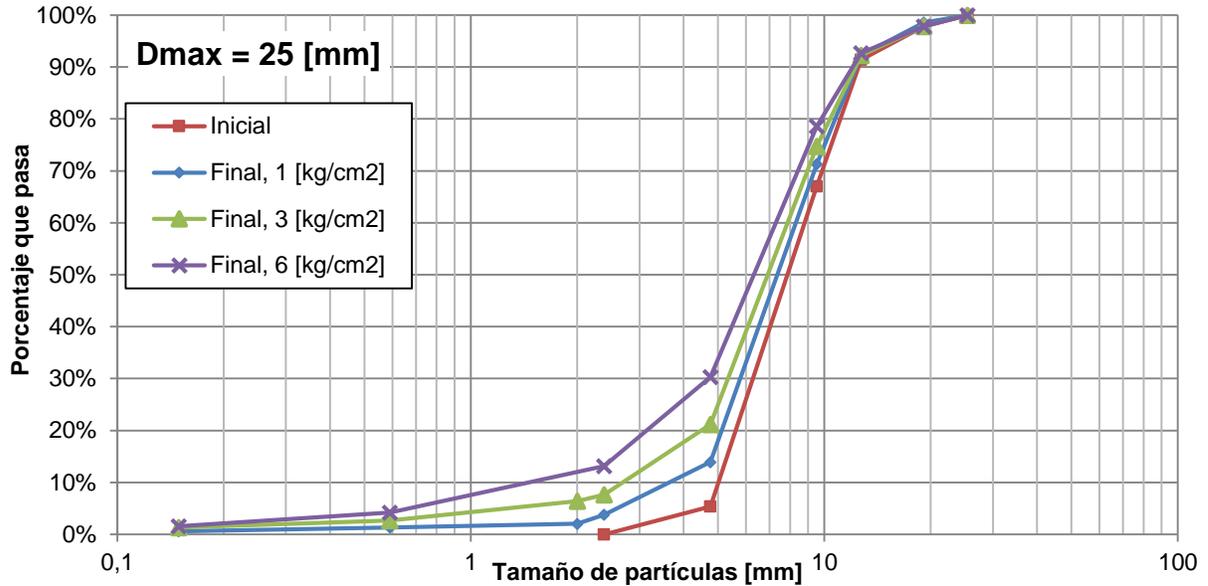


Figura 6-24. Granulometrías post-ensayo Dmax = 25 [mm]

La Figura 6-25 presenta la granulometría post ensayo de los ensayos triaxiales homotéticos con $D_{max} = 12,7$ [mm].

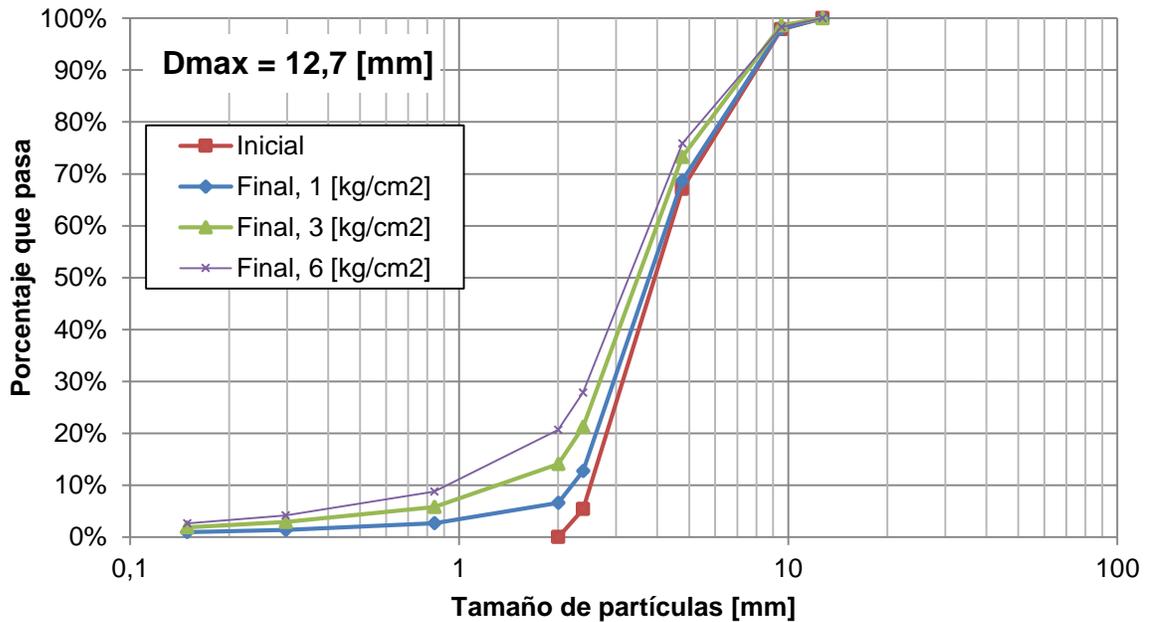


Figura 6-25. Granulometrías post-ensayo Dmax = 12,7 [mm]

La Figura 6-26 presenta la granulometría post ensayo de los ensayos triaxiales homotéticos con $D_{max} = 4,75$ [mm].

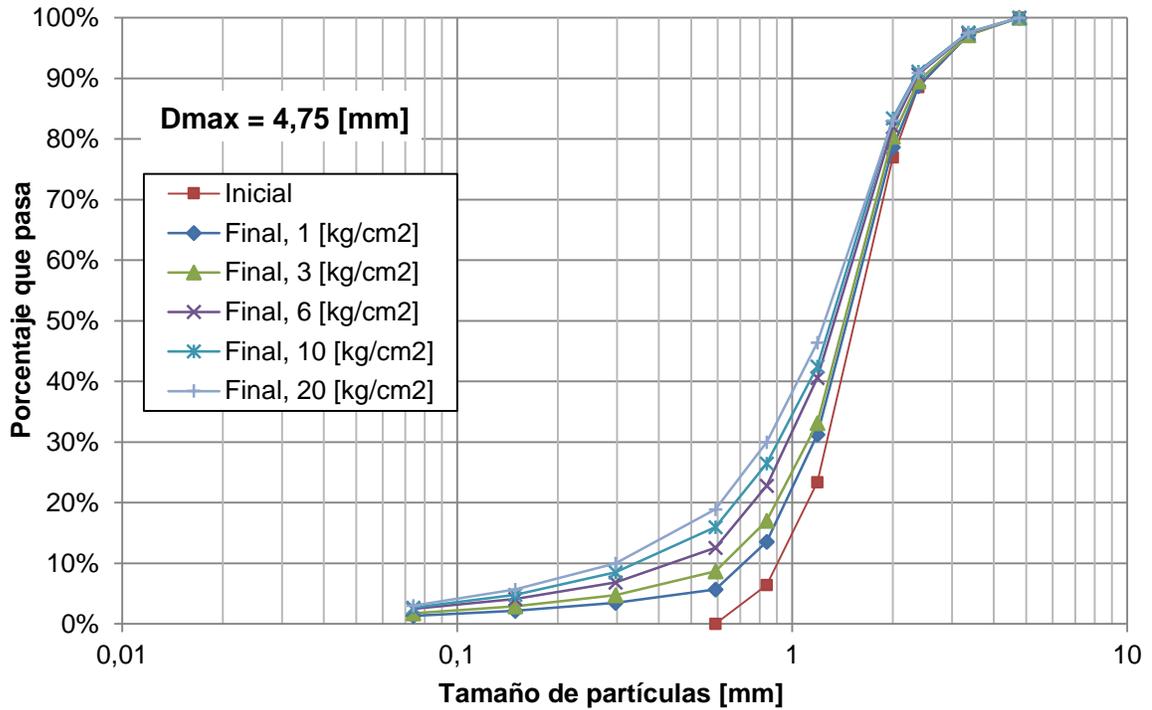


Figura 6-26. Granulometrías post-ensayo $D_{max} = 4,75$ [mm]

En la Figura 6-27 se muestra el parámetro de rotura relativa de Hardin (Br) para los distintos tamaños. En ella se percibe la creciente diferencia entre las roturas relativas al disminuir el tamaño máximo de la granulometría. Esta diferencia es claramente acentuada a medida que aumenta el confinamiento.

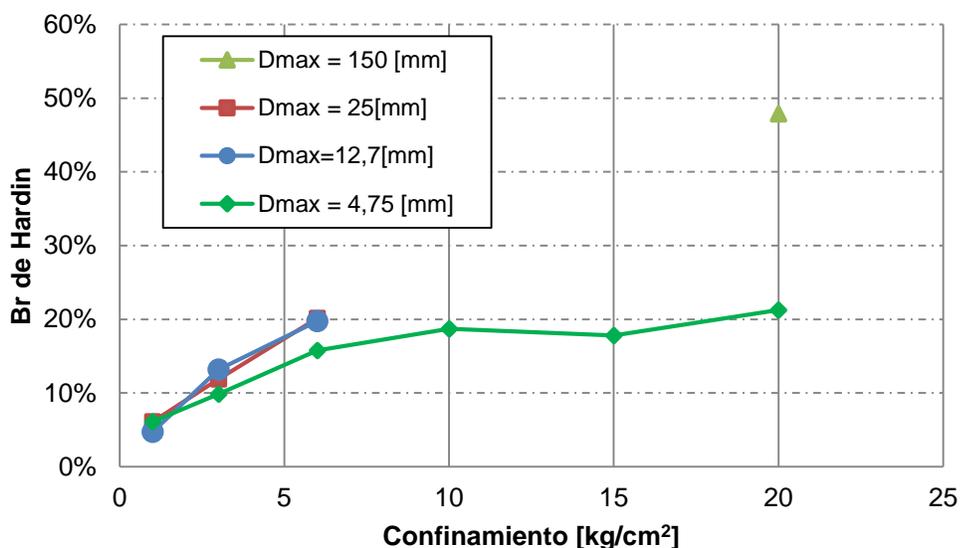


Figura 6-27. Rotura relativa material PEK

6.3 Resultados Material mezcla 50/50

6.3.1 Comportamiento tensión-deformación

Las densidades secas obtenidas luego de la etapa de consolidación se presentan en la Tabla 6-15.

Tabla 6-15. Densidad seca post consolidación material combinado

D _{max} [mm]	Densidad seca de confección [ton/m ³]	Densidad seca post consolidación [ton/m ³]			
		$\sigma_3 = 1$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 3$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 6$ [kg/cm ²]	$\sigma_3 = 20$ [kg/cm ²]
4,75	1,37	1,37	1,39	1,42	1,51
12,7	1,38	1,40	1,42	1,43	-
25	1,34	1,39	1,41	1,43	-
150	1,60	-	-	-	1,83

Se presentan en la Figura 6-28 las curvas de tensión-deformación y comportamiento volumétrico del ensayo triaxial de grandes dimensiones realizados a la combinación de los materiales PES y PEK (50/50). En estos se observa que tanto la resistencia al corte como la deformación volumétrica no alcanzan un estado residual.

En la Figura 6-29 se presentan los ensayos convencionales realizados con gradaciones homotéticas a la de gran escala, donde se tiene que la granulometría de tamaño

máximo 12,7 [mm] resultó ser la más resistente, seguida de aquella con tamaño máximo 25 [mm] terminando con $D_{max} = 4,75$ [mm]. Respecto al cambio volumétrico se aprecia que la banda generada por los ensayos a presión de confinamiento de 1 y 6 [kg/cm²] es pequeña, mientras que en los ensayos a 3 [kg/cm²] de confinamiento la diferencia es más notoria.

En la Figura 6-30 se presenta la serie de ensayos triaxiales realizados en la muestra de menor tamaño máximo $D_{max} = 4,75$ [mm] la cual consideró presiones de confinamiento de 1, 3, 6 y 20 [kg/cm²].

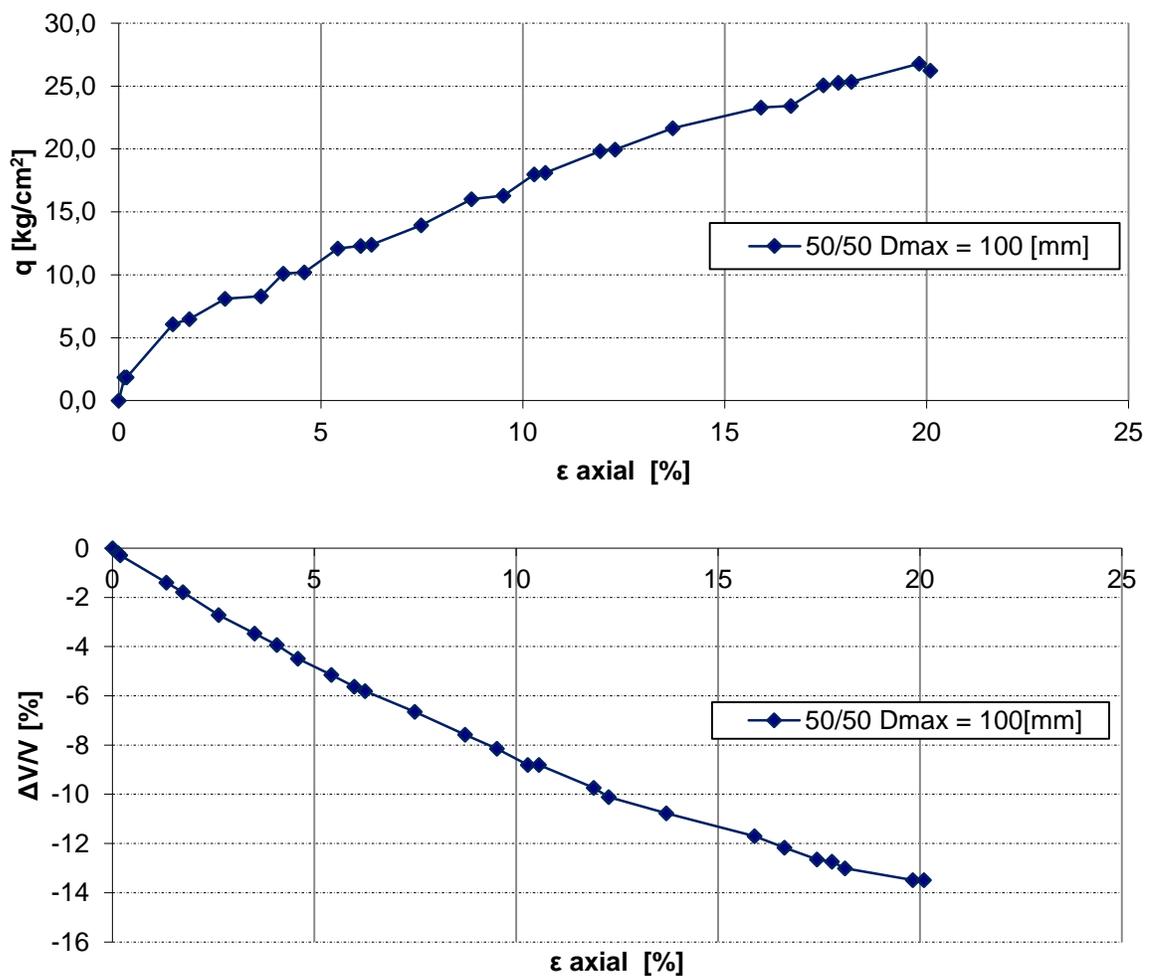


Figura 6-28. Resultados ensayo triaxial de gran escala en material combinado

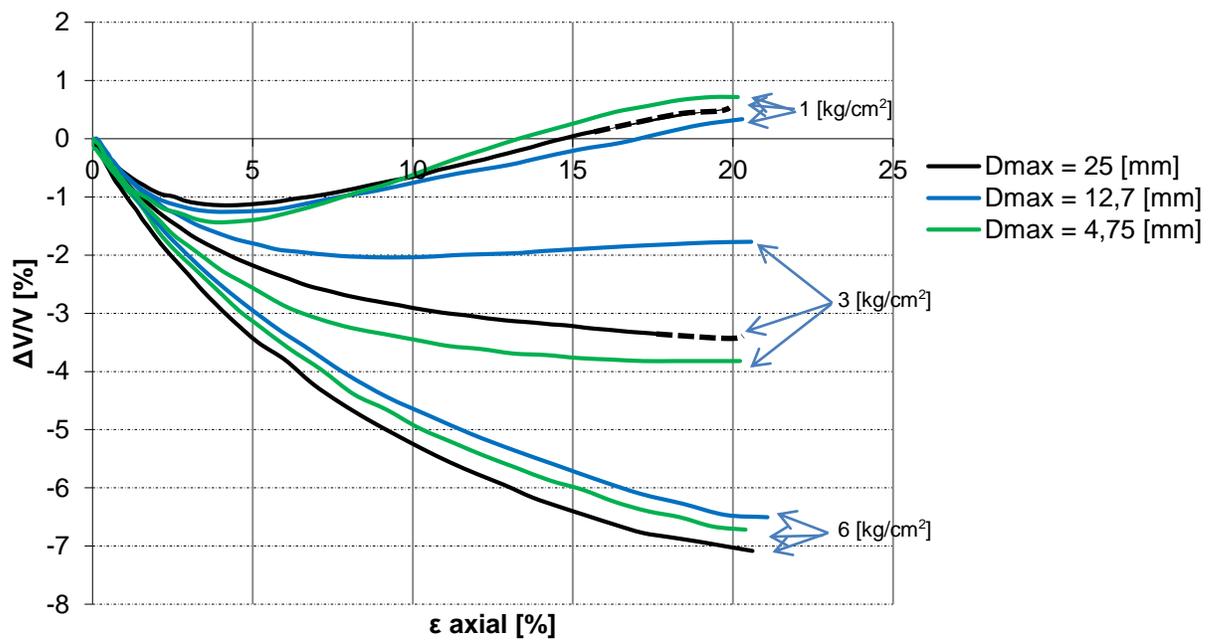
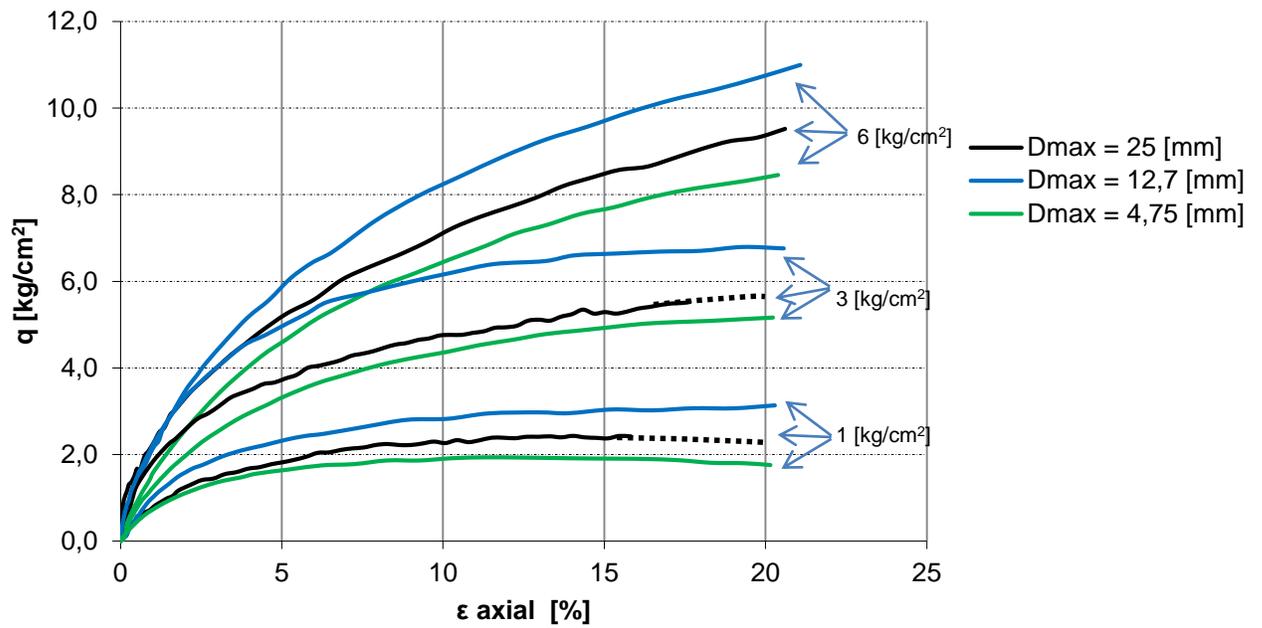


Figura 6-29. Resultados de ensayos homotéticos, material Combinado

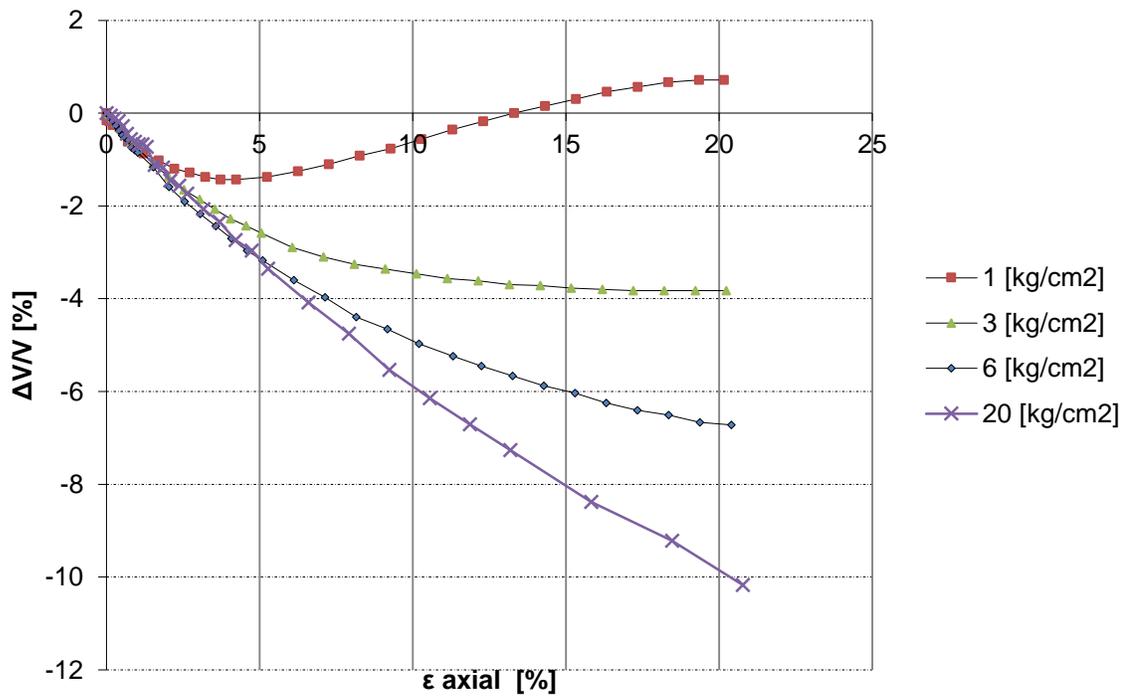
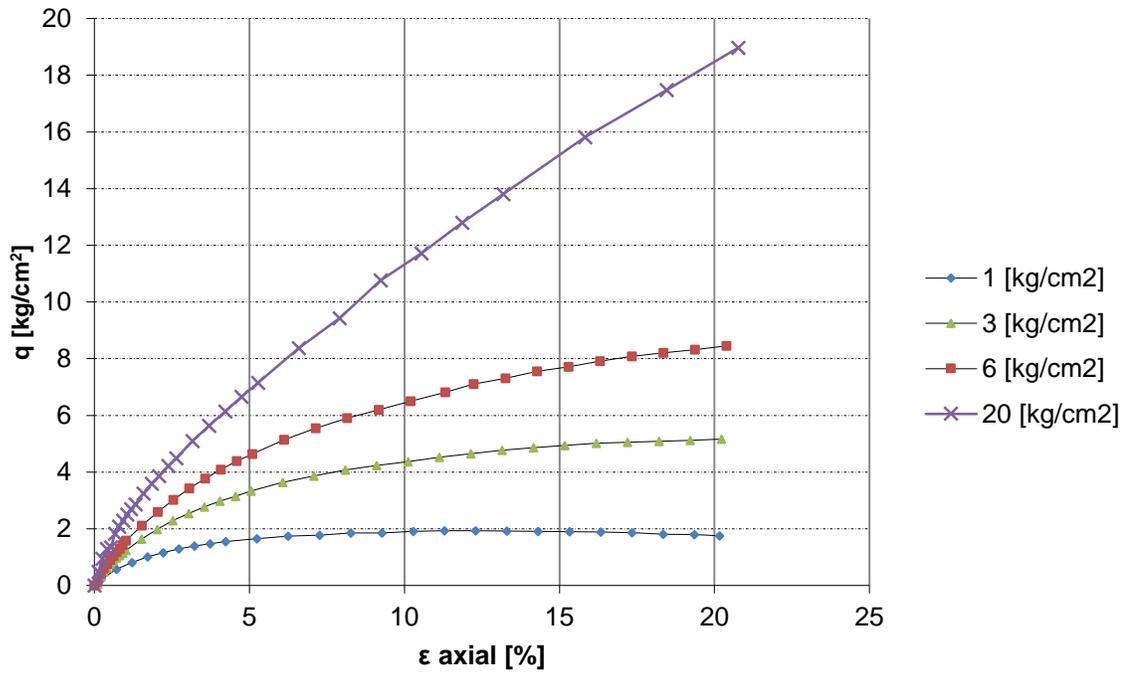


Figura 6-30. Ensayos en granulometría menor $D_{max} = 4,75$ [mm] a distintos confinamientos, material Combinado

Se presenta en la Figura 6-31 la comparación directa del ensayo de grandes dimensiones a 20 [kg/cm^2] con el de tamaño máximo 4,75 [mm] también a 20 [kg/cm^2].

De esta se aprecia que la muestra de $D_{\max} = 100$ [mm] presenta una resistencia al corte y una significativamente mayor que la muestra de $D_{\max} = 4,75$ [mm] y lo mismo sucede con la deformación volumétrica.

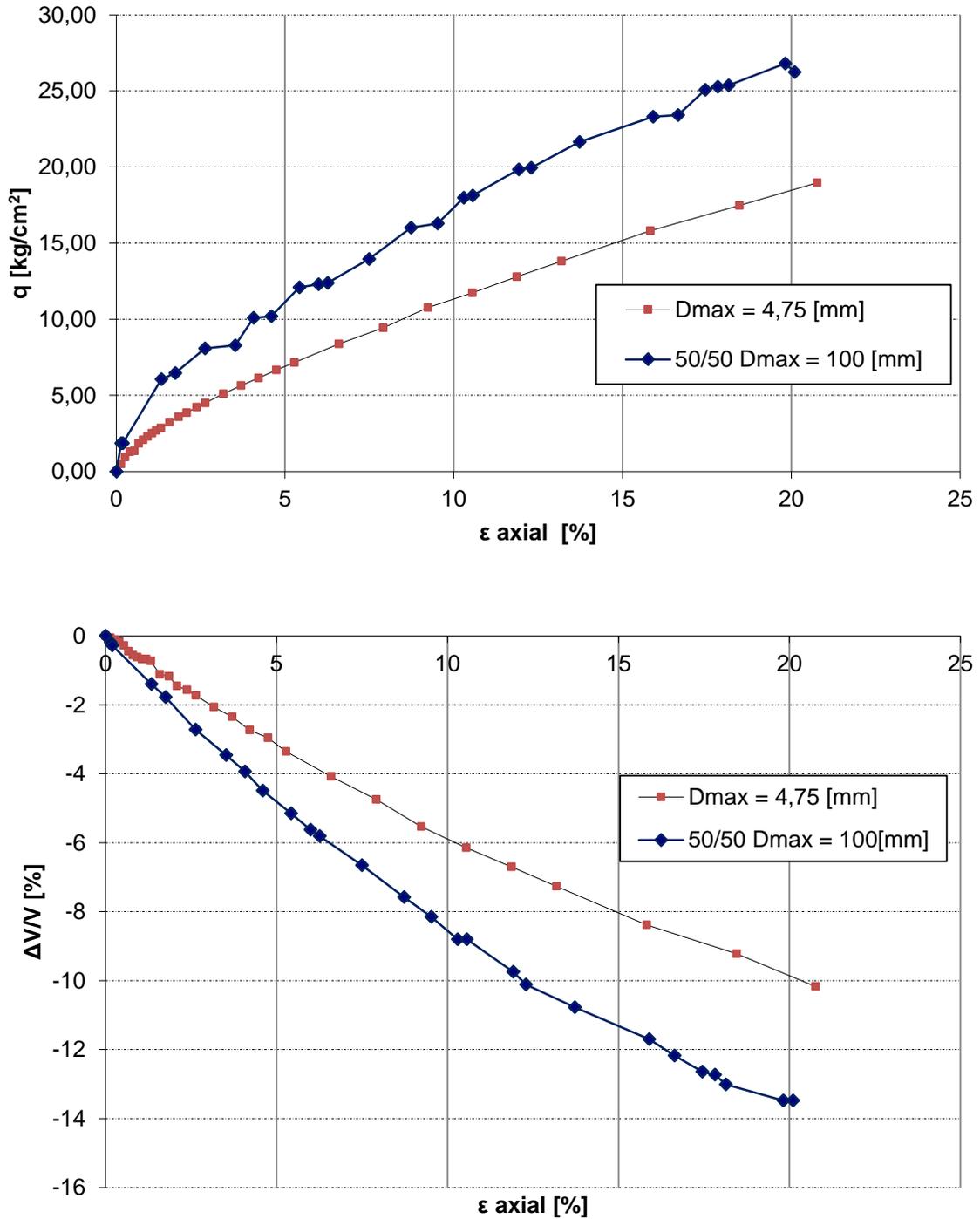


Figura 6-31. Comparación de resultados de ensayos triaxiales en muestras de $D_{\max} = 100$ [mm] y $D_{\max} = 4,75$ [mm], material Combinado

6.3.2 Envolvente de Falla

A partir de la sección 6.3.1 se realiza análisis de la respuesta del material combinado usando los parámetros ángulo de fricción secante (ϕ_p) y E_{50} . Además se caracteriza la envolvente de falla mediante los criterios Mohr-Coulomb y no lineal.

La Figura 6-32 muestra los resultados de ángulo de fricción máximo en las distintas granulometrías paralelas. Para el confinamiento de 1 [kg/cm²] las diferencias llegan hasta 9° y con un aumento del confinamiento estas se reducen llegar a los 5° a 6 [kg/cm²]. Los ensayos a 20 [kg/cm²] tienen una diferencia de 5,8° siendo el ensayo de grandes dimensiones más resistente.

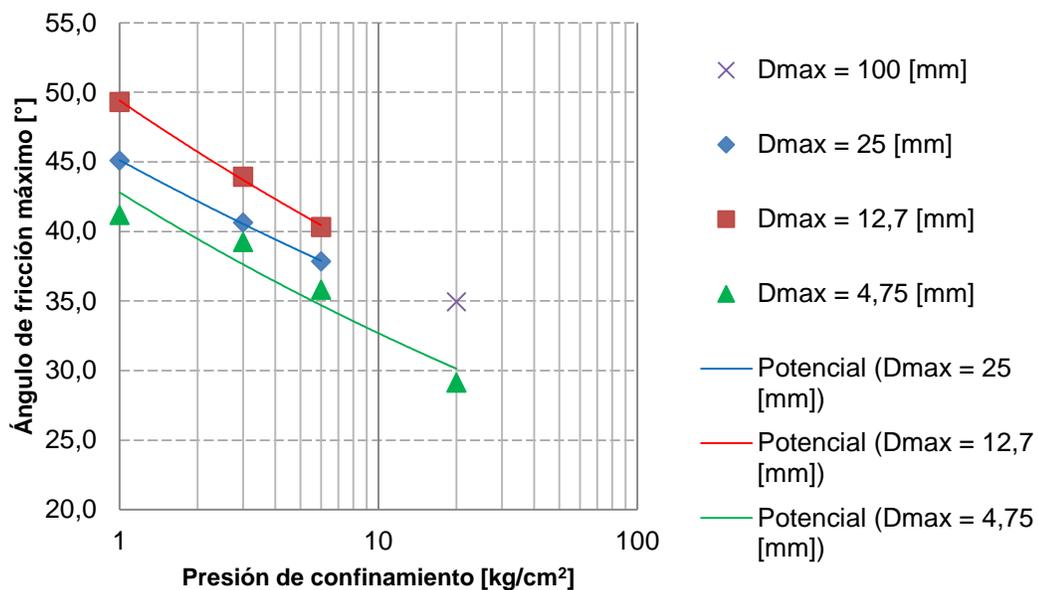


Figura 6-32. Ángulo de fricción máximo en función de presión de confinamiento, material Combinado

La Figura 6-33 muestra la variación del módulo E_{50} con la presión de confinamiento siguiendo una relación potencial como es de esperarse. A pesar de que en general a tendencia es creciente, los ensayos a 3 [kg/cm²] de confinamiento con D_{max} de 12,7 [mm] y 25 [mm] escapan a este comportamiento.

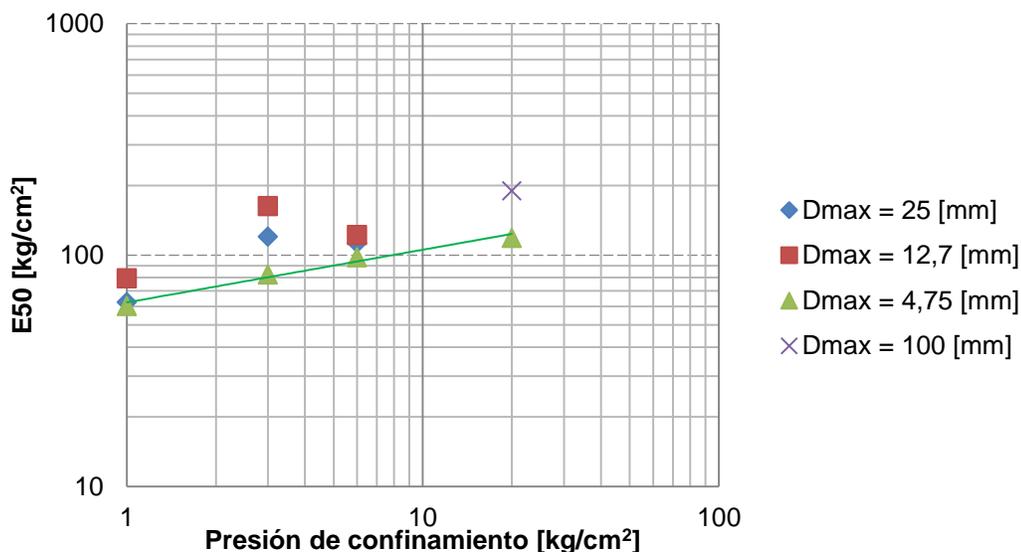


Figura 6-33. Módulo E_{50} en función de presión de confinamiento

Un resumen de las propiedades geomecánicas de cada granulometría es presentada en la Tabla 6-16.

Tabla 6-16. Resumen de propiedades geomecánicas, material Combinado

D_{max} [mm]	100		25		12,7		4,75	
σ_3 [kg/cm ²]	ϕ_p [°]	E_{50} [kg/cm ²]						
1	-	-	45,1	62,7	49,3	79,4	41,2	60,3
3	-	-	40,6	120,4	43,9	163,3	39,2	82,6
6	-	-	37,8	113,0	40,3	122,3	35,8	98,1
20	34,94	189,90	-	-	-	-	29,1	119,1

Se muestra en la Tabla 6-17 se presentan los parámetros de envolvente de falla del criterio de Mohr-Coulomb obtenidos de los ensayos con presión de confinamiento menor o igual a 6 [kg/cm²] donde se puede ver que la diferencia entre granulometrías llega a ser de 3,2° en el ángulo de fricción.

Tabla 6-17. Parámetros de envolvente de falla Mohr-Coulomb

D_{max} [mm]	Cohesión [kg/cm ²]	Ángulo de fricción [°]	R ²
25	0,55	35,8	0,9967
12,7	0,86	37,6	0,9988
4,75	0,45	34,4	0,9976

Al definir una envolvente no lineal relacionando esfuerzo normal y esfuerzo de corte (De Mello 1977) para cada granulometría se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 6-18. Para comparar las envolventes se han utilizado los ensayos triaxiales realizados a una presión de confinamiento menor o igual a 6 [kg/cm²]. También se adiciona a modo de comparación la envolvente para la granulometría $D_{\max} = 4,75$ [mm] utilizando también el ensayo con presión de confinamiento de 20 [kg/cm²] (señalada con un asterisco). Esta comparación es discutida en la Sección 7.2.

Tabla 6-18. Parámetros de envolvente no lineal (De Mello 1977), material Combinado

D_{\max} [mm]	A	b	R ²
25	1,09	0,85	1
12,7	1,29	0,82	1
4,75	0,93	0,89	0,9986
4,75*	0,99	0,84	0,9973

Por otro lado, al usar la envolvente no lineal en el espacio p-q para los ensayos a una presión de confinamiento menor o igual a 6 [kg/cm²] se obtienen los parámetros descritos en la Tabla 6-19 los que son usados para estimar el ángulo de fricción de un ensayo triaxial teórico con una presión de confinamiento de 20 [kg/cm²] (Tabla 6-20).

Tabla 6-19. Parámetros de envolvente no lineal en espacio p-q, material Combinado

D_{\max} [mm]	A'	b'	R ²
25	1,04	0,88	1
12,7	1,19	0,86	0,9999
4,75	0,92	0,91	0,9989

Tabla 6-20. Estimación de ángulo de fricción máximo a una presión de confinamiento de 20 [kg/cm²], material Combinado

D_{\max} [mm]	Ángulo de fricción estimado [°]	q_{\max} [kg/cm ²]
25	33,6	24,8
12,7	35,2	27,3
4,75	33,2	24,2

6.3.3 Rotura de partículas

Se presenta en primer lugar el resultado de rotura de partículas para la probeta de grandes dimensiones para el material combinado.

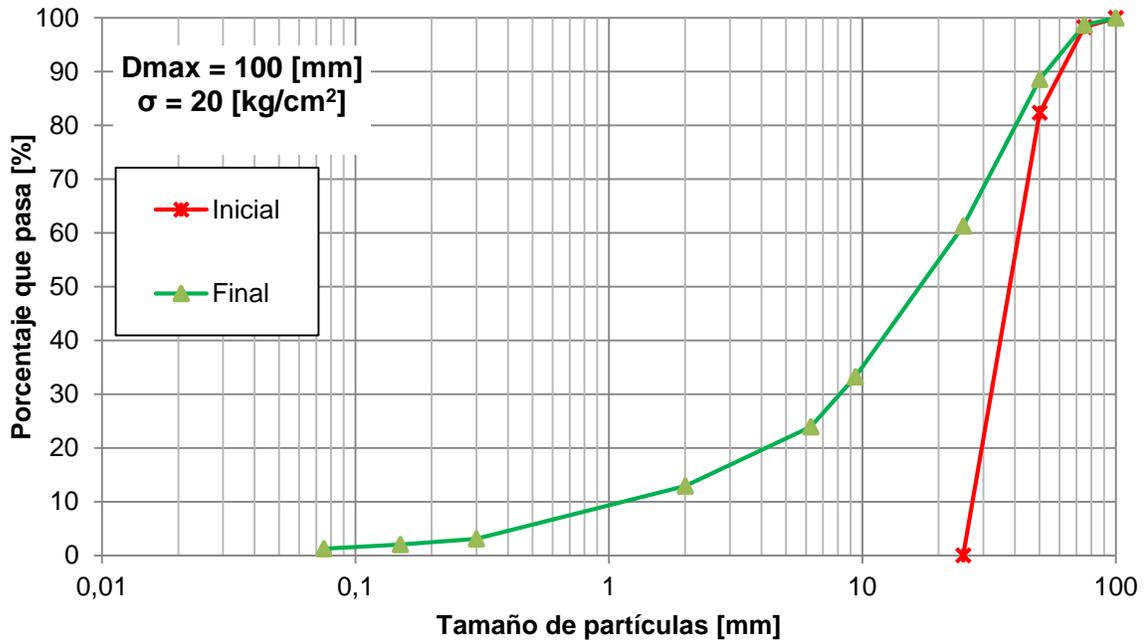


Figura 6-34. Granulometría post-ensayo de gran escala, material Combinado

Como se mencionó en la sección 5.2.2.3, la probeta para este material se dividió en las tres capas superiores (en total de 60 cm) que se caracterizaban por presentar una partícula retenida en 3" (75 mm) entre partículas retenidas en 1" (25 mm), y tres capas inferiores (en total de 60 cm) donde la partícula retenida en 3" (75 mm) estaba en contacto con partículas retenidas en 2" (50 mm). Esta distinción de granulometrías y su distribución post ensayo se muestran en la Figura 6-35 en la que se distinguen cantidades de rotura similares y las partículas de gran tamaño prácticamente no sufren rotura.

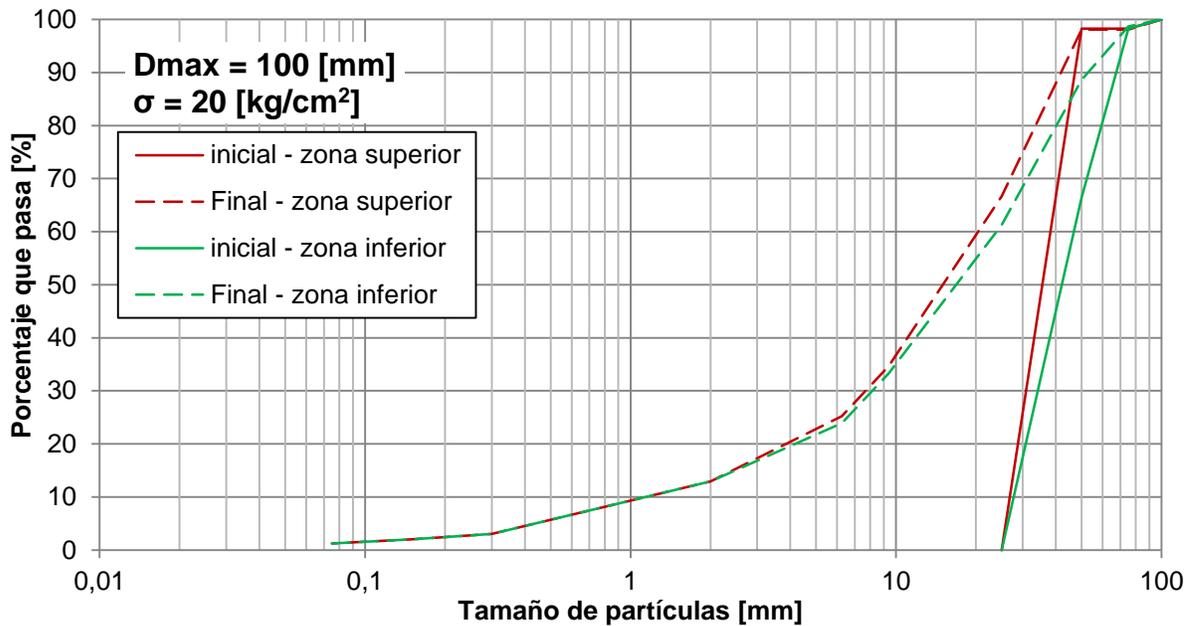


Figura 6-35. Granulometría post-ensayo en zonas de probeta de gran escala, material Combinado

La Figura 6-36 muestra las partículas retenidas en 3" para la zona superior de la probeta, mientras la Figura 6-37 presenta las partículas retenidas en 3" para la zona inferior de la probeta. Es notorio en estas imágenes que la zona aledaña a ellas sufre una gran rotura, sin embargo las evidencias de rotura en ellas son escasas y se refieren principalmente a desgaste por contactos y en un caso a rotura de un borde.



Figura 6-36. Partículas retenidas en 3" tras ensayo (zona superior)



Figura 6-37. Partículas retenidas en 3" tras ensayo (zona inferior)

La Figura 6-38 muestra evidencias de rotura diametral (*breaking*), y desintegración (*desintegrating*) en distintas partículas de la probeta.

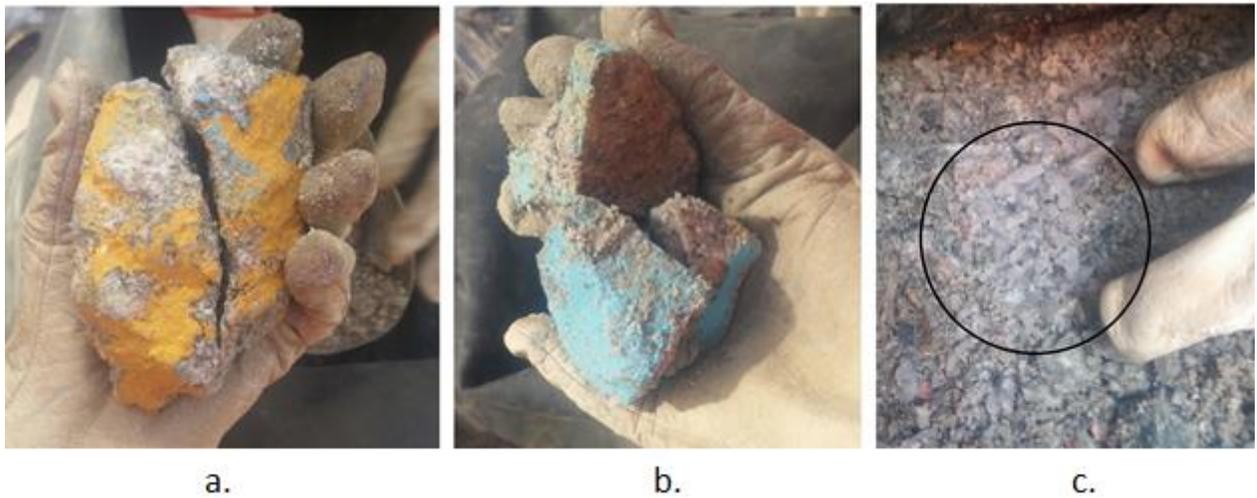


Figura 6-38. Evidencias de rotura (a) Material PES (b) Material PEK (c) pulverización de partícula

Se presentan a continuación las postgranulometrías de las curvas homotéticas a las distintas presiones de confinamiento.

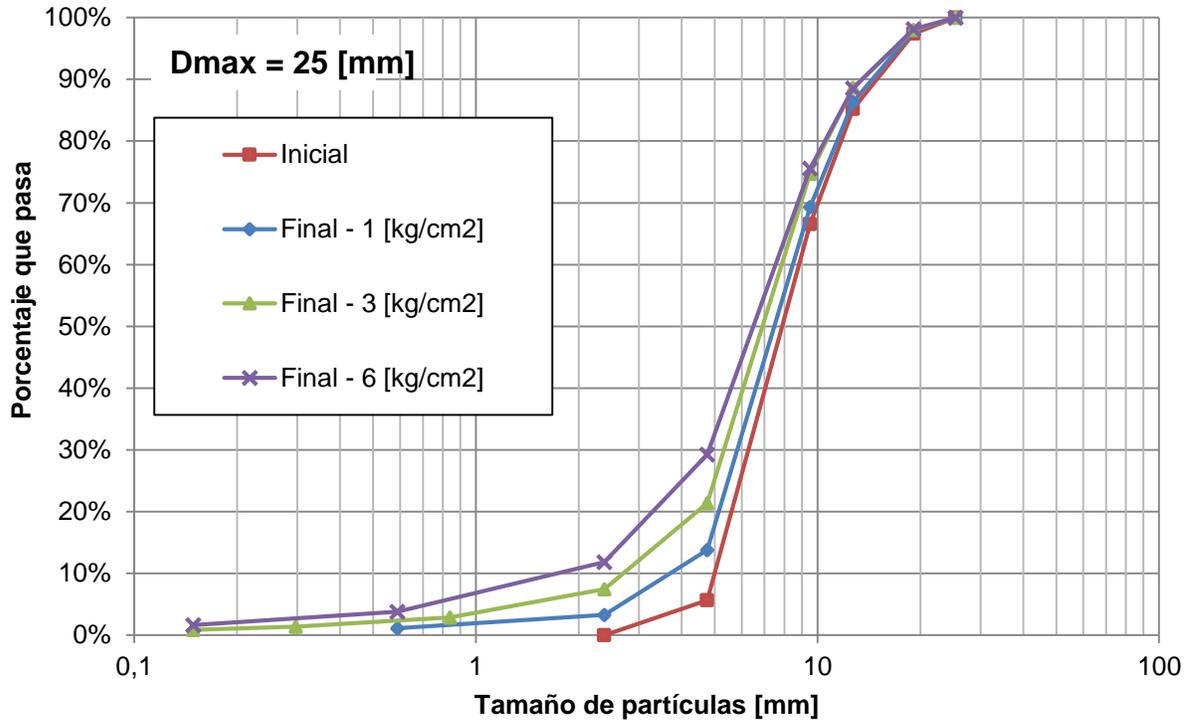


Figura 6-39. Granulometrías post-ensayo Dmax = 25 [mm]

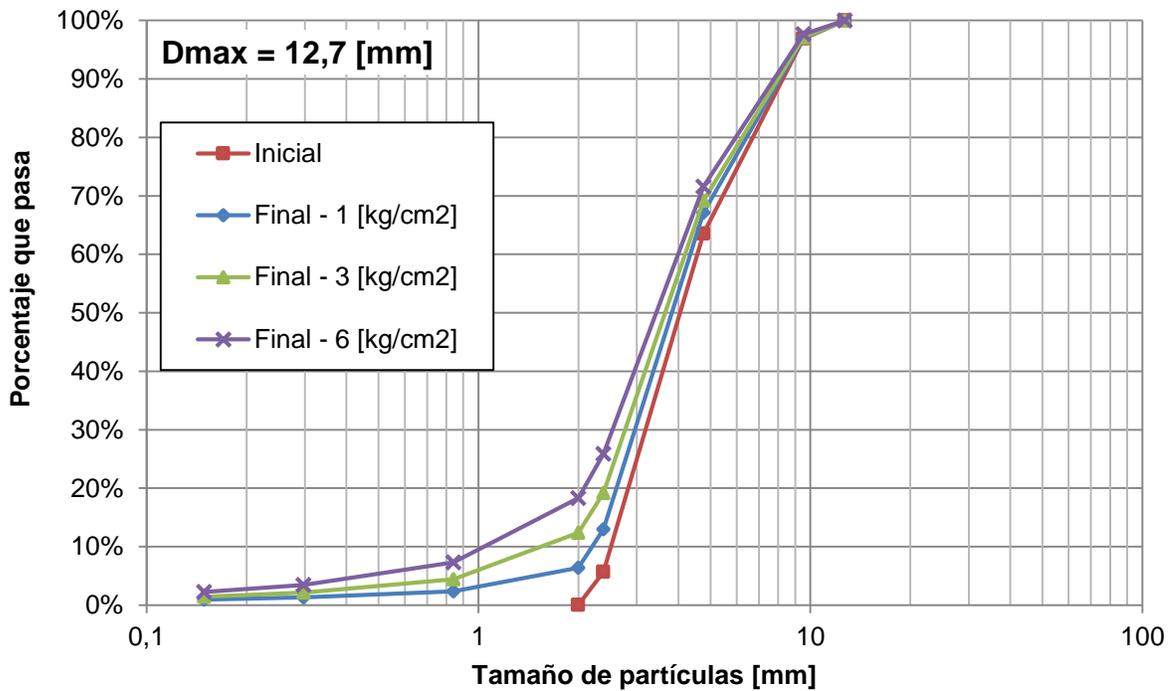


Figura 6-40. Granulometrías post-ensayo Dmax = 12,7 [mm]

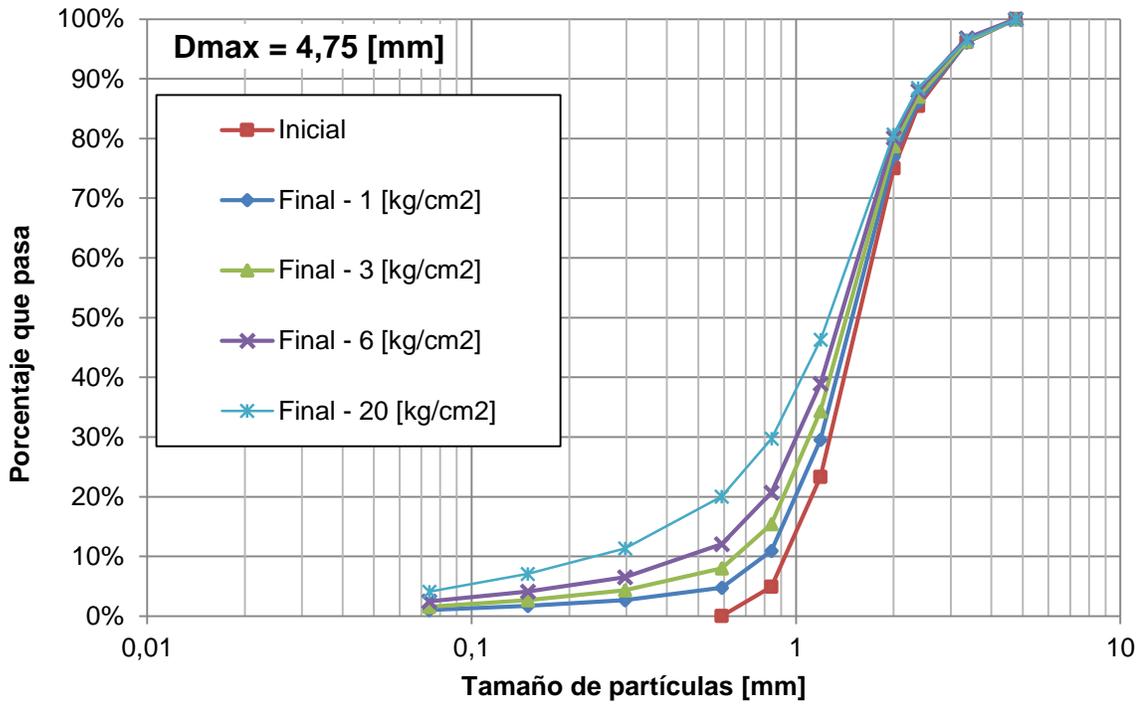


Figura 6-41. Granulometrías post-ensayo Dmax = 4,75 [mm]

A partir de los gráficos presentados se calcula el parámetro de rotura relativa de Hardin para cada granulometría. Estos resultados se muestran en la Figura 6-42 y evidencian el aumento de rotura de material con el incremento de confinamiento y tamaño. Para un confinamiento de 1 [kg/cm²] se observa una diferencia de 1% entre las probetas de tamaño máximo 4,75 [mm] y 25 [mm], mientras que para estas mismas a un confinamiento de 6 [kg/cm²] la diferencia aumenta a 3%.

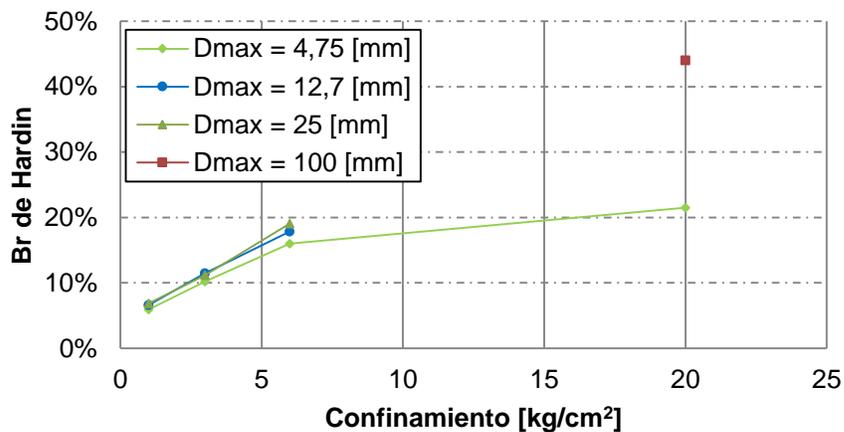


Figura 6-42. Rotura relativa de Hardin, material Combinado

7 Discusión y Análisis de Resultados

En esta sección se combinarán los resultados de resistencia, rotura y resistencia individual de partículas para comprender globalmente el comportamiento de los materiales estudiados. Se realizará una comparación del comportamiento de las unidades PES y PEK así como también de la combinación de ambos.

Con los resultados de rotura de partículas se propondrá un modelo que logre predecir la rotura para muestras de mayor tamaño a partir de granulometrías paralelas.

Finalmente, se presenta un análisis de la metodología para la determinación de densidad mínima para estos materiales.

7.1 Comparación de resultados mecánicos y de rotura

7.1.1 Comparación entre materiales

Es posible realizar una comparación bastante directa de los materiales, ya que las granulometrías de estos son muy similares y también lo es su índice I_{50} .

La Figura 7-1 muestra la comparación entre los ángulos de fricción de los materiales estudiados en esta investigación. Para las muestras de tamaño máximo 25 [mm] se percibe una caída similar en el ángulo de fricción, siendo el material PEK levemente más resistente pero no de una forma conclusiva. Este comportamiento va de la mano con lo que sucede en la rotura de partículas en donde es posible observar que la rotura relativa en el material PEK es superior solo por una pequeña diferencia (Figura 7-2).

Al observar lo que sucede en las muestras de tamaño máximo 12,7 [mm] ya se hace notorio que el material PES tiene una mayor degradación de ángulo de fricción en comparación al material PEK, el primero presenta una caída de casi 11° en el rango de presiones estudiado, mientras el segundo cae solo 4° estando el material Combinado en general en algún punto variable entre ambos materiales. En términos de rotura relativa se observa una diferencia de 3% siendo mayor la rotura en el material PEK.

Para las muestras de tamaño máximo 4,75 [mm] se repite el que el material PEK tenga una caída menor (9,7°) en el rango de presión de confinamiento entre 1 a 20 [kg/cm²]

en comparación con el material PES (12,5°) existiendo un punto de cruce entre ambos entre los 3 y 6 [kg/cm²] de presión de confinamiento. El material combinado tiene un ángulo de fricción muy cercano al del material PES en todo el rango de confinamiento. Respecto a la rotura relativa para estas muestras se observa que el material PES tiene una rotura menor hasta la presión de confinamiento de 10 [kg/cm²], punto en el cual existe una diferencia de 4% entre el material PES y los otros materiales. Sin embargo al llegar a los 20 [kg/cm²] de confinamiento los tres materiales coinciden en un 22% de rotura relativa.

También es interesante mencionar que el material PEK tiene un aumento rápido en rotura con el confinamiento, hasta llegar a un punto donde se observa una detención alrededor del 20% de rotura. Esto difiere de la evolución de rotura del material PES, ya que este gradualmente aumenta con el confinamiento sin evidenciar una detención, para finalmente coincidir con la rotura del material PEK a 20 [kg/cm²] de confinamiento.

Complementando lo anterior, al observar los gráficos de cambio volumétrico de los ensayos PEK de tamaño máximo 4,75 [mm] también se llega a un umbral de compresibilidad en el que prácticamente hay un solapamiento entre las presiones de 15 y 20 [kg/cm²] (Figura 6-16).

La detención de rotura que presenta el material PEK puede asociarse a lo que es conocido como distribución final, y que Einav (2007) utiliza como parámetro de rotura relativa (Figura 7-3) en vez del límite de malla #200 propuesto por Hardin (1985). Sin embargo es un tema que requiere mayor análisis, ya que el mecanismo del ensayo triaxial no ejerce corte en toda la probeta, por lo que no parece fácil llegar a un máximo de rotura con este ensayo.

Considerando lo dicho anteriormente, se deduce que no es la rotura la única responsable de la caída de resistencia de estos materiales, sino que también se atribuye a otras características intrínsecas de estos. Por ejemplo, al comparar los materiales en cuanto a forma, a pesar de que ambos poseen partículas angulares, la superficie de un gran porcentaje de partículas PES (en torno al 30%) se caracteriza por tener caras planas, mientras que el material PEK carece de partículas con esta condición, abundando en partículas con superficies rugosas. Esto podría explicar la

diferencia en el comportamiento friccional a distintos confinamientos de ambos materiales.

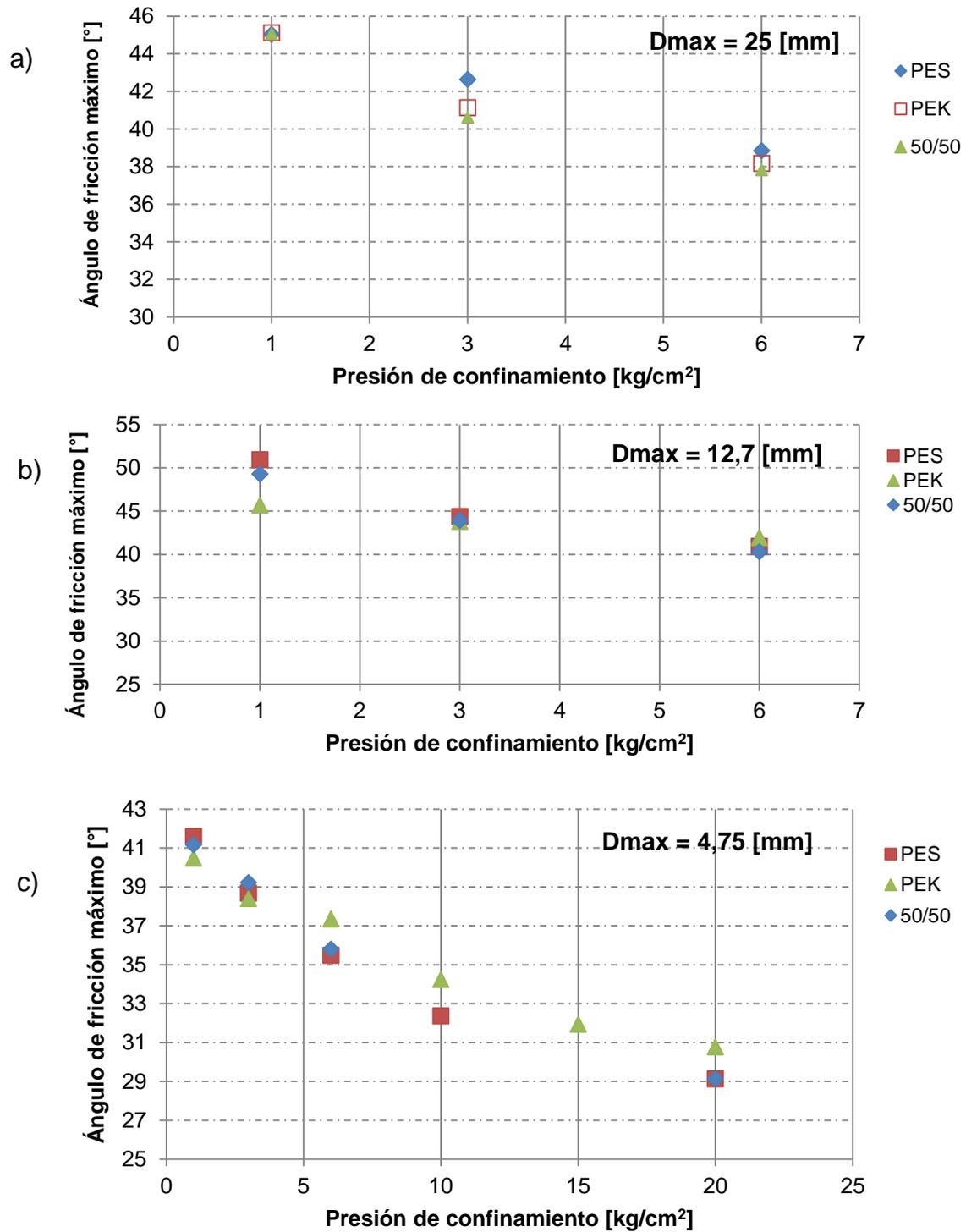


Figura 7-1. Comparación de caída de ángulo de fricción máximo en materiales (a) $D_{max} = 25$ [mm] (b) $D_{max} = 12,7$ [mm] (d) $D_{max} = 4,75$ [mm]

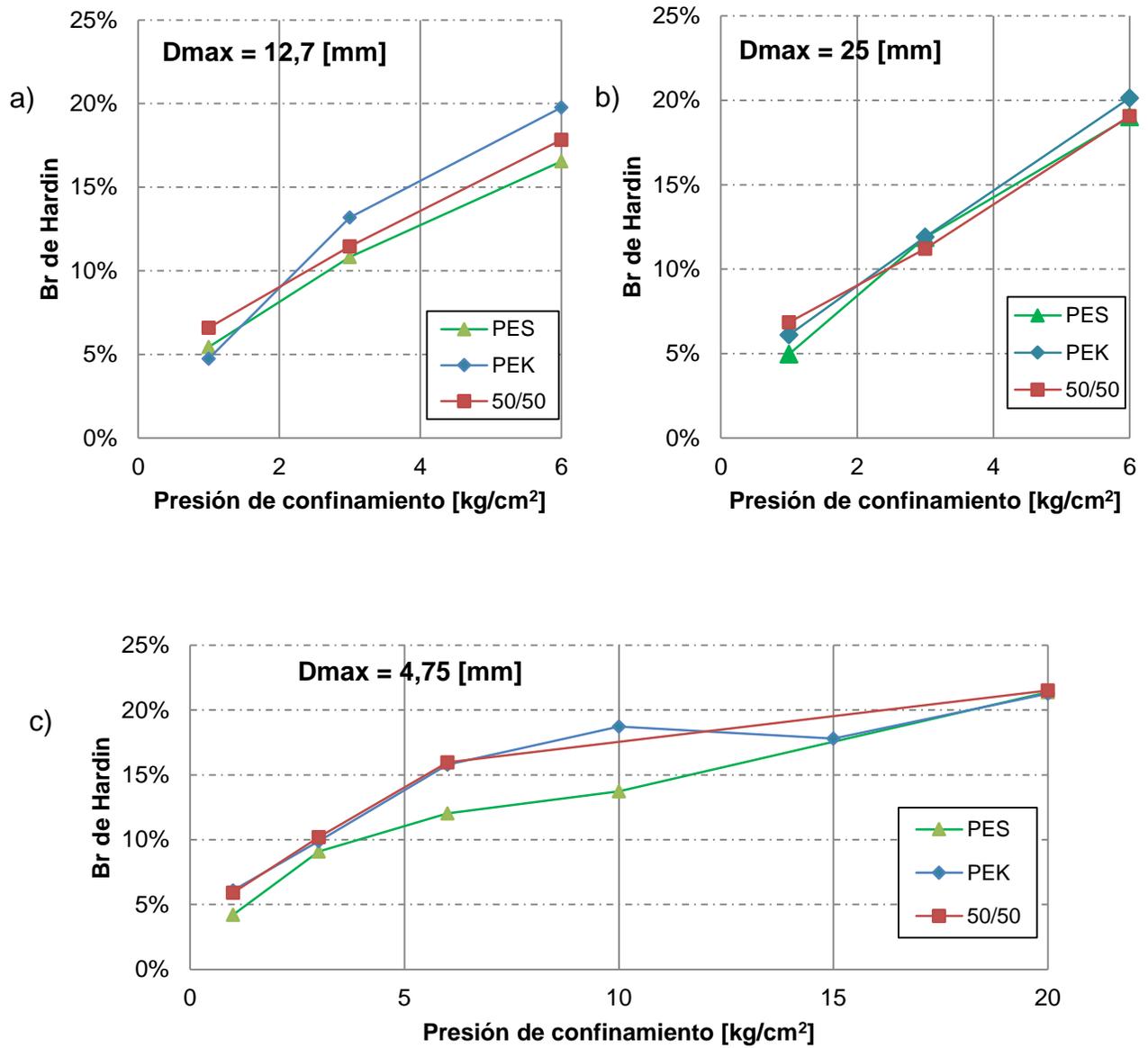


Figura 7-2. Comparación de rotura de partículas en materiales (a) D_{max} = 12,7 [mm] (b) D_{max} = 25 [mm] (d) D_{max} = 4,75 [mm]

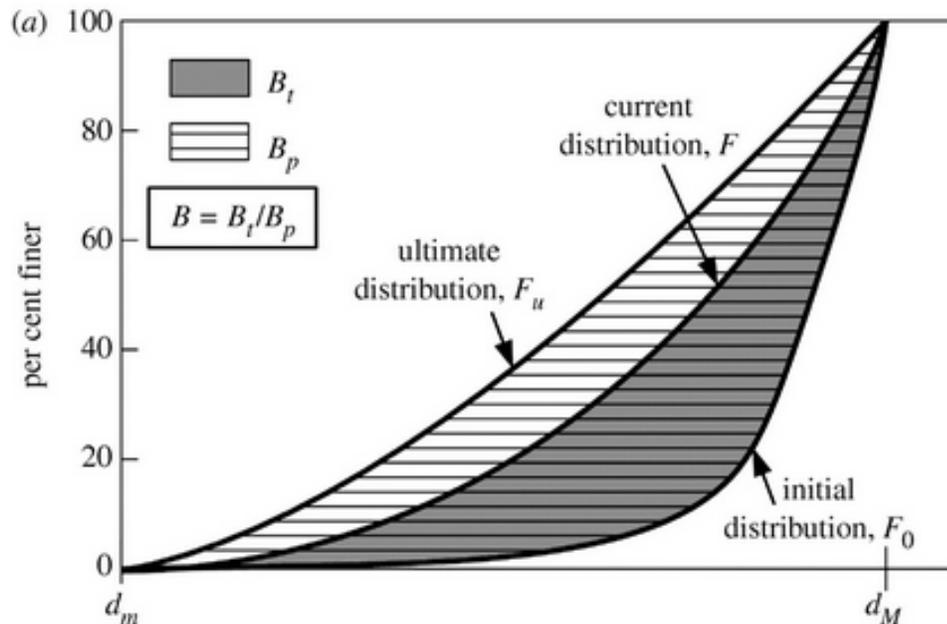


Figura 7-3. Rotura relativa de Einav (2007)

7.1.2 Comparación entre escalamientos

Respecto a los ensayos con tamaño máximo de 12,7 [mm], se observó en todos los casos que estos obtuvieron una resistencia mayor a las otras dos granulometrías escaladas, no siguiendo una tendencia de resistencia con tamaño de partícula. La diferencia en el ángulo de fricción encontrado con esta granulometría y las demás se presenta en la Tabla 7-1 llegando incluso hasta 9° en el material PES. La diferencia tiende a descender con el aumento de la presión de confinamiento,

Tabla 7-1. Diferencia de ángulo de fricción en homotéticas respecto a $D_{max} = 12,7$ [mm]

σ_3	$\Delta\phi$ PES		$\Delta\phi$ PEK		$\Delta\phi$ 50/50	
	4,75 [mm]	25 [mm]	4,75 [mm]	25 [mm]	4,75 [mm]	25 [mm]
1	9,4	5,9	5,2	5,5	4,2	8,1
3	5,7	1,7	5,4	2,7	4,8	4,7
6	5,5	2,1	4,6	3,8	2,5	4,5

Existe la probabilidad de que esta situación se deba a la velocidad usada en estos ensayos, que como se menciona en la sección 5.2.1 se realizaron a un 0,19% de tasa de deformación, lo cual es superior al 0,13% de las otras curvas homotéticas.

Esto indicaría que en estos tipos de materiales la velocidad de la aplicación de corte es un factor incidente. Oldecop y Alonso (2007) indican que la deformación volumétrica en la etapa de corte en enrocados es dependiente del tiempo, lo cual coincide con las curvas de deformación volumétrica en este material que fueron mucho menos contractivas y más dilatantes, según el caso. Sin embargo es claro que es un efecto que se debe corroborar y no es posible concluir en base a lo obtenido.

Si se aísla el resultado de las probetas con tamaño máximo 12,7 [mm], comparando solo las granulometrías con tamaño máximo 4,75 [mm] con 25 [mm] las diferencias son menores, e incluso en el caso del material PES no sobrepasan los 3,5°.

Tabla 7-2. Diferencia de ángulo de fricción respecto a Dmax = 25 [mm]

	$\Delta\phi$ PES	$\Delta\phi$ PEK	$\Delta\phi$ 50/50
σ_3	4,75 [mm]	4,75 [mm]	4,75 [mm]
1	3,5	5,2	3,9
3	4,0	2,7	1,4
6	3,4	0,8	2,0

7.2 Evaluación de ajuste y predicción de envolventes

En las tablas y figuras presentadas en las secciones 6.1.2, 6.2.2 y 6.3.2 de las envolventes de falla no lineales se observa que el ajuste de las envolventes es bastante preciso en el rango de presiones de confinamiento entre 1 y 6 [kg/cm²]. La Figura 7-4 muestra además la envolvente no lineal para las granulometrías de tamaño máximo 4,75 [mm] en los tres materiales en el rango de confinamientos entre 1 y 20 [kg/cm²]. A partir de esta se confirma que la envolvente no lineal propuesta por De Mello (1977) es un modelo que logra un muy buen ajuste para la resistencia de estos materiales, aunque en las altas presiones entrega un resultado levemente no conservador pasando sobre los puntos de los ensayos triaxiales realizados.

Respecto al ajuste usando la envolvente de Mohr-Coulomb, es evidente que no es el criterio más apropiado para este tipo de materiales y su uso puede ser apropiado solo para bajos confinamientos, pero es altamente no conservador para mayores presiones.

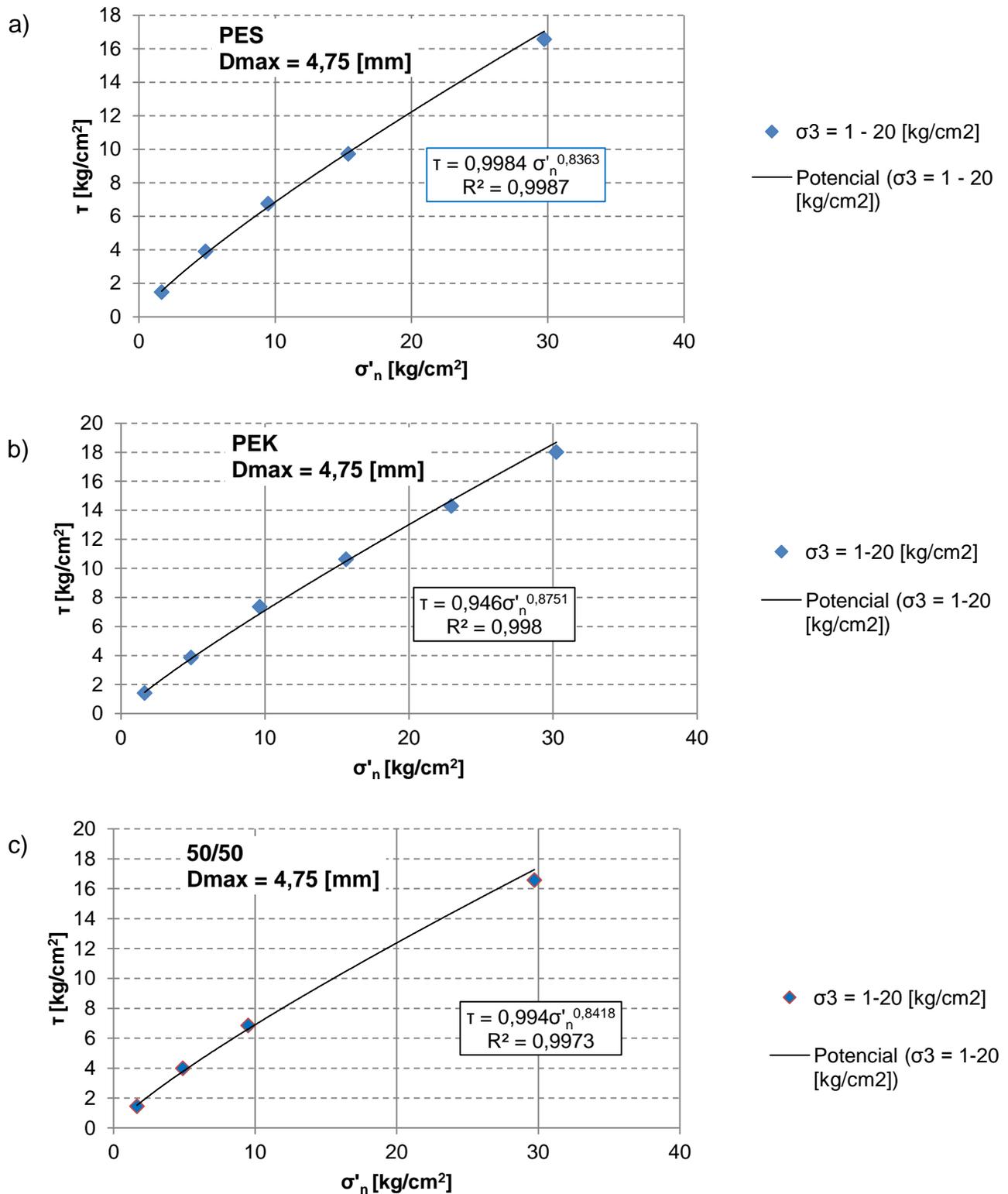


Figura 7-4. Ajuste de envolvente no lineal (De Mello, 1977) D_{max} = 4,75 [mm] a) PES (b) PEK (d) Combinado

En la sección 6 además se mostró los distintos materiales que lograban predecir mediante el uso de una envolvente no lineal un ángulo de fricción máximo para un confinamiento de 20 [kg/cm²] cercano al obtenido en los ensayos de grandes dimensiones. Estos resultados se resumen en Tabla 7-3 en la que las filas con asterisco son las estimadas con envolvente no lineal en el espacio p-q.

Tabla 7-3. Comparación de ángulos de fricción a 20 [kg/cm²]

D _{max} [mm]	PES	PEK	50/50
150	33,2	36,1	34,6
25*	33,2	33,9	33,6
12,7*	34,9	39,9	35,2
4,75*	32,3	35,3	33,2
4,75	29,1	30,8	29,1

Para evaluar cuan precisa es esta metodología se han utilizado los datos reales de los ensayos triaxiales con granulometrías de tamaño máximo D_{max} = 4,75 [mm] y al igual que en los otros escalamientos solo se consideran los ensayos triaxiales con presiones de confinamiento de a 1, 3 y 6 [kg/cm²]. A partir de ellos se deduce la resistencia a 20 [kg/cm²] usando la envolvente no lineal para finalmente comparar este valor con el resultado obtenido en el ensayo a 20 [kg/cm²] de confinamiento para la misma granulometría, como se ejemplifica en la Figura 7-5. La Figura 7-6 muestra esta predicción en el espacio τ-σ'_n para el material PEK.

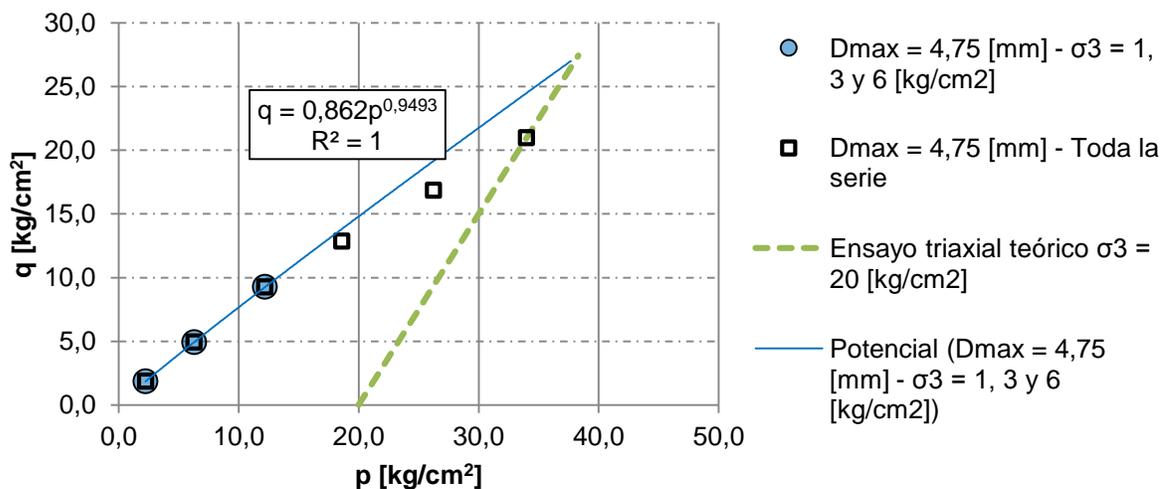


Figura 7-5. Ajuste envolvente no lineal p-q, material PEK

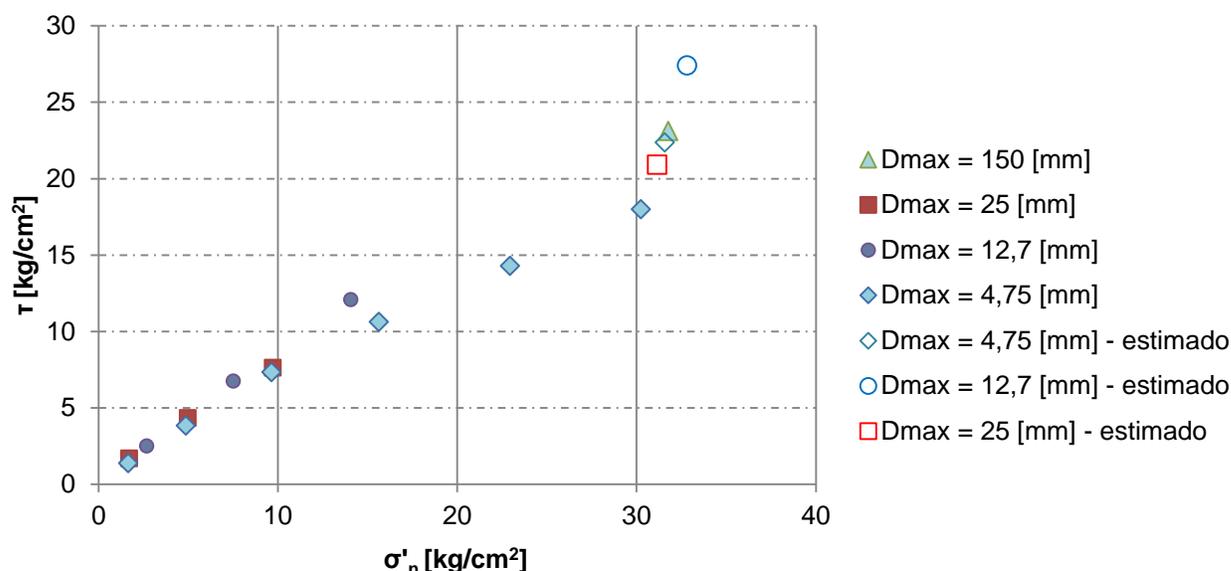


Figura 7-6. Estimación de resistencia a 20 [kg/cm²] para las distintas granulometrías homotéticas, material PEK

Los valores de esta comparación se presentan en la Tabla 7-4 donde es posible observar que la degradación de la resistencia es mayor a la que predice la envolvente no lineal con los 3 puntos experimentales, siendo las diferencias del orden de los 4° y porcentualmente de un 10%.

Tabla 7-4. Comparación de resultados y envolvente no lineal

	ϕ PES	ϕ PEK	ϕ 50/50
Envolvente no lineal	32,3	35,3	33,2
Ensayo Triaxial	29,13	30,8	29,1
Diferencia	3,17	4,5	4,1

Esto hace suponer que las estimaciones realizadas para las otras granulometrías ($D_{max} = 12,7$ [mm] y $D_{max} = 25$ [mm]) también tienen este sesgo, de forma que los valores estimados en la En la sección 6 además se mostró los distintos materiales que lograban predecir mediante el uso de una envolvente no lineal un ángulo de fricción máximo para un confinamiento de 20 [kg/cm²] cercano al obtenido en los ensayos de grandes dimensiones. Estos resultados se resumen en Tabla 7-3 en la que las filas con asterisco son las estimadas con envolvente no lineal en el espacio p-q.

Tabla 7-3 deben en realidad ser del orden de 10% menor.

7.3 Estimación de rotura de granulometrías con mayor D_{max}

De los resultados mostrados en la sección 6 de este informe respecto a la rotura relativa y también de resistencia individual de partículas se puede inferir que a una presión de confinamiento dada, al aumentar el tamaño de partícula, se tendrá también un aumento de la rotura. Ahora bien, si se aumenta el confinamiento, la diferencia de aumento de rotura con el tamaño es mayor. Gráficamente, en un espacio Br vs Tamaño con curvas representando cada confinamiento, esta relación se muestra en una pendiente cada vez más empinada mientras más aumente el confinamiento, y a su vez estas curvas estarán ubicadas más arriba en el gráfico.

De los datos obtenidos es posible ajustar cada curva con una ecuación potencial. En este caso es conveniente dividir la variable tamaño por el tamaño máximo de la granulometría menor, de forma que en la expresión matemática el ponderador corresponda a la rotura para una granulometría de tamaño máximo de 1 [mm], mientras el exponente exprese la inclinación de la curva, por lo que para la curva correspondiente a un confinamiento de 20 [kg/cm²] se tendrá un exponente mayor a los anteriores. La expresión se muestra a continuación:

$$Br = K \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^n$$

Dónde:

- Br: Rotura relativa de Hardin [%]
- K: Constante que representa la rotura obtenida para la muestra de menor tamaño máximo [%]
- D: Tamaño máximo de partícula de granulometría homotética
- d: Menor tamaño máximo de las granulometrías homotéticas usadas en la regresión.
- n: exponente que evidencia influencia del tamaño

Es importante considerar que en las muestras de tamaño máximo 25 [mm] la cámara utilizada no permitía llegar 20% de deformación por lo que la rotura en estos ensayos triaxiales debe ser un poco mayor a la que se obtuvo en esta investigación.

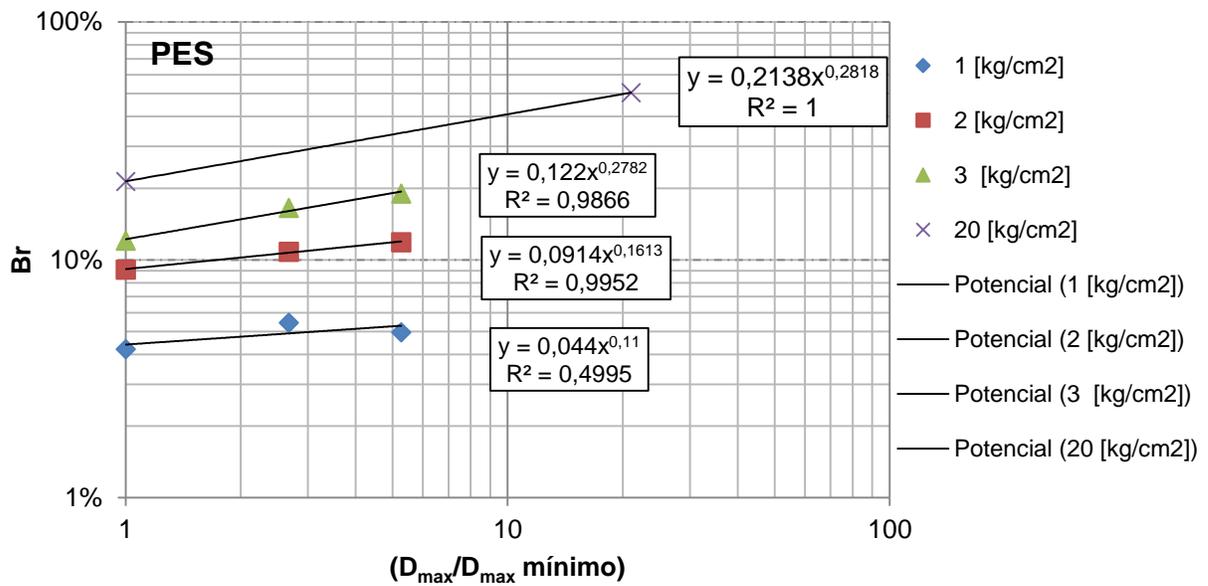


Figura 7-7. Estimación de rotura material PES

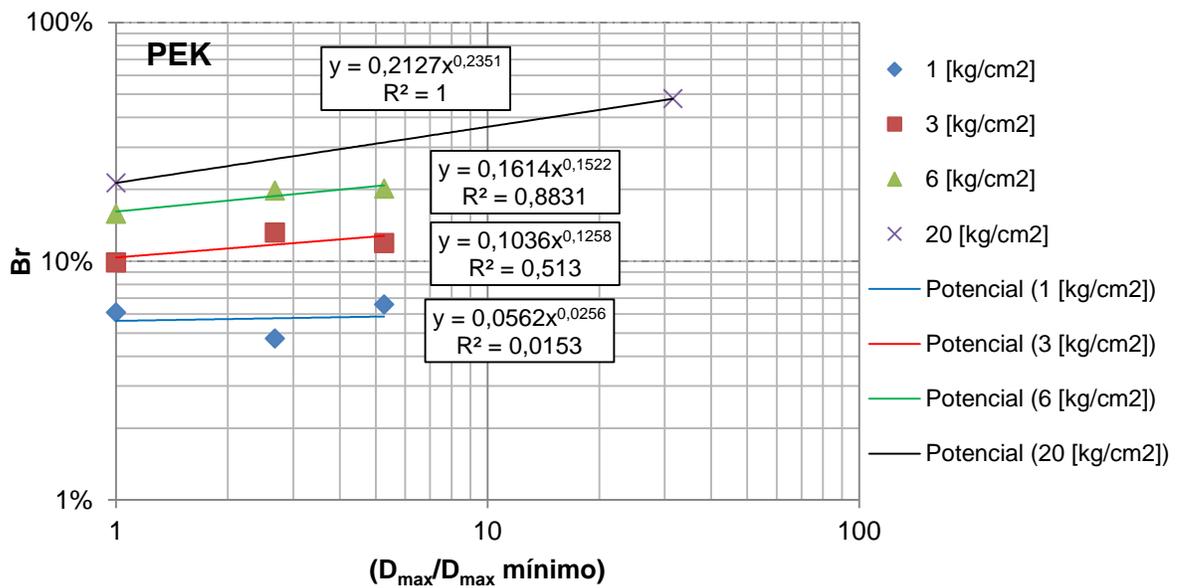


Figura 7-8. Estimación de rotura material PEK

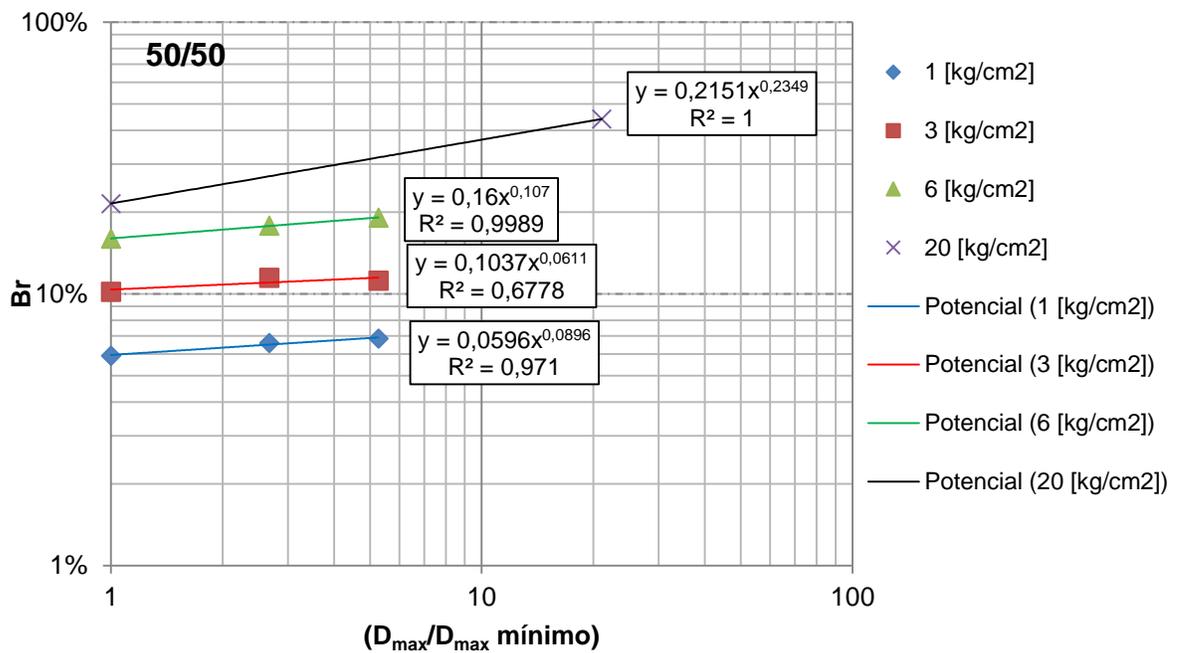


Figura 7-9. Estimación de rotura material combinado

Mediante esta relación matemática es posible extrapolar la rotura relativa que tendrán muestras con granulometrías de tamaño máximo aun mayor a los estudiados. Este análisis es mostrado en la Tabla 7-5.

Tabla 7-5. Extrapolación de rotura relativa (Br) para mayores D_{max}

Material	D_{max} [mm]	d/D	Presión de confinamiento [kg/cm ²]		
			1	3	6
PES	100	21	6%	15%	28%
	1000	211	8%	22%	54%
	2673	563	9%	25%	71%
PEK	150	32	6%	16%	27%
	1000	211	6%	20%	36%
	3368	709	7%	24%	44%
50/50	100	21	8%	12%	22%
	1000	211	10%	14%	28%
	3000	632	11%	15%	32%

Si quisiera estimarse la rotura que tendrá alguna muestra de granulometría distinta a $D_{\max} = 4,75$ [mm] a una presión de confinamiento de 20 [kg/cm²] una opción es ver la relación real existente de la rotura relativa entre 6 y 20 [kg/cm²] de confinamiento y usar esta ponderación en los ensayos para la muestra del tamaño buscado. Con este procedimiento también se puede completar la curva del confinamiento 20 [kg/cm²] en el espacio Br vs D_{\max} , con el cual se realiza una nueva estimación. Este procedimiento es menos estricto que el anterior ya que las tendencias son menos claras a priori en el espacio Br vs σ_3 y lo ideal sería tener a un mismo confinamiento una serie de granulometrías de tres tamaños máximo, sin embargo es sabido que equipos que ensayen probetas de tamaños 10 [cm] x 20 [cm] o 15 [cm] x 30 [cm] a altas presiones son escasos.

7.4 Comparación de resultados con literatura

A fin de tener una referencia de los resultados obtenidos en esta investigación se han escogido de la literatura ensayos que presenten entre sus características coeficientes de uniformidad bajos o índices de vacíos iniciales cercanos a los de este trabajo para compararlos.

La Figura 7-10 presenta los resultados de ángulo de fricción máximo para el material PES obtenidos en los ensayos triaxiales de gran escala y granulometrías de tamaño convencional. El ensayo triaxial de gran escala cae en la zona que Leps (1970) define como enrocado de baja resistencia,

Respecto al material escalado PES, dependiendo de la granulometría referida se ubica desde la zona de enrocados promedios hasta incluso el límite inferior (Indraratna 1993) para el ensayo de confinamiento 20 [kg/cm²].

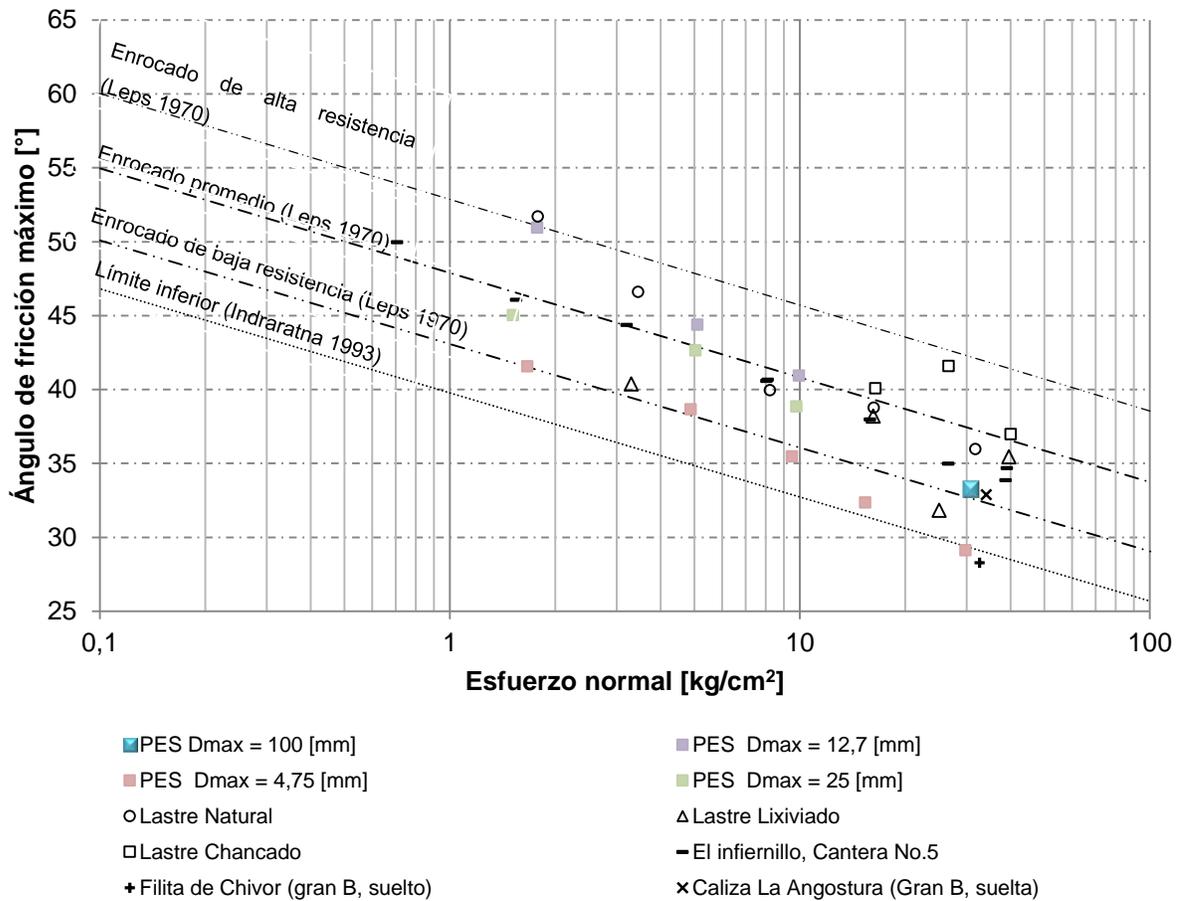


Figura 7-10. Comparación de resultados, material PES

En la Figura 7-11 el material PEK es comparado con los mismos datos que el material PES. En esta se observa que el ensayo de grandes dimensiones se acerca al rango de “enrocado promedio”. La muestra de tamaño máximo 25 [mm] se ubica entre “enrocado promedio” decayendo hacia “enrocado de baja resistencia”. La muestra de tamaño máximo 12,7 [mm] se comporta un “enrocado promedio”, y finalmente la muestra de tamaño máximo 4,75 [mm] se muestra como un “enrocado de baja resistencia” decayendo hacia el rango “límite inferior”.

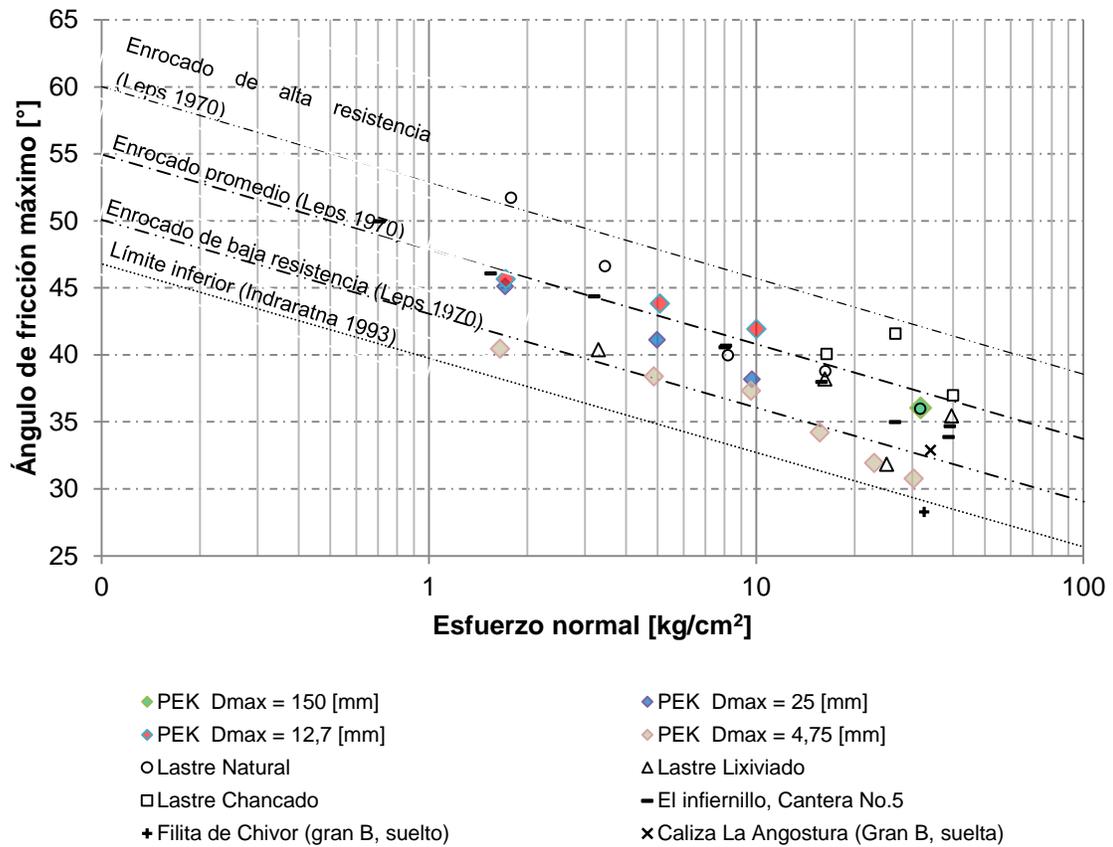


Figura 7-11. Comparación de resultados, material PEK

La Figura 7-12 muestra la comparación de la literatura con los resultados del material Combinado en sus distintas granulometrías. De esta se aprecia que el ensayo de gran escala se encuentra entre los rangos de “enrocado promedio” y “enrocado de baja resistencia”. El material de tamaño máximo 25 [mm] presenta una caída desde la zona “enrocado promedio” a “enrocado de baja resistencia” al aumentar la presión de confinamiento. La granulometría $D_{max} = 12,7$ [mm] está a bajos confinamientos próxima a un “enrocado de alta resistencia”, pero llega a quedar bajo del rango “enrocado promedio” al llegar a 6 [kg/cm²] de confinamiento. Finalmente, la muestra de tamaño máximo 4,75 [mm] va desde la zona de enrocados de baja resistencia hasta llegar incluso bajo el “límite inferior” propuesto por Indraratna (1993).

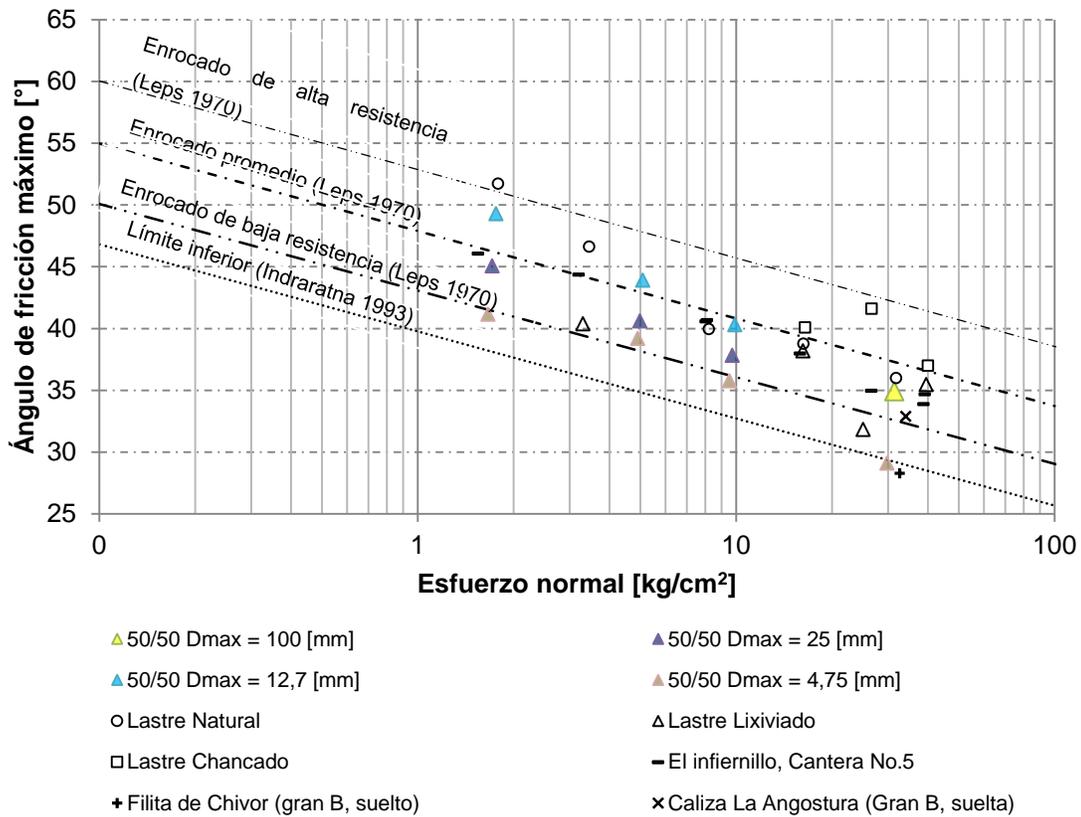


Figura 7-12. Comparación de resultados, material Combinado

Se observa en los ensayos de gran escala una superposición con los resultados de Marsal (1965) para el enrocado de El Infiernillo Cantera No. 5 y también con el lastre natural de Contreras.

Cabe mencionar respecto a las tendencias propuestas por Leps (1970) e Indraratna (1993) que pueden producir confusión ya que en general los enrocados pueden presentar comportamientos a una presión de confinamiento que quedarían clasificados como enrocados de alta resistencia, y luego cambiar de zona a un enrocado de baja resistencia siendo el mismo material, o viceversa. Como han indicado Banks et al. (1971), cada material tiene su propia ley de decaimiento de resistencia con el aumento del confinamiento.

Bajo el mismo criterio que para el ángulo de fricción, los resultados de rotura son comparados utilizando el parámetro de rotura relativa de Hardin (Br). En la Figura 7-13 se ha agregado solo la fragmentación de los ensayos de gran escala y de los escalamientos del material PES, a fin de no saturar el gráfico, considerando además que los niveles de rotura de los otros materiales son semejantes.

Se observa que la rotura de los materiales tronados de esta investigación es largamente superior a la del set de datos de referencia, cumpliéndose incluso que el material escalado PES llega a ser mayor que la de los lastres. Esto puede ser debido por un lado al bajo coeficiente de uniformidad de las muestras ensayadas y también a que los lastres ya han sufrido un proceso de rotura en su transporte y depositación dentro de la mina, por lo que es muy probable que las partículas más débiles ya hayan sufrido rotura de antemano.

Es destacable también que para los materiales Filita de Chivor ($C_u = 2, e_i = 0,81$) y Caliza la Angostura ($C_u = 2, e_i = 0,73$) no se alcanza con la deformación axial cercana al 14,5% el estado crítico, y analizando la base de datos de los ensayos de Marsal puede observarse que aquellos materiales con un bajo coeficiente de uniformidad tienden a necesitar mayores deformaciones para alcanzar esta condición. Este comportamiento también es notoriamente observado en los resultados de esta investigación.

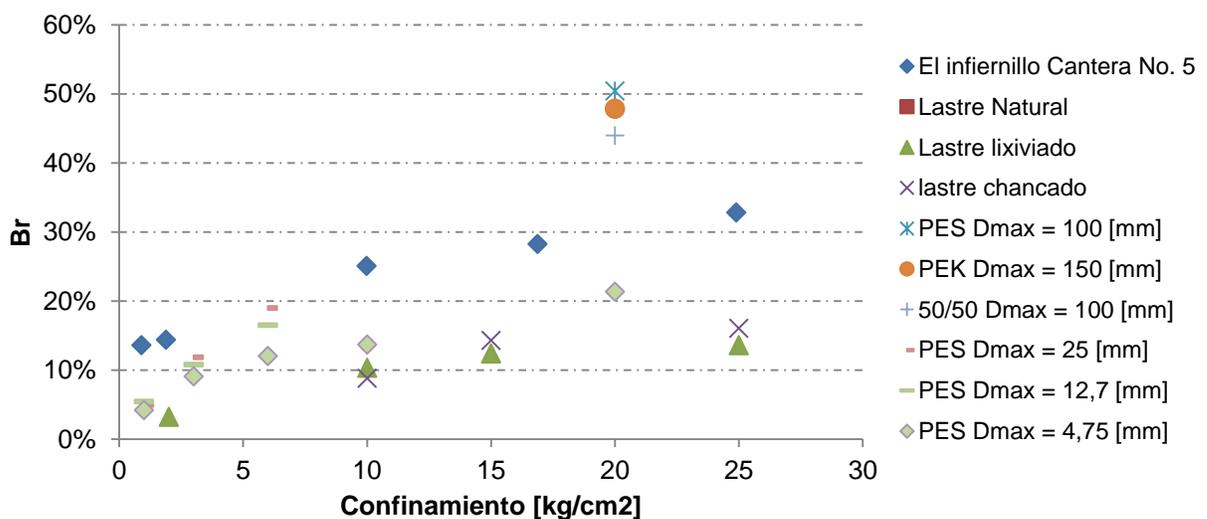


Figura 7-13. Comparación de rotura con otros materiales

Finalmente se realiza una comparación de los resultados del módulo de deformación E_{50} con la base de datos recopilada por Ovalle et. al (2014). Esta se presenta en la figura y queda en evidencia cuan bajo son los resultados obtenidos, los cuales se entienden el bajo coeficiente de uniformidad y la baja densidad utilizada que hacen que el material sea muy compresible.

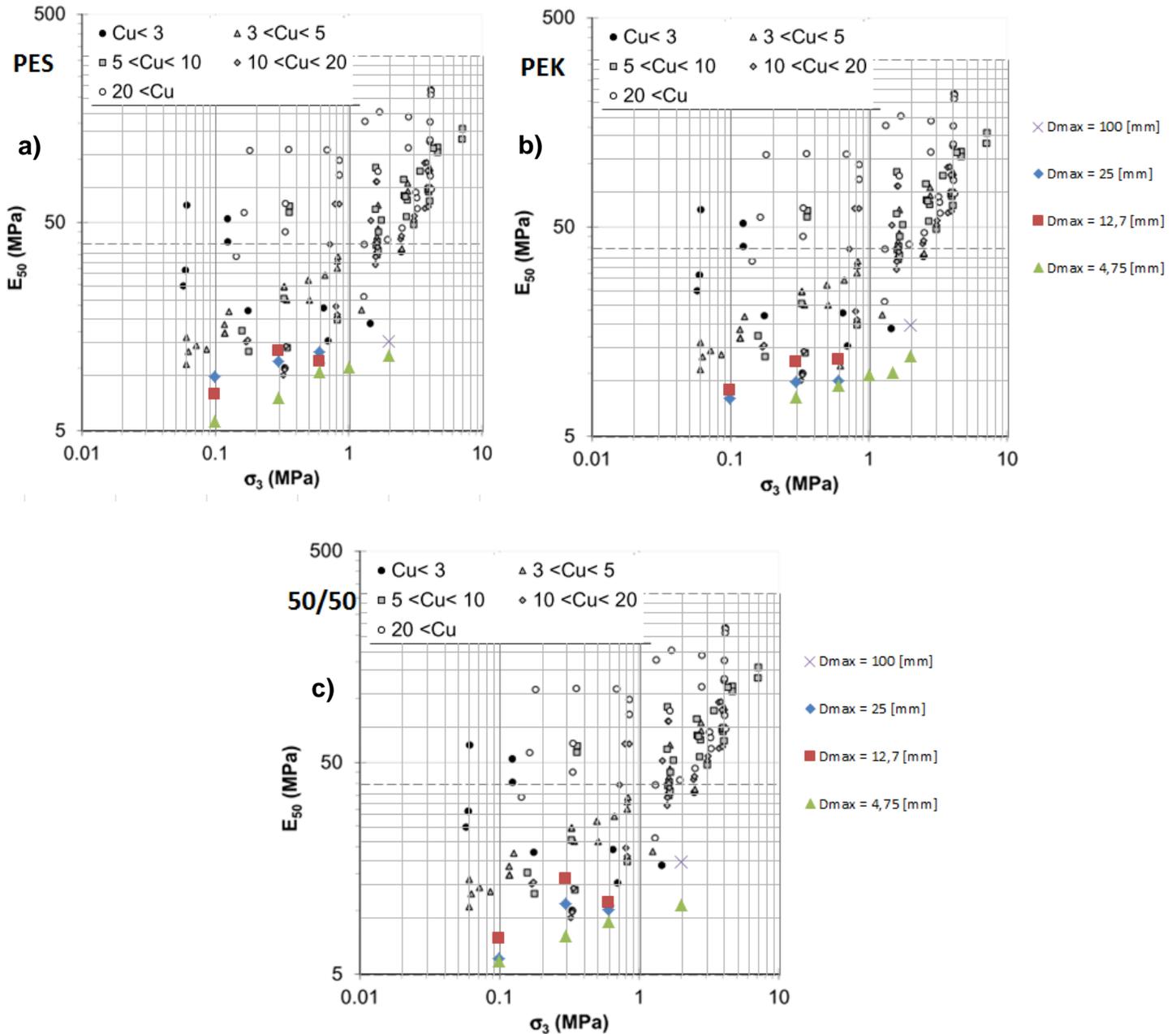


Figura 7-14. Comparación de módulo de deformación E_{50} para (a) PES, (b) PEK, (c) 50/50

7.5 Análisis de metodología de determinación de densidad mínima

Durante la determinación de la densidad seca mínima de los materiales utilizados se percibió que esta se veía considerablemente alterada al utilizar diferentes metodologías pudiendo alcanzarse densidades menores usando métodos alternativos a los propuestos por las normas. Para comparar este efecto, utilizando las granulometrías de tamaño máximo 12,7 [mm] de las muestras PES y PEK, se depositó el material en un molde de 2,8 litros de capacidad siguiendo cuatro procedimientos detallados a continuación:

1. Depositación controlada: El material es contenido en una bolsa y es depositado lentamente en el molde mediante deslizamiento, como recomienda la Nch 1726 Of. 1980.
2. Manual: Usando una poruña el material es depositado en el molde.
3. Depositación rápida: El material contenido en una bolsa es colocado rápidamente en el molde al ser vertido directamente.
4. Embudo Largo: El embudo de la se ubica en medio del molde y se llena con material. Luego es levantado rápidamente permitiendo la dispersión del material en el molde.



Figura 7-15. Embudo largo en molde de ensayos de densidad.

Los resultados de estos procedimientos son mostrados en la Tabla 7-6 en la que se aprecia que los métodos que obtuvieron menor densidad son aquellos caracterizados por una rápida colocación del material, llegando a existir una diferencia de 0,1 [gr/cm³] para el caso del material PEK. Este comportamiento puede ser explicado debido a que las partículas de estos materiales de bajo coeficiente de uniformidad y sin matriz tienen un menor tiempo de reacomodo al ser depositadas rápidamente.

Tabla 7-6. Resultados de determinación de densidad mínima

Método	Densidad [gr/cm ³]	
	PES	PEK
Controlada	1,41	1,41
Manual	1,40	1,38
Rápida	1,34	1,34
Embudo	1,35	1,31

Debido a esto, se recomienda que en la determinación de la densidad mínima de este tipo de materiales se utilicen métodos de depositación rápida.

8 Conclusiones y Recomendaciones

8.1 Conclusiones

De acuerdo a los resultados y análisis de la investigación llevada a cabo se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- La resistencia mecánica de un material granular grueso puede ser estimada de forma aceptable con el uso del método de gradación paralela.
- La rotura de partículas de un material granular grueso puede estimarse a través de extrapolaciones de la rotura de muestras escaladas ensayadas a un mismo confinamiento mediante el método de gradación paralela.
- Los materiales granulares presentan un decaimiento de su resistencia en función del esfuerzo normal. Este decaimiento puede ser pronunciado dependiendo no solo de la rotura de partículas sino también de otras propiedades intrínsecas del material como la forma de las partículas (rugosidad, forma y redondez).
- El tamaño máximo de partícula de una muestra afecta la resistencia de una probeta, encontrándose en este estudio que las granulometrías de mayor tamaño presentan mayor resistencia.
- La rotura existente en un ensayo triaxial es proporcional al tamaño de partículas y al confinamiento. Esto también está relacionado a la caída observada del índice I_s con el aumento del tamaño.
- La envolvente de falla no lineal propuesta por De Mello (1977) entrega un buen ajuste para los materiales utilizados en esta investigación, siendo levemente no conservadora para altas presiones de confinamiento.
- La envolvente de falla no lineal en el espacio p-q basada en un rango de bajas presiones no logra predecir la degradación del ángulo de fricción existente al llegar a altas presiones de confinamiento, entregando resultados no conservadores. La magnitud de este efecto puede estimarse con un ensayo de alta presión en una granulometría escalada.
- En cuanto a resistencia y rotura, los resultados de la mezcla de materiales fluctúan entre los resultados de ambos materiales según lo esperado.

- Materiales de bajo coeficiente de uniformidad requieren de mayores deformaciones para alcanzar un estado crítico.
- Procedimientos de determinación de densidad mínima de depositación rápida obtienen mejores resultados.

8.2 Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones son realizadas en base de las conclusiones a las que se llegó en esta investigación:

- Al estimar la rotura mediante muestras escaladas se recomienda la utilización de resultados de rotura de tres granulometrías paralelas como base, ensayadas a tres presiones de confinamientos.
- El criterio utilizado en esta investigación fue comparar todos los resultados a un 20% de deformación. Sería una valiosa información adicional realizar los ensayos hasta el estado crítico, realizando las mismas comparaciones en este punto. Con esto también se podría realizar el análisis del desplazamiento del estado crítico en función de la rotura.
- Existen otras aproximaciones a la influencia del tamaño en la rotura de partículas basadas en la estadística de rotura (Weibull 1951) que podrían ser comparadas con el criterio utilizado en esta investigación.
- Estudiar el efecto de la tasa de deformación durante la etapa de corte en la resistencia final para este tipo de materiales uniformes y sin matriz.
- Estudiar el umbral de rotura de estos materiales frágiles en el ensayo triaxial, comparando los resultados de esta investigación con ensayos a confinamientos aún mayores. De la misma forma, estudiar la variación de este umbral al aumentar el tamaño de partículas.
- En el estudio de materiales mezclados se recomienda añadir a estos resultados la combinación de materiales con propiedades geotécnicas que tengan diferencias más marcadas que PES y PEK.

9 Bibliografía

1. AL-HUSSAINI, M. (1983) "Effect of particle size and strain conditions on the strength of crushed basalt." *Canadian Geotechnical Journal* 20(4):706–17.
2. ASTM D5731-08. (2008) "Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications." *ASTM International* 22(2):51–60.
3. BANKS, D., MACIVER, B., SOWERS, G. (1971). "Review of shearing strength of rockfills." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 97(5):794–801.
4. BEEN, K., M. G. JEFFERIES. (1991). "The Critical State of sands." *Géotechnique* 41(3):365–381.
5. BESIO, G. (2012). "Uso del metodo de curvas homoteticas en la representación de ensayos monotonicos y cíclicos en suelos gruesos". Tesis de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
6. CEA, J.C., OLALLA, C., Y UTRILLAS J.L. (1994). "Influencia de la granulometria y el tamaño máximo en la resistencia al corte de escolleras." Pp. 165–72 en *III Simposio Nacional de Geotecnia Vial*.
7. CONTRERAS, L. (2011). "Comportamiento friccionante de materiales granulares gruesos". Tesis de Ingeniero Civil y Magister. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
8. DE LA HOZ, K. (2007). "Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos". Tesis de Ingeniero Civil y Magister. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
9. DE MELLO, V. (1977). "Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams." *Géotechnique* 27(3):279–355.
10. D'ESPESSAILLES, N. (2014). "Estudio del comportamiento y rotura de arena de corte simple y monótono". Universidad de Chile.
11. DODDS, J. (2003). "Particle shape and stiffness - Effects on soil behavior." Tesis de Magister en Ingeniería Civil, Georgia Institute of Technology
12. DORADOR, L. (2010). "Análisis experimental de las metodologías de curvas homotéticas y corte en la evaluación geotécnica de suelos gruesos". Tesis de

Ingeniero Civil y Magister. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

13. DORUK, P. (1991). "Analysis of the laboratory strength data using the original and modified Hoek-Brown failure criteria". University of Toronto.
14. EINAV, I. (2007). "Breakage mechanics—Part I: Theory." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 55(6):1274–97.
15. FROSSARD, E. OVALE, C. DANO, C. HICHER; P-Y, MAIOLINO, S; HU, W. (2013). "Size effects due to grain crushing in rockfis shear strength." Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
16. FUMAGALLI, E. (1969). "Test on cohesionless materials for rockfill dams." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
17. HARDIN, B. O. (1986). "Crushing of soil particles." *Ill*(10):1177–92.
18. HOLTZ, W. G. Y GIBBS, H. J. (1956). "Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 82(1):1–22.
19. INDRARATNA, B., IONESCU, D. Y CHRISTIE, D. (1998). "Shear Behaviour of Railway Ballast based on Large Scale Triaxial Testing." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124(5):439–449.
20. KEZDI, A. (1979). *Soil physics*. Amsterdam: Elsevier.
21. LADE, P., YAMAMURO, J. Y BOPP, P. (1996). "Significance of Particle Crushing in Granular Materials." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 122(4):309–316.
22. LEE, K. Y FARHOOMAND, I. (1967). "compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression." *Canadian Geotechnical Journal* IV(1).
23. LEPS, T. (1970). "Review of shearing strength of rockfill." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 96(4): 1159-1170
24. LOWE III, J. (1964). "Shear strength of coarse embankment dam materials." Eighth International Congress on Large Dams, Edinburgh, Great Britain, 4-8 May 1964: Transactions 745–61.

25. MARACHI, D., CHAN, C. K. Y SEED, B. (1972). "Evaluation of properties of rockfill materials." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division , Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 97(1):95–114.
26. MARSAL, R., GOMEZ, E., NUÑEZ, A., CUELLAR R., Y MORENO R. (1965). "Investigación sobre el comportamiento de suelos granulares y muestras de enrocamiento."
27. MOSS, A. (2011). "An Introduction to Block and Panel Caving." en *Global Metals y Mining Conference*. Hollywood, Florida, USA.
28. OLDECOP, L. A. Y E. E. ALONSO. (2007). "Discussion: Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill." *Géotechnique* 57(3):289–301.
29. OVALLE, C., BARD, E., DORADOR, L., DE LA HOZ, K., DANO, C., CAMPAÑA, J., PALMA, C., HICHER, P-Y., ACUÑA, G., (2014). "Una revisión de ensayos triaxiales en suelos gruesos y enrocados." en VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica.
30. OVALLE, C., FROSSARD, E., DANO, C. Y HICHER, P-Y. (2014). "Efectos de tamaño en el comportamiento mecánico de enrocados." en VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica.
31. PALMA, C., LINERO, S. Y APABLAZA, R. (2007). "Caracterización Geotécnica de Materiales de Lastre en Botaderos de Gran Altura Mediante Ensayos Triaxiales y Odométricos de Gran Tamaño." Pp. 2–5 en *Proceedings of International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*.
32. ROWE, P. W. (1962). "The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 269(N° 13 39):500–527.
33. RIQUELME, J. Y DORADOR, L. (2014). "Metodología para determinar densidades máxima y mínima en suelos granulares gruesos a partir de ensayos de laboratorio de escala reducida." en VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica.
34. SANTAMARINA, J.C. Y CHO, G.C. (2004). "Soil behaviour: The role of particle shape." *Advances in Geotechnical Engineering. Proceedings of the Skempton Conference* 1–14.

35. SARAC, D. Z. Y POPOVIC, M. (1985). "Shear strength of rockfill and slope stability." en *Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco.
36. STOEBER, J. (2012). "Effects of maximum particle size and sample scaling on the mechanical behavior of mine waste rock; a critical state approach". Thesis for the Degree of Master of Science. Colorado State University, Department of Civil and Environmental Engineering.
37. UNLAND, G. (2007). "The principles of single-particle crushing." Pp. 117–225 en *Particle Breakage*, editado por A. D. Salman, M. Ghadiri, y M. Hounslow. Elsevier.
38. VALLERGA, B. A., SEED, H., MONISMITH, C. Y COOPER, R. (1957). "Effect of shape, size and surface roughness of aggregate particles on the strength of granular materials" editado por American Society for Testing and Materials. 63–74.
39. VARADARAJAN, A., SHARMA, K., VENKATACHALAM, K. Y GUPTA, A. (2003). "Testing and Modeling Two Rockfill Materials." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129(3):206–218.
40. VERDUGO, R. Y DE LA HOZ, K. (2006). "Geomechanical Characterization of Coarse Granular Soils." *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* 6(2):199–214.
41. VERDUGO, R, PETERS, G. Y BEJARANO, I. (2007). "Evaluación de parametros geomecánicos de suelos gruesos." en *VI Congreso Chileno de Geotecnia*.
42. VESIC, A. S. Y CLOUGH. G. (1968). "Behaviour of granular materials under high stresses." *Asce J Soil Mech Found Div* 94(3):661–688.
43. WEIBULL, W. (1951). "A statistical distribution function of wide applicability." *Journal of applied mechanics* 103.
44. XIAO, Y., LIU, H., DING, X., CHEN, Y., JIANG, J. Y ZHANG, W. (2015). "Influence of Particle Breakage on Critical State Line of Rockfill Material." *International Journal of Geomechanics*. Just released, July 2015, 18 p.

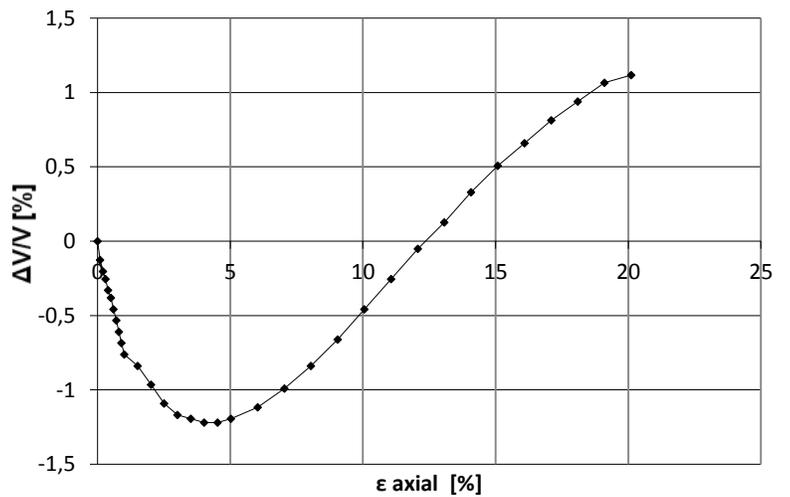
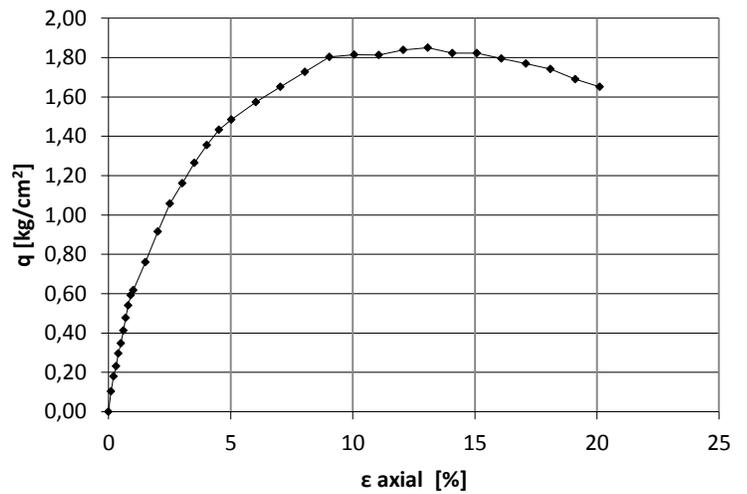
10 Anexos

10.1 Detalle de ensayos triaxiales de tamaño convencional

Material PEK Dmax = 4,75 [mm]

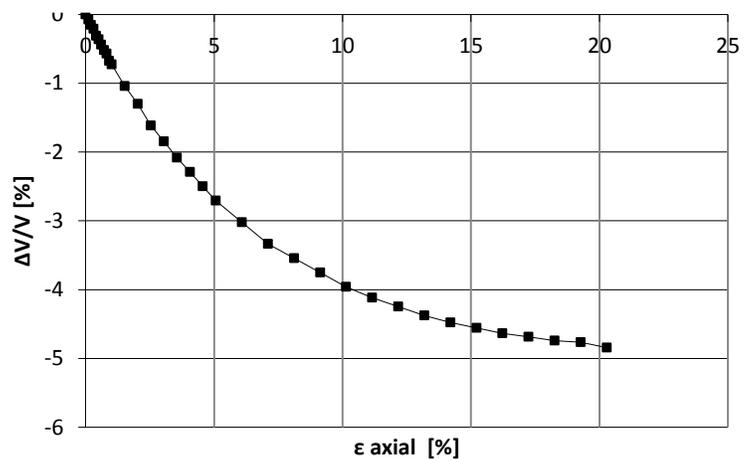
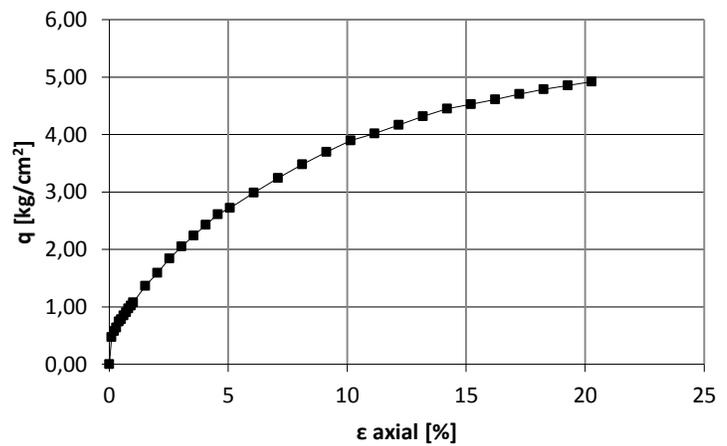
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	1,0	0,0
0,1	-0,1	1,1	0,1
0,2	-0,2	1,1	0,2
0,3	-0,3	1,2	0,2
0,4	-0,3	1,2	0,3
0,5	-0,4	1,2	0,3
0,6	-0,5	1,3	0,4
0,7	-0,5	1,3	0,5
0,8	-0,6	1,4	0,5
0,9	-0,7	1,4	0,6
1,0	-0,8	1,4	0,6
1,5	-0,8	1,5	0,8
2,0	-1,0	1,6	0,9
2,5	-1,1	1,7	1,1
3,0	-1,2	1,8	1,2
3,5	-1,2	1,8	1,3
4,0	-1,2	1,9	1,4
4,5	-1,2	2,0	1,4
5,0	-1,2	2,0	1,5
6,0	-1,1	2,0	1,6
7,0	-1,0	2,1	1,7
8,0	-0,8	2,2	1,7
9,1	-0,7	2,2	1,8
10,1	-0,5	2,2	1,8
11,1	-0,3	2,2	1,8
12,1	-0,1	2,2	1,8
13,1	0,1	2,2	1,8
14,1	0,3	2,2	1,8
15,1	0,5	2,2	1,8
16,1	0,7	2,2	1,8
17,1	0,8	2,2	1,8
18,1	0,9	2,2	1,7
19,1	1,1	2,1	1,7
20,1	1,1	2,1	1,7

Material	PEK
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm ²]	1
Densidad inicial [gr/cm ³]	1,333
Volumen drenado en consolidación [cm ³]	3,3



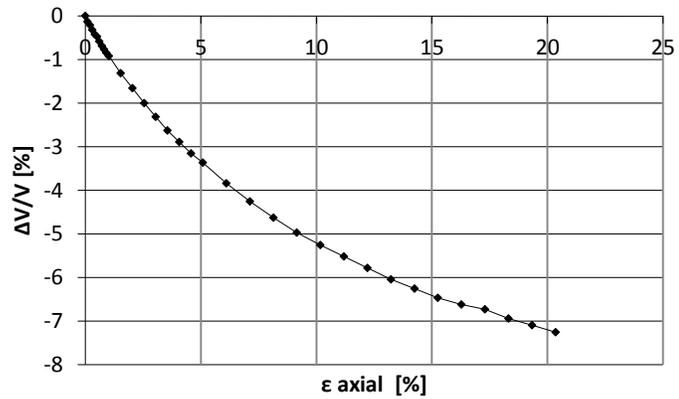
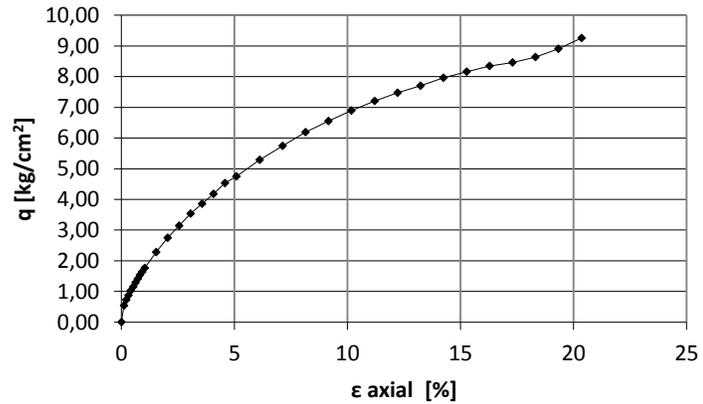
Def. unit.	DV/Vo	ρ	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	3,0	0,0
0,1	-0,1	3,3	0,5
0,2	-0,2	3,4	0,6
0,3	-0,2	3,4	0,6
0,4	-0,3	3,5	0,7
0,5	-0,4	3,5	0,8
0,6	-0,4	3,6	0,9
0,7	-0,5	3,6	0,9
0,8	-0,6	3,6	1,0
0,9	-0,7	3,7	1,0
1,0	-0,7	3,7	1,1
1,5	-1,0	3,9	1,4
2,0	-1,3	4,1	1,6
2,5	-1,6	4,2	1,8
3,0	-1,8	4,4	2,1
3,5	-2,1	4,5	2,2
4,1	-2,3	4,6	2,4
4,6	-2,5	4,7	2,6
5,1	-2,7	4,8	2,7
6,1	-3,0	5,0	3,0
7,1	-3,3	5,2	3,2
8,1	-3,5	5,3	3,5
9,1	-3,8	5,5	3,7
10,1	-4,0	5,6	3,9
11,2	-4,1	5,7	4,0
12,2	-4,2	5,8	4,2
13,2	-4,4	5,9	4,3
14,2	-4,5	6,0	4,5
15,2	-4,6	6,0	4,5
16,2	-4,6	6,1	4,6
17,2	-4,7	6,1	4,7
18,3	-4,7	6,2	4,8
19,3	-4,8	6,2	4,9
20,3	-4,8	6,3	4,9

Material	PEK
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	3
Densidad inicial [gr/cm³]	1,333
Volumen drenado en consolidación [cm³]	8,4



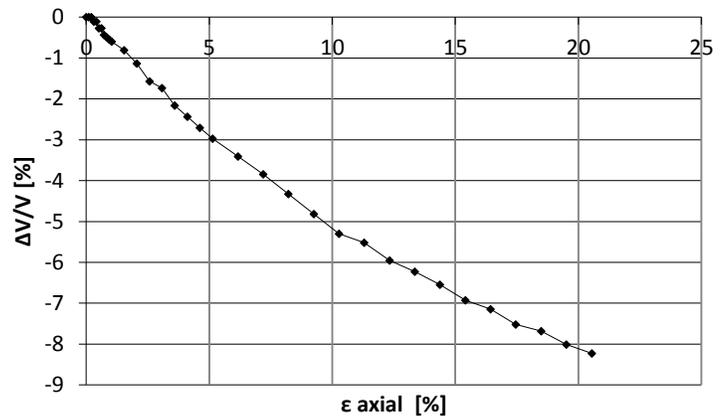
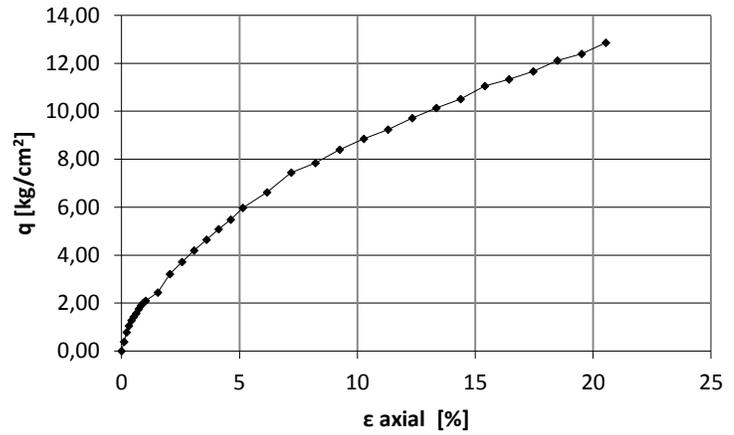
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	6,0	0,0
0,1	-0,1	6,4	0,5
0,2	-0,2	6,5	0,7
0,3	-0,3	6,6	0,9
0,4	-0,4	6,7	1,0
0,5	-0,5	6,8	1,1
0,6	-0,6	6,9	1,3
0,7	-0,7	6,9	1,4
0,8	-0,8	7,0	1,5
0,9	-0,8	7,1	1,6
1,0	-0,9	7,2	1,8
1,5	-1,3	7,5	2,3
2,0	-1,7	7,8	2,7
2,5	-2,0	8,1	3,1
3,1	-2,3	8,4	3,5
3,6	-2,6	8,6	3,9
4,1	-2,9	8,8	4,2
4,6	-3,2	9,0	4,5
5,1	-3,4	9,2	4,7
6,1	-3,8	9,5	5,3
7,1	-4,3	9,8	5,7
8,1	-4,6	10,1	6,2
9,2	-5,0	10,4	6,5
10,2	-5,3	10,6	6,9
11,2	-5,5	10,8	7,2
12,2	-5,8	11,0	7,5
13,2	-6,0	11,1	7,7
14,2	-6,3	11,3	8,0
15,3	-6,5	11,4	8,2
16,3	-6,6	11,6	8,3
17,3	-6,7	11,6	8,5
18,3	-6,9	11,8	8,6
19,3	-7,1	11,9	8,9
20,3	-7,3	12,2	9,3

Material	PEK
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	6
Densidad inicial [gr/cm³]	1,333
Volumen drenado en consolidación [cm³]	10,25



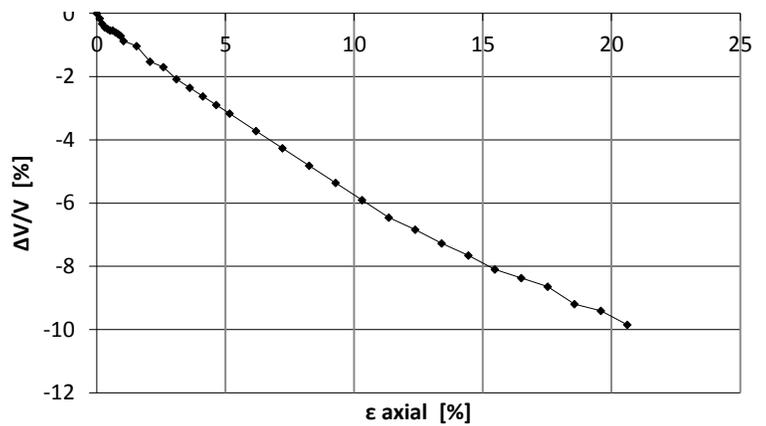
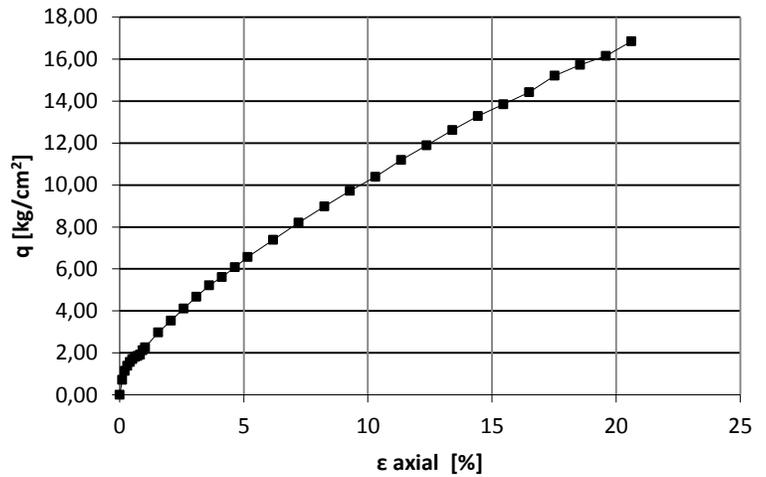
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	10,0	0,0
0,1	0,0	10,3	0,4
0,2	0,0	10,5	0,8
0,3	-0,1	10,7	1,1
0,4	-0,1	10,8	1,3
0,5	-0,3	10,9	1,4
0,6	-0,3	11,0	1,6
0,7	-0,4	11,2	1,7
0,8	-0,5	11,3	1,9
0,9	-0,5	11,3	2,0
1,0	-0,6	11,4	2,1
1,5	-0,8	11,6	2,4
2,1	-1,1	12,1	3,2
2,6	-1,6	12,5	3,7
3,1	-1,7	12,8	4,2
3,6	-2,2	13,1	4,7
4,1	-2,4	13,4	5,1
4,6	-2,7	13,7	5,5
5,1	-3,0	14,0	6,0
6,2	-3,4	14,4	6,6
7,2	-3,8	15,0	7,5
8,2	-4,3	15,2	7,8
9,2	-4,8	15,6	8,4
10,3	-5,3	15,9	8,9
11,3	-5,5	16,2	9,2
12,3	-6,0	16,5	9,7
13,4	-6,2	16,8	10,1
14,4	-6,5	17,0	10,5
15,4	-6,9	17,4	11,1
16,4	-7,1	17,6	11,3
17,5	-7,5	17,8	11,7
18,5	-7,7	18,1	12,1
19,5	-8,0	18,3	12,4
20,5	-8,2	18,6	12,9

Material	PEK
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	10
Densidad inicial [gr/cm³]	1,333
Volumen drenado en consolidación [cm³]	16



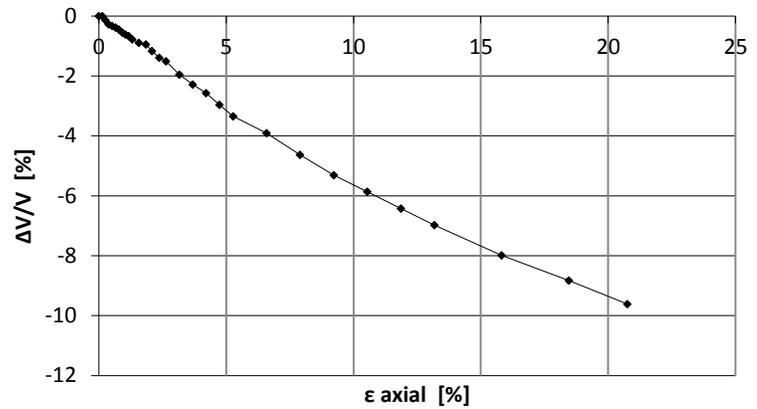
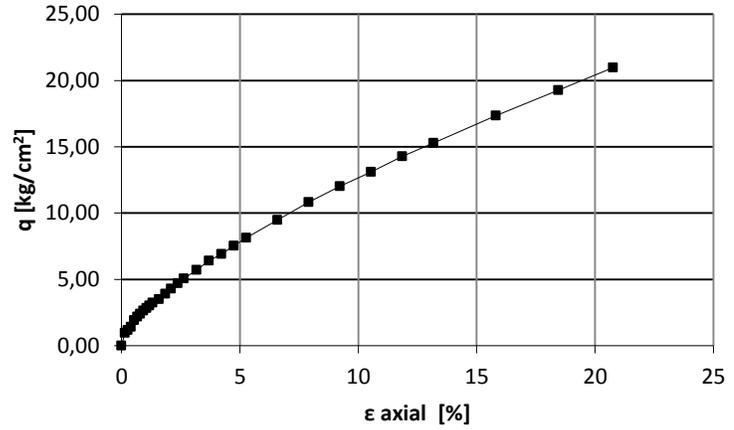
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	15,0	0,0
0,1	-0,2	15,5	0,7
0,2	-0,3	15,8	1,1
0,3	-0,4	15,9	1,4
0,4	-0,5	16,0	1,6
0,5	-0,5	16,1	1,7
0,6	-0,5	16,2	1,8
0,7	-0,6	16,2	1,9
0,8	-0,7	16,3	1,9
0,9	-0,7	16,4	2,1
1,0	-0,9	16,5	2,3
1,5	-1,0	17,0	3,0
2,1	-1,5	17,4	3,5
2,6	-1,7	17,7	4,1
3,1	-2,1	18,1	4,7
3,6	-2,4	18,5	5,2
4,1	-2,6	18,7	5,6
4,6	-2,9	19,1	6,1
5,2	-3,2	19,4	6,6
6,2	-3,7	19,9	7,4
7,2	-4,3	20,5	8,2
8,2	-4,8	21,0	9,0
9,3	-5,4	21,5	9,7
10,3	-5,9	21,9	10,4
11,3	-6,5	22,5	11,2
12,4	-6,8	22,9	11,9
13,4	-7,3	23,4	12,6
14,4	-7,7	23,9	13,3
15,5	-8,1	24,2	13,8
16,5	-8,4	24,6	14,4
17,5	-8,6	25,1	15,2
18,6	-9,2	25,5	15,7
19,6	-9,4	25,8	16,1
20,6	-9,8	26,2	16,9

Material	PEK
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	15
Densidad inicial [gr/cm³]	1,333
Volumen drenado en consolidación [cm³]	18,2



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	20,0	0,0
0,1	0,0	20,6	1,0
0,3	-0,1	20,8	1,2
0,4	-0,3	20,9	1,4
0,5	-0,3	21,3	1,9
0,7	-0,4	21,5	2,2
0,8	-0,4	21,6	2,4
0,9	-0,6	21,8	2,6
1,1	-0,6	21,9	2,8
1,2	-0,7	22,0	3,0
1,3	-0,8	22,2	3,2
1,6	-0,9	22,3	3,5
1,8	-0,9	22,6	3,9
2,1	-1,2	22,9	4,3
2,4	-1,4	23,1	4,7
2,6	-1,5	23,4	5,1
3,2	-2,0	23,8	5,7
3,7	-2,3	24,3	6,4
4,2	-2,6	24,6	6,9
4,7	-3,0	25,0	7,5
5,3	-3,4	25,4	8,1
6,6	-3,9	26,3	9,5
7,9	-4,6	27,2	10,8
9,2	-5,3	28,0	12,0
10,5	-5,9	28,7	13,1
11,9	-6,4	29,5	14,3
13,2	-7,0	30,2	15,3
15,8	-8,0	31,6	17,3
18,5	-8,8	32,9	19,3
20,8	-9,6	34,0	21,0

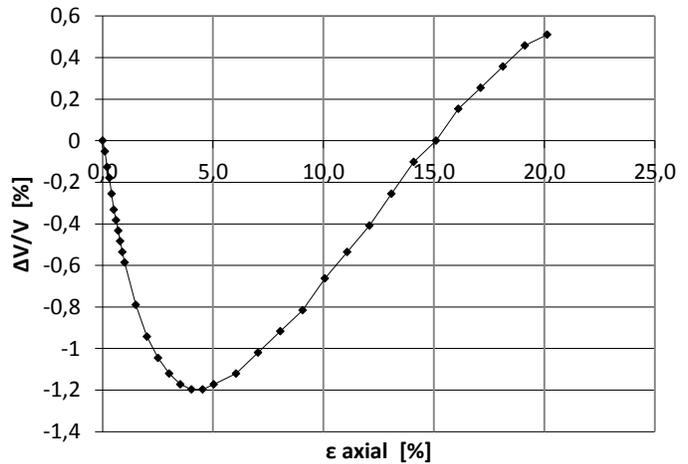
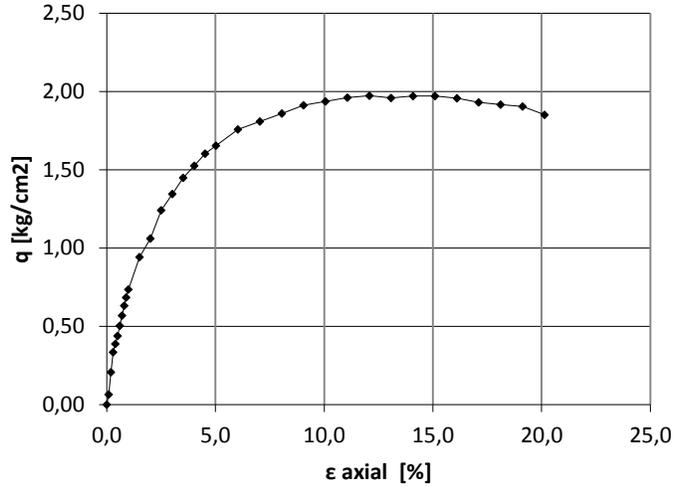
Material	PEK
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	20
Densidad inicial [gr/cm³]	1,333
Volumen drenado en consolidación [cm³]	22,5



Material PES Dmax = 4,75 [mm]

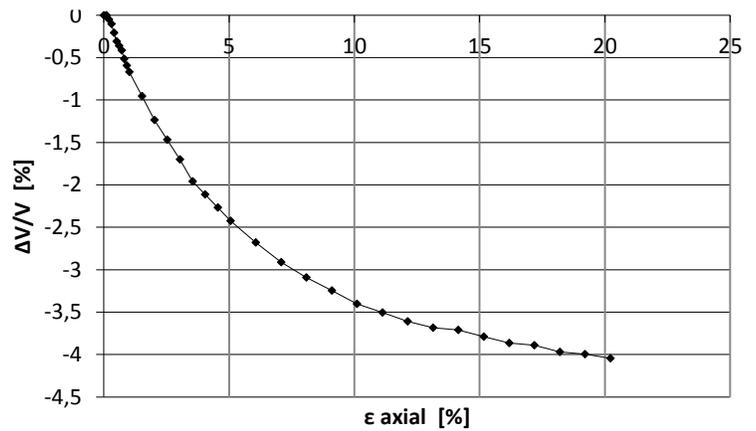
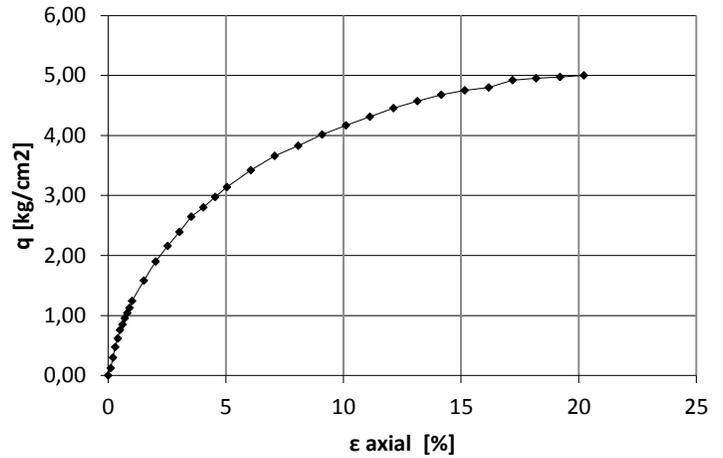
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	1,0	0,0
0,1	-0,1	1,0	0,1
0,2	-0,1	1,1	0,2
0,3	-0,2	1,2	0,3
0,4	-0,3	1,3	0,4
0,5	-0,3	1,3	0,4
0,6	-0,4	1,3	0,5
0,7	-0,4	1,4	0,6
0,8	-0,5	1,4	0,6
0,9	-0,5	1,5	0,7
1,0	-0,6	1,5	0,7
1,5	-0,8	1,6	0,9
2,0	-0,9	1,7	1,1
2,5	-1,0	1,8	1,2
3,0	-1,1	1,9	1,3
3,5	-1,2	2,0	1,4
4,0	-1,2	2,0	1,5
4,5	-1,2	2,1	1,6
5,0	-1,2	2,1	1,7
6,0	-1,1	2,2	1,8
7,0	-1,0	2,2	1,8
8,1	-0,9	2,2	1,9
9,1	-0,8	2,3	1,9
10,1	-0,7	2,3	1,9
11,1	-0,5	2,3	2,0
12,1	-0,4	2,3	2,0
13,1	-0,3	2,3	2,0
14,1	-0,1	2,3	2,0
15,1	0,0	2,3	2,0
16,1	0,2	2,3	2,0
17,1	0,3	2,3	1,9
18,1	0,4	2,3	1,9
19,1	0,5	2,3	1,9
20,1	0,5	2,2	1,9

Material	PES
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm2]	1
Densidad inicial [gr/cm3]	1,352
Volumen drenado en consolidación [cm3]	4



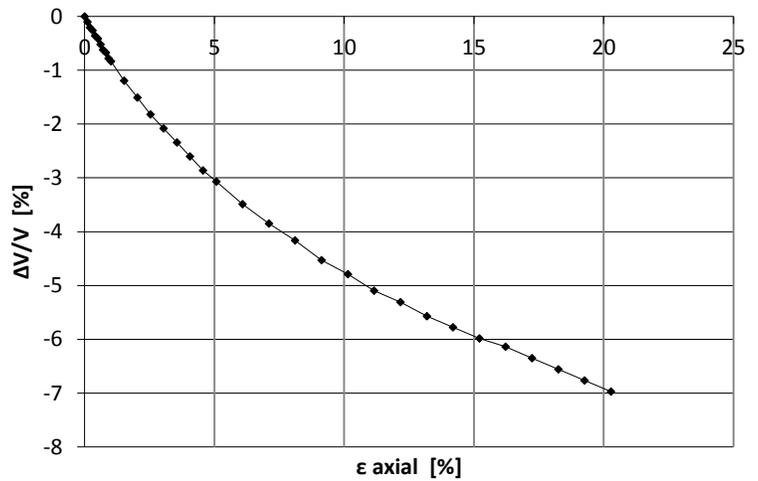
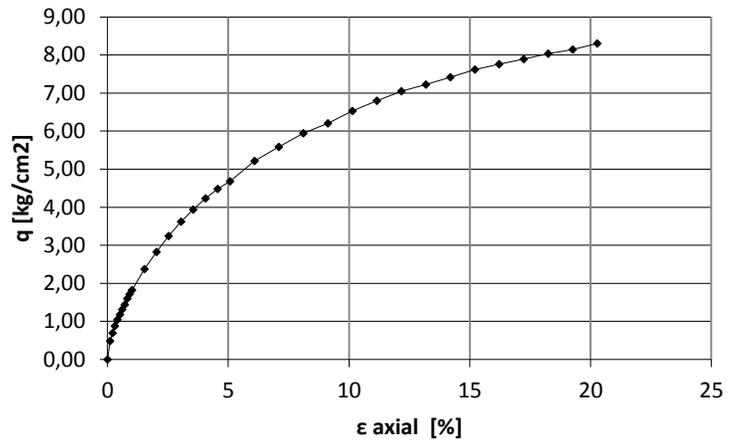
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	3,0	0,0
0,1	0,0	3,1	0,1
0,2	-0,1	3,2	0,3
0,3	-0,1	3,3	0,5
0,4	-0,2	3,4	0,6
0,5	-0,3	3,5	0,8
0,6	-0,4	3,6	0,9
0,7	-0,4	3,6	1,0
0,8	-0,5	3,7	1,0
0,9	-0,6	3,7	1,1
1,0	-0,7	3,8	1,2
1,5	-1,0	4,1	1,6
2,0	-1,2	4,3	1,9
2,5	-1,5	4,4	2,2
3,0	-1,7	4,6	2,4
3,5	-2,0	4,8	2,6
4,0	-2,1	4,9	2,8
4,5	-2,3	5,0	3,0
5,1	-2,4	5,1	3,1
6,1	-2,7	5,3	3,4
7,1	-2,9	5,4	3,7
8,1	-3,1	5,6	3,8
9,1	-3,2	5,7	4,0
10,1	-3,4	5,8	4,2
11,1	-3,5	5,9	4,3
12,1	-3,6	6,0	4,5
13,1	-3,7	6,0	4,6
14,1	-3,7	6,1	4,7
15,2	-3,8	6,2	4,8
16,2	-3,9	6,2	4,8
17,2	-3,9	6,3	4,9
18,2	-4,0	6,3	5,0
19,2	-4,0	6,3	5,0
20,2	-4,0	6,3	5,0

Material	PES
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	3
Densidad inicial [gr/cm³]	1,352
Volumen drenado en consolidación [cm³]	6,25



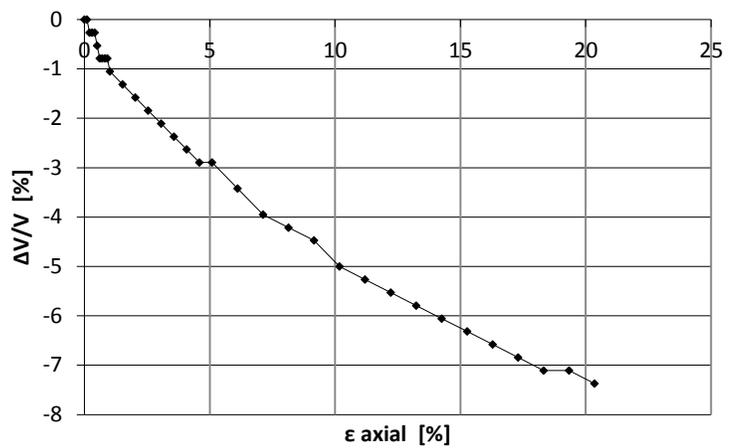
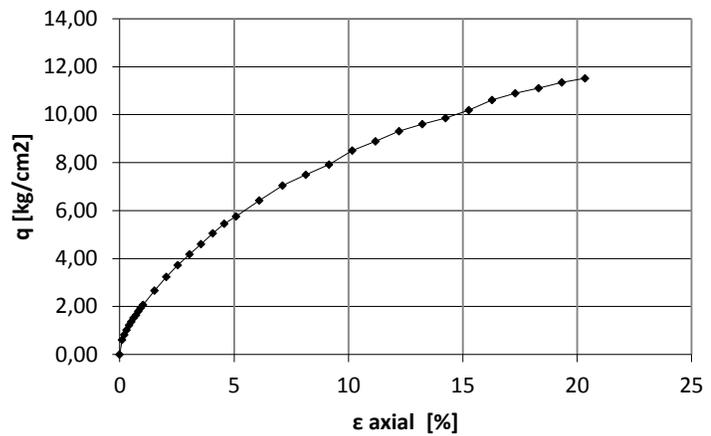
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	6,0	0,0
0,1	-0,1	6,3	0,5
0,2	-0,2	6,5	0,7
0,3	-0,3	6,6	0,9
0,4	-0,4	6,7	1,0
0,5	-0,4	6,8	1,2
0,6	-0,5	6,9	1,3
0,7	-0,6	7,0	1,4
0,8	-0,7	7,1	1,6
0,9	-0,8	7,1	1,7
1,0	-0,8	7,2	1,8
1,5	-1,2	7,6	2,4
2,0	-1,5	7,9	2,8
2,5	-1,8	8,2	3,2
3,0	-2,1	8,4	3,6
3,5	-2,3	8,6	3,9
4,1	-2,6	8,8	4,2
4,6	-2,9	9,0	4,5
5,1	-3,1	9,1	4,7
6,1	-3,5	9,5	5,2
7,1	-3,9	9,7	5,6
8,1	-4,2	10,0	5,9
9,1	-4,5	10,1	6,2
10,1	-4,8	10,4	6,5
11,2	-5,1	10,5	6,8
12,2	-5,3	10,7	7,0
13,2	-5,6	10,8	7,2
14,2	-5,8	10,9	7,4
15,2	-6,0	11,1	7,6
16,2	-6,1	11,2	7,8
17,2	-6,3	11,3	7,9
18,2	-6,6	11,4	8,0
19,3	-6,8	11,4	8,1
20,3	-7,0	11,5	8,3

Material	PES
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	6
Densidad inicial [gr/cm³]	1,352
Volumen drenado en consolidación [cm³]	8,15



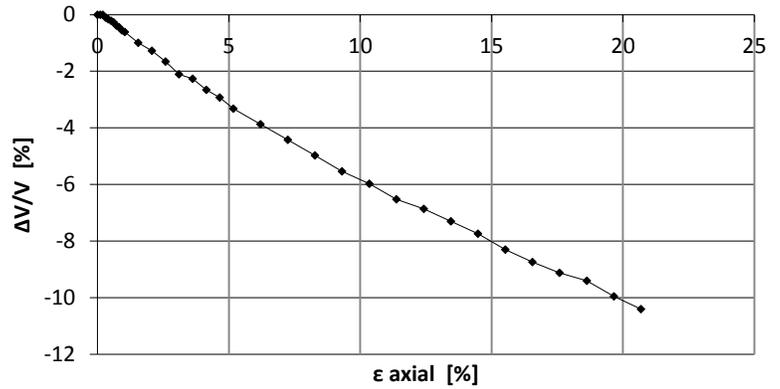
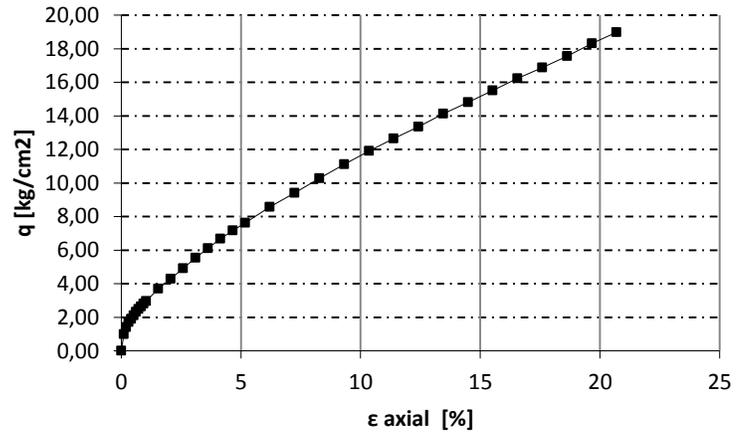
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	10,0	0,0
0,1	0,0	10,4	0,6
0,2	-0,3	10,5	0,8
0,3	-0,3	10,7	1,0
0,4	-0,3	10,8	1,2
0,5	-0,5	10,9	1,4
0,6	-0,8	11,0	1,5
0,7	-0,8	11,1	1,7
0,8	-0,8	11,2	1,8
0,9	-0,8	11,3	1,9
1,0	-1,1	11,4	2,1
1,5	-1,3	11,8	2,7
2,0	-1,6	12,2	3,2
2,5	-1,8	12,5	3,7
3,1	-2,1	12,8	4,2
3,6	-2,4	13,1	4,6
4,1	-2,6	13,4	5,1
4,6	-2,9	13,6	5,4
5,1	-2,9	13,8	5,8
6,1	-3,4	14,3	6,4
7,1	-3,9	14,7	7,0
8,1	-4,2	15,0	7,5
9,2	-4,5	15,3	7,9
10,2	-5,0	15,7	8,5
11,2	-5,3	15,9	8,9
12,2	-5,5	16,2	9,3
13,2	-5,8	16,4	9,6
14,2	-6,1	16,6	9,9
15,3	-6,3	16,8	10,2
16,3	-6,6	17,1	10,6
17,3	-6,8	17,3	10,9
18,3	-7,1	17,4	11,1
19,3	-7,1	17,6	11,3
20,4	-7,4	17,7	11,5

Material	PES
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	10
Densidad inicial [gr/cm³]	1,352
Volumen drenado en consolidación [cm³]	10,5



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	20,0	0,0
0,1	0,0	20,7	1,0
0,2	0,0	20,9	1,4
0,3	-0,1	21,1	1,7
0,4	-0,2	21,3	1,9
0,5	-0,2	21,4	2,1
0,6	-0,3	21,5	2,3
0,7	-0,4	21,7	2,5
0,8	-0,4	21,8	2,7
0,9	-0,6	21,9	2,8
1,0	-0,6	22,0	3,0
1,6	-1,0	22,5	3,7
2,1	-1,3	22,9	4,3
2,6	-1,7	23,3	4,9
3,1	-2,1	23,7	5,5
3,6	-2,3	24,1	6,1
4,1	-2,7	24,4	6,7
4,7	-2,9	24,8	7,2
5,2	-3,3	25,1	7,6
6,2	-3,9	25,7	8,6
7,2	-4,4	26,3	9,4
8,3	-5,0	26,8	10,3
9,3	-5,5	27,4	11,1
10,3	-6,0	27,9	11,9
11,4	-6,5	28,4	12,6
12,4	-6,9	28,9	13,3
13,5	-7,3	29,4	14,1
14,5	-7,7	29,9	14,8
15,5	-8,3	30,3	15,5
16,6	-8,7	30,8	16,2
17,6	-9,1	31,3	16,9
18,6	-9,4	31,7	17,6
19,7	-10,0	32,2	18,3
20,7	-10,4	32,6	19,0

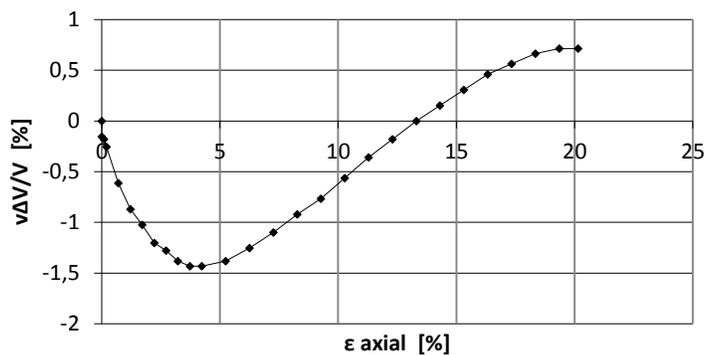
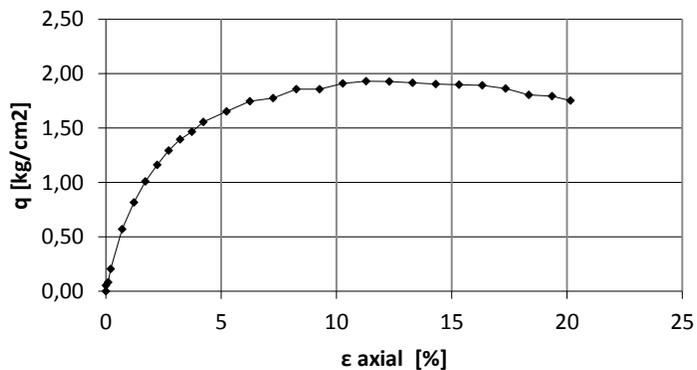
Material	PES
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm2]	20
Densidad inicial [gr/cm3]	1,352
Volumen drenado en consolidación [cm3]	20,5



Material combinado Dmax = 4,75 [mm]

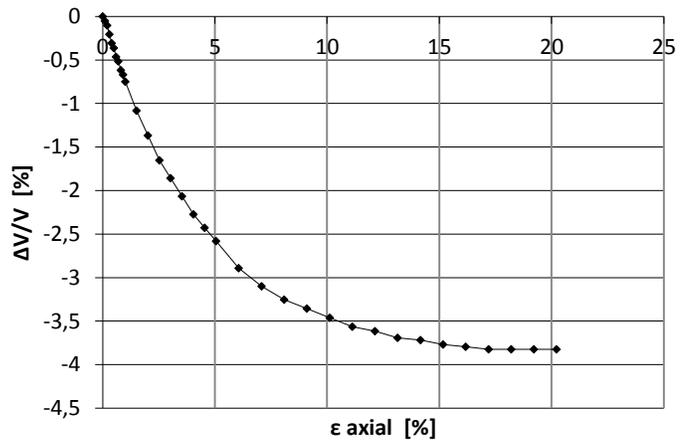
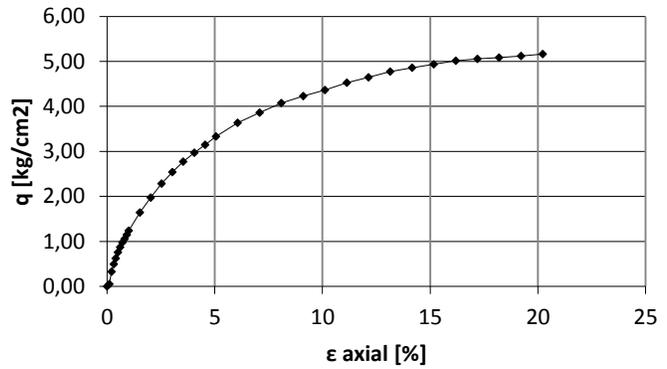
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	1,0	0,0
0,0	-0,2	1,0	0,1
0,1	-0,2	1,1	0,1
0,2	-0,3	1,1	0,2
0,7	-0,6	1,4	0,6
1,2	-0,9	1,5	0,8
1,7	-1,0	1,7	1,0
2,2	-1,2	1,8	1,2
2,7	-1,3	1,9	1,3
3,2	-1,4	1,9	1,4
3,7	-1,4	2,0	1,5
4,2	-1,4	2,0	1,6
5,2	-1,4	2,1	1,7
6,2	-1,3	2,2	1,7
7,3	-1,1	2,2	1,8
8,3	-0,9	2,2	1,9
9,3	-0,8	2,2	1,9
10,3	-0,6	2,3	1,9
11,3	-0,4	2,3	1,9
12,3	-0,2	2,3	1,9
13,3	0,0	2,3	1,9
14,3	0,2	2,3	1,9
15,3	0,3	2,3	1,9
16,3	0,5	2,3	1,9
17,3	0,6	2,2	1,9
18,3	0,7	2,2	1,8
19,3	0,7	2,2	1,8
20,2	0,7	2,2	1,8

Material	50/50
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm2]	1
Densidad inicial [gr/cm3]	1,343
Volumen drenado en consolidación [cm3]	4,6



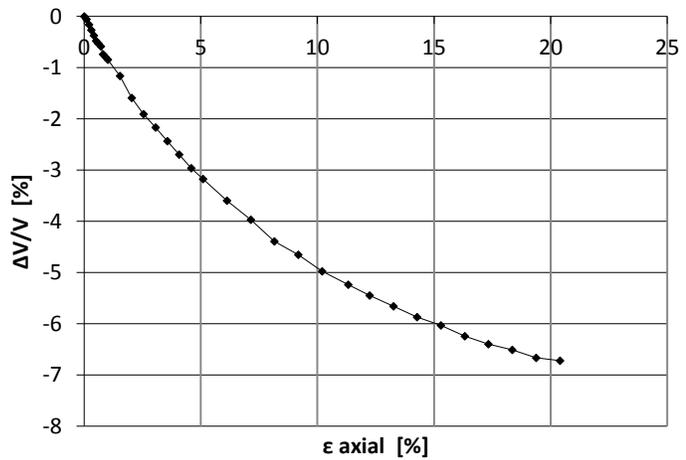
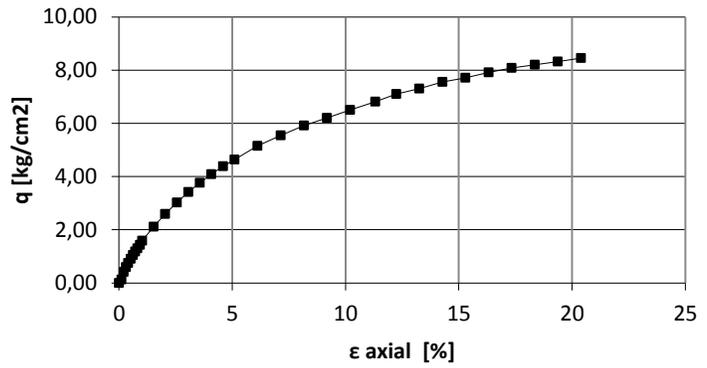
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	3,0	0,0
0,1	-0,1	3,0	0,1
0,2	-0,1	3,2	0,3
0,3	-0,2	3,3	0,5
0,4	-0,3	3,4	0,6
0,5	-0,4	3,5	0,8
0,6	-0,5	3,6	0,9
0,7	-0,5	3,7	1,0
0,8	-0,6	3,7	1,1
0,9	-0,7	3,8	1,1
1,0	-0,7	3,8	1,2
1,5	-1,1	4,1	1,6
2,0	-1,4	4,3	2,0
2,5	-1,7	4,5	2,3
3,0	-1,9	4,7	2,5
3,5	-2,1	4,8	2,8
4,0	-2,3	5,0	3,0
4,6	-2,4	5,1	3,1
5,1	-2,6	5,2	3,3
6,1	-2,9	5,4	3,6
7,1	-3,1	5,6	3,9
8,1	-3,3	5,7	4,1
9,1	-3,4	5,8	4,2
10,1	-3,5	5,9	4,4
11,1	-3,6	6,0	4,5
12,1	-3,6	6,1	4,6
13,1	-3,7	6,2	4,8
14,2	-3,7	6,2	4,9
15,2	-3,8	6,3	4,9
16,2	-3,8	6,3	5,0
17,2	-3,8	6,4	5,1
18,2	-3,8	6,4	5,1
19,2	-3,8	6,4	5,1
20,2	-3,8	6,4	5,2

Material	50/50
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	3
Densidad inicial [gr/cm³]	1,343
Volumen drenado en consolidación [cm³]	6,7



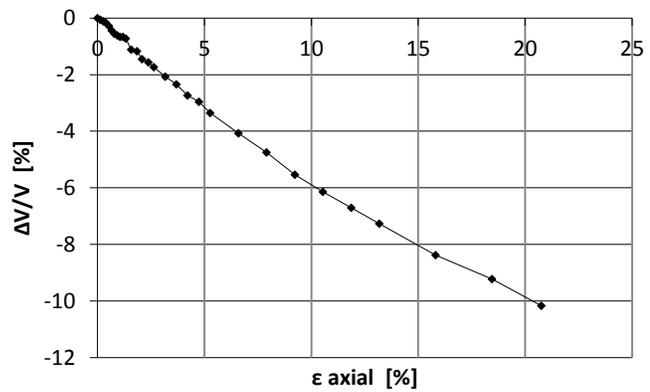
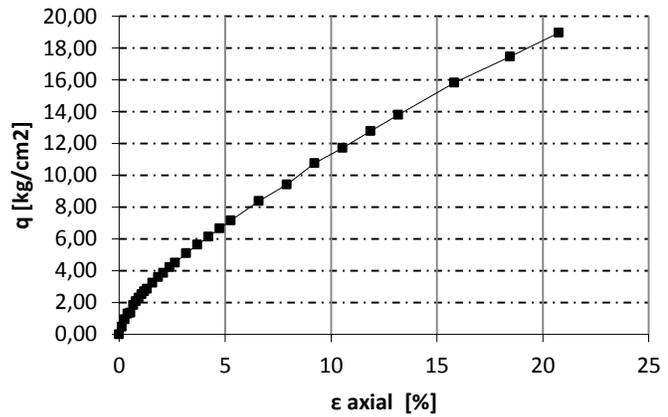
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	6,0	0,0
0,1	-0,1	6,1	0,1
0,2	-0,2	6,3	0,4
0,3	-0,3	6,4	0,6
0,4	-0,4	6,5	0,8
0,5	-0,5	6,6	0,9
0,6	-0,5	6,7	1,0
0,7	-0,6	6,8	1,2
0,8	-0,7	6,9	1,3
0,9	-0,8	7,0	1,4
1,0	-0,8	7,1	1,6
1,5	-1,2	7,4	2,1
2,0	-1,6	7,7	2,6
2,5	-1,9	8,0	3,0
3,1	-2,2	8,3	3,4
3,6	-2,4	8,5	3,8
4,1	-2,7	8,7	4,1
4,6	-3,0	8,9	4,4
5,1	-3,2	9,1	4,6
6,1	-3,6	9,4	5,1
7,1	-4,0	9,7	5,5
8,2	-4,4	9,9	5,9
9,2	-4,7	10,1	6,2
10,2	-5,0	10,3	6,5
11,3	-5,2	10,5	6,8
12,2	-5,4	10,7	7,1
13,3	-5,7	10,9	7,3
14,3	-5,9	11,0	7,6
15,3	-6,0	11,1	7,7
16,3	-6,2	11,3	7,9
17,3	-6,4	11,4	8,1
18,4	-6,5	11,5	8,2
19,4	-6,7	11,5	8,3
20,4	-6,7	11,6	8,5

Material	50/50
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm2]	6
Densidad inicial [gr/cm3]	1,343
Volumen drenado en consolidación [cm3]	11,5



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	20,0	0,0
0,1	-0,1	20,3	0,5
0,3	-0,1	20,6	0,9
0,4	-0,2	20,9	1,3
0,5	-0,3	20,9	1,3
0,7	-0,4	21,2	1,8
0,8	-0,6	21,4	2,1
0,9	-0,6	21,5	2,3
1,1	-0,7	21,7	2,5
1,2	-0,7	21,8	2,7
1,3	-0,7	21,9	2,9
1,6	-1,1	22,2	3,2
1,8	-1,2	22,4	3,6
2,1	-1,5	22,6	3,9
2,4	-1,6	22,8	4,2
2,6	-1,7	23,0	4,5
3,2	-2,1	23,4	5,1
3,7	-2,3	23,8	5,6
4,2	-2,7	24,1	6,1
4,7	-3,0	24,4	6,7
5,3	-3,4	24,8	7,2
6,6	-4,1	25,6	8,4
7,9	-4,7	26,3	9,4
9,2	-5,5	27,2	10,8
10,5	-6,1	27,8	11,7
11,9	-6,7	28,5	12,8
13,2	-7,3	29,2	13,8
15,8	-8,4	30,5	15,8
18,5	-9,2	31,6	17,5
20,8	-10,2	32,6	19,0

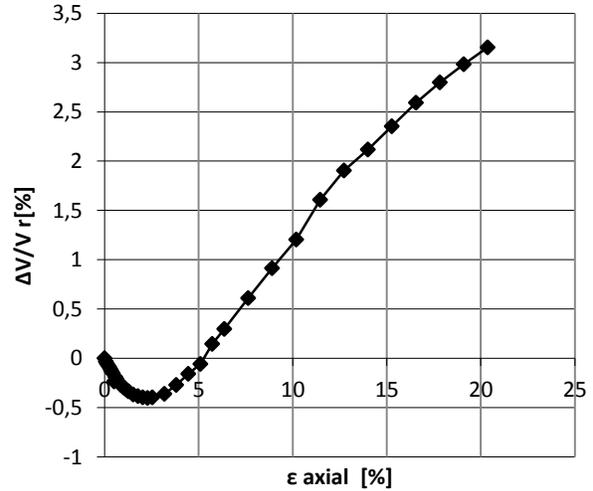
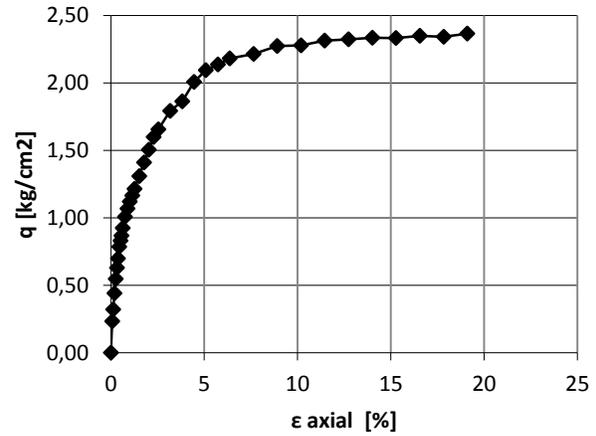
Material	50/50
Altura Probeta [cm]	10
Diámetro Probeta [cm]	5,05
Confinamiento [kg/cm²]	20
Densidad inicial [gr/cm³]	1,343
Volumen drenado en consolidación [cm³]	22,5



Material PEK Dmax = 12,7 [mm]

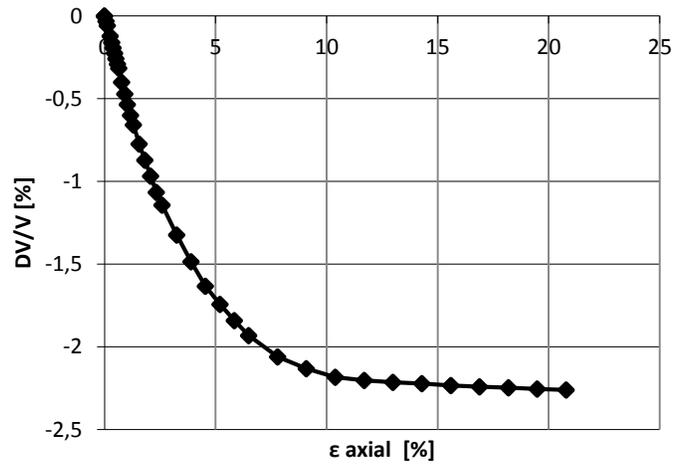
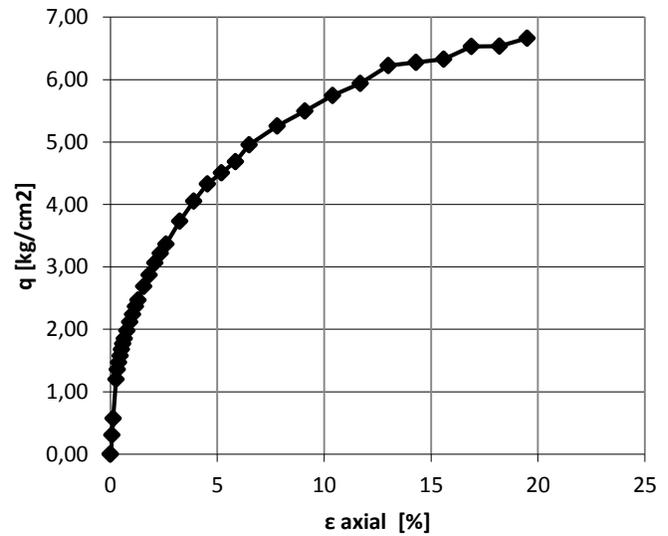
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,00	0,00	1,00	0,00
0,07	-0,03	1,16	0,23
0,13	-0,05	1,21	0,32
0,19	-0,07	1,29	0,44
0,26	-0,09	1,36	0,55
0,32	-0,11	1,42	0,63
0,38	-0,13	1,47	0,70
0,45	-0,15	1,52	0,79
0,51	-0,23	1,55	0,83
0,57	-0,19	1,58	0,87
0,64	-0,21	1,62	0,92
0,76	-0,24	1,67	1,01
0,89	-0,27	1,71	1,07
1,02	-0,30	1,75	1,12
1,15	-0,32	1,78	1,16
1,27	-0,33	1,81	1,21
1,53	-0,37	1,87	1,31
1,78	-0,38	1,94	1,41
2,04	-0,40	2,00	1,50
2,29	-0,40	2,07	1,60
2,55	-0,40	2,10	1,66
3,18	-0,36	2,20	1,79
3,82	-0,27	2,24	1,86
4,46	-0,16	2,34	2,01
5,09	-0,06	2,40	2,09
5,73	0,15	2,42	2,14
6,37	0,30	2,46	2,18
7,64	0,61	2,48	2,22
8,91	0,91	2,52	2,28
10,19	1,20	2,52	2,28
11,46	1,61	2,54	2,31
12,73	1,90	2,55	2,32
14,01	2,12	2,56	2,34
15,28	2,35	2,56	2,33
16,55	2,59	2,57	2,35
17,83	2,80	2,56	2,34
19,10	2,98	2,58	2,37
20,37	3,15	2,68	2,51

Material	PEK
Altura probeta [cm]	20,1
Diámetro probeta [cm]	10,1
Confinamiento [kg/cm2]	1
Densidad inicial [gr/cm3]	1,349
Volumen drenado en consolidación [cm3]	26,3



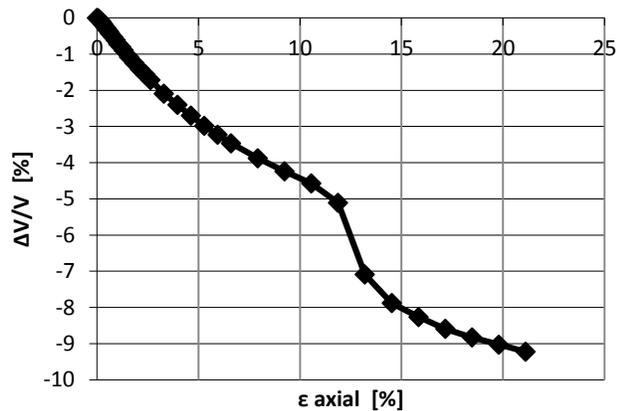
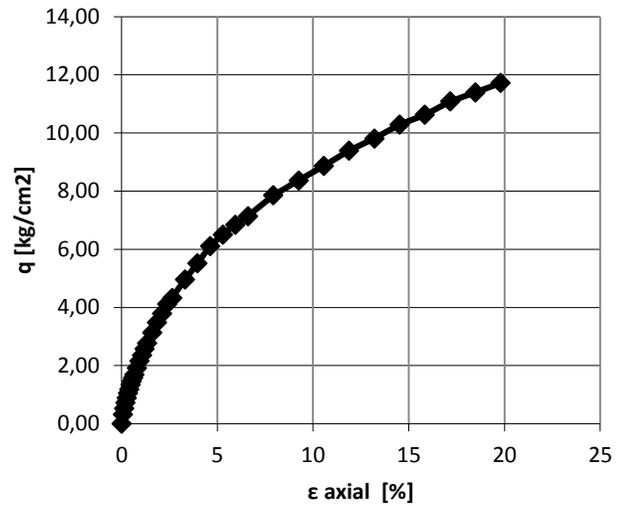
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	3,0	0,0
0,1	0,0	3,2	0,3
0,1	-0,1	3,4	0,6
0,0	0,0	3,0	0,0
0,3	-0,1	3,8	1,2
0,3	-0,2	3,9	1,4
0,4	-0,2	4,0	1,5
0,5	-0,2	4,1	1,6
0,5	-0,3	4,1	1,7
0,6	-0,3	4,2	1,8
0,6	-0,3	4,2	1,9
0,8	-0,4	4,3	2,0
0,9	-0,5	4,4	2,1
1,0	-0,5	4,5	2,2
1,2	-0,6	4,6	2,4
1,3	-0,7	4,6	2,5
1,6	-0,8	4,8	2,7
1,8	-0,9	4,9	2,9
2,1	-1,0	5,0	3,1
2,3	-1,1	5,1	3,2
2,6	-1,1	5,2	3,4
3,2	-1,3	5,5	3,7
3,9	-1,5	5,7	4,1
4,5	-1,6	5,9	4,3
5,2	-1,7	6,0	4,5
5,8	-1,8	6,1	4,7
6,5	-1,9	6,3	5,0
7,8	-2,1	6,5	5,3
9,1	-2,1	6,7	5,5
10,4	-2,2	6,8	5,7
11,7	-2,2	7,0	5,9
13,0	-2,2	7,1	6,2
14,3	-2,2	7,2	6,3
15,6	-2,2	7,2	6,3
16,9	-2,2	7,4	6,5
18,2	-2,2	7,4	6,5
19,5	-2,3	7,4	6,7
20,8	-2,3	7,5	6,8

Material	PEK
Altura probeta [cm]	19,7
Diámetro probeta [cm]	10,1
Confinamiento [kg/cm ²]	3
Densidad inicial [gr/cm ³]	1,349
Volumen drenado en consolidación [cm ³]	31,5



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	6,0	0,0
0,1	0,0	6,2	0,3
0,1	-0,1	6,4	0,5
0,2	-0,1	6,5	0,7
0,3	-0,1	6,6	0,9
0,3	-0,2	6,7	1,0
0,4	-0,2	6,8	1,2
0,5	-0,3	6,9	1,3
0,5	-0,3	7,0	1,5
0,6	-0,4	7,1	1,6
0,7	-0,4	7,1	1,7
0,8	-0,5	7,3	1,9
0,9	-0,6	7,4	2,2
1,1	-0,7	7,6	2,4
1,2	-0,8	7,7	2,6
1,3	-0,9	7,8	2,8
1,6	-1,1	8,1	3,1
1,8	-1,3	8,3	3,5
2,1	-1,4	8,5	3,8
2,4	-1,6	8,7	4,1
2,6	-1,7	8,9	4,3
3,3	-2,1	9,3	5,0
4,0	-2,4	9,7	5,5
4,6	-2,7	10,1	6,1
5,3	-3,0	10,3	6,5
5,9	-3,2	10,6	6,8
6,6	-3,5	10,8	7,1
7,9	-3,9	11,2	7,9
9,2	-4,2	11,6	8,4
10,6	-4,6	11,9	8,9
11,9	-5,1	12,3	9,4
13,2	-7,1	12,5	9,8
14,5	-7,9	12,9	10,3
15,8	-8,3	13,1	10,6
17,2	-8,6	13,4	11,1
18,5	-8,8	13,6	11,4
19,8	-9,0	13,8	11,7
21,1	-9,2	14,1	12,1

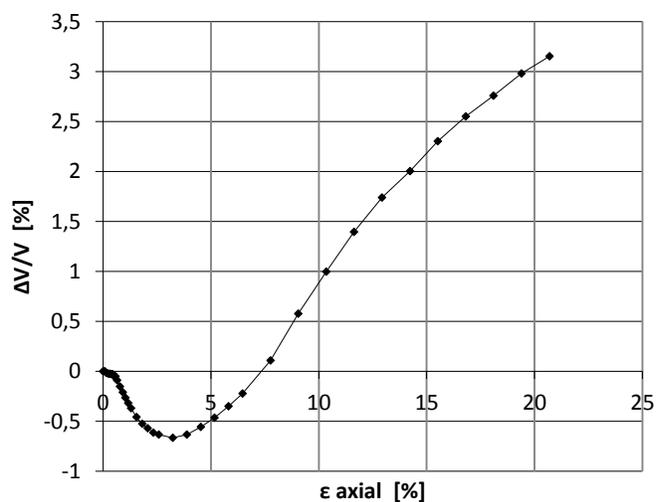
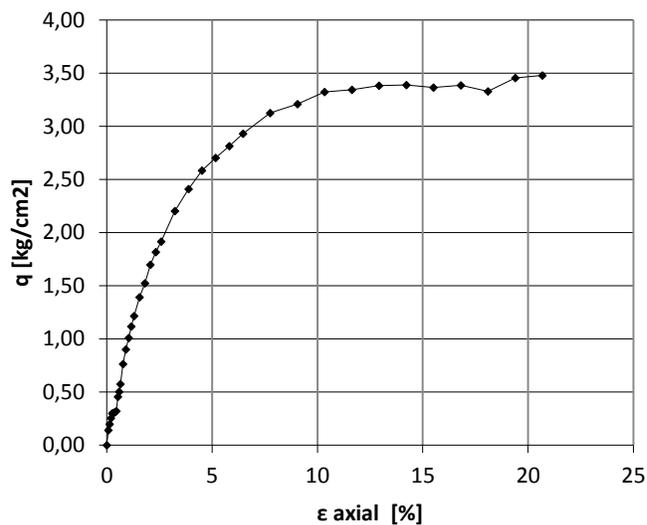
Material	PEK
Altura probeta [cm]	19,5
Diámetro probeta [cm]	10,2
Confinamiento [kg/cm2]	6
Densidad inicial [gr/cm3]	1,349
Volumen drenado en consolidación [cm3]	62,5



Material PES Dmax = 12,7 [mm]

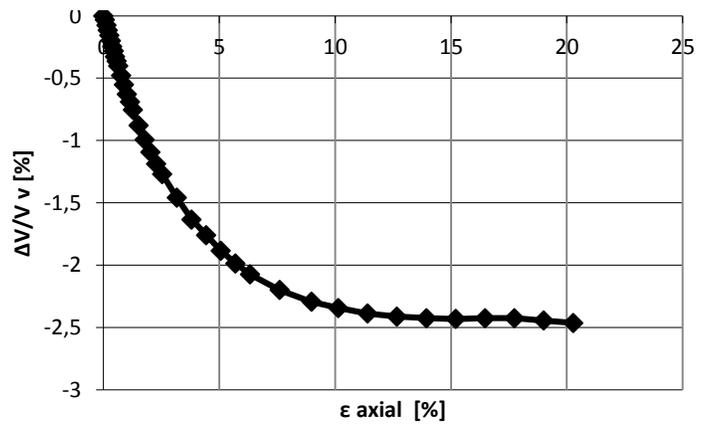
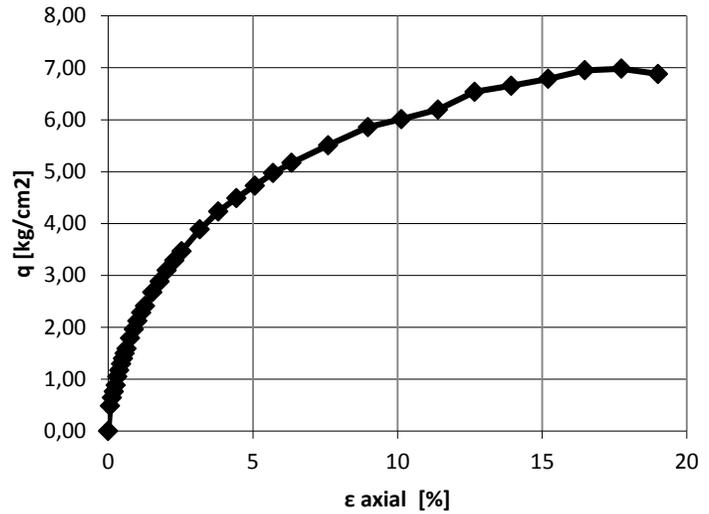
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	1,0	0,0
0,1	0,0	1,1	0,1
0,1	0,0	1,1	0,2
0,2	0,0	1,2	0,3
0,3	0,0	1,2	0,3
0,3	0,0	1,2	0,3
0,4	0,0	1,2	0,3
0,5	0,0	1,2	0,3
0,5	-0,1	1,3	0,5
0,6	-0,1	1,3	0,5
0,6	-0,1	1,4	0,6
0,8	-0,2	1,5	0,8
0,9	-0,2	1,6	0,9
1,0	-0,3	1,7	1,0
1,2	-0,3	1,7	1,1
1,3	-0,4	1,8	1,2
1,6	-0,5	1,9	1,4
1,8	-0,5	2,0	1,5
2,1	-0,6	2,1	1,7
2,3	-0,6	2,2	1,8
2,6	-0,6	2,3	1,9
3,2	-0,7	2,5	2,2
3,9	-0,6	2,6	2,4
4,5	-0,6	2,7	2,6
5,2	-0,5	2,8	2,7
5,8	-0,3	2,9	2,8
6,5	-0,2	3,0	2,9
7,8	0,1	3,1	3,1
9,1	0,6	3,1	3,2
10,3	1,0	3,2	3,3
11,6	1,4	3,2	3,3
12,9	1,7	3,3	3,4
14,2	2,0	3,3	3,4
15,5	2,3	3,2	3,4
16,8	2,6	3,3	3,4
18,1	2,8	3,2	3,3
19,4	3,0	3,3	3,5
20,7	3,2	3,3	3,5

Material	PES
Altura probeta [cm]	19,7
Diámetro probeta [cm]	10,2
Confinamiento [kg/cm2]	1
Densidad inicial [gr/cm3]	1,404
Volumen drenado en consolidación [cm3]	25,3



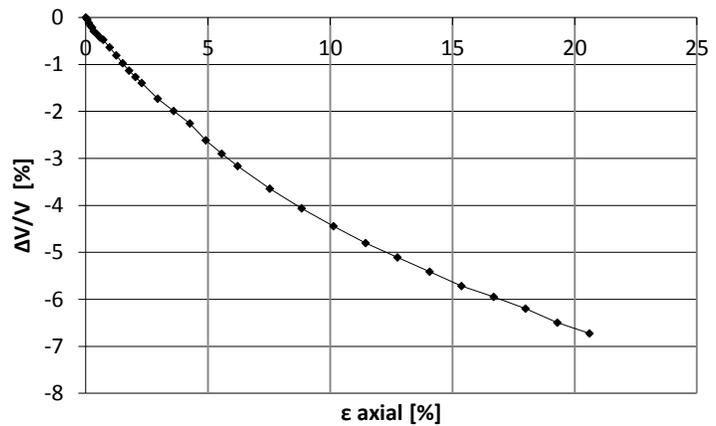
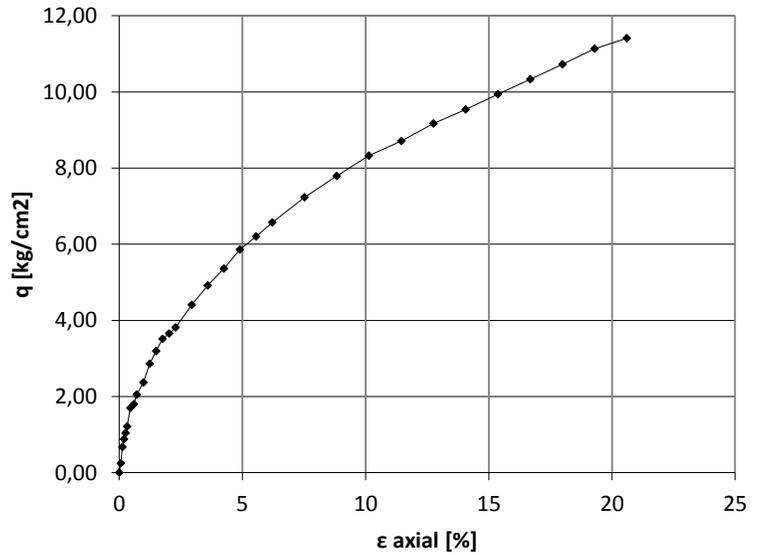
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	3,0	0,0
0,1	0,0	3,3	0,5
0,1	-0,1	3,4	0,6
0,2	-0,1	3,5	0,8
0,3	-0,2	3,6	0,9
0,3	-0,2	3,7	1,0
0,4	-0,2	3,8	1,2
0,4	-0,3	3,9	1,3
0,5	-0,3	3,9	1,4
0,6	-0,4	4,0	1,5
0,6	-0,4	4,1	1,6
0,8	-0,5	4,2	1,8
0,9	-0,6	4,3	2,0
1,0	-0,6	4,4	2,1
1,1	-0,7	4,5	2,3
1,3	-0,8	4,6	2,4
1,5	-0,9	4,8	2,7
1,8	-1,0	4,9	2,9
2,0	-1,1	5,1	3,1
2,3	-1,2	5,2	3,3
2,5	-1,3	5,3	3,5
3,2	-1,5	5,6	3,9
3,8	-1,6	5,8	4,2
4,4	-1,8	6,0	4,5
5,1	-1,9	6,2	4,7
5,7	-2,0	6,3	5,0
6,3	-2,1	6,4	5,2
7,6	-2,2	6,7	5,5
9,0	-2,3	6,9	5,9
10,1	-2,3	7,0	6,0
11,4	-2,4	7,1	6,2
12,7	-2,4	7,4	6,5
13,9	-2,4	7,4	6,7
15,2	-2,4	7,5	6,8
16,5	-2,4	7,6	7,0
17,7	-2,4	7,7	7,0
19,0	-2,4	7,6	6,9
20,3	-2,5	7,6	6,9

Material	PES
Altura probeta [cm]	20,2
Diámetro probeta [cm]	10,1
Confinamiento [kg/cm2]	3
Densidad inicial [gr/cm3]	1,404
Volumen drenado en consolidación [cm3]	32



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	6,0	0,0
0,1	0,0	6,2	0,2
0,1	-0,1	6,4	0,7
0,2	-0,2	6,6	0,9
0,3	-0,2	6,7	1,0
0,3	-0,3	6,8	1,2
0,5	-0,4	7,1	1,7
0,6	-0,4	7,2	1,8
0,7	-0,5	7,4	2,1
1,0	-0,6	7,6	2,4
1,2	-0,8	7,9	2,9
1,5	-1,0	8,1	3,2
1,8	-1,1	8,3	3,5
2,0	-1,3	8,4	3,7
2,3	-1,4	8,5	3,8
2,9	-1,7	8,9	4,4
3,6	-2,0	9,3	4,9
4,2	-2,3	9,6	5,4
4,9	-2,6	9,9	5,9
5,6	-2,9	10,1	6,2
6,2	-3,2	10,4	6,6
7,5	-3,6	10,8	7,2
8,8	-4,1	11,2	7,8
10,1	-4,4	11,5	8,3
11,4	-4,8	11,8	8,7
12,8	-5,1	12,1	9,2
14,1	-5,4	12,4	9,5
15,4	-5,7	12,6	9,9
16,7	-5,9	12,9	10,3
18,0	-6,2	13,1	10,7
19,3	-6,5	13,4	11,1
20,6	-6,7	13,6	11,4

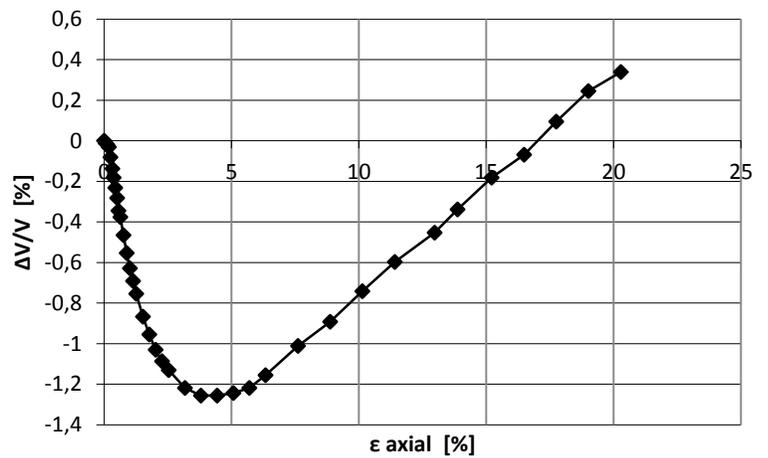
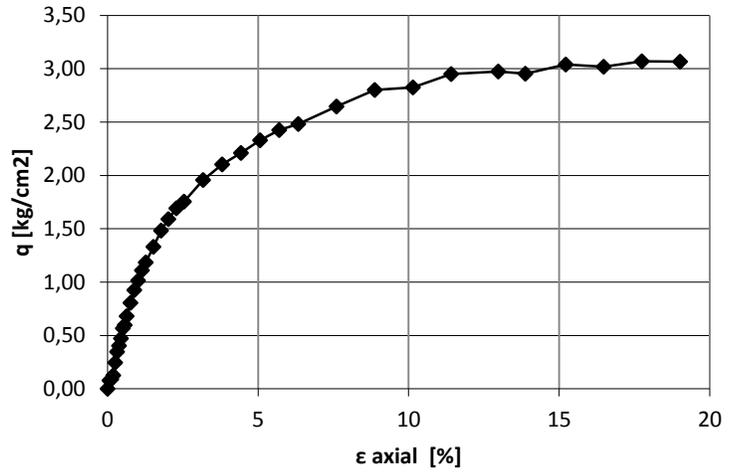
Material	PES
Altura probeta [cm]	19,7
Diámetro probeta [cm]	10,1
Confinamiento [kg/cm²]	6
Densidad inicial [gr/cm³]	1,404
Volumen drenado en consolidación [cm³]	64,2



Material combinado Dmax = 12,7 [mm]

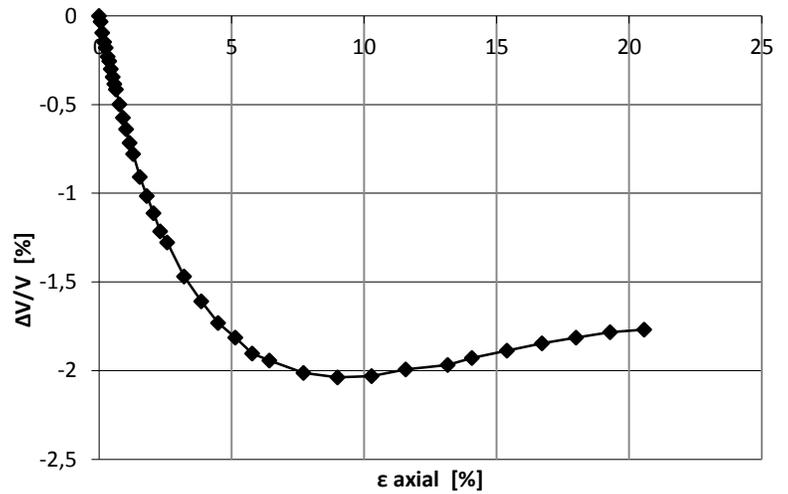
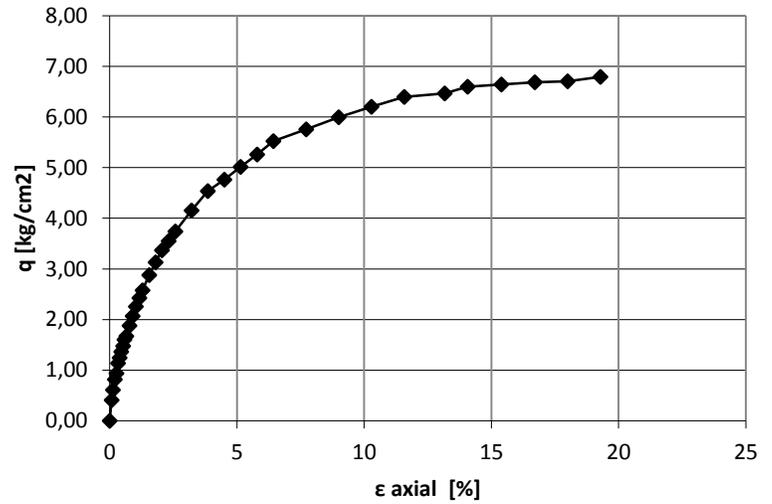
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	1,0	0,0
0,1	0,0	1,1	0,1
0,1	0,0	1,1	0,1
0,2	0,0	1,1	0,1
0,3	-0,1	1,2	0,2
0,3	-0,1	1,2	0,3
0,4	-0,2	1,3	0,4
0,4	-0,2	1,3	0,5
0,5	-0,3	1,4	0,6
0,6	-0,3	1,4	0,6
0,6	-0,4	1,5	0,7
0,8	-0,5	1,5	0,8
0,9	-0,6	1,6	0,9
1,0	-0,6	1,7	1,0
1,1	-0,7	1,7	1,1
1,3	-0,8	1,8	1,2
1,5	-0,9	1,9	1,3
1,8	-1,0	2,0	1,5
2,0	-1,0	2,1	1,6
2,3	-1,1	2,1	1,7
2,5	-1,1	2,2	1,8
3,2	-1,2	2,3	2,0
3,8	-1,3	2,4	2,1
4,4	-1,3	2,5	2,2
5,1	-1,2	2,6	2,3
5,7	-1,2	2,6	2,4
6,3	-1,2	2,7	2,5
7,6	-1,0	2,8	2,6
8,9	-0,9	2,9	2,8
10,1	-0,7	2,9	2,8
11,4	-0,6	3,0	3,0
13,0	-0,5	3,0	3,0
13,9	-0,3	3,0	3,0
15,2	-0,2	3,0	3,0
16,5	-0,1	3,0	3,0
17,8	0,1	3,0	3,1
19,0	0,2	3,0	3,1
20,3	0,3	3,1	3,1

Material	50/50
Altura probeta [cm]	20,1
Diámetro probeta [cm]	10,1
Confinamiento [kg/cm2]	1
Densidad inicial [gr/cm3]	1,385
Volumen drenado en consolidación [cm3]	16



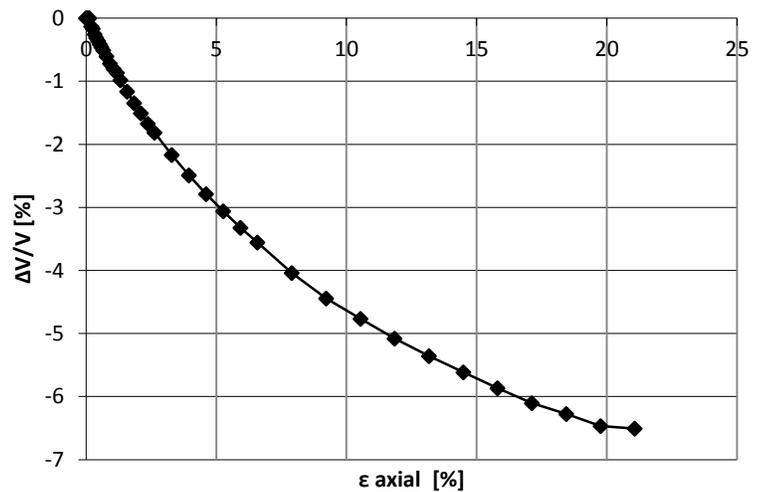
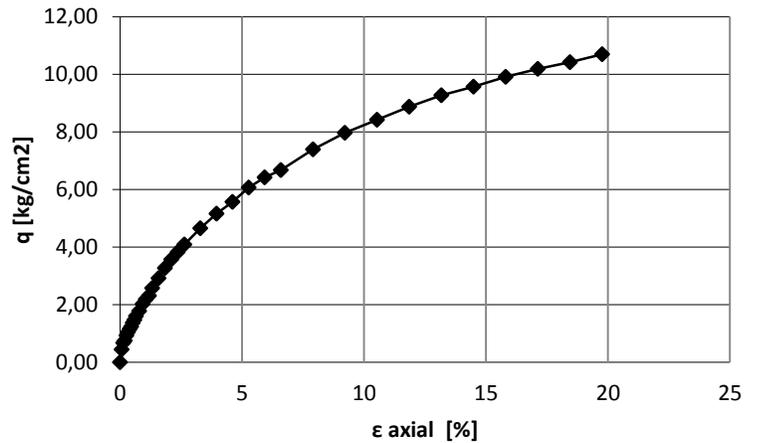
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	3,0	0,0
0,1	0,0	3,3	0,4
0,1	-0,1	3,4	0,6
0,2	-0,1	3,5	0,8
0,3	-0,2	3,6	0,9
0,3	-0,2	3,8	1,1
0,4	-0,3	3,8	1,2
0,5	-0,3	3,9	1,4
0,5	-0,3	4,0	1,5
0,6	-0,4	4,1	1,6
0,6	-0,4	4,1	1,7
0,8	-0,5	4,3	1,9
0,9	-0,6	4,4	2,1
1,0	-0,6	4,5	2,3
1,2	-0,7	4,6	2,4
1,3	-0,8	4,7	2,6
1,5	-0,9	4,9	2,9
1,8	-1,0	5,1	3,1
2,1	-1,1	5,2	3,4
2,3	-1,2	5,4	3,5
2,6	-1,3	5,5	3,7
3,2	-1,5	5,8	4,2
3,9	-1,6	6,0	4,5
4,5	-1,7	6,2	4,8
5,1	-1,8	6,3	5,0
5,8	-1,9	6,5	5,3
6,4	-1,9	6,7	5,5
7,7	-2,0	6,8	5,8
9,0	-2,0	7,0	6,0
10,3	-2,0	7,1	6,2
11,6	-2,0	7,3	6,4
13,2	-2,0	7,3	6,5
14,1	-1,9	7,4	6,6
15,4	-1,9	7,4	6,6
16,7	-1,8	7,5	6,7
18,0	-1,8	7,5	6,7
19,3	-1,8	7,5	6,8
20,6	-1,8	7,5	6,8

Material	50/50
Altura probeta [cm]	19,9
Diámetro probeta [cm]	10,1
Confinamiento [kg/cm2]	3
Densidad inicial [gr/cm3]	1,385
Volumen drenado en consolidación [cm3]	35,1



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	6,0	0,0
0,1	0,0	6,3	0,4
0,1	0,0	6,5	0,7
0,2	-0,1	6,5	0,8
0,3	-0,2	6,6	0,9
0,3	-0,3	6,7	1,1
0,4	-0,3	6,8	1,2
0,5	-0,4	6,8	1,2
0,5	-0,4	6,9	1,4
0,6	-0,5	7,0	1,5
0,7	-0,5	7,1	1,6
0,8	-0,6	7,2	1,8
0,9	-0,7	7,3	2,0
1,1	-0,8	7,5	2,2
1,2	-0,9	7,5	2,3
1,3	-1,0	7,7	2,6
1,6	-1,2	7,9	2,9
1,8	-1,3	8,2	3,3
2,1	-1,5	8,4	3,6
2,4	-1,7	8,6	3,8
2,6	-1,8	8,7	4,1
3,3	-2,2	9,1	4,7
4,0	-2,5	9,4	5,2
4,6	-2,8	9,7	5,6
5,3	-3,1	10,0	6,1
5,9	-3,3	10,3	6,4
6,6	-3,6	10,5	6,7
7,9	-4,0	10,9	7,4
9,2	-4,4	11,3	8,0
10,5	-4,8	11,6	8,4
11,9	-5,1	11,9	8,9
13,2	-5,4	12,2	9,3
14,5	-5,6	12,4	9,6
15,8	-5,9	12,6	9,9
17,1	-6,1	12,8	10,2
18,4	-6,3	13,0	10,4
19,8	-6,5	13,1	10,7
21,1	-6,5	13,3	11,0

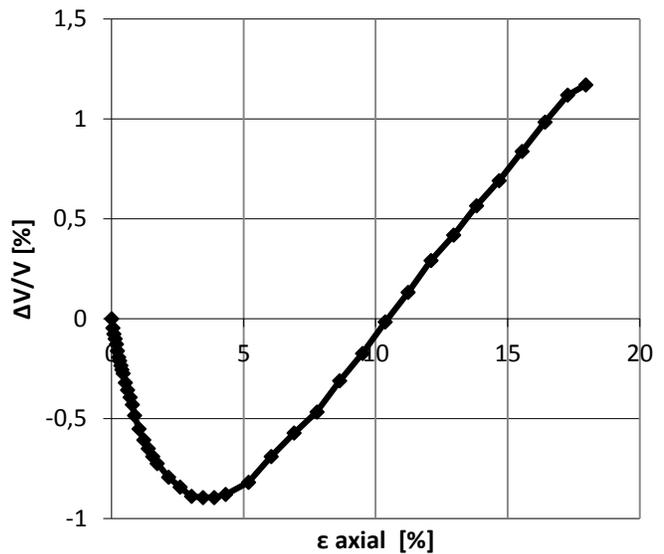
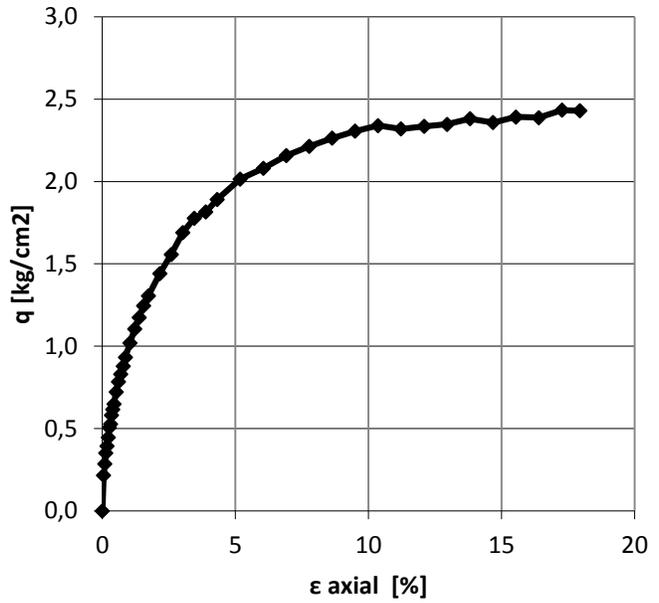
Material	50/50
Altura probeta [cm]	19,5
Diámetro probeta [cm]	10,2
Confinamiento [kg/cm2]	6
Densidad inicial [gr/cm3]	1,385
Volumen drenado en consolidación [cm3]	54



Material PEK Dmax = 25 [mm]

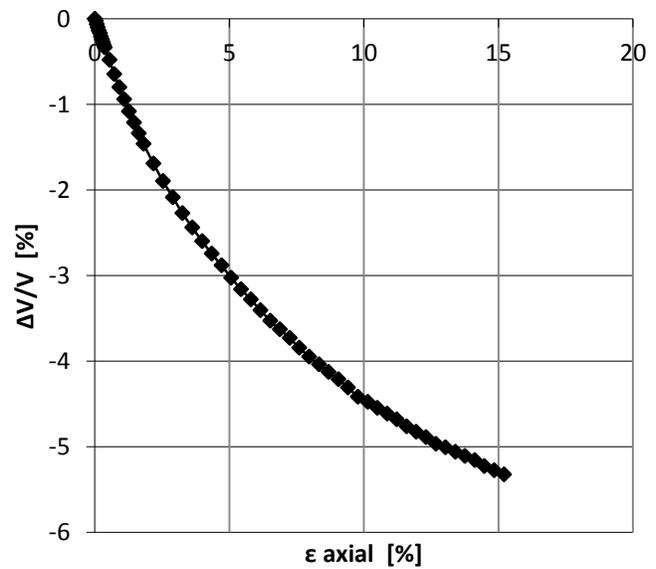
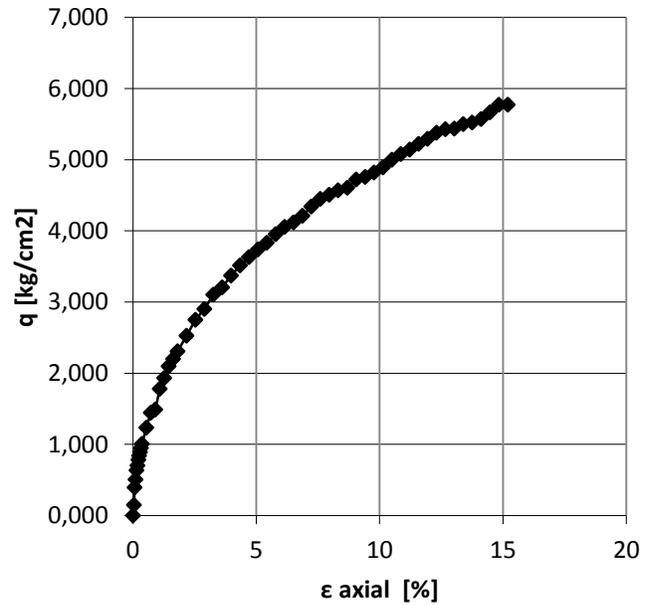
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	1,0	0,0
0,0	0,0	1,1	0,2
0,1	-0,1	1,2	0,3
0,1	-0,1	1,2	0,4
0,2	-0,1	1,3	0,4
0,2	-0,2	1,3	0,4
0,3	-0,2	1,3	0,5
0,3	-0,2	1,4	0,5
0,3	-0,2	1,4	0,6
0,4	-0,3	1,4	0,6
0,4	-0,3	1,4	0,6
0,5	-0,3	1,5	0,7
0,6	-0,4	1,5	0,8
0,7	-0,4	1,6	0,8
0,8	-0,4	1,6	0,9
0,9	-0,5	1,6	0,9
1,0	-0,6	1,7	1,0
1,2	-0,6	1,7	1,1
1,4	-0,6	1,8	1,2
1,6	-0,7	1,8	1,2
1,7	-0,7	1,9	1,3
2,2	-0,8	2,0	1,4
2,6	-0,8	2,0	1,6
3,0	-0,9	2,1	1,7
3,5	-0,9	2,2	1,8
3,9	-0,9	2,2	1,8
4,3	-0,9	2,3	1,9
5,2	-0,8	2,3	2,0
6,0	-0,7	2,4	2,1
6,9	-0,6	2,4	2,2
7,8	-0,5	2,5	2,2
8,6	-0,3	2,5	2,3
9,5	-0,2	2,5	2,3
10,4	0,0	2,6	2,3
11,2	0,1	2,5	2,3
12,1	0,3	2,6	2,3
13,0	0,4	2,6	2,3
13,8	0,6	2,6	2,4
14,7	0,7	2,6	2,4
15,5	0,8	2,6	2,4
16,4	1,0	2,6	2,4
17,3	1,1	2,6	2,4
17,9	1,2	2,6	2,4

Material	PEK
Altura Probeta [cm]	29,55
Diámetro Probeta [cm]	15
Confinamiento [kg/cm ²]	1
Densidad inicial [gr/cm ³]	1,365
Volumen drenado en consolidación [cm ³]	70,4



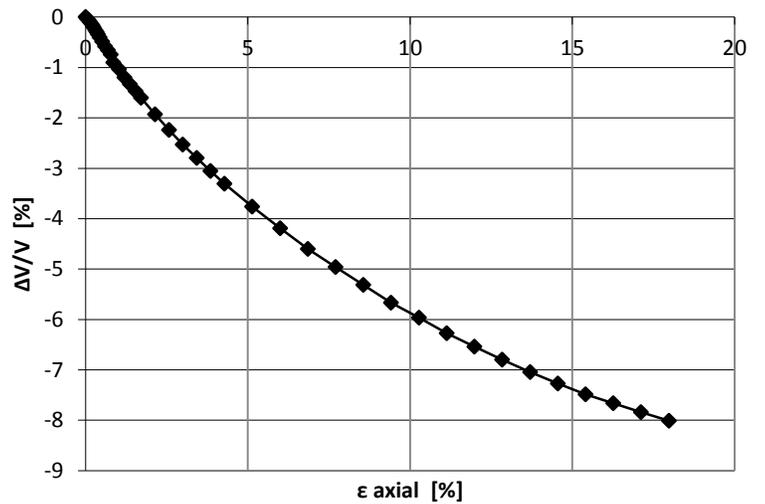
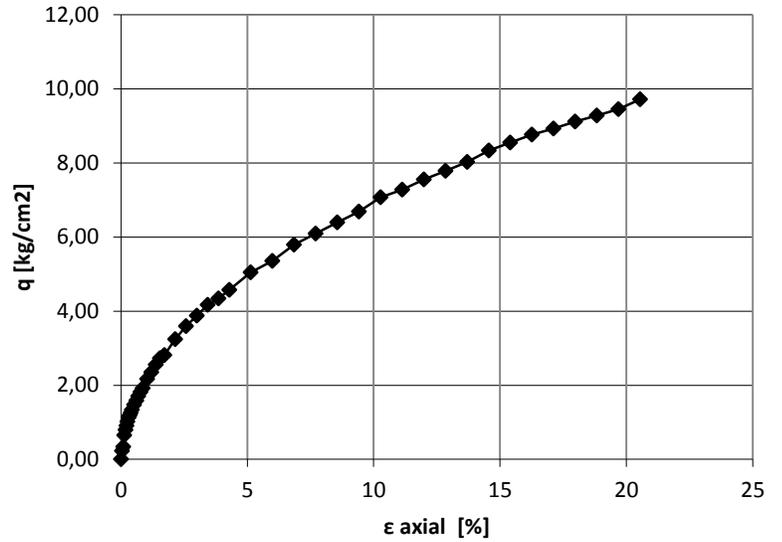
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	3,0	0,0
0,0	0,0	3,1	0,1
0,1	-0,1	3,3	0,4
0,1	-0,1	3,3	0,5
0,1	-0,1	3,4	0,6
0,2	-0,2	3,5	0,7
0,2	-0,2	3,5	0,8
0,3	-0,2	3,6	0,8
0,3	-0,3	3,6	0,9
0,3	-0,3	3,6	0,9
0,4	-0,3	3,7	1,0
0,5	-0,5	3,8	1,2
0,7	-0,6	4,0	1,4
0,9	-0,8	4,0	1,5
1,1	-0,9	4,2	1,8
1,3	-1,1	4,3	1,9
1,4	-1,2	4,4	2,1
1,6	-1,3	4,5	2,2
1,8	-1,5	4,5	2,3
2,2	-1,7	4,7	2,5
2,5	-1,9	4,8	2,7
2,9	-2,1	4,9	2,9
3,3	-2,3	5,1	3,1
3,6	-2,4	5,1	3,2
4,0	-2,6	5,2	3,4
4,3	-2,7	5,3	3,5
4,7	-2,9	5,4	3,6
5,1	-3,0	5,5	3,7
5,4	-3,2	5,6	3,8
5,8	-3,3	5,6	4,0
6,2	-3,4	5,7	4,1
6,5	-3,5	5,7	4,1
6,9	-3,6	5,8	4,2
7,2	-3,7	5,9	4,3
7,6	-3,8	6,0	4,4
8,0	-3,9	6,0	4,5
8,3	-4,0	6,0	4,6
8,7	-4,1	6,1	4,6
9,0	-4,2	6,1	4,7
9,4	-4,3	6,2	4,8
9,8	-4,4	6,2	4,8
10,1	-4,5	6,3	4,9
10,5	-4,5	6,3	5,0
10,9	-4,6	6,4	5,1
11,2	-4,7	6,4	5,1
11,6	-4,8	6,5	5,2
11,9	-4,8	6,5	5,3
12,3	-4,9	6,6	5,4
12,7	-5,0	6,6	5,4
13,0	-5,0	6,6	5,4
13,4	-5,1	6,7	5,5
13,8	-5,1	6,7	5,5
14,1	-5,2	6,7	5,6
14,5	-5,2	6,8	5,7
14,8	-5,3	6,8	5,8
15,2	-5,3	6,8	5,8

Material	PEK
Altura Probeta [cm]	27,9
Diámetro Probeta [cm]	15
Confinamiento [kg/cm2]	3
Densidad inicial [gr/cm3]	1,365
Volumen drenado en consolidación [cm3]	141,9



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	6,0	0,0
0,0	0,0	6,2	0,2
0,1	-0,1	6,2	0,3
0,1	-0,1	6,4	0,6
0,2	-0,1	6,5	0,8
0,2	-0,2	6,6	0,9
0,3	-0,2	6,7	1,0
0,3	-0,3	6,8	1,1
0,3	-0,3	6,8	1,2
0,4	-0,3	6,8	1,2
0,4	-0,4	6,9	1,3
0,5	-0,5	7,0	1,5
0,6	-0,6	7,1	1,6
0,7	-0,7	7,1	1,7
0,8	-0,7	7,2	1,8
0,9	-0,9	7,3	1,9
1,0	-1,0	7,4	2,2
1,2	-1,2	7,6	2,4
1,4	-1,3	7,7	2,6
1,5	-1,5	7,8	2,7
1,7	-1,6	7,9	2,8
2,1	-1,9	8,2	3,2
2,6	-2,2	8,4	3,6
3,0	-2,5	8,6	3,9
3,4	-2,8	8,8	4,2
3,9	-3,1	8,9	4,3
4,3	-3,3	9,1	4,6
5,1	-3,8	9,4	5,0
6,0	-4,2	9,6	5,4
6,8	-4,6	9,9	5,8
7,7	-5,0	10,1	6,1
8,6	-5,3	10,3	6,4
9,4	-5,7	10,5	6,7
10,3	-6,0	10,7	7,1
11,1	-6,3	10,9	7,3
12,0	-6,5	11,0	7,5
12,8	-6,8	11,2	7,8
13,7	-7,0	11,4	8,0
14,6	-7,3	11,6	8,3
15,4	-7,5	11,7	8,5
16,3	-7,7	11,8	8,8
17,1	-7,8	12,0	8,9
18,0	-8,0	12,1	9,1
18,8	-8,2	12,2	9,3
19,7	-8,3	12,3	9,5
20,5	-8,4	12,5	9,7

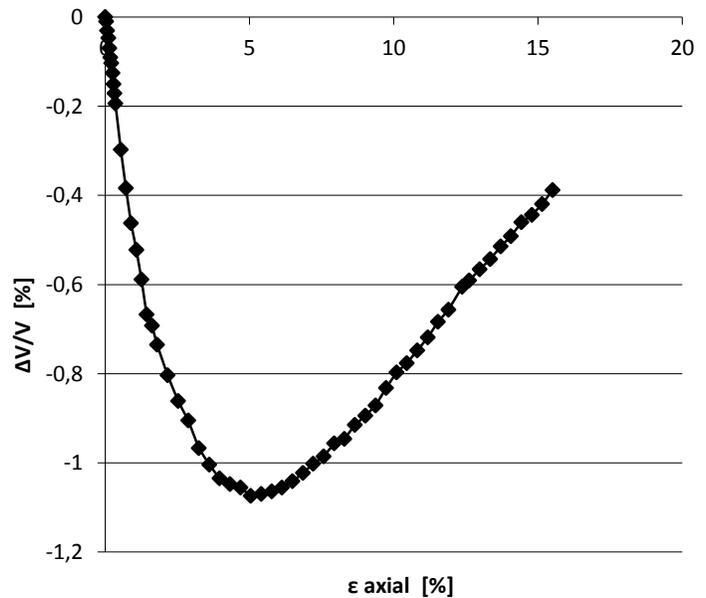
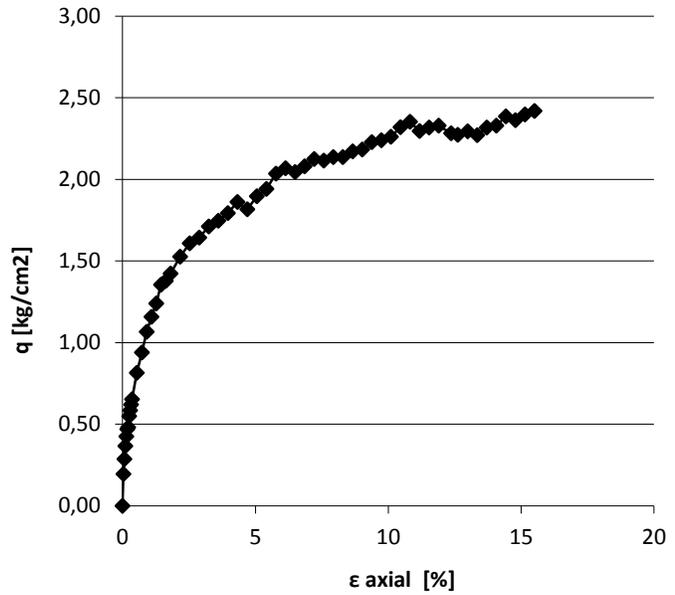
Material	PEK
Altura Probeta [cm]	29,99
Diámetro Probeta [cm]	15,2
Confinamiento [kg/cm2]	6
Densidad inicial [gr/cm3]	1,365
Volumen drenado en consolidación [cm3]	174,62



Material PES Dmax = 25 [mm]

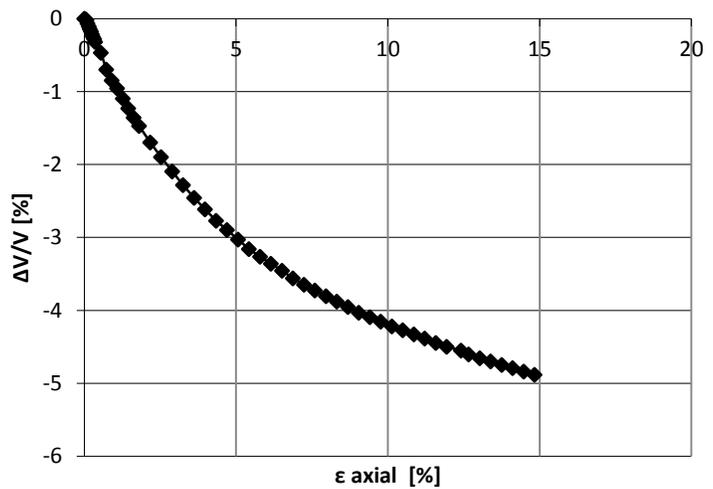
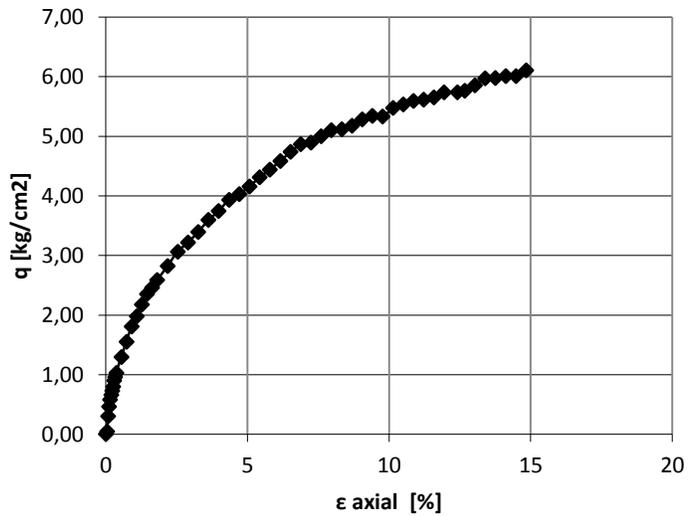
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	1,0	0,0
0,0	0,0	1,1	0,2
0,1	0,0	1,2	0,3
0,1	0,0	1,2	0,4
0,1	-0,1	1,3	0,4
0,2	-0,1	1,3	0,5
0,2	-0,1	1,3	0,5
0,3	-0,1	1,4	0,5
0,3	-0,2	1,4	0,6
0,3	-0,2	1,4	0,6
0,4	-0,2	1,4	0,7
0,5	-0,3	1,5	0,8
0,7	-0,4	1,6	0,9
0,9	-0,5	1,7	1,1
1,1	-0,5	1,8	1,2
1,3	-0,6	1,8	1,2
1,4	-0,7	1,9	1,4
1,6	-0,7	1,9	1,4
1,8	-0,7	1,9	1,4
2,2	-0,8	2,0	1,5
2,5	-0,9	2,1	1,6
2,9	-0,9	2,1	1,6
3,2	-1,0	2,1	1,7
3,6	-1,0	2,2	1,7
4,0	-1,0	2,2	1,8
4,3	-1,0	2,2	1,9
4,7	-1,1	2,2	1,8
5,0	-1,1	2,3	1,9
5,4	-1,1	2,3	1,9
5,8	-1,1	2,4	2,0
6,1	-1,1	2,4	2,1
6,5	-1,0	2,4	2,0
6,9	-1,0	2,4	2,1
7,2	-1,0	2,4	2,1
7,6	-1,0	2,4	2,1
7,9	-1,0	2,4	2,1
8,3	-0,9	2,4	2,1
8,7	-0,9	2,4	2,2
9,0	-0,9	2,5	2,2
9,4	-0,9	2,5	2,2
9,7	-0,8	2,5	2,2
10,1	-0,8	2,5	2,3
10,5	-0,8	2,5	2,3
10,8	-0,7	2,6	2,4
11,2	-0,7	2,5	2,3
11,5	-0,7	2,5	2,3
11,9	-0,7	2,6	2,3
12,4	-0,6	2,5	2,3
12,6	-0,6	2,5	2,3
13,0	-0,6	2,5	2,3
13,3	-0,5	2,5	2,3
13,7	-0,5	2,5	2,3
14,1	-0,5	2,6	2,3
14,4	-0,5	2,6	2,4
14,8	-0,4	2,6	2,4
15,1	-0,4	2,6	2,4
15,5	-0,4	2,6	2,4

Material	PES
Altura Probeta [cm]	27,9
Diámetro Probeta [cm]	15
Confinamiento [kg/cm2]	1
Densidad inicial [gr/cm3]	1,395
Volumen drenado en consolidación [cm3]	24



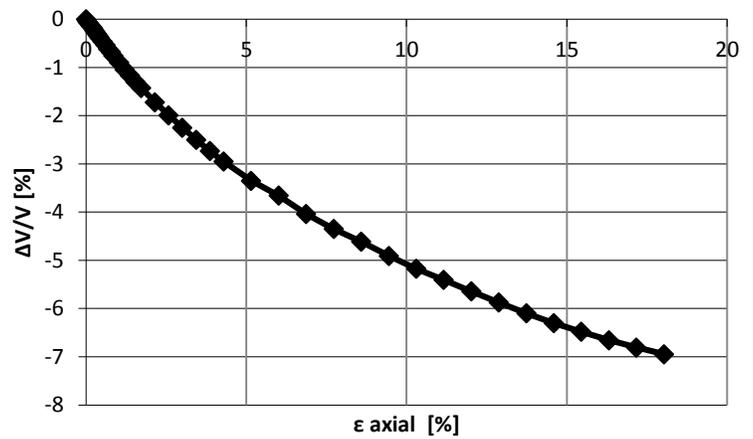
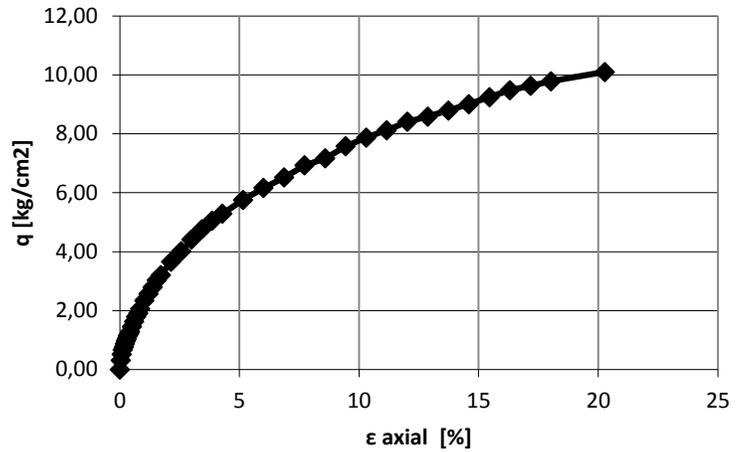
Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	3,0	0,0
0,0	0,0	3,0	0,0
0,1	0,0	3,2	0,3
0,1	-0,1	3,3	0,5
0,1	-0,1	3,4	0,6
0,2	-0,1	3,4	0,7
0,2	-0,2	3,5	0,7
0,3	-0,2	3,5	0,8
0,3	-0,3	3,6	0,9
0,3	-0,3	3,6	1,0
0,4	-0,3	3,7	1,0
0,5	-0,5	3,9	1,3
0,7	-0,7	4,0	1,5
0,9	-0,8	4,2	1,8
1,1	-1,0	4,3	2,0
1,3	-1,1	4,5	2,2
1,4	-1,2	4,6	2,4
1,6	-1,4	4,6	2,5
1,8	-1,5	4,7	2,6
2,2	-1,7	4,9	2,8
2,5	-1,9	5,0	3,1
2,9	-2,1	5,1	3,2
3,3	-2,3	5,3	3,4
3,6	-2,5	5,4	3,6
4,0	-2,6	5,5	3,7
4,3	-2,8	5,6	3,9
4,7	-2,9	5,7	4,0
5,1	-3,0	5,8	4,2
5,4	-3,2	5,9	4,3
5,8	-3,3	6,0	4,4
6,2	-3,4	6,1	4,6
6,5	-3,5	6,2	4,7
6,9	-3,6	6,2	4,9
7,2	-3,6	6,3	4,9
7,6	-3,7	6,3	5,0
8,0	-3,8	6,4	5,1
8,3	-3,9	6,4	5,1
8,7	-4,0	6,5	5,2
9,0	-4,0	6,5	5,3
9,4	-4,1	6,6	5,3
9,8	-4,2	6,6	5,3
10,1	-4,2	6,6	5,5
10,5	-4,3	6,7	5,5
10,9	-4,3	6,7	5,6
11,2	-4,4	6,7	5,6
11,6	-4,4	6,8	5,7
11,9	-4,5	6,8	5,7
12,4	-4,6	6,8	5,7
12,7	-4,6	6,8	5,8
13,0	-4,7	6,9	5,9
13,4	-4,7	7,0	6,0
13,8	-4,7	7,0	6,0
14,1	-4,8	7,0	6,0
14,5	-4,8	7,0	6,0
14,8	-4,9	7,1	6,1

Material	PES
Altura Probeta [cm]	27,9
Diámetro Probeta [cm]	15
Confinamiento [kg/cm2]	3
Densidad inicial [gr/cm3]	1,395
Volumen drenado en consolidación [cm3]	143,4



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm2]	[kg/cm2]
0,0	0,0	6,0	0,0
0,0	0,0	6,2	0,3
0,1	-0,1	6,3	0,5
0,1	-0,1	6,4	0,7
0,2	-0,2	6,5	0,8
0,2	-0,2	6,6	0,9
0,3	-0,2	6,6	1,0
0,3	-0,3	6,7	1,0
0,3	-0,3	6,8	1,1
0,4	-0,3	6,8	1,2
0,4	-0,4	6,9	1,3
0,5	-0,5	7,0	1,5
0,6	-0,5	7,1	1,6
0,7	-0,6	7,2	1,8
0,8	-0,7	7,3	1,9
0,9	-0,8	7,4	2,1
1,0	-0,9	7,6	2,3
1,2	-1,0	7,7	2,6
1,4	-1,2	7,9	2,8
1,5	-1,3	8,0	3,0
1,7	-1,4	8,1	3,2
2,1	-1,7	8,4	3,7
2,6	-2,0	8,7	4,0
3,0	-2,2	8,9	4,4
3,4	-2,5	9,2	4,8
3,9	-2,7	9,4	5,1
4,3	-3,0	9,5	5,3
5,2	-3,4	9,8	5,8
6,0	-3,7	10,1	6,2
6,9	-4,0	10,3	6,5
7,7	-4,4	10,6	6,9
8,6	-4,6	10,8	7,2
9,4	-4,9	11,1	7,6
10,3	-5,2	11,3	7,9
11,2	-5,4	11,4	8,1
12,0	-5,6	11,6	8,4
12,9	-5,9	11,7	8,6
13,7	-6,1	11,9	8,8
14,6	-6,3	12,0	9,0
15,5	-6,5	12,2	9,2
16,3	-6,7	12,3	9,5
17,2	-6,8	12,4	9,6
18,0	-6,9	12,5	9,8
20,3	0,0	12,7	10,1
19,7	0,0	-182,7	-283,0
20,6	0,0	-182,7	-283,0

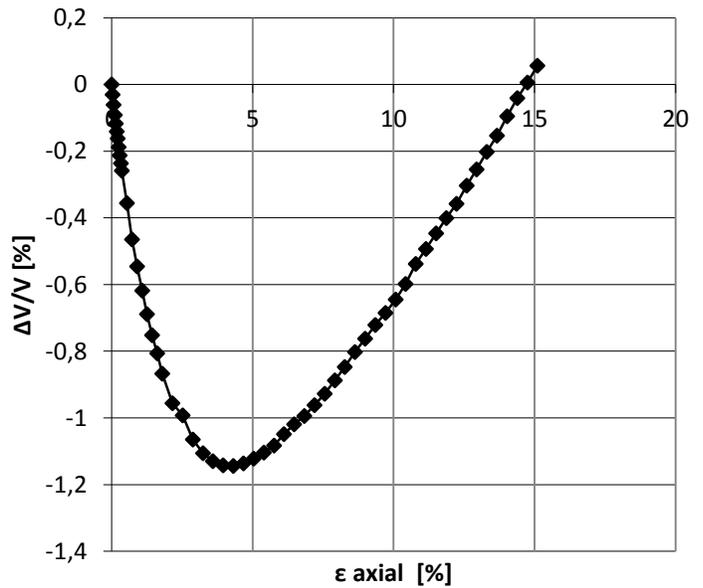
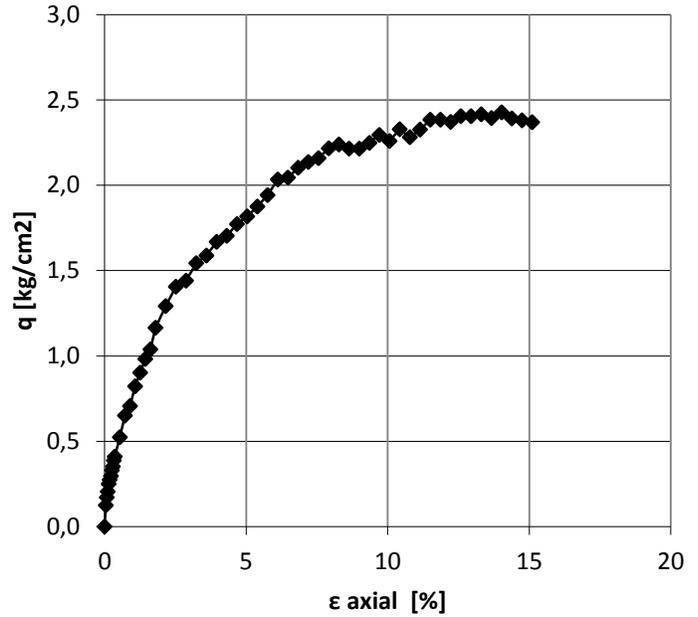
Material	PES
Altura Probeta [cm]	29,99
Diámetro Probeta [cm]	15,2
Confinamiento [kg/cm2]	6
Densidad inicial [gr/cm3]	1,395
Volumen drenado en consolidación [cm3]	225,4



Material combinado Dmax = 25 [mm]

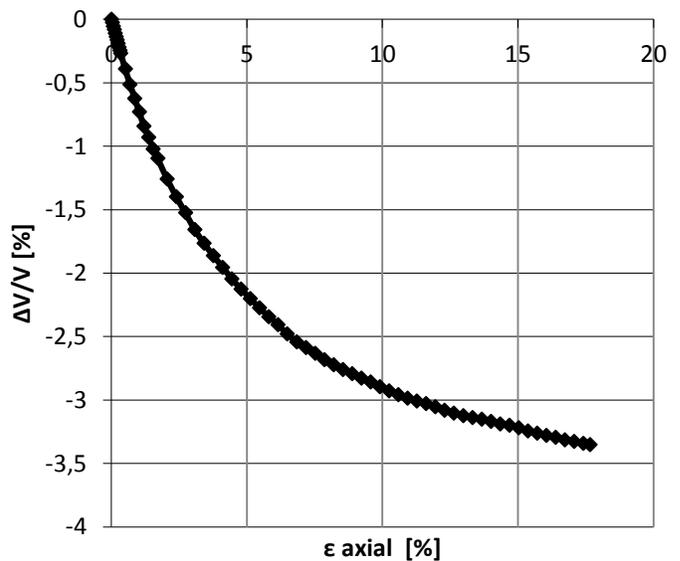
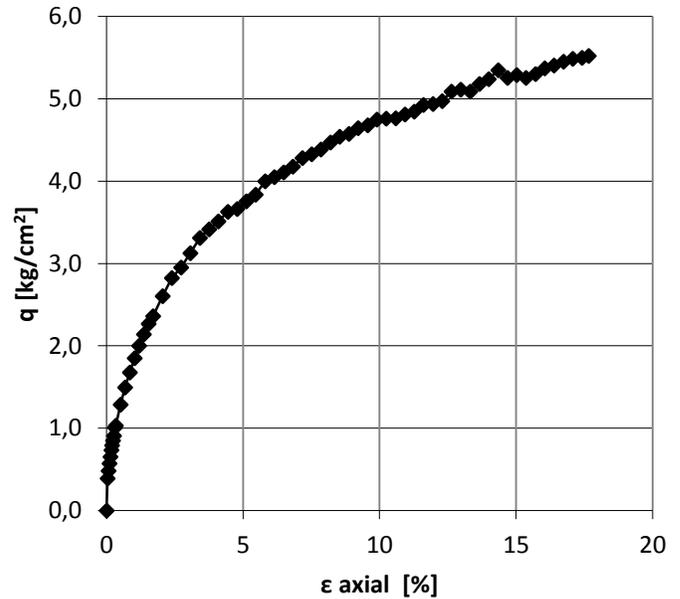
Def. unit.	DV/Vo	ρ	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	1,0	0,0
0,0	0,0	1,1	0,1
0,1	-0,1	1,1	0,2
0,1	-0,1	1,1	0,2
0,1	-0,1	1,2	0,3
0,2	-0,1	1,2	0,3
0,2	-0,2	1,2	0,3
0,3	-0,2	1,2	0,3
0,3	-0,2	1,2	0,4
0,3	-0,2	1,3	0,4
0,4	-0,3	1,3	0,4
0,5	-0,4	1,3	0,5
0,7	-0,5	1,4	0,7
0,9	-0,5	1,5	0,7
1,1	-0,6	1,5	0,8
1,3	-0,7	1,6	0,9
1,4	-0,8	1,7	1,0
1,6	-0,8	1,7	1,0
1,8	-0,9	1,8	1,2
2,2	-1,0	1,9	1,3
2,5	-1,0	1,9	1,4
2,9	-1,1	2,0	1,4
3,2	-1,1	2,0	1,5
3,6	-1,1	2,1	1,6
4,0	-1,1	2,1	1,7
4,3	-1,1	2,1	1,7
4,7	-1,1	2,2	1,8
5,0	-1,1	2,2	1,8
5,4	-1,1	2,2	1,9
5,8	-1,1	2,3	1,9
6,1	-1,0	2,4	2,0
6,5	-1,0	2,4	2,0
6,8	-1,0	2,4	2,1
7,2	-1,0	2,4	2,1
7,6	-0,9	2,4	2,2
7,9	-0,9	2,5	2,2
8,3	-0,8	2,5	2,2
8,6	-0,8	2,5	2,2
9,0	-0,8	2,5	2,2
9,4	-0,7	2,5	2,2
9,7	-0,7	2,5	2,3
10,1	-0,6	2,5	2,3
10,4	-0,6	2,6	2,3
10,8	-0,5	2,5	2,3
11,1	-0,5	2,6	2,3
11,5	-0,4	2,6	2,4
11,9	-0,4	2,6	2,4
12,2	-0,4	2,6	2,4
12,6	-0,3	2,6	2,4
12,9	-0,3	2,6	2,4
13,3	-0,2	2,6	2,4
13,7	-0,2	2,6	2,4
14,0	-0,1	2,6	2,4
14,4	0,0	2,6	2,4
14,7	0,0	2,6	2,4
15,1	0,1	2,6	2,4
15,5	0,1	2,6	2,4
15,8	0,1	2,6	2,4

Material	50/50
Altura Probeta [cm]	27,9
Diámetro Probeta [cm]	15
Confinamiento [kg/cm²]	1
Densidad inicial [gr/cm³]	1,375
Volumen drenado en consolidación [cm³]	51,2



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	3,0	0,0
0,0	0,0	3,3	0,4
0,1	-0,1	3,3	0,5
0,1	-0,1	3,4	0,6
0,1	-0,1	3,4	0,7
0,2	-0,1	3,5	0,7
0,2	-0,2	3,5	0,8
0,2	-0,2	3,6	0,8
0,3	-0,2	3,6	0,9
0,3	-0,2	3,7	1,0
0,3	-0,3	3,7	1,0
0,5	-0,4	3,9	1,3
0,7	-0,5	4,0	1,5
0,9	-0,6	4,1	1,7
1,0	-0,7	4,2	1,9
1,2	-0,8	4,3	2,0
1,4	-0,9	4,4	2,1
1,5	-1,0	4,5	2,3
1,7	-1,1	4,6	2,4
2,0	-1,3	4,7	2,6
2,4	-1,4	4,9	2,8
2,7	-1,5	5,0	3,0
3,1	-1,7	5,1	3,1
3,4	-1,8	5,2	3,3
3,8	-1,9	5,3	3,4
4,1	-2,0	5,3	3,5
4,4	-2,0	5,4	3,6
4,8	-2,1	5,4	3,7
5,1	-2,2	5,5	3,8
5,5	-2,3	5,6	3,8
5,8	-2,3	5,7	4,0
6,1	-2,4	5,7	4,0
6,5	-2,5	5,7	4,1
6,8	-2,5	5,8	4,2
7,2	-2,6	5,9	4,3
7,5	-2,6	5,9	4,3
7,9	-2,7	5,9	4,4
8,2	-2,7	6,0	4,5
8,5	-2,8	6,0	4,5
8,9	-2,8	6,0	4,6
9,2	-2,8	6,1	4,6
9,6	-2,9	6,1	4,7
9,9	-2,9	6,2	4,7
10,2	-2,9	6,2	4,8
10,6	-3,0	6,2	4,8
10,9	-3,0	6,2	4,8
11,3	-3,0	6,2	4,8
11,6	-3,0	6,3	4,9
11,9	-3,1	6,3	4,9
12,3	-3,1	6,3	5,0
12,6	-3,1	6,4	5,1
13,0	-3,1	6,4	5,1
13,3	-3,1	6,4	5,1
13,7	-3,2	6,5	5,2
14,0	-3,2	6,5	5,2
14,3	-3,2	6,6	5,3
14,7	-3,2	6,5	5,3
15,0	-3,2	6,5	5,3
15,4	-3,2	6,5	5,3
15,7	-3,3	6,5	5,3
16,0	-3,3	6,6	5,4
16,4	-3,3	6,6	5,4
16,7	-3,3	6,6	5,5
17,1	-3,3	6,7	5,5
17,4	-3,3	6,7	5,5
17,7	-3,4	6,7	5,5

Material	50/50
Altura Probeta [cm]	29,5
Diámetro Probeta [cm]	15
Confinamiento [kg/cm ²]	3
Densidad inicial [gr/cm ³]	1,375
Volumen drenado en consolidación [cm ³]	112,5



Def. unit.	DV/Vo	p	q
[%]	[%]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,0	0,0	6,0	0,0
0,0	0,0	6,2	0,3
0,1	-0,1	6,6	0,9
0,1	-0,1	6,7	1,0
0,2	-0,2	6,7	1,1
0,2	-0,2	6,8	1,2
0,3	-0,3	6,9	1,3
0,3	-0,3	6,9	1,3
0,3	-0,3	6,9	1,4
0,4	-0,4	7,0	1,4
0,4	-0,4	7,0	1,5
0,5	-0,5	7,1	1,7
0,0	0,0	6,0	0,0
0,7	-0,7	7,2	1,8
0,8	-0,8	7,3	2,0
0,9	-0,8	7,4	2,1
1,0	-1,0	7,5	2,3
1,2	-1,1	7,7	2,5
1,4	-1,2	7,8	2,6
1,5	-1,4	7,9	2,9
1,7	-1,5	8,0	3,0
2,1	-1,8	8,3	3,4
2,6	-2,1	8,5	3,7
3,0	-2,3	8,7	4,0
3,4	-2,6	8,9	4,3
3,9	-2,9	9,0	4,6
4,3	-3,1	9,2	4,8
5,2	-3,5	9,5	5,3
6,0	-3,8	9,7	5,6
6,9	-4,2	10,0	6,0
7,7	-4,5	10,2	6,3
8,6	-4,8	10,4	6,6
9,4	-5,1	10,6	6,9
10,3	-5,3	10,8	7,2
11,2	-5,6	11,0	7,5
12,0	-5,8	11,1	7,7
12,9	-6,0	11,3	7,9
13,7	-6,2	11,5	8,2
14,6	-6,3	11,6	8,4
15,5	-6,5	11,7	8,6
16,3	-6,6	11,8	8,6
17,2	-6,8	11,9	8,8
18,0	-6,8	12,0	9,1
18,9	-6,9	12,2	9,2
19,7	-7,0	12,2	9,3
20,6	-7,1	12,3	9,5

Material	50/50
Altura Probeta [cm]	29,99
Diámetro Probeta [cm]	15,2
Confinamiento [kg/cm²]	6
Densidad inicial [gr/cm³]	1,375
Volumen drenado en consolidación [cm³]	226,2

