# 7. VALORACIÓN DE RESULTADOS

## 7.1 Efecto de la granulometría

### *7.1.1 Consolidación isótropa*

Para observar el efecto de la granulometría en los parámetros estudiados, compararemos curvas de probetas con diferentes confinamientos y granulometrías, seleccionando una curva representativa para cada tipo de ensayo.

En las siguientes figuras (44 y 45) comparamos las curvas índice de poros – tensión media de Lambe e índice de poros (log) – tensión media de Lambe:

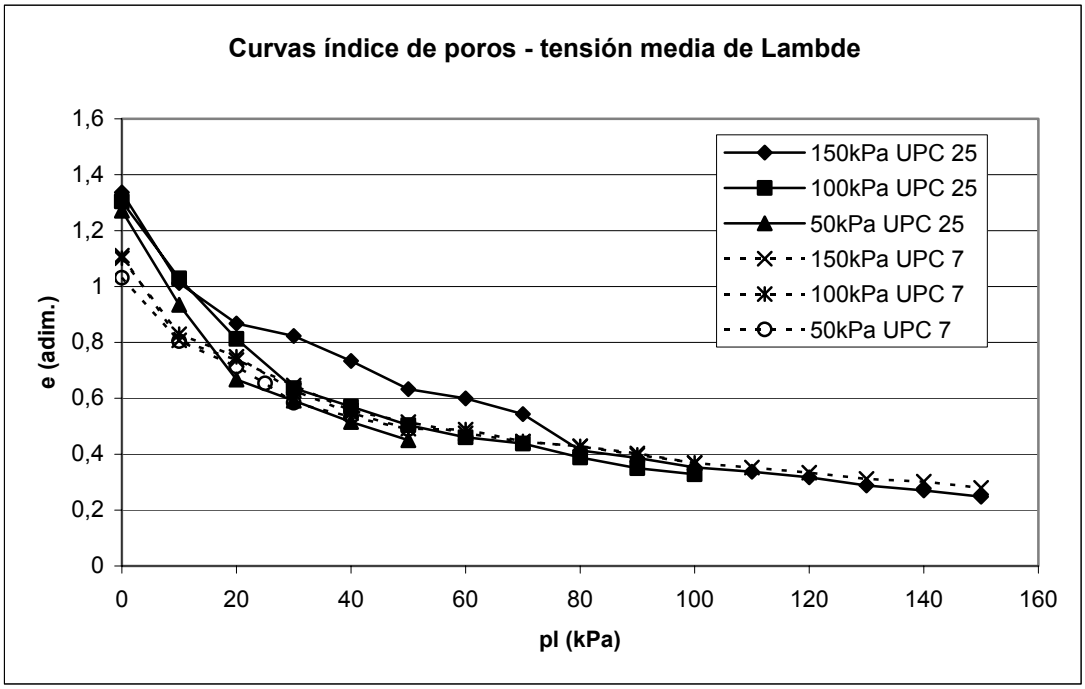


*Figura 44. Relación comparada entre índice de poros y tensión media de Lambe para diferentes granulometrías y confinamientos*

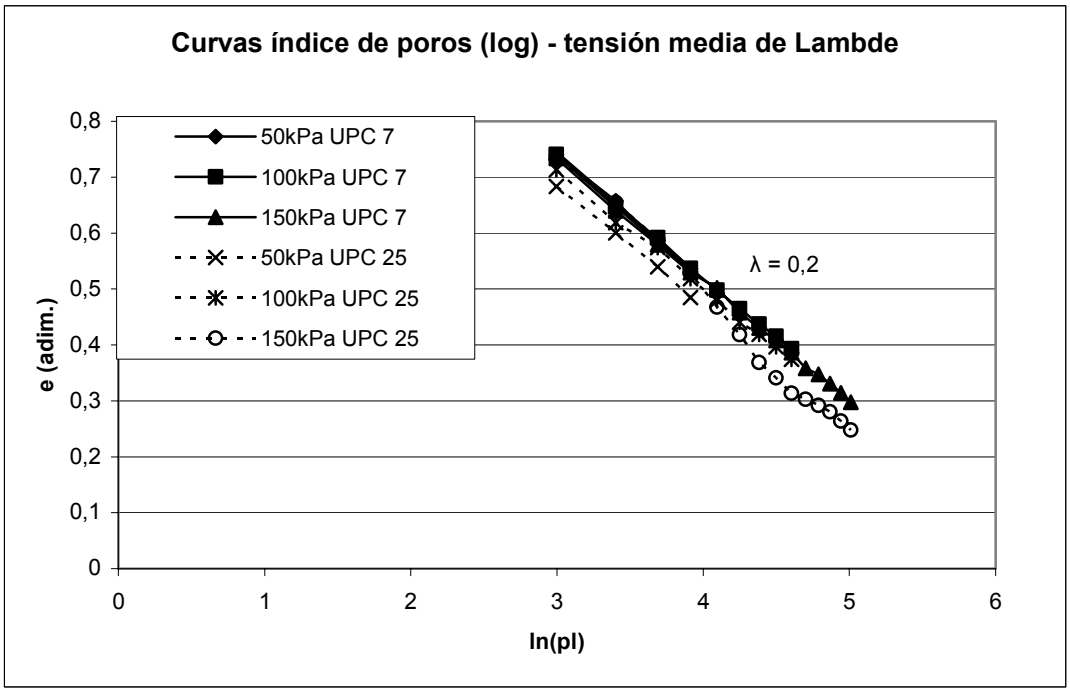


*Figura 45. Relación comparada entre el índice de poros (log) y la tensión mediad e Lambe para diferentes granulometrías y confinamientos*

Pese a partir de índices de poros diferentes según la granulometría, los índices de poros al finalizar las fases de consolidación isótropa son similares en todos los casos y se pueden englobar dentro de una única curva. Como ya apuntamos en el capítulo de resultados, estas curvas corresponden a valores de λ entre 0,21 y 0,22.

Por lo que respecta a la curvas que relacionan las deformaciones radiales y volumétricas con las deformaciones verticales durante la consolidación isótropa (figuras 46 y 47 respectivamente), la dispersión de los resultados hace difícil establecer conclusiones más allá de que los comportamientos, salvo en las etapas iniciales influenciadas por la penetración de la membrana, son lineales y con pendiente cercana a 1 lo que indica comportamiento isótropo.

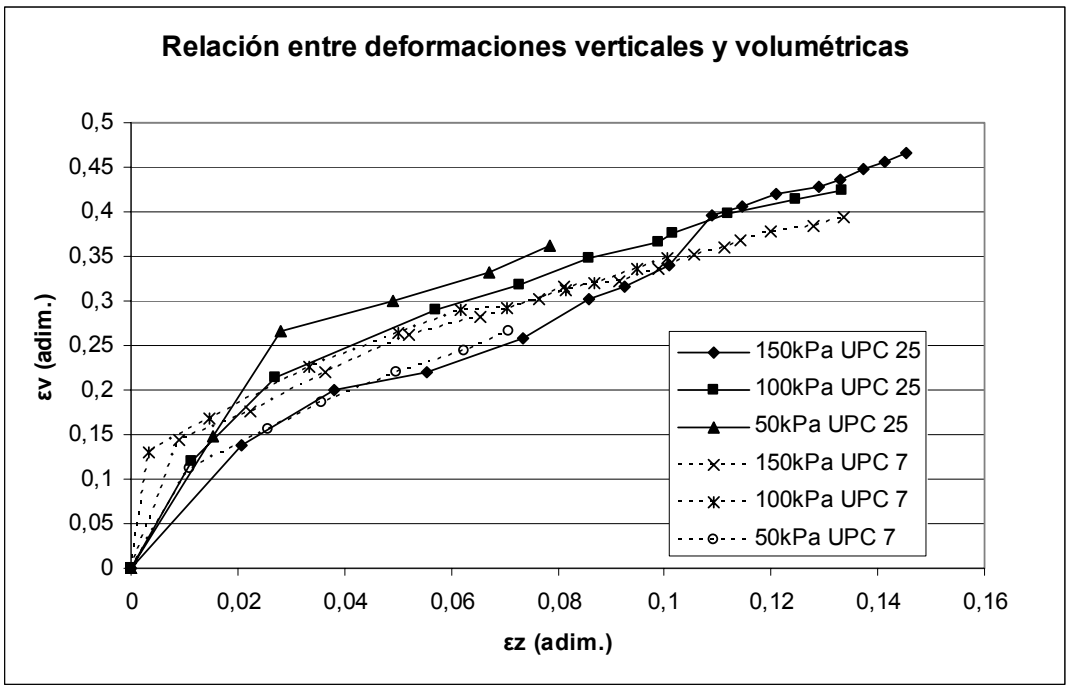


*Figura 46. Relación entre deformaciones volumétricas y verticales durante consolidación isótropa para diferentes granulometrías y confinamientos*

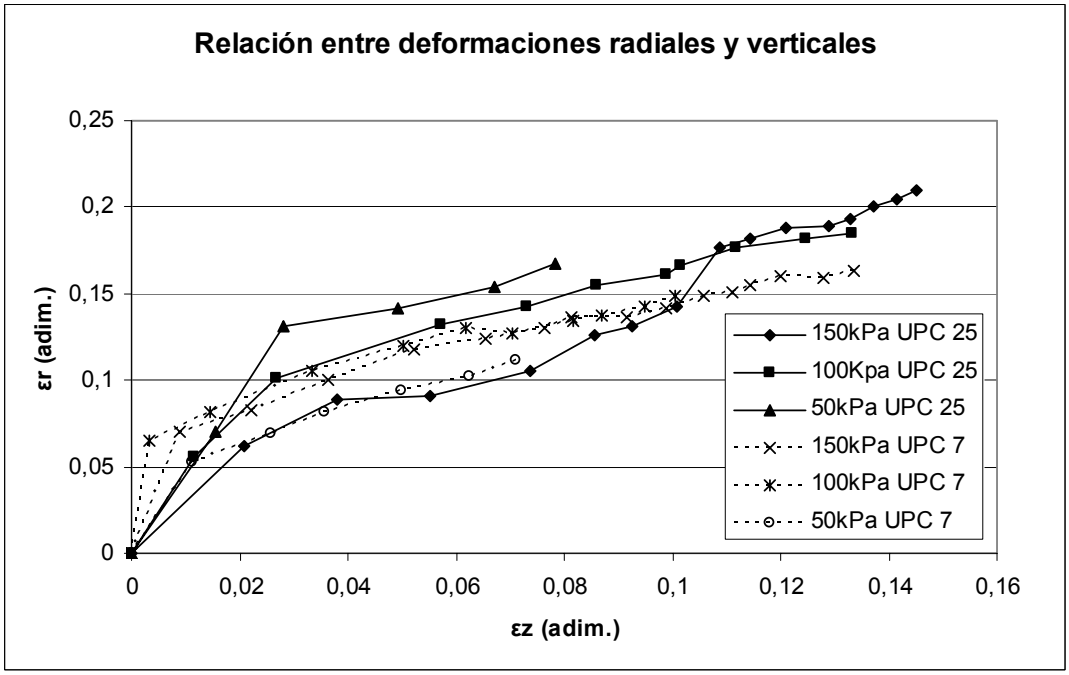


*Figura 47. Relación entre deformaciones radiales y verticales durante consolidación isótropa para diferentes granulometrías y confinamientos*

Donde si se observan ligeras diferencias de comportamiento entre granulometrías es en las curvas tensión media de Lambe – deformación vertical, donde cada granulometría sigue una curva patrón diferente (ver figura 48).

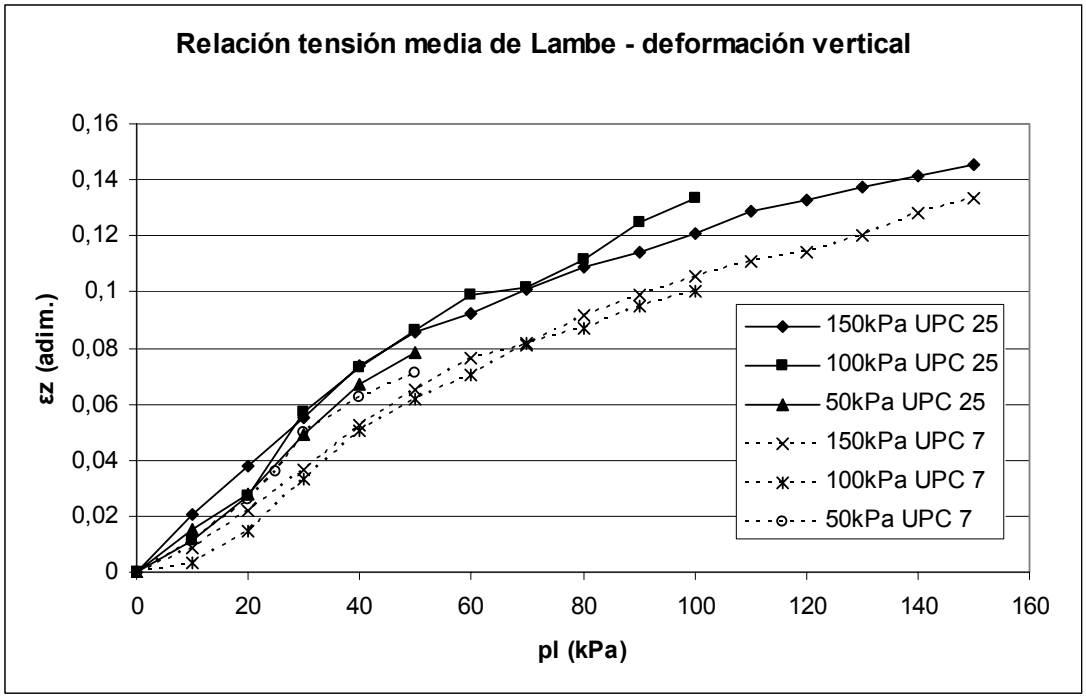


*Figura 48. Relación entre tensiones medias de Lambe y deformaciones verticales durante consolidación isótropa para diferentes granulometrías.*

### *7.1.2 Compresión confinada*

En las curvas que relacionan la tensión desviadora de Cambridge con las deformaciones verticales (ver figura 49) se observan diferencias entre las dos granulometrías, tal y como se puede ver a continuación. Las curvas sugieren que pese a ser el mismo material no presentan las mismas resistencias movilizadas para deformaciones impuestas (ver figura 50):

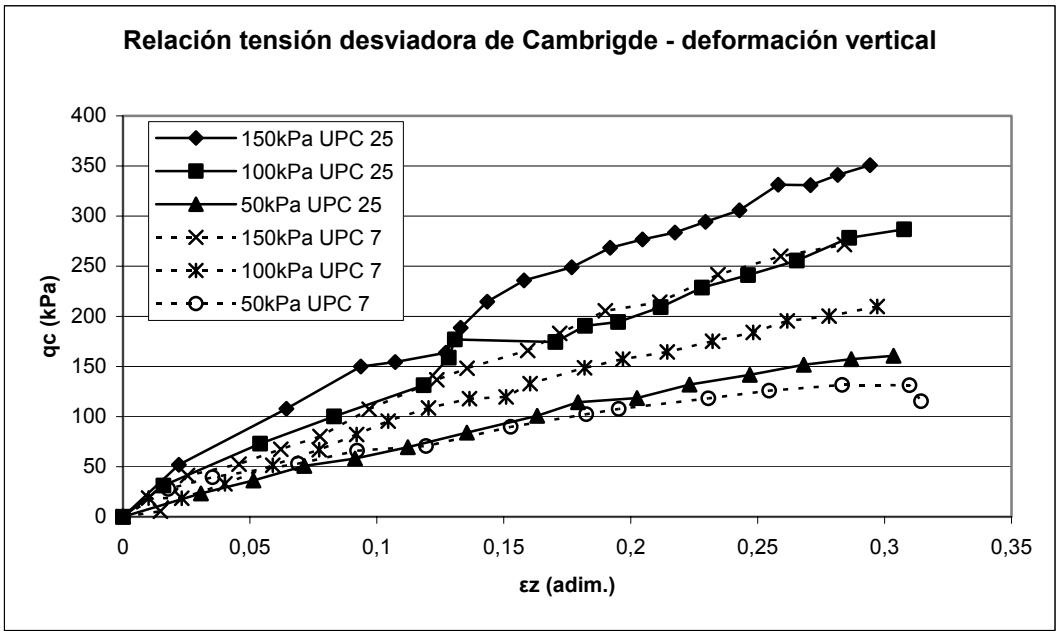


*Figura 49. Curvas qc-*ε*z* para ensayos de compresión a diferentes confinamientos para diferentes granulometrías

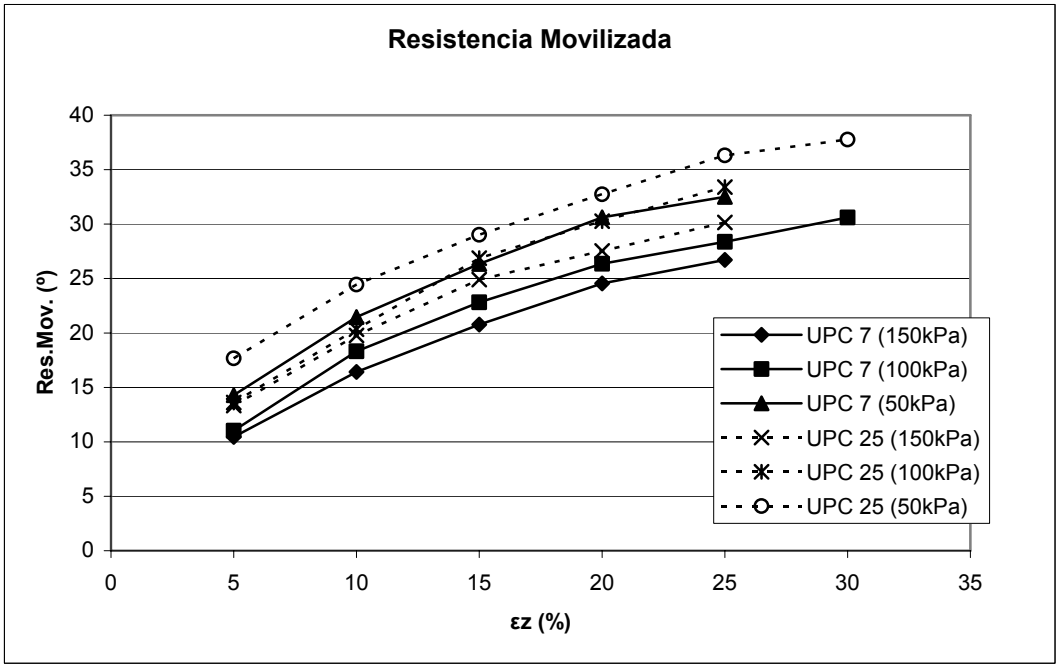


*Figura 50. Resistencias movilizadas para diferentes granulometrías y confinamientos*

Se puede decir pues, que aunque la diferencia de resistencias no es muy elevada entre granulometrías, el tamaño UPC 25 tiene de media 3 o 4 grados más de fricción interna que el tamaño UPC 7 a todos los niveles de deformación vertical.

### *7.1.3 Expansión lateral*

Por lo que respecta a los resultados de los ensayos de expansión lateral, las resistencias movilizadas son similares, independientemente del nivel de confinamiento de partida, tal y como se observa en la figura 51. Se observa la misma dispersión en los resultados para el tamaño UPC 25 que para el UPC 7 y al igual que para los resultados de compresión las diferencias entre ángulos de fricción interna no difiere en más de 2 o 3 grados a todos los niveles de deformación vertical.

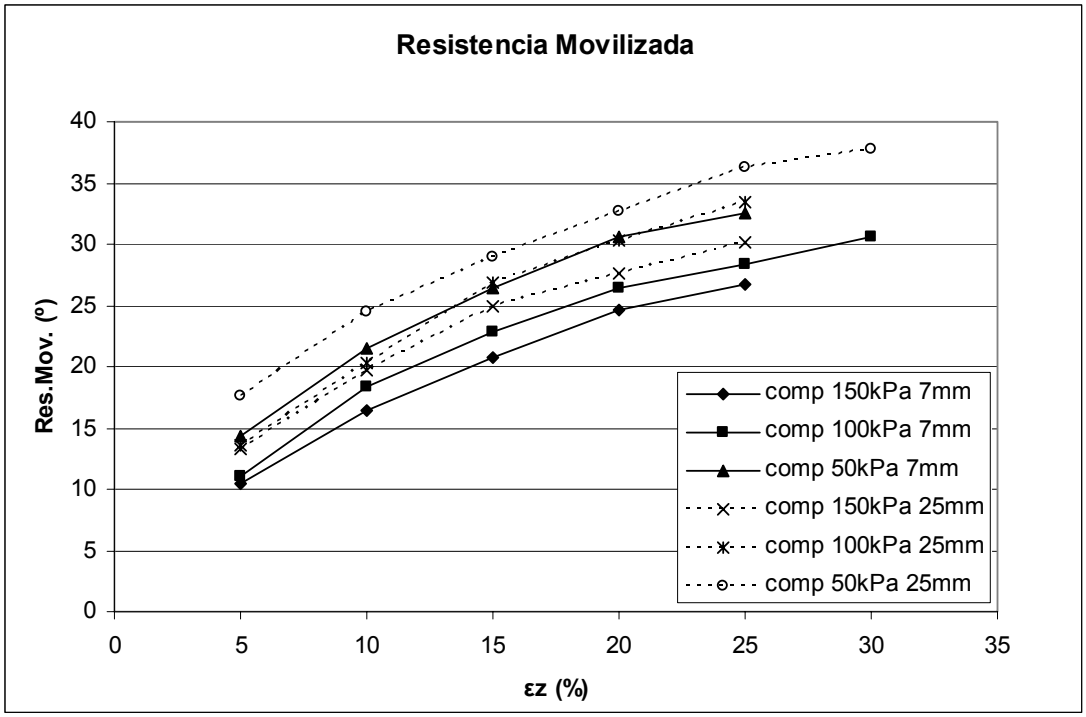


*Figura 51. Resistencias movilizadas en ensayos de expansión lateral para diferentes confinamientos iniciales y granulometrías*

En la figura 52 se pueden ver las trayectorias de tensiones de los ensayos.

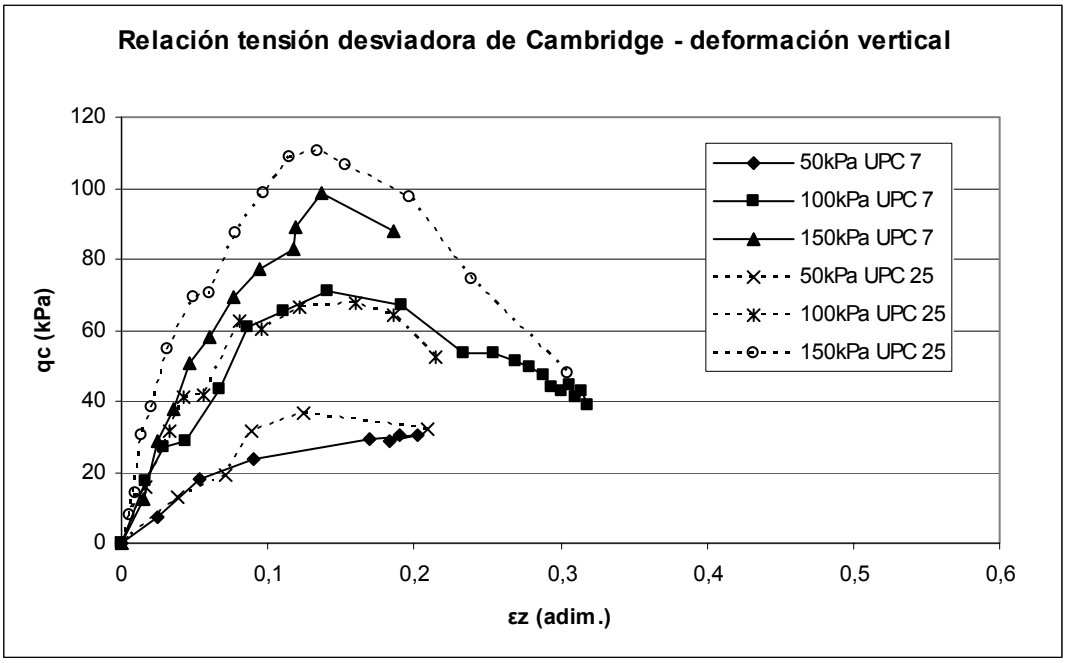


*Figura 52. Curvas tensión desviadora de Cambridge – deformación vertical durante la extensión lateral para diferentes granulometrías y confinamientos iniciales*

### *7.1.4 Módulos elásticos y de compresibilidad volumétrica*

Teniendo en cuenta los resultados expuestos en el capítulo 6 (tablas 6 y 7), podemos concluir que no hay diferencias significativas en los coeficientes qc/εz en las fases de descarga – recarga (asimilables a módulos elásticos de las probetas), salvo diferencias de 100-200kPa entre módulos atribuibles a errores propios de los ensayos.

Por lo que respecta a las relaciones pc/εv durantes las fases de descarga – recarga (asimilables a coeficientes de compresibilidad volumétricos), las diferencias no son más notables que para los módulos qc/εz (diferencias de 100-200kPa).

Se puede concluir por tanto que estas diferencias no son atribuibles al tamaño de las muestras que forman las probetas.

## 7.2 Efecto del confinamiento de las probetas

### *7.2.1 Consolidación isótropa*

Tal y como hemos comentado en el apartado 7.1.1, ni el confinamiento ni la granulometría tienen influencia en las curvas de consolidación del material, ya que se ajustan a una única curva patrón

### *7.2.2 Compresión confinada*

Retomando la figura 49, podemos observar claramente, tal y como era de esperar, que a mayores confinamientos las muestras son más rígidas, lo que se traduce en mayores ángulos de fricción y mayores resistencias movilizadas para un determinado nivel de deformaciones verticales.

A menores confinamientos menores son las tensiones desviadoras soportadas por las probetas, aunque mayores son las resistencias movilizadas, independientemente de la granulometría, tal y como se ve en la figura 53:

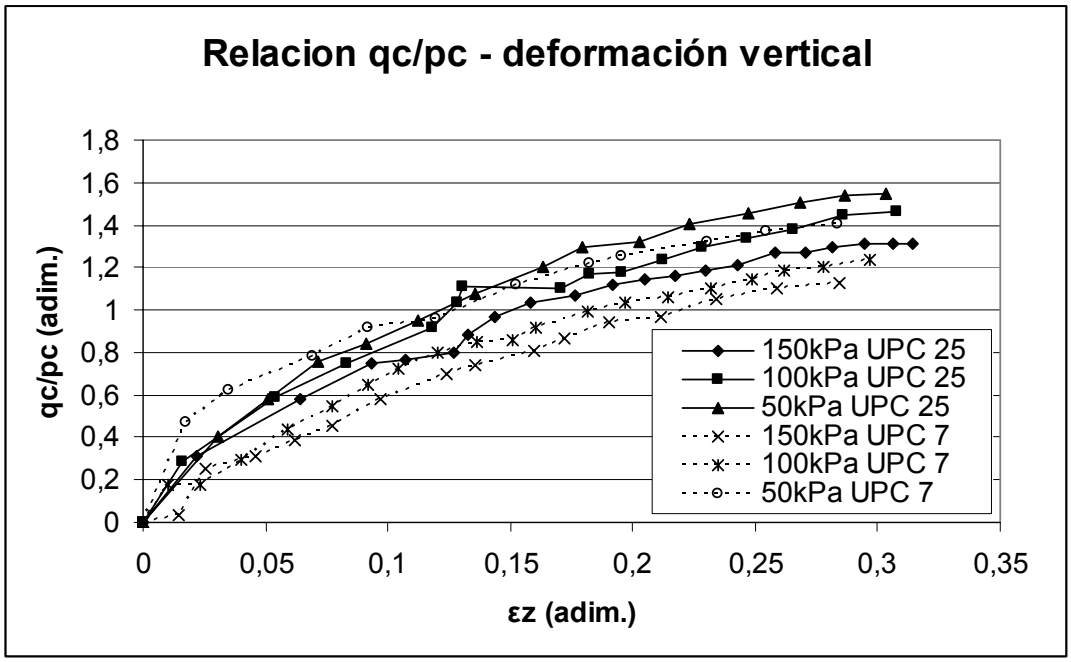


*Figura 53. Efecto del confinamiento en la relación qc/pc - εv*

Por lo que respecta al comportamiento de las probetas, éste siempre es de tipo dúctil y no se observa variación con el confinamiento, si bien para bajos confinamientos se intuyen asíntotas horizontales en las cargas que indican principio de rotura de las probetas.

### *7.2.3 Expansión lateral*

De la misma forma que para los ensayos de compresión, a menor confinamiento menores son las cargas soportadas. Para las resistencias movilizadas en cambio, a mayor confinamiento mayor ángulo de fricción para un determinado nivel de deformación vertical. Esta diferencia con los resultados de compresión (inversión del orden de las curvas de resistencia movilizada) se puede observar en las 54 y 55:

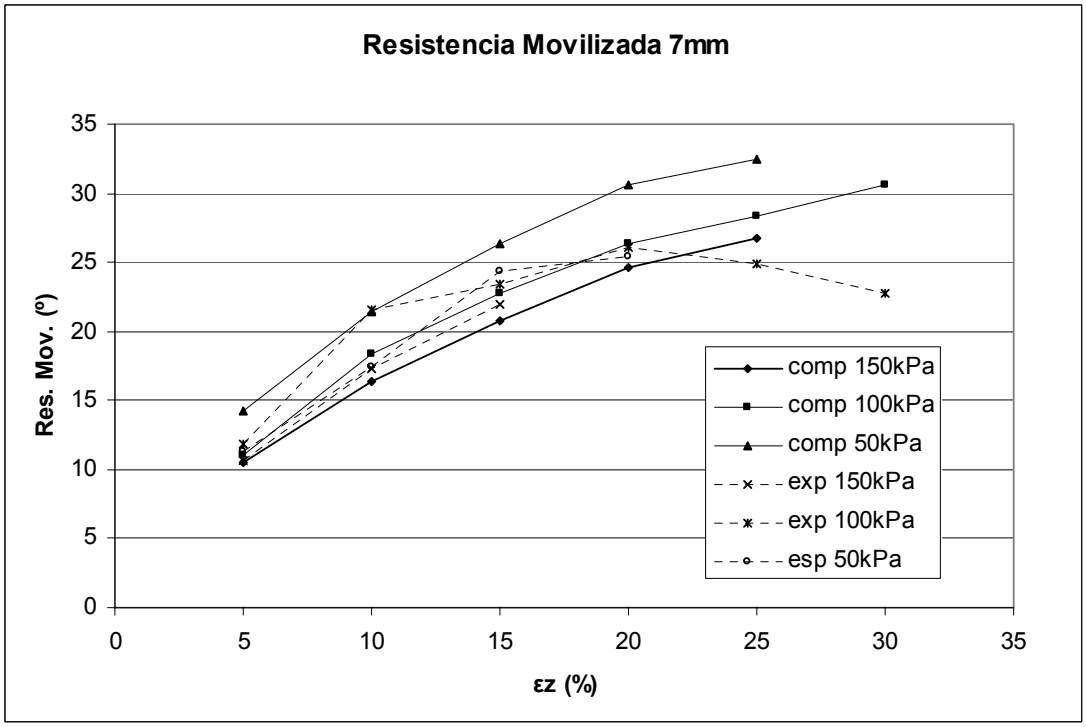


*Figura 54. Comparación entre resistencias movilizadas a compresión y a extensión lateral para UPC 7*

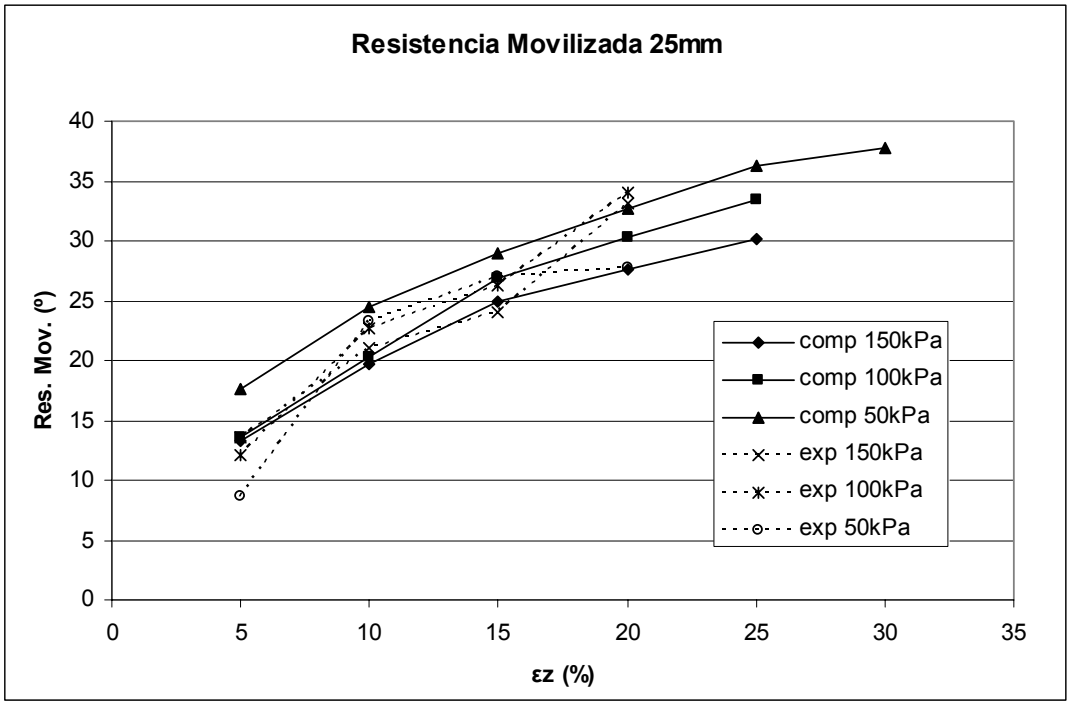


*Figura 55. Comparación entre resistencias movilizadas a compresión y a extensión lateral para UPC 25*

### *7.2.4 Módulos elásticos y de compresibilidad volumétrica*

En este apartado las diferencias de comportamiento con el confinamiento son muy evidentes. Tanto los módulos elásticos (qc/εz) como los de compresibilidad volumétrica (pc/εv) crecen rápidamente con el nivel de confinamiento (ver figuras 56 y 57).

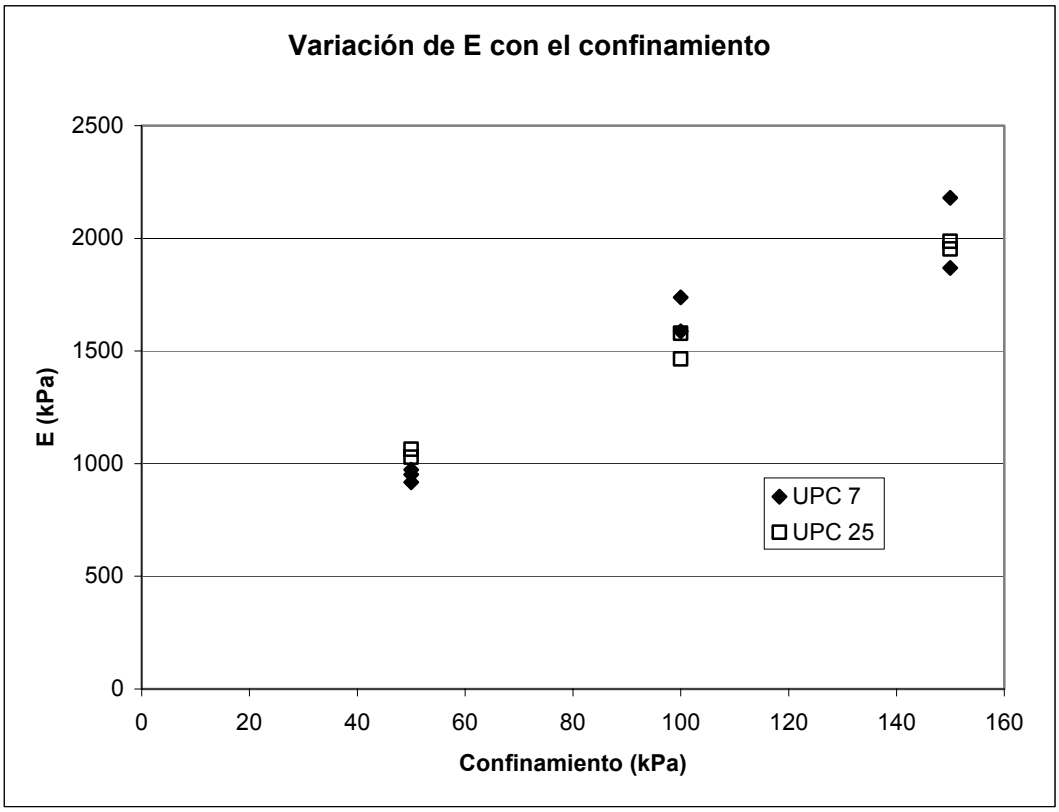


*Figura 56. Variación del módulo elástico con el nivel de confinamiento para UPC 7 y UPC 25*

Las diferencias observadas entre granulometrías, como ya hemos comentado, son producto de la dispersión de resultados y no de la granulometría en sí. Se puede observar una mayor dispersión de resultados cuando mayor es el confinamiento de las probetas.

La variación del coeficiente de compresibilidad volumétrica con el confinamiento puede verse en la figura 57.

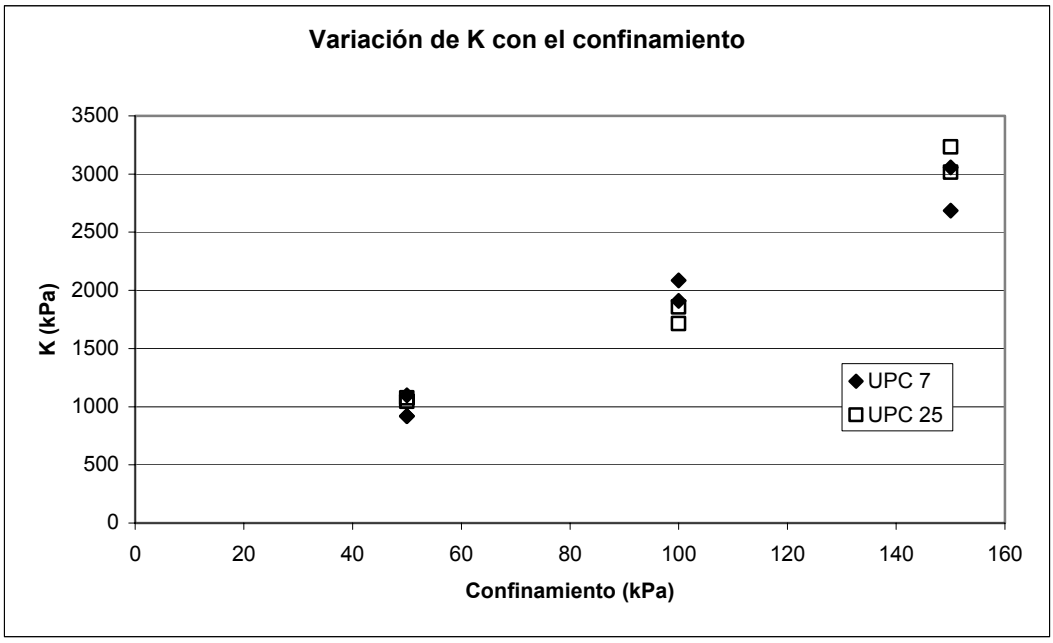


*Figura 57. Variación del coeficiente de compresibilidad volumétrico con el nivel de confinamiento para UPC 7 y UPC 25*

De la misma forma que para el módulo elástico, las diferencias entre granulometrías corresponden a la dispersión de resultados cuanto mayor es el confinamiento y no a diferencias de comportamiento. Las diferencias con el nivel de confinamiento, en cambio, son indiscutibles.

Ponderando los valores de K en función de los parámetros $R^2$ obtenidos en sus ajustes, y ajustando a su vez los valores obtenidos mediante una recta, tal y como sugiere el modelo Cam-Clay, obtenemos una relación lineal (ver figura 58) entre en confinamiento de la probeta y su coeficiente de compresibilidad volumétrica (o en todo caso la relación pc/εv)

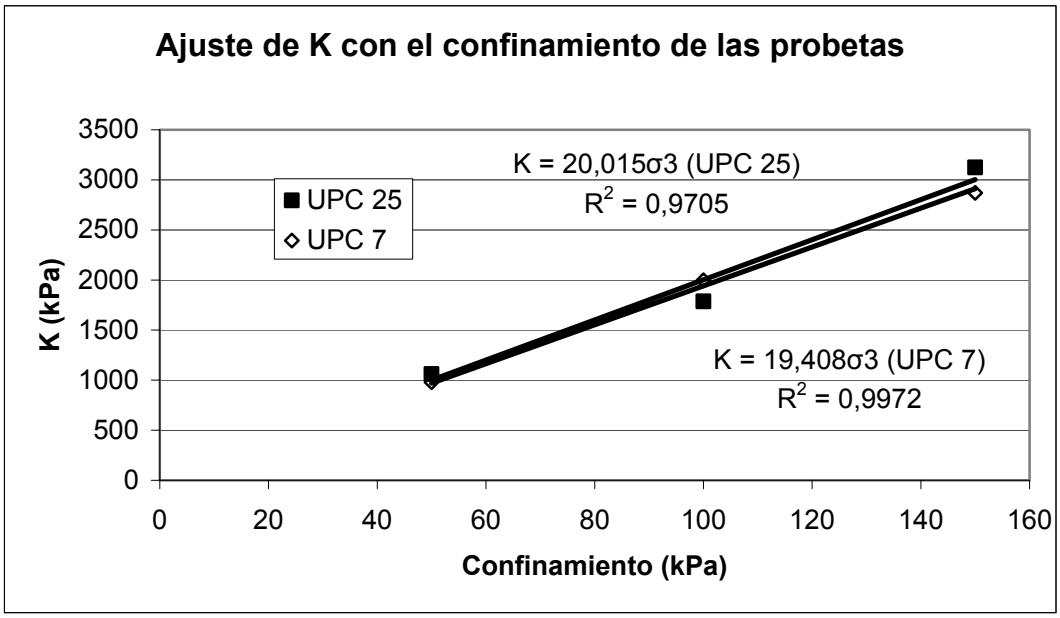


*Figura 58. Ajuste lineal entre el coeficiente K y el nivel de confinamiento para UPC 7 y UPC 25.*

En ambos casos obtenemos relaciones suficientemente buenas teniendo en cuenta la dispersión de resultados. Según nuestro análisis y suponiendo que ambas granulometrías se comportan de igual manera (dispersión debida a errores durante los ensayos), podemos establecer que:

$$K = 19{,}7\sigma_3$$ ($\sigma_3$ y K en kPa)

Del mismo modo podemos actuar para el módulo elástico, ajustando en este caso a una expresión proporcional a la raíz cuadrada del confinamiento, tal y como sucede en el caso de arenas. Una vez obtenidos los valores de E ponderados según el parámetro $R^2$ proveniente de su ajuste lineal, mediante mínimos cuadrados ajustaremos la relación a una expresión de tipo $E = cte\sqrt{\sigma_3}$ (ver figura 59).

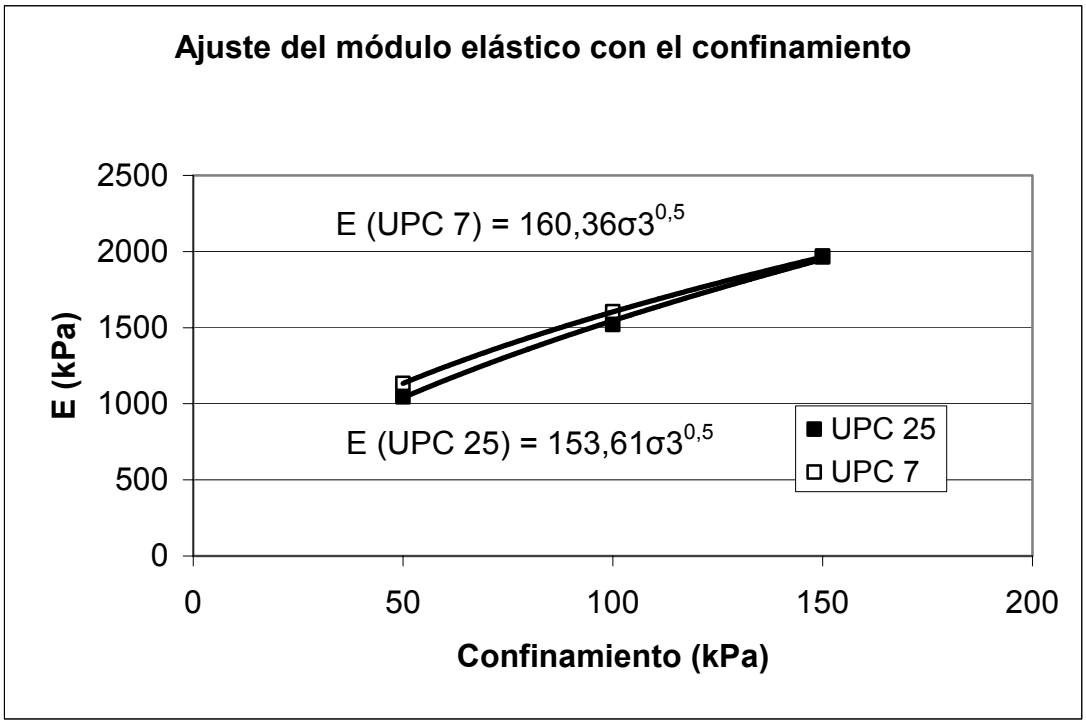


*Figura 59. Ajuste de la relación E - confinamiento para UPC 7 y UPC 25*

Podemos concluir que:

$E = 160{,}36\sqrt{\sigma_3}$ para UPC 7 ($\sigma_3$ y E en kPa)

$E = 153{,}61\sqrt{\sigma_3}$ para UPC 25 ($\sigma_3$ y E en kPa)

## 7.3 Efecto de la saturación de las probetas

### *7.3.1 Compresión confinada*

En el caso de probetas no saturadas solo podemos establecer comparación de resultados en el caso de compresión, ya que solo se realizaron ensayos no saturados para el tamaño UPC 7. En este caso hemos supuesto que las variaciones volumétricas y radiales se comportan de la misma forma que para las probetas saturadas, a fin de poder calcular las tensiones actuantes sobre las probetas ya que en los ensayos no saturados no podemos estimarlas con los procedimientos habituales (medida del volumen de agua entrante/saliente).

Relacionando las deformaciones verticales experimentadas por las probetas no saturadas con las deformaciones radiales experimentadas por las probetas saturadas, obtenemos una variación de área teórica suponiendo que este comportamiento no varía con la saturación. Utilizando estas áreas con las cargas aplicadas podemos conocer las tensiones experimentadas por las probetas para niveles de deformación vertical dados, y así obtener una curva de resistencias movilizadas (ver figura 60).

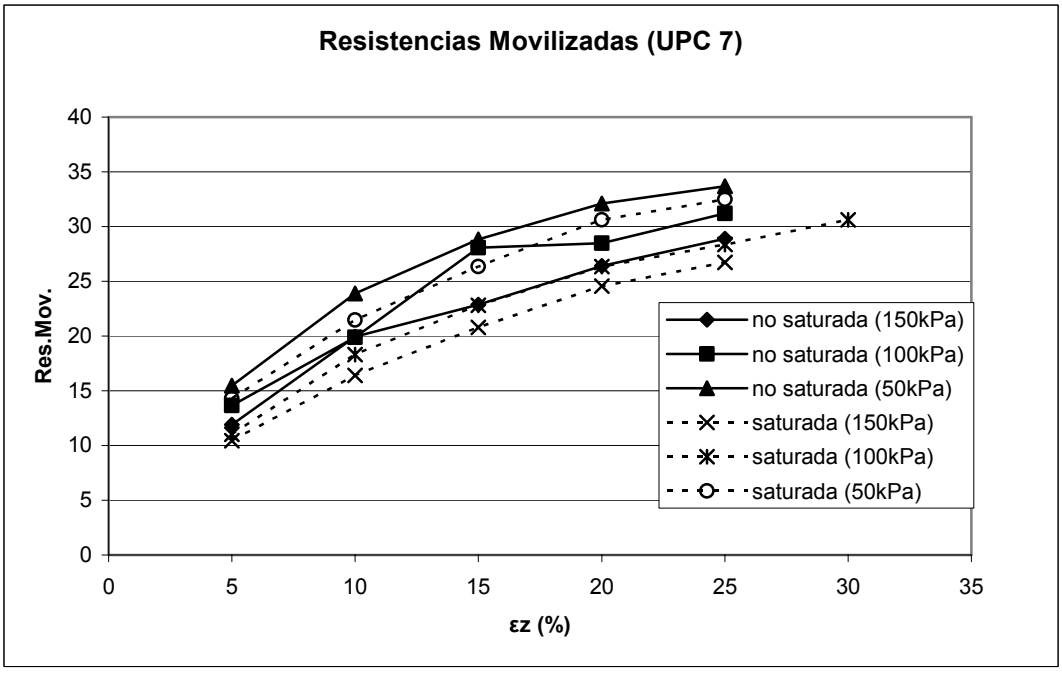


*Figura 60. Comparación de resistencias movilizadas entre probetas saturadas y no saturadas para UPC 7*

Tal y como sucedía para las probetas saturadas, a menor confinamiento menor carga soportada, pero comparativamente mayor ángulo de fricción interna. Las diferencias de comportamiento no son significativas si tenemos en cuenta que las dispersiones son parecidas a las obtenidas en ensayos saturados y que además, introducimos errores nuevos con la estimación del área de las probetas.

Así pues, podemos concluir que las diferencias de comportamiento son debidas a errores inherentes de los ensayos y las hipótesis más que al hecho de estar las probetas saturadas o no.

Las diferencias entre resistencias movilizadas de muestras secas o saturadas, para confinamientos y deformaciones verticales fijadas, se muestran el la tabla 10:

| $\sigma_3$ (kPa) | $\varepsilon_z$ (%) | $\Phi_{seco} - \Phi_{saturado}$ (º) | $\Delta\Phi_{media}$ (º) |
|---|---|---|---|
| 150 | 5 | 1,46 | 2,18 |
| | 10 | 3,47 | |
| | 15 | 2,03 | |
| | 20 | 1,8 | |
| | 25 | 2,16 | |
| 100 | 5 | 2,64 | 2,89 |
| | 10 | 1,57 | |
| | 15 | 5,27 | |
| | 20 | 2,13 | |
| | 25 | 2,83 | |
| 50 | 5 | 1,17 | 1,75 |
| | 10 | 2,43 | |
| | 15 | 2,49 | |
| | 20 | 1,49 | |
| | 25 | 1,18 | |

*Tabla 10. Diferencia entre resistencias movilizadas secas y saturadas*

## 7.4 Comparación de resultados con resultados de corte directo

En la figura 61 se muestran los resultados de los estudios de corte directo en NFU de M. Arroyo et al. (2007):

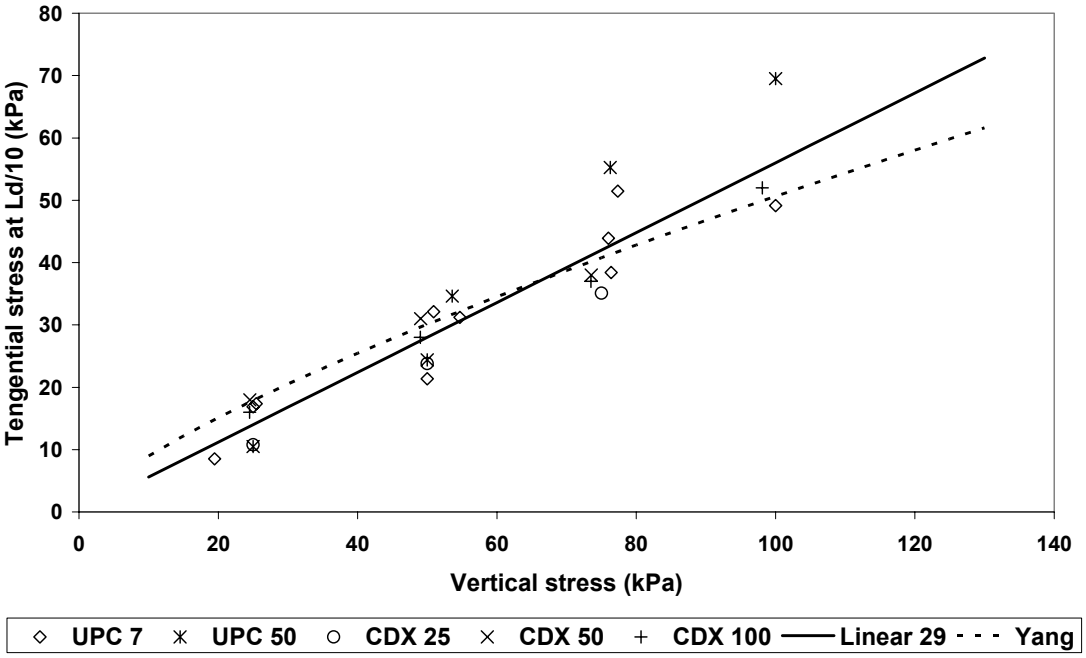


*Figura 61. Resultados de corte directo (M. Arroyo et al. 2007)*

Cabe destacar que en esta figura los autores han efectuado una comparación de sus resultados con los de Yang et al. (2002), si bien estos últimos se muestran por separado en la figura 62:

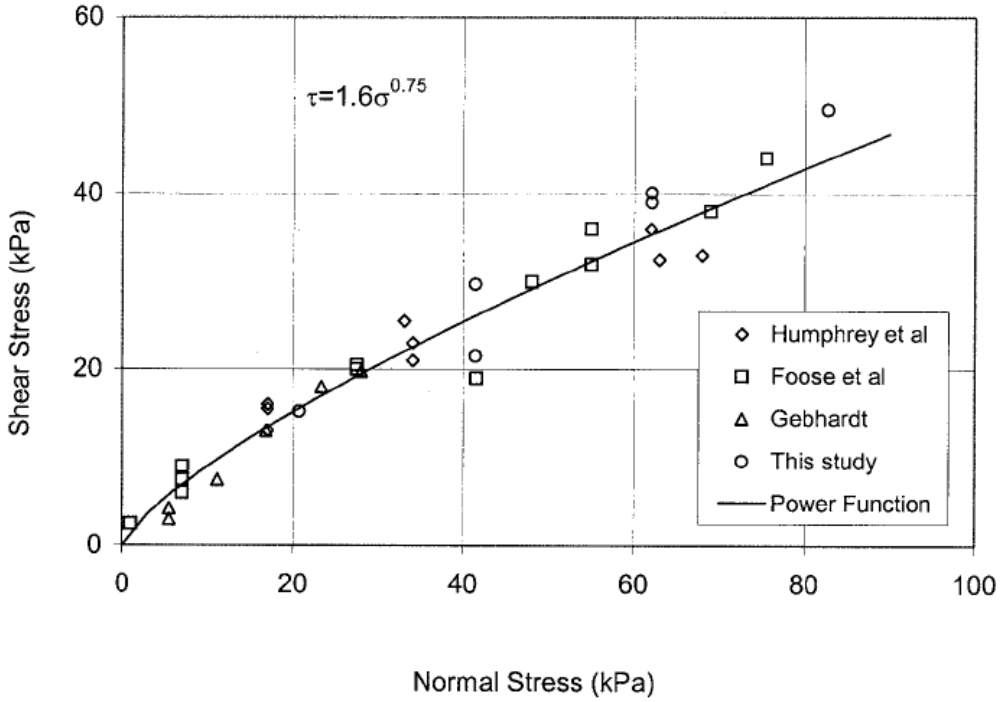


*Figura 62. Resultados de corte directo (Yang, 2002)*

De acuerdo con M. Arroyo et al (2006), el ángulo de fricción conjunto para los tamaños UPC y CDX es de 30º mientras que para Yang et al (2002), en el tramo aproximable a una recta es de unos 25º.

En el caso de nuestro estudio mediante el aparato triaxial, los ángulos obtenidos varían en función del grado de deformación vertical alcanzado por las probetas. Para deformaciones del 25% durante el desviador (máximas alcanzadas mediante el aparato) el valor del ángulo de fricción es de unos 30º.

## 7.5 Comparación de resultados triaxiales con otros estudios

A continuación mostramos las curvas tensión desviadora de Cambridge – deformación vertical obtenidas por R. Salgado et al. (1999) para ensayos de compresión simple en aparato triaxial (figura 63). En el estudio recalca el hecho de que las probetas, durante la fase de aplicación del esfuerzo desviador se deformaban un 10% verticalmente antes de empezar a hincharse (*bulging*).

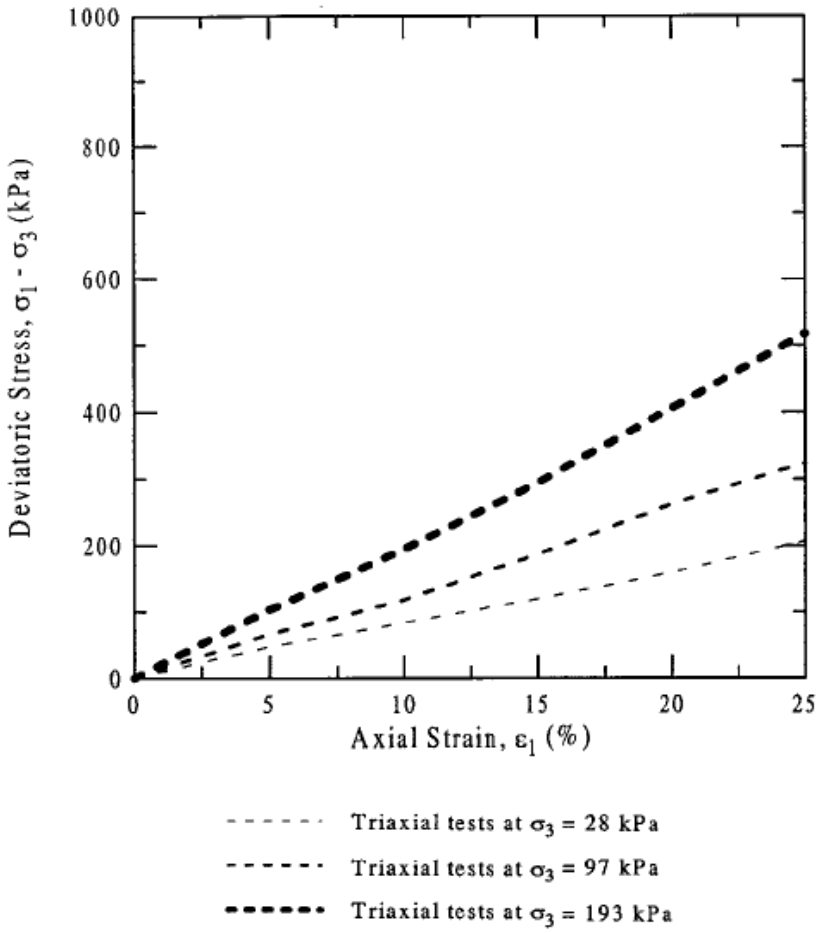


*Figura 63. Resultados tensión – deformación (R. Salgado 1999)*

En la figura 64 se puede ver que en el caso de las probetas confinadas a 97kPa (confinamiento similar al usado en algunos ensayos de este estudio, de 100kPa), las cargas así como el comportamiento en general de las probetas son similares a las obtenidas en el material UPC 25. En cuanto al hinchamiento de las probetas, en el tamaño UPC 25 se produce para aproximadamente un 5% de deformación vertical (durante la fase desviadora, la mitad que en la granulometría usada por R. Salgado et al., 1999)

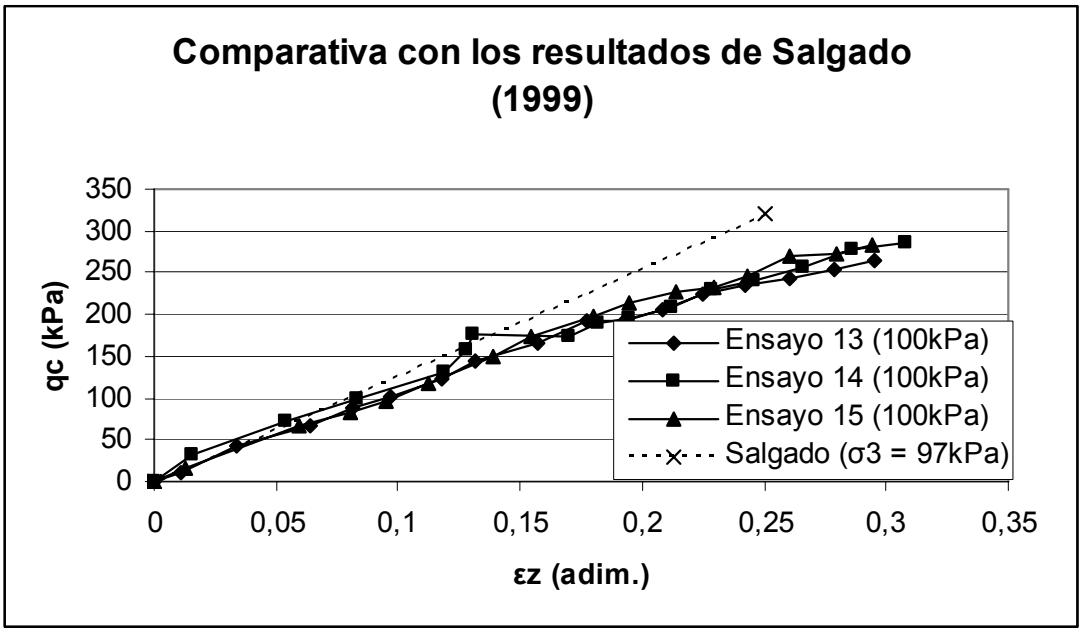


*Figura 64. Comparativa de las curvas qc/$\varepsilon_z$* del tamaño UPC con las de Salgado et al. (1999)

En cuanto a los resultados de extensión lateral, los resultados del estudio de Ewi Y. Wu et al.(1997) muestran una estabilización de las deformaciones verticales durante los ensayos, mientras que en este estudio se observa claramente una rotura de las probetas (comparar figuras 65 y 66). Los ángulos de fricción obtenidos en este estudio son inferiores a los obtenidos por Wu (57º frente a los 37º de este estudio).

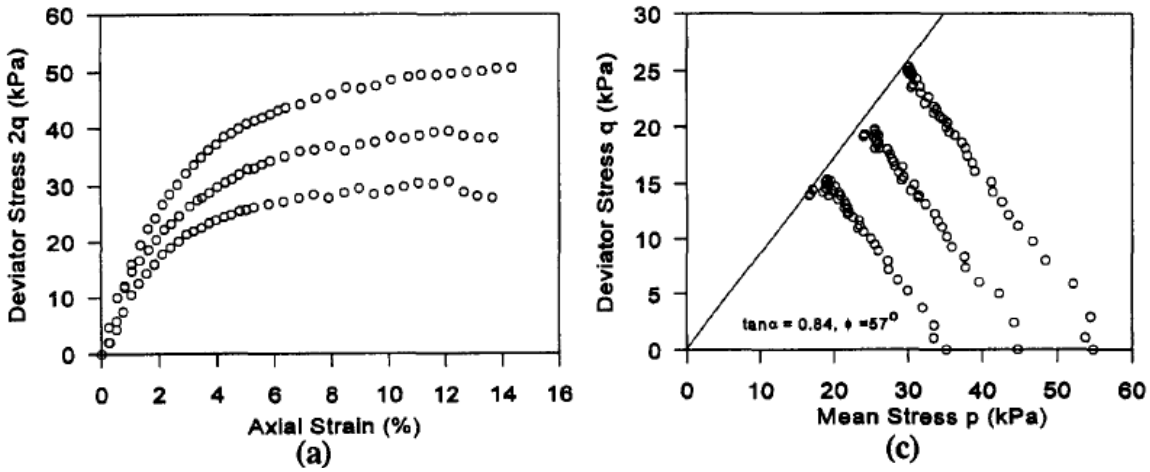


*Figura 65. Resultados tensión – deformación (Wu et al. 1997)*

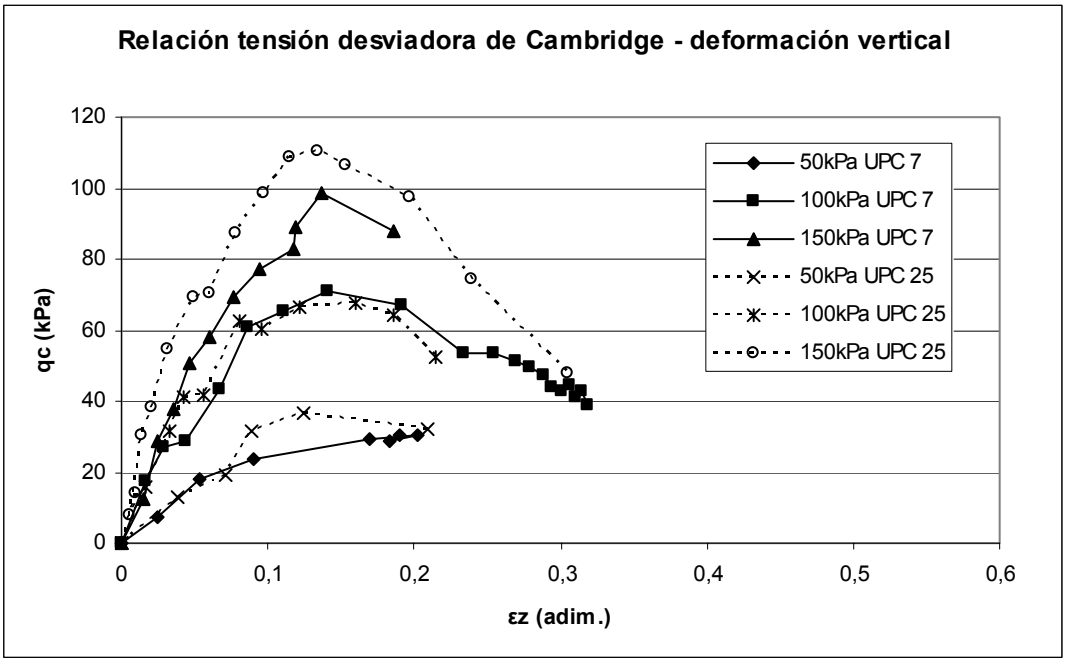


*Figura 66. Curvas tensión desviadora de Cambridge – deformación vertical para UPC 7 y UPC 25 en ensayos de extensión lateral*

En cuanto a los estudios de Yang et al. (2002), recogen los resultados de resistencias movilizadas de los ensayos de Brenda (1995), con granulometrías similares a las de este estudio (19mm, 9,5mm) y confinamientos de 35kPa y 55kPa (ver tabla 11).

| Author | Maximum size (mm) | Unit weight ($kN/m^3$) | Confining pressure (kPa) | Failure criterion and shear strength | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 10% strain | | 20% strain | | Maximum | | NA | |
| | | | | c (kPa) | ϕ | c (kPa) | ϕ | c (kPa) | ϕ | c (kPa) | ϕ |
| Benda (1995) | 38 | 5.89 | 35-55 | 0 | 21.1 | 0 | 35.5 | | | | |
| | 19 | 5.62 | 35-55 | 0 | 21.4 | 0 | 34.1 | | | | |
| | 9.5 | 4.95 | 35-55 | 0 | 17.2 | 0 | 31.2 | | | | |
| | 9.5 | 5.88 | 35-55 | 0 | 20.6 | 0 | 32.1 | | | | |
| | 2 | 5.23 | 35-55 | 0 | 25.8 | 0 | 36 | | | | |
| Ahmed (1993) | 13 | 6.19 | 36-199 | 22.7 | 11.2 | 35.8 | 20.5 | | | | |
| | 25 | 6.32 | 31-199 | 25.4 | 12.6 | 37.3 | 22.7 | | | | |
| | 25 | 6.42 | 32-307 | 22.1 | 14.6 | 33.2 | 25.3 | | | | |
| | 25 | 6.75 | 32-199 | 24.6 | 14.3 | 39.2 | 24.7 | | | | |
| Masad et al. (1996) | 4.75 | 6.24 | 150-350 | 70 | 6 | 82 | 15 | | | | |
| Wu et al. (1997) | 38 | 5.89 | 35-55 | | | | | 0 | 57 | | |
| | 19 | 5.62 | 35-55 | | | | | 0 | 54 | | |
| | 9.5 | 4.95 | 35-55 | | | | | 0 | 60 | | |
| | 9.5 | 5.88 | 35-55 | | | | | 0 | 47 | | |
| | 2 | 5.23 | 35-55 | | | | | 0 | 45 | | |
| Bressette (1984) | 51 | 5.98 | NA | | | | | | | 25.9 | 21 |
| Lee et al. (1999) | 51 | 5.96 | NA | | | | | | | 31.6 | 14 |
| | 30 | 6.3 | 28-193 | | | | | | | 7.6 | 21 |
| This study | 10 | 5.73 | 23.4-84.1 | 21.6 | 11.0 | 37.7 | 18.8 | | | | |

*Tabla 11. Resumen de resultados obtenidos por Yang et al. (2002)*

Como se puede ver en la tabla anterior, las resistencias movilizadas para tamaños de 9,5mm son de 17-20º para un 10% de deformación vertical y de 31-32º para un 20%, similares a los 18º y 27º obtenidos en este estudio para UPC7. En cuanto al tamaño de 19mm, los resultados de Brenda (1995) son similares a los de este estudio (UPC 25): 21,4º al 10% frente a 22º y 34,1º al 20% frente a 33º.

Los resultados de Yang (2002) dan un valor del ángulo de fricción de 37º, superiores a los de este estudio (30%).