



CAPITULO 5

MODELO CONSTITUTIVO A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO EDMÉTRICO

5.1 Análisis de los resultados del ensayo

El objetivo de los ensayos edométricos realizados a las muestras disgregadas S1TP1 y S1TP10 ha sido evaluar la velocidad del proceso de compactación de la sal desde el momento que es vertida a la escombrera en forma de material granular suelto hasta la actualidad y predecir de esta manera la compactación que sufrirá en años futuros. La velocidad del proceso de compactación en presencia de salmuera según Spiers (1990); Olivella (1992); Chumbe (1996), depende de:

- El índice de poros
- La magnitud de la tensión aplicada
- Tamaño de los granos de sal de la muestra

Respecto al tamaño de granos de la sal, se encontró un tamaño medio y constante de grano (véase Anejo 1), para el intervalo de deformación en el tiempo estudiado. Así que, la velocidad del proceso de compactación dependerá básicamente de los otros dos parámetros, anteriormente mencionados.



5.2 Modelo Constitutivo del proceso de compactación del material salino

Se presenta un modelo constitutivo para la compactación de la sal. Un modelo constitutivo para la deformación que sufre un material cuando le es aplicado una carga y que será comparado con los resultados del ensayo edométrico realizado en el laboratorio. Este modelo que se presenta a continuación se centra en la deformación a lo largo del tiempo, debido a que el material salino es un material de carácter dúctil, permitiendo deformaciones prolongadas.

En general puede escribirse esta relación de velocidad de cambio de índice de poros ($\partial e / \partial t$) de la siguiente forma, Chumbe (1996):

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{creep} = A\phi^\beta \sigma^\alpha e^\gamma \quad (5.1)$$

Siendo:

e = Índice de poros
 ϕ = Tamaño de grano
 σ = Tensión aplicada
 A, α, β, γ = Parámetros

Si se introduce una parte elástica entonces, nos quedaría de la siguiente forma:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{total} = \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{elastica} + \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{viscoplastico} \quad (5.2)$$

El objetivo de los ensayos ha sido el de obtener estos parámetros a partir de las curvas asiento-tiempo a fin de poder evaluar la velocidad de compactación, y por tanto, el aumento de resistencia de la sal en la escombrera.

En la Tabla 5.1 se recogen los parámetros resultantes A, α, β, γ , del ajuste entre los valores de índice de porosidad medidos experimentalmente y los estimados teóricamente según las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = A\phi^\beta \sigma^\alpha e^\gamma \quad e(t) = e_{t=0} - C_c \log_{10} \frac{\sigma(t)}{\sigma_{t=0}} + \int_0^t \frac{\partial e}{\partial \tau} d\tau \quad (5.3)$$

En la misma Tabla 5.1, también se recogen los parámetros A, α, β, γ obtenidos en la tesis doctoral de D. Chumbe.



	C_c	$A\phi^\beta$	α	γ
S1TP1	0,04	$6,99 \cdot 10^{-6}$	1,00	6,00
S1TP10	0,04	$2,05 \cdot 10^{-3}$	2,64	5,65
D. Chumbe (1996)	-	$1,85 \cdot 10^{-5}$	1,35	4,09

Tabla 5.1.- Valores de los parámetros para el cálculo de los cambios del índice de poros.

El índice de poros cambia en relación al tiempo con una velocidad que es proporcional a e^γ , con valores de γ entre (4-6), proporcional a σ^α con valores de α entre (1-2,64), y proporcional a ϕ^β con valores de β entre (-3 y 3).

Referente a los valores de los parámetros resultantes α y γ , vemos que son de valor similar en los tres casos, dando lugar a velocidades del cambio del índice de poros del orden de 10^{-7} a 10^{-8} (s^{-1}). Referente al término $A\phi^\beta$, existen valores más dispares, esto puede ser debido a los cambios en la granulometría de la sal debido al proceso de compactación y la posterior deformación sufrida ya que la variación del índice de poros varía linealmente con el diámetro de grano (Chumbe, 1996), de manera que el parámetro β alcanza valores diferentes entre -3 y 3. Por otra parte, el diferente contenido de material insoluble puede también afectar a los valores de estos parámetros.

En la Figura 5.1 y 5.2 se muestran los valores medidos en el laboratorio y los valores modelados según el modelo constitutivo para las muestras salinas S1TP1 y S1TP10 respectivamente, utilizando los parámetros obtenidos en la Tabla 5.1.

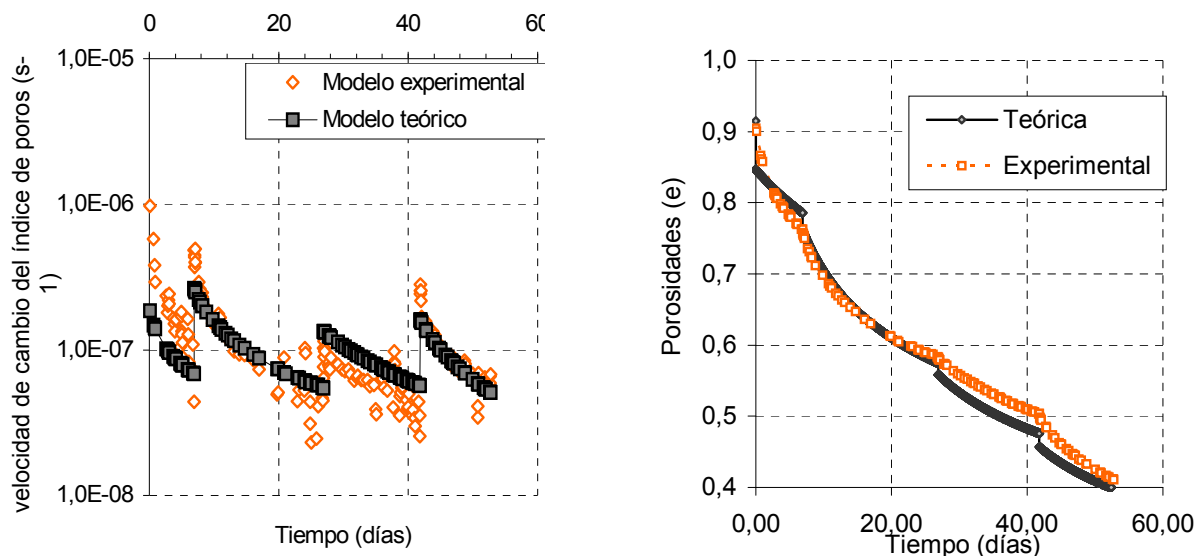


Figura 5.1.- Comparación entre los valores medidos y las predicciones del modelo para la muestras S1TP1.

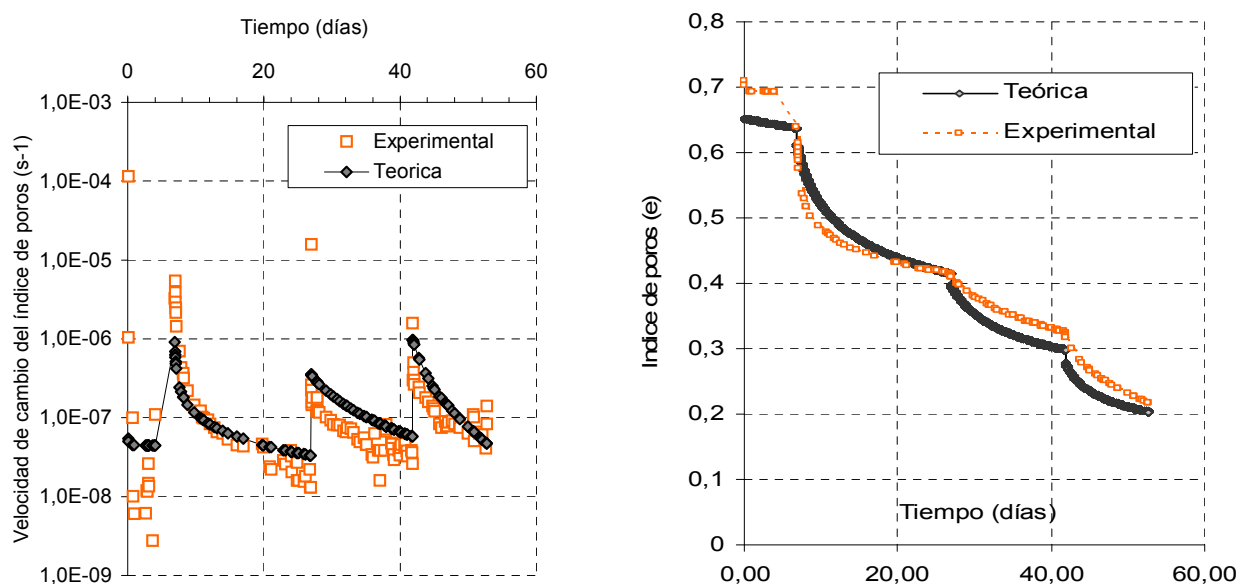


Figura 5.2.- Comparación entre los valores medidos y las predicciones del modelo para las muestra S1TP10.

Gracias al modelo constitutivo se conoce la evolución del índice de poros que permite estimar la porosidad en la escombrera transcurrido un cierto tiempo desde que se depositó la sal. En la Figura 5.3 se muestran las simulaciones de la evolución de la porosidad para varias profundidades (20m, 50m, 100 m, 140 m) de la escombrera considerando cada uno de los dos modelos derivados de los parámetros obtenidos en cada uno de los ensayos. Hay que señalar que en esta modelación se ha supuesto que en el origen de la escala de tiempos se aplica una carga que es la



correspondiente al peso propio de la escombrera a cada profundidad y que a partir de ese instante esa carga se mantiene constante. Esta simplificación puede alterar los resultados correspondientes a los tiempos cortos durante la construcción de la escombrera.

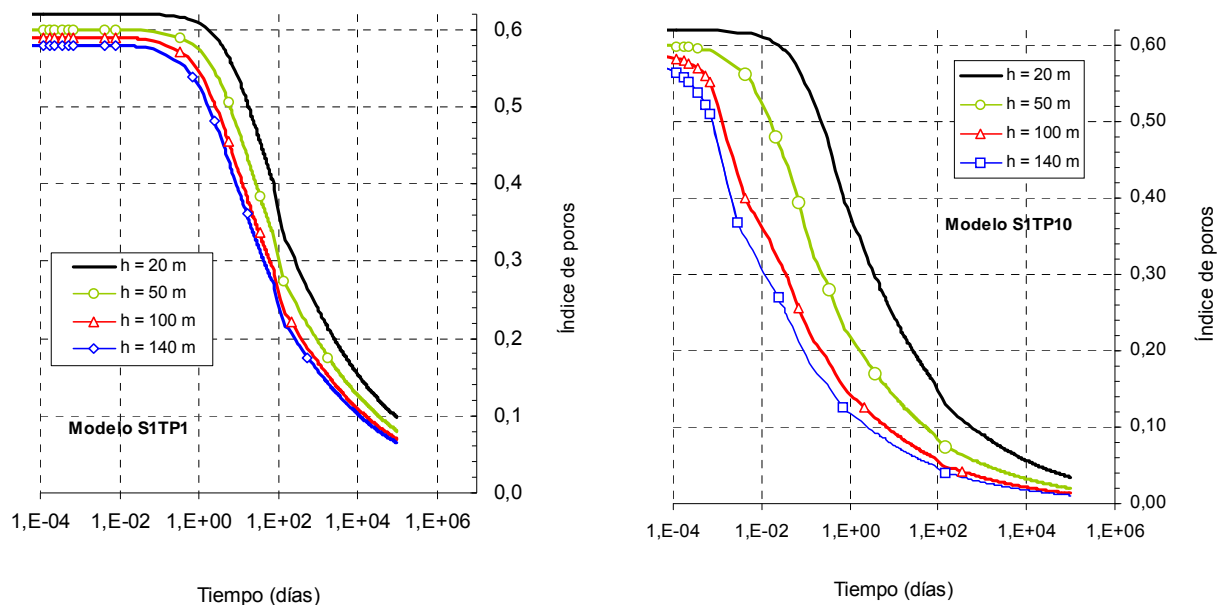


Figura 5.3.- Evolución calculada del índice de poros para las cargas correspondientes a varias profundidades, utilizando los parámetros obtenidos de los dos ensayos edométricos realizados.

En la Figura 5.4 se dibuja la porosidad en función de la profundidad, vemos que las porosidades se encuentran concentradas entre valores de 0,07 a 0,17 principalmente, siguiendo las mismas tendencias que las porosidades calculadas al cabo de 1000 días con los modelos mencionados.

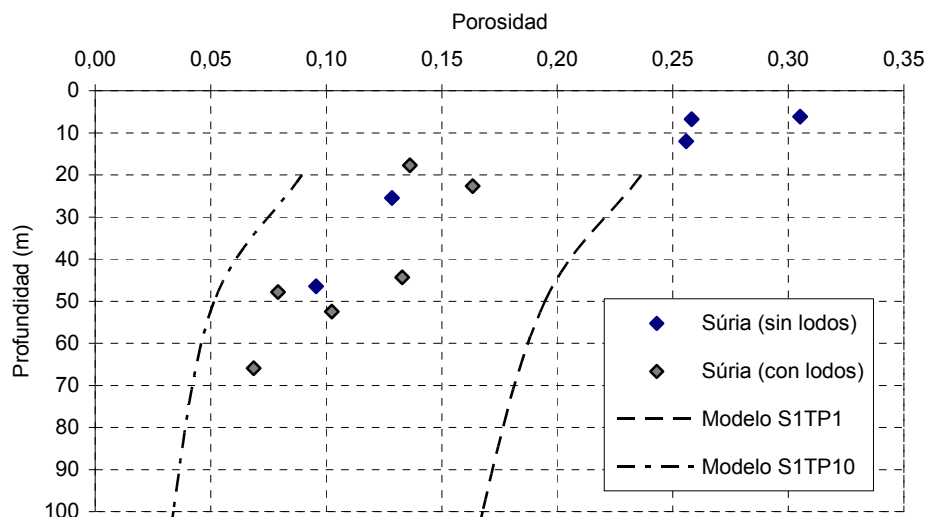


Figura 5.4.- Perfil de porosidades medidas y calculadas utilizando los parámetros obtenidos en los ensayos edométricos .

A partir de la evolución de las porosidades y utilizando la correlación entre la porosidad y la resistencia mostrada en la Figura 4.31 puede estimarse la evolución de la resistencia con el tiempo para diversas condiciones de confinamiento. La muestra S1TP1 correspondería al modelo más desfavorable ya que para un mismo tiempo la resistencia a compresión simple es menor que para el caso de la muestra S1TP10. De esta manera se puede observar en la Figura 5.5 que para un tiempo de 100 días a 20 m de profundidad con el modelo más desfavorable la resistencia a la compresión simple es de 3 MPa. Con el modelo más favorable para un tiempo de 100 días a 20 m de profundidad la resistencia a la compresión simple es de 12 MPa.

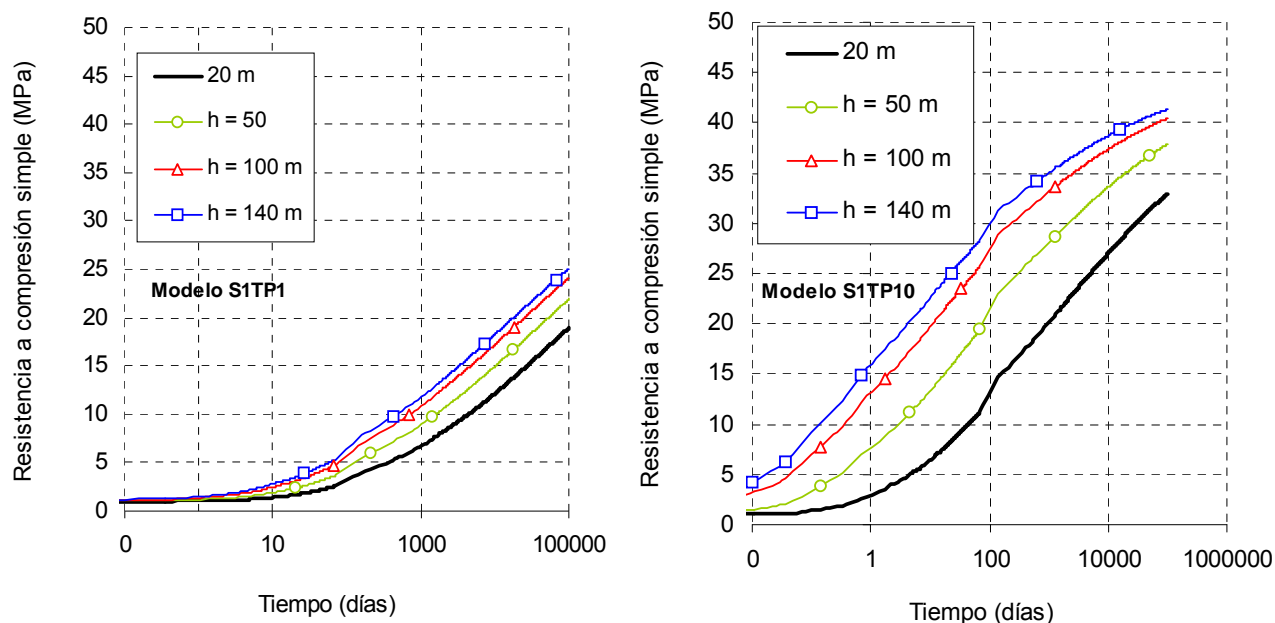


Figura 5.5.- Evolución de la resistencia a compresión simple a varias profundidades según los modelos derivados de la evolución de la porosidad en los ensayos edométricos.

5.3 Modelo de la permeabilidad del material

Se presenta un modelo para modelar la permeabilidad de la sal en función del índice de poros. Un modelo realizado a partir de las permeabilidades obtenidas mediante los ensayos de permeabilidad efectuados antes y después del ensayo edométrico.

En general puede escribirse esta relación permeabilidad–índice de poros de la siguiente forma:

$$K = Ae^k \quad (5.4)$$

Siendo:

K = Permeabilidad (cm/s)
A, k = Parámetros
e = Índice de poros

Este modelo nos da como resultado los diferentes valores que adopta la permeabilidad a lo largo del ensayo edométrico.



En la Tabla 5.2 se recogen los parámetros resultantes A y k del ajuste entre el valor inicial de la permeabilidad y el valor final de la misma.

	A	k
S1TP1	$2,55 \cdot 10^{-8}$	2,32
S1TP10	$2,61 \cdot 10^{-7}$	2,55

Tabla 5.2.- Valores de los parámetros para el cálculo de la permeabilidad.

La permeabilidad cambia en relación al tiempo y es proporcional a e^k con valores de k entre (2,32-2,55).

El valor de parámetro k, vemos que son similares en los dos casos, muestra (S1TP1 y S1TP10), dando lugar a permeabilidades del orden de 10^{-4} a 10^{-6} (cm/s).

En las Figuras 5.6 y 5.7 se muestran las gráficas resultantes según el modelo para las muestras salinas S1TP1 y S1TP10 respectivamente, utilizando los parámetros obtenidos en la Tabla 5.2.

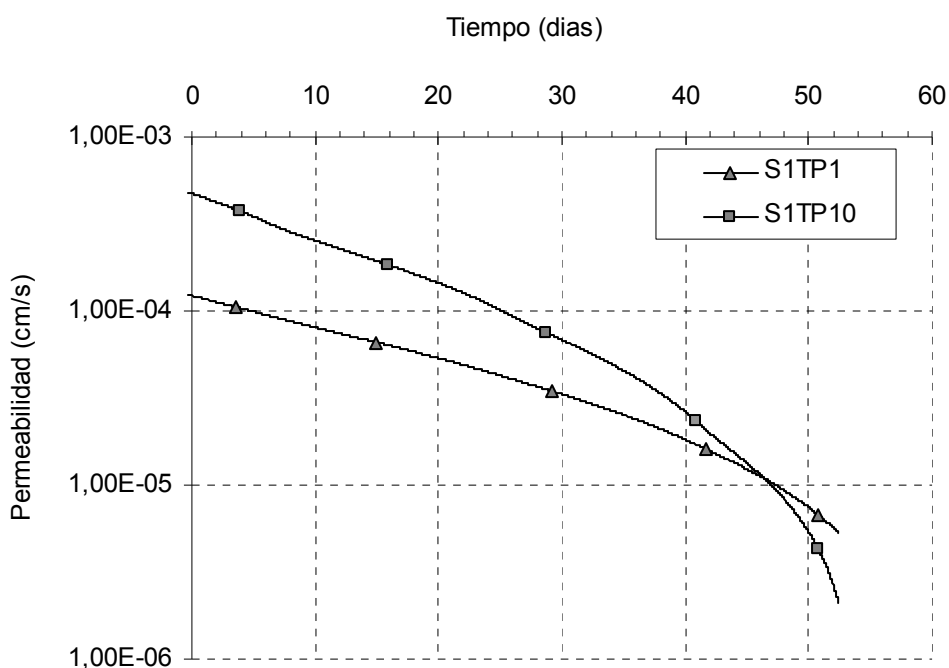


Figura 5.6.- Relación de las permeabilidades en función del tiempo para las muestras S1TP1 y S1TP10.

En la Figura 5.6 vemos como tanto para la muestra S1TP1 y S1TP10, la permeabilidad disminuye progresivamente con el tiempo, variando de valores de 10^{-3} a 10^{-6} cm/s al final del ensayo edométrico.

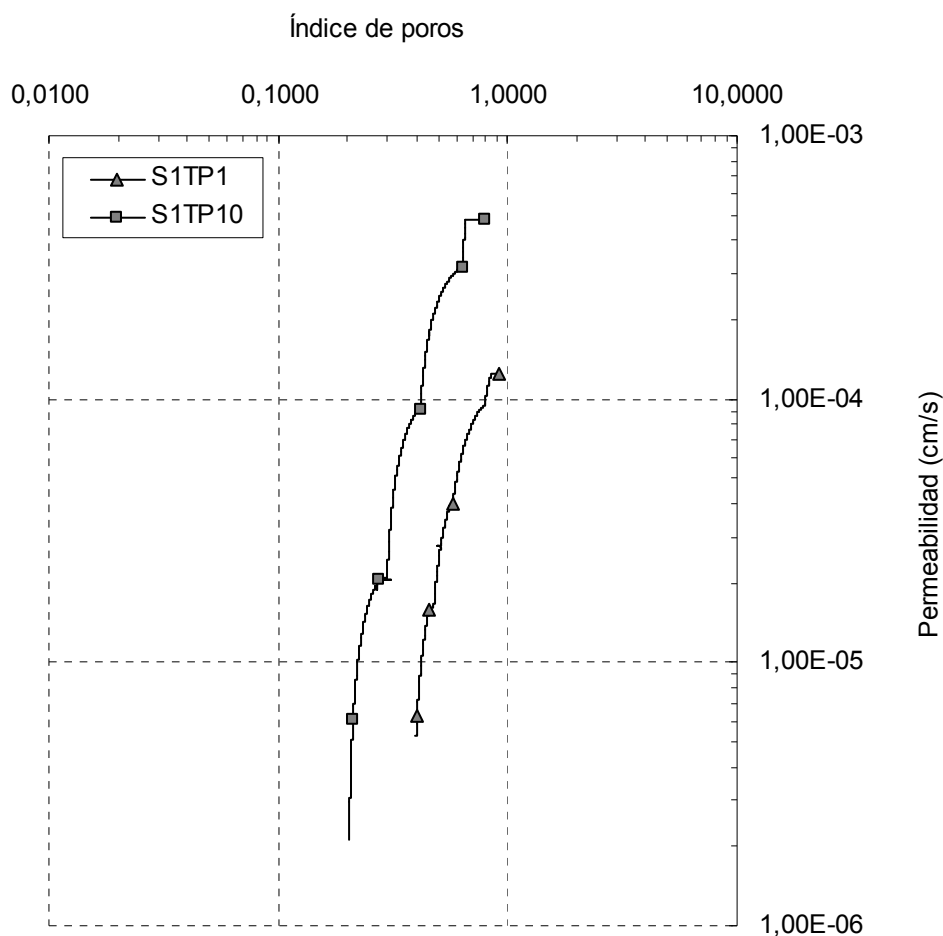


Figura 5.7.- Relación de las permeabilidades en función del índice de poros para las muestras S1TP1 y S1TP10.

En la Figura 5.7, anterior se observa que la permeabilidad varía de manera cúbica en función del índice de poros, es decir, la permeabilidad disminuye tres órdenes de magnitud en función a un orden de magnitud que disminuye el índice de poros.

Si lo comparamos con el modelo de Kozeny, válido para determinar la permeabilidad de una roca con las deformaciones. Según Kozeny para un medio poroso, la permeabilidad puede ponerse en función de la porosidad como:

$$K = K_0 * \left(\frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \right) * \left(\frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \right) \quad (5.5)$$

Siendo:

ϕ = Porosidad después de deformarse

ϕ_0 = Porosidad inicial



K_0 = Permeabilidad correspondiente a la ϕ_0

que supone un comportamiento isótropo y que la permeabilidad está controlada por la porosidad.

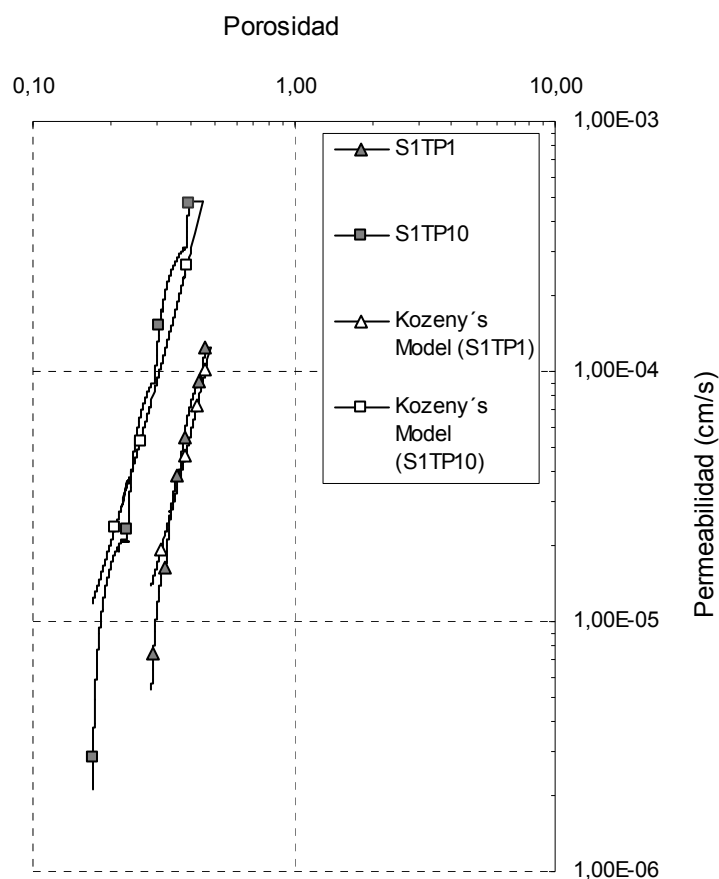


Figura 5.8.- Relación de las permeabilidades en función de la porosidad para las muestras S1TP1 y S1TP10, comparadas con el modelo propuesto por Kozeny

Si comparamos los resultados obtenidos de nuestro modelo con el modelo de Kozeny vemos que los resultados son muy similares (Figura 5.8). Variando en tres órdenes de magnitud la permeabilidad en función a la porosidad.

