



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL
TERRENO Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN MODELO
REDUCIDO DE LA CONSOLIDACIÓN RADIAL
Y DEFORMACIÓN DE UN SUELO BLANDO
MEJORADO CON COLUMNAS DE GRAVA**

Autora

ANA ISABEL CIMENTADA HERNÁNDEZ

Directora

ALMUDENA DA COSTA GARCÍA

Santander, Marzo de 2009

CAPÍTULO 3

ENSAYOS CON COLUMNA DE GRAVA

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos realizados con columna de grava. El análisis se realiza atendiendo a diversos aspectos del comportamiento del suelo mejorado: proceso de consolidación radial del suelo blando alrededor de la columna de grava, reparto de las cargas aplicadas en superficie entre el suelo y la columna y, finalmente, reducción del asiento. Para ello, se presta especial atención a las medidas de los asientos y su velocidad de desarrollo en el tiempo, y a la variación de las tensiones totales e intersticiales en distintos puntos del suelo y la columna.

Se han realizado un total de nueve ensayos con dos geometrías diferentes, cinco de ellos correspondientes a la geometría $N = 4$ y cuatro a la geometría $N = 3$.

Este capítulo se desarrolla en cuatro apartados principales. El primero de ellos corresponde a la descripción del procedimiento de ensayo: preparación de la muestra de suelo blando consolidada, construcción e instalación de la columna de grava central y aplicación de los escalones de carga. El segundo y tercer apartado están dedicados en su totalidad a la presentación e interpretación de los resultados obtenidos para las geometrías $N = 4$ y $N = 3$ respectivamente. En el último apartado se analizan de forma conjunta los resultados de ambas geometrías y se aplican distintas soluciones teóricas para su interpretación.

3.1. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Como se ha definido en el apartado 2.1, el modelo se ha diseñado para ensayos con dos geometrías diferentes, siendo los valores de la relación de diámetros entre suelo mejorado y columna (N) de 3 y 4 en cada caso (diámetro de la columna de 84,67 mm y 63,5 mm respectivamente).

La preparación y realización de un ensayo es la misma para ambas geometrías. Las diferencias existen únicamente en el momento de excavación y construcción de la columna donde el procedimiento a seguir es el mismo pero el sistema de excavado precisa de la colocación de unos u otros accesorios en función del diámetro de la columna. También el molde para la construcción de la columna tiene las características geométricas adecuadas a cada caso.

3.1.1. Descripción del ensayo

Cada ensayo completo se puede dividir en una serie de etapas claramente diferenciadas. La primera de ellas es la preparación y colocación en la célula Rowe de la muestra de caolín. En segundo lugar se consolida la muestra a una presión de 100 kPa. Tras esta consolidación inicial, se procede a la colocación de la columna, y finalmente, en la última etapa del ensayo se aplican una serie de escalones de carga para el estudio del proceso de consolidación radial y reparto de cargas entre el suelo y la columna.

A continuación se presenta con mayor detalle el procedimiento seguido en cada una de las etapas enumeradas.

Preparación de la muestra de ensayo y del equipo

La preparación de la muestra y del equipo para los ensayos con columna de grava se realiza de la misma manera que lo descrito en el apartado 2.4.1 para los ensayos edométricos con caolín llevados a cabo en la célula Rowe para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de ensayo y de la instrumentación implementada. Ello conlleva la saturación de todos los conductos del equipo, la aplicación de una capa fina de silicona en las paredes de la célula, el amasado del caolín con una humedad de 1,5 veces su límite líquido y su colocación en la célula (para más detalles ver apartado 2.4.1).

Consolidación inicial de la muestra

Antes de la colocación de la columna se realiza una consolidación inicial del caolín a 100 kPa. Para ello se emplean los dos sistemas de aplicación de carga descritos en el apartado 2.4.2, es decir, una primera consolidación con el sistema de poleas y pesas hasta una tensión de 50 kPa con una duración aproximada de tres días, y una segunda fase de consolidación hasta 100 kPa en el sistema de aire comprimido, hasta la completa consolidación de la muestra a dicha tensión. Durante ambas fases de consolidación se controlan las tensiones totales verticales y las presiones intersticiales en el plano inferior de la muestra. Con las lecturas de tensión total vertical se comprueba que la presión de consolidación aplicada es la deseada y que se transmite completamente al plano inferior de la muestra. Con el control de las presiones intersticiales se conoce el fin del proceso de consolidación en ambos sistemas. En el primer sistema de carga es imposible aplicar una presión de cola a la muestra puesto que está en contacto con la atmósfera. Con el segundo sistema de presión, la consolidación se realiza con una presión de cola de 300 kPa. La aplicación de esta presión de cola se ha justificado en el apartado 2.4 y tiene que ver con la eliminación de posibles burbujas de aire en la muestra.

Colocación de la columna central

Una vez consolidado el caolín a 100 kPa se abre la célula edométrica para instalar la columna de grava central. El proceso de construcción e instalación se describe en el apartado 3.1.2 con mayor detalle, mostrando todos los elementos diseñados y empleados en el proceso, así como el procedimiento a seguir en la construcción.

Aplicación de la carga

Una vez instalada la columna de grava se procede a la aplicación de una serie de escalones de carga. El incremento de carga aplicado en cada uno de ellos es de 100 kPa, llevándose a cabo en total cinco escalones durante cada ensayo, llegando hasta una tensión máxima aplicada de 600 kPa. Cada escalón de carga posee dos partes diferenciadas. En la primera se aplica la carga de manera instantánea sin permitir el drenaje de la muestra. Para ello se cierra la llave de drenaje de la piedra porosa central situada bajo la columna de grava. Aunque la aplicación de la carga es instantánea el aumento de las presiones intersticiales no es inmediato, por lo que el drenaje se mantiene cerrado hasta que las presiones intersticiales alcanzan el incremento de tensión dado. Una vez alcanzado dicho incremento comienza la segunda parte del escalón, se abre la llave de drenaje de la columna para permitir el drenaje radial del caolín. El momento de apertura del drenaje marca el inicio del proceso de consolidación radial. El escalón de carga se considera finalizado transcurridas 24 horas desde el tiempo de inicio de la consolidación, es decir, desde el instante de apertura del drenaje, a pesar de que las presiones intersticiales en el caolín se disipan antes. Después de estas 24 horas se aplica el siguiente escalón siguiendo de nuevo el mismo proceso.

Durante cada escalón de carga se toman lecturas en cada uno de los sensores de presión intersticial y de tensión total. La localización de los puntos de medida para cada una de las geometrías se ha expuesto en el apartado 2.3.2, y los tiempos para los cuales se toman lecturas se han justificado en el apartado 2.3.3.

Las lecturas realizadas por el LVDT durante todo el ensayo para controlar el asiento, deben ser referenciadas a una determinada altura de la muestra para poder interpretarlas. Para ello, se considera como lectura de referencia la correspondiente al

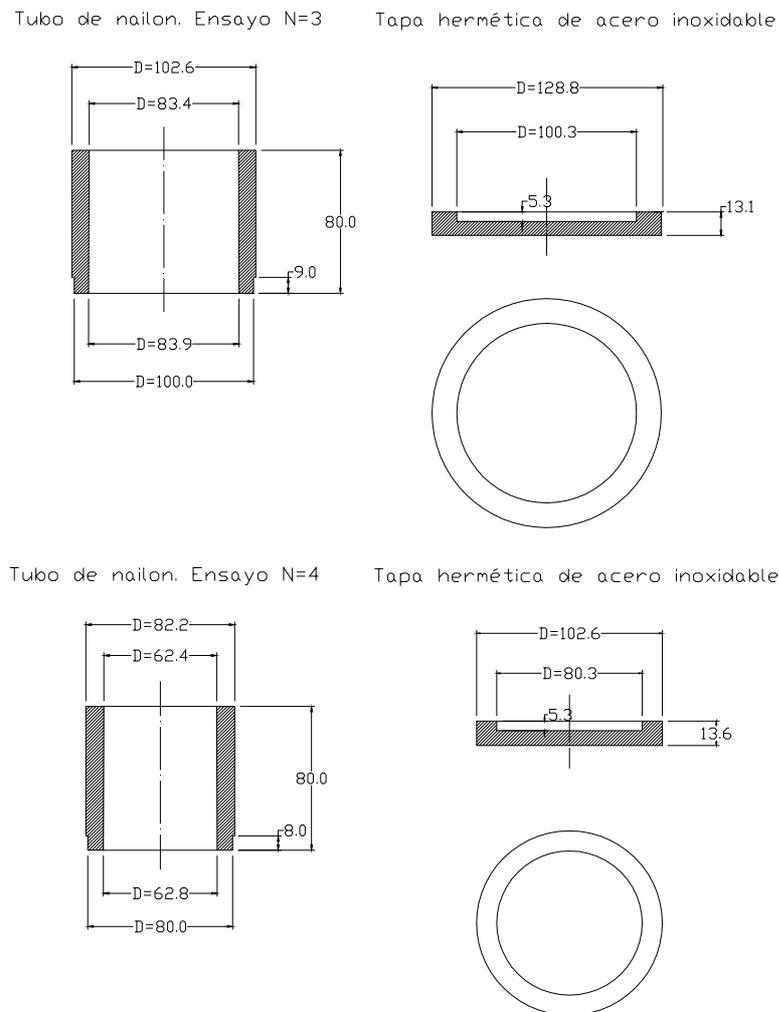
final del ensayo con la muestra descargada. Así, una vez terminados todos los escalones se descarga la célula produciéndose el hinchamiento de la muestra. Durante esta descarga se siguen midiendo todos los sensores aunque únicamente las lecturas del LVDT son necesarias. La descarga se mantiene el tiempo suficiente hasta que el hinchamiento de la muestra es prácticamente nulo y la lectura del LVDT se mantiene estable (lectura de referencia). La duración es de aproximadamente una semana. Se abre la célula y se mide la altura final de la pastilla, altura ligada a la citada lectura de referencia del LVDT.

3.1.2. Construcción e instalación de la columna de grava

La construcción de la columna es previa a la excavación del orificio central donde va alojada, ya que dicha construcción no se realiza en el interior de la célula. La columna se construye en el interior de un molde de nailon de dimensiones adecuadas a cada una de las geometrías de ensayo. Para su fabricación se introducen sucesivas capas de grava, compactándose cada una de ellas por vibración. Durante el vibrado de las capas se aplica además un peso en la superficie que ayuda a conseguir una mayor compactación de la muestra. Con este método de compactación de la columna se consiguen unas densidades secas en torno a $16,5 \text{ kN/m}^3$, lo que supone un índice de densidad próximo a la unidad. El peso de grava necesario para cada uno de los tamaños de columna ($N = 4$ y $N = 3$) es de 410 g y 730 g, aproximadamente. Una vez compactada toda la columna (altura de la columna $H = 80 \text{ mm}$), se llena el molde de agua y se introduce en un congelador a una temperatura de -19°C durante al menos 24 horas.

A pesar de que la construcción de la columna mediante congelado antes de su instalación es muy diferente de los métodos empleados en obra, el uso de este método facilita que las condiciones iniciales de las columnas empleadas en todos los ensayos sean similares. Sivakumar et al (2004) investigaron los comportamientos de un suelo blando mejorado con columna de grava compactada y con columna de grava congelada, de donde se concluye la validez de este método para los fines de este estudio.

Los moldes para la construcción de la columna son de forma interior troncocónica, con una diferencia entre los diámetros de las bases de 0,5 mm (ver Figura 3.1) que posibilita la extracción de la columna una vez que ha sido congelada.



Cotas en mm

Figura 3.1. Moldes para la construcción de la columna de grava

Los moldes llevan una tapa ajustada en una de las bases dejando la otra abierta para evitar el desarrollo de cualquier presión lateral durante el congelado de la grava, debido a la variación de volumen del agua.

- tubo de hincado: su diseño se realiza expresamente para la investigación, con las dimensiones adecuadas a cada geometría de ensayo (ver Figura 3.3). Se introduce en la muestra de caolín consolidada y a su abrigo se retira el material de su interior, construyéndose así el orificio central para la columna. El borde que realiza el hincado lleva un chaflán interior para que la alteración del suelo durante su penetración sea mínima. En cualquier caso, dicha alteración se produce en el material que es excavado y no en el que bordea a la columna.

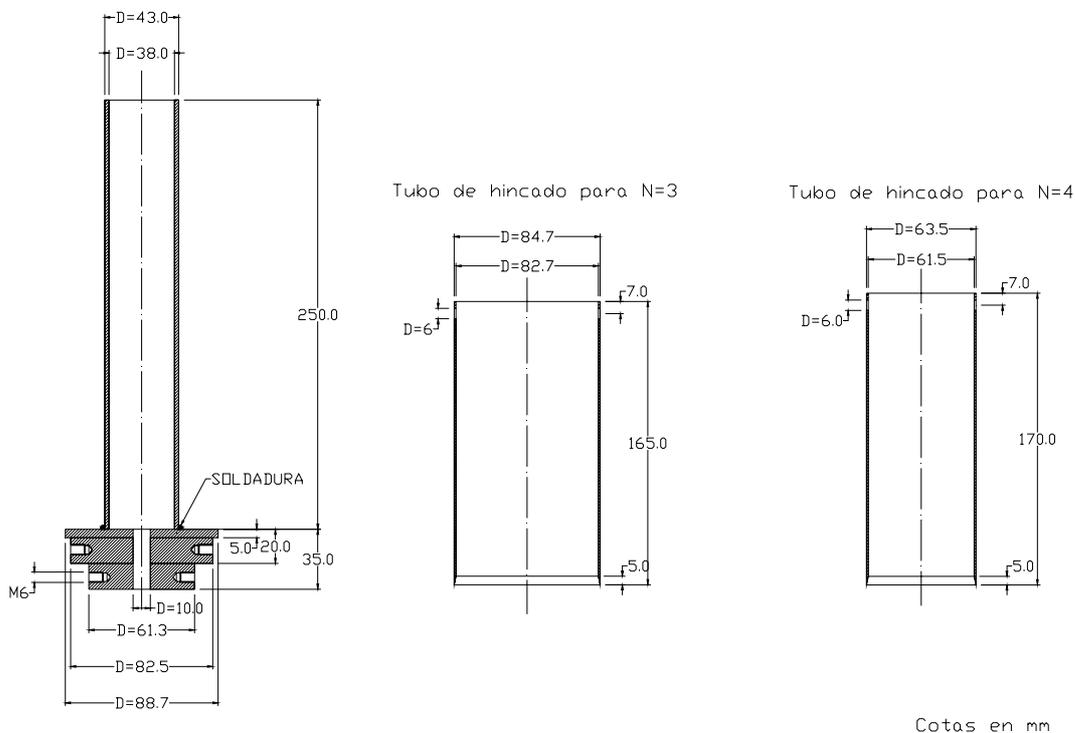


Figura 3.3. Elemento de empuje y tubos de hincado para la construcción de la columna de grava

- el soporte: se fija a la base y es el elemento donde se aplica la fuerza para el hincado del tubo y además sirve como sustento de éste (ver Figura 3.4). Se adquiere en el mercado.



Figura 3.4. Soporte para taladro adquirido para el sistema de excavación de la columna de grava

Para realizar la excavación, una vez abierta la célula se colocan en la posición correcta todos los elementos que conforman el sistema (ver Figura 3.5).



Figura 3.5. Sistema de excavación diseñado para la construcción de la columna de grava

Durante la excavación se mantiene la muestra de caolín sumergida para no perder humedad. Se vacía el caolín del interior del tubo de hincado y se limpia cuidadosamente la base de la excavación para eliminar cualquier resto de suelo arcilloso.

En el apartado 2.4 se han descrito una serie de ensayos realizados hasta conseguir el correcto funcionamiento de todo el equipo y procedimiento de ensayo. Uno de los aspectos allí señalado es la necesidad de colocar una capa de arena y una placa agujereada bajo la columna de grava. Ello justifica los dos siguientes pasos en el procedimiento de ensayo. A continuación se introduce el peso de arena necesario en cada geometría de ensayo para obtener una capa de unos 4mm de espesor en el fondo de la perforación (20,6g y 27,5g para $N = 4$ y $N = 3$ respectivamente). La arena se reparte uniformemente con un embudo (ver Figura 3.6).



Figura 3.6. Fondo de la excavación con la capa de arena colocada

Tanto la excavación como la colocación de la capa de arena se realizan al abrigo del tubo de hincado. En este momento se retira dicho tubo y se coloca sobre la arena la chapa de acero inoxidable diseñada para separar la arena de la grava. A continuación se llena de agua el orificio realizado con el fin de mantener saturada la arena y la columna de grava una vez sea instalada (ver Figura 3.7). Una vez colocados todos estos elementos en la base de la excavación, se extrae la columna del congelador y del molde

y se instala en el orificio central mientras se encuentra aún congelada. La extracción de la columna se realiza mediante la aplicación de una fuerza en su base de menor diámetro con una prensa, lo que provoca el despegue entre la columna y el molde. Después, la extracción completa solamente requiere un ligero empuje en la base menor. Durante esta actuación se coloca un elemento a modo de aislante térmico entre la prensa y la columna, evitando que esta se descongele.



Figura 3.7. Orificio antes de la colocación de la columna con la chapa de separación, y después, una vez colocada la columna de grava

Después de instalada la columna se espera a que se descongele antes de aplicar cualquier carga. El tiempo necesario es de aproximadamente dos horas. Se controla el nivel de agua de la muestra, manteniéndola en todo momento saturada. Aunque es posible que durante el congelado de la columna exista un complejo estado de tensiones generado dentro de la grava, la desaparición durante el proceso de descongelación de la estructura formada borra cualquier historia tensional ligada al congelado. Después del descongelado se enrasa la columna al mismo nivel que la muestra de caolín y se cierra la célula edométrica, cambiando la placa porosa superior usada anteriormente para permitir el drenaje superior y por tanto la consolidación de la muestra, por la tapa de aluminio diseñada (ver Figura 2.37) la cual no permite drenaje alguno hacia la superficie.

La muestra se vuelve a someter a la misma presión alcanzada en la etapa de consolidación inicial (100kPa). Con esta carga se consigue que la columna se acomode en el orificio, incrustándose las partículas de grava en el caolín circundante y dando continuidad a la interfaz suelo-columna. De este modo se crea una situación semejante a

la real en dicho contacto. Durante la aplicación de esta carga se toman lecturas de todos los sensores, comprobando un correcto comportamiento del sistema. Principalmente se controlan las lecturas de los transductores de tensión total bajo la columna, que han de ser similares si el reparto de cargas es uniforme.

Después de disipadas y estabilizadas las presiones intersticiales y estabilizadas las tensiones totales tanto en el caolín como en la columna, se aplican los sucesivos escalones de carga para el estudio de la consolidación radial y reparto de carga entre el suelo y la columna.

3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA GEOMETRÍA $N = 4$

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados con una relación de diámetros de $N = 4$. Este valor corresponde a un diámetro de columna $d_c = 63,5$ mm, lo que supone un área de sustitución del 6,25%. El número de ensayos realizados y su nomenclatura se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Ensayos realizados con geometría $N = 4$

Fecha de ensayo	15-05-07	07-09-07	15-11-07	04-02-08	01-04-08
Identificación	1N4	2N4	3N4	4N4	5N4

Los resultados que se presentan a continuación tienen que ver con las medidas de presión intersticial, tensión total y asientos realizadas durante los ensayos. Estas medidas se realizan en los sensores dispuestos según se ha justificado en el apartado 2.3.2, cuya posición se resume a continuación:

- presiones intersticiales en la base a distancias radiales de: $r = 37, 41, 46, 58, 76$ y 115 mm
- tensiones totales en la base en $r = 22,5$ mm (columna), $41, 58, 76$ y 115 mm (suelo)
- tensión total en dos puntos del contorno lateral en $h = 3$ cm.

Los tiempos a los cuales se realizan lecturas de los sensores se han presentado y justificado en el apartado 2.3.3.

Han de mencionarse algunas incidencias acontecidas en el último escalón de carga del ensayo 3N4 y en la medida de presiones intersticiales en uno de los sensores en el ensayo 5N4. Estas incidencias, que se describen a continuación, no invalidan en absoluto los ensayos, pero es conveniente tenerlas en cuenta en el análisis de resultados.

En el último escalón de carga del ensayo 3N4 se produce una interrupción en el funcionamiento del aire comprimido que aplica la carga a la muestra, suspendiéndose durante unos minutos su aplicación. Esto hace que el proceso de consolidación radial se interrumpa y el escalón se deseché para el posterior análisis. Por este motivo no se presenta ningún resultado de este escalón final. En el ensayo 5N4 no se pudieron tomar lecturas de presión intersticial en el punto más próximo a la columna puesto que al abrir el drenaje la lectura se anulaba de manera instantánea. Esto se corresponde con una disipación instantánea de la presión intersticial en ese punto debido a su drenaje inmediato. El motivo para que esto suceda es que haya llegado algo de arena de la capa colocada bajo la columna, que se ha podido introducir en el momento en el que se aplica la presión de cola por la piedra porosa central tras la colocación de la columna. Este comportamiento se puede observar en las figuras correspondientes de medidas de presión intersticial de este ensayo adjuntas en el Apéndice D.

3.2.1. Presiones intersticiales

Durante cada escalón de carga se realizan medidas de los incrementos de presión intersticial a distintos radios en el suelo blando, correspondiendo con la ubicación de los sensores destinados a esta geometría, según se ha detallado anteriormente. Los resultados se presentan gráficamente de varias formas. Una de ellas es la representación de las medidas de cada uno de los transductores frente al tiempo, la cual corresponde con el modo en que se observan estas lecturas en tiempo real en el ensayo. A modo de ejemplo, en la Figura 3.8 se muestran las lecturas de incremento de presiones intersticiales (Δu) con respecto al incremento inicial (Δu_0 , igual al incremento de presión aplicado en el escalón) registradas durante el primer escalón de carga del ensayo 2N4. Se observa claramente la primera parte de aplicación de carga sin drenaje durante la cual se produce un aumento de las presiones intersticiales hasta alcanzar un valor igual al incremento de carga aplicada y la parte durante la cual se produce la consolidación radial del caolín al permitir el drenaje de la columna.

La disipación de las presiones intersticiales se produce con mayor rapidez en el sensor más próximo a la columna de grava puesto que el camino de drenaje es menor (sensor colocado en $r = 37$ mm). La velocidad de disipación de dichas presiones es más lenta a medida que el punto de lectura se encuentra más alejado (mayor camino de

drenaje), lo que queda perfectamente reflejado en las curvas de lecturas. El resto de curvas para los distintos escalones de los cinco ensayos realizados con esta geometría se recogen en el Apéndice D.

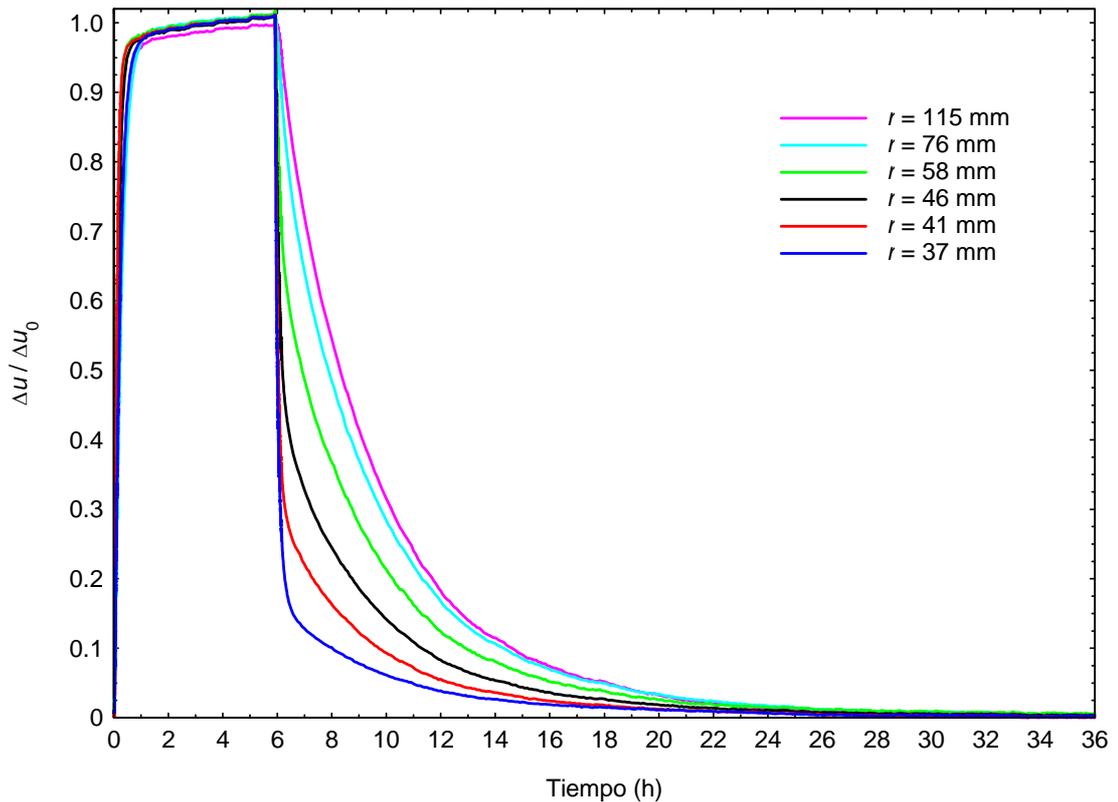


Figura 3.8. Medidas de presión intersticial a lo largo del tiempo durante el escalón de carga 100-200 kPa. Ensayo 2N4

El segundo modo de representación permite, a partir de estas medidas, observar su disipación a lo largo de un radio fijo para cada escalón de carga. En la Figura 3.9 se muestra, a modo de ejemplo, la representación de las medidas realizadas en el ensayo 2N4 en los puntos donde se sitúan los sensores de presión intersticial y en determinados tiempos, en el mismo escalón de carga mostrado anteriormente. El resto de los resultados de los ensayos se muestran también en el Apéndice D.

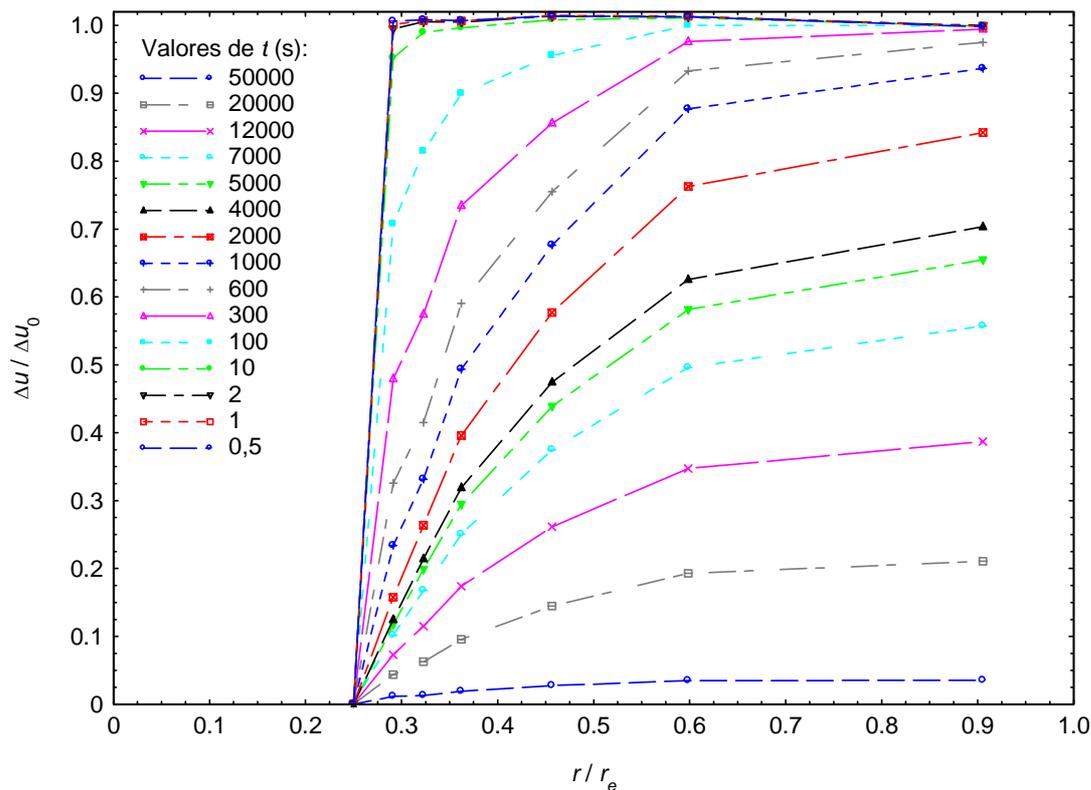


Figura 3.9. Medidas de presiones intersticiales a lo largo de un radio. Escalón 100–200 kPa. Ensayo 2N4

Estimación de c_{vr}^{eq} a utilizar en la solución de Barron para reproducir los resultados

A partir de los valores medidos de presión intersticial en un escalón a distintas distancias radiales y para distintos tiempos, se puede estimar el valor del coeficiente de consolidación radial que se debe emplear en la solución teórica de la consolidación radial de Barron-Hansbo (ver apartado 1.2.1) para reproducir los resultados obtenidos en los ensayos.

La estimación del coeficiente de consolidación se ha realizado de dos formas. Inicialmente se estima a partir de los valores medidos por los sensores de presiones intersticiales y su distribución a lo largo del radio (isócronas). Como se justificará más adelante, esto hace que no se puedan emplear las isócronas obtenidas en los primeros instantes de la consolidación. Para evitar el despreciar los resultados iniciales del

proceso de consolidación, se realiza posteriormente una estimación empleando el valor medio de la presión intersticial a lo largo del radio.

Para la primera estimación se comparan los valores de la presión intersticial medida, con lo dados por la solución de Barron, obtenidos mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta u}{\Delta u_0} = \frac{e^{-8T_r/\mu}}{\mu} \left[\ln\left(\frac{r}{r_c}\right) - \frac{r^2 - r_c^2}{2r_e^2} \right] \quad (3.1)$$

siendo:

Δu el incremento de presión intersticial en un punto

Δu_0 el incremento de presión intersticial inicial

$$\mu = \frac{r_e^2}{r_e^2 - r_c^2} \ln\left(\frac{r_e}{r_c}\right) - \frac{3}{4} + \frac{r_c^2}{4r_e^2} \quad (3.2)$$

$$T_r = \frac{c_{vr}t}{4r_e^2} \quad (3.3)$$

La isócrona correspondiente al inicio de la consolidación obtenida mediante la solución de Barron, no coincide con la distribución real de presiones intersticiales a lo largo del radio, aunque sí lo hace su valor medio (ver Figura 3.10).

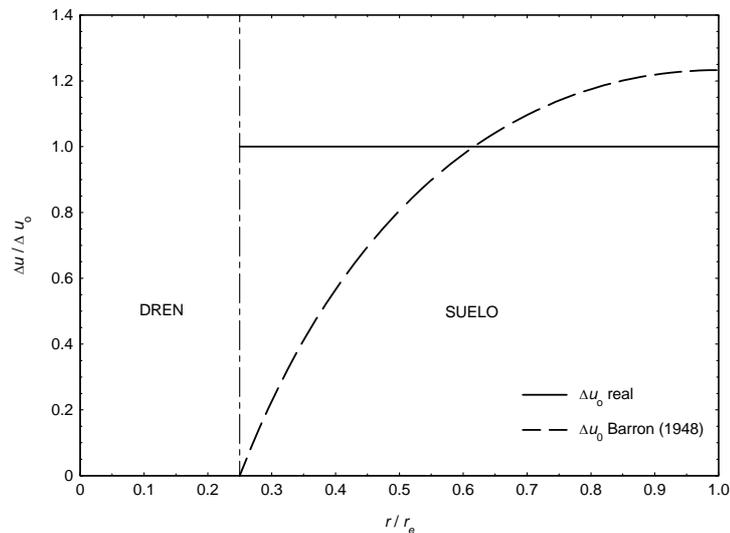


Figura 3.10. Distribución de presiones intersticiales iniciales real y según Barron (1948)

El comportamiento real en el suelo es un cambio instantáneo en el contacto con el dren, donde la presión intersticial es nula debido al drenaje inmediato, mientras que en el resto del suelo no existe disipación alguna de presiones intersticiales (Δu igual al incremento de carga aplicada). Sin embargo, la solución de Barron proporciona una isócrona continua, creciente con la distancia al dren. Por ello, si se realiza el ajuste de la solución de Barron a los resultados para todos los tiempos se observa que, como cabía esperar, no resulta muy bueno al comienzo de la consolidación (las isócronas de Barron difieren mucho de las obtenidas con las medidas realizadas), pero va mejorando a medida que los tiempos van siendo mayores. A partir de los 1000 ó 2000 segundos, dependiendo del escalón y el caso analizado, la correlación entre las curvas de ajuste con dicha solución y las medidas de los ensayos es satisfactoria, por lo que se consideran tiempos válidos para el ajuste definitivo. Con el fin de considerar un valor único y válido en todos los escalones y ensayos, se decide realizar en todos los casos el ajuste para tiempos iguales o superiores a 2000 segundos desde la apertura del drenaje (inicio de la consolidación).

Para realizar el ajuste definitivo se consideran las medidas realizadas a distintos radios (donde se encuentran situados los sensores) y en los tiempos representados en la Figura 3.9. Para esos mismos tiempos y radios se calcula el valor de Δu teórico a partir de la ec. (3.1) y el error cuadrático correspondiente, siendo éste el cuadrado de la diferencia entre la medida y el valor teórico. Finalmente, se considera el valor del coeficiente de consolidación radial del escalón aquel que minimiza la suma de los errores cuadráticos del ajuste.

De esta forma, para cada escalón de carga se obtiene un único coeficiente de consolidación radial que se considera constante a lo largo del mismo. Este coeficiente se denomina c_{vr}^{eq} para diferenciarlo del c_{vr} correspondiente al caolín sin columna. En soluciones teóricas existentes se emplean distintos superíndices acompañando al símbolo c_{vr} en función de las hipótesis que contemplan, por lo que en este caso se decide emplear un superíndice *eq* correspondiente al suelo que equivale al conjunto suelo-columna del ensayo. Una vez obtenido este valor, se representan las isócronas teóricas correspondientes a los tiempos considerados en el ajuste. En la Figura 3.11 se muestra a modo de ejemplo las medidas junto con las isócronas obtenidas mediante la

solución de Barron para los mismos tiempos, en el escalón 100-200 kPa del ensayo 2N4, utilizando para ello el valor de c_{vr}^{eq} estimado en dicho escalón.

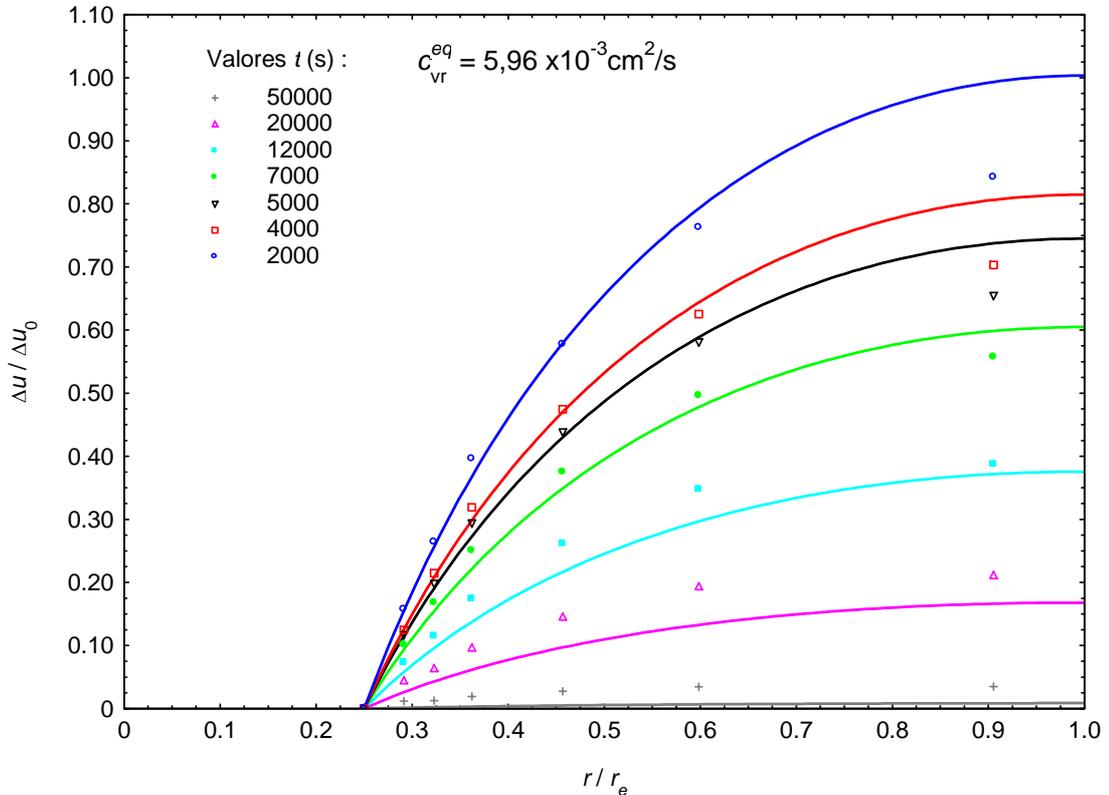


Figura 3.11. Presiones intersticiales medidas e isócronas obtenidas con la solución de Barron empleando el coeficiente de consolidación estimado. Escalón 100–200 kPa. Ensayo 2N4

En todos los escalones de todos los ensayos se observa que con el coeficiente de consolidación radial así estimado, el mejor ajuste entre los resultados y la solución teórica de Barron se consigue para un grado de consolidación de la muestra de aproximadamente el 50%. De los resultados obtenidos se observa que la solución de Barron subestima el valor del coeficiente de consolidación para grados de consolidación menores del 50%, puesto que el incremento de presiones intersticiales aún sin dispar medido por los transductores es menor que el teórico, y lo sobrestima para aquellos superiores donde la consolidación real resulta más lenta que la predicha por la solución de Barron.

Los valores de c_{vr}^{eq} estimados en cada uno de los escalones de cada ensayo realizado se muestran en la Tabla 3.2. Es importante recordar que estos valores del coeficiente de consolidación radial representan los valores que mejor reproducen las medidas de presiones intersticiales en el escalón de carga correspondiente, si se emplea la solución de Barron para su análisis.

Tabla 3.2. Valores de c_{vr}^{eq} , estimados a partir de las medidas de Δu , a utilizar en la solución de Barron para reproducir el ensayo. Geometría $N = 4$

c_{vr}^{eq} ($\times 10^{-3}$ cm ² /s)					
Ensayo					
Escalón de carga (kPa)	1N4	2N4	3N4	4N4	5N4
100 – 200	7,40	5,96	5,92	5,45	6,71
200 – 300	7,36	5,87	5,68	5,00	5,35
300 – 400	7,89	6,49	6,52	5,14	5,81
400 – 500	9,34	8,34	7,02	5,95	6,28
500 – 600	11,9	9,31	---	6,31	6,70

Los resultados muestran un aumento del coeficiente de consolidación radial equivalente a medida que el escalón de carga aplicada es mayor, con la excepción del primer escalón donde el valor obtenido es ligeramente superior al del escalón siguiente. Este comportamiento se repite para todos los ensayos de esta geometría. Los valores mayores en el primer escalón se deben a que el suelo se encuentra sobreconsolidado al inicio de este escalón, debido a la secuencia de aplicación de carga en el ensayo hasta ese momento, que sigue los siguientes pasos. Previamente a la colocación de la columna, el suelo blando se consolida a una tensión de 100 kPa. A continuación, se descarga para la construcción de la columna y una vez colocada, se vuelve a aplicar de nuevo la misma carga. Sin embargo, la presencia de la columna hace que parte de la

carga aplicada actúe sobre ella, descargando al suelo que se queda con una tensión inferior a 100 kPa. Con ello se tiene el suelo sobreconsolidado con razones de sobreconsolidación, RSC , entre 1,3 y 1,6 calculadas mediante las medidas de los sensores de tensión total vertical en el suelo. Como es sabido, el coeficiente de consolidación varía con la presión de preconsolidación, aumentando a medida que la muestra está más sobreconsolidada. Esto justifica los mayores valores obtenidos en el primer escalón.

La segunda estimación de los valores del coeficiente de consolidación a emplear en la solución de Barron para reproducir los resultados obtenidos, se realiza mediante el grado de consolidación medio para cada tiempo (U_r). Ello permite no tener que obviar las medidas de presiones intersticiales correspondientes a tiempos inferiores a 2000s, ya que como se observa en la Figura 3.10, aunque las isócronas iniciales dadas por la solución de Barron no coinciden con la distribución real, sí lo hace el valor medio de la presión intersticial en el radio ($\overline{\Delta u_r}$).

El valor de $\overline{\Delta u_r}$ en los ensayos se obtiene a partir de la integración numérica de las medidas representadas en la Figura 3.9, correspondientes a un determinado tiempo. Como herramienta para la integración, se emplean unas curvas de suavizado de las lecturas de las presiones intersticiales para los distintos tiempos. Estas curvas se integran a toda la corona de suelo blando obteniendo el valor medio de la presión intersticial para ese tiempo. Una vez calculados los valores de $\overline{\Delta u_r}$ en distintos tiempos del ensayo, se obtiene el grado de consolidación medio de la muestra en cada uno de los tiempos considerados mediante la expresión:

$$U_r = 1 - \frac{\overline{\Delta u_r}}{\Delta u_0} \quad (3.4)$$

En la Figura 3.12 se representa, a modo de ejemplo, el grado de consolidación medio así obtenido, correspondiente a las medidas durante el escalón 100-200 kPa del ensayo 2N4. En la misma figura se muestra el resultado de la aplicación de la solución de Barron. Esta solución es para un suelo con drenes verticales por lo que el coeficiente de consolidación que se utiliza en el análisis es el del caolín. En este caso, se ha considerado el correspondiente al mismo escalón de carga (100-200 kPa) obtenido en el

ensayo edométrico en célula Rowe cuyos resultados se presentan en el apartado 2.4.3 ($c_{vr} = 2,68 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$). Como cabía esperar, el proceso de consolidación obtenido del ensayo con columna es mucho más rápido que el estimado a partir de la solución de Barron con el coeficiente de consolidación del caolín. Ello se debe a que dicha solución es para drenes mientras que la presencia de la columna acelera la consolidación. Para que esta solución reprodujese mejor los resultados de los ensayos, sería necesaria una traslación de la curva $U_r - t$. Esa traslación supone considerar un coeficiente de consolidación mayor que el del caolín que englobe todas las condiciones existentes en el ensayo en cuanto a geometría (área de sustitución), valor real de la relación de rigideces columna-suelo y comportamiento de la columna (elástico o elasto-plástico).

Para evaluar la traslación necesaria, o lo que es lo mismo el aumento del valor del coeficiente de consolidación radial para reproducir la situación real, se ha calculado el grado de consolidación medio teórico según la ecuación (3.5), el cual es función a través de T_r del coeficiente de consolidación equivalente que se pretende estimar (ver apartado 1.2.1).

$$U_r = 1 - e^{-8T_r / \mu} \quad (3.5)$$

Se toma como resultado el valor de c_{vr}^{eq} que minimiza la suma del error cuadrático entre los valores teóricos y los obtenidos a partir de los resultados del ensayo. Al igual que en el método anterior, para cada escalón de carga se obtiene un coeficiente de consolidación único y constante.

En la Figura 3.12 se representa también la curva correspondiente al coeficiente de consolidación equivalente estimado para el escalón de carga representado, observándose en los resultados la traslación necesaria de la curva obtenida para la solución con drenes.

Al igual que ocurriera en el método de ajuste anterior, la solución teórica subestima el valor del coeficiente de consolidación para grados de consolidación inferiores al 50% y lo sobrestima para los superiores empleando el valor del coeficiente de consolidación equivalente. En torno a ese valor, los resultados teóricos y experimentales se ajustan correctamente.

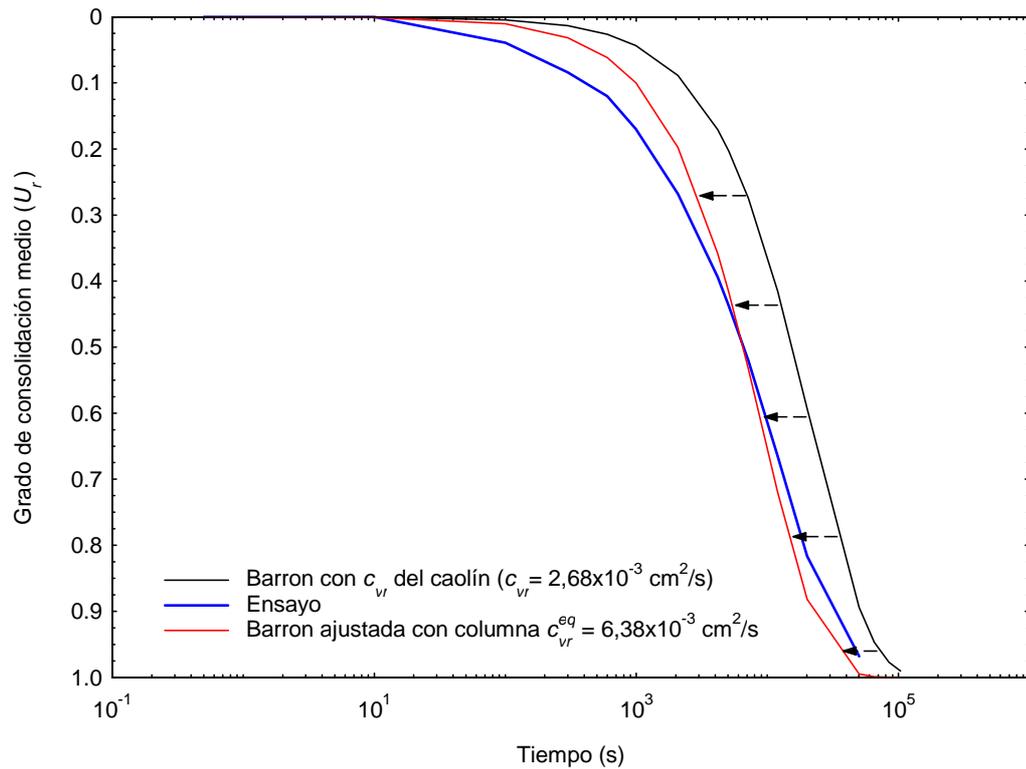


Figura 3.12. Grado de consolidación medio. Comparación con la solución teórica. Escalón 100–200 kPa. Ensayo 2N4

Los valores obtenidos en cada uno de los escalones de los distintos ensayos realizados se presentan en la Tabla 3.3.

Los resultados muestran un aumento del coeficiente de consolidación radial equivalente a medida que aumenta la carga aplicada sobre la muestra. En este caso, al igual que ocurriría con la estimación anterior, existe una excepción en esa tendencia ya que, los valores estimados en el primer escalón de carga superan ligeramente a los del segundo, con la excepción del ensayo 2N4 donde el valor del coeficiente de consolidación es idéntico en el primer y segundo escalón. Como se comenta en el apartado anterior, esto se debe a que en el primer escalón de carga el suelo se encuentra ligeramente sobreconsolidado (RSC entre 1,3 y 1,6) y el coeficiente de consolidación de un suelo aumenta con la razón de sobreconsolidación.

Tabla 3.3. Valores de c_{vr}^{eq} , estimados a partir del grado de consolidación medio, a utilizar en la solución de Barron para reproducir el ensayo. Geometría $N = 4$

Escalón de carga (kPa)	c_{vr}^{eq} ($\times 10^{-3}$ cm ² /s)				
	Ensayo				
	1N4	2N4	3N4	4N4	5N4
100 – 200	8,01	6,38	6,4	5,89	7,15
200 – 300	7,90	6,38	6,24	5,47	5,75
300 – 400	8,90	7,07	7,23	5,55	6,16
400 – 500	10,87	9,5	7,96	6,45	6,69
500 – 600	14,46	10,38	---	6,83	7,08

Las dos estimaciones realizadas mediante presiones intersticiales o isócronas y mediante el grado de consolidación medio dan valores de c_{vr}^{eq} muy próximos (Tabla 3.2 y Tabla 3.3).

3.2.2. Tensiones totales. Factor de concentración de tensiones

De las lecturas realizadas por los transductores de medida de tensión vertical total tanto en el suelo como en la columna se obtienen datos del reparto de cargas entre ambos materiales durante la aplicación de cada escalón de carga, tanto en la parte sin drenaje como durante el proceso de consolidación radial. En la Figura 3.13 y en la Figura 3.14 se presenta el registro de estas tensiones durante un escalón de carga, en la columna y en el suelo respectivamente. En ellas se encuentra descontada la presión de cola aplicada durante el ensayo (300 kPa para todos los ensayos). El resto de las curvas correspondientes a todos los escalones de carga de todos los ensayos se adjuntan en el Apéndice D, donde los valores representados son directamente las lecturas realizadas

por los sensores, es decir, sin descontar la presión de cola aplicada. Analizando los resultados se observa un aumento instantáneo de las tensiones verticales medidas, tanto en el suelo como en la columna, aproximadamente igual al incremento de tensión total vertical aplicada (100kPa), puesto que las condiciones de carga son sin drenaje. Mientras el drenaje está cerrado, la lectura se mantiene más o menos constante. En el instante de apertura del drenaje, las tensiones verticales en la columna aumentan ($t=6h$ aproximadamente en el caso presentado en la Figura 3.13), y a partir de este momento continúan aumentando progresivamente hasta estabilizarse una vez disipadas las presiones intersticiales en el caolín y terminado por tanto el proceso de consolidación radial.

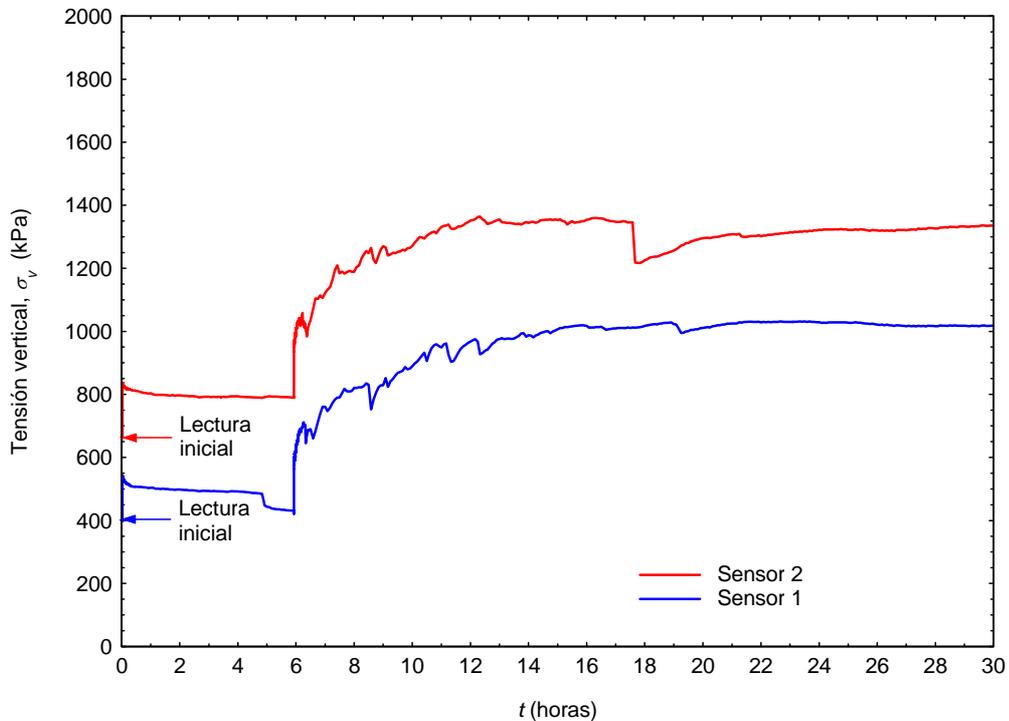


Figura 3.13. Registro de tensiones totales verticales en la columna. Escalón 100-200 kPa. Ensayo 2N4

El comportamiento del suelo blando, después del periodo con el drenaje cerrado, es diferente al del material granular. Al abrir el drenaje comienza la disipación de presiones intersticiales y con ello la transferencia de carga desde el caolín hacia la columna de grava. En la Figura 3.14 puede verse claramente el instante de apertura de drenaje, marcado por un descenso de la tensión vertical en todos los puntos de medida

del suelo. Los puntos próximos a la columna sufren un descenso inicial de la tensión total más acusado pero se produce una recuperación en el tiempo hasta llegar al valor medio final que actúa sobre el caolín ($r = 41$ y 58 mm). Los puntos más alejados registran un descenso inicial menor, siguiendo esa tendencia descendente hasta converger en el valor medio de la carga final que actúa sobre el caolín. Este comportamiento se da en el punto $r = 115$ mm, siendo el punto $r = 76$ mm una transición entre el comportamiento anterior y éste.

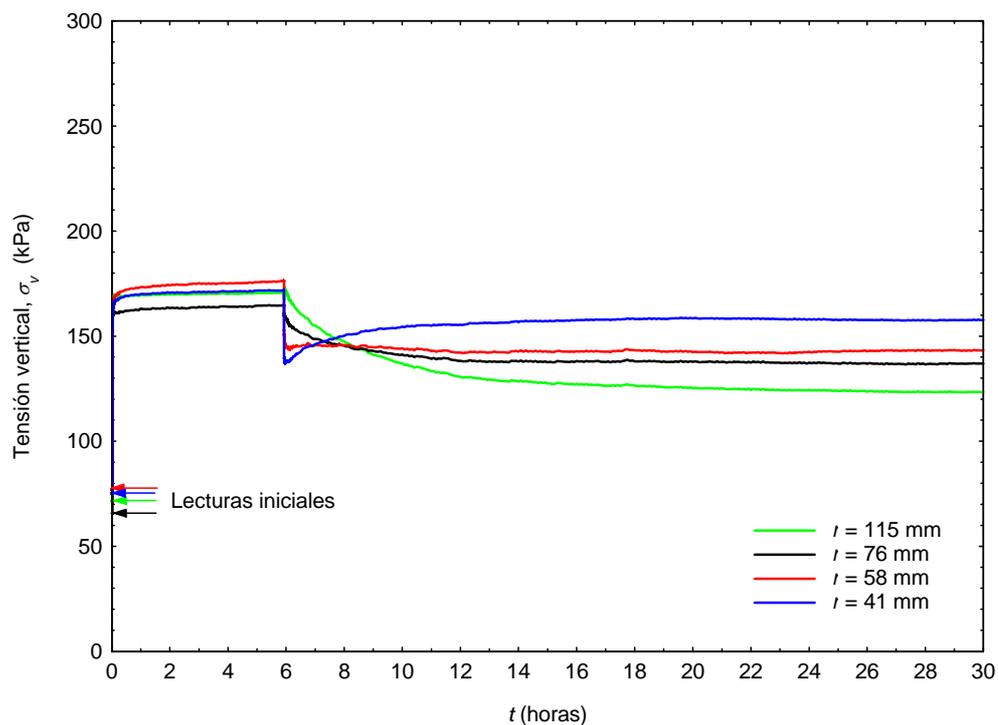


Figura 3.14. Registro de tensiones totales verticales en el suelo. Escalón 100 – 200 kPa. Ensayo 2N4

Todo lo anterior se corresponde con lo que cabe esperar dada la condición de asiento uniforme o carga rígida aplicada y se justifica a continuación.

Los puntos más cercanos a la columna tienen una disipación más rápida de las presiones intersticiales puesto que el camino de drenaje es menor. Para que el asiento sea uniforme la tensión efectiva, y por tanto la diferencia entre tensión total y presión intersticial, ha de ser constante a lo largo del radio (ver Figura 3.15). Un instante después de abrir el drenaje ($t \approx 0$), el incremento de tensiones efectivas es prácticamente nulo en el suelo. Por tanto, el incremento de presiones intersticiales y el de tensiones

totales a lo largo del radio en el suelo blando ha de coincidir aproximadamente. A medida que la consolidación radial tiene lugar, las presiones intersticiales se van disipando y la tensión efectiva (que ha de ser constante en el radio) aumenta. En un punto muy próximo a la columna las presiones intersticiales son casi nulas debido al corto camino de drenaje. Si la tensión efectiva va aumentando durante la consolidación, esto sólo puede producirse por medio del aumento de las tensiones totales en ese punto. Del mismo modo se explica el comportamiento observado en los puntos más alejados de la columna de grava, donde las presiones intersticiales en un instante son superiores a su valor medio en el radio. En este caso, las tensiones verticales totales disminuyen a lo largo de todo el proceso de consolidación para que se cumpla la condición de tensión efectiva constante a lo largo del radio (asiento uniforme).

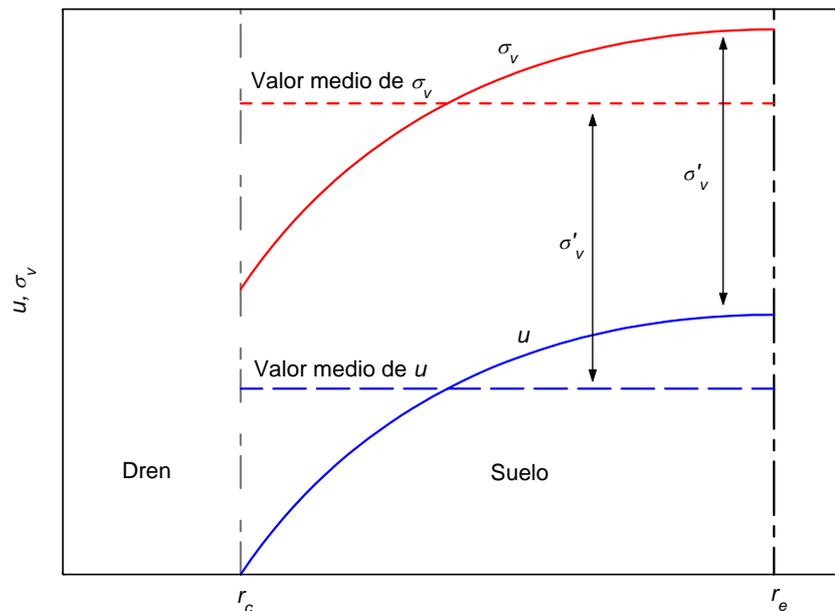


Figura 3.15. Variación de la tensión vertical y la presión intersticial con el radio. Solución de Barron (1948) con carga rígida

En la Figura 3.16 se representa las curvas teóricas de la tensión vertical en el suelo a lo largo de un escalón de carga para distintas distancias radiales. Las distancias analizadas se han elegido dividiendo en cincuenta partes la longitud de suelo ($r_e - r_c$). De todas ellas se ha representado únicamente las curvas de tensiones totales en siete radios. Estos corresponden a la interfaz columna-suelo ($r_c = 31,75\text{mm}$), al borde lateral del

suelo blando ($r_e = 127\text{mm}$) y el resto se han elegido aleatoriamente de manera que queden reflejados los distintos comportamientos entre estos casos extremos. Para ello se ha utilizado la solución de Han y Ye (apartado 1.2.1) con unos valores de los módulos edométricos del suelo y columna de $E_{mc} = 39200\text{ kPa}$, $E_{ms} = 1400\text{ kPa}$ (situación en el primer escalón de carga) y un valor del coeficiente de consolidación equivalente de $c_{vr}^{eq} = 7,71 \times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$, obtenido a partir del valor del coeficiente de consolidación del caolín sin columna para el primer escalón de carga ($c_{vr} = 2,69 \times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$), según la relación entre ambos coeficientes de consolidación dada por los autores. Para distintos tiempos se ha obtenido el valor de la presión intersticial a distintos radios (u), el valor medio de la presión intersticial en el radio (\bar{u}_r) y la tensión vertical media en el suelo ($\bar{\sigma}_{vs}$, ec. 1.15). La diferencia entre $\bar{\sigma}_{vs}$ y \bar{u}_r es el valor de la tensión efectiva en el suelo, igual para todos sus puntos (ver Figura 3.15). Trasladando la curva de las presiones intersticiales a lo largo del radio, una magnitud igual a dicha tensión efectiva, se han obtenido las curvas de la tensión vertical total en distintos puntos del suelo.

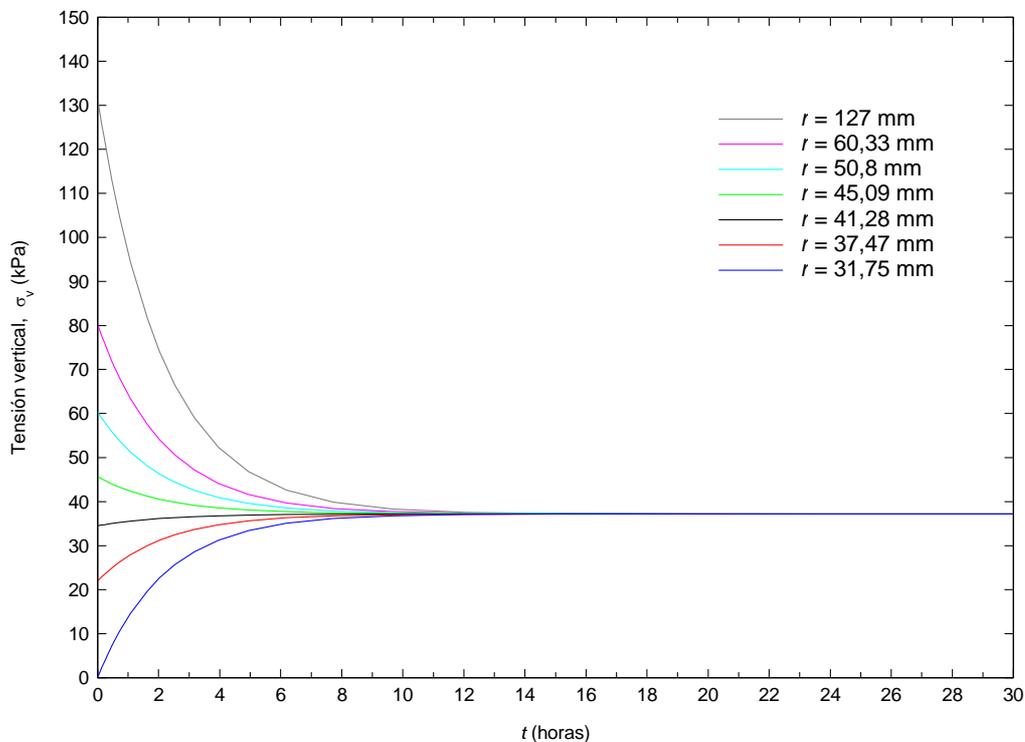


Figura 3.16. Tensiones totales verticales teóricas a distintos radios en el suelo. Solución de Han y Ye (2001). Geometría $N = 4$

Las curvas de la Figura 3.14 (medidas en el ensayo) muestran un comportamiento similar a las de la Figura 3.16 a partir del momento de apertura del drenaje, con respecto al aumento o disminución de la tensión vertical en el suelo a lo largo del tiempo, dependiendo de la posición del punto analizado.

En la Figura 3.17 se muestra la evolución del incremento de la tensión vertical total ($\Delta\sigma_v$) con respecto al incremento de carga aplicada en el escalón (Δp) con el tiempo, tanto en la columna como en el caolín a lo largo del radio. La tensión vertical en la columna se considera constante a lo largo del radio, por tanto se toma el valor medio de las lecturas de los dos sensores como valor de la tensión vertical que actúa sobre ella. Sin embargo no es así en el suelo, donde la tensión vertical total sólo es constante en el radio en los instantes inicial y final de la consolidación. En este caso se presentan las medidas de cada sensor a medida que el proceso de consolidación y el asiento van teniendo lugar.

Según la teoría, en el instante inicial tras la apertura del drenaje ($t \approx 0$), el incremento de carga que se encuentra actuando sobre la columna es menor que el que actúa sobre el caolín. Esto se debe a que el material arcilloso presenta instantáneamente un comportamiento sin drenaje y por tanto es un material incompresible, lo que supone una mayor rigidez que la columna de grava, que si drena instantáneamente. A medida que el exceso de presiones intersticiales se va disipando mediante el flujo radial del agua hacia la columna, el módulo de rigidez del suelo se reduce gradualmente hasta alcanzar su valor drenado, presentando entonces la columna una rigidez superior al suelo. En estas condiciones, la tensión vertical que actúa sobre la columna es mayor que la del suelo.

Este comportamiento se ha podido observar en los cinco ensayos realizados con $N=4$, captándose en alguno de ellos en los dos últimos escalones de carga aplicados (400-500 kPa y 500-600 kPa) y en otros también en el escalón anterior (300-400 kPa). En los casos mencionados, para un tiempo $t=0,5s$, la relación entre el incremento de carga vertical soportada y el incremento de carga aplicada es menor que la unidad para la columna y ligeramente superior para el suelo. Sin embargo, como ya se ha comentado esto no ocurre de forma sistemática en todos los escalones, como puede verse en el caso representado en la Figura 3.17. El motivo es que la primera lectura que realizan los

sensores es transcurridos 0,5s desde la apertura del drenaje. Este tiempo, dependiendo de las condiciones del escalón (coeficiente de consolidación, geometría) y de la velocidad real de la aplicación de la carga (tiempo empleado en la apertura de la llave de drenaje de la columna central) puede estar suficientemente próximo al instante inicial del proceso de consolidación como para mostrar dicho comportamiento, pero en otros casos puede encontrarse bastante alejado. (ver el resto de los resultados de los escalones de todos los ensayos en el Apéndice D).

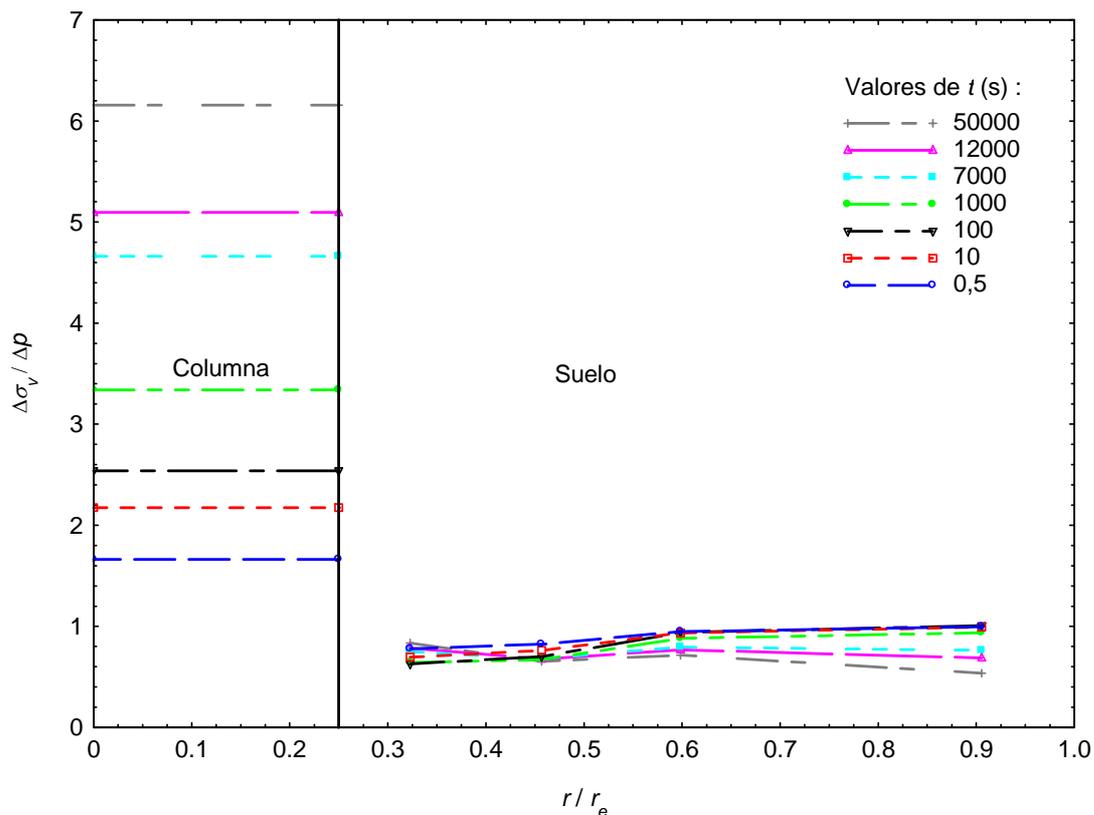


Figura 3.17. Reparto de tensión total vertical en el caolín y en la columna en el tiempo. Escalón 100 – 200 kPa. Ensayo 2N4

En la Figura 3.18 se muestra la tensión vertical media en el suelo y en la columna en función del tiempo. Como se ha comentado anteriormente, para el cálculo de la tensión media de la columna se considera el valor medio de las lecturas de los dos sensores. En el cálculo de la tensión media del suelo, puesto que las lecturas se realizan a diferentes radios se toma como valor medio de la tensión vertical total el obtenido ponderando cada una de las medidas por su área tributaria. Ha de cumplirse que la relación entre la media ponderada por las áreas y el incremento de carga aplicado sea

aproximadamente igual a la unidad para que exista equilibrio de fuerzas en el sistema, siendo esta relación:

$$\frac{(\Delta\sigma_c \cdot A_c + \Delta\sigma_s \cdot A_s)/A_e}{\Delta p} \quad (3.6)$$

donde A_c , A_s y A_e son las áreas de columna, suelo y área total de la muestra, respectivamente.

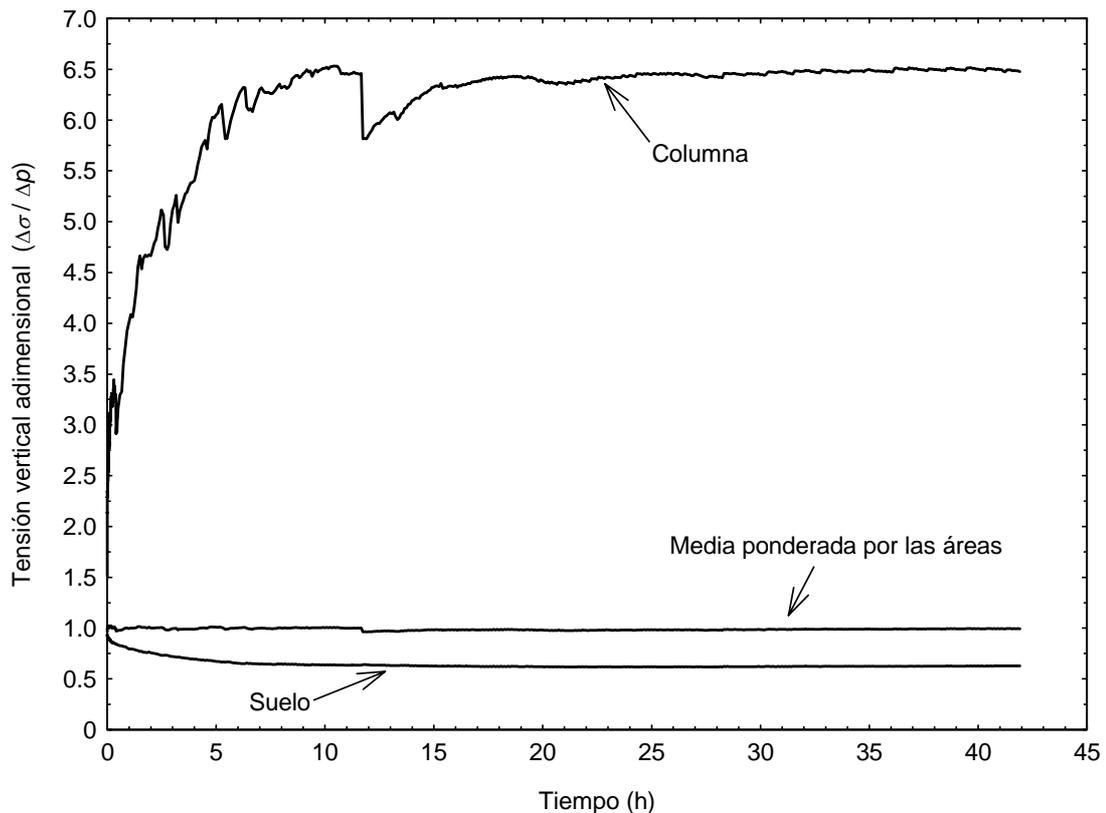


Figura 3.18. Evolución con el tiempo de las tensiones en el suelo y la columna. Geometría $N = 4$

Se observa de manera clara la transferencia de carga que tiene lugar entre columna y suelo, puesto que a medida que aumenta la carga que actúa sobre la columna se produce la descarga del suelo blando hasta llegar a un estado final de estabilización de la tensión vertical en ambos materiales. Se representa la relación entre la media ponderada por las áreas y la carga aplicada (ec. 3.6) y se comprueba que toma un valor muy próximo a la unidad. En la mayoría de los escalones de carga de los ensayos se observa una ligera disminución con el tiempo (parte final del escalón) de dicha relación.

Esto puede deberse a la asunción de la hipótesis de áreas de columna y suelo constantes a lo largo del ensayo para el cálculo de la media ponderada (diámetro de la columna constante en el ensayo). Para los incrementos de carga aplicada la deformación radial de la columna es muy pequeña lo que se comprueba de forma visual al finalizar el ensayo tras los cinco escalones de carga y la descarga. Sin embargo, aunque pequeña, la deformación radial de la columna existe, y el valor real del área de la columna es mayor que el supuesto, resultando un valor de la media ponderada por las áreas menor que el real.

Una vez finalizado el proceso de consolidación, las tensiones verticales totales medidas en suelo y columna se estabilizan. Estos valores finales se emplean para definir el factor de concentración de tensiones al final del escalón (relación entre tensión en la columna y en el suelo, considerando como tales los incrementos en el escalón). Los valores que alcanza este factor al final de cada escalón se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Valores del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón. Geometría $N = 4$

Escalón de carga (kPa)	Factor de concentración de tensiones (<i>SCF</i>)				
	Ensayo				
	1N4	2N4	3N4	4N4	5N4
100 – 200	9,96	10,32	10,55	11,59	16,57
200 – 300	7,76	6,91	7,45	9,25	8,61
300 – 400	8,33	4,50	8,14	7,96	5,22
400 – 500	6,37	4,32	5,33	7,18	5,88
500 – 600	4,06	3,34	---	4,66	4,94

En la Figura 3.19 se representan gráficamente los resultados de la Tabla 3.4. El valor del *SCF* obtenido en el primer escalón del ensayo 5N4 presenta una gran

dispersión frente al resto, lo que puede suponer alguna anomalía en la aplicación de la carga de este primer escalón o en el comportamiento del conjunto suelo-columna. La normalidad se reestablece en el resto de escalones del ensayo.

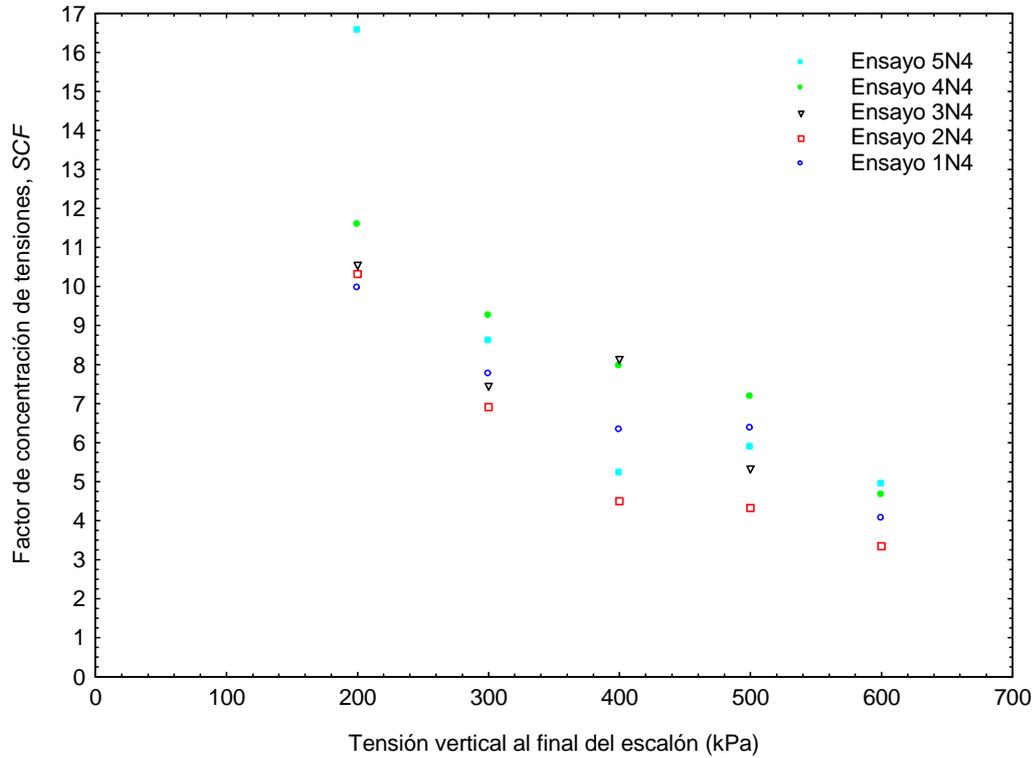


Figura 3.19. Valor del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón. Geometría $N = 4$

Se observa de forma clara que los valores obtenidos van disminuyendo a medida que la tensión vertical es mayor. Esta disminución del *SCF* indica una disminución también de la relación de rigideces entre la columna y el suelo, parámetro que influye en la distribución de la carga entre ambos materiales. Para comprobarlo, se analiza el estado tensional al final de los escalones de carga y se obtienen los módulos del suelo y la columna correspondientes a dichas tensiones. El análisis se realiza de forma general para todos los ensayos puesto que la tensión vertical total en columna y suelo se puede acotar en un rango pequeño para idénticos escalones, independientemente del ensayo estudiado. Esto se resume en la Tabla 3.5 comprobando que, con los valores adoptados para el módulo de deformación del caolín y de la grava (ver apartado 2.2.1 y 2.2.2) para

cada nivel de tensiones, la relación entre ambos disminuye, como indican los valores obtenidos del factor de concentración de tensiones.

Tabla 3.5. Rango de tensión vertical total en suelo y columna al final de cada escalón y módulos de deformación correspondientes. Geometría $N = 4$

Escalón de carga (kPa)	σ_{vc} (kPa)	σ_{vs} (kPa)	E_c (kPa)	E_s (kPa)	E_c/E_s
100 – 200	1180-2180	115-140	30000	1000	30
200 – 300	1640-2775	185-210	30000	1300	23,1
300 – 400	1950-3140	255-280	30000	1700	17,6
400 – 500	2250-3500	320-350	30000	1700	17,6
500 – 600	2490-3865	390-420	30000	2200	13,6

Las tensiones horizontales medidas en la pared lateral de la célula se controlan en tiempo real mediante su representación gráfica frente al tiempo. A modo de ejemplo se muestra en la Figura 3.20 la evolución de estas tensiones en el escalón de carga de 100 a 200 kPa del ensayo 2N4. El resto de las curvas de resultados se adjuntan en el Apéndice D.

Durante la aplicación de la carga sin drenaje, primera fase del escalón, se observa un incremento de las tensiones totales horizontales igual al incremento de carga dado. El instante de apertura del drenaje queda reflejado mediante un acusado descenso de las tensiones, las cuales, a partir de este momento continúan con un descenso suavizado en el tiempo hasta alcanzar un valor constante una vez terminado el proceso de consolidación.

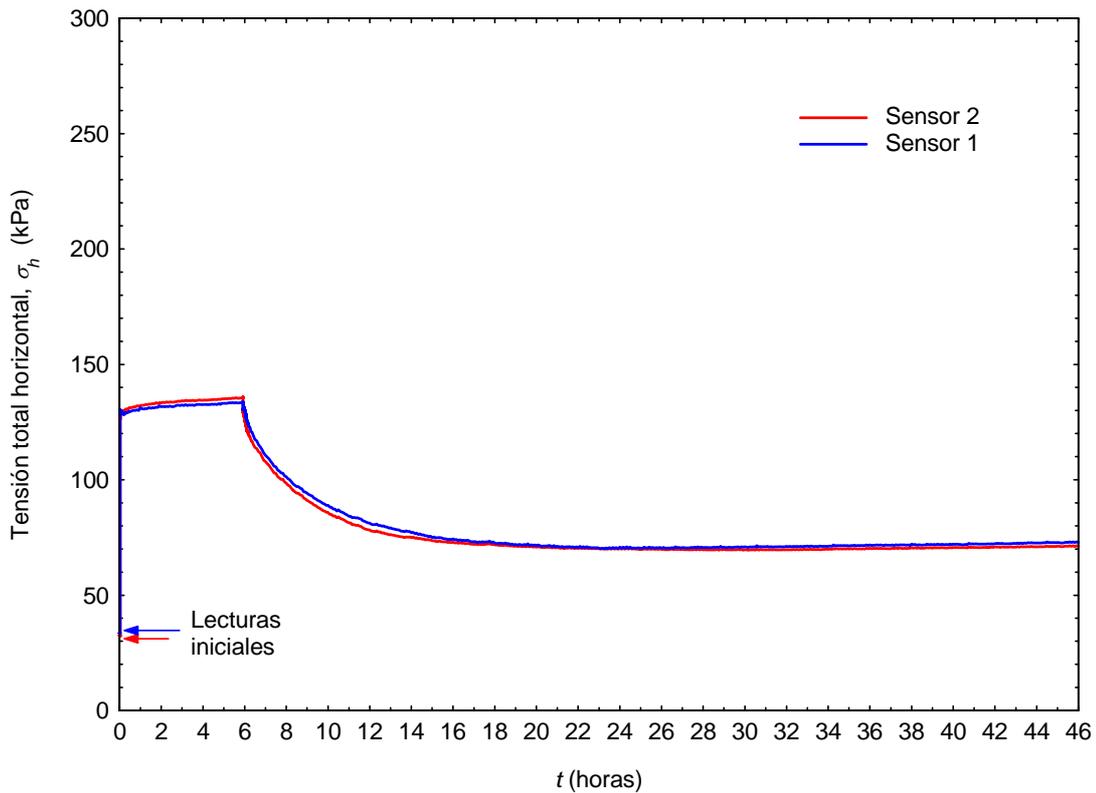


Figura 3.20. Tensiones totales horizontales en el contorno lateral de la muestra. Escalón 100 – 200 kPa. Ensayo 2N4

3.2.3. Deformación vertical

La muestra de ensayo trata de reproducir una rebanada horizontal a una cierta profundidad, representativa de una columna real y el suelo blando circundante, por tanto, cuando se habla de asiento se refiere al de dicha rebanada y no al correspondiente a la integración de la deformación vertical a lo largo de toda la longitud de la columna.

Este asiento de la muestra durante los ensayos se mide con el LVDT dispuesto en la parte superior de la célula. Dadas las condiciones impuestas de carga rígida (ver apartado 2.1) la deformación vertical es uniforme en toda la muestra. Las medidas se realizan durante la fase sin drenaje y durante el proceso de consolidación de la muestra.

En la Figura 3.21, en la gráfica izquierda se presentan las lecturas correspondientes al escalón de carga de 100 a 200 kPa del ensayo 2N4 en escala logarítmica de tiempos. La toma de lecturas comienza un poco antes de la aplicación de la carga, de este modo es posible registrar el momento exacto de inicio del escalón.

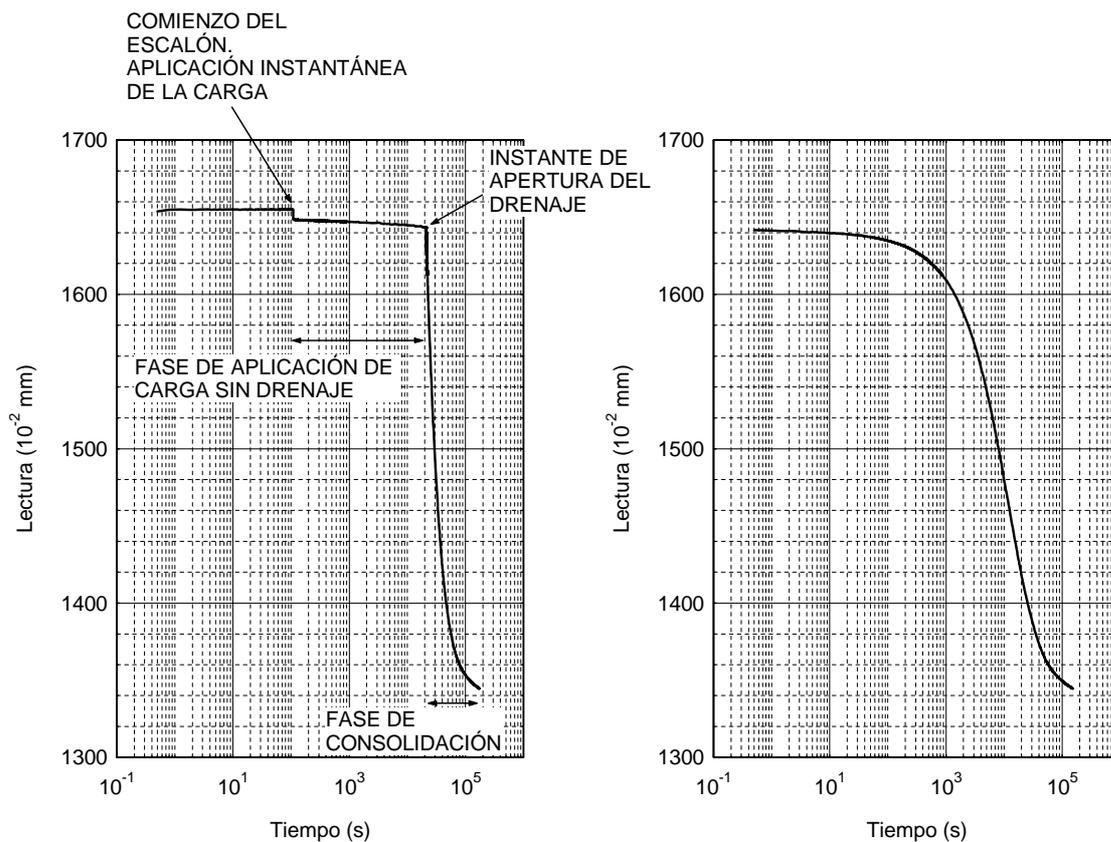


Figura 3.21. Curva de consolidación. Escalón 100 – 200 kPa. Ensayo 2N4.

En dicha figura se observa que en el momento de aplicación de la carga se produce un pequeño descenso de la lectura del LVDT (en el caso que se representa $t \approx 100s$) que se puede deber al ajuste del sistema de aplicación de carga, en concreto al de la goma a través de la cual se aplica la carga. A partir de este momento la lectura permanece constante durante la fase con drenaje cerrado. A continuación, al abrir el drenaje, comienza la evolución de los asientos durante la consolidación de la muestra. En la gráfica situada a la derecha, se presenta únicamente las lecturas tomadas durante la fase de consolidación del escalón, tomando como tiempo de referencia ($t = 0$) el instante de apertura del drenaje. Esta curva es la que realmente ofrece información sobre el proceso de consolidación y la velocidad de desarrollo de los asientos. Por este motivo, en el Apéndice D se adjuntan únicamente estas curvas de consolidación para todos los escalones de carga de los ensayos realizados, sin la representación de las lecturas tomadas durante la fase sin drenaje.

En las obras reales se suele tener datos de los asientos en la superficie del suelo y no de las presiones intersticiales, debido a la dificultad que implica la medida de estas últimas. Por este motivo es muy común calcular el grado de consolidación medio para un tiempo determinado como el cociente entre el asiento en ese tiempo y el asiento final estimado a partir de los índices de compresión y entumecimiento. Luego, a partir del grado de consolidación medio se estima el valor del coeficiente de consolidación para emplearlo en la teoría de la consolidación y obtener tiempos necesarios para que se produzcan determinados asientos. Esta misma forma de proceder se realiza en los ensayos edométricos convencionales en los que no se dispone de medidas de presiones intersticiales. Esta estimación del coeficiente de consolidación a partir del grado de consolidación medio obtenido a través de los asientos, puede dar lugar a errores si no se tienen en cuenta una serie de consideraciones que se detallan a continuación.

Por un lado presencia de consolidación secundaria tiene que ser tenida en cuenta a la hora de estimar los asientos correspondientes al 100% de consolidación. Esto así se hace en la interpretación de los ensayos edométricos convencionales mediante las conocidas correcciones de Casagrande y de Taylor aplicadas a las curvas de consolidación.

En los ensayos que aquí se presentan, se puede observar cierta inclinación del tramo final de las curvas de consolidación (cuando los incrementos de presión intersticial ya están completamente disipados aún se registran asientos en la muestra, ver Figura 3.8 y Figura 3.21

Por otro lado, como se verá en el apartado 3.4.2, la consideración de un comportamiento elástico o elasto-plástico de la columna da lugar a asientos finales de la muestra diferentes entre sí, y a su vez diferentes a los medidos en el conjunto suelo-columna. La plastificación de la columna hace que se interrumpa la transferencia de carga desde el suelo hacia ella, pudiendo incluso aumentar ligeramente la tensión que actúa sobre el suelo. Esta situación hace que el asiento teórico del conjunto sea mayor que bajo la hipótesis de comportamiento elástico. Además, a partir del instante de plastificación de la columna el proceso de consolidación radial se ralentiza con respecto a la tendencia que seguiría si el comportamiento de la columna fuera elástico. A partir de ese instante, el grado de consolidación medio deja de ser el mismo en un tiempo

determinado para el caso de columna elástica y elasto-plástica. Según lo visto, el grado de consolidación medio en un tiempo dentro del tramo inicial del proceso de consolidación (tramo elástico) da valores diferentes en función de que se considere uno u otro asiento como asiento final de la muestra.

Los dos fenómenos anteriores, consolidación secundaria y plastificación de la columna, hacen que para la estimación del coeficiente de consolidación equivalente a partir de las medidas de asientos fuese necesario aplicar una serie de construcciones o correcciones de las medidas que, de alguna manera, eliminaran la influencia de todos estos fenómenos. Sin embargo, este no es el objeto de esta Tesis Doctoral, por lo que no se considera necesario enfocar en ese sentido el análisis de los resultados de los ensayos.

Factor de reducción de asientos

Uno de los aspectos importantes del tratamiento con las columnas de grava es la reducción del asiento que se produce (ver apartado 1.1.3). El motivo principal que lo provoca es la descarga que tiene lugar en el suelo por la presencia de las columnas de grava, pues para una misma carga aplicada en superficie, el suelo mejorado se lleva una menor tensión vertical ya que parte de la misma se encuentra actuando sobre la columna.

El parámetro empleado para evaluar la mejora del conjunto suelo-columna en cuanto a la deformación es el factor de reducción de asientos (ver apartado 1.1.3) que relaciona el asiento que se produce en el suelo blando con y sin columna ($\alpha = s_c/s_o$). El valor de este parámetro ha sido obtenido para cada uno de los ensayos. El valor del asiento sin columna se tiene del ensayo edométrico realizado con caolín en la célula Rowe para la comprobación final del funcionamiento del equipo de ensayo (ver apartado 2.4.3). Por otro lado, de cada uno de los ensayos realizados con columna se tiene el valor del asiento al final del ensayo (fin del escalón de 500 a 600 kPa, salvo en el ensayo 3N4 que finaliza en el escalón de 400 a 500 kPa). Dado que la altura inicial de pastilla no es la misma en el ensayo sin columna que en los ensayos con columna, se ha transformado el asiento sin columna al correspondiente a una altura inicial igual a la altura de la muestra con columna, una vez instalada ésta y sometida a una tensión

vertical de 100 kPa (H_{100}). Para ello se ha empleado los valores de la deformación unitaria en cada ensayo. Una vez referenciados los valores de asiento a la misma altura de pastilla (H_{100}), se obtiene el cociente resultando los valores que se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Valores del factor de reducción de asientos (final del ensayo). Geometría $N = 4$

Ensayo	1N4	2N4	3N4	4N4	5N4
ε_z con columna	0,121	0,126	0,115	0,139	0,133
Factor de reducción de asientos	0,713	0,743	0,752	0,819	0,785
Altura inicial, H_{100} (mm)	79,12	74,52	73,07	72,35	70,24

Nota: ε_z sin columna = 0,1696 salvo en el ensayo 3N4 donde ε_z sin columna = 0,1531

En la Figura 3.22 se muestra la variación del factor de reducción de asientos con el valor de N para varios valores de la relación de rigideces de la columna y el suelo blando, según el análisis realizado por Balaam y Booker (1985). En dicha figura se han representado los valores del coeficiente de reducción de asientos obtenidos en los ensayos.

Se comprueba que la colocación de columnas de grava reduce el asiento en la muestra, dado que el factor de reducción de asientos es inferior a la unidad. Para esta geometría de ensayo, el asiento se reduce entre un 20 y 30% aproximadamente. Comparando los resultados de los ensayos con los obtenidos según el método de Balaam y Booker (1985) se observa que, para la variación de la relación de módulos columna-suelo obtenida en esta geometría de ensayo (E_c/E_s entre 30 y 14, ver Tabla 3.5), la solución teórica predice una mayor reducción del asiento. Sin embargo, esta solución asume un comportamiento elástico de la columna, sin considerar su posible plastificación, la cual tiene lugar en los ensayos como se verá en el apartado 3.4.2. Al producirse la plastificación de la columna, sobre el suelo actúa una carga mayor que en el caso de comportamiento totalmente elástico y por tanto, el asiento es mayor que lo estimado con la solución de Balaam y Booker.

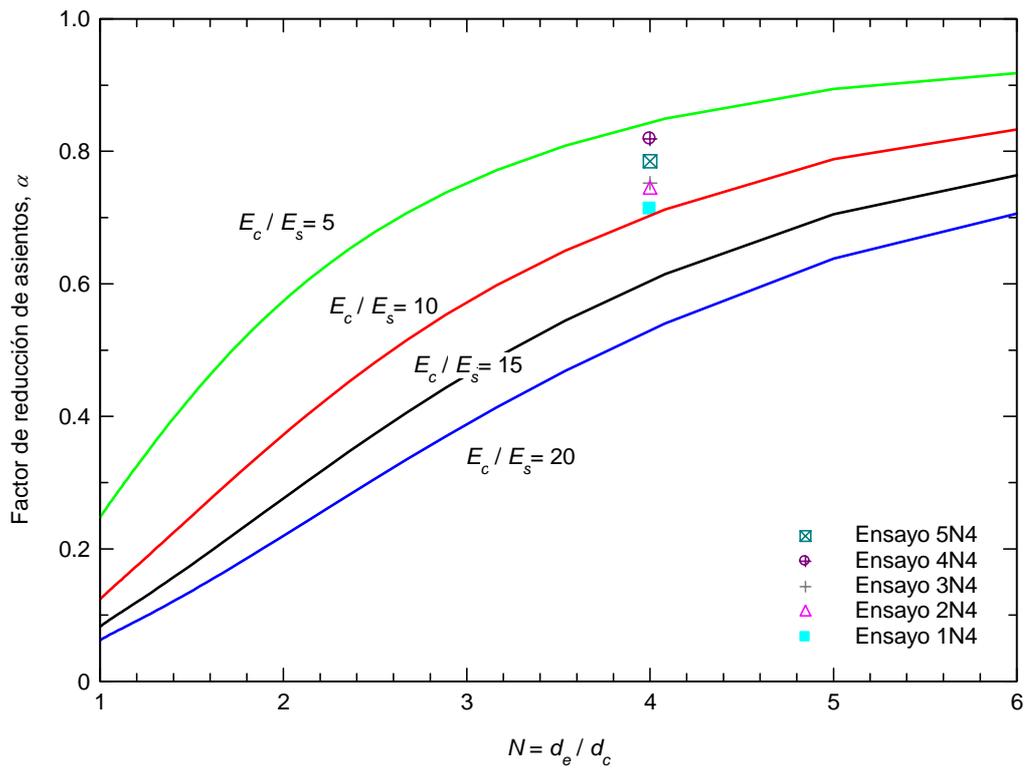


Figura 3.22. Factor de reducción de asientos. Geometría $N=4$. Comparación con el método de Balaam y Booker (1985)

3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA GEOMETRÍA $N = 3$

Los ensayos realizados con una relación de diámetros de $N = 3$ corresponden a un diámetro de columna $d_c = 84,7$ mm, lo que supone un área de sustitución del 11,11%. Los ensayos realizados y su nomenclatura se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Ensayos realizados con geometría $N = 3$

Fecha de ensayo	03-07-07	23-07-07	06-06-08	01-07-08
Identificación	1N3	2N3	3N3	4N3

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a las medidas de presión intersticial, tensión total y asientos realizadas durante los ensayos. Estas medidas se realizan en los sensores dispuestos según se ha justificado en el apartado 2.3.2, cuya posición se resume a continuación:

- presiones intersticiales en la base a distancias radiales de: $r = 49, 53, 58, 69, 84,5$ y 115 mm
- tensiones totales en la base en $r = 22,5$ mm (columna), $49, 58, 69$ y 115 mm (suelo)
- tensión total en dos puntos del contorno lateral en $h = 3$ cm.

Los tiempos a los cuales se realizan lecturas de los sensores se han presentado y justificado en el apartado 2.3.3.

Durante la ejecución de los ensayos 2N3 y 3N3 tuvieron lugar algunas incidencias, todas ellas de pequeña importancia que no influyen a los resultados, por lo que se siguió adelante con los ensayos. En el primer escalón aplicado en el ensayo 3N3, durante la fase de aplicación de carga sin drenaje se produjo una pequeña fuga en el acoplamiento de uno de los sensores de medida de tensión total. Esto motivó un mínimo

drenaje y por tanto la imposibilidad de que el incremento de presión intersticial inicial alcanzase el valor del incremento de carga aplicado. Antes de abrir el drenaje se subsanó este problema. En el Apéndice D, en la figura correspondiente a las lecturas de presiones intersticiales de dicho escalón, se puede observar la diferencia en la tendencia observada. Además, en el ensayo 2N3 no se pudieron tomar lecturas de presión intersticial en el punto más próximo a la columna puesto que al abrir el drenaje la lectura se anulaba de manera instantánea. Al igual que sucediera en la geometría anterior en uno de los ensayos, el motivo del drenaje inmediato en ese punto es la presencia de una pequeña cantidad de la arena colocada bajo la columna. En el último escalón del ensayo 2N3, en el transcurso del proceso de consolidación radial se produce el atasco del transductor de medida de presión intersticial más próximo a la pared lateral. Todo esto se encuentra registrado en las figuras correspondientes de medidas de presión intersticial adjuntas en el Apéndice D.

3.3.1. Presiones intersticiales

Al igual que para la geometría $N = 4$, durante cada escalón de carga se realizan medidas de los incrementos de presión intersticial en los distintos sensores correspondientes a esta geometría.

Los resultados de presiones intersticiales se representan gráficamente de las mismas formas que para la geometría anterior. La más sencilla es la que corresponde al modo de observación en tiempo real durante el ensayo. En ella se representan las lecturas de cada uno de los transductores frente al tiempo. A modo de ejemplo, en la Figura 3.23 se muestran las lecturas de incremento de presión intersticial (Δu) con respecto al incremento inicial (Δu_0 , igual al incremento de presión aplicado en el escalón) registrado en cada punto de medida durante uno de los escalones de carga del ensayo 1N3. Se observa la primera parte de aplicación de carga sin drenaje con un aumento de las presiones intersticiales hasta un valor igual al incremento de carga aplicado y una segunda parte durante la cual se produce la consolidación del caolín al permitir el drenaje radial de la muestra hacia la columna.

En la figura se comprueba que la disipación de las presiones intersticiales es más rápida en los puntos más cercanos a la columna lo que resulta lógico ya que el camino de drenaje es menor.

El resto de curvas para los distintos escalones de los cuatro ensayos se recogen en el Apéndice D.

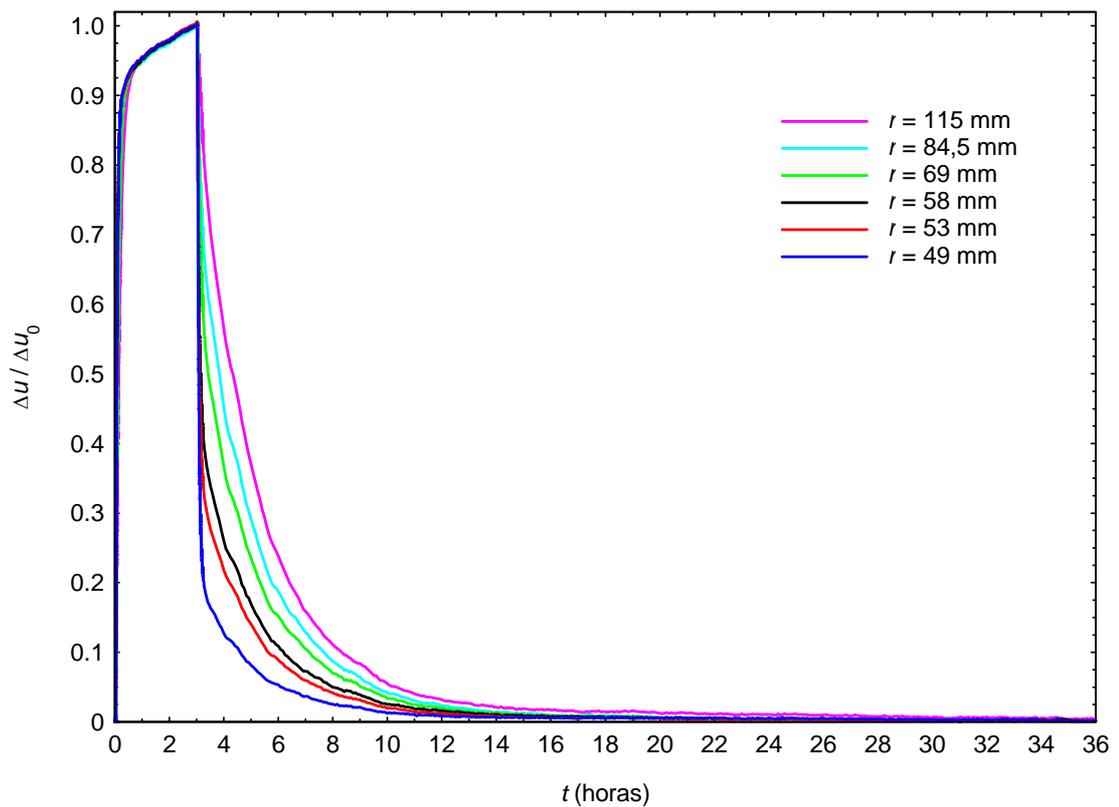


Figura 3.23. Medidas de presión intersticiales a lo largo del tiempo durante el escalón de carga 200-300 kPa. Ensayo 1N3

El segundo modo de representación muestra la disipación de las presiones intersticiales a lo largo de un radio fijo. En la Figura 3.24 se muestra el mismo escalón de carga de la Figura 3.23. Los resultados de todos los escalones de carga de todos los ensayos se adjuntan también en el Apéndice D.

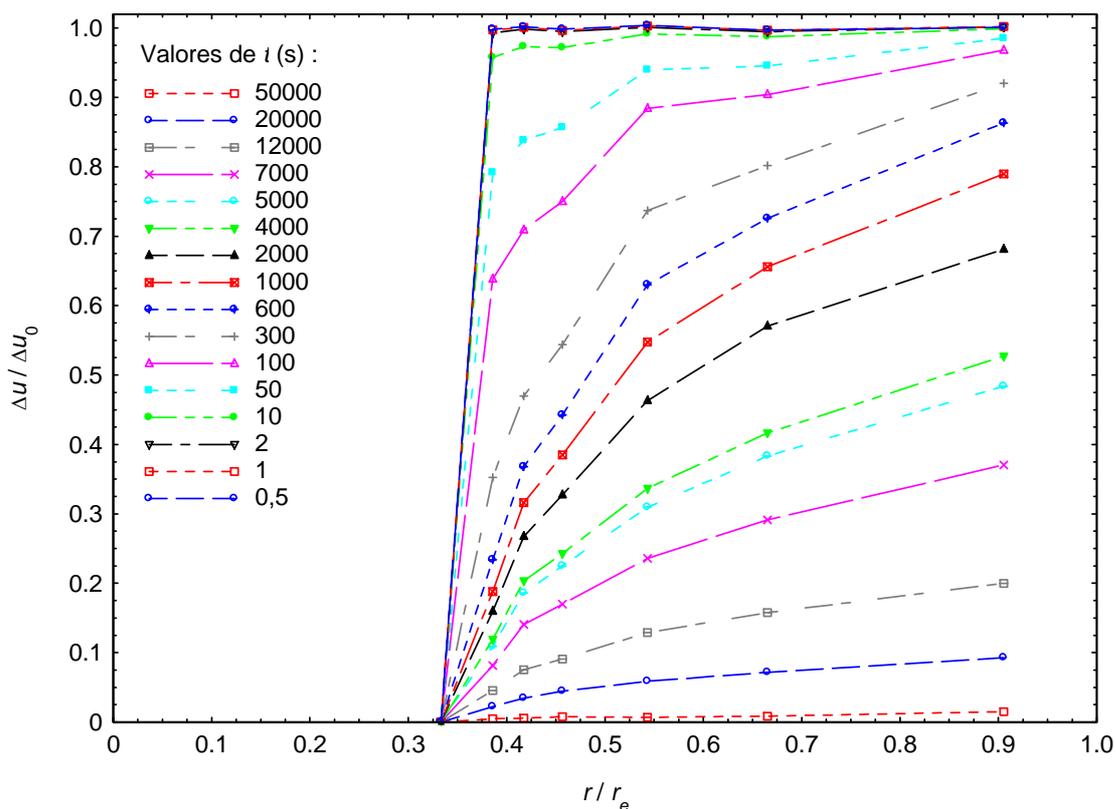


Figura 3.24. Medidas de presiones intersticiales a lo largo de un radio. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3

Estimación de c_{vr}^{eq} a utilizar en la solución de Barron para reproducir los resultados

Del mismo modo que se hiciera en los ensayos con la geometría $N = 4$ (apartado 3.2.1), se realiza una estimación del coeficiente de consolidación equivalente de la muestra según dos métodos distintos a partir de las medidas de presiones intersticiales realizadas a distintas distancias radiales en el suelo blando y para distintos tiempos. El proceso seguido para la estimación y su justificación es idéntico al presentado en dicho apartado.

En el primero de los métodos de estimación se realiza usando las lecturas realizadas en tiempos iguales o superiores a los 2000s, puesto que para esta geometría también se consigue un ajuste aceptable a partir de ese instante (justificación en el apartado 3.2.1).

En la Figura 3.25 se muestran las medidas junto con sus curvas de ajuste y el valor de c_{vr}^{eq} del escalón 200-300 kPa del ensayo 1N3.

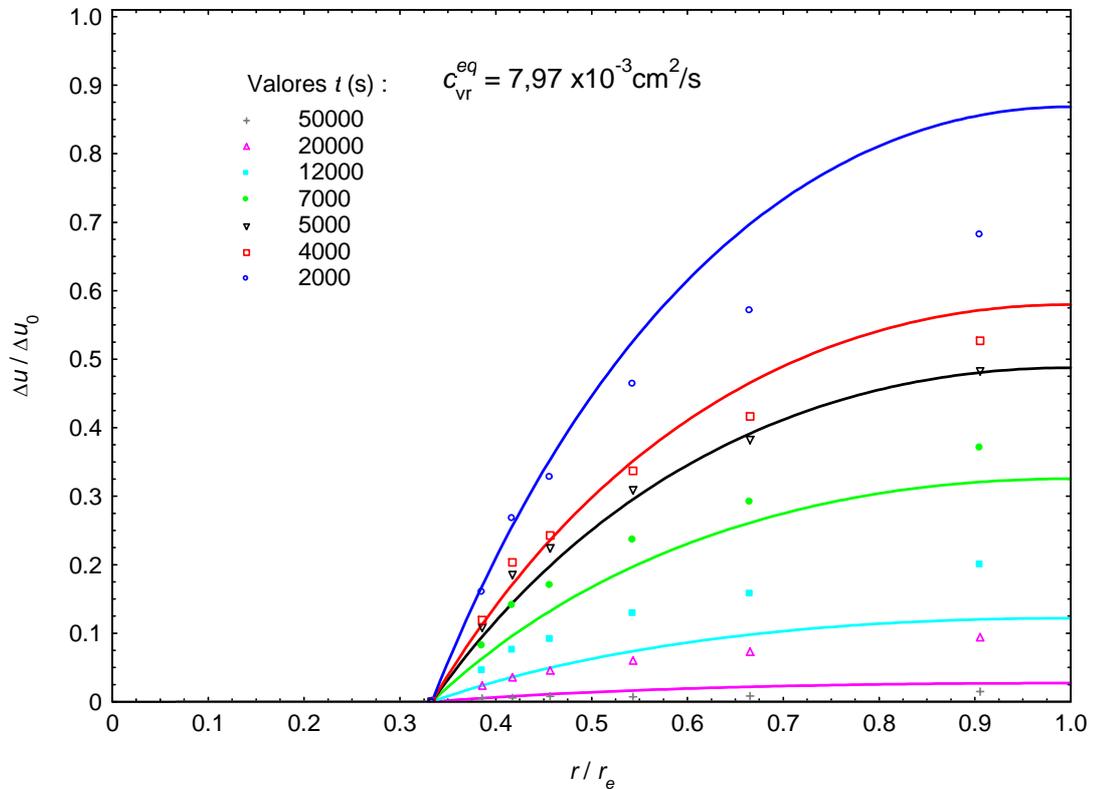


Figura 3.25. Presiones intersticiales medidas e isócronas obtenidas con la solución de Barron empleando el coeficiente de consolidación estimado. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3

En todos los escalones de todos los ensayos se observa que, con el coeficiente de consolidación radial obtenido mediante este método, el mejor ajuste a la solución teórica de Barron se consigue para un grado de consolidación de aproximadamente el 65%. De los resultados obtenidos se observa que la solución de Barron subestima el valor del coeficiente de consolidación radial para grados de consolidación menores del 65%, resultando una consolidación real más rápida que la predicha por la teoría y la sobrestima en su tramo final para grados de consolidación superiores al dado.

Los valores obtenidos de c_{vr}^{eq} en cada uno de los escalones de carga de cada ensayo se muestran en la Tabla 3.8. Estos valores del coeficiente de consolidación radial son los que mejor reproducen los valores de medidas de presiones intersticiales en el escalón de carga correspondiente, si se emplea la solución de Barron para su análisis.

Tabla 3.8. Valores de c_{vr}^{eq} estimados a partir de las medidas de Δu , a utilizar en la solución de Barron para reproducir el ensayo. Geometría $N = 3$

Escalón de carga (kPa)	c_{vr}^{eq} ($\times 10^{-3}$ cm ² /s)			
	Ensayo			
	1N3	2N3	3N3	4N3
100 – 200	10,50	9,22	9,11	8,29
200 – 300	7,97	8,10	7,43	6,63
300 – 400	8,79	8,16	6,51	6,35
400 – 500	8,49	7,93	6,45	6,60
500 – 600	10,30	8,25	7,25	7,46

En este caso los valores de c_{vr}^{eq} no siguen una tendencia continua a aumentar a medida que lo hace la carga aplicada en el escalón, como lo hicieran los valores estimados en la geometría $N = 4$. Sin embargo, si que se puede observar que el valor estimado en el primer escalón de cada ensayo es superior al resultado obtenido en el escalón siguiente, igual que sucede en la geometría $N = 4$. Este comportamiento se debe a que el suelo blando se encuentra sobreconsolidado durante un tiempo al inicio de este primer escalón, debido a que previamente a la construcción de la columna de grava se consolida a una tensión de 100 kPa y después de construida se vuelve a aplicar la misma tensión, pero la presencia de la columna hace que el suelo blando no recupere el nivel de tensiones previo (RSC entre 1,6 y 2,1 en los ensayos realizados con esta geometría). El coeficiente de consolidación de un material aumenta a medida que lo hace su RSC , por eso en este escalón se estiman valores superiores al siguiente escalón donde el caolín ya se encuentra normalmente consolidado y por tanto su coeficiente de consolidación disminuye.

Para cada escalón de carga se realiza una segunda estimación del coeficiente de consolidación radial. Para ello, al igual que en la geometría $N = 4$, partiendo de las

lecturas de los transductores se obtiene el valor de la presión intersticial media en un radio para distintos tiempos (aquellos representados en las curvas de medidas, ver Figura 3.24). Para ello se emplean unas curvas de suavizado de las medidas realizadas que, posteriormente, se integran a toda la corona de suelo blando, obteniendo así el valor medio del incremento de presión intersticial en el radio ($\overline{\Delta u_r}$). Finalmente se calcula el grado de consolidación medio de la muestra a partir del valor de la presión intersticial media calculada para cada uno de los tiempos considerados, según la ec. (3.4).

En la Figura 3.26 se representa, a modo de ejemplo, el grado de consolidación medio correspondiente a las medidas durante el escalón 200-300 kPa del ensayo 1N3, obtenido a partir de su integración del modo que se ha descrito para la geometría $N = 4$. En la misma figura se muestran los resultados de la aplicación la solución de Barron para drenes verticales. En ese caso, el coeficiente de consolidación que se utiliza para el análisis del proceso es el del caolín. Para el escalón que se representa en la figura, se ha considerado el correspondiente al mismo escalón de carga (200-300 kPa) obtenido en el ensayo edométrico en célula Rowe cuyos resultados se presentan en el apartado 2.4.3 ($c_{vr} = 2,55 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$). Como cabía esperar, el proceso de consolidación con columna obtenido en el ensayo es más rápido que el estimado a partir de la solución de Barron con el coeficiente de consolidación del caolín. Esto es debido a que dicha solución es para drenes verticales, mientras que la presencia de la columna acelera la consolidación. Para que la solución de Barron reprodujese mejor los resultados de los ensayos, se necesitaría realizar una traslación de la curva U_r-t hacia el origen (tiempos menores de consolidación). Para ello, se debe considerar un coeficiente de consolidación equivalente mayor que el del caolín, que englobe todas las condiciones existentes en el ensayo en cuanto a geometría (área de sustitución), valor real de la relación de rigideces columna-suelo y comportamiento de la columna (elástico o elasto-plástico).

Para evaluar la traslación necesaria y obtener el valor del coeficiente de consolidación equivalente para reproducir los resultados de los ensayos, calcula el grado de consolidación medio dado por la solución teórica de la consolidación (ec. 3.5), la cual es función del c_{vr}^{eq} que se pretende estimar a través del factor de tiempo. Se toma como resultado el valor del coeficiente de consolidación radial que hace mínima la

suma del error cuadrático entre los valores teóricos y los obtenidos en el ensayo. De este modo se obtiene un único coeficiente de consolidación radial, c_{vr}^{eq} , para cada escalón de carga, que se considera constante a lo largo del mismo. En la Figura 3.26 se representa también la curva correspondiente al c_{vr}^{eq} estimado para el escalón de carga representado, observándose en los resultados la traslación necesaria de la curva obtenida para la solución con drenes. Los valores obtenidos en cada uno de los escalones de carga de los distintos ensayos realizados se presentan en la Tabla 3.9.

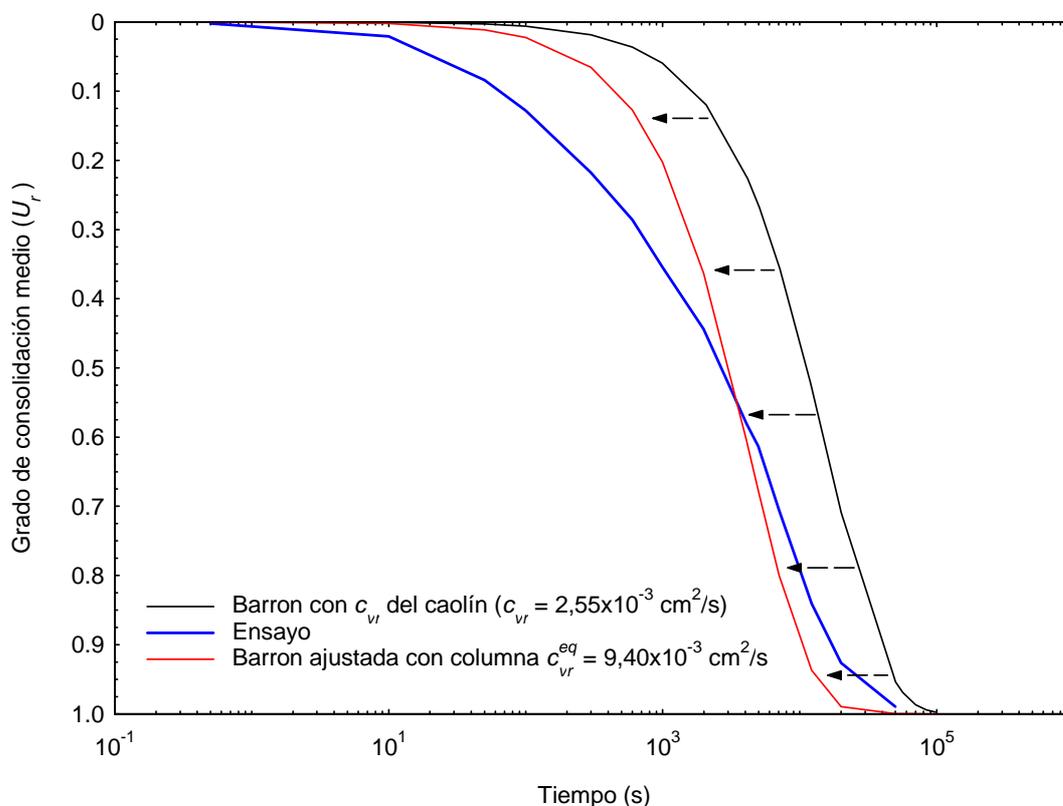


Figura 3.26. Grado de consolidación medio. Comparación con la solución teórica. Escalón de carga 200- 300 kPa. Ensayo 1N3

Al igual que ocurriera en el método de ajuste anterior, la solución teórica subestima el valor del coeficiente de consolidación para grados de consolidación inferiores al 60% y lo sobrestima para los superiores. En torno a ese valor, los resultados teóricos y experimentales se ajustan correctamente.

Tabla 3.9. Valores de c_{vr}^{eq} estimados a partir del grado de consolidación medio, a utilizar en la solución de Barron para reproducir el ensayo. Geometría $N = 3$

Escalón de carga (kPa)	c_{vr}^{eq} ($\times 10^{-3}$ cm ² /s)			
	Ensayo			
	1N3	2N3	3N3	4N3
100 – 200	12,64	10,01	10,57	9,18
200 – 300	9,40	9,12	8,63	7,44
300 – 400	11,44	9,42	7,45	7,16
400 – 500	10,30	8,90	7,41	7,53
500 – 600	13,72	9,40	8,40	8,57

Al igual que en el ajuste anterior, no hay una clara tendencia a aumentar con los escalones del valor de c_{vr}^{eq} estimado, aunque si se puede observar que los valores en los escalones intermedios son menores a los correspondientes al último escalón. Sin embargo, el valor estimado en el primer escalón de todos los ensayos es considerablemente mayor al estimado en el escalón siguiente y el comportamiento es claro en los cuatro ensayos realizados. Como se describe en el anterior método de ajuste y en los ensayos con la geometría $N = 4$ (donde también es perceptible esta situación), el motivo es que la muestra se encuentra sobreconsolidada al inicio de este primer escalón y el coeficiente de consolidación del caolín aumenta con su razón de sobreconsolidación. Esa diferencia entre los valores estimados en el primer y segundo escalón es más acusada para los ensayos de la geometría $N = 3$ que para los correspondientes a $N = 4$, lo que es lógico ya que la razón de sobreconsolidación del suelo es superior en la geometría con mayor diámetro de columna ($N = 3$).

Los resultados obtenidos con ambos métodos de estimación (a partir de la distribución de presiones intersticiales o isócronas y ajuste del grado de consolidación

medio) se encuentran muy próximos a los obtenidos a partir de la distribución de presiones intersticiales a lo largo de un radio y su ajuste a la solución teórica de Barron (Tabla 3.8).

3.3.2. Tensiones totales. Factor de concentración de tensiones

A partir de las lecturas realizadas en los transductores de tensión vertical total en el suelo y en la columna se conoce el reparto de cargas entre ambos materiales durante la aplicación de cada escalón de carga, tanto en la parte sin drenaje como durante el proceso de consolidación radial. En la Figura 3.27 y en la Figura 3.28 se presenta el registro de tensiones totales durante un escalón de carga en la columna y en el suelo respectivamente. En ellas se encuentra descontada la presión de cola aplicada durante el ensayo (300 kPa para todos los ensayos). Esta representación gráfica coincide con la observada en tiempo real durante el ensayo. Se puede diferenciar claramente las dos partes del escalón de carga. Instantáneamente, la aplicación de la carga sin drenaje provoca un aumento inicial de las tensiones verticales tanto en el suelo como en la columna igual al incremento de tensión total vertical aplicada (100 kPa). A partir del instante de apertura del drenaje ($t=3h$ en el caso presentado en la Figura 3.27), las tensiones verticales en la columna aumentan hasta estabilizarse una vez disipadas las presiones intersticiales en el caolín y terminado por tanto el proceso de consolidación radial.

El resto de los resultados correspondientes a las lecturas de las tensiones verticales que actúan sobre la columna y el suelo en cada uno de los escalones de todos los ensayos realizados se adjunta en el Apéndice D, donde los valores representados son directamente las lecturas realizadas por los sensores, es decir, sin descontar la presión de cola aplicada. En varios escalones de algunos ensayos con geometría $N = 3$ (2N3 y 3N3) se observa una diferencia significativa en la lectura de los dos sensores de tensión en la columna. Este hecho no se ha dado de forma tan acusada en la geometría $N = 4$. Una mejora en este sentido podría haber sido la colocación de tres transductores de medida en lugar de dos, para tener una tercera lectura de comprobación. En cualquier caso, la respuesta de ambos sensores frente a las acciones de aplicación instantánea de la carga y apertura instantánea del drenaje es similar, lo que hace pensar que no existe

un comportamiento inadecuado de ninguno de ellos. La diferencia de lecturas puede deberse a un enrase inadecuado de la columna, lo que originaría que sobre alguna zona de la columna actuase mayor tensión que en el resto. Para interpretaciones posteriores se toma el valor medio de las lecturas.

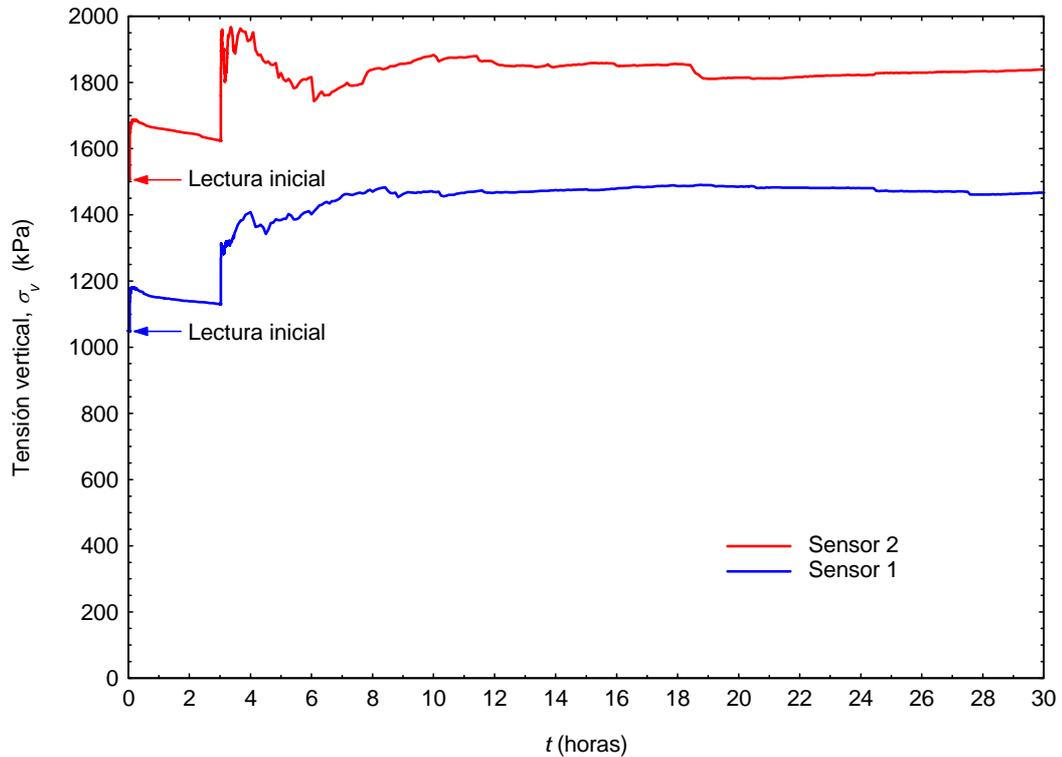


Figura 3.27. Tensiones totales verticales en la columna. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3

En la Figura 3.28 se presentan las medidas de tensiones totales verticales en el suelo para el mismo escalón que las representadas en la columna. Se observa el instante de apertura del drenaje con un descenso de las tensiones verticales en todos los puntos debido a la transferencia inmediata de carga desde el suelo a la columna. En ese instante comienza la disipación de presiones intersticiales y con ello la transferencia de carga desde el caolín hacia la columna de grava. Los puntos próximos a la columna sufren un descenso inicial de la tensión total más acusado pero se produce una recuperación en el tiempo hasta llegar al valor medio final que actúa sobre el caolín ($r = 49$ mm). Los puntos más alejados registran un descenso inicial menor, siguiendo esa tendencia descendente hasta converger en el valor medio de la carga final que actúa sobre el caolín. Este comportamiento se da en el punto $r = 69$ y 115 mm, siendo el punto $r = 58$ mm una transición entre el comportamiento anterior y éste.

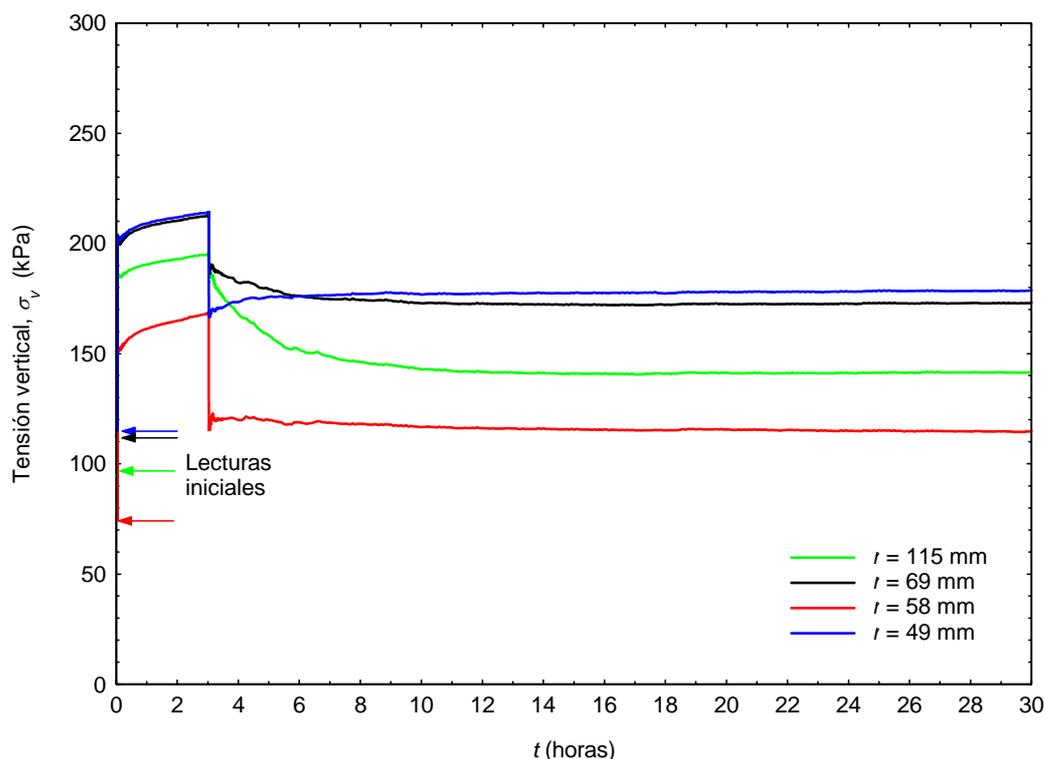


Figura 3.28. Tensiones totales en el caolín. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3

Estas tendencias se corresponden con lo que cabe esperar dada la condición de carga rígida aplicada en superficie. En la Figura 3.29 se representa las curvas teóricas de la tensión vertical en el suelo a lo largo de un escalón de carga para distintas distancias radiales. Para ello, al igual que se describe en la geometría $N = 4$ (apartado 3.2.2), los radios analizados se han elegido dividiendo en cincuenta partes la longitud de suelo ($r_e - r_c$), representando únicamente siete de ellas de manera reflejen los distintos comportamientos en función de la distancia del punto al elemento drenante. Al igual que en la geometría $N = 4$, se ha utilizado la solución de Han y Ye (apartado 1.2.1) con los mismos valores de los módulos edométricos del suelo y columna ($E_{mc} = 39200$ kPa y $E_{ms} = 1400$ kPa) y un valor del coeficiente de consolidación equivalente de $c_{vr}^{eq} = 12,11 \times 10^{-3}$ cm²/s, obtenido a partir del valor del coeficiente de consolidación del caolín sin columna ($c_{vr} = 2,69 \times 10^{-3}$ cm²/s) para el primer escalón de carga, según la relación dada por los autores entre ambos coeficientes de consolidación. Para distintos tiempos se ha obtenido el valor de la presión intersticial a distintos radios (u), el valor medio de la presión intersticial en el radio (\overline{u}_r) y la tensión vertical media en el suelo ($\overline{\sigma}_{vs}$). La diferencia entre $\overline{\sigma}_{vs}$ y \overline{u}_r es el valor de la tensión efectiva en el suelo, igual para todos

sus puntos. Trasladando la curva de las presiones intersticiales a lo largo del radio, una magnitud igual a dicha tensión efectiva, se han obtenido las curvas de la tensión vertical total en distintos puntos del suelo. En las curvas teóricas así obtenidas se pone de manifiesto el comportamiento descrito en los resultados de los ensayos, con respecto a la evolución de las tensiones en el suelo dependiendo de la distancia del punto al elemento drenante.

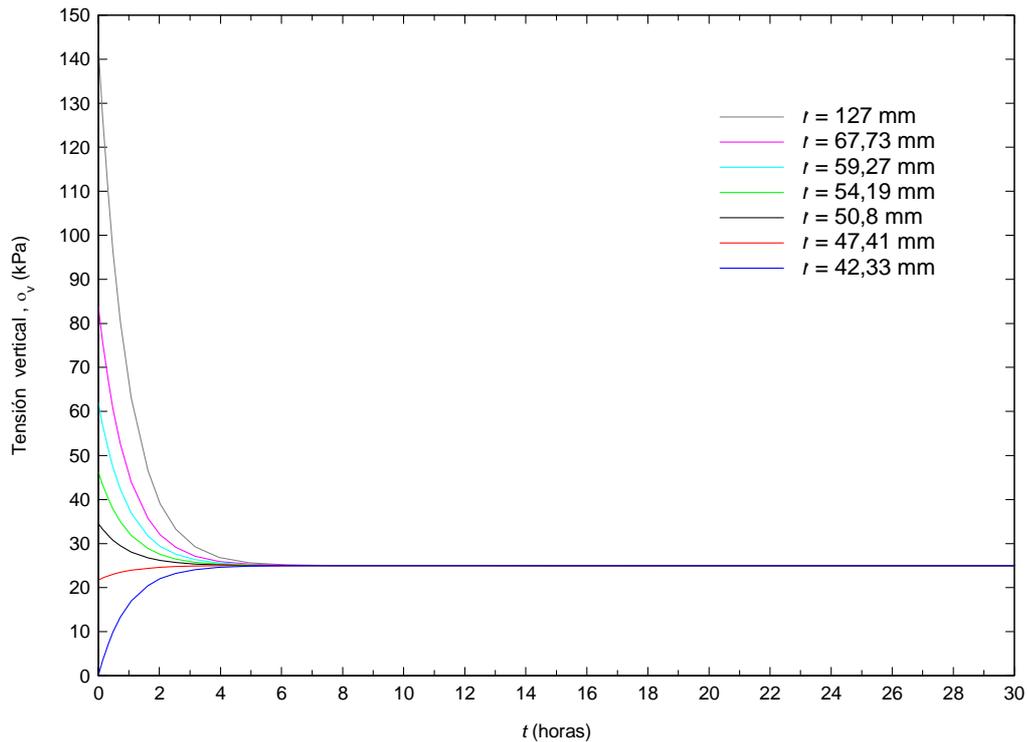


Figura 3.29. Tensiones totales verticales teóricas a distintos radios en el suelo. Solución de Han y Ye (2001). Geometría $N = 3$

En la Figura 3.30 se muestra la evolución del incremento de la tensión vertical total ($\Delta\sigma_v$) con respecto al incremento de carga aplicado en el escalón (Δp) con el tiempo tanto en la columna como en el caolín a lo largo del radio. La tensión vertical en la columna se considera constante a lo largo del radio, por lo que se toma el valor medio de las lecturas de los dos sensores como valor de la tensión vertical total actuando sobre ella. En el suelo se presentan las medidas de cada transductor a medida que el proceso de consolidación y el asiento van teniendo lugar. Se observa el aumento de la carga que actúa sobre la columna a medida que el proceso de consolidación avanza. El resto de los resultados de los escalones de todos los ensayos se adjuntan en el Apéndice D. En

bastantes escalones de los cuatro ensayos realizados con esta geometría (300-400 kPa, 400-500 kPa y 500-600 kPa de todos los ensayos) se ha observado que para un tiempo $t=0,5s$, la relación entre el incremento de carga vertical soportada y el incremento de carga aplicada es menor que la unidad para la columna y ligeramente superior para el suelo, lo que implica que la columna se encuentre menos cargada que el suelo blando circundante. Sin embargo, esto no ocurre de forma sistemática en todos los escalones, como puede verse en el caso representado en la Figura 3.30. Este comportamiento está justificado según la teoría existente, tal y como se describe en el apartado 3.2.2 de la geometría $N = 4$.

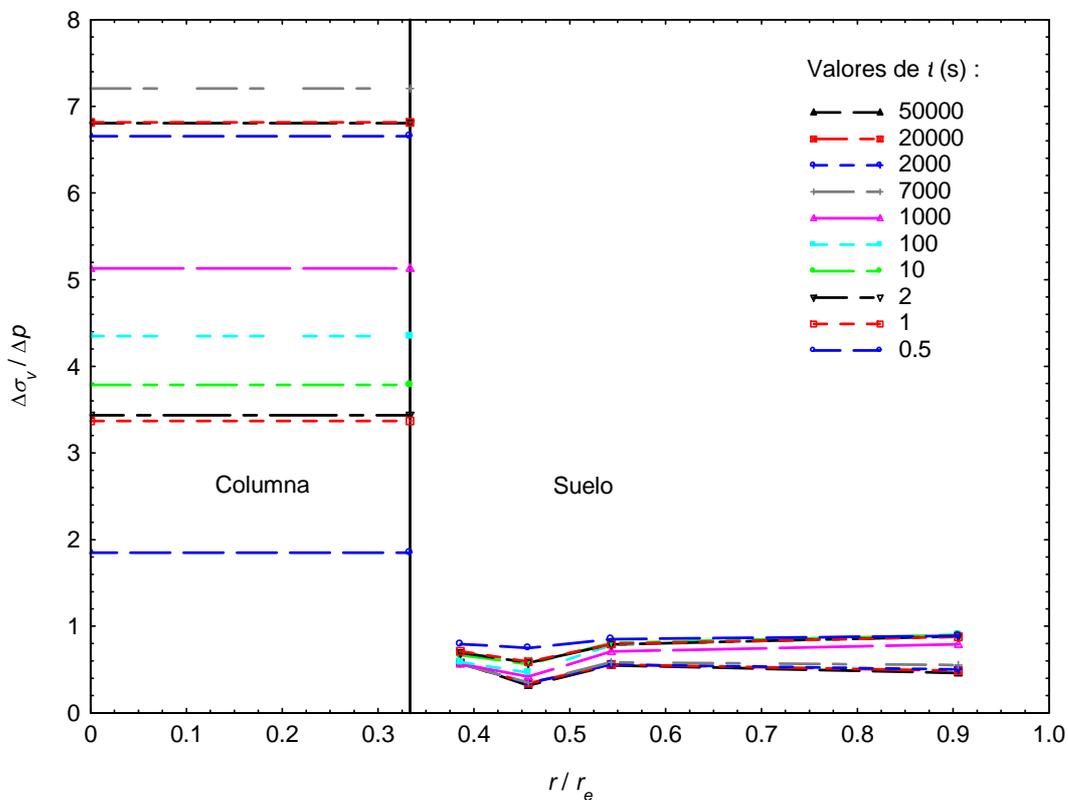


Figura 3.30. Reparto de tensión total vertical en el caolín y en la columna en el tiempo. Escalón 200 – 300 kPa. Ensayo 1N3

En la Figura 3.31 se muestra la tensión vertical media en el suelo y en la columna en función del tiempo, comprobando el equilibrio entre la tensión leída en ambos materiales y la tensión aplicada al conjunto. Se considera el valor medio de las dos lecturas de tensión vertical total en la columna. En el cálculo de la tensión media del suelo, puesto que las lecturas se realizan a diferentes radios se toma como valor medio

de la tensión vertical total el obtenido ponderando cada una de las medidas por su área tributaria. Se observa de manera clara el aumento de la carga que actúa sobre la columna y la descarga del suelo blando que se produce durante el escalón hasta llegar a un estado final de equilibrio de la tensión vertical en ambos materiales. Se comprueba que la relación entre la media ponderada por las áreas y la carga aplicada (ec. 3.6) toma un valor muy próximo a la unidad como corresponde. Al igual que ocurre en la geometría de ensayo con $N = 4$, en la mayoría de los escalones de carga de los cuatro ensayos realizados se observa una ligera disminución con el tiempo (parte final del escalón) de dicha relación. La justificación de este comportamiento es la consideración de las áreas de columna y suelo constantes a lo largo del ensayo para el cálculo de la media ponderada (diámetro de la columna constante en el ensayo), como se describe en el apartado 3.2.2.

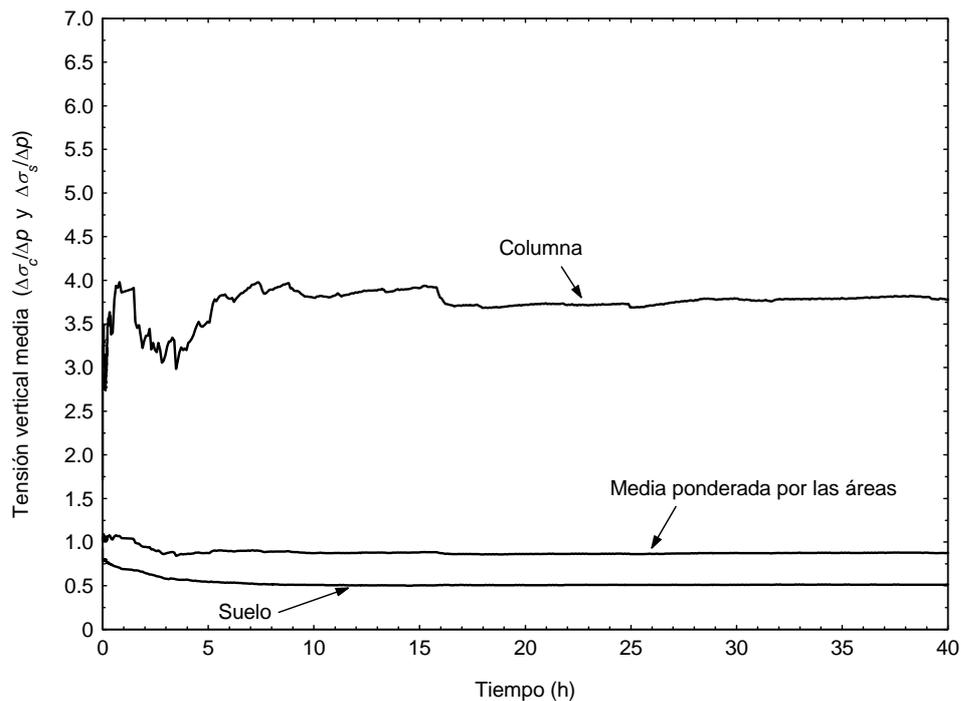


Figura 3.31. Evolución con el tiempo de las tensiones en el suelo y la columna. Geometría $N = 3$

Una vez finalizado el proceso de consolidación, las tensiones verticales totales medidas en suelo y columna se estabilizan. Estos valores finales se emplean para definir el factor de concentración de tensiones al final de cada escalón (relación entre tensión en la columna y en el suelo, considerando como tales los incrementos en el escalón).

Los valores que alcanza este factor al final de cada escalón se presentan en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Valores del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón. Geometría N = 3

Factor de concentración de tensiones (<i>SCF</i>)				
Escalón de carga (kPa)	Ensayo			
	1N3	2N3	3N3	4N3
100 – 200	13,37	9,58	2,68	6,32
200 – 300	7,30	19,39	5,34	5,46
300 – 400	6,32	9,28	3,25	7,04
400 – 500	5,82	9,47	4,14	5,47
500 – 600	4,80	4,78	5,03	2,52

En la Figura 3.32 se presentan estos resultados de forma gráfica. En el ensayo 1N3 se aprecia una disminución de los valores del *SCF* a medida que la carga aplicada en el escalón aumenta. Esta tendencia no resulta clara en el resto de los ensayos. El ensayo 2N3 presenta la misma pauta pero la disminución con los escalones es menos acusada, con la excepción del valor obtenido en el segundo escalón que es anormalmente elevado. En el ensayo 3N3 no se puede establecer una similitud de comportamiento con el resto de ensayos. Se considera que hay un problema en las lecturas de las tensiones totales en el suelo o en la columna (o en ambas) utilizadas para el cálculo del *SCF*. En el ensayo 4N3, el valor del *SCF* aumenta ligeramente en el escalón intermedio con respecto al anterior, pero en el resto sigue la tendencia de disminución. Esta dispersión en los resultados resulta a veces inevitable en los estudios experimentales.

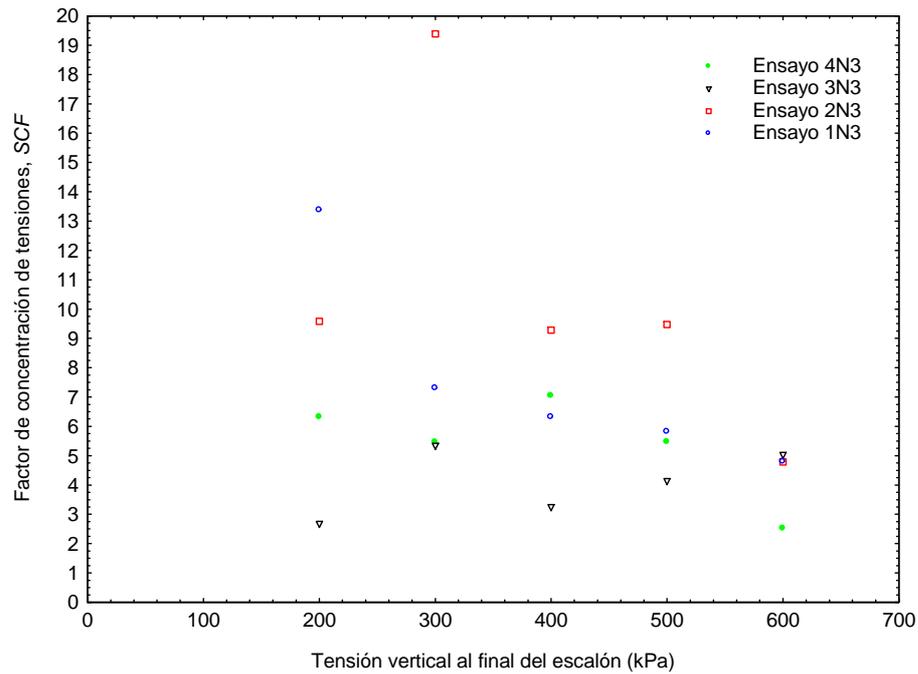


Figura 3.32. Valor del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón de los ensayos con geometría $N = 3$

Una disminución del SCF se encontraría en concordancia con una disminución de la relación de rigideces columna-suelo como se justifica también en el apartado 3.2.2. Para comprobar si esto ocurre en los ensayos, se estudian las tensiones que soportan ambos materiales en los distintos escalones de carga y los valores del módulo de deformación de cada material para cada nivel de tensiones (ver Tabla 3.11).

Tabla 3.11. Rango de tensión vertical total en suelo y columna al final de cada escalón y módulos de deformación correspondientes. Geometría $N = 3$

Escalón de carga (kPa)	σ_{vc} (kPa)	σ_{vs} (kPa)	E_c (kPa)	E_s (kPa)	E_c/E_s
100 – 200	450-1700	85-110	30000	1000	30
200 – 300	1020-2080	135-160	30000	1000	30
300 – 400	1200-2530	190-210	30000	1300	23,1
400 – 500	1415-2875	240-275	30000	1700	17,6
500 – 600	1715-3035	300-335	30000	1700	17,6

La relación de módulos comienza con un valor aproximado de 30 para los dos primeros escalones de carga y desciende a 17,6 en los últimos.

En cuanto a las tensiones horizontales en el contorno lateral impermeable, en la Figura 3.33 se muestran los resultados obtenidos en el escalón de carga de 200 a 300 kPa del ensayo 1N3. Se distingue de forma clara la primera etapa de aplicación de carga sin drenaje, durante la cual las tensiones totales horizontales sufren un incremento de igual valor al aplicado en superficie. El instante de apertura del drenaje en la columna queda plasmado por un descenso acusado de la medida. Seguidamente, a lo largo del proceso de consolidación radial del escalón, el descenso de las tensiones totales horizontales continúa de manera más suave hasta estabilizarse una vez finalizada la consolidación. El resto de las curvas de resultados se adjuntan en el Apéndice D.

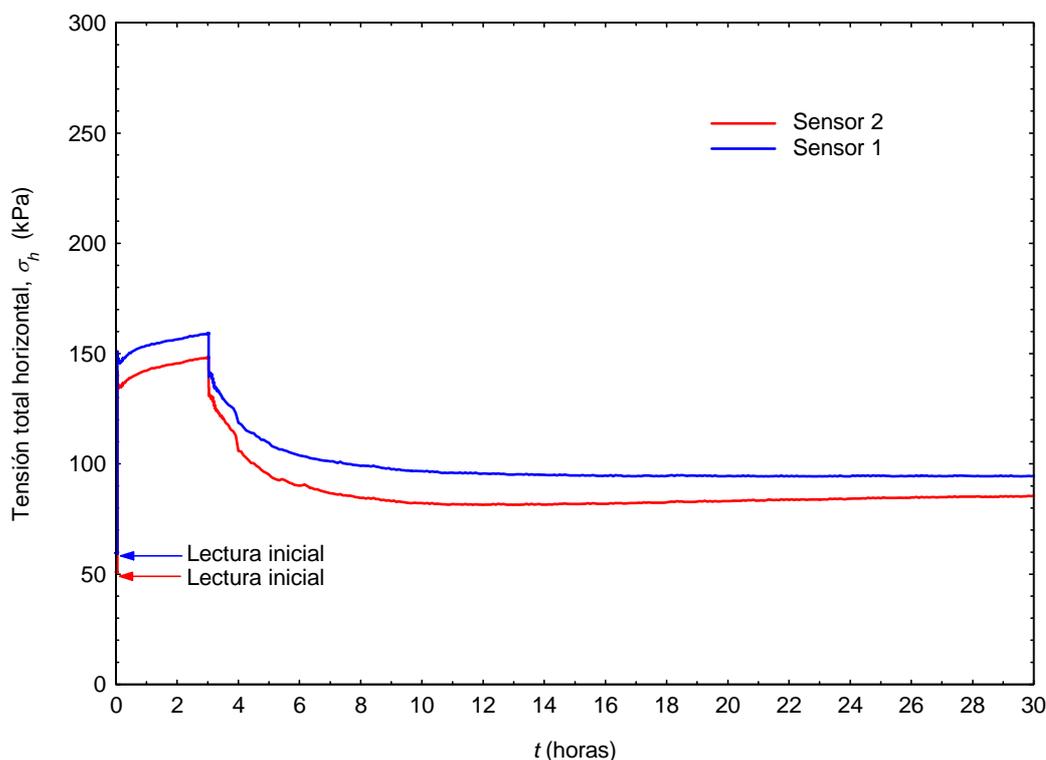


Figura 3.33. Tensiones totales horizontales en el contorno lateral de la muestra. Escalón 200 – 300 kPa. Ensayo 1N3

3.3.3. Deformación vertical

Como se describe en el apartado 3.2.3 para la geometría $N = 4$, la muestra de ensayo trata de reproducir una rebanada horizontal a una cierta profundidad,

representativa de una columna real y el suelo blando circundante. Por tanto, cuando se habla de asiento se refiere al de dicha rebanada y no al correspondiente a la integración de la deformación vertical a lo largo de toda la longitud de la columna.

Del mismo modo que para la geometría $N = 4$, los asientos durante los ensayos, uniformes en la muestra, se miden a través del LVDT dispuesto en la parte superior de la célula. Las medidas se realizan tanto para la fase sin drenaje como durante el proceso de consolidación. En la Figura 3.34, en la gráfica situada a la izquierda se presenta las lecturas correspondientes al escalón 200-300 kPa del ensayo 1N3 en escala logarítmica de tiempos. Las oscilaciones de medidas que se registran en la parte sin drenaje se deben a que el recorrido del LVDT puede no ser suficiente para registrar el asiento durante la consolidación por lo que se decide colocar en su máximo recorrido. Siempre que se estima que el recorrido no va a ser suficiente en un escalón se decide mover el LVDT antes de la fase de consolidación.

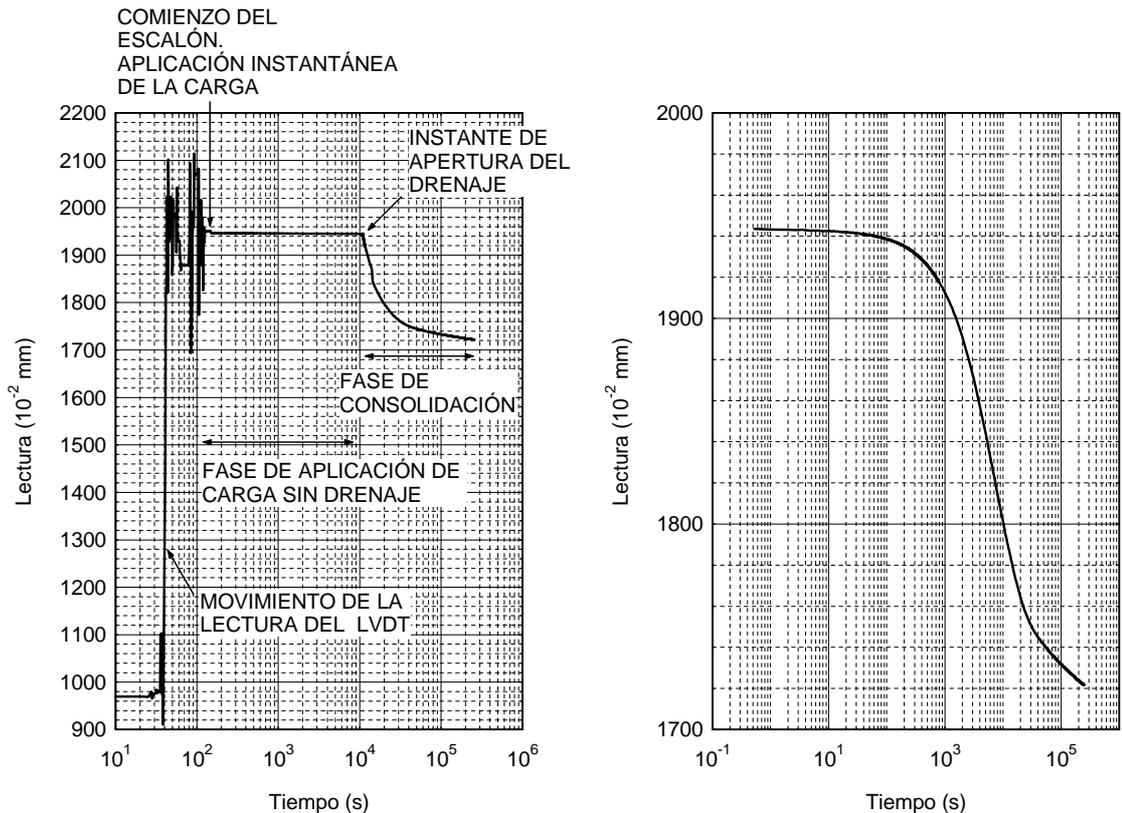


Figura 3.34. Curva de consolidación en escala logarítmica de tiempos. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3

Al igual que en la geometría anterior, en el momento de aplicación de la carga se produce un pequeño asiento ($t \approx 150s$ en el caso que se representa en la figura) que se considera debido a un ajuste del sistema de aplicación de carga. A partir de este momento la lectura permanece constante durante la fase con drenaje cerrado. A continuación, al abrir el drenaje, comienza la evolución de los asientos durante la consolidación de la muestra. En la gráfica derecha, se presenta únicamente las lecturas tomadas durante la fase de consolidación del escalón, tomando como tiempo de referencia ($t = 0$) el instante de apertura del drenaje. En el Apéndice D se adjuntan únicamente estas curvas de consolidación para todos los escalones de carga de los ensayos realizados, sin la representación de las lecturas tomadas durante la fase sin drenaje, por el mismo motivo descrito en la geometría anterior (ver apartado 3.2.3).

Como se describe con mayor detalle en el apartado 3.2.3, a partir de los asientos registrados en la muestra es posible calcular su grado de consolidación medio para un tiempo determinado como el cociente entre el asiento en ese tiempo y el asiento final. A partir del grado de consolidación medio se podría estimar un coeficiente de consolidación equivalente que reprodujera los resultados obtenidos en cuanto a la deformación vertical de la muestra y emplearlo para el análisis de la consolidación. Sin embargo, esta estimación del coeficiente de consolidación a partir del grado de consolidación medio obtenido a través de los asientos, da lugar a errores si no se tienen en cuenta una serie de consideraciones como son la presencia de consolidación secundaria y la plastificación de la columna, como se describe en el apartado citado anteriormente.

Los dos fenómenos anteriores hacen que para la estimación del c_{vr}^{eq} a partir de las medidas de asientos fuese necesario aplicar una serie de construcciones o correcciones de las medidas que, de alguna manera, eliminaran la influencia de todos estos fenómenos. Sin embargo, este no es el objeto de esta Tesis Doctoral y no se considera necesario enfocar en ese sentido el análisis de los resultados de los ensayos.

Factor de reducción de asientos

Para evaluar la mejora del conjunto suelo-columna en cuanto a la deformación, se emplea el factor de reducción de asientos (ver apartado 1.1.3), que relaciona el

asiento que se produce en el suelo blando con y sin columna. El valor de este parámetro ha sido obtenido para cada uno de los ensayos del mismo modo que en la geometría $N = 4$ (ver apartado 3.2.3), considerando para el cálculo del asiento sin columna, el ensayo edométrico realizado con caolín en la célula Rowe para la comprobación del funcionamiento del equipo de ensayo (ver apartado 2.4.3). La altura de pastilla de los ensayos con columna (altura del conjunto columna-suelo una vez aplicada de nuevo una tensión vertical de 100 kPa, H_{100}) es distinta en cada ensayo, aunque se encuentra dentro del mismo orden de magnitud.

Los valores obtenidos en cada ensayo se presentan en la Tabla 3.12 junto con la altura de pastilla y el asiento total con columna registrado.

Tabla 3.12. Valores del factor de reducción de asientos (final del ensayo). Geometría $N = 3$

Ensayo	1N3	2N3	3N3	4N3
ε_z con columna	0,112	0,108	0,11	0,13
Factor de reducción de asientos	0,663	0,636	0,651	0,766
Altura inicial, H_{100} (mm)	74,21	74,21	70,75	73,14

Nota: ε_z sin columna = 0,1696

En la Figura 3.35 se presenta la variación del factor de reducción de asientos con el valor de N para varios valores de la relación de rigideces de la columna y el suelo blando, según el análisis realizado por Balaam y Booker (1985), añadiendo los valores obtenidos en los ensayos.

En esta geometría de ensayo, los resultados obtenidos muestran que la construcción de la columna de grava reduce el asiento en aproximadamente un 35%. El valor de $\alpha = 0,766$ se considera no representativo de esta geometría por su desviación con respecto a los demás resultados. Como ocurre en la geometría con $N = 4$, se comprueba que la colocación de columnas de grava reduce el asiento en la muestra, dado que el factor de reducción de asientos es inferior a la unidad. Comparando los resultados de los ensayos con los obtenidos según el método de Balaam y Booker (1985) se observa que, para la variación de la relación de módulos columna-suelo

obtenida en esta geometría de ensayo (E_c/E_s entre 30 y 18, ver Tabla 3.11), la solución teórica predice una mayor reducción del asiento con el tratamiento del suelo con columnas. Sin embargo, esta solución asume un comportamiento elástico de la columna, sin considerar su posible plastificación, la cual tiene lugar en los ensayos como se verá en el apartado 3.4.2. Al producirse la plastificación de la columna, sobre el suelo actúa una carga mayor que en el caso de comportamiento totalmente elástico y por tanto, el asiento es mayor que en esta última situación considerada en el análisis de Balaam y Booker.

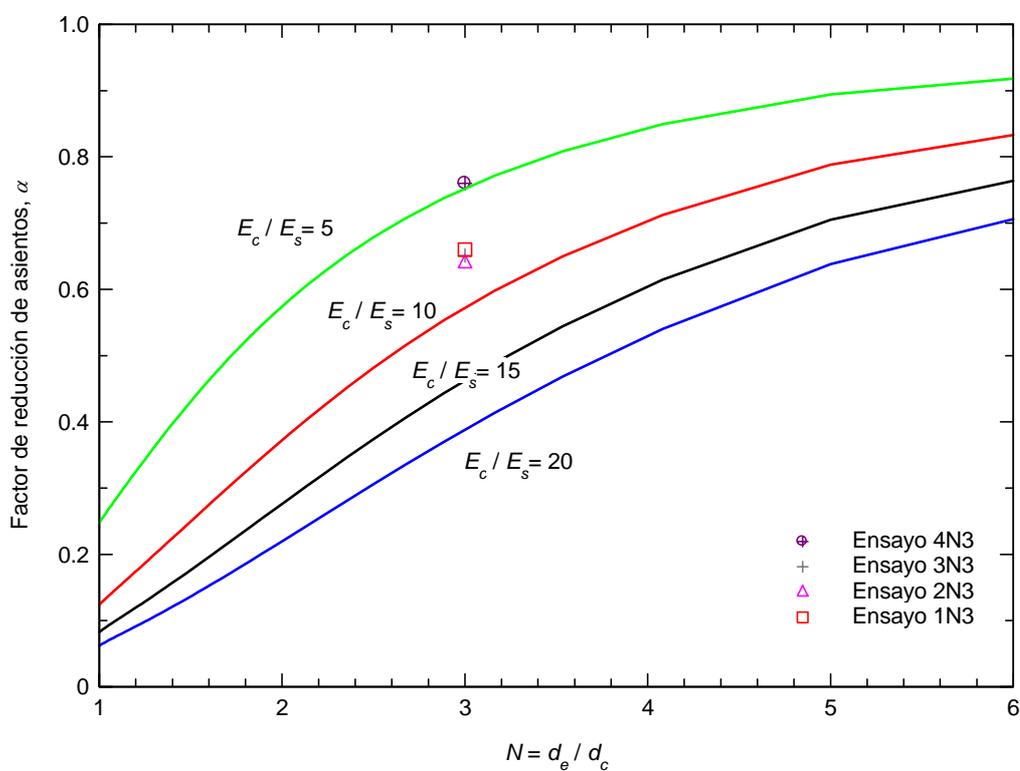


Figura 3.35. Factor de reducción de asientos obtenido en los ensayos con geometría $N = 3$

3.4. INTERPRETACIÓN CONJUNTA

En este apartado se comparan los resultados obtenidos en los ensayos realizados con las dos geometrías consideradas ($N = 4$ y $N = 3$) y, posteriormente, se aplican algunas soluciones teóricas existentes específicas para columnas de grava a los resultados obtenidos. Se establecen una serie de conclusiones derivadas de esta interpretación, que se resumen también en las conclusiones generales de la investigación.

3.4.1. Comparación de resultados $N = 4$ y $N = 3$

Se trata de analizar la influencia del área de sustitución de un tratamiento con columnas de grava en el comportamiento del terreno, en referencia a las presiones intersticiales, tensiones totales en el suelo y la columna y asientos.

Presiones intersticiales

En las curvas donde se representan las lecturas de presiones intersticiales a lo largo del tiempo en los distintos radios de medida (ver Figura 3.8 y Figura 3.23 y resto de escalones en el Apéndice D) se aprecia que el tiempo necesario para la completa disipación de las presiones intersticiales es superior para la geometría $N = 4$ (en torno a 13 horas en el escalón representado en la Figura 3.8) que para la geometría $N = 3$ (11 horas aproximadamente en el escalón representado en la Figura 3.23). Analizando todos los escalones de todos los ensayos con ambas geometrías se tiene que, para la geometría de menor diámetro de columna ($N = 4$), el tiempo necesario se encuentra en el rango entre 13 y 16 horas. Para los ensayos con mayor área de columna ($N = 3$) estos tiempos disminuyen, produciéndose la disipación total de las presiones intersticiales transcurridas entre 9 y 11 horas. Esto resulta completamente coherente con la disminución del camino de drenaje que supone la colocación de una columna de mayor diámetro en un mismo área de suelo blando (mayor área de sustitución).

En los apartados 3.2.1 y 3.3.1 se ha estimado el coeficiente de consolidación equivalente para cada escalón, a utilizar en la solución de Barron para reproducir los resultados de los ensayos. Esta estimación se ha llevado a cabo mediante dos métodos a partir de las lecturas de presiones intersticiales en el suelo blando a lo largo del tiempo.

En la Figura 3.36, en la gráfica situada a la izquierda se representa los valores obtenidos para ambas geometrías sin diferenciar el método de ajuste empleado (los valores correspondientes se encuentran en la Tabla 3.2, Tabla 3.3, Tabla 3.8 y Tabla 3.9). Los valores de c_{vr}^{eq} estimados en los ensayos con $N = 3$ son por lo general superiores a los de la geometría de ensayo $N = 4$ como cabría esperar, puesto que en estos últimos el diámetro de la columna es menor, lo que supone mayor camino de drenaje.

En la gráfica de la derecha se presenta el intervalo en el que se encuentran estos valores estimados, diferenciando los dos métodos de estimación empleados para cada una de las geometrías de ensayo. Ambos métodos proporcionan resultados muy próximos entre sí, siendo menor la dispersión para los ensayos con diámetro de columna más pequeño ($N = 4$).

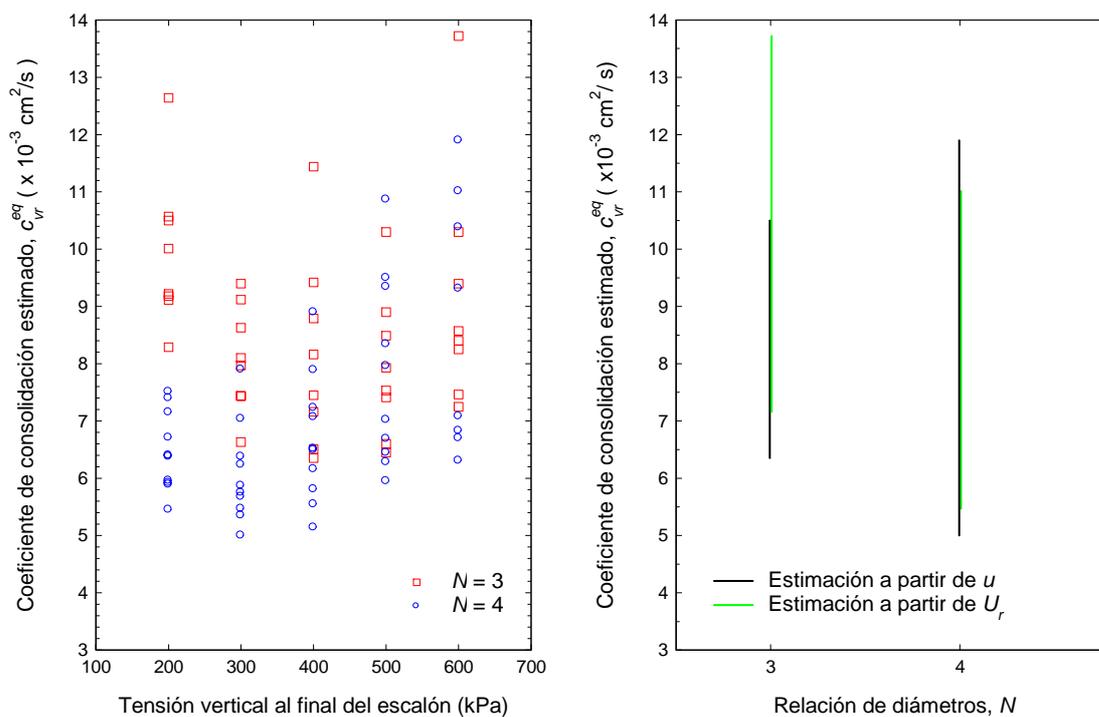


Figura 3.36. Valores del coeficiente de consolidación equivalente estimado a partir de las presiones intersticiales en ambas geometrías de ensayo

Tensiones totales

En la Figura 3.37 se representan las tensiones totales verticales en la columna (gráfica izq.) y en el suelo (gráfica dcha.) al final de todos los escalones de todos los

ensayos y para las geometrías $N = 3$ y $N = 4$. Las tensiones en el suelo representadas son los valores medios obtenidos ponderando las lecturas de los sensores por sus áreas de influencia. En la citada figura se puede observar que la tensión en el suelo es menor en la geometría $N = 3$, lo que resulta lógico dado que en este caso la sustitución de material blando por uno más rígido es mayor que para la geometría $N = 4$. Las tensiones en la columna también son menores en el caso $N = 3$.

Por otro lado, dado que la carga en el suelo al final de cada escalón es mayor para la geometría $N = 4$ que para la geometría $N = 3$ (comparando escalones de la igual carga aplicada), el módulo de rigidez del suelo, que aumenta con el nivel de tensiones, también lo debe de ser. Por tanto, ya que el módulo de la grava se considera constante, la relación de rigideces columna-suelo presenta una mayor disminución a lo largo del ensayo para la geometría $N = 4$, lo que concuerda con los valores considerados para los distintos escalones en cada geometría (ver Tabla 3.5 y Tabla 3.11).

El tratamiento con columnas de grava de un suelo blando provoca una disminución de la carga que actúa sobre éste debida a la sustitución de parte del material blando por un material de mayor rigidez. En esta investigación se ensayan dos áreas de sustitución diferentes, siendo la mayor la correspondiente a la relación de diámetros $N=3$. La magnitud de las cargas aplicadas son las mismas en ambas geometrías de ensayo, por tanto, la tensión que actúa sobre el suelo (en escalones de igual tensión vertical aplicada) debe ser menor en los ensayos con la columna de mayor diámetro.

El factor de concentración de tensiones sigue una tendencia de disminución a medida que la tensión vertical del escalón es mayor, en ambas geometrías (ver Figura 3.38). Esta tendencia resulta clara en los ensayos de $N = 4$ pero no así en los ensayos de mayor diámetro de columna. La disminución es acorde con la disminución progresiva de la relación de rigideces columna suelo, la cual tiene lugar tal y como se ha descrito en el párrafo anterior.

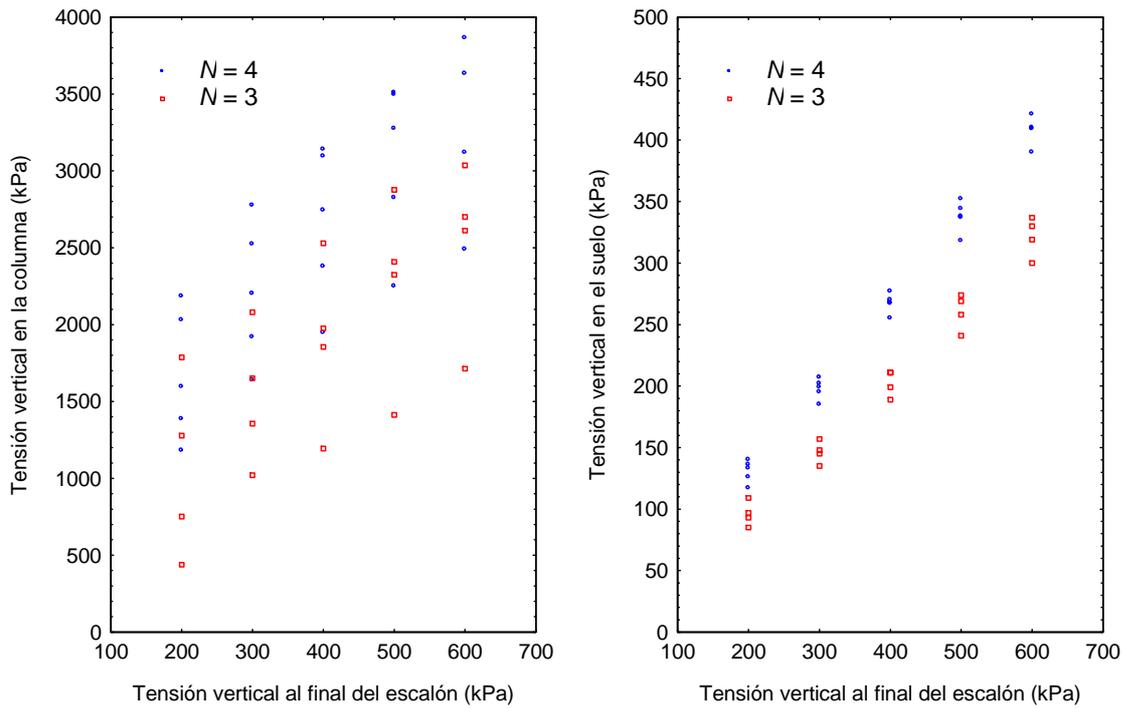


Figura 3.37. Tensiones verticales que actúan sobre el suelo y la columna al final de cada escalón en ambas geometrías

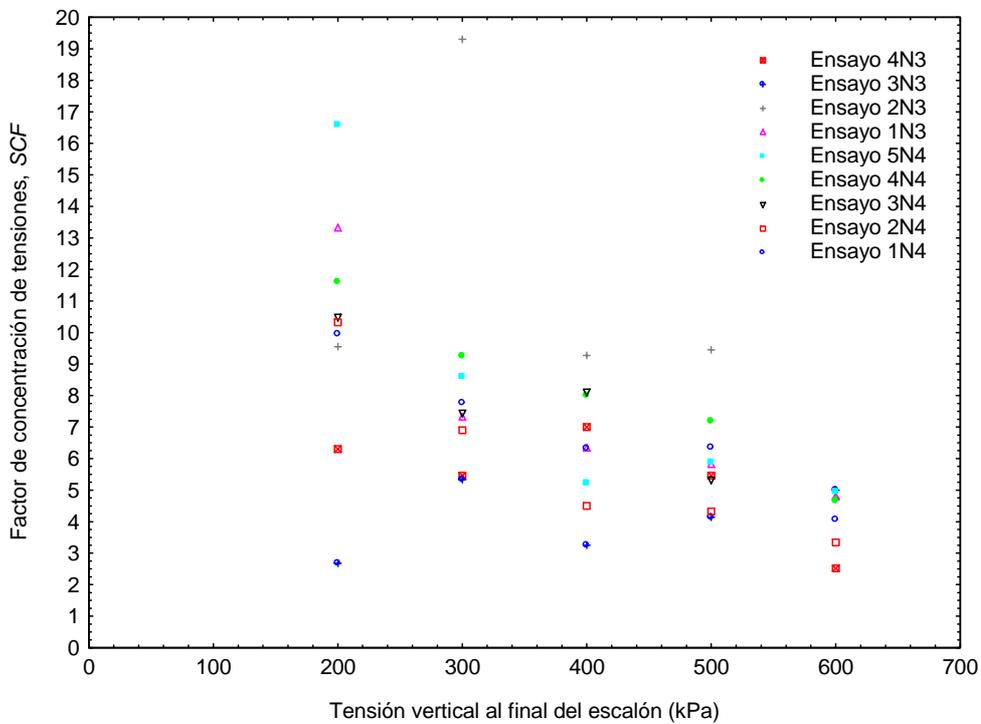


Figura 3.38. Valor del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón para ambas geometrías

Deformación vertical

En ambas geometrías, se han medido asiento de la muestra durante el ensayo. A partir de la altura inicial de la pastilla y del asiento medido en cada ensayo se obtiene la mejora producida por las columnas de grava en cuanto a la reducción del asiento de la muestra. Comparando ambas geometrías de estudio se observa que, para mayor diámetro de columna ($N = 3$) el factor de reducción de asientos obtenido es menor (ver Tabla 3.13), como cabía esperar, puesto que la muestra con mayor área de sustitución es más rígida y por tanto presenta una mayor reducción del asiento bajo una misma carga aplicada.

Tabla 3.13. Valores del factor de reducción de asientos en ambas geometrías

Geometría	Factor de reducción de asientos (Ensayo)				
$N = 4$	0,713 (1N4)	0,743 (2N4)	0,752 (3N4)	0,819 (4N4)	0,785 (5N4)
$N = 3$	0,663 (1N3)	0,636 (2N3)	0,651 (3N3)	0,766 (4N3)	

Resumen de la influencia del área de sustitución

En ambas geometrías se han medido presiones intersticiales a distintas distancias radiales a lo largo de los escalones de carga aplicados en los ensayos. Para la geometría con $N = 3$ (mayor sustitución de área) el tiempo necesario para que se disipen completamente las presiones intersticiales debidas a la aplicación del escalón de carga es menor que en la geometría $N = 4$. Esta aceleración de la consolidación se refleja también en los valores estimados del coeficiente de consolidación equivalente, que son, por lo general, mayores para la geometría $N = 3$.

Las tensiones totales medidas en el suelo resultan menores para la geometría $N=3$ dado que la sustitución de material blando por uno más rígido es mayor en este caso que en la geometría $N = 4$. Esto conlleva además que, el módulo del suelo (que aumenta con el nivel de tensiones) alcanza un valor menor al final de los ensayos de la citada geometría. Por tanto, la relación de rigideces columna-suelo disminuye en menor

cuantía en estos ensayos. Esta disminución de la relación de tensiones es acorde con la disminución del factor de concentración de tensiones registrada en todos los ensayos de la geometría $N = 4$ y alguno de la geometría $N = 3$.

Por otro lado, se aprecia diferencia en cuanto a la reducción del asiento debida al tratamiento con columnas en los resultados obtenidos en ambas geometrías. Estos muestran una mayor reducción para una misma carga aplicada en los ensayos con mayor diámetro de columna ($N = 3$) debido a que la muestra es más rígida.

3.4.2. Aplicación de soluciones teóricas a los resultados

Los resultados obtenidos en cuanto al coeficiente de consolidación y el reparto de cargas entre suelo y columna, en los ensayos realizados con las dos geometrías de estudio, se analizan a continuación empleando las soluciones teóricas existentes para el estudio de columnas de grava (Han y Ye, 2001 y Castro, 2008). La comparación de los resultados obtenidos en cuanto a la reducción del asiento de la muestra de suelo blando con la columna central se compara con las soluciones teóricas de Balaam y Booker (1981), Priebe (1976) y Castro (2008). En el apartado 1.2.1 se resumen las principales hipótesis y la formulación específica de cada una de las citadas soluciones. Para su aplicación, es necesario conocer la relación entre el diámetro de la columna y del suelo o el área de sustitución, puesto que ambos parámetros están relacionados. En los ensayos realizados, la variación de diámetro de la columna a lo largo de los distintos escalones de carga aplicados no ha sido medida, por lo tanto, la geometría real de la muestra de ensayo solamente se conoce al principio del primer escalón de carga, tras la construcción de la columna. La deformación de la columna será mayor cuanto mayor sea la tensión aplicada en el escalón, por lo que la comparación debe hacerse en los escalones iniciales. Como se describe en el apartado 3.2.1 y 3.3.1, antes de la aplicación del primer escalón de carga la muestra se encuentra ligeramente sobreconsolidada, tanto en la geometría con $N = 4$ como para $N = 3$. El coeficiente de consolidación del caolín es mayor cuando un suelo se encuentra sobreconsolidado que si está normalmente consolidado, lo que queda reflejado en los resultados obtenidos en los primeros escalones de carga de todos los ensayos de ambas geometrías (ver Tabla 3.2, Tabla 3.3, Tabla 3.8 y Tabla 3.9), donde los coeficientes de consolidación equivalentes estimados en el primer escalón de carga son superiores a los del segundo escalón. Al final del

primer escalón, la tensión en el suelo supera la de preconsolidación (100 kPa) por lo que la muestra pasa a estar normalmente consolidada en los siguientes escalones de carga. Por estos motivos, sólo se contrastan los resultados obtenidos en el segundo escalón de carga de cada ensayo, en el que el suelo se encuentra normalmente consolidado y la deformación es muy pequeña y por tanto puede considerarse la relación entre diámetros teórica del ensayo ($N = 4$ ó $N = 3$). Esta comparación del segundo escalón se realiza tanto en lo que se refiere al análisis del proceso de consolidación como al reparto de cargas entre suelo y columna.

Otro de los parámetros necesarios en las soluciones de Castro y Han y Ye es la relación de rigideces entre la columna y el suelo, empleando en cada caso los valores que contemplan las diferentes hipótesis de deformación de la columna realizadas por los autores. En la solución propuesta por Han y Ye (2001) se considera únicamente deformación vertical de la columna (confinamiento lateral) por lo que los módulos de deformación utilizados son los edométricos para ambos materiales. Castro (2008) tiene en cuenta tanto la deformación vertical como radial de la columna de grava. En este caso se emplean los módulos de Young para ambos materiales. Esto justifica el cálculo de los módulos edométrico y de deformación del caolín y de la grava presentados en el apartado 2.2.

En el caso de la grava, los ensayos de consolidación anisótropa con trayectoria edométrica descritos en el apartado 2.2.2 proporcionaron un valor del módulo edométrico (E_{mc}) de 39200 kPa. Para el cálculo del módulo de Young se tienen los ensayos de consolidación anisótropa con distintos valores del coeficiente de empuje, cuya justificación y resultados se describen con detalle también en el apartado 2.2.2, adoptándose un valor del módulo para la grava de 30000 kPa.

Para el caolín, el valor de ambos módulos se obtiene del ensayo edométrico convencional realizado sobre este material, cuyos resultados se presentan en el apartado 2.2.1. En este caso, se tiene valores del módulo edométrico y del módulo de Young para cada escalón de carga aplicado en el edómetro (ver tabla 2.5). Para ajustar el valor del módulo que se debe considerar en las soluciones teóricas, se han obtenido las tensiones que actúan sobre el caolín en los distintos escalones de carga de los ensayos para ambas geometrías. Dentro de la misma geometría, para escalones de igual carga vertical

aplicada, la tensión que actúa sobre el caolín es aproximadamente la misma, por lo que el análisis se realiza dando un rango para cada escalón independientemente del ensayo, pero abarcando todos sus resultados. Los valores obtenidos de los módulos se presentan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Tensión vertical total en suelo al final de cada escalón y módulos edométrico y de deformación del caolín, correspondientes para ambas geometrías

Escalón de carga (kPa)	N = 4			N = 3		
	σ_{vs} (kPa)	E_{ms} (kPa)	E_s (kPa)	σ_{vs} (kPa)	E_{ms} (kPa)	E_s (kPa)
100 – 200	115-140	1400	1000	85-110	1400	1000
200 – 300	185-210	2000	1300	135-160	1400	1000
300 – 400	255-280	2500	1700	190-210	2000	1700
400 – 500	320-350	2500	1700	240-275	2500	1700
500 – 600	390-420	3000	2200	300-335	2500	1700

En el caso del caolín, como se justifica en el apartado 2.2.1, se adopta un valor del coeficiente de Poisson de 0,3. En el caso de la grava, se toma un valor medio entre los obtenidos en los ensayos triaxiales drenados (ver apartado 2.2.2, Tabla 2.6). Se considera $\mu_c = 0,18$.

Coefficiente de consolidación equivalente

Como se ha visto en el Capítulo 1, el proceso de consolidación alrededor de una columna de grava deformable está gobernado por la misma ecuación diferencial que para el caso de un dren prefabricado de rigidez despreciable, con la salvedad del empleo de un coeficiente de consolidación modificado que contemple las diferentes hipótesis de deformación de la columna y su rigidez. Por ello, para aplicar las distintas soluciones teóricas existentes a los resultados obtenidos en esta investigación, los ensayos se han interpretado de esta forma y se ha obtenido el valor de este coeficiente de consolidación

radial equivalente (c_{vr}^{eq}) y su relación con el coeficiente de consolidación real del suelo sin columna, considerando este último como el obtenido en el ensayo edométrico realizado sobre el caolín en la célula Rowe para la comprobación del funcionamiento del equipo de ensayo (ver apartado 2.4, tabla 2.11).

La solución teórica propuesta por Han y Ye (2001) considera confinamiento lateral de la columna de grava (ver apartado 1.2.1). Debido a esta hipótesis de deformación lateral nula de la columna, emplea los módulos edométricos de ambos materiales. En este caso, el coeficiente de consolidación modificado tiene la siguiente expresión:

$$c_{vr}^{ze} = c_{vr} \left(1 + \frac{E_{mc}}{E_{ms}} \frac{a_r}{1 - a_r} \right) \quad (3.7)$$

donde el superíndice e define el comportamiento elástico de la columna.

La solución propuesta por Castro (2008) tiene en cuenta la deformación radial de la columna de grava, considerando un coeficiente de consolidación equivalente cuya expresión es:

$$c_{vr}^{zre} = c_{vr} \cdot \frac{[a_r(\lambda_c + 2G_c) + (1 - a_r)(\lambda_s + 2G_s)] [H - (\lambda_c - \lambda_s)] - (1 - a_r)(\lambda_c - \lambda_s)^2}{(\lambda_s + 2G_s)[H - (1 - 3a_r)(G_c - G_s)]} \quad (2.8)$$

donde los módulos de rigidez considerados para el suelo y la columna son los módulos de Young (ver apartado 1.2.1).

En la Tabla 3.15 se presenta la relación del coeficiente de consolidación radial equivalente y el del caolín sin columna obtenida en el segundo escalón de los ensayos realizados en ambas geometrías con los dos métodos de estimación descritos en los apartados 3.2.1 y 3.3.1 y su comparación con los valores obtenidos mediante las distintas soluciones teóricas. Se muestra el valor de la relación de módulos, edométricos y de Young, considerados para el cálculo teórico.

Tabla 3.15. Relación del coeficiente de consolidación radial equivalente y sin columna. Comparación de los resultados con soluciones teóricas

Segundo escalón del ensayo	E_{mc}/E_{ms}	E_c/E_s	Relación c_{vr}^{eq}/c_{vr}			
			Estimación a partir de u	Estimación a partir de U_r	Castro (2008)	Han y Ye (2001)
1N4	19,6	23,1	2,76	3,10	2,05	2,31
2N4	19,6	23,1	2,30	2,50	2,05	2,31
3N4	19,6	23,1	2,23	2,45	2,05	2,31
4N4	19,6	23,1	1,96	2,15	2,05	2,31
5N4	19,6	23,1	2,10	2,25	2,05	2,31
1N3	28	30	3,13	3,69	3,44	4,50
2N3	28	30	3,18	3,58	3,44	4,50
3N3	28	30	2,91	3,38	3,44	4,50
4N3	28	30	2,60	2,92	3,44	4,50

En la Figura 3.39 se presentan de forma gráfica los resultados de la tabla anterior. Los resultados obtenidos en el laboratorio con la geometría de ensayo $N = 3$ se ajustan mejor a los propuestos por Castro (2008). En la geometría de ensayo $N = 4$, los resultados de ambas soluciones son muy próximos, dadas las relaciones de módulos edométricos y de Young consideradas en el escalón, por lo que no es posible determinar la solución que ofrece un ajuste mejor a los resultados. Comparando ambas geometrías se pone de manifiesto que la consideración de la deformación radial en el desarrollo de la solución de Castro da lugar a resultados más acordes con la realidad. La hipótesis de deformación radial nula en la columna conlleva valores más elevados del coeficiente de consolidación radial.

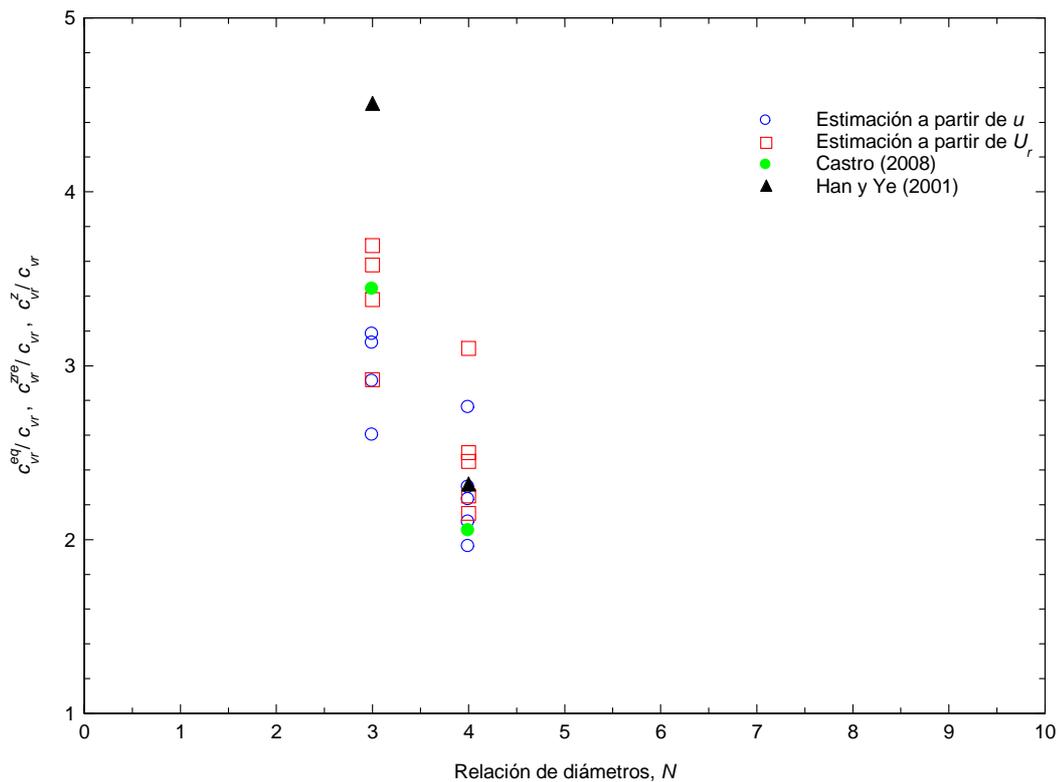


Figura 3.39. Coeficiente de consolidación equivalente. Columna elástica. Comparación de los resultados teóricos y de laboratorio.

Factor de concentración de tensiones

En la Figura 3.40 se representa de forma conjunta la evolución de la relación entre tensiones en la columna y en el suelo (SCF) en el segundo escalón de los ensayos con $N = 4$ y con $N = 3$, respectivamente. Además, se añaden los resultados de la aplicación de las soluciones teóricas de Castro y Han y Ye, a cada uno de los casos. Los valores finales del factor de concentración de tensiones en el segundo escalón de carga obtenidos en todos los ensayos y de la aplicación de ambas soluciones teóricas se presentan en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Factor de concentración de tensiones al final del segundo escalón. Comparación con la solución de Han y Ye (2001) y Castro (2008)

Segundo escalón del ensayo	Factor de concentración de tensiones, <i>SCF</i>			
	Resultados obtenidos	Castro (2008) Columna elástica	Castro (2008) Columna elasto-plástica	Han y Ye (2001)
1N4	7,76	17,18	4,99	19,6
2N4	6,91	17,18	5,24	19,6
3N4	7,45	17,18	5,00	19,6
4N4	9,25	17,18	5,05	19,6
5N4	8,61	17,18	4,98	19,6
1N3	7,30	22,11	5,22	28
2N3	19,39	22,11	6,50	28
3N3	5,34	22,11	5,16	28
4N3	5,46	22,11	5,82	28

En el caso de considerar confinamiento lateral de la columna (Han y Ye, 2001), el factor de concentración de tensiones comienza en cero y alcanza un valor final igual a la relación de módulos edométricos entre la columna y el suelo (para el segundo escalón de carga $E_{mc}/E_{ms} = 19,6$ con $N = 4$ y $E_{mc}/E_{ms} = 28$ con $N = 3$). Los valores del factor de concentración de tensiones obtenidos bajo la hipótesis de deformación radial nula no son acordes con los resultados experimentales, tanto de la presente investigación en laboratorio como de otras realizadas en casos reales. La relación de módulos suele encontrarse entre 10 y 50, mientras que el factor de concentración de tensiones medido en casos reales (Barksdale y Bachus, 1983) oscila en un rango entre 3 y 10 y el obtenido en los segundos escalones de los ensayos realizados se encuentra por lo general entre 5 y 9, aproximadamente.

Al considerar la deformación radial de la columna (Castro, 2008) se reduce el valor final del *SCF*, tanto si se considera un comportamiento elástico de la columna como elasto-plástico. Para esta solución, el valor inicial deja de ser nulo debido a la existencia de un asiento instantáneo en el conjunto suelo-columna. En el caso de realizar el análisis considerando la columna elasto-plástica se reproducen las condiciones de tensiones iniciales en la muestra para estudiar su posible plastificación. Para la relación de rigideces columna-suelo dada en la Tabla 3.15, y considerando las propiedades de cada material que intervienen en la solución (coeficiente de empuje en reposo y coeficiente de consolidación del caolín, ángulo de rozamiento interno y dilatación de la grava y coeficientes de Poisson de ambos materiales) se produce la plastificación de la columna de grava en ambas geometrías de ensayo. En esta situación, el valor final del *SCF* obtenido con la solución de Castro considerando un comportamiento elasto-plástico de la columna es aún menor que el que se podría esperar manteniendo un comportamiento elástico, encontrándose más acorde a los resultados experimentales obtenidos en esta investigación.

La representación de la Figura 3.40 se ha realizado por separado para todos los segundos escalones de los ensayos (ver Apéndice D). En el ensayo 2N3 se ha obtenido un valor del factor de concentración de tensiones al final del segundo escalón muy superior al resto de los ensayos ($SCF=19,39$). Este valor y la curva de resultados se asemeja más a la teórica que considera un comportamiento elástico de la columna, por tanto, en este escalón podría no haberse producido su plastificación. Sin embargo, este resultado no se considera representativo dado que se ha obtenido de manera puntual en un único escalón de los analizados. En la visión conjunta que muestra la Figura 3.40 se refleja claramente que, los valores finales del factor de concentración de tensiones en los escalones representados se acercan más a los que predice la solución de Castro (2008), considerando la plastificación de la columna que reduce de forma considerable el valor teórico final.

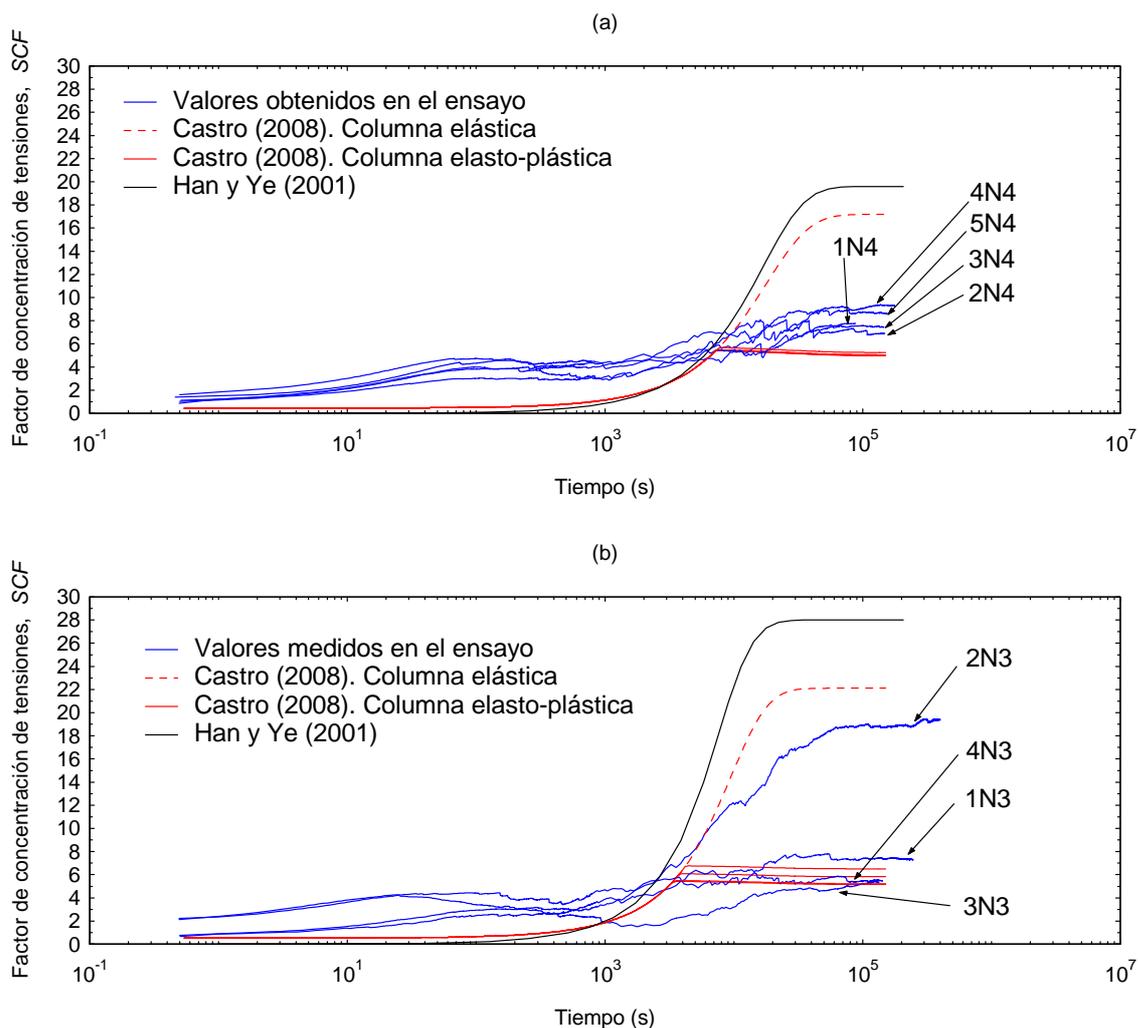


Figura 3.40. Evolución del factor de concentración de tensiones en un escalón. Comparación con la solución de Han y Ye (2001) y Castro (2008). (a) $N = 4$ (b) $N = 3$

Factor de reducción de asientos

En la Figura 3.41 se muestran los resultados obtenidos en ambas geometrías de ensayo, comparándolos con los obtenidos a partir de la solución propuesta por Balaam y Booker para distinta relación de rigideces de los materiales. También se contrastan con los resultados del método básico de Priebe para el valor medio de ϕ del material granular empleado ($\phi = 46^\circ$). Por último, se añaden también los resultados de la solución de Castro (2008) considerando un valor medio del ángulo de dilatancia de la grava $\psi = 10^\circ$, obtenido a partir de los ensayos triaxiales con drenaje realizados (ver

apartado 2.2.2). Se ha representado los resultados de esta solución para los valores extremos del rango de variación de la relación de tensiones en los ensayos (E_c/E_s entre 14 y 30, ver Tabla 3.5 y Tabla 3.11) y para un valor medio de 23,1.

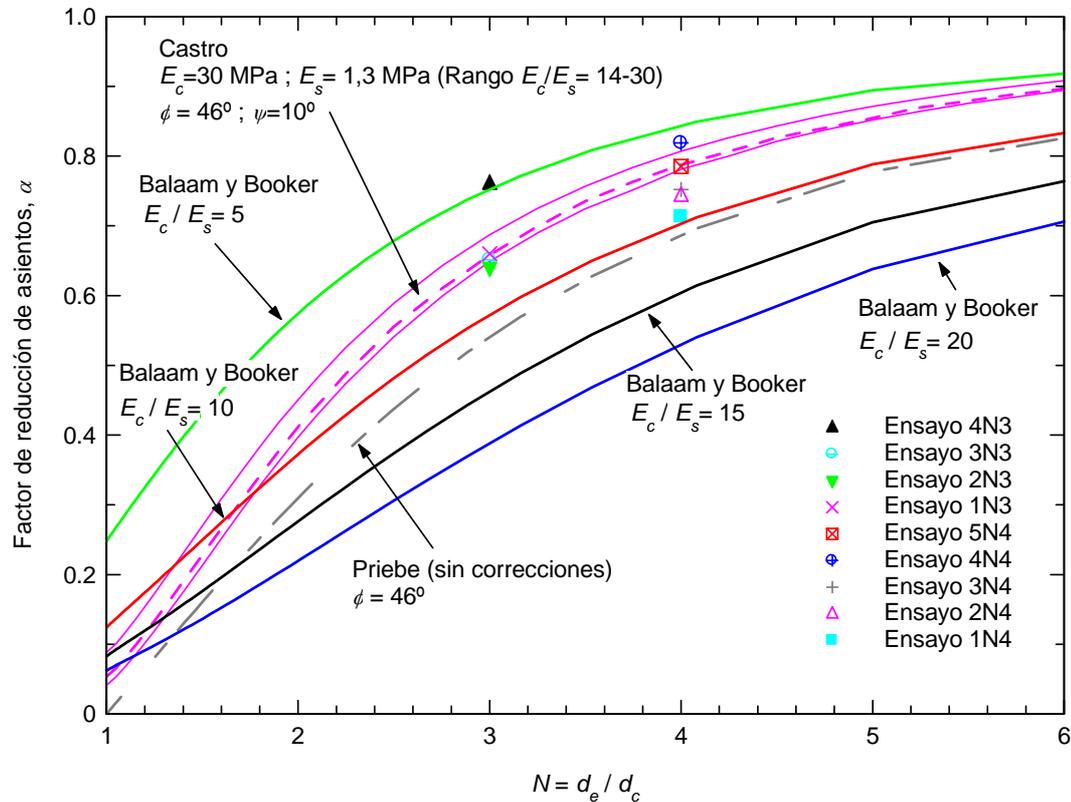


Figura 3.41. Factor de reducción de asientos obtenido en los ensayos con ambas geometrías. Comparación con el método de Balaam y Booker, Priebe (sin correcciones) y Castro

El factor de reducción de asientos obtenido en todos los ensayos con columna es menor que la unidad, lo que implica que el asiento que se produce en la muestra mejorada con columna es menor que el que se produce en ese mismo suelo sin tratamiento alguno. Los resultados obtenidos en los ensayos concuerdan adecuadamente con los conseguidos a partir de la solución de Castro (2008), considerando un comportamiento elasto-plástico de la columna. Se observa que la solución de Balaam y Booker, que considera la columna elástica, predice una reducción del asiento muy superior a los anteriores. El motivo es que la plastificación de la columna provoca que el suelo soporte mayor carga que en el caso de que ésta se comporte de forma elástica, y por tanto, al encontrarse el suelo más cargado se produce un asiento mayor.

Los resultados de los ensayos muestran una reducción del asiento entre un 20 y un 30%, aproximadamente, para la geometría $N = 4$ y en torno a un 35% para la geometría $N = 3$. Con el análisis elástico de la columna, para la relación de módulos media de los ensayos, se llega a una reducción del asiento superior al 50 y 60% en la geometría $N = 4$ y $N = 3$, respectivamente.

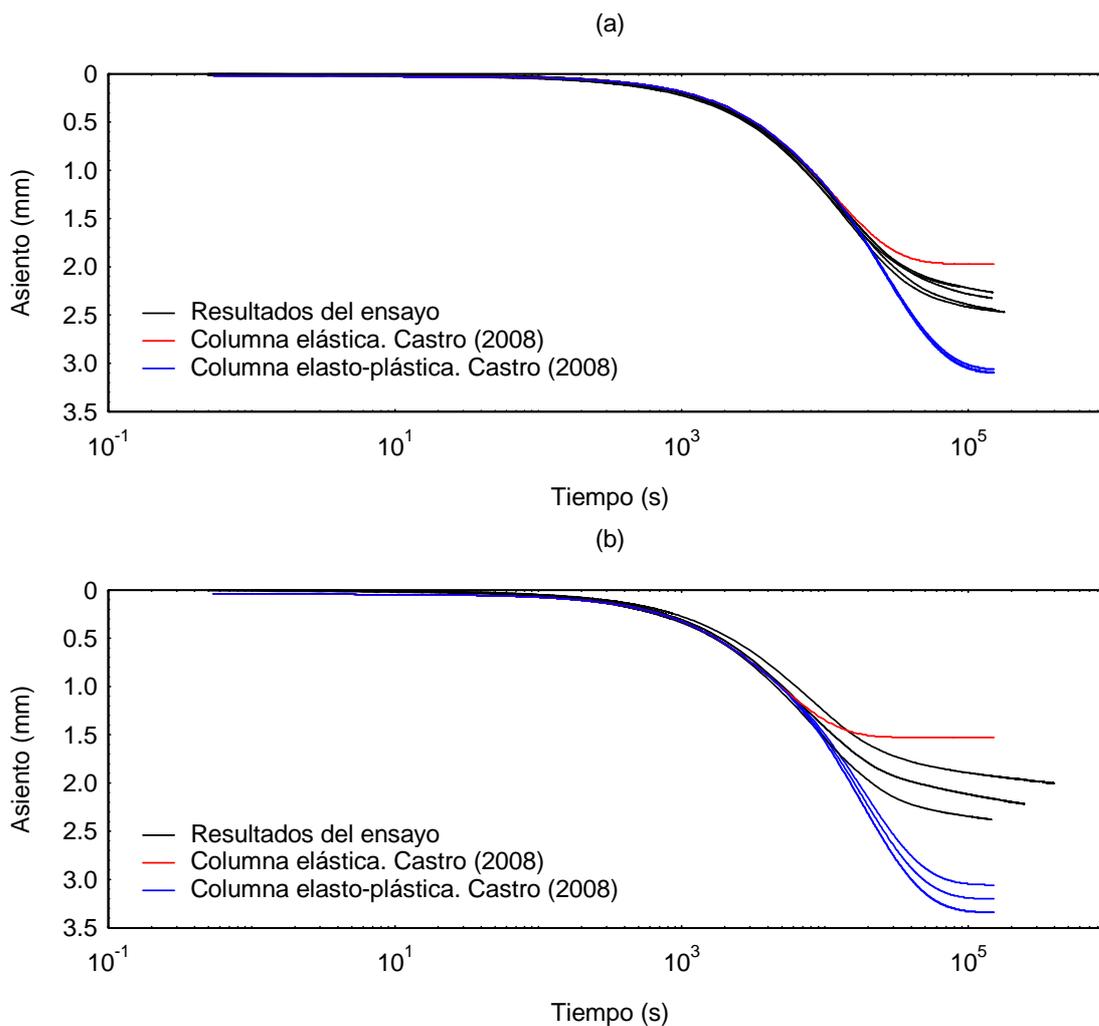


Figura 3.42. Evolución del asiento medido en un escalón. Comparación con el obtenido con comportamiento elástico y elasto-plástico de la columna (Castro, 2008). (a) $N = 4$ (b) $N = 3$

En la Figura 3.42 se muestra de forma conjunta los asientos medidos en el segundo escalón de carga de todos los ensayos con cada geometría ($N=4$ y $N=3$, respectivamente). Con la solución de Castro se obtiene el asiento teórico considerando tanto el caso de comportamiento elástico de la columna de grava como elasto-plástico.

Para el caso elástico se obtiene una única curva de resultados para cada geometría puesto que la carga aplicada en los escalones es la misma. Para un comportamiento elasto-plástico de la columna, se obtiene una curva para cada escalón de cada ensayo, puesto que el instante de plastificación es función del estado tensional inicial de la columna en ese escalón. Sin embargo, este nivel de tensiones varía muy poco de un ensayo a otro (como es lógico puesto que el procedimiento de ensayo es el mismo) lo que hace que la diferencia entre estas curvas sea casi inapreciable en la figura. Todas ellas comparten el tramo inicial con la curva de comportamiento elástico hasta el instante de plastificación.

La plastificación de la columna da lugar a un asiento de la muestra mayor que en el caso de comportamiento elástico debido a que en la situación de columna plastificada la tensión que actúa sobre el suelo es mayor que el caso elástico. En la figura se observa que los asientos medidos en los ensayos son un valor intermedio entre los teóricos obtenidos para ambos comportamientos de la columna.

En el Apéndice D se adjuntan por separado las curvas representadas en la Figura 3.42 de los asientos medidos en el segundo escalón de cada ensayo y los asientos teóricos considerando ambos comportamientos de la columna (elástico y elasto-plástico).