

Capítulo 9: Ensayo de Columna de Infiltración

A lo largo del programa experimental se han realizado diversos ensayos sobre muestras preparadas utilizando un material con una granulometría escalada en función de las dimensiones de la muestra a ensayar. En la mayoría de los ensayos se utilizó un material con un tamaño máximo de pellet $D_{max.}=4\text{mm}$, tamaño que resulta menor al utilizado en el ensayo a escala real. Para contrastar la información obtenida a lo largo del programa experimental con la respuesta del material en las condiciones del ensayo a escala real, se realizaron ensayos de columna de infiltración. El principal objetivo de estos ensayos es evaluar los posibles efectos de escala provenientes de la utilización de un material con una granulometría con tamaños de pellets más pequeños y contrastar los resultados obtenidos en laboratorio con la respuesta del material en una escala más representativa de las condiciones existentes en el ensayo a escala real. Para ello se diseñó y construyó un equipo de laboratorio capaz de realizar ensayos sobre muestras cilíndricas con un tamaño de 70 mm de diámetro y una altura máxima de 200 mm. De acuerdo a lo descrito en el apartado 2.3.3, éste equipo permite realizar ensayos de infiltración a volumen constante y medir la evolución de las distintas variables durante el proceso de hidratación. El ensayo de columna de infiltración resulta importante como elemento de “enlace” entre los ensayos realizados en el laboratorio y el ensayo a escala real.

9.1 Descripción del ensayo

Los ensayos de columna de infiltración se pueden describir como ensayos de infiltración a volumen constante. Sobre una muestra cilíndrica se inyecta agua por la base y se mantiene a volumen constante. El dispositivo de ensayo utilizado permite medir la evolución de la presión vertical y horizontal de hinchamiento utilizando sensores de carga y de presión total. Adicionalmente se controlan las condiciones de inyección de agua utilizando un sistema automático (GDS). Los ensayos se realizaron sobre muestras preparadas con un valor de densidad seca de 1.4 Mg/m^3 . Este valor se definió teniendo en cuenta la densidad seca del material en el ensayo a escala real (1.36 Mg/m^3). Se realizaron dos ensayos utilizando diferentes tipos de inyección de agua al inicio de la etapa de hidratación. En un caso se utilizó una inyección de agua con control del volumen inyectado por unidad de tiempo, mientras en el segundo caso se utilizó un control de la presión de inyección durante la primera etapa del ensayo. En ambos ensayos y una vez alcanzado un valor de presión de inyección de 200 kPa, se fijó

la presión de inyección de agua y se mantuvo constante hasta el final del ensayo. Las características generales de estos ensayos y una vista general del dispositivo de ensayo se muestran en las Figuras 9.1 y 9.2. La secuencia utilizada para realizar cada uno de estos ensayos fue:

- Preparación del dispositivo de ensayo.
- Control y calibración del sistema de ensayo (estanqueidad y respuesta de los sensores).
- Preparación de la muestra.
- Hidratación por inyección de agua.
- Fin de ensayo y análisis de la muestra.

9.1.1 Preparación del dispositivo de ensayo

La primera etapa del proceso es la preparación del dispositivo de ensayo. Previo a cada uno de los ensayos, se realiza el montaje y calibración del dispositivo de ensayo. En esta etapa previa, se ensambla el dispositivo de ensayo y se realiza una prueba de estanqueidad de la cámara que aloja la muestra. El montaje del equipo se realiza partiendo de la tapa y los pasantes (el equipo se monta apoyado en su parte superior). Partiendo de la tapa y los pasantes se coloca la camisa, se ajusta la tapa de cierre y se colocan los sensores de presión lateral. Un detalle del montaje y del ajuste de los sensores de presión lateral se muestra en las Figuras 9.3 y 9.4. Luego de completar estas secuencias, se coloca un cilindro metálico que simula la muestra de suelo, se cierra la cámara y se llena con agua. En la Figura 9.5 se muestran las distintas etapas de colocación de la célula de presión vertical, el tubo de inyección de agua y sistema de cierre. Finalmente se conecta la entrada de agua con el sistema de inyección automático (GDS) y se procede a realizar una prueba de estanqueidad del sistema (se mantiene la presión durante 24 h y se mide la variación o pérdida de volumen).

9.1.2 Control y calibración del sistema

Dadas las características del equipo utilizado en el ensayo, los sensores de presión lateral requieren de un sistema de conexión estanco. En este caso se utilizó un sistema de ajuste por presión y un cierre estanco mediante anillos de goma, Figura 9.4. Este

sistema de ajuste obliga a realizar una calibración del equipo posterior al ajuste de los sensores y previo a la realización de cada uno de los ensayos. Para calibrar el sistema se aplicaron ciclos carga-descarga utilizando el sistema automático de inyección de agua. En este caso se utilizó un sistema de pistón y motor paso a paso, que permite controlar la presión de agua en +/- 1 kPa y aplicar cambios de volumen de +/- 1 mm³/seg. Durante la calibración se mide la respuesta de cada uno de los sensores y se deduce su constante de proporcionalidad e histéresis. Los resultados correspondientes a la calibración realizada en uno de los ensayos se muestra en la Figura 9.5. Se observa una respuesta de tipo lineal en todos los sensores y con un valor del R² que resulta mayor de 0.995. Los valores obtenidos en una de las calibraciones realizadas se resumen en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1. Valores correspondientes a la calibración del equipo de columna de infiltración previo a la realización del TEST 2.

Presión a agua [kg/cm ²]	Sensor Vertical	Sensor Lateral 1	Sensor Lateral 2	Sensor Lateral 3
0	0.069	0.683	0.185	1.057
2	0.181	0.861	0.375	1.224
4	0.4	1.046	0.561	1.418
6	0.61	1.224	0.748	1.594
8	0.8	1.425	0.942	1.749
10	0.952	1.61	1.126	1.931
10	0.949	1.611	1.124	1.932
8	0.802	1.428	0.94	1.743
6	0.629	1.226	0.745	1.592
4	0.414	1.048	0.558	1.418
2	0.196	0.869	0.379	1.220
4	0.403	1.045	0.558	1.596
6	0.605	1.22	0.744	1.593
8	0.795	1.425	0.939	1.740
10	0.947	1.608	1.124	1.930

9.1.3 Preparación de la muestra

Los ensayos se realizaron sobre muestras de 70 mm de diámetro y 180 mm de altura. Las muestras se prepararon utilizando un método de compactación por capas (3 capas de 60 mm cada una) aplicando una velocidad de deformación constante de 0.2 mm/min. La densidad seca de las muestras luego de la compactación fue de 1.40 Mg/m³. Las características de cada una de las muestras fabricadas se presentan resumidas en la

Tabla 9.2. Durante la compactación se midieron la fuerza vertical de compactación y la presión lateral. A partir de estos valores se obtiene la evolución de la trayectoria de tensiones (tensión vertical: σ_v y tensión horizontal: σ_H) para cada sensor. Las trayectorias de tensiones obtenidas durante la compactación y correspondientes a la compactación de la capa 3 de una de las muestras se presentan en las Figuras 9.9 y 9.10. También se indican los valores de K_0 y el coeficiente de Poisson ν . Se observa que los valores correspondientes al sensor lateral 1, presenta picos de crecimiento y colapsos provocados por el reacomodo y la rotura de pellets en la capa de material que está siendo compactado en esta etapa. Los valores de $K_0 \approx 0.3 - 0.4$ y $\nu \approx 0.2 - 0.25$ medidos durante la compactación están en concordancia con los valores reportados para materiales granulares.

Tabla 9.2. Características de las muestras preparadas para los ensayos de Columna de Infiltración.

	Tamaño máximo	Densidad seca	Índice de vacíos	Contenido de agua	Sr (%)	Tensión máx. de comp.	K_0
	Dmax [mm]	ρ_d [Mg/m ³]	e	W(%)		σ_v [MPa]	σ_v/σ_h
TEST 1	10	1.43	0.89	5.78%	17.40	3	0,35-0,45
TEST 2	20	1.40	0.93	8.78%	25.39	1.4	0,3-0,4

9.1.4 Inyección de agua

Una vez finalizadas las operaciones de preparación de la muestra, se realizó la etapa de inyección de agua. Se colocó el cabezal de inyección, la célula de carga y se ajustó la tapa de confinamiento de acuerdo con la secuencia que se muestra en la Figure 9.6. El dispositivo final de ensayo se muestra en la Figura 9.11.

Para realizar la inyección de agua se utilizaron dos procedimientos diferentes. Para la selección de estos procedimientos se tuvo en cuenta el protocolo de inyección de agua utilizado en el ensayo a escala real. En él se aplicó una inyección diaria de 20 litros en dos etapas de 10 litros en 15 minutos. El valor medio de la presión de inyección durante cada uno de los “pulsos” de inyección fue de 200 kPa. Teniendo en cuenta este valor se utilizó un procedimiento de inyección con control de velocidad y un control de inyección con control de la presión. En ambos procedimientos se limitó la presión de inyección en 200 kPa. En el primer ensayo, indicado como TEST 1, se aplicó una

condición inicial de velocidad de inyección constante y se midió la presión de inyección. La inyección comenzó con un flujo constante de $375 \text{ mm}^3/\text{s}$, condición que se mantuvo hasta que la presión de inyección alcanzó un valor de 200 kPa. A partir de ese momento, se fijó la presión de inyección en 200 kPa y se realizó una inyección con control de la presión de inyección. En el segundo ensayo, indicado como TEST 2, se utilizó un control de presión y se incrementó la presión de inyección de forma lineal y hasta alcanzar un valor de 200 kPa en el primer minuto de ensayo. Una vez alcanzado este valor, la presión se mantuvo constante e igual a 200 kPa hasta el final del ensayo. La evolución de la presión de agua, el volumen y el caudal inyectados durante la etapa inicial de ambos ensayos se muestran en la Figura 9.12.

9.1.5 Resultados experimentales

9.1.5.1 Evolución de la inyección de agua

Comparando los resultados experimentales obtenidos en ambos ensayos durante la primera etapa de inyección de agua se observan comportamientos diferentes (Figura 9.12). Durante la primera etapa del ensayo realizado con control de la velocidad de inyección (TEST 1), se inyectaron casi 130 ml de agua y el grado de saturación pasó de $Sr_0 = 0.17$ a $Sr_1 = 0.56$. Por otra parte, en el ensayo realizado con control de la presión de inyección (TEST 2) se inyectaron 43.7 ml y el grado de saturación pasó de $Sr_0 = 0.25$ a $Sr_1 = 0.40$. Luego de esta etapa inicial, se observan comportamientos similares. La evolución del volumen de agua inyectado y la variación del flujo a lo largo del ensayo se muestran en las Figuras 9.13-a y 9.13-b respectivamente. En el TEST 1 se alcanzó un grado de saturación de 0.82 luego de 3000 horas de inyección, mientras que en el TEST 2 (aún en marcha), el grado de saturación luego de 4200 horas de inyección es de 0.82. En la Figura 9.13-c, se presenta la evolución del flujo en función del grado de saturación para ambos ensayos. Se observa que la evolución de la velocidad de entrada de agua en la muestra durante la segunda etapa de ambos ensayos, está determinada por la presión de inyección y el grado de saturación de la muestra.

9.1.5.2 Evolución de las tensiones. Presión de hinchamiento

La evolución de la presiones de hinchamiento en ambos ensayos se muestran en las Figuras 9.14 a 9.18. Durante el ensayo TEST 1 y luego de finalizada la etapa de preparación de la muestra, se detectaron problemas en la conexión de los sensores de presión lateral y debieron reposicionarse. El reposicionamiento de los sensores modificó el estado de tensiones de la muestra en la zona de contacto entre el sensor y el material e introduce errores en la medida. Por este motivo los registros de presión lateral obtenidos durante el primer ensayo (TEST 1 Figura 9.14-a) y medida obtenida con estos sensores no se han tomado en cuenta para el análisis de las trayectorias de tensiones.

Comparando la evolución de la presión vertical de hinchamiento obtenida en ambos ensayos se observa que no depende del tipo de inyección utilizada durante la primera etapa del ensayo (Figura 9.15). Ambos ensayos muestran evoluciones temporales muy similares, llegando a un valor de presión de hinchamiento de aproximadamente 8.5 kg/cm² en correspondencia con un grado de saturación de 0.82 en ambos ensayos.

La evolución de la presión vertical y horizontal a lo largo del ensayo TEST 2 se muestran en las Figuras 9.16 y 9.17. La presión vertical muestra un comportamiento de crecimiento monótono desde el comienzo del ensayo y hasta un valor de 8.5 kg/cm². En el caso de las tensiones horizontales, el comportamiento observado muestra un comportamiento de crecimiento inicial. Posteriormente se observa una caída en el valor de la presión de hinchamiento debido al colapso de la estructura granular. Comportamientos similares fueron observados en los ensayos de humedecimiento a volumen constante reportados en el apartado 4.2.2. Se observa que luego de 4200 horas de ensayo, la medida de la presión de hinchamiento en los sensores operativos es aproximadamente la misma (8.0 kg/cm²), Figura 9.16. Esto indica que durante el proceso de humedecimiento, el material evoluciona a un estado de tensiones isotrópico “borrando” la anisotropía inicial introducida por la compactación. La evolución de la

tensión media $p = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2\sigma_h)$ y la tensión desviadora $q = (\sigma_v - \sigma_h)$ se muestran en las

Figuras 9.17-a y 9.17-b respectivamente. Los valores presentados fueron calculados a partir de la tensión vertical y el correspondiente valor de tensión horizontal. En todos los puntos se observan comportamientos cualitativamente similares en la evolución de p y q. Para interpretar el comportamiento observado, se consideraron las trayectorias de

tensiones en el plano (p, q) a lo largo del ensayo, Figura 9.18. En línea punteada se indica la trayectoria de tensiones correspondiente a la compactación. En trazo continuo se presenta la evolución de la trayectoria de tensiones a lo largo de la etapa de inyección. Las trayectorias se indican como 1, 2 y 3 en correspondencia con la numeración utilizada en los sensores de tensión lateral. Las trayectorias de tensiones muestran un tramo inicial que evoluciona de acuerdo a una relación lineal entre q/p similar a la observada durante la etapa de compactación $q/p \approx K_0$. Luego de este tramo inicial, la evolución de la trayectoria de tensiones evoluciona de forma cualitativamente similar a lo observado en los ensayos de presión de hinchamiento con control de la tensión lateral (ver apartado 4.2.2). Las trayectorias de tensiones (p, q) obtenidas a lo largo de estos ensayos se muestran en la Figura 9.19. A modo comparativo, en la Figura 9.20 se muestran la trayectoria de tensiones (p, q) correspondiente al ensayo VC13-2 y la correspondiente al sensor lateral 2 del TEST 2. Los comportamientos observados se muestran cualitativamente similares entre sí. El comportamiento observado se puede explicar asumiendo que durante la etapa inicial del ensayo, el agua entra en la muestra y se almacena en los vacíos entre pellets. En el caso del ensayo TEST 2 y durante la primera etapa del ensayo se inyecta un volumen de agua de 43.75 ml que llena los vacíos entre pellets (macroporosidad) de los primeros 3.2 cm de muestra (Figura 9.21-a). Durante esta etapa, el material ubicado por sobre esta zona, permanece en las condiciones iniciales. Al finalizar esta etapa, los pellets de la zona inundada comienzan a hidratarse, se expanden y se observa un incremento en la presión de hinchamiento. Este incremento actúa sobre la porción seca de material como un incremento de presión vertical neta $\Delta\sigma_v$ (Figura 9.21-b) y se observa una respuesta elástica. Los incrementos de tensión vertical y horizontal se vinculan de acuerdo con la expresión: **Equation Chapter (Next) Section 9**

$$\frac{\Delta\sigma_H}{\Delta\sigma_v} = \frac{\nu}{1-\nu} = K_0 \approx 0.33 \quad (9.1)$$

Luego de esta etapa y en correspondencia con el comienzo de la hidratación de las zonas en la que se encuentran los sensores, la trayectorias de tensiones evolucionan de acuerdo con el comportamiento observado en los ensayos de presión de hinchamiento realizados el edómetro con control de la tensión lateral, apartado 4.2.2.

9.1.6 Fin de ensayo y análisis de la muestra

El TEST 1 se finalizó luego de una etapa de inyección de 3000 horas y habiendo alcanzado un grado de saturación de 0.82. Por otra parte, el TEST 2, aún está en marcha y está previsto continuar la inyección hasta completar la saturación de la muestra y realizar una medida de la permeabilidad saturada del material. Una vez finalizado el TEST 1, se extrajo la muestra, se cortó en rebanadas transversales y se midió el contenido de agua y la densidad seca en cada una de ellas. Para ello se utilizó el método de la parafina (ASTM 4531-86). En la Figura 9.22 se muestra la distribución del contenido de agua, el grado de saturación y la densidad seca a lo largo de la muestra al final del ensayo. Estos valores se resumen en la Tabla 9.3. Se observa que la zona más cercana al inyector presenta una disminución en la densidad seca evidenciando la expansión del material. En la zona central, la densidad seca permanece constante mientras que el material ubicado en el extremo más lejano al inyector se ha comprimido. En las Figuras 9.23 y 9.24 se presentan distintas vistas del material en correspondencia con distintos grados de saturación. Se observa que durante el proceso de hidratación los pellets expanden invadiendo los poros entre pellets y se obtiene un material con un aspecto más uniforme. En la Figura 9.24 se observa el aspecto del material con un grado de saturación $S_r \approx 0.55 - 0.60$. Es posible identificar algunos poros entre pellets no invadidos.

Tabla 9.3. Distribución del contenido de agua, grado de saturación y densidad seca del la muestra de pellets al final del ensayo de Columna de Infiltración TEST 1.

Progresiva [mm]	15.1	47.0	81.0	109.2	136.2	166.1
w (%)	39.6	33.4	27.0	23.7	21.6	21.7
S_r	1.00	0.84	0.68	0.60	0.55	0.55
ρ_d [Mg/m ³]	1.33	1.38	1.42	1.42	1.43	1.47