

Capítulo 1: Características fundamentales del material utilizado.

1.1 La bentonita

1.1.1 Composición y estructura de la bentonita

La mayoría de los minerales de arcilla están formados por dos unidades estructurales básicas diferentes, silicatos y aluminatos. Los silicatos son estructuras tetraédricas formadas por un núcleo de sílice y oxígeno en sus vértices, mientras que los aluminatos son estructuras octaédricas formadas por un núcleo de aluminio y en sus vértices iones hidróxilos (OH^-), Figura 1.1. Ambas unidades se combinan formando partículas de forma hojosa que se caracterizan por tener una gran superficie específica (gran relación entre el área y la masa), propiedad que resulta determinante en el comportamiento del material. La sílice y aluminio pueden aparecer sustituidos por otros elementos, hecho que se conoce como sustitución isomorfa. La combinación de las unidades básicas da lugar a diferentes minerales arcillosos los cuales se componen de una combinación de estructuras en forma de hoja. Las estructuras de los principales minerales arcillosos se muestran en la Figura 1.2.

La bentonita es una arcilla compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, con independencia de su génesis y modo de aparición, (Grim, 1972). Las esmectitas son filosilicatos con estructura 2:1, presentando una gran diversidad composicional. Su estructura se basa en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidróxilos. Los oxígenos se unen formando capas de extensión infinita con coordinación tetraédrica. Tres de cada cuatro oxígenos están compartidos con los tetraedros vecinos. En el interior de los tetraedros se alojan cationes Si^{4+} . Los hidróxilos forman capas con coordinación octaédrica. Los oxígenos tetraédricos sin compartir con otros oxígenos (oxígenos apicales) forman parte de la capa octaédrica adyacente. Los cationes octaédricos son, generalmente, Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} o Fe^{3+} y, más raramente, Li^+ , Cr^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} o Zn^{2+} . Una capa octaédrica entre dos tetraédricas, unidas fuertemente por enlace covalente, forman la unidad estructural básica de las esmectitas.

Estas láminas se encuentran separadas por cationes débilmente hidratados (fundamentalmente Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^{2+}), que compensan las cargas negativas resultantes de las sustituciones isomórficas (tanto tetraédricas como octaédricas) de cationes por otros con valencias diferentes. La presencia de la superficie interlaminar así como de una débil carga en la misma, son características esenciales de este grupo de minerales. Como consecuencia de ello son capaces de incluir en ella no sólo cationes hidratados, sino también agua u otros líquidos polares, dando lugar a una mayor separación de las capas (aumento de su espaciado reticular) y por tanto hinchamiento.

1.1.2 Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas de la bentonita se derivan principalmente de:

- Su tamaño de partícula (inferior a 2 μm).
- Su morfología laminar (filosilicatos).
- Las sustituciones isomorfas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

A continuación se enumeran y describen algunas de las propiedades fisicoquímicas de mayor interés en la utilización de los materiales de bentonita.

1.1.2.1 Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que ésta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g . Las bentonitas poseen una elevada superficie específica (150-800 m^2/g), muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

1.1.2.2 Capacidad de intercambio catiónico

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir

como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomorfas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina. En el caso de las bentonitas la capacidad de intercambio catiónico varía entre 70 y 130 meq/100 g.

1.1.2.3 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación de la superficie interlaminar son también propiedades únicas de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos de la bentonita. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. Cuando el catión interlaminar es el Na^+ , las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, y si por el contrario, tienen Ca^{2+} o Mg^{2+} como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

1.1.2.4 Plasticidad

Las esmectitas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma un recubrimiento sobre las partículas laminares de esmectita produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las esmectitas es consecuencia,

nuevamente, de su morfología laminar, extremadamente pequeño tamaño de partícula (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

1.1.3 Usos de la bentonita

La utilización de la bentonita sea como material puro o combinado tiene aplicaciones en numerosas áreas. En la Figura 1.3 se muestra un cuadro con una breve reseña de las aplicaciones más comunes de la bentonita agrupadas de acuerdo al área de aplicación.

1.2 Pellets de bentonita

La bentonita en forma de pellets (gránulos de alta densidad), es muy utilizada debido a las siguientes propiedades facilidad en el transporte y manejo del material, posibilidad de utilizar medios mecánicos en las operaciones de emplazamiento, menor generación de polvos en suspensión que favorece su uso en ambientes con reducida ventilación, no necesita la utilización de medios de compactación mecánicos adicionales.

A continuación se describe el proceso de fabricación de los pellets de bentonita. Se indican las propiedades de la bentonita así como de las propias unidades granulares: tamaño, densidad seca, humedad inicial, etc. Finalmente se presentan los resultados obtenidos en ensayos de intrusión de mercurio (MIP) realizados para caracterizar la estructura interna de estas unidades.

1.2.1 Proceso de fabricación de los pellets de bentonita

Los pellets de bentonita utilizados en esta investigación se fabricaron a partir de polvo de bentonita FEBEX (NAGRA, 2001; Kennedy, 2003). La bentonita FEBEX es una bentonita cálcica que proviene del depósito de Cortijo de Archidona. El depósito se encuentra ubicado en la zona de Serrata de Nijar situado al sur de España en Almería. Las características fundamentales de este material han sido extensamente estudiadas en el programa de laboratorio del proyecto FEBEX (ENRESA, 2000). En dicho proyecto se estudia el comportamiento de una barrera compuesta por bloques de bentonita compactada, como aislante en un almacenamiento subterráneo de residuos provenientes de la energía nuclear. Durante el programa experimental realizado a lo largo de este proyecto, se han llevado a cabo numerosos estudios de caracterización térmica,

mecánica, hidráulica y química del material. Las principales características de este material se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características de la bentonita FEBEX. (Adaptada de ENRESA, 2000)

Parámetro	Valor
Límite líquido w_L (%)	93
Límite plástico w_P (%)	47
Porción de material con tamaño $< 75 \mu m$	85
Contenido de agua higroscópico w (%)	14
Densidad de sólidos ρ_s (Mg/m^3)	2.70
Contenido de monmorillonita %	>90

Utilizando la bentonita FEBEX como materia prima se manufacturan los pellets de alta densidad. El proceso de fabricación de los pellets se puede describir de acuerdo a las siguientes etapas:

- Calentamiento de la bentonita FEBEX a 120 ° C. Como resultado de este proceso se tiene un material con un contenido de agua del 3-4 % y mucho más compresible.
- Compactación del material precalentado mediante una prensa de rodillos. El material previamente calentado se vierte sobre una prensa de rodillos en la que se regulan tanto la fuerza como la velocidad de la compactación buscando un rendimiento óptimo. Como resultado de la compactación se obtienen gránulos de bentonita altamente compactada y con un muy bajo contenido de agua. ($\rho_d = 1.95 Mg/m^3$, $w=3-4$ %). Las características de los pellets se presentan en la Tabla 1.2.
- Finalmente se rompen los gránulos y se clasifican por tamaño. Se mezclan siguiendo una granulometría óptima tipo Fuller y se almacenan en bolsas herméticas para su posterior utilización.

El proceso de fabricación de los pellets y de preparación de las mezclas se representa esquemáticamente en la Figura 1.4. En la Figura 1.5 se muestran las bolsas de mezclas de pellets en el momento previo a su utilización.

Tabla 1.2. Características de las unidades granulares, pellets.

Parámetro	Valor
Densidad seca ρ_d (Mg/m ³)	1.95
Contenido de agua w(%)	3-4
Succión asociada al contenido de agua (MPa)	250-300
Índice de vacíos, e	0.38
Grado de saturación inicial, S_r	0.28
Densidad de sólidos ρ_s (Mg/m ³)	2.70

1.2.2 Caracterización de la estructura interna de los pellets de bentonita

El tamaño, la forma y la distribución por tamaño de los poros son elementos fundamentales en la estructura interna de un suelo. La conductividad hidráulica está muy condicionada por la forma y tamaño de los poros. De igual forma, el comportamiento de deformación y cambio de volumen del suelo, está estrechamente ligado al espacio disponible entre partículas para que éstas se desplacen y reacomoden. Por estos motivos, resulta fundamental el estudio de la estructura interna de un material, la determinación del volumen, tamaño y forma de los poros así como su evolución y cambio frente a acciones externas.

En el caso de los materiales con un alto contenido de minerales arcillosos y de características expansivas, el estudio de la estructura interna resulta aún más determinante. El potencial expansivo de un suelo está estrechamente ligado a la capacidad de incorporar una gran cantidad de agua entre partículas de arcilla (Tabla 1.1). Las moléculas de agua se incorporan en capas sucesivas, alojándose entre los minerales arcillosos y generando grandes cambios estructurales. Esto hace del proceso de hidratación un fenómeno hidromecánico muy acoplado que provoca grandes cambios

estructurales. A los efectos de caracterizar la estructura interna de los pellets de bentonita se realizaron ensayos de intrusión de mercurio (MIP).

1.2.2.1 Ensayos de intrusión de mercurio (MIP). Porosimetrías

Los ensayos de intrusión de mercurio o ensayos de porosimetría de mercurio, permiten obtener información sobre el volumen de poros interconectados y su distribución por tamaño. El principio de funcionamiento de los ensayos MIP es sencillo. Se sumerge la muestra en mercurio y se aumenta la presión del mercurio en forma incremental. Para cada incremento de presión aplicado en el mercurio, se mide el volumen de mercurio que ingresa en la muestra. El volumen total de mercurio inyectado nos da información sobre el índice de vacíos de la muestra y la presión de mercurio aplicada en cada incremento se vincula con el tamaño de los poros.

Para interpretar el ensayo se plantea la siguiente analogía geométrica. Se asume que el suelo está formado por un conjunto de poros de forma cilíndrica y de distinto diámetro. Al aumentar la presión, el mercurio que rodea la muestra comienza a entrar en los tubos (poros): primero los poros de mayor diámetro y luego los de menor diámetro. La relación entre la presión de mercurio y el diámetro del poro que se está llenando se puede expresar como:

$$D = - \frac{4 \gamma \cos \theta_{nw}}{(P_{Hg} - P_{vHg})} \quad (1.1)$$

siendo:

D = diámetro del poro

γ = tensión superficial del mercurio

θ_{nw} = ángulo de contacto mercurio bentonita

$(P_{Hg} - P_{vHg})$ = exceso de presión de mercurio líquido sobre la presión de vapor de mercurio.

La relación planteada en la ecuación (1.1) se deduce de plantear el equilibrio de fuerzas sobre la superficie de contacto vapor de mercurio-mercurio-pared del poro, existente en

un poro cilíndrico durante la intrusión de mercurio, Figura 1.6. La tensión superficial del mercurio es $\gamma = 0.484 \text{ N/m}$ a 25°C , el ángulo de contacto para arcillas como la bentonita varía entre 139° y 147° y en este caso se adoptó $\theta_{mw} = 140^\circ$. Otros valores han sido reportados en la literatura para materiales arcillosos, Delage & Lefebvre (1984) tomaron un ángulo de 141° en arcillas naturales, mientras que Griffiths & Joshi (1989) utilizaron 147° para illita y caolinita.

En los ensayos realizados se utilizó un porosímetro de mercurio Micromeritics Modelo AutoPore IV 9500, Figura 1.7. Este equipo permite aplicar presiones de mercurio mediante dos sistemas de control diferentes. Un sistema de baja presión que utiliza nitrógeno como fluido para aplicar las presiones sobre el mercurio y un sistema de alta presión que utiliza aceite. Mediante el sistema de baja presión se controla la presión absoluta de mercurio aplicada en un rango de valores entre 0.0025 a 0.20 MPa, Figura 1.8-a. Por otra parte, mediante el sistema de alta presión se aplican presiones absolutas entre 0.2 y 220 MPa, Figura 1.8-b. A partir de la expresión (1.1) se deducen los valores máximos y mínimos de tamaño de poro que se pueden investigar. En el caso de las muestras de pellets de bentonita, el rango de poros estudiado fue de entre 6nm (0.006 μm) y 500 μm . Los poros con un tamaño mayores de 500 μm se inyectan de mercurio durante la etapa del “llenado inicial” del porosímetro y en el caso de poros de un tamaño menor a 6 nm se reportan dentro de la porosidad no conectada o no inyectada.

Como resultado del ensayo se obtiene una relación entre la presión de mercurio aplicada y el volumen de mercurio inyectado. La presión de mercurio se traduce en un diámetro de poro a partir de la expresión (1.1) y se representa en función del volumen inyectado por unidad de masa de la muestra. En la Figura 1.9 se muestra en forma esquemática una curva obtenida en un ensayo de intrusión de mercurio. En el eje horizontal se considera la presión aplicada o el diámetro de poro equivalente y en el eje vertical se representa el volumen total intruido por unidad de masa. Considerando la densidad de las partículas de sólido $\rho_s [\text{Mg/m}^3]$ y el volumen de mercurio intruido por unidad de masa $V_{\text{int}} [\text{ml/g}]$, se puede obtener el índice de vacíos inyectado e_{int} a partir de la relación:

$$e_{\text{int}} = V_{\text{int}} * \rho_s \quad (1.2)$$

En los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio se distinguen dos fases diferentes, la fase de intrusión y la fase de extrusión. Durante la fase de intrusión, se incrementa la presión de mercurio hasta un valor máximo (220 MPa) y se mide el volumen de mercurio entrado en la muestra. En la segunda fase, fase de extrusión, se disminuye la presión de mercurio aplicada de forma controlada y se mide el volumen de mercurio saliente de la muestra. La fase de intrusión (curva representada en forma continua en la Figura 1.9) nos permite tener información sobre el volumen de vacíos interconectados (porosidad interconectada) y de su distribución por tamaño. A modo de ejemplo podríamos decir que los resultados representados en la Figura 1.9 se corresponden con un material con una estructura de poros monomodal. Los poros se agrupan en un único tamaño predominante con un valor medio cercano a 0.1 μm .

Durante la segunda fase del ensayo, fase de salida o extrusión del mercurio, se mide el volumen de mercurio “saliente” frente al decremento de la presión (línea punteada en la Figura 1.9). A lo largo de la fase de extrusión, se observa un efecto de histéresis y también que existe parte del mercurio que se mantiene dentro de la muestra. Estos fenómenos se deben por una parte la diferencia existente en el ángulo de mojado durante el proceso de entrada y de salida del mercurio, y en segundo lugar, por la existencia de poros con constricciones o poros “cuello de botella”, que hacen las veces que caverna o cavidades donde el mercurio permanece almacenado.

El análisis incremental de la curva de intrusión nos permite obtener la una función densidad de distribución poros según su tamaño e identificar los tamaños más característicos, (Romero, 1999). Tomando $f(x)$ como:

$$f(x) = \frac{1}{V_t} \left(- \frac{d(V_{\text{int}})}{dx} \right) \quad (1.3)$$

y la función integral $F(x)$ como:

$$F(x) = \int_x^{\infty} f(x) dx = \frac{V_{\text{int}}}{V_t} \quad (1.4)$$

y donde

$$F(0) = \int_0^{\infty} f(x) dx = 1$$

x es el diámetro aparente del poro inyectado, V_t es el volumen total de poros accesibles en la muestra y (V_{int}) es el volumen de poros inyectado con un diámetro igual o mayor de x .

A los efectos de analizar la información obtenida en el ensayo y dado que los diámetros de poros mínimo y máximo difieren en varios ordenes de magnitud, resulta útil utilizar una escala logarítmica de acuerdo con:

$$f(\log(x)) = \frac{1}{V_t} \left(- \frac{d(V_{int})}{d(\log(x))} \right) \quad (1.5)$$

Analizando la función de distribución resulta más evidente el estudio de la estructura interna del material ensayado.

Algunas de las limitaciones que presenta el ensayo de intrusión de mercurio son:

- Los poros deben estar secos. Esto obliga a realizar, en forma previa al ensayo, un secado de la muestra utilizando técnicas como el freeze drying (congelado rápido y posterior sublimación del agua). Mediante esta técnica, es posible extraer el agua de los poros limitando al máximo la modificación de la estructura del suelo por los efectos de retracción, (Delage *et al.*, 1982; Delage *et al.*, 1996).
- Sólo se obtiene información sobre los poros interconectados
- Los poros conectados a través de poros de menor tamaño (efecto de tipo cuello de botella) se llenarán al alcanzarse la presión de llenado correspondiente al poro menor
- El equipo tiene la limitante de no poder inyectar los poros con un tamaño menor a 6nm.

A pesar de estas limitantes el ensayo de intrusión de mercurio nos aporta información muy útil para caracterizar la estructura interna del material y los factores que la afectan.

Los resultados obtenidos en ensayos realizados sobre dos muestras de basalto triturado, preparadas mediante compactación estática y dinámica respectivamente se muestran en la Figura 1.10. Se puede observar como distintos tipos de compactación resultan en una estructura interna diferente.

1.2.2.2 Ensayos de porosimetría sobre un pellet

Se realizaron ensayos de intrusión de mercurio sobre los pellets de bentonita con el objetivo de caracterizar su estructura interna y de obtener información sobre las unidades que componen las mezclas granulares. Los resultados obtenidos durante el ensayo de intrusión de mercurio se presentan en la Figura 1.11. La Figura 1.11-a representa el índice de vacíos inyectado en el ensayo (e_{int}), calculado a partir de la expresión (1.2).

A partir del análisis incremental de la curva de intrusión de mercurio en función del tamaño de poro y de acuerdo con la expresión (1.5) se obtiene la función de densidad de distribución del índice de vacíos intruido (e_{int}) por tamaño de poro, Figura 1.11-b. En el caso de los pellets de bentonita nos encontramos con una distribución de poros bi-modal. Según se observa en la curva de la Figura 1.11-b, existen dos grupos de poros con tamaños característicos de 13 nm y 3 μ m respectivamente. Los poros con un tamaño de 3 μ m se corresponden con los poros entre agregados de partículas de minerales de arcilla, mientras que los poros de tamaño 13 nm pertenecen a los poros dentro de los agregados de partículas de arcilla. De estos resultados se deduce que a pesar de la fuerte compactación aplicada durante el proceso de fábrica de los gránulos de bentonita, no se alcanzan a “fundir” los agregados de partículas de arcilla y se mantiene la distribución bi-modal.

1.3 Preparación de las mezclas de pellets de bentonita

Una vez fabricados, los gránulos de bentonita de alta densidad se rompen, se clasifican por tamaño y se utilizan para preparar las mezclas de pellets. Las diferentes fracciones clasificadas por tamaño se muestran en la Figura 1.12. Para la preparación de las mezclas de pellets se tomó como punto de partida una distribución granulométrica de tipo Fuller (Figura 1.13). La definición de la curva granulométrica óptima se hizo a partir de una serie de ensayos preliminares realizados sobre muestras fabricadas

utilizando la mezcla inicial. El objetivo fundamental de estos ensayos fue de definir la curva granulométrica óptima de la mezcla de pellets de acuerdo con los siguientes factores:

- Maximizar la densidad seca obtenida por autocompactación. Esto se debe a que el emplazamiento de las mezclas de pellets se realiza por medios mecánicos y su compactación se produce únicamente por caída gravitacional.
- Evitar la segregación del material. Evitar que las operaciones de transporte y emplazamiento produzcan una separación por tamaño por efecto de la segregación del material y perder la uniformidad de la mezcla.
- Minimizar el tiempo necesario para alcanzar la saturación del material. Esto es, reducir al máximo posible los tiempos necesarios para que la barrera alcance la saturación y se encuentre en estado de servicio.
- Construir una mezcla estable. Asegurar que todas las fracciones del material mantengan las condiciones de humedad y densidad seca necesarias durante el proceso de transporte y emplazamiento.

Luego de definida la curva granulométrica óptima se prepararon mezclas de pellets y se estudió su estructura interna considerando diferentes niveles de compactación. A continuación se presentan los ensayos preliminares y la selección de la mezcla óptima. Posteriormente se describen los ensayos realizados para caracterizar la estructura interna de las mezclas de pellets, (Romero *et al.*, 2001).

1.3.1 Ensayos preliminares y selección de la mezcla óptima

A los efectos de diseñar la mezcla óptima se realizaron una serie de ensayos de carácter preliminar. Como punto de partida para el diseño de la mezcla se utilizó una distribución granulométrica de tipo Fuller y se limitó el tamaño máximo de pellet a utilizar en función de las dimensiones de la muestra. El concepto propuesto por la curva Fuller asume que las partículas que componen el suelo tienen una forma aproximadamente esférica y las combina de forma de optimizar su empaquetamiento, maximizando la densidad y minimizando los vacíos. El concepto propuesto se representa en la Figura 1.13. La expresión matemática de dicha curva es:

$$\%Pasante = \sqrt{\frac{D}{D_{m\acute{a}x}}} \times 100 \quad (1.6)$$

donde D y $D_{m\acute{a}x}$ representan el tamaño pasante y el tamaño máximo de partícula respectivamente.

Los objetivos particulares de la etapa de ensayos preliminares son:

- Estudiar la evolución del contenido de agua de las diferentes fracciones de pellets.
- Estudiar la influencia de la fracción de partículas de menor tamaño en las propiedades hidráulicas y mecánicas, permeabilidad y presión de hinchamiento.

Para lograr los objetivos particulares planteados anteriormente se realizaron dos tipos de ensayos diferentes:

- Ensayos de evolución del contenido de agua por fracción.
- Ensayos de infiltración.

1.3.1.1 Evolución del contenido de agua por fracción

Durante gran parte de las operaciones de transporte y emplazamiento, las mezclas de pellets estarán en contacto con ambientes donde la humedad relativa del aire es mayor que la correspondiente a la del potencial de agua existente en el interior de los gránulos. A lo largo de este tiempo, los pellets intentaran compensar este desequilibrio absorbiendo agua del aire en un proceso que se podría asimilar a una expansión libre. Los pellets aumentan su contenido de agua, disminuyendo su densidad seca.

En estos ensayos se estudió la estabilidad de cada una de las fracciones al ser expuestas a un ambiente con una humedad relativa mayor a la existente en su interior. Las diferentes fracciones de pellets se mantuvieron expuestas al ambiente del laboratorio (con una humedad relativa $HR(\%)=50-60$) y se midieron los contenidos de agua de cada una de las fracciones en diferentes tiempos hasta su estabilización en un contenido de agua cercano al 17%.

Los resultados obtenidos durante el ensayo, Figura 1.14, muestran como luego de 7 días las fracciones con tamaños menores de 0.4 mm presentan un incremento en el contenido de agua, significativamente mayor al medido en las fracciones con un tamaño mayor. Finalmente y al cabo de 2 meses de exposición, todas las fracciones llegan al mismo punto de equilibrio con el medio ambiente con un contenido de agua próximo al 17%. La velocidad de absorción de agua, observada en la fracción fina del material, se puede relacionar con a la mayor superficie expuesta al intercambio.

1.3.1.2 Ensayos de infiltración

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de evolución del contenido de agua, se determinó que la fracción de material con tamaño menor del 0.4 mm tiene una mayor velocidad para intercambiar agua con el aire circundante (aumenta su contenido de agua muy rápidamente). Esto motivó la realización de una serie de ensayos adicionales. Ensayos de infiltración realizados con el objetivo de estudiar algunos efectos de la fracción fina en el comportamiento hidromecánico de la mezcla. En estos ensayos también se estudio la influencia de otros factores en la respuesta del material como: el contenido de agua inicial, la influencia del tipo de agua y densidad seca. Dada la poca información con que se contaba al comienzo de la investigación, en la selección de ensayos realizados se intentó tener en cuenta la mayor cantidad de factores posibles. A pesar de ello es posible realizar un análisis de conjunto de los resultados obtenidos. Las características de los ensayos realizados se presentan en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Ensayos de infiltración realizados en el programa preliminar.

ENSAYO	Densidad seca [Mg/m ³]	Tipo de agua	Granulometría		Contenido de agua W ₀ (%)
			Fracción < 0.4mm	D _{max.} [mm]	
INF 1	1.43	Destilada	Sí	15	18
INF 2	1.50	Destilada	Sí	10	4
INF 3	1.51	Destilada	No	10	4
INF 4	1.39	Pearson (*)	No	10	4
INF 5	1.30	Pearson (*)	No	10	4

(*) Agua de Pearson: Agua existente en el macizo que aloja la el almacenamiento. Mont Terri, Suiza (Pearson, 2002).

Los ensayos de infiltración se pueden describir en forma simplificada como ensayos de inyección de agua a volumen constante. La muestra se coloca en una célula de infiltración (Figura 1.15), que permite la inyección de agua desde la parte inferior en

condiciones controladas. La célula se coloca en un edómetro de palanca y se bloquea el desplazamiento vertical de la muestra manteniendo la condición de volumen constante. Durante el proceso de inyección se mide el volumen de agua que entra en la muestra y la presión de hinchamiento vertical. En la Figura 1.16 se muestra el dispositivo de ensayo utilizado. Una revisión detallada del equipo y procedimiento de ensayo se presenta en el Capítulo 3.

La evolución del grado de saturación de la muestra a lo largo del ensayo así como la presión de hinchamiento obtenida al final del ensayo se muestran en las Figuras 1.17-a y 1.17-b, respectivamente. De acuerdo con los resultados obtenidos y comparando en particular los resultados de los ensayos INF_2 e INF_3 realizados sobre muestras con igual densidad seca, se puede observar la influencia de la fracción fina en la evolución del grado de saturación. La mezcla que no contiene la fracción con tamaños de partículas menores de 0.4 mm (INF_3) muestra, para iguales tiempos de ensayo, un mayor valor en el grado de saturación (Figura 1.17-a). Sin embargo la ausencia de esta fracción más fina del material no parece afectar mayormente la presión de hinchamiento ya que en ambos casos se alcanzan valores similares (Figura 1.17-b). Comparando los resultados obtenidos en los restantes ensayos se pueden obtener indicadores de comportamiento respecto de otras variables como el tipo de agua utilizada, la densidad de la mezcla y el contenido de agua inicial. En los ensayos realizados con agua de Pearson se observa que la presión de hinchamiento no parece ser mayormente afectada ni por el tipo de agua ni por la diferencia de contenido de agua inicial en los rangos entre 4 y 18 %. De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que la presión de hinchamiento del material, está controlada por la densidad seca de la mezcla. Los valores registrados se ajustan muy bien con la información proveniente de los resultados experimentales obtenidos en el proyecto FEBEX, (ENRESA, 2000).

Finalmente se realizó un ensayo de infiltración adicional utilizando una célula de metacrilato. El objetivo del ensayo es el de obtener información cualitativa sobre la cinemática del agua al entrar en la muestra y a lo largo de la primera parte del proceso de infiltración. Para ellos se preparó una muestra de pellets en una célula de infiltración de 7 mm diámetro y 180 mm de altura, Figura 1.18. Las características del ensayo se presentan en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Características del ensayo de infiltración realizado en una célula de metacrilato.

ENSAYO	Densidad seca [Mg/m ³]	Tipo de agua	Granulometría		Contenido de agua W ₀ (%)
			Fracción < 0.4mm	D _{max.} [mm]	
INF MET	1.50	Destilada	Sí	20	18

En este ensayo de infiltración se inyectó agua en la muestra por su parte inferior utilizando una presión de agua correspondiente a una carga hidráulica de 0.20 m y se observó la trayectoria seguida por el agua durante el inicio de la inyección. Inicialmente el agua entró en la mezcla granular hidratando los primeros centímetros de la muestra en forma muy rápida, Figura 1.18-c. Luego de este corto período inicial, la entrada de agua se detuvo debido a que los pellets en contacto con el agua expanden formando una barrera impermeable. Las condiciones de inyección se mantuvieron durante un período de 25 días sin observarse un avance significativo en el frente de hidratación.

1.3.1.3 Selección de la mezcla óptima

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos preliminares y de acuerdo con los objetivos establecidos para el diseño de la mezcla óptima, se decidió descartar de las mezclas de pellets la fracción de material con un tamaño menor a los 0.4 mm. Los factores determinantes en la decisión adoptada fueron:

- Evitar la segregación de material fino observada durante el proceso preparación de las muestras.
- La mayor velocidad de intercambio de agua con el medio ambiente observado en la fracción fina de material.
- Obtener un material con una estructura interna más abierta y con una mayor interconexión de los poros entre pellets
- El valor final de la presión de hinchamiento no se afecta por la granulometría y depende de la densidad seca de la mezcla.

Como resultado se diseñó una curva granulométrica cuyo tamaño mínimo de pellets es de 0.4 mm. La curva granulométrica adoptada se puede expresar como:

$$(\%)Pasante = 100 \frac{\sqrt{D/D_{\max}} - \sqrt{D_{\min}/D_{\max}}}{1 - \sqrt{D_{\min}/D_{\max}}} \quad (1.7)$$

donde D_{\min} es el diámetro de mínimo de los pellets ($D_{\min} = 0.4 \text{ mm}$ en este caso) y D_{\max} varía dependiendo del tamaño de la muestra a ensayar. A lo largo del programa experimental se utilizaron tamaños máximos de 4, 10 y 15 mm para muestras de altura de ensayo 20, 50 y 100 mm respectivamente. Las curvas granulométricas correspondientes a cada uno de los tamaños máximos se muestran en la Figura 1.19.

1.4 Caracterización de la estructura interna de las mezclas de pellets de bentonita

Una vez definida la granulometría a utilizar se prepararon muestras de pellets a distintos niveles de empaquetamiento. Esto es, con distintos valores de densidad seca que variaron entre 1.35 y 1.95 Mg/m³ y se estudio su estructura interna. Para ello se realizaron dos tipos de ensayos diferentes, ensayos de Intrusión de Mercurio (MIP) y observaciones utilizando un microscopio electrónico ambiental (ESEM). A partir de estos ensayos es posible obtener información sobre el volumen, tamaño y la forma de la red de poros existentes en el material a diferentes densidades de empaquetamiento.

A continuación se describe en primer lugar, el proceso de preparación de las muestras de pellets a distintos valores de densidad seca y se estudia el efecto de la compactación sobre la granulometría de la mezcla (rotura de pellets). Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de intrusión de mercurio y observaciones mediante ESEM. Finalmente, se resumen las características fundamentales de la estructura interna observada en las mezclas de pellets de bentonita y su evolución a lo largo del proceso de compactación. Se describen los mecanismos de cambio de volumen fundamentales existentes a lo largo de la compactación y se realiza un análisis fractal del espacio poroso de las muestras a diferentes densidades.

1.4.1 Fabricación de muestras

Una de las ventajas en la utilización de este material, es que su colocación no requiere la utilización de compactación mecánica adicional. En el laboratorio se realizaron ensayos de preparación de muestras utilizando una compactación por caída gravitacional. Los

valores de densidad seca obtenidos mediante este tipo de procedimiento en el laboratorio fueron de entre 1.05 y 1.15 Mg/m³. Estos valores resultan menores a los reportados por NAGRA (2003), obtenidos en los ensayos de prueba realizados utilizando un túnel de maqueta a escala real. Esto obligó en laboratorio, a la utilización de una compactación mecánica adicional de forma de poder alcanzar las densidades previstas. En la preparación de las muestras para estudiar el efecto de la compactación, se adoptó una mezcla con un tamaño máximo de pellet de 4 mm. El material se colocó en un compactador con dimensiones de 50 mm de diámetro y 20 mm de altura, Figura 1.20. El material se compactó de forma unidimensional, utilizando una velocidad de deformación vertical constante de 0.2 mm/min y se registró la evolución de la carga vertical. Los valores de carga vertical obtenidos al final del proceso de compactación en función de la densidad seca de la muestra se presentan en la Figura 1.21. De acuerdo con los datos experimentales, la tensión vertical de compactación se puede expresar mediante una ley exponencial dada por:

$$\sigma_v = 0.00263 e^{5.115\rho_d} \quad (1.8)$$

donde ρ_d es la densidad seca de la muestra expresada en [Mg/m³] y σ_v es la tensión vertical máxima de compactación expresada en [MPa]. El proceso de preparación y compactación de las muestras se puede asimilar a un proceso de carga y descarga a contenido de agua constante. Las curvas de compresibilidad obtenidas durante la compactación, en el caso de las muestras con densidades medias de entre 1.30 y 1.50 Mg/m³ nos permiten deducir cierta información sobre la rama de compresibilidad virgen de las mezclas granulares, Figura 1.22.

A los efectos de cuantificar el efecto de la compactación en la curva granulométrica, el efecto de la rotura de pellets, investigar los mecanismos de reducción de vacíos en las mezclas granulares, se estudió la granulometría de la muestra antes y después del proceso de compactación. Se prepararon muestras a una densidad seca de 1.5 Mg/m³ y posteriormente se realizó un análisis de su granulometría. Las curvas de distribución granulométrica antes y después del proceso de compactación se muestran en la Figura 1.23. De acuerdo con los resultados obtenidos, no se observa un cambio significativo en la curva granulométrica antes y después del proceso de compactación. Solo hay un 10 % en el aumento de la fracción fina de tamaño menor de 0.4mm. Esto permite concluir que

el mecanismo fundamental en la reducción de vacíos para mezclas de pellets con un valor densidad seca menor de 1.5 Mg/m^3 es el reordenamiento de los pellets. La rotura de pellets para niveles de empaquetamiento relativamente bajo, si bien existe, no tiene una importancia significativa en el mecanismo de la reducción de vacíos.

Finalmente y para tener información del estado total de tensiones existente en la muestra a lo largo del proceso de compactación, se realizaron ensayos de compactación utilizando un compactador con control de tensión lateral. Se midieron la evolución de la tensión vertical (σ_v) y tensión horizontal (σ_h) y se calcularon los valores de $K_0 = \frac{\sigma_v}{\sigma_h}$.

La evolución de las tensiones vertical y horizontal a lo largo del proceso de compactación para algunos de los ensayos realizados, se presentan en la Figura 1.24. Los valores medios de K_0 obtenidos fueron de $K_0 = 0.54$. Estos valores resultan dentro del rango de valores reportados por Mesri & Hayat (1993) para materiales granulares. Los valores de K_0 medidos en arenas y gravas varían entre 0.6 para materiales y 0.25 en función del ángulo de rozamiento interno y el nivel de tensiones aplicado. Considerando la expresión simplificada de Jaky (1948) para el coeficiente de empuje de tierras, propuesta para suelos granulares no densificados y materiales cohesivos normalmente consolidados $K_0 = 1 - \sin(\phi')$, el ángulo de fricción interna ϕ' para la mezcla de pellets sería de $\phi' \approx 27^\circ$.

1.4.2 Ensayos de porosimetría (MIP) realizados sobre mezclas de pellets

Se realizaron ensayos de intrusión de mercurio sobre mezclas de pellets de bentonita preparadas con diferentes valores de densidad seca de 1.35, 1.45 y 1.70 Mg/m^3 . Adicionalmente, se realizaron ensayos de intrusión de mercurio sobre una muestra de pellets compactada a un valor de densidad seca de 1.95 Mg/m^3 y una muestra preparada en el propio porosímetro utilizando caída gravitacional y cuya densidad seca se estimó en $\rho_d = 1.10 - 1.20 \text{ Mg/m}^3$. De esta forma se estudió obtuvo información sobre la estructura interna del material considerando distintos niveles de compactación.

En el caso de la muestra granular preparada por gravedad, Figura 1.25, el volumen de vacíos inyectado con mercurio resultó equivalente a un índice de vacíos de $e_{\text{int}} = 1.024$,

valor que representa entre el 71 y 82 % del índice de vacíos total ($e_{\text{Total}} \approx 1.25 - 1.45$). El volumen de vacíos no inyectado en la muestra es $e_{\text{NO_int}} \approx 0.22 - 0.43$. Este valor resulta consistente con el valor de porosidad no inyectada observado en el ensayo de intrusión de mercurio realizado sobre un pellet (Figura 1.11). La mezcla granular presenta una estructura interna donde se identifican tres conjuntos de poros con diferente tamaño característico, 250 μm , 3 μm y 13nm. El conjunto de poros de mayor tamaño (250 μm) corresponde a los poros entre pellets. Este valor está en correspondencia con la relación propuesta por Kamiya & Uno (2000) para materiales granulares. Esta relación vincula el tamaño característico de poro y el tamaño de partícula en materiales granulares ($d_{\text{poro}} = 0.2 D_{\text{part}}$). Los restantes conjuntos de poros, de tamaños 3 μm y 13nm, se corresponden con los poros situados dentro del pellet, poros intra-pellet. El primero corresponde a los poros entre agregados de partículas de arcilla y el segundo, de tamaño 13 nm, se corresponde con los poros intra-agregados de partículas de arcilla. La función de distribución de poros obtenida en el ensayo de intrusión de mercurio se presenta en la Figura 1.25-b.

En la Figura 1.26, se presentan los resultados obtenidos en muestras con valores de densidad seca 1.35, 1.45 y 1.70 Mg/m^3 . También se incluyen los resultados obtenidos en el caso de la muestra con una densidad seca de 1.95 Mg/m^3 y que representa el pellet. Los volúmenes totales inyectados en cada una de las muestras representan entre el 57 y el 67% del volumen total de vacíos. Este valor resulta algo menor al obtenido en el ensayo de un pellet. Las curvas de densidad de distribución de poros, Figura 1.26-b, muestran una distribución bi modal en todas las muestras. Un modo de poros con un tamaño de 13 nm común a todas las muestras y que corresponde a los poros ubicados entre partículas de arcilla dentro del pellet, y un segundo modo de tamaño variable entre 5 y 40 μm . Este segundo conjunto de poros corresponde con los poros entre pellets y su tamaño depende de la densidad seca de la muestra.

Los resultados obtenidos están en concordancia con los resultados reportados sobre muestras compactadas utilizando bentonita FEBEX. Esto es, el material compactado previo al proceso de su pelletización. En la Figura 1.27 se muestran comparados los resultados obtenidos en ensayos de intrusión de mercurio realizados sobre una muestra de pellets a una densidad de 1.45 Mg/m^3 y una muestra de bentonita FEBEX

compactada a 1.55 Mg/m^3 . A los efectos de poder comparar estos resultados se normalizó el índice de vacíos inyectado (e_{int}) respecto del índice de vacíos total (e_{Tot}).

En la Figura 1.27-a se representa el grado de saturación inyectado, dado por $S_{r_{\text{int}}} = \frac{e_{\text{int}}}{e_{\text{Tot}}}$

en función del tamaño de poros. El grado de saturación inyectado $S_{r_{\text{int}}}$ en el caso de las muestras de pellets resultó un poco mayor que en las muestras de bentonita FEBEX. Una explicación posible es la mayor densidad de los gránulos que componen la muestra de pellets (resultado del proceso de pelletización), que determina para una misma densidad seca de la muestra, una porosidad más accesible.

1.4.3 Observación de la estructura interna utilizando microscopio electrónico (ESEM)

El ESEM (Environmental Scanning Electron Microscopy) permite observar la estructura interna del material y obtener imágenes de una muestra ampliadas desde 300 hasta 3000 veces su tamaño. A los efectos de observar la estructura interna de las mezclas de pellets de bentonita se fabricó una muestra con una densidad seca de 1.50 Mg/m^3 y se tomaron fotografías con 700 y 1500 aumentos. En la Figura 1.28 se muestran las imágenes tomadas con el ESEM y se indican los poros entre pellets. Los tamaños de poros observados son consistentes con los resultados obtenidos en los ensayos de intrusión de mercurio sobre muestras con densidad seca similar. Se observa un conjunto de poros con un tamaño aproximado de $20 \mu\text{m}$ correspondientes a los poros entre pellets. También se distingue un segundo conjunto de poros con un tamaño medio aproximado de $3 \mu\text{m}$. Poros ubicados dentro de las unidades granulares y correspondientes a los vacíos entre conglomerados de partículas de arcilla. Aún con imágenes aumentadas en 3000 veces, los poros de tamaño característico de 13 nm son muy difíciles de identificar ya que tendrían una medida aproximada en la fotografía, de 0.02 mm .

1.4.4 Características fundamentales

A continuación se resumen las características fundamentales de la estructura interna de las mezclas de pellets. Se describen los mecanismos de reducción de vacíos actuantes durante el proceso de compactación y se presenta un análisis fractal del espacio poroso de la muestra de pellets.

1.4.4.1 Estructura interna de las mezclas de pellets

A partir de los ensayos de intrusión de mercurio y de la observación mediante microscopio de electrones se ha investigado la estructura interna de las mezclas de pellets y su evolución con la densidad seca. De acuerdo con los resultados obtenidos se pueden realizar las siguientes consideraciones:

- Las unidades granulares de alta densidad o pellets, presentan una estructura interna con una distribución de poros bi modal. Se distinguen dos tamaños de poros característicos: un tamaño correspondiente a los poros entre agregados de partículas de arcilla de tamaño medio $3\ \mu\text{m}$ y un segundo modo correspondiente a los poros intra-agregados de partículas con un tamaño medio de $13\ \text{nm}$.
- Las muestras preparadas sin la utilización de una compactación mecánica adicional, compactación por gravedad, muestran una curva de distribución de poros tri modal, Figura 1.25. Se distinguen tres grupos de poros distintos. Un conjunto de poros correspondientes a los poros entre pellets con un tamaño medio de $250\ \mu\text{m}$ y dos grupos de poros ubicados dentro del pellet. Poros entre agregados de partículas de arcilla y poros intra-agregados, con tamaños característicos de $3\ \mu\text{m}$ y $13\ \text{nm}$ respectivamente.
- En los ensayos realizados sobre muestras de pellets con valores de densidad seca de 1.35 , 1.45 , y $1.70\ \text{Mg/m}^3$, se obtuvieron distribuciones de poro bi modales. Un conjunto de poros de tamaño $13\ \text{nm}$ común a todas las muestras, y un conjunto de poros con un tamaño característico que varía entre 40 y $5\ \mu\text{m}$ en dependencia con el índice de vacíos de la muestra. El modo de poros correspondiente a los poros entre agregados de partículas de arcilla ($3\ \mu\text{m}$) queda oculto bajo el modo de poros entre pellets.

- El proceso de compactación utilizado provoca una reducción de los vacíos correspondientes a los vacíos entre pellets mientras que no afecta la estructura interna de los pellets.

1.4.4.2 Efecto de la compactación en la estructura interna

El proceso de compactación reduce el volumen de vacíos de la muestra y afecta su estructura interna. A lo largo de este proceso y dependiendo del nivel de carga aplicado, de la rigidez y resistencia a la ruptura de los gránulos de bentonita, se evidencian diferentes mecanismos de reducción de vacíos o compactación. Analizando las curvas de distribución de poros obtenidas a distintos niveles de compactación, se pueden identificar dos etapas bien diferenciadas:

- Una primera etapa en la que actúan en forma combinada mecanismos de reordenamiento de pellets y rotura o “crushing” de los pellets. Esta etapa se desarrolla desde el comienzo de la compactación y hasta un valor de densidad seca de 1.70 Mg/m^3 . En esta etapa, la curva de distribución de poros sufre una traslación o corrimiento del modo de poros de mayor tamaño hacia valores menores, Figura 1.29-a. Durante la primera parte de esta etapa y hasta un valor de densidad seca de 1.50 Mg/m^3 el reordenamiento de pellets aparece como mecanismo predominante frente a la rotura de pellets. Posteriormente y hasta un valor de 1.7 Mg/m^3 la rotura o “crushing” de pellets se impone al reordenamiento como mecanismo predominante
- En una segunda etapa, para valores de densidad seca entre 1.7 Mg/m^3 y hasta 1.95 Mg/m^3 , aparece un proceso de deformación de los gránulos ya rotos, de menor tamaño y se produce la coalescencia de poros. Este mecanismo provoca un cambio en la forma de la curva de distribución de poros, donde se observa una reducción y aplanamiento de la curva en el modo correspondiente a los poros de mayor tamaño, Figura 1.29-b.

1.4.4.3 Análisis fractal del espacio poroso

De forma complementaria a los análisis anteriores, se realizó un análisis fractal del espacio poroso de los vacíos entre pellets. El objetivo fundamental de este análisis es establecer la existencia de una similitud geométrica entre los espacios porosos de la muestra a diferentes niveles de densidad seca.

La geometría fractal permite establecer patrones de relación entre formas y geometrías a diferentes escalas. La ecuación fundamental de la geometría fractal fue propuesta por Mandelbrot (1982, 1983 y 1986) y Feder, (1988) y se expresa como:

$$N(r) \propto k r^{-D} \quad (1.9)$$

donde $N(r)$ es el número de elementos de longitud característica r , k es una constante y D es la dimensión fractal. A modo de ejemplo podemos considerar el algoritmo propuesto por Sierpinsky para la obtención de conjuntos con una misma dimensión fractal formados a partir de la subdivisión de un triángulo equilátero, Figura 1.30. Admitiendo que el área del triángulo inicial es igual a la unidad podemos establecer la siguiente relación entre dos iteraciones consecutivas

$$D = \frac{\left[\log \left(\frac{N_{i+1}}{N_i} \right) \right]}{\left[\log \left(\frac{r_i}{r_{i+1}} \right) \right]} \quad (1.10)$$

considerando la iteración $i=2$, se tiene que $r_i = \frac{1}{2^2}$ y $r_{i+1} = \frac{1}{2^3}$ y la dimensión fractal es

$$D = \frac{\left[\log(3) \right]}{\left[\log(2) \right]} \approx 1.585. \text{ Los triángulos generados a partir de dicho algoritmo}$$

mantienen entre si una relación de auto similitud en sus diferentes escalas y están caracterizados por el valor de su dimensión fractal D .

La aplicación de la teoría de fractales a la ciencia del suelo (Valdez-Cepeda & Olivares-Sáenz, 1998) y al análisis de la estructura de medios porosos (Giménez *et al.* 1997) resulta en una herramienta útil para describir numerosos fenómenos que tiene lugar a diferentes escalas. Considerando a los agregados en términos de masa Anderson y McBratney (1995) propusieron la relación:

$$n = 1 - \left[\frac{k r_i^{(D-d)}}{\rho_s} \right] \quad (1.11)$$

donde n representa el espacio poroso, r_i es el tamaño característico de las íesimas clases de poros, D es la dimensión fractal y d la dimensión topológica característica

($d=3$ en el caso de volumen) y ρ_s es la densidad de los sólidos del suelo. Utilizando esta relación se analizó la evolución del espacio poroso entre pellets a lo largo del proceso de compactación y se representó la porosidad entre pellets (n_{MACRO}) de cada una de las mezclas en función del tamaño característico de los poros entre gránulos (ϕ). Los tamaños característicos obtenidos en los ensayos de intrusión de mercurio se representaron con el eje de las abscisas y los correspondientes valores de porosidad entre pellets (n_{MACRO}) en el eje de las ordenadas en la Figura 1.31. Aplicando la relación (1.11), se realizó un ajuste por mínimos cuadrados y se obtuvo una dimensión fractal $D=2.87$. De acuerdo con el análisis realizado las muestras con valores de densidad seca entre 1.15 y 1.70 Mg/m³ presentan una porosidad entre pellet con una gran similitud volumétrica. En el caso de muestras con una mayor densidad seca (1.95 Mg/m³) el ajuste pierde su validez indicando un cambio en las características geométricas del conjunto. El análisis realizado indica que la muestra mantiene sus características granulares durante el proceso de compactación y hasta un valor de densidad seca de 1.70 Mg/m³. Sin embargo, al aumentar la densidad seca por sobre este valor, la tensión vertical aplicada durante la compactación alcanza valores similares a los necesarios para deformar el propio pellet y la muestra pierde su estructura granular. Analisis similares se obtienen a partir de las expresiones propuestas por Yu & Chen (2001) donde la dimensión fractal del espacio poroso se describe como:

$$D_f = d - \frac{\ln(\varepsilon)}{\ln\left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}}\right)} \quad (1.12)$$

siendo d la dimensión topológica correspondiente (2 o 3), ε es la porosidad y λ_{\min} y λ_{\max} representan los límites del dominio sobre el que se aplica la similitud. En

este caso se puede tomar $\log\left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}}\right) = \log(\bar{\phi})$ como una medida del diámetro característico de los poros entre pellets de la mezcla en la expresión (1.11).

Finalmente, vale la pena remarcar que si bien existen un sin número de modelos para el análisis del comportamiento hidráulico (permeabilidad y almacenamiento de agua) basados en los principios de la geometría fractal, su aplicación y extensión se debe realizar con suma prudencia y siempre acompañada de una fuerte experimentación.