

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
GRADO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

GEOTECNIA

APUNTES TEMA 10

TEMA 10. INTRODUCCIÓN A LOS SUELOS NO SATURADOS

10.1 SUELOS NO SATURADOS. DEFINICIÓN DE SUCCIÓN Y DE TENSIÓN EFECTIVA.....	2
10.2 RELACIONES ENTRE LA SUCCIÓN Y EL GRADO DE SATURACIÓN	5
10.3 COMPORTAMIENTO DEFORMACIONAL. COLAPSO E HINCHAMIENTO.....	6
10.4 EL PROCESO DE LA COMPACTACIÓN. PARÁMETROS DE REFERENCIA. CURVAS DENSIDAD-HUMEDAD	8
10.5 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS COMPACTADOS. APLICACIÓN A UN CASO REAL.....	10
10.6 ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE SUELOS COMPACTADOS.....	15
10.7 APLICACIONES INGENIERILES DE LA COMPACTACIÓN.....	19
10.7.1 Método de vibración-compresión	20
10.7.2 Método de amasado	21
10.7.3 Aspectos geotécnicos ligados a la compactación	22
10.7.4 Métodos de control de la compactación	24

Tema 10. Introducción a los suelos no saturados

10.1 Suelos no saturados. Definición de succión y de tensión efectiva

El estudio pormenorizado del suelo en condiciones de no saturación (también denominado semisaturado o parcialmente saturado) no suele ser tan habitual como el caso del suelo saturado, en el que únicamente existen dos fases y, por consiguiente, su análisis es más sencillo. En la figura 10.1.1 se muestra un esquema que ilustra el caso del suelo parcialmente saturado, ($0 < S_r < 1$), en el que están presentes la fase sólida, la fase líquida y la fase gaseosa.

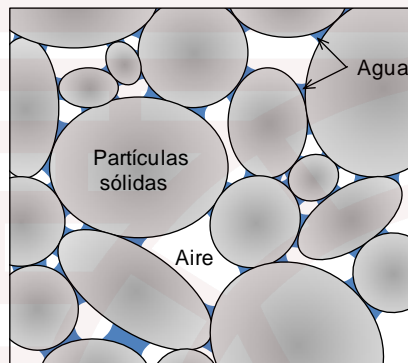


Figura 10.1.1 Fases de un suelo parcialmente saturado

En líneas generales, es empíricamente observable que un suelo parcialmente saturado presenta, a igualdad de índice de poros, una mayor resistencia mecánica que en la condición saturada o bien la seca. La explicación a este incremento de resistencia se basa en considerar, en primera aproximación, que se genera una fuerza suplementaria entre partículas debida a la ascensión capilar de la fase líquida a través de los intersticios, proporcionando, de este modo, una resistencia adicional que se anula al saturar dicho suelo.

Si se considera a los intersticios del suelo como un medio formado por tubos en contacto con un líquido, entonces la altura alcanzada, debida a la ascensión capilar, se puede calcular de forma aproximada en base a considerar dichos tubos de diámetro constante. En la figura 10.1.2 se presenta un esquema que permite calcular el valor de dicha ascensión; para ello hay que considerar que la presión de agua en el punto A es $P_A = -\gamma_w h$ y en el punto B es $P_B = 0$. Se observa entonces que el punto A debe tener una presión de agua negativa, dado que en el punto B la presión debe ser nula por estar a presión atmosférica.

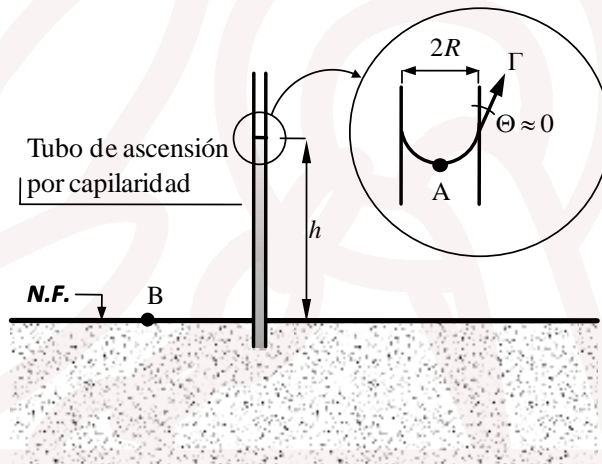


Figura 10.1.2 Esquema explicativo de la ascensión capilar en un suelo

Adicionalmente, cabe señalar que el cálculo de la altura capilar (h) se obtiene haciendo el equilibrio vertical entre el valor de la tensión superficial (que únicamente se da en el perímetro del tubo de ascensión) con la presión de la columna de líquido (habitualmente agua) que induce dicho fenómeno. La expresión de dicho equilibrio se puede formular como:

$$2\pi R\Gamma \cos \Theta = \pi R^2 h \gamma_w$$

siendo:

Γ : Parámetro de tensión superficial.

Θ : Ángulo del menisco respecto la vertical

Despejando el valor de h , se encuentra el valor de la ascensión capilar de un fluido (agua en el caso de suelos):

$$h = \frac{2\Gamma \cos \Theta}{R\gamma_w}$$

Como consecuencia de lo anterior se admite que en los suelos parcialmente saturados se genera y mantiene una presión negativa en el agua intersticial; efectivamente el agua en contacto con las partículas sólidas ejerce una tracción entre ellas, aumentando, de este modo, la tensión actuante sobre dichas partículas. Dado que en los suelos la distancia entre partículas es variable (ver figura 10.1.1) se considera que, a efectos macroscópicos, existe un radio capilar medio.

Como ejemplos ilustrativos del fenómeno de ascensión capilar, se puede considerar en primer lugar lo que ocurre en un terrón de azúcar cuando se moja su base en el líquido y se observa como dicho líquido asciende hasta mojar todo el terrón. Por otro lado, se puede observar también el aumento de la resistencia (a igualdad de índice de poros) que presenta una arena de

playa parcialmente saturada, dado que en estas condiciones permite construir, por ejemplo, un castillo de arena; efectivamente se puede constatar que es muy difícil construirlo con arena completamente seca o completamente saturada.

Para suelos saturados, y a efectos de la deformación volumétrica, el acoplamiento mecánico entre la fase líquida y la fase sólida se rige, como se ha visto a lo largo del curso, por la expresión:

$$\sigma' = \sigma - P_w$$

Con el fin de analizar el comportamiento mecánico de los suelos parcialmente saturados hay que tener en cuenta que no se cumple la ley de tensiones efectivas propuesta por Terzaghi, tal como ocurre en el caso del suelo saturado; en consecuencia hay que cuantificar la tensión actuante sobre las partículas sólidas a partir de la presión del aire (P_a) y de la presión del agua (P_w) intersticiales. Para ello se define una variable tensional, siempre positiva, denominada succión (S), tal que:

$$S = P_a - P_w$$

Cabe señalar que se han propuesto diversos modelos para calcular la tensión efectiva que gobierna el comportamiento mecánico del suelo no saturado, sin embargo la expresión más tradicional es la debida a Bishop (1963):

$$\sigma' = \sigma - [P_a - \chi(P_a - P_w)]$$

donde χ es un parámetro que depende fundamentalmente del grado de saturación y del tipo de suelo; su valor está acotado entre 0 (suelo seco) y 1 (suelo saturado). Aunque dicha expresión tiene sus limitaciones, sigue empleándose en los modelos que tratan de describir el comportamiento mecánico de los suelos no saturados.

Hay que indicar que la succión impuesta y/o medida en el suelo hace referencia a su contorno y que, debido al diferente tamaño de las partículas que habitualmente componen el suelo (cuantificables mediante el ensayo de porosimetría) su distribución en el interior de la masa de suelo puede no ser homogénea. De otro lado, se considera que en el proceso de secado de un suelo saturado primero se secan los poros de mayor tamaño y, sucesivamente, los de menor tamaño; lo contrario ocurre en un proceso de humectación donde el agua inicialmente se sitúa en los poros de menor tamaño para ir llenando sucesivamente los de mayor tamaño.

Recientemente se han desarrollado modelos de comportamiento en base a considerar la idea de separación operativa entre microestructura y macroestructura, entendiendo ambas como el resultado de la separación de la estructura en dos niveles de tamaño de poro; la separación de ambos niveles se hace a partir de los datos de la porosimetría. Se ha constatado experimentalmente que para dos probetas de un mismo suelo con un mismo índice de poros pero con un porcentaje distinto de microestructura y de macroestructura, dicho porcentaje influye notablemente en el comportamiento mecánico del suelo.

10.2 Relaciones entre la succión y el grado de saturación

Tal como se ha indicado, la expresión de Bishop incorpora la relación entre la succión y el grado de saturación, sin embargo esta relación es determinable experimentalmente en el laboratorio imponiendo una y midiendo la otra; el resultado se conoce habitualmente como curva de retención del suelo. Efectivamente, se puede controlar la humedad, por lo tanto el grado de saturación, y medir la succión mediante el equipo apropiado o bien imponer la succión y medir la humedad. En el apartado 10.6 se ampliará este concepto y se describirán los procedimientos de laboratorio usados habitualmente. De otro lado, hay que hacer hincapié en que un cambio en la humedad del suelo va acompañado de un cierto cambio de volumen del mismo; por ello, tanto si se procede a su secado como a su humectación, se va a producir un cambio de volumen que supone un cambio en el índice de poros. Es aconsejable indicar en la curva de retención si los valores se han obtenido, o no, considerando los cambios de volumen total del suelo.

La figura 10.2.1 muestra una curva de retención genérica que relaciona la succión con el contenido de agua del suelo, obtenida experimentalmente mediante un ciclo de secado y humectación, variando la succión aplicada y midiendo su contenido de agua para cada punto ensayado. De otro lado, a partir de la curva de retención se puede conocer el valor de la succión, en función del grado de saturación o bien de su humedad, interpolando en cualquier punto intermedio. Se puede observar que para valores bajos del grado de saturación el valor de la succión tiende a valores elevados, mientras que para valores altos decae rápidamente hasta alcanzar un valor nulo en saturación.

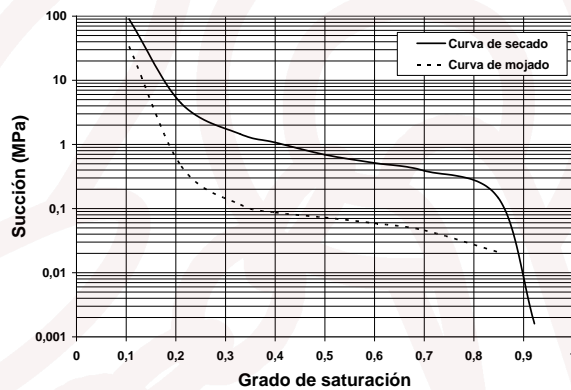


Figura 10.2.1 Curva de retención típica en suelos de grano fino

10.3 Comportamiento deformacional. Colapso e hinchamiento

En un suelo no saturado pueden darse cambios volumétricos notables al llevar dicho suelo a saturación bajo una carga exterior de valor constante. Dichos cambios de volumen se conocen como fenómenos de hinchamiento y de colapso, según sea el cambio de volumen negativo o positivo, respectivamente. Se constata experimentalmente que la deformación volumétrica experimentada por el suelo, es función del grado de saturación, de la densidad seca, de la tensión exterior actuante, del valor de la succión y del tipo de suelo.

Por lo que se refiere al hinchamiento, se define como un aumento del índice de poros (disminución de la densidad seca) a consecuencia de un aumento brusco de la humedad, cuando ésta tiende a la de saturación. En general se puede afirmar que los suelos arcillosos tienen tendencia al hinchamiento si han sido compactados (ver apartado 10.7) en la rama seca a densidad elevada (energía de compactación elevada), pero también depende del tipo de partículas que lo componen; efectivamente, los suelos formados por partículas de gran superficie específica presentan un elevado potencial de hinchamiento. En cuanto a los suelos de tipo limoso, la tendencia al hinchamiento suele ser pequeña.

De otro lado, se define el colapso como una disminución del índice de poros (aumento de la densidad seca) a consecuencia del aumento brusco de la humedad del suelo, cuando ésta tiende a la de saturación. Se da generalmente en suelos de tipo limoso con el índice de poros elevado, donde el valor de la succión también lo es; en consecuencia, al anularse la succión por saturación se da un descenso notable de la resistencia del suelo y entonces el esqueleto sólido tiende a desmoronarse produciéndose un descenso del volumen total ocupado por el suelo.

Finalmente, cabe indicar que las variaciones bruscas de la humedad, que provocan hinchamiento o bien el colapso en suelos, pueden ser debidas a lluvia o bien a infiltraciones de agua por rotura de conducciones, entre otras causas similares. En la figura 10.3.1 se muestra el aspecto de un canal de riego en el que a consecuencia de la humectación, por efecto de las filtraciones de agua, el suelo limoso se ha saturado con el consiguiente colapso desplazando el recubrimiento lateral de hormigón que protegía el canal.



Figura 10.3.1 Aspecto de un colapso en limos naturales de baja densidad en el canal Algerri-Balaguer (Lleida)

De otro lado, la figura 10.3.2 muestra el levantamiento de la solera del túnel de Lilla a consecuencia de la aportación accidental de agua después de la perforación de dicho túnel. La carga en la solera era pequeña debido a la descarga que supone la perforación; dadas las características geológicas del terreno, la aportación de agua puso en marcha un proceso de hinchamiento, que obligó a sobre-excavar la sección inicial y a un posterior refuerzo de la estructura de contención.



Figura 10.3.2 Aspecto del hinchamiento de una marga en la solera del túnel de Lilla (Tarragona)

10.4 El proceso de la compactación. Parámetros de referencia. Curvas densidad-humedad

La compactación se define como un proceso mecánico en el que el suelo se deforma con el aporte de energía exterior a expensas de la expulsión del aire intersticial. Los resultados obtenidos permiten constatar que a mayor densidad el suelo presenta mayor resistencia y menor deformabilidad. Se pretende pues modificar el estado del suelo considerando que se reduce el índice de poros a expensas del aire intersticial y que la energía aportada pasa al esqueleto sólido deformándolo. Para que el proceso sea eficaz el suelo debe ser algo cohesivo, de forma que la deformación alcanzada durante la compactación sea permanente (deformación plástica).

De otro lado, cabe señalar que la compactación es un proceso físico complejo en el que intervienen diversas variables y relaciones entre ellas; en consecuencia, y para conseguir un grado de operatividad alto, hay que fijar las variables más representativas. De ello se deriva que dependiendo de cómo se realice la compactación, y del valor de los parámetros que entran en juego, el suelo puede presentar comportamientos muy diferentes, tal como se ha indicado en el párrafo anterior, aunque tenga el mismo valor del índice de poros, especialmente cuando se le lleva a saturación.

Con el fin de caracterizar el comportamiento del suelo frente al proceso de compactación, se emplea como referencia el ensayo Proctor (ver tema 6.7). Efectivamente, en el año 1930 Proctor propuso como variables para caracterizar el proceso de compactación: la densidad seca alcanzada, la humedad de compactación empleada, la energía aportada al suelo y, evidentemente, el tipo de suelo. Estas cuatro variables se consideran necesarias para definir y caracterizar la curva de compactación de un suelo ($\gamma_d - \omega$). Una combinación apropiada de estas variables permite obtener un suelo con unas características geotécnicas prefijadas.

Tal como se indicó en el apartado 6.7, se consideran dos modalidades de ensayo Proctor: el ensayo de Proctor Normal (PN) que aplica al suelo una energía de 583 kJ/m³ y el Proctor Modificado (PM) que aplica al suelo una energía de 2.630 kJ/m³. En el caso del PM la energía es notablemente mayor y, al ser mayor la densidad seca alcanzada, se consiguen suelos más compactos y menos deformables, en relación al ensayo PN. Los equipos utilizados en el laboratorio para el PN y para el PM son distintos; su proceder experimental está recogido en normas diferentes (para el PN se utiliza la norma UNE-103500-94 y para el PM la UNE-103501-94).

Cuando se pretende diseñar una determinada estructura geotécnica, en la que se requiera compactación del terreno, es esencial determinar las características de la compactación en vistas a que el terreno pueda soportar las solicitaciones mecánicas que se apliquen sobre él. Tal como se ha indicado, el ensayo Proctor permite obtener la densidad seca que puede alcanzar un suelo para un nivel de energía prefijado. De este modo, para un determinado tipo de suelo, si se fija el nivel de energía (PN, PM) se puede obtener la curva de compactación ($\gamma_d-\omega$) que contiene una información muy útil en vistas a compactar el terreno con la mayor eficacia posible.

Cada punto en el gráfico ($\gamma_d-\omega$) corresponde a un ensayo Proctor, así en la figura 10.4.1 se puede observar que existe un máximo de la densidad seca para una humedad determinada; este valor de la humedad se denomina humedad óptima (ω_{opt}); la curva grado de saturación unidad representa un límite para la curva de compactación, dado que no es posible alcanzar grados de saturación mayores que la unidad. A partir de la curva de compactación se observa que el valor óptimo de la humedad (ω_{opt}) delimita una rama con humedades inferiores a la óptima (rama seca o lado seco) y otra para las humedades superiores (rama húmeda o lado húmedo). De otro lado, cabe señalar que si aumenta la energía aplicada la curva de compactación se desplaza hacia la izquierda, es decir, hacia valores crecientes de la densidad seca. El límite extremo para la compactación, la máxima densidad seca posible, se da cuando $\gamma_d = \gamma_s$, ello supondría un índice de poros nulo.

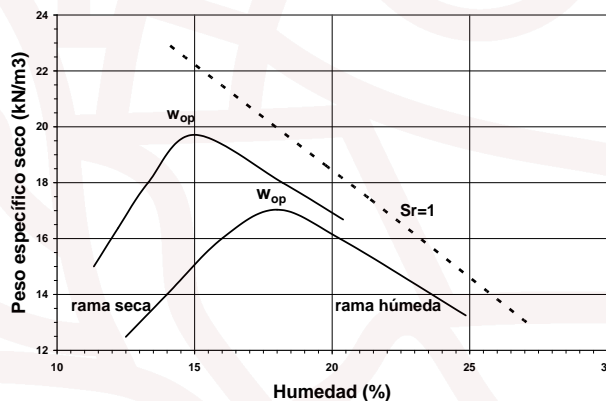


Figura 10.4.1 Curvas $\gamma_d-\omega$ obtenidas mediante el ensayo Proctor a distinta energía de compactación

En la misma figura 10.4.1 se muestran los resultados de dos curvas de compactación para un mismo suelo en el que se han usado distintas energía de compactación. La curva que presenta mayor densidad seca (o peso específico seco) corresponde a la que se ha obtenido con una energía de compactación mayor y, por tanto, la humedad óptima resultante debe ser menor.

Experimentalmente se puede constatar que para la gran mayoría de suelos el grado de saturación para un valor de la humedad correspondiente a la óptima se sitúa en: $S_r = 0.7 \div 0.8$. El grado de saturación del suelo en la humedad óptima se puede obtener mediante la ya conocida expresión (ver tema 2):

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{\gamma_s \omega}{\gamma_w S_r}} \rightarrow S_r = \frac{\omega}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}}$$

Mediante el uso de tablas y ábacos apropiados se puede estimar la humedad óptima (ω_{opt}) en función de los límites de Atterberg del suelo a compactar. En el caso de los limos son habituales valores tales como: $\omega_{op} = 10 \div 20 \%$ y $\gamma_d = 16 \div 22 \text{ kN/m}^3$.

10.5 Análisis de las propiedades de los suelos compactados. Aplicación a un caso real

Tal como ya se ha indicado anteriormente, el control de las condiciones de compactación permite obtener un suelo con unas características geotécnicas determinadas. En este apartado se analizarán, en función de las condiciones de compactación, algunas de las propiedades del suelo, como son: estructura, permeabilidad, compresibilidad, resistencia, cambios de volumen frente a inundación y la tendencia a alcanzar presiones intersticiales positivas al ser compactado. El criterio de diferenciación se basará en el hecho de que se compacte por la rama seca o bien por la rama húmeda.

Estructura alcanzada: si se compacta por la rama seca ($\omega < \omega_{opt}$) o bien por la rama húmeda ($\omega > \omega_{opt}$) el esqueleto sólido del suelo presentará un tipo de estructura diferente, floculada o bien dispersa. La estructura floculada se alcanza mayoritariamente en suelos compactados por la rama seca (en arcillas no depende del método de compactación). De otro lado, la estructura dispersa se alcanza en suelos compactados por la rama húmeda (en este caso sí depende del método de compactación empleado).

En la figura 10.5.1 se muestra el ejemplo de una curva de compactación en la que se indica la estructura alcanzada, según si se compacta por la rama seca o la rama húmeda. Cabe señalar que se trata de una tendencia mayoritaria hacia un tipo u otro de estructura, las imágenes del microscopio electrónico permiten evaluar dicha tendencia.

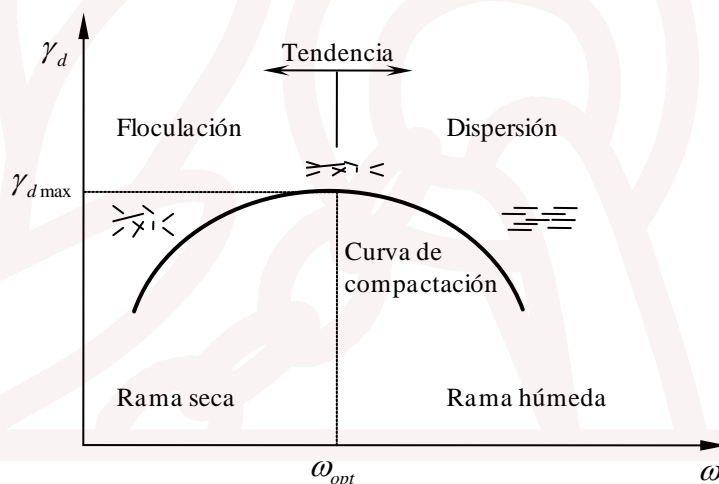


Figura 10.5.1 Estructura alcanzada por el suelo según el punto de compactación

Los suelos que alcanzan una estructura floculada (rama seca) son menos deformables, presentan una mayor succión y una mayor rigidez que los que alcanzan una estructura dispersa (rama húmeda). Dado que en la rama húmeda el grado de saturación suele ser mayor de 0.8, la succión generada es muy baja y, por tanto, su influencia sobre la resistencia y la rigidez es pequeña.

Permeabilidad: ésta es una propiedad muy relevante en el comportamiento hidromecánico del suelo; en consecuencia es necesario determinarla con la mayor exactitud posible. Tal como se ha visto en el apartado 6.4, en suelos saturados la permeabilidad se obtiene aplicando un gradiente hidráulico, midiendo el caudal y aplicando la ley de Darcy. Hay que tener en cuenta que en el caso de suelos no saturados (k_{no-sat}), como es el caso de los suelos compactados, la permeabilidad debe obtenerse mediante un flujo de gas o bien otras técnicas diferentes a las utilizadas para suelos saturados.

Se puede obtener experimentalmente la gráfica $k-\omega$ en la que se visualiza cómo evoluciona el valor de k , punto a punto, en función de las condiciones de compactación del suelo. También se puede graficar la permeabilidad en función del peso específico seco alcanzado ($k-\gamma_d$). La figura 10.5.2 muestra un ejemplo de ambos gráficos.

En ambos gráficos se observa que si se compacta el suelo con una energía constante ($J=cte$) en la rama seca la permeabilidad desciende hasta un valor k_{min} , cercano al valor de la ω_{opt} o bien a la $\gamma_{d,max}$, según el caso. De otro lado, se observa que si aumenta la humedad progresivamente, al alcanzar la rama húmeda su valor aumenta ligeramente. Obviamente, si se repite el ensayo aumentando la energía de compactación, el suelo se comprimirá más y disminuirá, en este caso,

su índice de poros y, por lo tanto, disminuirá la permeabilidad. Efectivamente, la permeabilidad es función del índice de poros, del grado de saturación, de la estructura alcanzada y del diámetro equivalente mayoritario de los poros; de otro lado, se puede estimar también a partir de la curva de retención.

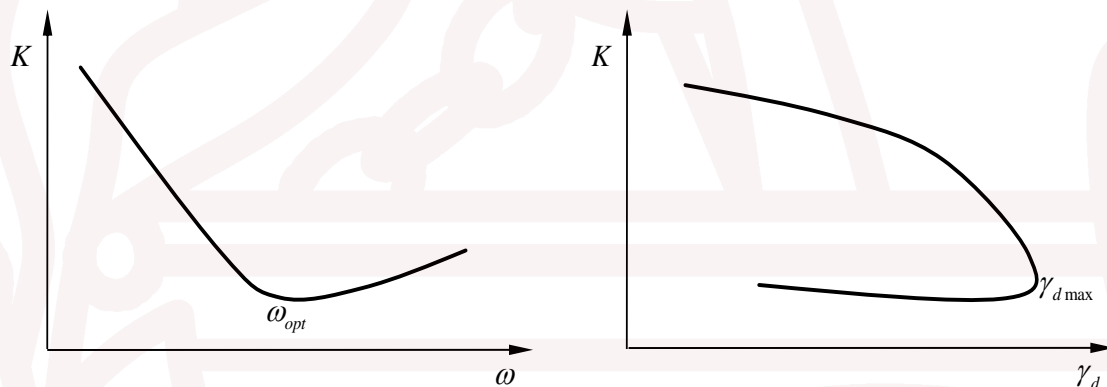


Figura 10.5.2 Relación entre la permeabilidad y la humedad (izquierda) y la densidad seca (derecha)

Compresibilidad: en un suelo compactado se caracteriza por la mayor o menor deformación que sufre el suelo frente a la acción de una carga exterior. Se constata experimentalmente que depende de la estructura alcanzada durante la compactación. Los aspectos más relevantes a destacar son los siguientes:

1. Los suelos compactados en la rama seca (estructura floculada), son poco compresibles.
2. Los suelos compactados en la rama húmeda (estructura dispersa), son bastante compresibles.
3. Las arcillas compactadas cerca de la humedad óptima si se someten a un valor bajo de la tensión exterior se comportan de forma muy compresible, mientras que si se someten a tensiones más elevadas tienden a ser más rígidas.
4. El tiempo de compresión (t_c) es función del grado de saturación y del peso específico seco iniciales. La estimación del tiempo de compresión tiene implicaciones prácticas, dado que influye en la eficiencia temporal de la compactación.

Cambios volumen frente a inundación: tal como se ha indicado, pueden darse cambios volumétricos notables al llevar un suelo compactado a saturación bajo una carga exterior de valor constante. Estos cambios de volumen se asocian a los fenómenos de hinchamiento, de colapso y de retracción; su valor es función del grado de saturación, de la densidad seca, de la tensión exterior actuante, del valor de la succión y tipo de suelo.

Los suelos arcillosos tienen tendencia al hinchamiento si han sido compactados en la rama seca a densidad elevada (energía de compactación elevada). También depende del tipo de partículas que lo componen (las partículas de gran superficie específica tienen elevado potencial de hinchamiento). En suelos limosos la tendencia al hinchamiento suele ser pequeña.

El colapso suele darse en suelos de tipo limoso que han sido compactados por la rama seca a baja densidad seca. Efectivamente en esta zona de compactación el índice de poros es elevado y el valor de la succión también lo es; en consecuencia, al anularse la succión por saturación, se da un descenso notable de la resistencia del suelo y, en consecuencia, el esqueleto sólido tiende a desmoronarse.

En cuanto a la retracción del suelo, ésta se produce por reducción del contenido de agua en un suelo que tiene inicialmente un grado de saturación elevado; el fenómeno se observa en los procesos de secado en los que el suelo suele agrietarse. Se da habitualmente en suelos compactados en la rama húmeda y no se observa en suelos compactados por la rama seca.

Resistencia: en suelos compactados por la rama seca se observa que presentan una resistencia mayor que los compactados por la rama húmeda; sin embargo, la rotura, caso de producirse, es del tipo frágil. Se constata que los suelos compactados por la rama húmeda presentan una rotura de tipo plástico. La figura 10.5.3 muestra un comportamiento tenso-deformacional comparado entre el suelo compactado por la rama seca y el mismo suelo compactado por la rama húmeda.

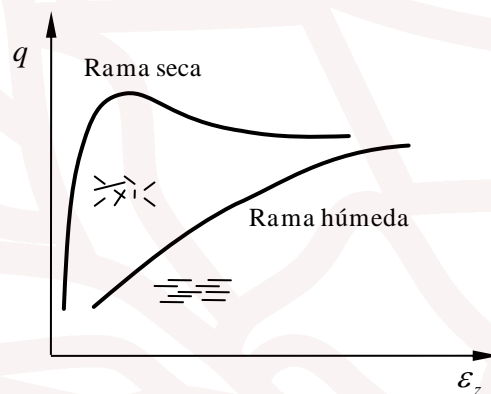


Figura 10.5.3 Comportamiento tenso-deformacional del suelo en función de la humedad de compactación

Presión intersticial: el aumento que puede generarse en el terreno debido a la compactación también es distinto según la rama en la que se compacte. En efecto, si se compacta por la rama

seca, es decir un (grado de saturación bajo), se conseguirá una permeabilidad relativamente alta y las presiones de agua generadas serán bajas, dado que la elevada permeabilidad permite que la presión intersticial se disipe con rapidez. Por el contrario, si se compacta el suelo por la rama húmeda (grado de saturación elevado), se conseguirá una permeabilidad baja y las presiones de agua generadas se disiparán con dificultad; de otro lado, pueden producirse oclusiones de aire con lo que puede aumentar su presión y transmitirla al agua.

Como resumen de las anteriores consideraciones, se puede afirmar que si se conocen suficientemente las exigencias de la obra, se puede decidir el punto de compactación más apropiado. En ocasiones las necesidades y exigencias de la obra pueden ser contradictorias y, en estos casos, se debe llegar a una solución de compromiso. Debe quedar claro que rama húmeda/rama seca son conceptos que dependen de la humedad respecto a la óptima y a la energía de compactación; ambos parámetros son difíciles de controlar en obra, en comparación con los ensayos realizados en el laboratorio.

A continuación, en la figura 10.5.4, se muestra un esquema genérico de una presa de materiales sueltos (presa de tierras). Esencialmente una presa de materiales sueltos es una estructura geotécnica que tiene por objeto permitir el embalsado de agua para usos hidroeléctricos o bien de regadío; para ello dispone de un núcleo de material arcilloso compactado, que tendrá una permeabilidad baja, sostenido mecánicamente mediante el apoyo de espaldones (aguas arriba y aguas abajo), dado que sobre dicho núcleo se aplica el gradiente hidráulico existente entre el nivel de embalse y el del río. Dichos espaldones suelen construirse de material grueso y muy permeable (escollera, bolos); efectivamente en la figura se puede observar que la línea equipotencial correspondiente al nivel freático no cambia de dirección en los espaldones, dada la permeabilidad del material empleado en su construcción.

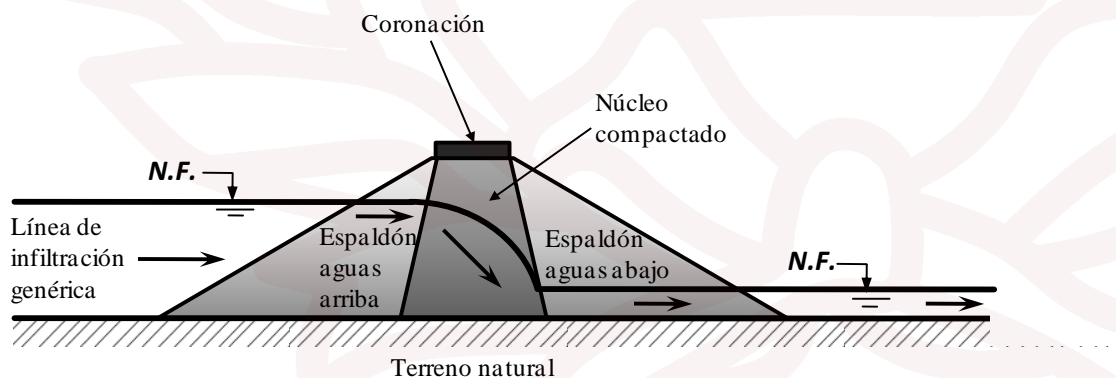


Figura 10.5.4 Esquema de una presa de materiales sueltos

Seguidamente se analizan los aspectos a tener en cuenta en relación a dicha obra y, especialmente, en la decisión sobre la rama de compactación más apropiada:

1. Debe obtenerse la máxima impermeabilidad posible; ello implica compactar por el **lado húmedo**.
2. Debido a los esfuerzos mecánicos que debe soportar el núcleo, es necesario obtener la máxima carga de rotura; ello implica compactar por el **lado seco**.
3. Ante una eventual rotura del núcleo debe evitarse la rotura frágil, dado que si se forman grietas el colapso de la presa es muy rápido; ello implica compactar por el **lado húmedo**.
4. Hay que evitar en lo posible la generación de presión intersticial positiva durante la construcción, dado la estructura puede colapsar debido a la escasa tensión intergranular resultante; ello implica compactar por el **lado seco**.
5. Los ciclos de embalse y desembalse, que producen humedecimientos y secados, pueden producir cambios de volumen en el suelo; ello implica compactar por el **lado húmedo**.

Como puede verse en este ejemplo concreto, y según la propiedad a controlar, las exigencias de compactación del núcleo difieren en cuanto a la rama más apropiada para la compactación. En esta situación se debe adoptar una solución de compromiso que, en conjunto, sea la mejor solución. En general, y para el caso de una presa de tierras, se aconseja compactar el núcleo en un punto de humedad ligeramente inferior a la humedad correspondiente al óptimo.

10.6 Ensayos de laboratorio sobre suelos compactados

Uno de los aspectos básicos ligados a los equipos de laboratorio para suelos no saturados, y que los hace diferentes a los empleados en los suelos saturados, es el método de control y/o medida de la succión. Todos los equipos que se han descrito en el tema 6 pueden ser, convenientemente modificados, utilizados para suelos no saturados mediante control y/o medida de la succión.

Cuando se trata de controlar la succión existen diversos métodos que seguidamente se enumeran y describen sucintamente:

1. Discos porosos cerámicos de alto valor de entrada de aire (AVEA). Están disponibles hasta una succión máxima de 1,5 MPa. El disco debe saturarse previamente, el valor de entrada de aire indica la presión máxima para la que el fabricante garantiza su saturación y, por lo tanto, el mantenimiento de la succión prescrita en el contorno del suelo. Muy usado en los laboratorios e instrumentos de medida *in situ*.

2. Membranas semipermeables (acetato de celulosa). Están disponibles hasta una succión máxima de 10 MPa. Para ensayos de larga duración la membrana puede sufrir ataques microbianos que favorecen su destrucción. Poco usado.
3. Sales disueltas (disoluciones saturadas y no saturadas) en agua dentro de un recinto cerrado controlando de este modo la humedad relativa del aire (h_r). Hasta una succión de 50 MPa ($h_r = 70\%$). Muy usado en los laboratorios.
4. Ácido sulfúrico disuelto en agua dentro de un recinto cerrado (control de la humedad relativa del aire). De uso para el control de succiones elevadas, hasta 500 MPa ($h_r < 10\%$). Poco usado.
5. Poly-Etilene-Glicol (PEG) en solución acuosa y acompañado de una membrana osmótica. De uso hasta 2 MPa. Poco usado.

Por lo que se refiere a la medida de la succión, se pueden destacar los siguientes métodos:

1. Papel de filtro. Se pone en contacto con el suelo, aislándolo de la atmósfera, hasta asegurar el equilibrio de succión entre ambos. Dado que se conoce la curva de retención del papel, facilitada por el fabricante, se puede determinar la succión. Disponible hasta 10 MPa.
2. Tensiómetro. Utiliza la técnica del disco poroso. Hasta 2 MPa.
3. Psicrómetro. Suele utilizar termopares para determinar el punto de rocío y, con ello, la humedad relativa del aire. Disponible hasta 200 MPa. Es muy útil para trabajar a muy baja succión (prácticamente en saturación). Existen equipos muy fiables que utilizan la técnica psicrométrica aplicada a un espejo donde condensa el vapor de agua (punto de rocío).
4. Higrómetro. Mide directamente la humedad relativa del aire ($h_r < 97\%$); poco adecuado para succiones bajas.

La figura 10.6.1 muestra un equipo edométrico con control de succión, típico para suelos no saturados, en el que existe la posibilidad de aplicar una humectación rápida. La carga vertical se aplica mediante aire a presión y la succión se controla mediante la presión de aire y de agua que están en contacto con el suelo a través del disco poroso (AVEA).

La figura 10.6.2 muestra el comportamiento en condiciones edométricas de un suelo típico frente a inundación bajo una tensión efectiva vertical constante (puntos B y D), después de un proceso de compresión en condiciones no saturadas (trayectorias AB y AD). La trayectoria BC caracteriza el colapso del suelo (disminución del índice de poros y aumento de la densidad seca), mientras que la trayectoria DE caracteriza un proceso de hinchamiento (aumento del índice de poros y disminución de la densidad seca).

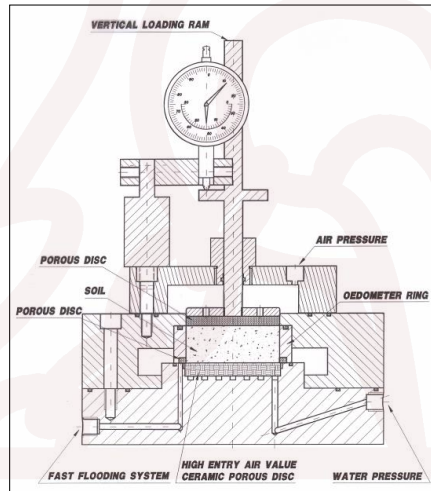


Figura 10.6.1 Edómetro con control de succión y posibilidad de humectación rápida del suelo

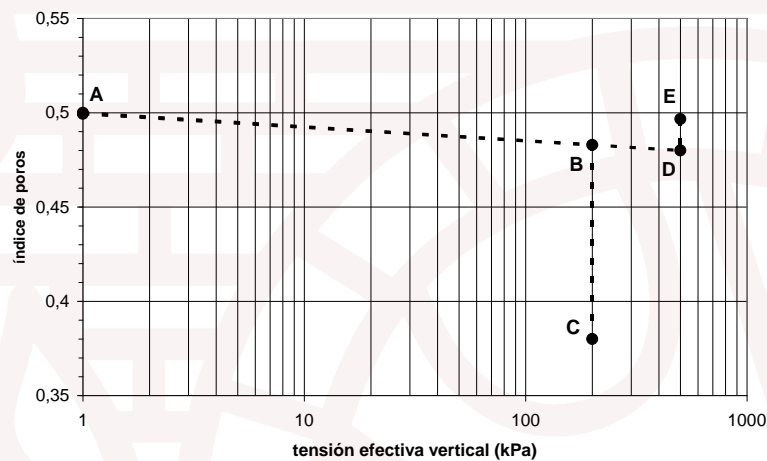


Figura 10.6.2 Trayectorias de compresión (ABD), de colapso (BC) y de hinchamiento (DE) típicas en suelos

En la figura 10.6.3 se muestra el esquema y aspecto de un equipo edométrico diseñado para suelos no saturados en el que es posible controlar la succión, mediante un disco poroso de 0.5 MPa, así como la temperatura hasta un máximo de 80°C.

De otro lado, la figura 10.6.4 muestra los resultados experimentales del limo arcilloso compactado procedente del llano de Barcelona ensayado en condiciones edométricas. Se puede observar los mapas de colapso e hinchamiento (comportamiento expansivo) para tres tensiones verticales aplicadas (0.1, 0.3, 0.6 MPa), en función de la humedad de compactación. Pueden apreciarse los contornos de las líneas iso-succión en relación a la línea de saturación ($S_r=1$). Se observa que existe una densidad de compactación para la que no se produce colapso ni

hinchamiento ($\varepsilon_v=0$), obviamente diferente para cada tensión vertical (figura de abajo a la derecha).

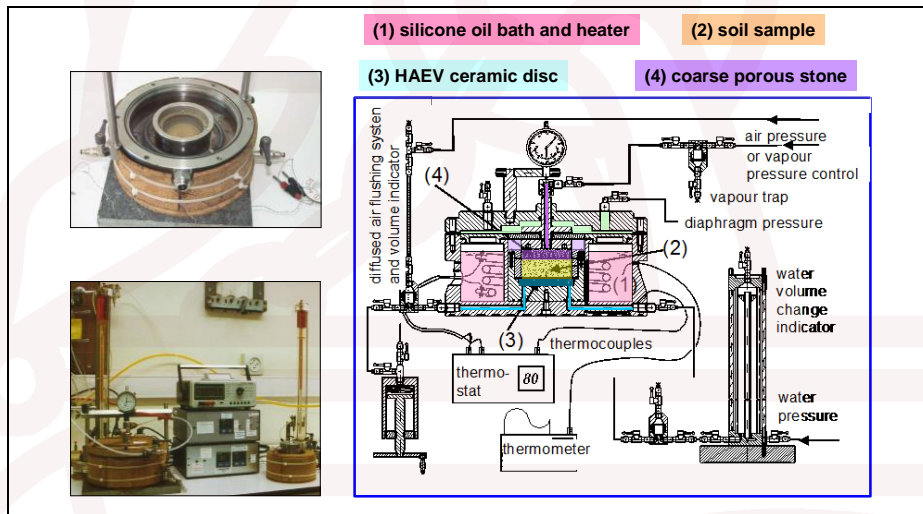


Figura 10.6.3 Esquema de un edómetro con succión (0.5 MPa) y temperatura controladas (80°C)

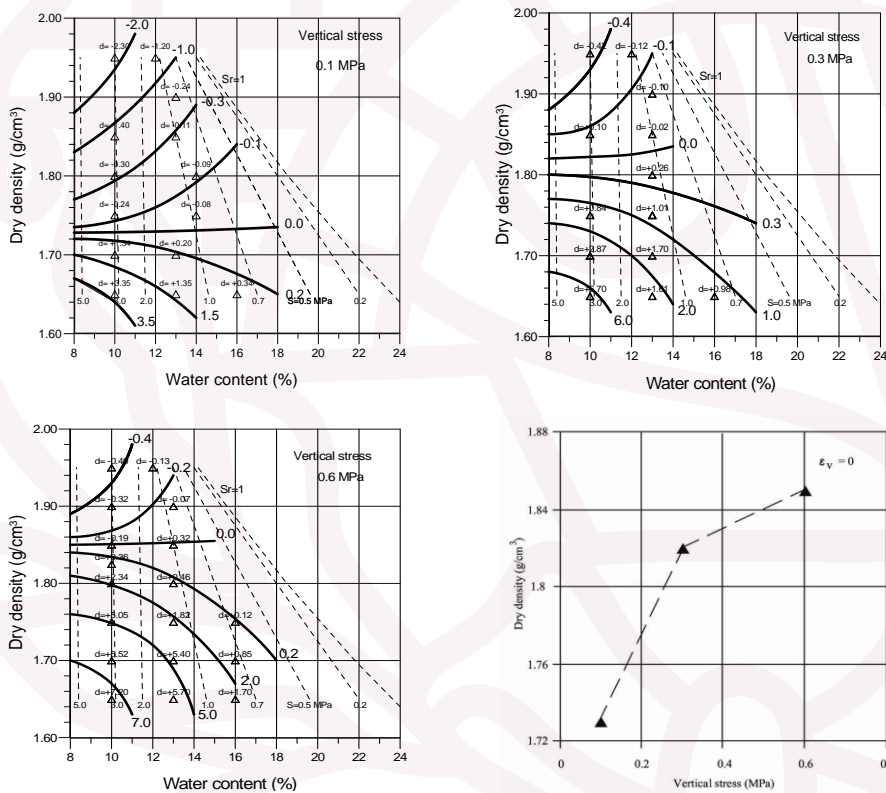


Figura 10.6.4 Variación de las densidades secas correspondientes a la transición entre comportamiento expansivo y colapso con la tensión vertical aplicada

Finalmente cabe señalar la importancia ingenieril que tiene el conocimiento de las curvas de comportamiento indicadas, dado que entonces se puede proyectar la compactación a una densidad seca en la que no se produzcan cambios volumétricos al saturar el suelo (para una carga exterior dada). Naturalmente dichas curvas serán diferentes para cada tipo de suelo y, por lo tanto, habría que obtenerlas para cada caso.

10.7 Aplicaciones ingenieriles de la compactación

Existen diversos métodos de compactación de suelos *in situ* según las necesidades del terreno y de la obra. En la tabla 10.7.1 se muestra un cuadro resumen comparativo entre los métodos de compactación usados en el laboratorio y su correspondencia con los empleados *in situ*.

Tabla 10.7.1 Métodos de aporte de energía en la compactación: ensayos en el laboratorio y sistemas usados en obra

Método de aporte de energía	En el laboratorio	En el terreno
Impacto	Proctor	Caída de pesos
Amasado	Harvard	Rodillo con salientes
Vibración	Mesa vibrante	Rodillo vibrante
Compresión	Prensado	Rodillo liso pesado
Explosión	-	Explosión controlada

Los métodos más utilizados para el aporte de energía al terreno son los de vibración, compresión y amasado. En cuanto al método de impacto para la compactación *in situ* es poco utilizado, sin embargo es muy apropiado para conseguir una densidad elevada en un punto localizado, por ejemplo en la base para una cimentación superficial en un relleno de baja densidad; para ello debe disponerse de una masa elevada, de varias toneladas, que se eleva mediante una grúa apropiada y se deja caer libremente sobre el mismo punto hasta alcanzar la densidad requerida. En cuanto al método por explosión, se utiliza muy poco dado que, obviamente, produce fuertes vibraciones en el terreno inadmisibles en una zona habitada y pueden afectar a las construcciones existentes en su proximidad.

A continuación se describen las fases del procedimiento habitual para la compactación de un terraplén en base a la compactación de capas sucesivas, aportando terreno hasta completar la altura de dicho terraplén prevista en el proyecto:

1. Se procede, en primer lugar, a realizar un desbroce de la maleza que pudiera existir, con el fin de efectuar una excavación y una nivelación del terreno en la zona de compactación. Esta operación es muy aconsejable, si bien no es estrictamente necesaria para el proceso de compactación.
2. Seguidamente, una vez se tiene la base nivelada y preparada, se procede a extender el terreno de aportación que formará el cuerpo del terraplén. La extensión del terreno siempre se debe realizar por capas de 10÷40 cm de espesor (dependiendo del tipo de terreno). No es aconsejable superar dicho espesor dado que entonces no es posible garantizar la eficacia del método de compactación empleado.
3. La siguiente operación consiste en humedecer el terreno aportando agua hasta la humedad prescrita; habitualmente se hace por aspersión mediante un sistema apropiado con el fin de garantizar la máxima homogeneidad en toda la capa. Esta fase requiere de experiencia suficiente dado que es difícil conseguir homogeneidad.
4. Se espera hasta que la capa tiene la humedad prescrita en el proyecto; normalmente se riega por la mañana y se compacta por la tarde o bien se riega por la tarde y se compacta a la mañana siguiente.
5. Se procede a la compactación con la energía y método previsto en el proyecto (hay que fijar la velocidad y el número de pasadas del rodillo).
6. Finalmente, hay que comprobar *in-situ* si la capa compactada tiene la densidad y la humedad esperadas. En caso afirmativo, se sigue el proceso en una nueva capa y así sucesivamente hasta completar el terraplén. Hay que tener en cuenta el asiento del terraplén a medida que se va recreciendo.

Seguidamente se describen algunos aspectos relacionados con los tres métodos de compactación indicados. En la práctica ingenieril es habitual utilizar equipos que incorporan de forma conjunta el método de vibración y el de compresión; en cuanto al método de amasado, se utilizan equipos que disponen de salientes en el rodillo.

10.7.1 Método de vibración-compresión

Es un método ampliamente utilizado en obras de compactación para muy diversas aplicaciones. Se realiza mediante rodillos lisos arrastrados, o bien autopulsados, a los que se les añade la capacidad de vibración. La eficacia del procedimiento depende fundamentalmente de:

1. Las características del equipo compactador utilizado: la masa y el tamaño del rodillo influyen sobre la eficiencia del procedimiento. Es habitual disponer de equipos que van

desde los 50 kg (generalmente usados en la compactación manual) hasta 25 T. En cuanto a la frecuencia de vibración disponible, suele estar entre 10 y 100 Hz.

2. Las características del suelo empleado: densidad y humedad iniciales así como del estado de agregación que presenta el terreno a aportar.
3. El procedimiento empleado: número de pasadas del rodillo, frecuencia de vibración (hay equipos que permiten variarla para una mejor eficacia del proceso), de la velocidad de avance del rodillo (cuanto más lento mayor eficiencia) y del espesor de capa utilizado.

Cabe señalar que la vibración se genera por rotación de masas excéntricas dispuestas en el interior del rodillo. Cuando se trata de compactar grandes cantidades de terreno, puede justificarse económicamente la realización de varias pruebas en el propio terreno para determinar la frecuencia óptima de vibración; obviamente es necesario que el equipo utilizado permita variarla. Existen ábacos para calcular el rendimiento en m^3/h en función de la velocidad del rodillo, el número de pasadas del mismo, así como su masa y tamaño. En este sentido, resulta muy conveniente tener en cuenta las recomendaciones del fabricante del equipo en relación al procedimiento y al tipo de suelo a utilizar. El método de vibración-compresión es apropiado para suelos del tipo limoso y arcilloso, pero también es apropiado en suelos de matriz arenosa que sean algo cohesivos. La figura 10.7.1 muestra el aspecto de un equipo típico para la compactación por el método de vibración-compresión.



Figura 10.7.1 Aspecto de un equipo típico de compactación por vibración-compresión

10.7.2 Método de amasado

En este caso se emplea un rodillo con salientes, habitualmente conocido como “pata de cabra”, en el que se produce un hincado de los salientes sobre el terreno, ello supone un amasado del mismo. Al igual que sucede con el método de vibración-compresión, la eficacia del procedimiento de amasado depende esencialmente de:

1. Las características del equipo compactador utilizado: la masa y el tamaño del rodillo influyen sobre la eficiencia del procedimiento. Es habitual disponer de equipos de 25 T con salientes de formas diferentes que tienen en cuenta las características del terreno a compactar.
2. Las características del suelo empleado: de la densidad y humedad iniciales así como del estado de agregación que presenta inicialmente el terreno a aportar.
3. El procedimiento empleado: número de pasadas del rodillo, de la velocidad de avance del rodillo (cuanto más lento mayor eficiencia) y del espesor de la capa utilizado.

También existen ábacos para calcular el rendimiento en m^3/h en función de la velocidad del rodillo, el número de pasadas del mismo así como su masa y tamaño. El método de amasado es apropiado para suelos del tipo limoso y arcilloso de cohesión elevada, en suelos poco cohesivos es poco eficiente. La figura 10.7.2 muestra el aspecto de un equipo típico para la compactación por el método de amasado.



Figura 10.7.2 Aspecto de un equipo típico de compactación por amasado

10.7.3 Aspectos geotécnicos ligados a la compactación

A continuación se analizan algunos aspectos característicos de los suelos compactados *in situ* que se relacionan con el resultado y que influyen notablemente sobre las propiedades geotécnicas del terreno compactado, además de la humedad, la densidad y el método de aporte de la energía.

1. La retracción, definida como una reducción de volumen del suelo cuando se produce un proceso de secado a partir de un grado de saturación inicial elevado; se observa fácilmente en la superficie del terreno dado que aparecen grietas. La retracción es pequeña si se compacta por la rama seca, dado que entonces el grado de saturación inicial es bajo. Sin embargo, si se compacta por la rama húmeda, cuyo grado de saturación es elevado (>0.8), al

secarse puede producir, en función del tipo de suelo, una retracción elevada. El peligro de retracción es bajo si se usa el método de compresión, aumenta ligeramente si se aplica vibración y es mucho mayor si se usa el método de amasado mediante el rodillo con salientes.

2. La forma de la curva de compactación (γ_d, ω), obtenida en el laboratorio mediante el ensayo Proctor, cambia poco en relación a la obtenida con el método de compactación usado in situ.
3. En cuanto a la carga de rotura del suelo compactado, suele interesar que sea lo mayor posible pero puede suceder que sea incompatible con otra propiedad del suelo; su valor es función directa de la energía aplicada y de la densidad alcanzada. Efectivamente a mayor energía aplicada, mayor es la densidad seca alcanzada y mayor la carga de rotura (mayor resistencia) del suelo. De otro lado, la compresión generada por el rodillo actúa como una carga de preconsolidación sobre el terreno, es decir, el rodillo carga el terreno cuando pasa por encima pero posteriormente se descarga.
4. Tal como se ha indicado, la frecuencia óptima de vibración del rodillo depende del tipo de suelo y su estado de agregación. Para grandes cantidades de terreno a compactar, es muy conveniente ajustarla lo más posible a la óptima.
5. La velocidad de avance del rodillo tiene mucha importancia en el procedimiento de compactación. Tal como se indicó en el apartado 10.5 existe un tiempo de compactación (t_c) estimable en función del estado del suelo; se puede afirmar que en general a mayor velocidad del rodillo menor es la eficacia.
6. Dado que los aspectos prácticos del procedimiento de compactación in situ se basan esencialmente en la experiencia, existe una gran variedad de tablas comparativas sobre las propiedades de los suelos compactados según el procedimiento utilizado; conviene atender a la experiencia del fabricante de los equipos utilizados.
7. En zonas tropicales, donde los suelos son muy húmedos, puede ser necesario secar el suelo antes de la compactación ya que un exceso de humedad puede impedir la compactación. Puede ser necesario almacenar a cubierto el terreno en la época lluviosa, con lo que el coste de la compactación será mayor.
8. Finalmente, conviene señalar que el índice CBR (California Boring Ratio) es un ensayo muy utilizado y se usa para clasificar a los terrenos compactados. Las normas UNE 103502-95 y ASTM-D1883-92 describen el ensayo CBR que se realiza en suelos compactados y consiste en generar un punzonamiento, en condiciones de confinamiento lateral, mediante un punzón de diámetro 50 mm sobre una probeta compactada en el molde Proctor. Se basa en considerar que cuanto más resistencia ejerza el suelo a la penetración del punzón mejor es su calidad, según los criterios establecidos por la misma norma; el resultado se compara con un suelo patrón y se define como un porcentaje respecto de él.

10.7.4 Métodos de control de la compactación

A continuación se describen muy resumidamente los métodos de control de compactación realizados en el terreno. Se trata de comprobar si la humedad y la densidad seca obtenidas en el terreno compactado son las que prescribe el proyecto.

Método de la arena normalizada: (UNE-103503-95). Se emplea arena normalizada de 1 mm de diámetro de la que se conoce el peso específico de las partículas y la densidad natural que adquiere al llenar un recipiente de volumen conocido. El procedimiento es el siguiente:

1. Se hace una perforación en el terreno compactado de aproximadamente 15 cm de diámetro por 15 cm de altura empleando un sistema totalmente manual. Seguidamente se recoge el suelo extraído y se pesa, guardándolo en una bolsa estanca para posteriormente obtener su humedad en el laboratorio.
2. Se rellena el agujero realizado con la arena normalizada controlando el peso de arena que se ha utilizado para rellenar dicho agujero. Mediante el peso de arena utilizado para rellenar el agujero y sabiendo la densidad seca que alcanza (calibrada anteriormente), se calcula el volumen del agujero. Hay que señalar que la precisión depende esencialmente de la experiencia que tiene el operario en la realización de la maniobra.
3. Conocido el volumen del agujero y el peso seco del suelo que ocupaba el agujero, se calcula la densidad seca de terreno a controlar.

Cabe señalar que dicho método, muy utilizado hace unas décadas, en la actualidad ha caído en desuso a favor de otros métodos más rápidos y automatizados.

Método del balón hinchable: el sistema es poco usado en la actualidad. El procedimiento de ejecución se puede describir como:

1. Se excava un agujero en el terreno, se pesa el terreno extraído y se obtiene la humedad; al igual que en el método de la arena normalizada.
2. Sobre la superficie del terreno encima del agujero excavado, coloca un recipiente lleno de agua cuya base esta formada por una membrana flexible.
3. Mediante aire a presión se presuriza el agua y se obliga, de este modo, a la membrana a adaptarse a la pared y fondo del agujero; en estas condiciones se mide el volumen de agua desplazado, que debe coincidir aproximadamente con el del agujero.
4. Con los datos del volumen del agujero y el peso de suelo extraído de él, se puede calcular la densidad seca del terreno.

Método de la impermeabilización de la pared: como en el caso anterior, el método es poco utilizado en la actualidad. En cuanto al procedimiento de ejecución, se puede resumir en:

1. Se excava un agujero en el terreno, se pesa el terreno extraído y se obtiene la humedad; al igual que en el método de la arena normalizada y el del balón hinchable.
2. Mediante laca o pintura se impermeabiliza la pared del agujero.
3. Se llena el agujero impermeabilizado de agua o de aceite y se mide su volumen.
4. Con los datos del volumen del agujero y el peso del suelo extraído de él, se puede calcular la densidad seca del terreno.

Método nuclear (Troxler): en este sistema se utiliza material radioactivo. Es el más empleado en obra en la actualidad, tanto por su rapidez de ejecución como por la sencillez y la fiabilidad del método. La figura 10.7.3 muestra un esquema del equipo.

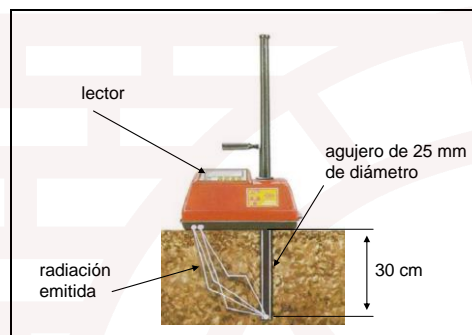


Figura 10.7.3 Esquema del equipo de emisión radioactiva para el control de la compactación

El aparato utiliza la emisión radioactiva como principio físico de la medida por lo que el laborante que lo utilice debe estar suficientemente acreditado para ello y el equipo debe tener los permisos exigidos. El procedimiento de medida se puede sintetizar en:

1. Se realiza una perforación en el terreno a controlar de unos 25 a 30 cm de profundidad y unos 20 mm de diámetro.
2. Se coloca el aparato en la superficie del terreno; sobre la perforación realizada se introduce un mástil hasta el fondo, que servirá como receptor de la radiación emitida desde la superficie.
3. Se pone en marcha el equipo debiendo distanciarse todas las personas unos 10 m, para evitar recibir radiaciones durante el proceso de lectura.
4. Una vez finalizada la lectura (aproximadamente unos 10 segundos) el equipo emite una señal acústica indicando que ya es seguro acercarse.

Para determinar la humedad del suelo, el equipo emite un haz de neutrones de forma que la atenuación de este haz, recogido en el detector, es directamente proporcional a la humedad del terreno. De otro lado, para la determinación de la densidad el equipo emite un haz de radiación gamma, de forma que la atenuación de este haz es directamente proporcional a la densidad del terreno.

El equipo debe calibrarse con una periodicidad apropiada y guardarse convenientemente protegido en armarios especiales, tal como indica la normativa de equipos radioactivos. De forma automática el aparato convierte las medidas en valores de humedad y densidad seca; también calcula el porcentaje respecto al Proctor Normal o Modificado, según las especificaciones del proyecto. El equipo es, por tanto, un sistema de medida muy cómodo, rápido y fiable que permite conocer de inmediato si el terreno compactado cumple con las especificaciones del proyecto.