

Recomendaciones para el estudio del tapial

Los estudios de investigación dirigidos a la conservación del patrimonio arquitectónico de tierra han sufrido un impulso en la actualidad e instituciones de gran prestigio internacional están contribuyendo a ello de forma importante. Andalucía es una región con una importante trayectoria arquitectónica en tierra, cuya tradición se remonta al período prerromano. El estado alarmante de conservación que presenta este tipo de construcciones está demandando actuaciones de urgencia.

Definición de las condiciones que tienen que cumplir los estudios previos aplicados al tapial

La metodología de estudio a aplicar sobre este tipo de construcciones está encaminada al conocimiento sobre el suelo y su comportamiento como material de construcción. A pesar de la extensa bibliografía existente, los estudios científicos, normas y ensayos con lo que se cuenta actualmente presentan poco rigor en comparación con el método de estudio aplicado sobre otros materiales (piedra, ladrillo o mortero). El fundamento de la metodología a aplicar sobre estos materiales debe tener en cuenta la determinación de los parámetros de mecánica de suelos y la físico-química de las arcillas.

Recommendations for the study of earthen building

In recent years, research on the conservation of this architectonic heritage have received great support and prestigious international institutions have made important contributions in this field. Andalusia is a region with a long history of "tapial" architecture. This tradition dates back to pre-Roman times. However; the alarming condition of these types of constructions requires urgent action.

Definition of the conditions governing preliminary studies applied to earthen building

The study methodology to be applied in these types of buildings is aimed at obtaining information on the soil or earth material used and its behaviour as a building material. Despite the abundant bibliography available, current scientific studies, regulations and tests are not as rigorous as the methods used to study other materials (stone, brick or mortar). The methodology to be applied in the study of these materials must take into account the determination of soil mechanics parameters and the physical-chemical characteristics of clays, since this information is essential for studying these types of materials.

Recomendaciones para el estudio del tapial'

La arquitectura construida con tierra se extiende de forma amplia en numerosos lugares del mundo. Aunque históricamente está más relacionada con lugares cálidos, la técnica de construcción del tapial se ha adaptado a las condiciones y culturas más diversas, incrementando en estos casos los sistemas de protección aprovechando sus cualidades (rapidez en la construcción, costo mínimo, aislamiento térmico, resistencia al fuego, solidez y durabilidad) dando como fruto una asombrosa arquitectura monumental (figuras 1-8).

En España fue un material muy empleado. Las atalayas de Aníbal en la Península Ibérica estaban construidas con este material según un conocido texto de Plinio. La primera cita con relación a este tipo de construcciones data del s. IX (MENÉNDEZ PIDAL, 1955), donde se señala la construcción de un castillo (Alcázar) y una muralla de tierra en Toledo.

Con relación a su origen, aunque la procedencia de esta técnica es insólita, se le ha atribuido un posible origen hispánico, basado en el hecho de encontrar numerosos ejemplos de esta arquitectura en restos hispanorromanos. Tal es el caso de *postscaenium*, teatro romano de Segóbriga, del edificio con exedras junto al foro de Clunia o de las estructuras ligantes del teatro de Itálica, por citar algunos ejemplos. También son frecuentes las fábricas de tierra en villas romanas como Ampurias y otras villas rurales. El tapiadero aparece abundantemente citado en documentos relativos a nuestra arquitectura mudéjar, como los documentos estudiados por Ovideo Cuellas referentes a San Pedro mártir de Calatayud. En este área aragonesa abundan los tapias de yeso (ALMAGRO, 1992).

En este sentido los abundantes testimonios del siglo IV y II a.C. que aparecen en un conocido texto de Plinio (XXXV, 48) hacen de la tierra una especialidad africana o española.

La enorme cantidad de restos hispanomusulmanes que nos ha llegado evidencia la importancia de esta forma constructiva en la época medieval (TORRES BALBÁS, 1985).

En el mundo hispanomusulmán se empleó el tapial para la construcción de recintos fortificados, utilizando diversas técnicas, en función del material existente a pie de obra y de los recursos económicos. En estas construcciones era frecuente ver los agujeros o mechinales dejados por las agujas que perforaban el muro y sujetaban los tableros durante la construcción, visibles con frecuencia, excepto en las construcciones califales, o más recientemente en las que quedaban ocultos por un revestimiento de cal, imitando sillares (TORRES BALBÁS, 1985).

El tapial andalusí, de tradición almohade, es una mezcla de arcilla, arena gruesa, casquillos y mortero de cal, lo que viene llamándose hormigón pobre. La fábrica no escupía la cal ni los revocos, sino que se adherían bien. Al batir la mezcla con el encofrado se carbonataba más la superficie y un simple talochado lo dotaba de un duro acabado (TORRES BALBÁS, 1985).

Los muros construidos en tierra pueden perdurar durante siglos si están convenientemente protegidos, especialmente de la agresión del agua. Para garantizar su estabilidad es necesario fijar la atención en tres puntos esenciales: la zona de contacto con el suelo, en la que para evitar humedades se dispondrá de un zócalo de piedra o mortero como continuación del propio cimiento; en segundo lugar, los bordes de la fábrica o esquinales, en los que se suelen colocar elementos realizados con piedra, ladrillo o mortero de manera que contengan y compensen las tensiones horizontales de la fábrica, al tiempo que refuerzan puntos débiles como esquinas y ángulos; y, en tercer lugar, las cubiertas, en las que se colocan elementos para repartir las cargas y aleros con gran vuelo realizadas mediante hileras de ladrillo, tejares, canes de madera o incluso adobes.

Técnica constructiva

El término *tapial* o *tābica* es una transcripción hispánica del término bereber *tābiya* que se transformó bajo la forma "toub" en África. Se define como una obra de



1 y 2. Teatro Romano de Itálica, Sevilla. Fuente: Fototeca (IAPH)



3. Villa Romana de Ampurias. Imagen: Elisenda Murillo



4. Teatro Romano de Segóbriga



5 y 6. La Gran Muralla de China. Imagen: Víctor Fernández Salinas



7 y 8. Medina de Marrakech, Marruecos



1- 8. Desde la antigüedad se ha hecho abundante uso del tapial, tanto en Oriente, por ejemplo en la Gran Muralla China, como en Occidente. En concreto, los romanos utilizaron esta técnica en abundancia, revistiéndola generalmente de estucos pintados. En África se han construido ciudades en tierra como Kano en Nigeria, o Marrakech en Marruecos.

albañilería de tierra con cierta cantidad de cantos rodados, sin armadura de paja cortada, de humedad poco excesiva (por ejemplo, la de primavera), comprimida en el interior de un encofrado (alrededor de 3 m de largo por 0,90 m de alto, dimensiones que varían según los países), con ayuda de un apisonador; una especie de masa de madera manipulada a mano. El muro se levanta en series (tongadas) sucesivas de 90 cm de altura (BARDOU, 1979) o como unidades de obra de fábricas ejecutadas con tierra, barro o paja, en las que las consolidaciones se producen por medios mecánicos (DÍAZ ROMERAL et al., 1980).

La técnica consiste, según el Manual de Villanueva (1827), “en colocar dos tableros *hormas* en latín, verticales y paralelas, separadas a distancias iguales al ancho según el grosor que se quiera dar al del muro y sujetos a uno y otro por travesaños, palos de madera horizontales llamados agujas o cárceles, que sirven de molde, y entre ellos se van rellenando con piedra-grava a veces con piedra de río de mayor o menor tamaño y mortero de cal, echado por tongadas o capas bien apisonadas”.

Al fraguar el mortero, la fábrica del muro se endurece y los tableros pueden trasladarse a ambos lados para continuar la tapia en longitud o sobre la ya levantada. La argamasa varía mucho, pues se puede emplear en ella desde muy pequeña gravilla de río, como acostumbraban los romanos, hasta piedras de bastante magnitud, como se encuentra en muros de construcciones hispanomusulmanas (TORRES BALBÁS, 1985).

Se precisa de unos tableros de madera de gran solidez para resistir las presiones y vibraciones que tienen lugar en el proceso de apisonamiento. Suelen ser muy ligeros, de madera de buena calidad, para favorecer el transporte y montaje del encofrado. Constan, básicamente, de tres o cuatro tablas, al derecho de madera seca, con un número mínimo de nudos de un espesor de 3 cm, una anchura de 30 cm y una longitud de 3,25 m. Las tablas pueden unirse por medio del barzán (tablas pequeñas de madera), auxiliándose de unos clavos, quedando en este caso las improntas señaladas en la fábrica exterior del muro. Estas tablas se disponen distanciadas unos cuantos milímetros para evitar las presiones debidas a la dilatación de la madera. Las tablas en el interior deben ir pulidas, para obtener un paramento liso e impedir la formación de terrones.

Los tableros iban provistos de unos mangos, de hierro normalmente, para facilitar su transporte. Las dimensiones de los tableros son variables, si bien dentro de unos

límites a los que hacen referencia diferentes autores: longitud entre 1,60 y 4,20 m, y una altura de 80 cm, como dimensiones óptimas; bajo los tableros, de longitud 2,60 m, se sitúan cuatro agujas con un espaciado de 80 cm (GOIFFON, 1772).

Villanueva (1827), al hablar de los tableros, nos dice: “Se les llaman tapiales de 7 a 9 pies de largo y de 2,5 a 3 de alto. Las tablas han de tener de 2 a 2,5 de grueso, asegurados con unos barrotes clavados al exterior. Los tableros quedan ajustados por 4 piezas, dos de ellas se llaman agujas y las otras dos costas. Cuando los muros se hacen de machos intermedios, se ponen en las extremidades de los tableros otros de su altura, y del ancho que han de tener las tapias, asegurándolas con un canal o gargol, que se forman con dos listones clavados en los tableros, de modo que viene a hacer un cajón”.

Los datos recogidos por Ibén Jaldūn (TORRES BALBÁS, 1985) manifiestan que, dentro de la variabilidad de las dimensiones, en general tenían 168 por 84 cm. La variabilidad a la que se hace referencia afecta esencialmente a la longitud de los tableros, pues se ha podido constatar que la altura de los mismos ofrece una gran regularidad desde épocas antiguas. A título de ejemplos, la altura de las tapias de las murallas de Sevilla varía entre 82 y 85 cm y en Alicante oscila entre 80 y 92 cm. Tales medidas están en consonancia con el intervalo entre 82 y 96 cm, altura habitual en construcciones de este tipo en época islámica (BAZZANO, 1980).

La construcción del tapial también exige el empleo de otros elementos esenciales, las agujas y las costas o costero (utensilios también de madera de 1,62 m de altura sobrepasando la altura de los tableros en 50 cm). Estas piezas quedan perfectamente encajadas a los travesaños (agujas) gracias a otras piezas, yugos o clavijas. Los yugos en algunos lugares u ocasiones se sustituían por cuerdas, si bien, este sistema corre el peligro de que los tableros cedan durante el apisonamiento.

Como elementos adicionales, podemos señalar, en primer lugar, los *tableros de cabeza* o *tablas del extremo*, que están compuestos por unos cuantos tablones del mismo grueso; en la parte superior se fija una pieza de madera, que hará tope contra los travesaños (agujas) cuando convenga y para poder trasladarlo. Otro elemento son los *bastones* o *separadores*, piezas troncocónicas de madera que ayudan a mantener la separación de los tapiales y constante el grueso del muro, sobre todo

durante el montaje del tapial y el inicio de los trabajos. Pero también tienen otra misión: se extraen de la masa compactada y en su lugar se colocan las agujas, que sostendrán los tableros en la construcción de niveles superiores. Para que la extracción sea cómoda, se untan los bastones con jabón. El diámetro del bastón debe ser un poco mayor que la sección de la aguja y su longitud será la del muro (DOAT et al., 1985).

Villanueva (1827), en relación con el proceso de construcción, dice:

“Antes de situar los tableros, es necesario primero nivelar el basamento y trazar los trayectos destinados para las agujas. Sus distancias deben estar entre 0,97 cm de eje en eje y 16 cm de altura de muro a muro, lo que da al basamento alrededor de 80 cm de altura. Previamente se debe de excavar el cimiento, rellenándolo de mampostería. Una vez situados los tableros se comienza a rellenar de tierra los encofrados. Conforme se va cavando, si la tierra está seca, se rocía un poco; y deshaciendo los terrones, recorriéndola y desmenuzándola se amontona para que se conserve el jugo. En esta disposición se va echando dentro de los tapiales a tongadas o capas de poco más de medio pie de alto; entonces el oficial, que debe estar dentro del cajón, pisa, aprieta y maciza esta tierra con un pisón algo pesado (6 a 8 kg), que tiene un plano inferior puntiagudo, hasta conseguir un espesor de 8 a 10 cm de altura. El pisón y los pies del trabajador van macizando la tongada por un lado, y sobre la que ya queda apretada y maciza, al golpear el pisón produce un ruido sordo, que pasa a resonante cuando la capa está suficientemente compactada y se va echando otra tongada de la misma altura, y así sucesivamente se va llenando el cajón hasta completar la altura de los tapiales. Una vez llenos y enrasados los tableros, se sueldan los garrotes, se sacarán los clavos, se extraen los tapiales, y se colocarán más adelante para formar otra tapia como la rematada. Se debe abrir de arriba a bajo con la piqueta una caja, para que la tierra de la nueva tapia se entrelace con la ya hecha. En lo demás se sigue como la anterior y se continúa toda la línea hasta el cabo.

Acabada la primera hilada de tapias, se hace la segunda con la misma conformidad colocando las agujas bajas sobre el grueso de las tapias hechas, teniendo presente que el medio de la tapia de arriba debe caer sobre la junta de dos tapias de abajo, y lo mismo se debe de hacer con los ángulos, porque de este modo las paredes quedan con mucha más fortaleza, y no forman aberturas tan fácilmente” (figura 9).



9. Montaje de las tablas



10. Llenado de las tablas y compactación



11. Llenado y compactación



12. Aspecto que presentan los muros

9-12. Restauración de la muralla de Carmona. Fuente: Servicio de Arqueología del Ayuntamiento de Carmona

El proceso de apisonamiento debe ser realizado de forma correcta para evitar problemas de laminación del material o desmoronamiento rápido de la fábrica (figuras 10 y 11). Los principales factores que intervienen en la concepción de un pisón son los siguientes:

- Sección del golpeo. Son muy diversas y de ventajas muy discutidas. Las formas redondas preservan mejor los tableros, pero son menos eficaces en las zonas angulosas. Es la forma prismática, en superficie de apisonado plano, la que da los mejores resultados. Los ángulos de apisonado a 60° parecen dar resultados casi similares, pero a medida que se cierra el ángulo la eficacia disminuye. De modo que un ángulo de apisonamiento de 45° puede hacer perder el 30% de eficacia. Las formas de cono y ángulo favorecen la entrada en lugares difíciles.
- Superficie del apisonado. Se sitúa preferentemente alrededor de los 64 cm². Los investigadores muestran que para obtener los mejores resultados es conveniente no pasar de una sección superior a 225 cm².
- Cabeza del apisonado. Es a menudo de madera o metal. En el caso de ser de madera, está protegida por una placa metálica a fin de reducir la erosión demasiado rápida. Los pisones metálicos son más maleables y sólidos pero suelen tener la cabeza más pequeña.
- Peso. El peso recomendado se sitúa entre 5 y 8 kg, y debe variar según la talla del pisón y la fuerza de apisonamiento.
- El mango. El manejo del pisón puede ser simple o doble, en madera o metal. El mango hueco permite llevar el pisón fácilmente.

En el sistema constructivo, existen muchas variedades de tapias en función de las técnicas o los materiales usados, adaptados a los distintos lugares. En este sentido, podemos destacar los tapias monolíticos, en los que el muro funciona como un todo homogéneo y de igual resistencia, de los cuales pueden obtenerse tapias ordinarias, mejoradas, con refuerzos en sus caras o juntas. Éstas se caracterizan por poseer en su composición sólo tierra sin revestimiento posterior. Dentro de esta modalidad existen variaciones: *tapia real*, basada en un añadido de cal a la tierra. La tierra es trabajada de igual forma que en tapial de tierra, pero aparece mortero de cal y arena en juntas verticales y horizontales. El mortero unifica las tongadas, se utiliza en esquinas y jambas y en puntos débiles de la

edificación. Entre las formas reforzadas, encontramos la llamada *tapia acerada*, en la que se lleva a cabo la protección de la base de tierra por medio del cuernecimiento de sus paramentos con alguna mezcla y argamasa. Por otro lado, el *tapial de tierra calicastro* se solía emplear para edificios de carácter monumental; el procedimiento constructivo consiste en introducir un mortero de cal sobre las caras internas del encofrado de altura suficiente para poder trabajar las primeras tongadas. Se echa la tierra de la primera tongada y se apisona. Cuando se emplea en viviendas, sólo se calicastro por el exterior y, por el interior, se reviste con un mortero de cal o yeso. Otro tipo de refuerzo consistía en disponer en sus juntas horizontales y verticales un mortero de yeso o cal para evitar que éstas se agrietan cuando la tierra se seca; tales juntas podían ser rectas o curvas en forma de media luna (tapias con brenas o lunetos), pudiendo quedar dispuestas alternativamente de forma alineada. En otros casos la tapia se ejecutaba añadiendo paja de trigo a la tierra húmeda (*tapial de tierra y paja*). La misión de la paja consiste en reducir la retracción del muro para evitar fisuras, actuar como armazón y dar cohesión y consistencia a la fábrica. Por último tenemos las *tapias mixtas*. Se trata de tapias en las que se emplean, además de la tierra, otros elementos como piedra y ladrillo. Las hiladas de ladrillo o piedra están asentadas con mortero de cal en lugar de encofrado. En la primera tongada, se verterá en el interior la tierra hasta enrasar con la hilada de ladrillo; posteriormente, se pondrá otra hilada de ladrillo que se volverá a rellenar de tierra.

El tapial emplea como elemento básico de construcción la tierra, entendiéndose como tal la que forma la capa superficial de la corteza terrestre, resultado de los procesos de sedimentación y/o meteorización.

Su uso para la construcción nos pone de manifiesto el buen empleo que en la antigüedad se hacía de este material. Podríamos preguntarnos cómo seleccionaban, desde antiguo, la tierra para ser utilizada en construcción. La respuesta posiblemente esté en la experiencia, que se fue transmitiendo oralmente de generación en generación. Por los tratados sabemos que desde muy antiguo los entendidos en tierra empleaban una serie de técnicas previas, de carácter sensorial, que les permitían conocer el material que tenían disponible, y saber si era o no apropiado para la construcción:

- Olor. El olor a moho permite detectar la presencia de materia orgánica. Este olor se amplifica si se humedece o se calienta la tierra en cuestión.

- **Mordedura.** Con esta prueba es posible detectar, por medio de rechinado del material entre los dientes, el contenido en arenas y de la porción fina de los suelos. Si rechina desagradablemente, es arenosa; si rechina pero no de forma especialmente desagradable, es limosa; si se tiene una sensación “lisa o harinosa”, es arcillosa.

- **Vista.** Un vistazo permite hacerse una idea de la proporción y del grueso de las partículas. El ojo humano permite diferenciar hasta partículas de tamaño de arenas de 0,074 mm. El color es otro parámetro que permite detectar el ojo humano, que puede variar en función de la humedad y es un indicador muy valioso por la información composicional que nos puede aportar. En términos generales, para suelos secos, los colores castaños oscuro, verde oliva o negro pueden indicar que se trata de suelos orgánicos; mientras que, en general, colores claros y brillantes indican que se trata de suelos inorgánicos. Un color blanco, blanco grisáceo, azul marino, café o negruzco, puede ser indicativo de un suelo con materia orgánica activa. Suelos con colores grises claro pueden existir en depósitos limosos fluviales y en suelos que contengan gran cantidad de carbonatos de calcio; los colores blancos y grises indican la existencia de corales, yesos, caliche y material calcáreo; el color amarillo y ocre indica que contiene hidratos de carbonato, y de rojo a castaño oscuro que contiene óxidos de Fe.

- **Tacto.** Esta prueba se manifiesta mediante el tacto de las partículas contenidas en los suelos. Se toma un poco de tierra en la palma de la mano, y con el dedo índice de la otra se detecta la presencia de arenas, limos y arcillas, a partir de su mayor rugosidad.

- **Brillo.** La prueba se realiza para detectar la presencia de arcillas mediante el brillo de sus partículas. Se toma un poco de material, se desmorona perfectamente para después amasarlo con agua hasta formar una bola compactada del tamaño de la mano, se corta por la mitad para observar las superficies; se trata de arcillas cuando las superficies son brillantes, de limos cuando son poco brillantes y arenas cuando son opacas.

- **Sedimentación.** Esta prueba tiene como propósito conocer de una manera clara los componentes de los suelos mediante la decantación. Las partículas de tamaño grava, arena y limos se decantan, permaneciendo en suspensión las partículas tamaño arcilla.

- **Prueba de la cintilla.** La elaboración de esta prueba sirve para verificar el grado de plasticidad del material. Un poco de material perfectamente molido se amasa con agua y sobre una superficie lisa se fabrica una cintilla de 20 cm de longitud y se alza para observarla; si la cintilla se rompe antes de 5 cm, el suelo es arenoso, y podrá ser utilizado para la fabricación de adobe estabilizado con cemento.

- **Contenido óptimo de humedad.** Esta prueba tiene como finalidad determinar el límite líquido en el material, lo que permite conocer la contracción volumétrica. El procedimiento consiste en moler un poco de tierra y agregarle agua hasta que el material sea maleable. Después se coloca el material al ras en un recipiente y se apoya sobre el mismo una varilla sostenida con una mano y guiada con la otra; se suelta la varilla y si ésta penetra 2 cm, es el momento en que el material se encuentra en su límite líquido. En caso de que la penetración sea diferente, se agregará mayor cantidad de tierra o agua y se repetirá la prueba.

- **Prueba de lavado de las manos.** Con esta prueba, mediante el lavado de las manos después de haber manipulado la tierra en estado húmedo, se constata si contienen limos y/o arcillas. Cuando al lavarse las manos, éstas se sientan jabonosas y presentan dificultad a una rápida limpieza, se trata de una tierra donde predomina la arcilla; si, al contrario, la tierra se presenta polvorosa y es fácil de enjuagar, predominan los limos.

Con independencia de la escasa selección que tradicionalmente se ha hecho de la tierra, estudios recientes aconsejan unos rangos de variación para los diferentes parámetros (HOUBEN, 1982), de forma que el contenido en arcilla no supere el 20% y el contenido en arena sea superior al 45%; que los suelos presenten una débil plasticidad (que al ser compactados adquieran una compactación entre 1,7 y 2,3 g/cm³; debe entenderse que el máximo establecido, dentro del rango, está condicionado por el tipo de utensilios que se puede utilizar en la compactación); por otro lado, que la curva granulométrica de estas tierras no sea uniforme y la arcilla tenga una función de aglomerante; por último, que la tierra no contenga materia orgánica ni sales solubles.

Villanueva (1827), al hablarnos de las características del material, nos indica que éste debe ser arcilloso, pegajoso, compactado, limpio de guijo y con poca mezcla de agua y cascajo. En casi todos los países se halla con

abundancia y puede construirse con tierra paredes muy fuertes y durables.

La tierra, previa a su utilización, necesita ser preparada antes de su puesta en obra. Este proceso tiene lugar en varias fases:

- Extracción de la tierra. Debe ser un proceso sencillo, es decir, llevarlo a cabo en materiales fáciles de extraer, además de realizarlo en zonas muy próximas a la construcción. Puede realizarse de manera manual, con pico o pala, tal como se hacía en la antigüedad, o recurrir a maquinarias tal y como se hace en la actualidad.
- Cribaje para una selección textural del material, especialmente cuando presente partículas muy gruesas.
- Pulverización y amasado, para lograr la humedad óptima de compactación y la homogeneidad de la masa. Consiste en mezclar bien la tierra después de ser extraída del suelo. Esta operación debe realizarse si a la tierra se le va a añadir un estabilizante, arena o arcilla.
- Transporte de la tierra al encofrado. Esta operación puede influir en la calidad final de la tierra. Al igual que en el transporte y puesta en obra del hormigón, deben evitarse aquellas operaciones que puedan ocasionar la disgregación de la masa (HOUBEN, 1989).

Durante el siglo XIX, los ingenieros militares y particularmente los responsables de las fortificaciones de las construcciones coloniales siguieron empleando la tierra y reflexionando sobre sus cualidades. En muchos países, principalmente en Europa, después de la segunda Guerra Mundial, las técnicas de construcción en tierra se abandonaron, desapareciendo en gran parte los conocimientos que se fueron transmitiendo oralmente a lo largo del tiempo.

Parámetros que caracterizan la tierra como material de construcción

Es evidente que el conocimiento de las distintas propiedades que presentan los materiales de construcción, en general, resulta de indudable interés para las diferentes aplicaciones de los mismos. Los materiales geológicos, así como las construcciones de tierra construidas por el hombre, están constituidos por materiales no saturados, existiendo incluso zonas donde las condiciones de saturación no son ni siquiera previsibles.

Estos suelos están sujetos a cambios de humedad de origen natural o artificial, que causan importantes modificaciones en su capacidad portante (resistencia y deformabilidad). Por ello es importante conocer el comportamiento geotécnico de los suelos naturales no saturados a fin de poder predecir, prevenir o minimizar las desestabilizaciones que puede experimentar este material. Entender el comportamiento mecánico e hídrico de estos suelos es de gran importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de este tipo de construcciones.

La investigación de estos aspectos debe ser realizada a través de los siguientes procedimientos:

- Observación directa del comportamiento del suelo o construcciones mediante instrumentación y ensayos de campo, determinándose los parámetros más significativos.
- Realización de ensayos en laboratorio, reproduciendo los fenómenos naturales y analizando la influencia de determinados parámetros del suelo en su comportamiento de cara a la construcción.
- Elaboración de modelos generales de comportamiento que permitan predecir la respuesta del suelo a las sollicitaciones a las que se vea sometido.

Entre las propiedades de los suelos se encuentran: el color, la distribución del tamaño de las partículas, la mineralogía, la consistencia, la textura y estructura, la porosidad, la humedad, la densidad, el contenido en materia orgánica, la capacidad de intercambio iónico, las sales solubles, los óxidos amorfos-silice, alúmina y óxidos de hierro libres. Estas propiedades dependen a su vez de la composición química y de la estructura cristalina.

Entre las propiedades de los suelos podemos destacar:

Granulometría

Refleja el contenido en fracción de granos de diferentes medidas, permitiendo conocer las fracciones de grano grueso y fino. La diferenciación de las distintas partículas por tamaño difiere de unas normas a otras (tabla 1).

A partir de la curva granulométrica se pueden definir los coeficientes de curvatura y uniformidad. Hazen denominó

diámetro eficaz (D_{10}) al correspondiente al 10% de la curva granulométrica, concediéndole un papel importante sobre la permeabilidad de suelo. Definió también C_u como la razón del diámetro correspondiente al 60% (D_{60}) y al diámetro eficaz (JIMÉNEZ SALAS y JUSTO ALPAÑES, 1975).

El coeficiente de uniformidad es una medida de la dispersión, así de manera general puede decirse que un valor de C_u 2 corresponde a un suelo muy homogéneo (arena de playa) y un C_u 10 corresponde a un suelo de granulometría muy extendida.

En las clasificaciones basadas en las características granulométricas es habitual distinguir las distintas fracciones por el nombre de algunos tipos de suelos. No obstante, las distintas clasificaciones no coinciden en la especificación de los límites adecuados.

Los estudios que se han venido realizando sobre este tema no delimitan ningún tipo de tierra para la fabricación del tapial. Houben y Doat (1982) proponen la granulometría ideal que viene indicada en la figura 13.

Con relación a esto, Bazzano (1980) señala que la textura de las construcciones de tierra musulmanas muestra al menos 5% de finos (limos y arcillas) y un 40% de partículas mayores a 0,5 mm, cuya distribución granulométrica se indica en la tabla 2.

Para partículas menores de 0,08 mm, el tanto por ciento de arcilla recomendada está en el rango de 15-18%, y si los finos considerados ascienden a 0,05 mm, la proporción se eleva al 21-24%, y de limos al 20-23%. Sin embargo, este porcentaje está lejos del establecido en la parábola continua de Fuller cuya relación arcilla/limo es 1:1.

La tierra empleada como material de construcción debe contener una porción de arcilla para garantizar la cohesión de la fábrica y la arena suficiente para dar esqueleto interno al muro. El aconsejar porcentajes bajos de fracción arcilla está condicionado con la susceptibilidad al agua que presentan estos componentes mineralógicos, la cual puede originar importantes desórdenes en la estructura por hinchamiento y/o retracción.

Consistencia

Se establece a través de los límites de Atterberg. El índice de plasticidad se determina a partir de partículas

menores de 0,4 mm. El límite líquido refleja la cantidad de agua (en tanto por ciento) correspondiente al límite de transición entre el estado de consistencia fluido y plástico. Entre el estado plástico y estado sólido se establece el límite plástico.

En el límite líquido, el suelo comienza a manifestar una cierta resistencia al cizallamiento, y en el límite plástico la tierra deja de ser moldeable. La diferencia entre ambos parámetros se conoce como índice de plasticidad (IP). Los parámetros que más afectan a la plasticidad son la textura y la naturaleza mineralógica de las arcillas que influyen directamente, a su vez, sobre el grado de cohesión de la tierra (figura 14).

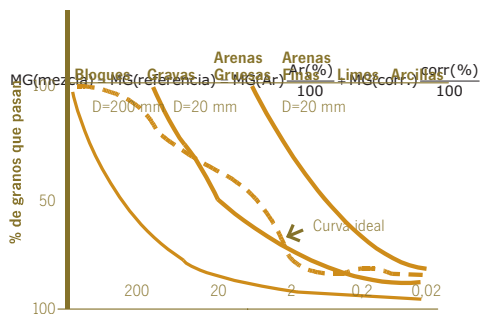
Un IP mayor 1/4 LL representa la cantidad de agua necesaria para vencer la cohesión existente, que depende también de la mineralogía. A igualdad de otros factores, cuanto mayor es el índice de plasticidad de un suelo, menor es su permeabilidad (HOUBEN y GUILLAUD, 1989).

Con los datos del límite líquido e índice de plasticidad de un suelo, es posible, en muchos casos, formar un juicio sobre el tipo al que pertenece su fracción fina. Para ello, el procedimiento más sencillo es hacer uso del ábaco de Casagrande representado en la figura 15.

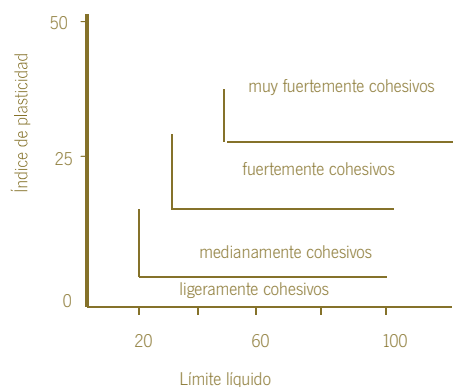
La línea A es un límite establecido empíricamente que separa las arcillas (CL e CH) de los limos (ML y MH). En la zona delimitada con un índice de plasticidad de entre 4 y 7 se superponen los suelos arcillosos y limosos, por lo que se emplea una doble nomenclatura CL-ML. El coeficiente de actividad de las arcillas se define como la relación entre el índice de plasticidad y su relación con el % de fracción menor de 2 μ m. Los límites de Atterberg están también en relación con otros parámetros como son la densidad máxima seca, contenido en agua óptimo, retracción lineal y resistencia a la compresión.

En la construcción en tierra conviene utilizar suelos con un bajo índice de plasticidad ya que cuanto más alto sea, mayor será la retracción por secado (deben evitarse aquellos suelos finos muy plásticos). En la tabla 3 se exponen las propiedades de plasticidad que presentan los distintos tipos de arcilla.

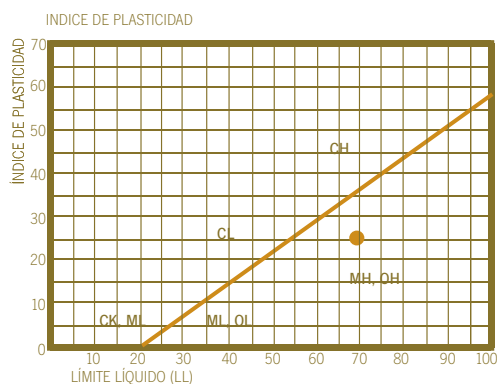
El grupo CRATerre ha establecido tres tipos de plasticidad: plasticidad débil, con un índice de plasticidad entre 5-10; plasticidad media, con un índice de plasticidad



13. Granulometría ideal según Doat y Houben (1982)



14. Distintos estados de cohesión de la tierra



15. Ábaco de Casagrande

C: arcilla
M: limos
O: materia orgánica
HC: arcillas de alta plasticidad
MH, O limos de alta compresibilidad
CL: arcillas de baja plasticidad
ML, O: limos de baja compresibilidad

entre 10-20; plasticidad fuerte, con un índice de plasticidad mayor de 20.

Compresibilidad

Se refiere a la actitud de la tierra a ser densificada artificialmente, para una determinada humedad y energía de compactación. Las variables principales que afectan a la compresibilidad de la tierra son la textura, el estado hídrico y la energía de compactación. A igualdad de otros factores, variando la humedad, obtenemos una curva que indica la densidad máxima para un contenido de humedad óptima (TEO).

Si empleamos energías de compactación cada vez mayores, conseguimos curvas más densas; con humedades óptimas menores y con valores en agua superior al TEO, se obtienen compactaciones menores. Para una textura uniforme, la porosidad es más elevada, se reduce el contenido en agua. Cuando la tierra posee una mayor proporción en partículas menores a 0,08 mm, se acentúa las variaciones de densidad según el contenido en agua. De esto se deduce, por una parte, que la masa volumétrica seca y el TEO están influenciados por la energía de compactación y por la textura de la tierra.

Densidad

Es el parámetro que en último término permite definir la "calidad" del elemento constructivo ejecutado, pues está en relación directa con la resistencia mecánica. Por este motivo, y al objeto de lograr un elemento durable, es decir, evitar su rápida degradación, es imprescindible cuidar rigurosamente todos aquellos aspectos que permiten lograr una adecuada densificación del material (granulometría, adición de agua y energía de compactación).

Sobre la base de lo anteriormente indicado, las propiedades de la tierra se conocen bien, y actualmente tenemos técnicas para identificar y cuantificar su comportamiento. El problema no radica en la determinación de las propiedades, sino en establecer, en cada una de ellas, los límites en valores absolutos para la idoneidad del material.

Estabilización de la tierra

Agrupamos aquí el conjunto de procedimientos que permiten mejorar las características de este material y

Tabla 1. Tamaño de las partículas según las distintas normas

TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS	D.I.N (4022)	M.I.T Y NORMAS BRITÁNICAS	ASTM
Arcillas	$\phi < 2 \mu\text{m}$	$\phi < 2 \mu\text{m}$	$\phi < 2 \mu\text{m}$
Limos	$\phi 2 \mu\text{m}-0,05 \text{ mm}$	$\phi 2 \mu\text{m}-0,06 \text{ mm}$	$\phi 2 \mu\text{m}-0,05 \text{ mm}$
Arenas	$\phi 0,05 \text{ mm}-2 \text{ mm}$	$\phi 0,06 \text{ mm}-2 \text{ mm}$	$\phi 0,05 \text{ mm}-2 \text{ mm}$
Gravas	$\phi 2 \text{ mm}-60 \text{ mm}$	$\phi > 2 \text{ mm}$	$\phi > 2 \text{ mm}$

Tabla 2

ABERTURA DEL TAMIZ (MM)	RETENIDO (%)
Nº 220	1,01
Nº 200	2,08
Nº 100	3,01
Nº 60	4,7
Nº 30	3,85
Nº 10	2,54
Nº 2	39,77
Nº 0,5	42,24

Tabla 3. Propiedades de plasticidad que presentan los distintos tipos de arcilla

TIPO DE ARCILLA	LP (%)	LL (%)	IP (%)	ARCILLA (%)	IP% ARCILLAS (%)
Caolinita	14,37	32,93	18,57	0,5	0,37
Clorita	15,66	16,73	1,07	0,5	0,02
Ilita	20,0	28,61	8,61	0,5	0,17
Haloisita	29,37	34,52	5,15	0,5	0,10
Montmorillonita	24,7	70,6	45,84	0,5	0,92

hacerlo útil desde el punto de vista constructivo. La compactación de tierra es un proceso extremadamente antiguo, aunque su estudio sistemático no se inició hasta los comienzos del siglo pasado. La utilización de estabilizantes es una práctica muy antigua; el hombre ha estudiado sus propiedades, en función de las características que eran capaces de transmitir a la tierra. Su empleo surge porque la experiencia muestra que la tierra “adecuada” es difícil de encontrar, porque las condiciones ambientales reducen ampliamente el período de construcción y por la necesidad de aumentar la durabilidad del elemento constructivo.

La estabilización de un suelo tiene como finalidad mejorar los puntos débiles de la tierra (mejorar la resistencia a la lluvia, al agua estancada, a la compresión, a la fle-

xión, a la tracción, a la abrasión y a la acción eólica). Puede ser de dos tipos: de naturaleza mecánica, y de tipo físico-químico. El control de la granulometría, porcentaje de finos y de la estabilización de las arcillas (motmorillonitas, bentonitas, haloisitas y las ilitas en menor proporción) resulta de gran interés.

La resistencia de un suelo viene dada también por las fuerzas de cohesión y rozamiento. La cohesión es la fuerza de atracción entre las partículas y el rozamiento se debe a la fricción entre ellas. El rozamiento, a diferencia de la cohesión, es independiente de la presión vertical que se ejerza sobre el suelo.

Para la estabilización mecánica, la tierra se puede someter a los siguientes procesos:

Densificación

Supone un aumento de la compacidad por reducción del volumen de huecos. El término compactación se emplea para designar el incremento artificial de densidad por medios mecánicos. Si amasamos una porción de suelo con una determinada cantidad de agua y lo compactamos en un molde estandarizado con una serie de golpes normalizados, éste adquirirá una densidad seca γ para una humedad de compactación h_1 :

$$\gamma = \frac{P_s}{V_t}$$

Donde P_s representa el peso del suelo seco y V_t es el volumen total que ocupa.

Si añadimos más agua, llegamos a una humedad h_2 , y nos dará, con la misma energía de compactación, una densidad γ_2 , mayor a la primera. Si seguimos repitiendo el proceso, iremos obteniendo γ crecientes hasta un valor de h_n a partir del cual la densidad seca final, para la misma compactación, empieza a disminuir. La densidad en ese momento es máxima y la humedad es la óptima para el grado de compactación fijado. En este sentido, los suelos con poca humedad presentan gran resistencia a deformarse, son más ásperos. El agua, en este proceso, actúa de lubricante y favorece la compactación; pero si pasamos el límite que podríamos llamar “lubricante”, el agua empieza a sobrar separando las partículas del suelo, aumentando el volumen y disminuyendo la densidad.

La sistematización del proceso de apisonado se basa en el *ensayo Proctor* que permite determinar la humedad óptima y densidad máxima de un suelo, cuando se compacta en un molde mediante impactos de una maza.

El proceso de compactación depende de la textura de la tierra (distribución granulométrica) así con una granulometría muy extendida puede lograrse curvas de compactación con valores de densidad más elevados.

La densificación de la tierra supone multiplicar los contactos entre los granos. Para granos esféricos, es posible calcular la proporción relativa de cada fracción de granos de diámetro diferente organizado en un medio lo más denso posible. Para ello puede emplearse la fórmula de Fuller, entre otras.

$$P = 100 \left[\frac{d}{D} \right]^{\frac{1}{n}}$$

Donde P es el % de granos de un tamaño dado, d es el tamaño de grano para % P dado, n es el coeficiente de gradación y D es el tamaño máximo.

El valor de n para granos esféricos es 0,5, mientras que en construcción en tierra n toma un valor comprendido entre 0,20 a 0,25 (HOUBEN y GUILLAUD, 1989).

Para modificar la textura de una tierra demasiado rica en grava, es suficiente con tamizarla eliminando la fracción demasiado gruesa. La tierra muy rica en finos puede mejorarse eliminándolos parcialmente por lavado. Una tierra con textura discontinua presenta una curva granulométrica muy característica. La curva describe una ascensión muy clara para una fracción de grano determinado (la más abundante). En este caso, será necesario tamizar o equilibrar el exceso añadiendo granos de otras fracciones, es decir, corregir la granulometría.

La corrección se realiza normalmente utilizando el módulo granulométrico como parámetro de cálculo “obligado”, de tal manera que el módulo de la mezcla (suelo por corregir + la fracción correctiva) sea el mismo que el de la granulometría elegida como referencia, es decir,

$$MG_{mezcla} = MG_{ref} = MG(Ar) \frac{Ar(\%)}{100} + MG(corr) \frac{corr(\%)}{100}$$

Donde MG (referencia) es el módulo granulométrico de la granulometría de referencia, $MG(Ar)$ representa el módulo del suelo que se pretende corregir, $MG(corr.)$ sería el módulo de la fracción correctora, y $Ar(\%)$ y $Corr(\%)$ son las proporciones representativas de ambas fracciones.

La otra ecuación complementaria es:

$$100 = Ar(\%) + corr(\%)$$

En este proceso tienen un papel importante las fuerzas de repulsión o atracción de las arcillas, que a su vez van a depender del contenido en agua del suelo (en estado floculado las láminas estarían desorientadas, impidiendo así el máximo grado de compactación).

En la estabilización mecánica es preferible favorecer las condiciones óptimas de compactación, más que recurrir al empleo de un ligante para la estabilización. De ahí la importancia que supone conseguir las condiciones óptimas de compactación del suelo (COPE, 1998).

Estudios llevados a cabo por Accetta (1984) indican que el índice de huecos, para un contenido en agua, varía linealmente con el logaritmo de la energía, no existiendo una relación directa entre la densidad máxima Proctor y la resistencia.

Armado

El suelo se puede estabilizar también por refuerzo para hacerlo más resistente a la tracción. Es algo que se viene haciendo desde antiguo. No se consideran suelos reforzados aquéllos mejorados por adiciones o tratamientos, pues en estos casos no se pueden separar los aspectos mecánicos de la matriz y de la adición (cemento, cal, etc.).

Consiste en agregar a la tierra un material que funciona como un esqueleto interno, generalmente fibras de naturaleza diversa (vegetales, animales, sintéticas, etc.) que le dan cohesión. El inconveniente secundario de la utilización de materias vegetales reside en el riesgo de pudrimiento (BARDOU, 1972).

Enlazar

Introduciendo en la tierra un ligante insoluble que rellene los vacíos.

Unir

Consiste en mejorar las propiedades de la tierra añadiendo diversas sustancias capaces de formar compuestos estables con elementos de la arcilla. Los productos químicos utilizados varían según la composición de la tierra, y es necesario un análisis previo para determinar qué elemento puede reaccionar químicamente con otro. Así, la estabilización con cal se revela como una estabilización por tratamiento químico más que por cementación; la cal puede reaccionar con los silicatos y aluminatos para formar compuestos puzolánicos estables, disminuyendo la plasticidad de la tierra (BARDOU, 1981).

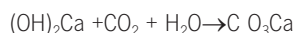
Históricamente la tierra se ha estabilizado mediante la adición de cal. Este procedimiento lleva consigo cinco mecanismos base, según Houben y Guillaud (1989):

- Absorción de agua. En presencia de tierra húmeda, la cal viva sufre una reacción de hidratación que acompaña un importante desprendimiento de calor (300 Kcal/kg cal).

- Cambio catiónico. Cuando se añade a la cal tierra humificada, ésta se satura de iones calcio. Aparece entonces un fenómeno de cambio de cationes, los iones calcio se sustituyen por Na, K, etc., dependiendo de la calidad de los cationes presentes y su capacidad de cambio.

- Floculación y aglomeración. Debido al cambio de cationes y al aumento de la cantidad de electrolitos en el agua intersticial, las partículas de tierra floculan y se aglomeran, y hay un aumento de los agregados de tamaño fino. Esto es debido al fenómeno de cambio de bases. Los iones de cal son absorbidos, hasta un cierto límite, por la estructura de las arcillas. El exceso de cal que puede quedar retenido en el suelo después de pasar el punto de fijación no queda en forma iónica (en este fenómeno físico-químico, la cal se disocia Ca^{++} y OH^-); los iones hidróxido crean un alto pH que favorece la sustitución de iones calcio por otros existentes en el medio), sino molecular y actúa sobre todo en el proceso de cementación o endurecimiento, reaccionando químicamente con la sílice y alúmina libre del suelo, formando silicatos y aluminatos de calcio, de forma análoga a los formados en el fraguado del cemento. Esta reacción es más lenta y puede durar un año o más.

- Carbonatación. La cal añadida a la tierra reacciona con el CO_2 del aire, aumentando la dureza superficial y en general la resistencia mecánica:



Sin embargo, este efecto puede verse contrarrestado en cierta medida si el suelo presenta capacidad para dar lugar a reacciones puzolánicas con la portlandita (OH_2Ca).

En el proceso de endurecimiento influyen dos factores fundamentalmente. Por un lado, la temperatura de curado, que tiene gran influencia en las mezclas suelo-cal. Para buenas resistencias se recomienda que la construcción se haga a principios de verano para que el curado goce de alta temperatura. No obstante, la cementación de las partículas de un suelo por la cal tiene tam-

bién lugar a temperaturas por debajo de los 0 °C. En segundo lugar, la naturaleza de la cal. Las dolomíticas producen, por lo general, mayores resistencias que las calcíticas para bajas temperaturas de curado.

- * Reacciones puzolánicas. La cal debe ser añadida a la tierra en cantidades suficientes, con el fin de producir y mantener el pH elevado necesario en la disolución de los minerales de la arcilla, y por un período tal que permita una reacción de estabilización efectiva.

Los suelos más apropiados para estabilizar con cal son los de granulometría fina, de plasticidad apreciable. La adición de la cal en el suelo incide apreciablemente en la plasticidad de éste; en suelos de baja plasticidad (IP <15) se producen aumentos tanto del límite líquido como del límite plástico y también y ligeramente su índice de plasticidad. En cambio, en suelos de plasticidad media y elevada (IP >15,) su adición produce disminuciones del IP. También aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite densificar suelos de elevada humedad natural.

La adición de cal produce reducciones de la densidad máxima Proctor; por el contrario, su resistencia a esfuerzo cortante es muy superior y aumenta, hasta cierto punto, con el porcentaje de cal añadida, el tiempo transcurrido, la temperatura de curado y la disgregación conseguida en el suelo durante la ejecución. Con la adición de cal el suelo se vuelve más friable y granular. El aumento del límite plástico y de la humedad óptima de compactación permite su puesta en obra con mayor facilidad (KRAEMER y DEL VAL, 1990).

Impermeabilizar

Proteger el muro de tapial supone aislarlo de los agentes de deterioro que le pueden afectar. De forma que el problema del agua se puede resolver con la aplicación de estabilizantes impermeables, el diseño de un drenaje adecuado, el control del agua que se adiciona al muro para el amasado, y evitando la influencia del agua de lluvia, capilaridad, condensación y salpicaduras.

El tapial también se puede proteger con refuerzos aplicados a puntos débiles de la estructura como pueden ser esquinas, paramentos y cubiertas.

Consiste en rellenar poros, fisuras y microfisuras de un material. Las partículas de arcilla quedan envueltas por

una capa impermeable que las hace insensibles a la acción de la humedad.

Los ligantes bituminosos son los más conocidos. Su utilización se remonta a varios milenios a.C., pero también se han empleado aceite de coco, la sabia de ciertas plantas de caucho, el pudrimiento de plantas de sabia oleaginosa o látex, las hojas de plátano tropical, los aceites vegetales, etc.

Hidrofugar

Consiste en actuar sobre el movimiento del agua y vapor por el interior de la masa de tierra, cambiando la naturaleza del agua o reduciendo la sensibilidad de las capas de arcilla.

Objetivos y campo de aplicación

Las construcciones de tierra aparecen directamente relacionadas, en la mayoría de los casos, con la arquitectura vernácula (BRINDAN COMPTON, 1990) y popular, siendo ésta la primera referencia importante que nos muestra la tierra como material de edificación.

Andalucía es una región con una importante trayectoria arquitectónica en tierra, cuya tradición se remonta al período prerromano; prueba de ello es el elevado número de restos arqueológicos existentes en nuestra comunidad autónoma así como la gran cantidad de construcciones que aún quedan en pie. Este patrimonio aparece representado con una gran variedad de técnicas constructivas adaptadas a los distintos lugares y épocas.

Los estudios de investigación dirigidos a la conservación del patrimonio arquitectónico de tierra han sufrido un impulso en la actualidad, como consecuencia del alarmante estado de deterioro que hoy sufre la mayor parte de estas construcciones.

En este sentido, en la actualidad se ha observado un resurgimiento en conservar esta técnica constructiva, que actualmente queda como una actividad restringida a zonas muy escasas de nuestro planeta, a lo que instituciones de prestigio como ICCROM, CRATerre o la Getty Conservation Institute han contribuido notablemente.

En noviembre de 1997, sobre las bases de la experiencia de un curso sobre la conservación y gestión del patrimonio arquitectónico histórico-arqueológico en tierra, que tuvo lugar en Trujillo (Perú), en colaboración con el

Instituto Nacional de cultura de Perú, el Centro Internacional de construcción en tierra, Craterre-EAG, la Getty Conservation Institute y el ICCROM, se crea un programa marco de cooperación internacional para el estudio de la conservación de la arquitectura en tierra en el dominio de la investigación, formación, planificación, experimentación y de difusión. Los objetivos de este proyecto se concretan en los siguientes aspectos:

- Determinar el estado actual de conocimientos sobre la conservación del patrimonio arquitectónico en tierra.
- Establecer una dinámica y una cohesión en el dominio de la investigación sobre esta arquitectura y su conservación.
- Caracterizar las propiedades del material y determinar las causas de su degradación al nivel “micro” y “macro”.
- Apoyar los procesos de investigación que permitan establecer protocolos, métodos analíticos, etc.
- Desarrollar y evaluar los procedimientos de intervención a través de ensayos de laboratorio y en el edificio o terreno.
- Fomentar la adopción de procedimientos válidos.

Este proyecto presenta las siguientes iniciativas en curso:

- Información sobre las investigaciones con el fin de identificar las iniciativas en este campo, las organizaciones, las investigaciones individuales que han proyectado tales conocimientos, así como las necesidades complementarias de investigación.
- Investigación bibliográfica. “Estructuración de la ciencia”. Constituir un cuadro de referencia para la clasificación de información, sujetos, disciplinas, metodologías, etc. relativo a la conservación del patrimonio arquitectónico en tierra y elaborar una relación sobre el estado de conocimientos con el fin de identificar y comunicar las prioridades de la investigación.
- Investigación en el laboratorio sobre la caracterización de los materiales.

En este sentido, este capítulo tiene como objetivos aportar una herramienta, metodología de trabajo básica, orientada hacia la investigación sobre estos materiales muy abundantes en construcciones históricas de nues-

tra comunidad autónoma. Esto permitirá esclarecer algunos aspectos sobre la conservación de este patrimonio con la definición de instrumentos y métodos tecnológicos apropiados, actuaciones e investigación.

Definición de las condiciones que tienen que cumplir los estudios previos aplicados al tapial

Antecedentes

Como punto de partida, podemos destacar entre los libros y manuscritos más antiguos que hacen alusión a este tipo de construcciones el *Manual de albañilería de Villanueva*. En 1772, Goiffon publica en Francia *L'Art du maçon Piseur*, que puede considerarse como el primer tratado sobre la arquitectura en tierra. Posteriormente, entre 1777 y 1823, François Contreaux publica numerosos escritos sobre este tema. En el siglo XIX, básicamente en Francia, se publican algunos textos técnicos.

Recientemente se pone de manifiesto un renacimiento y un interés por esta arquitectura. Es destacable la fundación de un departamento de construcciones en tierra creado por el ICCROM y organismos de prestigio internacional, como el Centro Pompidou de Francia o The Getty Conservation Institute en California, que han publicado numerosos estudios y organizan congresos internacionales, que actúan como punto de encuentro de especialistas en la materia.

La primera Conferencia Internacional sobre la Conservación de la Arquitectura en Tierra se llevó a cabo en Yard (Irán) en 1972, y contribuyó en gran medida a apreciar la tierra como material de construcción. En conferencias posteriores, como por ejemplo Roma (1978), se intentó promover una cooperación entre las instituciones involucradas en proyectos de investigación, recomendando las directrices claras para la preservación de este tipo de construcciones. En otras, por ejemplo la celebrada en Portugal (1993), se pretendió divulgar los conocimientos relativos a las técnicas de conservación y el empleo de este material de construcción.

Tratados más recientes intentan ordenar y clasificar la documentación existente, entre los que podemos destacar la recopilación bibliográfica llevada a cabo por ICO-MOS, *Earth architecture* (2004), con una colección de más de 400 publicaciones, o la realizada por el Getty Conservation Institute, *The JGCI Project Bibliographies Series Terra*, con más de 700 publicaciones, o el grupo CRAterre (Centro Internacional para la construcción de Tierra, organización científica asociada a la Escuela de

Arquitectura de Grenoble, EAG) al que debemos muchas contribuciones en esta material.

En España, la creación de un Centro de Arquitectura Tradicional (CIAT) en Boceguillas (Segovia) ha contribuido a impulsar el desarrollo de la investigación del uso de la tierra como material de construcción en nuestro país. Las publicaciones en esta materia son escasas. Cabe destacar las elaboradas por el Instituto Eduardo Torroja, las experiencias realizadas por Erhard Romher en Navapalos (Soria) y la actividad investigadora que en estos últimos años se ha llevado a cabo en diferentes universidades ligada a proyectos y/o tesis doctorales.

A pesar de la extensa bibliografía existente, los estudios científicos, normas y ensayos expuestos tienen poco rigor en comparación con el resto de los materiales de construcción tradicional (piedra, ladrillo o mortero). Los parámetros que denotan esta falta de métodos científico-técnicos adecuados son (BARBETA, 2002) la inexistencia de un método adecuado identificativo de los tipos de tierra y su aplicación en construcciones arquitectónicas, la insuficiencia en el conocimiento de ensayos para la mejora de la estabilización de este material de cara a su aplicación en construcción (proctor, ensayo granulométrico y su contradicción con las curvas de plasticidad), la falta de correspondencia entre los estudios de laboratorio y estabilizaciones adoptadas, la ausencia de un método integral y consensuado para la obtención de los componentes químicos de la tierra, la inexistencia de estudios integrales de durabilidad, la falta de un sistema de estabilización consecuente con la química de las arcillas, así como de correspondencia entre la analítica tecnológica del proceso de puesta en obra y los parámetros arquitectónicos del proyecto.

Como punto de partida para el estudio de este material, podemos destacar la clasificación de suelos utilizada hasta el momento basada en criterios ingenieriles, considerando como parámetros identificativos:

- La granulometría. Uno de los métodos empleados es el triángulo de Feret, que sólo considera suelos arcillosos, limosos y arenosos, omitiendo su forma, la mineralogía

de las arcillas y los limos, y las propiedades que de ellas se derivan, como plasticidad, densidad e índice de poros, aspectos fundamentales para definir la tierra como material de construcción (estabilidad y compactación).

- La clasificación de Casagrande incorpora las variables de plasticidad como un avance para poder relacionar la clasificación de los suelos con el índice de plasticidad (IP) y limite líquido (W_L).

- La clasificación más reciente ASTM D-2487 relaciona el índice de plasticidad IP y LL. Establece dos grandes grupos basados en LL: LL > 50 y LL< 50. Sin embargo, la clasificación es insuficiente para conocer el comportamiento químico que se puede obtener en el proceso de compactación y endurecimiento de la tierra estabilizada ya que no hace referencia al tipo de arcilla.

- La norma UNE 24013/53 clasifica el suelo por su resistencia mecánica, norma no aplicable a las construcciones de tierra.

- Las clasificaciones edafológicas, aunque tienen en cuenta parámetros químicos, no responden a los parámetros necesarios para la construcción.

El estudio de materiales históricos requiere un método propio de toma de muestras, ya que éstas son de poco tamaño y gran valor arqueológico. En este sentido, no existe ninguna norma específica. Se podría tomar de referencia, por ejemplo, la norma NLT101/72 (para la determinación de los límites de Atterberg), que requiere cribar la muestra hasta tamaño 0,42 mm y, si existen terrones, se deben desmenuzar. Este tratamiento puede generar finos artificiales que pueden modificar erróneamente el límite líquido, lo que llevaría consigo una contradicción entre el ensayo granulométrico y la gráfica de plasticidad.

En base a esto habría que tener en cuenta los siguientes aspectos, según Barbeta (2002):

- Considerar la fracción granulométrica < 2 μ como responsable de la plasticidad y, en menor medida, la fracción comprendida entre 5-70 μ.

- La plasticidad de la tierra de cara a la construcción tiene que relacionarse con el contenido en finos, en el rango 5-63 μ, el tipo de arcilla, así como con otras partículas micrométricas de cuarzo, feldespatos y carbonatos existentes en esta fracción.

- Contenido en finos (pasan el tamiz nº 10 ASTM, 2 mm).

Actualmente no existe ninguna clasificación de suelos que integre estos tres parámetros de utilidad para la identificación del material en este tipo de construcciones.

Otros parámetros básicos de interés son la densidad y el grado de absorción de agua, directamente relacionados con la compactación y su durabilidad. A su vez, la compactación está directamente relacionada con el índice de poros, índice de plasticidad y grado de formación de las estructuras químicas neoformadas.

El coeficiente de actividad de las arcillas resulta también un parámetro de interés, ya que nos informa sobre el aumento de volumen y retracción que experimenta el material con respecto al índice de plasticidad y el porcentaje de arcilla. El grupo CRATerre estableció una clasificación del suelo en función de este parámetro (tabla 4).

En la capacidad de cambio iónico inciden de forma importante la cantidad de calcio que tenga la arcilla (composición química, tamaño y estructura) y el contenido en materia orgánica. En este sentido, la ilita, caolinita y el talco presentan menor capacidad de cambio catiónico que la motnmorillonita, saponita o haloisita.

Por otra parte, las construcciones de tierra actualmente carecen de estudios integrales de durabilidad. Cabe destacar las propuestas de Barbeta (2002):

Tabla 4. Actividad del suelo

COEFICIENTE DE ACTIVIDAD	TIPO DE SUELO
> 0,75	Inactivo
0,75-1,25	Actividad media
1,25-2,0	Activo
< 2,0	Muy activo

* Retracción. Hasta ahora se ha aplicado la metodología utilizada para el adobe. También existen otras normas UNE 103108/96 y ASTM 427/93.

* Pérdida por hielo-deshielo. El proceso de desmoronamiento depende de la mineralogía, de las arcillas, de su finura y del tanto por ciento de la fracción limo y arena. Según Houben, está en función del límite líquido y del tanto por ciento de finos < 0,4 mm para un mismo índice de poros y es independiente de su resistencia mecánica.

* Ataque con sales, sulfatos y materia orgánica. Según las investigaciones llevadas a cabo por el grupo CRAterre los porcentajes máximos admisibles de estas sustancias en el material están:

< 1%, materia orgánica, un 2% entraña riesgo

2-3% de sulfatos

< 5% en óxidos e hidróxidos

No establece ningún valor para el contenido en arcilla ni estabilizante.

En relación con la materia orgánica, los trabajos edafológicos afirman que no se puede generalizar el hecho de que la adición de materia orgánica sea siempre perjudicial para la tierra, por ejemplo la adición de paja.

Metodología

Teniendo estos aspectos en cuenta, se hace necesaria una clasificación integral que relacione la mecánica del suelo y la físico-química de las arcillas, indispensable para el estudio de este tipo de material.

El establecimiento de una metodología adecuada requiere la aplicación de una fase de campo y otra de laboratorio, como se ha definido para el resto de los materiales históricos, que permitirá la caracterización del material desde el punto de vista constructivo y la identificación de los procesos de degradación que le están afectando, lo que supone un punto de partida importante en todo lo concerniente a la conservación y restauración de esta arquitectura monumental.

Fase de campo

La fase de campo requiere la inspección visual, muy importante para el establecimiento de la metodología y posterior toma de muestras.

Inspección visual

La identificación organoléptica de la fábrica del tapial consiste básicamente en la observación *in situ* del muro, establecimiento de sus características constructivas y posterior correlación con el tipo de suelo del entorno más próximo. En este sentido el examen visual resulta importante, ya que su observación permite apreciar los siguientes aspectos en el material: color, granulometría, contenido en arcilla, etc.; los aglomerantes y aditivos utilizados (cal, yeso, materia orgánica, etc.); tecnología constructiva empleada; alteración y degradación superficial; alterabilidad y degradación probable del muro tanto al aire libre como en ambiente protegido; existencia de organismos o de materias extrañas en la superficie.

De igual manera, se hace necesario llevar a cabo un estudio geológico de la zona donde está emplazado el tapial, que ayude a localizar la cantera de extracción del material, de gran importancia para la investigación experimental en laboratorio. Generalmente, la materia prima para la elaboración de estas construcciones suele localizarse en puntos próximos a la construcción de acuerdo con el principio básico de este tipo de edificaciones “coste mínimo en cuanto a su obtención”.

Toma de muestras

El muestreo consiste en pequeñas extracciones del material del edificio. Tiene como finalidad la evaluación de ciertos parámetros sobre el material que permita obtener la máxima información con el menor coste y la mínima perturbación del elemento construido.

Por regla general el destino de las muestras tiene una influencia decisiva en la técnica de muestreo, donde hay que tener en cuenta el tipo de material y el problema que se quiere resolver, o el tipo de parámetro que se quiere determinar, ya que esto va incidir en la cantidad de muestra que es necesario extraer.

La toma de muestras debe seguir el procedimiento indicado en anteriores capítulos. La recopilación de documentación historiográfica del monumento resulta fundamental para emplazar cronológicamente las distintas fases constructivas y para la identificación paramental (datos arqueológicos).

En muchos casos estas construcciones presentan unos revestimientos exteriores que actúan como elemento pro-

tector (son morteros y/u “hormigones” de cal). En este sentido resulta importante tomar muestras a distinta profundidad (de interior de muro, muestras de revestimiento y pátinas) (ONTIVEROS, 1995; ONTIVEROS et al., 1996).

La toma de muestras debe ir precedida de una serie de ensayos *in situ*, que de alguna manera la condicionan y que en otros casos complementan los resultados obtenidos en la fase de laboratorio, como ocurre para otros materiales de construcción. Sin embargo, en este caso, se da una falta de métodos no destructivos que consideren aspectos o parámetros que permitan la identificación a priori de este tipo de material, por lo que se puede recurrir a los mismos métodos definidos para el caso de la piedra, morteros y ladrillos (ver capítulos anteriores).

Fase de laboratorio

Tiene como objetivo la identificación de los parámetros característicos. La metodología de la que partimos está basada en los trabajos expuestos por algunos autores sobre construcciones en tierra (COPE,1984; DOAT et al., 1985; HOUBEN y GUILLAND, 1987; ONTIVEROS, 1995; BARBETA, 2002).

Teniendo en cuenta estos antecedentes, la investigación experimental sobre este tipo de construcciones tiene que

tener en cuenta de manera global la influencia del tipo de arcilla sobre la resistencia y durabilidad de los bloques de tierra compactada y, por otro lado, la influencia del tipo de estabilizante utilizado sobre su resistencia y durabilidad, así como la evaluación de las cantidades más idóneas.

En base a esto se establecen dos áreas de investigación claramente diferenciadas: parámetros a investigar sobre la arcilla y parámetros a investigar sobre el suelo, aspectos que están claramente relacionados (figura 16).

Estos ensayos que se han tomado como referencia vienen recogidos en la normativa que se indica en la tabla 5.

Parámetros a determinar sobre las arcillas

Preparación de las muestras

El paso previo para el estudio de esta fracción del suelo requiere en principio tamizar el suelo a través del tamiz 2 UNE o nº 10 ASTM, hasta conseguir una cantidad mínima de 500 g (si bien generalmente tendremos que partir de una menor cantidad, por las razones indicadas anteriormente). Este material se tritura en un molinillo (ágata o bolas) hasta hacer pasar 100 g por el tamiz 1 UNE o nº 18 ASTM. El material se somete al las siguientes determinaciones:

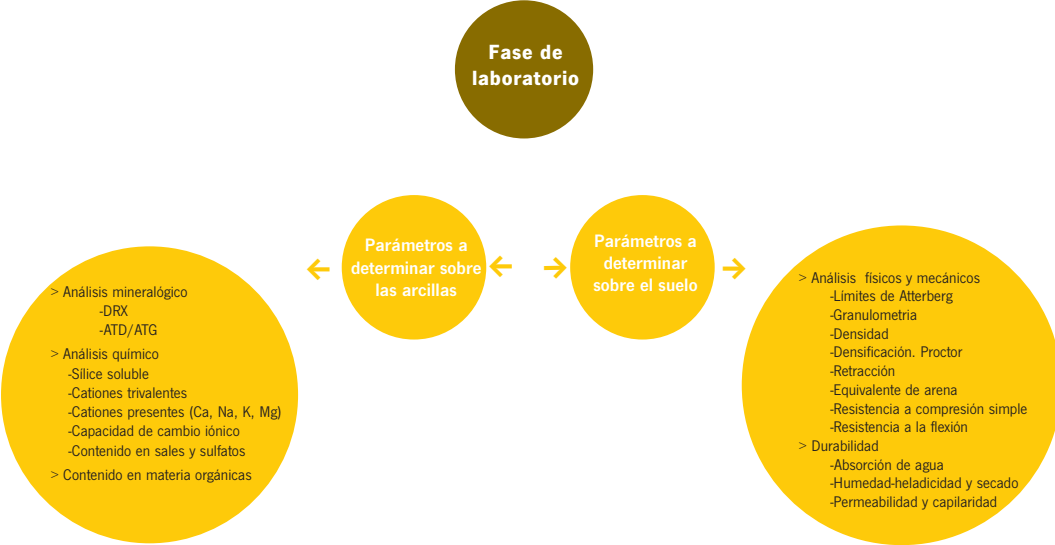


Tabla 5. Normativa relacionada con la tierra como material de construcción

ENSAYOS	NORMAS UNE	OTRAS NORMAS	DETERMINACIONES
Preparación de muestras de ensayo	UNE 103100/95	NLT-101/72	> Preparación de las muestras para ensayo
Ensayos para la caracterización del suelo	UNE 24013/53		> Nomenclatura de los terrenos para excavaciones y materiales de excavación
	UNE 103300/93	NLT- 102/72	> Humedad del suelo mediante secado en estufa
	UNE 103103/94	NLT- 105/91 y NLT- 106/72	> Límite líquido por método de la Cuchara de Casagrande
	UNE 103104/93		> Límite plástico
	UNE 103405/94	NLT-104/91, ASTM C-136	> Granulometría de suelos por tamizado
	UNE 103102/95	ASTM D-422	> Granulometría por sedimentación. Método densímetro
	UNE 103108/96	-	> Determinación de las características de retracción del suelo
	UNE 103109/95	NLT-113/87	> Equivalente de arena de un suelo
	UNE 103302	NLT-211	> Densidad real de las partículas del suelo (picnómetro)
	UNE 103301/94	NLT-206	> Hinchamiento Lambe
			> Densidad del suelo. Método balanza hidrostática
	UNE 7045/52	-	> Porosidad de un terreno
	UNE 103500/94 UNE 103501/94	NLT-107/91 y ASTM D-698 NLT108/91	> Ensayo de compactación. Proctor Normal y modificado
Ensayos de resistencia mecánica	UNE 103400/93	NLT-202	> Compresión simple de una probeta de suelo
	UNE 103401/96	-	> Ensayo de corte directo
Determinaciones químicas	UNE 103201/96 UNE 103201/03 Errátum		> Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos de un suelo
	UNE-103202/95		> Determinación cualitativa del contenido en sulfatos solubles en un suelo
	UNE-103200/93	NLT-116/91	> Contenido en carbonatos por el método del calcímetro de Bernard
	UNE 7368/77	NLT-117/72	> Contenido en materia orgánica por el método del agua oxigenada
	UNE-103204/93	NLT-118/72	> Contenido en materia orgánica, método del permanganato potásico (antes dicromato).
Durabilidad	-	NLT- 302 y ASTM D-559	> Ensayo de humedad-sequedad
	-	NLT- 303 y ASTM D-560	> Ensayo de hielo-deshielo

Tabla 6. Serie de tamices (ASTM)

TAMICES (ASTM)	ABERTURA (mm)
1,25	38,1
3/4	19,1
3/8	9,52
nº 4	4,75
nº 8	2,38
nº 10	2,00

Análisis mineralógico

Difracción de rayos X

El método de polvo cristalino (como se indicó en la página 39) permite determinar la composición mineralógica global de las muestras (fracción grava, arena, limo y, en menor medida, la fracción arcilla). Dada la heterogeneidad textural que presenta este tipo de material, es conveniente analizar mineralógicamente las distintas fracciones por separado (ONTIVEROS, 1995; VALVERDE et al., 1997) para tener valores más fiables.

Las distintas fracciones se trituran con un molinillo de bolas o de ágata hasta obtener un polvo fino ($< 0,08$ mm). Sobre los difractogramas de la muestra total se miden las áreas de las reflexiones más importantes para la identificación mineralógica de las distintas fases.

La identificación de la composición de la fracción limo y arcilla se realiza mediante el método de agregados orientados, tras previa separación, a partir de una suspensión de la misma muestra depositada en un portamuestras de vidrio y secada a temperatura ambiente.

El procedimiento de extracción de la fracción arcilla incluye las siguientes fases:

En primer lugar, la *eliminación de los carbonatos*. Se realiza atacando la muestra con un ácido (ácido clorhídrico 0,2 N o ácido acético), agitando constantemente hasta que la reacción entre el ácido y los carbonatos cese, y posterior eliminación por lavado (RAY et al., 1957; OSTROM, 1961). En una segunda fase de *centrifugación*, y una vez lavada la muestra, ésta se introduce en una batidora eléctrica durante 5 minutos junto con disolución de hexametafósforo sódico, para favorecer la dispersión de las arcillas, y posteriormente se introduce en una ultracentrifugadora.

Mediante la ley de Stokes, puede calcularse la velocidad de caída de los diferentes granos en suspensión. Las partículas mayores de 2μ tardan 8 horas en descender 10 cm en la columna de agua en la que se encuentran en suspensión; por encima de estos 10 cm quedarían las partículas menores de 2μ . La centrifugación requiere condiciones de velocidad angular y tiempo que iguale las condiciones de decantación (1000 r.p.m y 100 s y parada rápida y extracción de los 4 cm superiores de disolución), obteniendo resultados muy similares a los de la decantación en 8 horas.

Para la extracción de la fracción limo, la muestra se vierte en unos vasos de precipitados con agua, se agita durante 5 minutos, se deja en reposo durante 4 minutos y se extraen los 10 primeros centímetros de la suspensión. El procedimiento se realiza hasta que toda la fracción limo ha sido retirada de la muestra.

Los componentes arcillosos, vertidos sobre los portamuestras (con las partículas de arcilla en suspensión), se someten a una serie de tratamientos para la identificación de sus componentes mineralógicos: agregado orientado sin tratamiento (AO); agregado orientado solvatado con Etilénglicol (AO+EG) durante 48 horas a temperatura $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (BRUTON, 1955), para caracterizar los minerales hinchables; agregado orientado solvatado con Dimetilsulfóxido (AO+MSSO) durante 78 horas a temperatura ligeramente inferior a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (GONZÁLEZ GARCÍA y SÁNCHEZ CAMAZANO, 1968) para comprobar la existencia de caolinita en presencia de clorita; agregado orientado calentando a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ (AO+550 $^{\circ}\text{C}$) durante 90 minutos (MARTÍN VIVALDI y RODRÍGUEZ GALLEGU, 1961) para estudiar el comportamiento de la clorita y los minerales hinchables, así como para asegurar la presencia de caolinita.

El análisis mineralógico cuantitativo, a partir de la difracción de rayos X, se lleva a cabo según el fundamento de la técnica indicado anteriormente.

Análisis ATD/ATG

Los análisis termogravimétricos registran cambios de masa en función de la temperatura de la muestra a velocidad constante ($20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$). El sistema se basa en las señales emitidas por un termopar, que diferencia la temperatura en función de una muestra patrón de Al (BARBETA, 2002).

El resultado es una gráfica continua con una serie de picos indicadores de los cambios físico-químicos de calor y masa que experimenta el material al incrementar la temperatura.

Cada mineral presenta una serie de picos característicos, lo que pone de manifiesto su presencia:

Caolinita: Pico endotérmico a $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ y exotérmico a $980\text{ }^{\circ}\text{C}$. No se debe confundir con el cuarzo (doble pico a $573\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Haloisita: Pico endotérmico por debajo de 580 °C y un pico de deshidratación a 240 °C.

Montmorillonita: Pico endotérmico (deshidroxilación) en la región 700 °C (610-620-660-600 °C) y pico exotérmico a aproximadamente 900 °C (relacionado con el contenido en magnesio y su potencial de cambio catiónico).

Saponita: Pico endotérmico a 179-240-634-904 °C.

Illita: Pico endotérmico en el rango 500 °C (520-480-510) y pico doble endo-exotérmico a 900 °C.

Clorita: Tres picos endotérmicos en la franja de 750 a 850 °C y un pico exotérmico a 850 °C.

Además esta técnica permite identificar otros componentes: carbonato cálcico (pico a 820 °C), carbonato férrico (pico a 350 °C), goethita (pico a 370 °C), portlandita (pico a 460 °C).

Para el caso del análisis térmico diferencial (ATD), cada mineral presenta también una serie de picos característicos que se indican a continuación:

Caolinita: pico endotérmico a 550 °C, exotérmico a 100 °C y fluctuaciones débiles a 780 °C debido a la reacción de calcinación del calcio.

Haloisita: Curva parecida a la caolinita y zona muy pronunciada entre 175 y 300 °C debida a la deshidratación. Pico endotérmico entre 500 y 700 °C.

Corita: Triple pico endotérmico entre 500 °C y 700 °C y doble pico de deshidratación entre 100-150 °C y entre 250 y 300 °C.

Montmorillonita: Pico de deshidratación a 110 °C, pico endotérmico a 700 °C y doble pico endo-exotérmico a 1000 °C.

Análisis químico

El análisis químico tiene gran importancia para la identificación del suelo, sobre todo las fases solubles, porque la química de las arcillas junto a los aditivos que puede presentar este material tiene una gran incidencia en las propiedades del suelo de cara a la construcción. Para ello se hace necesario determinar la composición química de los elementos solubles mayoritarios (la fracción

soluble en medio acuosa: SiO₂, Al₂O₃, Fe, Ca), la identificación de los componentes minoritarios (SO₃²⁻, Cl⁻) y los cationes de cambio (Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺).

Para la determinación de los componentes químicos de la tierra se pueden utilizar tanto los métodos como las técnicas descritas en el capítulo I (piedra natural) o II (morteros). No obstante, los métodos más utilizados para la identificación química del suelo, de acuerdo con la normativa existente, se indican a continuación.

Determinación cuantitativa del contenido de sulfatos solubles de un suelo

Para la identificación cualitativa se propone el ensayo descrito en la norma UNE 103202 y para la determinación cuantitativa se propone el método descrito en la norma UNE 103201.

Procedimiento

Se toman 50 g de suelo que pase por el tamiz 0,125 UNE al que se le añade 200 ml de agua destilada y 10 ml de ácido clorhídrico. La mezcla se lleva a ebullición durante 15 minutos, se deja sedimentar y posteriormente se filtra por papel de porosidad media. Se hierve el filtrado y se le añade una disolución caliente de cloruro bórico, se filtra y se coloca en un crisol de porcelana y se calina a 800 °C durante 1 hora, se deja enfriar y se pesa (mg). El contenido en sulfatos se determina según la siguiente fórmula:

$$\text{Sulfatos} = \frac{0,416P}{M} (\text{mg} / \text{kg})$$

Donde **P** es el peso en mg de sulfato de bario, y **M** el peso de la muestra seca en kg.

Determinación de carbonatos

Para la descripción del ensayo se ha seguido el procedimiento indicado en la norma UNE 103200 y NLT-116/91. El método se basa en la descomposición de los carbonatos por la acción del ácido clorhídrico (calcímetro de Bernard).

Procedimiento

Se parte de 10 g de muestra de suelo que se hace pasar por el tamiz 250 UNE, tras secar y pulverizar la muestra. Para obtener el porcentaje de carbonato cálcico existente, se utiliza el calcímetro de Bernard que consiste en

una bureta medidora de los gases que desprende, en la reacción de la muestra, con el ácido clorhídrico. El contenido en carbonatos se calcula en función del volumen desprendido mediante la misma operación realizada con una cantidad conocida de CO_3Ca .

Determinación del contenido en materia orgánica

Método cualitativo

Aunque este ensayo no es usual en suelo ni se contempla en la normativa NLT-117, se ha considerado interesante correlacionarlo con la Norma UNE 10304 para arenas utilizadas en morteros y hormigones.

Este ensayo se basa en la comparación del color entre el líquido sobrenadante de las muestras de suelo y el de la muestra patrón.

La muestra patrón se prepara a partir de un ácido orgánico (ácido tánico) y una disolución de hidróxido sódico de la siguiente manera: en una probeta se mezclan 97,5 cm^3 de disolución de hidróxido sódico al 4% con 2,5 cm^3 de disolución de ácido tánico al 2% en 10% de alcohol. Agitamos vigorosamente y dejamos reposar. Por otra parte, se toman 100 g de muestra que pase por el tamiz n° 10 ASTM, se introduce en una botella transparente más una disolución de hidróxido sódico al 4% hasta 2 cm por encima del material, mezclándolas con la varilla de vidrio, se deja reposar y se observa el color que ha tomado el líquido comparándola con la muestra patrón. La mayor o menor coloración en comparación con la muestra patrón indicaría qué muestras presentan materia orgánica y qué muestras no.

Método cuantitativo

Debido a que el método del agua oxigenada contemplado en la norma NLT-117 es muy lento, se considera más oportuno utilizar el método del permanganato potásico, mucho más rápido, preciso y que requiere menor cantidad de muestra (UNE 103204/93).

Se toman 20 g de muestra que haya pasado el tamiz n° 14 ASTM, se secan en una estufa y posteriormente se pesan.

Se determinan los factores de corrección f y F , siguiendo el procedimiento especificado en la norma: factor f de la solución de permanganato potásico 0,1 N; factor F de la solución del ácido oxálico 0,1 N.

Ambos sirven para saber los cm^3 efectivos en que se convierten los 20 cm^3 teóricos de las fórmulas:

A) cm^3 efectivos del permanganato es igual a 20 $\text{cm}^3 / (f)$

B) cm^3 efectivos de ácido oxálico igual a 20 $\text{cm}^3 / (F)$

Factor del permanganato:

$$f = \frac{1000}{6,7} \times \frac{gr(\text{oxalato} - \text{sódico})}{cc.\text{permanganato} - \text{potásico}_{\text{gastados}}}$$

El factor del ácido oxálico $F = f (\text{cm}^3)$ de permanganato gastado en esa valoración dividido por 25 cm^3 de ácido oxálico.

Procedimiento. La muestra pesada y seca (de 0,2 a 0,3 g) se coloca en un erlenmeyer de 500 cm^3 y se le añade 25 cm^3 de ácido sulfúrico al 9%, calentando hasta ebullición y manteniendo durante 3 minutos. Dicha muestra se somete al procedimiento según las normas indicadas anteriormente.

Resultados. Según el procedimiento, el cálculo del contenido en materia orgánica se realiza de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\% \text{materia orgánica} = \frac{0,1032cc \times f(\text{permang} - 0,1)}{gr(\text{muestra} - \text{ensayada})}$$

Parámetros físicos y mecánicos a determinar sobre el tapial

Preparación de las muestras

Las muestras se secarán a una temperatura no superior a 60 °C. Previamente el material se dividirá en dos fracciones por medio del tamiz 5 UNE o n° 4 ASTM, aunque este tamiz seleccionado depende del tipo de ensayo a realizar y el tamaño máximo de las partículas:

★ **Análisis granulométrico.** La cantidad de muestra necesaria para el ensayo está en función de la relación limos y gruesos (0,062-2 μ / >2mm), si bien generalmente tendremos que adaptarnos a lo disponible. En este caso la muestra se separa por el tamiz 2 UNE o n° 10 ASTM. De la fracción de finos se toma la muestra necesaria para el análisis granulométrico por separado.

★ **Límite de Atterberg.** La muestra se pasa por tamiz 2 UNE y posteriormente se pasa la cantidad de muestra neces-

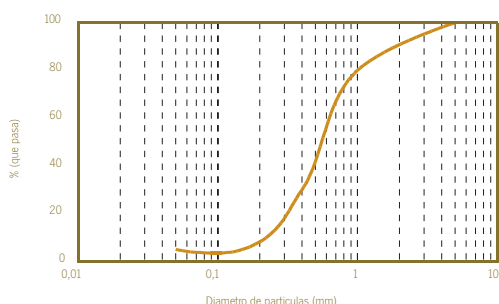
ria por el tamiz 0,40 UNE o n° 40 ASTM hasta conseguir 100 g de esta fracción para la realización del ensayo.

* Equivalente de arena. La muestra se pasa por el tamiz por el tamiz 5 UNE o n° 4 ASTM y se cuarteo hasta conseguir 150 g.

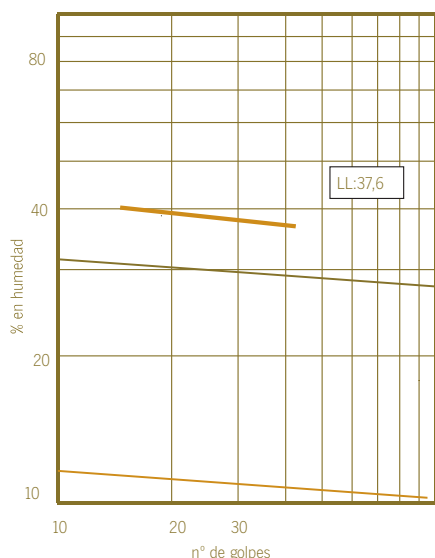
* Para el ensayo de apisonado, la muestra se pasa por el tamiz 20 UNE o n° 3/4 ASTM hasta conseguir una cantidad entre 15-35 kg dependiendo del molde utilizado.

Humedad mediante secado

Para la realización del ensayo se describe el procedimiento seguido en la norma NLT-101 o UNE 103300. El ensayo determina la humedad de un suelo mediante secado en estufa (105-110 °C). Se denomina humedad al cociente entre la masa de agua que pierde un suelo al secarlo y la masa del suelo seca.



17. Curva granulométrica



18. Determinación del límite líquido

$$W = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \times 100$$

Donde **W** es la humedad, **M₁** el peso del recipiente sin muestra, **M₂** el peso del recipiente más la muestra húmeda y **M₃** sería el peso del recipiente más la muestra seca.

Granulometría por tamizado

Determina el tanto por ciento en suelo que pasa por los distintos tamices hasta la abertura 0,08 mm (n° 200 ASTM). Para la realización del ensayo se recomienda la norma NLT-104/72.

Procedimiento

De la muestra original se separa la cantidad necesaria (500-5000 g dependiendo del tamaño máximo) de acuerdo con la norma NLT-101. Se seca al aire libre, se desmenuzan los terrones de arcilla y posteriormente se pesa. Esta cantidad se pasa por el tamiz n° 10 ASTM (2 UNE) y la fracción retenida se lava, seca, pesa y finalmente se pasa por la serie de tamices indicada en la tabla 6.

Cálculo de la humedad higroscópica

Mediante cuarteo se separan 120 g de la fracción de muestra que pase por el tamiz n° 10 ASTM. De esta cantidad se toman 20 g, que se secan en una estufa, y posteriormente se pesan. El cálculo de la humedad higroscópica se realiza de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$f = \frac{100}{100 + h}$$

$$h = \frac{a}{s} \times 100$$

Donde **f** representa al factor de corrección por humedad higroscópica, **h** sería la humedad higroscópica en %, **a** es el peso de agua y **s** el peso del suelo.

Para la determinación de la granulometría de los finos, se toman los 100 g de la fracción de muestra que pasa por el tamiz n° 10 ASTM, se colocan en un vaso de precipitado y se le añade, al mismo tiempo que se agita, unos 150 cm³ de hexametáfosfato sódico al 4%, dejando en reposo durante 18 horas. Posteriormente se lava la muestra sobre el tamiz n° 200 ASTM, hasta que pase

el agua limpia; se seca lo retenido en la estufa a 110 °C y finalmente se pasan por la serie de tamices que viene indicada en la tabla 7.

Una vez tomado el peso retenido en cada tamiz se realiza el cálculo requerido para la obtención de la curva de acumulados. Teniendo en cuenta que en la fracción fina los datos obtenidos son de una porción de 100 g, habrá que referirla al total de la muestra.

Resultados

El porcentaje de muestra que pasa por los distintos tamices acumulados se lleva a un gráfico cartesiano, donde se representa en abscisas (a escala semilogarítmica) la abertura de las mallas en mm y, en ordenadas, el tanto por ciento que pasa (figura 17).

Análisis granulométrico de finos por sedimentación

Este ensayo tiene como objetivo determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de un suelo desde 80 μ hasta 2 μ . Para la descripción del ensayo se ha seguido la norma UNE 103102.

Procedimiento

Se utiliza un densímetro con bulbo en forma de torpedo, de vidrio resistente a los agentes químicos según indica la norma. Se toma una porción de muestra que pase por el tamiz 2 UNE; esta fracción se cuartea hasta obtener 150 g. De esta cantidad se toman 20 g para determinar la humedad (w) con una precisión de 0,01 g (m_a). Se calcula la masa del suelo seco m_d , mediante la siguiente expresión:

$$m_d = m_a \frac{100}{100 + w}$$

Previamente se elimina el contenido en materia orgánica y carbonatos. Se introduce la muestra en un vaso de precipitado y se añaden, a la vez que se agita, 125 ml de hexametáfosfato sódico. Se deja durante 18 h agitando periódicamente. Se pasa toda la suspensión al vaso de agitación y se añade agua destilada. Se coloca en el aparato agitador y se mantiene durante 1 min a no menos de 10.000 r.p.m. A continuación se pasa la dispersión a una probeta graduada, a la que se añade agua destilada hasta completar un litro, y se introduce en el baño termostático. En otra probeta, se introducen 125

ml de solución dispersante y se añade agua destilada hasta completar 1l. Se sitúa en el baño termostático junto a la otra probeta y se deja el tiempo necesario para uniformar la temperatura. Se sitúa de nuevo la probeta en el baño y se inicia la cuenta del tiempo según la siguiente secuencia: 0,5, 1, 2, 5, 15, 30, 120, 240, y 1440 min.

Resultados

Se calcula la lectura verdadera R según la siguiente expresión:

$$R = R_h + C_m + C_T - C_d$$

Donde R_h representa el valor de densidad leído en el vástago del densímetro, C_m es la corrección por menisco, C_T es la corrección por temperatura y C_d la corrección por dispersante.

La profundidad efectiva H_r se obtiene a partir del calibrado correspondiente.

Se calcula el diámetro equivalente D de las partículas en mm por medio de la expresión:

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{\eta H_r}{(\rho_s - 1)t}}$$

Donde η representa la viscosidad del agua, H_r es la profundidad efectiva en la que se ha medido la densidad correspondiente a cada R_h , ρ_s se refiere a la densidad relativa de las partículas del suelo y t es el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo.

Posteriormente se calcula el porcentaje en masa K de partículas pequeñas con el correspondiente diámetro equivalente (D) por medio de la expresión:

$$K = \frac{\rho_s}{m_d(\rho_s - 1)} R_h \times 100$$

Límite líquido por el método de la Cuchara de Casagrande

Su cálculo permite determinar la consistencia de un suelo en función del grado de humedad. Se define como *límite líquido* la humedad a la que un surco sobre una masa de suelo, hecho con un acanalador de dimensio-

nes normalizadas, se cerrará hasta una distancia de 12 pulgadas, bajo el impacto de 25 golpes suministrados por un aparato normalizado para este ensayo (cuchara de Casagrande). Para su realización se ha seguido el ensayo indicado en la norma NLT-105/72.

Procedimiento

Se toman 100 g de muestra que pasan por el tamiz n° 40 (ASTM) y se mezclan con agua destilada en su punto justo, llenamos la cuchara manteniéndola en la palma de la mano, comprobamos con un acanalador si la profundidad es correcta. Se coloca la cuchara en el aparato a una altura sobre el soporte de un centímetro aproximadamente, y se golpea hasta que las paredes del surco se hayan unido por el fondo en una longitud de 13 mm, contando el número de golpes necesarios. Se toma una rebanada de material próximo al surco y se pesa sobre un cristal tarado para conocer su humedad, siguiendo el método normalizado a tal efecto, correspondiendo este valor al límite líquido en caso de que el golpeo haya sido de 25 golpes; de lo contrario, se toman muestras de dos puntos, determinándose el citado límite de forma gráfica (figura 18).

Límite Plástico

Para su determinación se recomienda el ensayo descrito en la norma NLT-106/72.

Procedimiento

Se toma la muestra del ensayo del límite líquido sobrante, la mezclamos hasta que la masa esté lo bastante plástica como para formar con ella una bola. Rodamos esta masa entre los dedos para formar un cilindro, hasta que tenga 3 mm de diámetro. Para obtener la humedad LP, el cilindro debe comenzar a desmoronarse; cuando se consigue, se determina la humedad por secado en la estufa. Para definir la plasticidad del suelo es necesario además conocer el índice de plasticidad, que se obtiene por diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Los valores obtenidos anteriormente se representan en el Ábaco de Plasticidad de Casagrande (figura 15).

Un parámetro relacionado con el índice de plasticidad es el coeficiente de actividad de las arcillas que se define como la relación entre el IP y el tanto por ciento de la fracción fina según:

$$C_a = \frac{I_p}{\% \text{arcilla}}$$

Este parámetro está relacionado con la capacidad de cambio catiónico que presenta la arcilla y depende de la movilidad de los cationes presentes en su estructura: $\text{Na}^+, > \text{Ba}^{++}, > \text{Sr}^{++}, > \text{Ca}^{++}, > \text{Mg}^{++}$. Es un indicador de la composición mineralógica de las arcillas. En base a él se puede establecer la siguiente clasificación: activas ($> 1,25$), normales ($1,25-0,75$), inactivas ($< 0,75$).

Clasificación del suelo

La clasificación del suelo se hace en base a los siguientes parámetros:

- * Tamaño de las partículas: *bloques* (partículas de roca retenidas en el tamiz n° 3 ASTM), *gravas* (partículas de roca que pasan por el tamiz n° 3 ASTM y quedan retenidas en el tamiz n° 4 ASTM), *arenas* (partículas de roca que pasan por el tamiz n° 4 ASTM y quedan retenidas en el tamiz n° 200 ASTM), *limo* y *arcilla* (son las partículas que pasan el tamiz n° 200 ASTM; para su separación hay que recurrir al ensayo de sedimentación aplicando la ley de Stokes).

- * Coeficiente de curvatura (Cc). Se define como la relación:

$$C_{30} = \frac{(D_{30})}{D_{60}D_{10}}$$

Donde D_{60} , D_{30} y D_{10} son los diámetros de las partículas correspondientes al 60, 30 y 10 % sobre la curva granulométrica.

- * Coeficiente de uniformidad (Cu). Se define como la relación:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Con el significado antes indicado.

De forma general, los suelos se clasifican como finos, si el 50% o más del peso del suelo pasa por el tamiz n° 200 ASTM, y suelos gruesos, si más del 50% del suelo seco es retenido en el tamiz n° 200 ASTM.

En base a estos criterios el suelo se clasifica como *grava* (> 50% de la fracción gruesa se retiene en el tamiz n° 4 ASTM) y *arena* (> 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz n° 4 ASTM).

Si cantidades inferiores al 12% pasan por el tamiz n° 200 ASTM, se representa la curva granulométrica y se calculan los coeficientes de uniformidad (Cu) y curvatura (Cc) según las ecuaciones ya indicadas con anterioridad.

Si menos del 5% de la muestra pasa por el tamiz n° 200 (ASTM), el suelo se considera bien clasificado si la arena o grava cumplen las siguientes condiciones: para grava, Cu mayor a 4; para arena, Cu mayor a 6; Cc está comprendido entre 1 y 3. Si el material no cumple estas condiciones, se dice que el suelo está pobremente clasificado.

Si más del 12% de la muestra pasa por el tamiz n° 200 ASTM, el suelo se considera suelo grueso con finos. En este caso se determina la plasticidad de estos finos y el suelo se clasifica como gravas o arenas, seguido de la terminología empleada por el ábaco de Casagrande.

Si la parte de la muestra que pasa por el tamiz n° 200 ASTM está comprendida entre 5 y 12%, se le adjudica al suelo una clasificación dual con dos símbolos del grupo. El primer símbolo correspondería al de grava o arena, con menos del 5% en finos (bien o mal clasificada GW, GP, SW, SP), y el segundo símbolo correspondería a grava o arena con más del 12% de finos (grava arcillosa GC, grava limosa GM, arena arcillosa SC, arena limosa SM).

Si el suelo predominante es arena o grava, pero contiene el 15% o más de otro constituyente de grano grueso, se añade al nombre del grupo la expresión “con bloques”, “con grava” o “con arena”.

Para suelos finos la clasificación toma como parámetros el valor del índice de plasticidad y límite líquido (figura 15). En función de esto los suelos se clasifican en:

• *Arcilla inorgánica*, si la representación del índice de plasticidad frente al límite líquido se sitúa sobre o por encima de la línea “A”, el índice de plasticidad es mayor a 4, y la presencia de materia orgánica no influye en el límite líquido. Podemos distinguir entre *arcillas de baja plasticidad*, si el límite líquido es menor a 50, *arcillas de alta plasticidad* (CH), si el límite líquido es 50 o mayor, *arcilla limosa* (CL-ML), si la posición del índice de plasticidad frente al límite líquido cae sobre o por encima de la línea “A” y el índice de plasticidad cae en el rango de 4 a 7.

• *Limo inorgánico*, si la presentación del índice de plasticidad frente al límite líquido se acomoda por debajo de la línea “A” o el índice de plasticidad es menor de 4. La presencia de materia orgánica no influye en el límite líquido. En este caso, distinguimos entre *limo de baja plasticidad* (ML), si el límite líquido es menor de 50, *limo de alta plasticidad* (MH), si el límite líquido es 50 o más, y *limo o arcilla orgánica*, si la presencia de materia orgánica es suficiente para influenciar en el límite líquido obtenido sobre la muestra seca al horno.

Si sobre el tamiz n° 200 ASTM se retiene menos del 30%, pero más del 15%, a esta terminología se le añade “con arena” o “con grava” según cuál sea la predominante. Pero si se retiene sobre el tamiz n° 200 ASTM el 30% o más de la muestra, se añadirá al nombre del grupo las palabras “arenosas” o “gravosas”, según predomine la arena o la grava.

Hinchamiento Lambe

El ensayo permite determinar el cambio de volumen potencial de un suelo. El ensayo requiere de un aparato clásico que se caracteriza por su rectificación abrasiva.

Procedimiento. Se parte de una muestra desmenuzada que pase por el tamiz n° 10 ASTM colocada en un ambiente con una humedad relativa de un 50% o 100%, manteniéndola en este ambiente durante 48 horas. La muestra se coloca en los anillos del aparato repartida de

Tabla 7. Serie de tamices (ASTM)

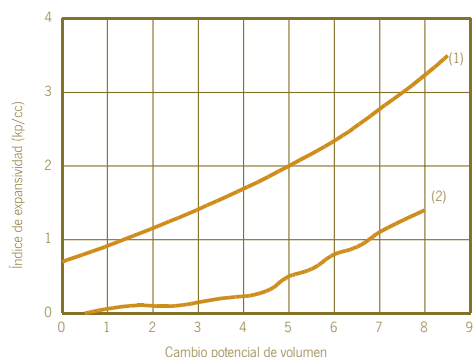
TAMICES (ASTM)	ABERTURA (mm)
N° 16	1,19
N° 30	0,59
N° 50	0,290
N° 80	0,177
N° 100	0,15
N° 200	0,074

forma homogénea y se compacta en tres capas. Una vez situada la muestra de forma adecuada en el dispositivo de medida, se coloca a cero el índice del micrómetro, girando convenientemente su esfera. Se ajusta el dedo de carga de tal forma que el microcomparador del anillo dinamométrico marque aproximadamente 4 divisiones. Se anota el tiempo en este momento y se introduce agua por los tres pequeños orificios del anillo grueso. De esta manera se reparte el agua por toda la piedra porosa inferior, a la vez que se elimina el aire. Se añade agua hasta que el nivel de ésta llegue al pistón.

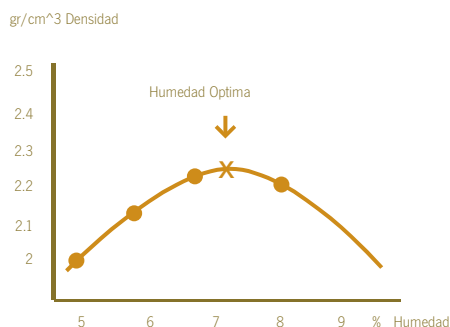
Resultados. Se va tomando lectura de acuerdo con la velocidad a la que se hinche el suelo (figura 19). El valor que la presión haya alcanzado al cabo de dos horas será el denominado índice de hinchamiento. Con este valor del índice de hinchamiento se determinará en las gráficas el cambio de volumen potencial de un suelo.

Equivalente de arena

El equivalente de arena (EA) se define como el cociente entre la altura de la parte arenosa sedimentaria y la altura total de finos floculados depositados en una probeta, multiplicado por 100. Para la descripción del ensayo se ha seguido la norma UNE 103109.



19. Hinchamiento Lambe. (1) Seco o húmedo y (2) Límite plástico



20. Curva Proctor

Procedimiento. Se parte de 120 g de muestra que pase por el tamiz nº 5 ASTM. Hay que decir que como trabajamos con dos muestras, las diferentes operaciones se realizan con una diferencia de 2 ó 3 minutos entre la primera y la segunda muestra. Cada una de estas muestras se sitúa en una probeta, a la que previamente se añade una solución desfloculante. Una vez introducida la muestra en las probetas y eliminado las burbujas que se hayan formado, el suelo se deja en reposo durante 10 minutos. Después tapamos la probeta y la agitamos, manteniéndola horizontal haciendo unos 90 ciclos en unos 30 segundos, y se introduce con una varilla acanalada, a una cierta presión, más líquido desfloculante por el fondo de la muestra para poner en suspensión las partículas más finas. Después dejamos reposar cada probeta 20 minutos y medimos en cada una la altura (respecto a la base) a la que llegan los finos y también la altura a la que llegan los gruesos.

Resultados. Para obtener el valor del equivalente de arena dividimos para cada probeta la altura de los gruesos entre la altura de los finos y lo multiplicamos por 100. Para que el ensayo se considere válido el resultado obtenido para cada probeta no puede diferir en más del 2%.

Ensayo Proctor Normal

Tiene como objetivo determinar en un suelo la relación entre la humedad y la densidad seca obtenida cuando es compactado en las condiciones establecidas. Este ensayo se realiza con material de cantera para poner de manifiesto la densidad óptima que puede obtener. Para la realización del ensayo se describe el procedimiento indicado en la norma NLT-107/76, para el Proctor normal.

Procedimiento

Se precisa un molde de metal de $1000 \pm 9 \text{ cm}^3$ de capacidad, con su base y collar, y maza mecánica de base circular de 2,50 kg adaptada al interior de una guía tabular adecuada para que su altura de caída libre sea de 30 cm.

La muestra utilizada para el ensayo se pasa por el tamiz 20 UNE, como indica en la NLT-101/72, se pesa el material retenido en dicho tamiz y se determina el tanto por ciento que representa respecto al peso total de la muestra. Se cuartea la muestra obtenida en porciones aproximadamente iguales (de 2,5 kg), para aplicar el procedimiento que a continuación se detalla.

Se tara el molde y el collar superior del dispositivo indicado anteriormente, se toma una de las porciones del suelo obtenidas y se mezcla con el agua que se estime necesaria, hasta que esté uniformemente repartida. El suelo, así preparado, se compacta en el molde con el collar colocado y en tres capas aproximadamente iguales. Para ello se aplicarán 26 golpes a cada capa, distribuidos uniformemente sobre la superficie. La última capa compactada deberá sobrepasar el borde del molde, pero no más de 1 cm.

Terminada la compactación, se quita el collar y se enrasa cuidadosamente el suelo con el borde del molde. Se pesa el conjunto molde y suelo compactado. Se abre el molde y se extrae una muestra representativa para determinar la humedad según la NLT-102.

Se repite esta operación con nuevas proporciones de material con diferentes cantidades de agua, hasta obtener los puntos necesarios para determinar la curva que relaciona la densidad seca con la humedad.

Resultados

Los datos de densidad y humedad se representan en un gráfico que tenga en abscisas los tantos por ciento de humedad y en ordenadas las densidades secas. Estos puntos definen una curva de pendiente suave; las coordenadas del máximo de esta curva definen la *densidad máxima* y la *humedad óptima* del ensayo Proctor (figura 20).

Para la realización del ensayo Proctor modificado deberá seguirse la norma NLT-108/76.

Densidad

Cálculo de la densidad aparente: (balanza hidrostática)

Entendemos por densidad aparente la densidad de la muestra *in situ*, es decir la densidad de la muestra en su lugar de origen, por tanto, la debemos calcular en muestras inalteradas. Para la realización del ensayo se ha seguido el método descrito en la norma UNE 103-301. Esta norma se aplica en suelos cuya humedad y contenido en finos impidan el desmoronamiento de la muestra y permitan su recubrimiento con una delgada capa fina de parafina, de densidad conocida.

Procedimiento

Se toman dos muestras del suelo de 100 a 50 g (si es arcilloso) o 150-100 (si es arenoso). De la primera muestra se determina la humedad según la norma UNE 103300. De la segunda muestra se determina la masa M_1 y, acto seguido, la cubrimos con una capa de parafina sumergiéndola en un recipiente con parafina caliente para impermeabilizarla. Una vez hemos impermeabilizado la muestra con la parafina caliente, la volvemos a pesar (M_2). La diferencia entre los valores M_1 y M_2 corresponde a la masa de la parafina añadida M_3 . El volumen de ésta (V_1) viene dado por el cociente entre la M_3 y la densidad de la parafina en g/cm³.

Resultados

Se determina en balanza hidrostática el peso sumergido de la muestra más la parafina (M_4) en g.

El volumen de la muestra (V_2) viene dado por la siguiente expresión:

$$V_2 = M_2 - M_4 - V_1$$

La densidad húmeda ρ :

$$\rho = \frac{M_1}{V_2} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Humedad seca ρ_d :

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde W es la humedad de la muestra.

Determinación de la densidad relativa (método del picnómetro)

El método tiene como objetivo la determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo de tamaño menor de 5 mm. Se define como el cociente entre la masa de un determinado volumen de suelo, exento de poros, a una temperatura, y la masa del mismo volumen de agua destilada, exenta de aire, a la misma temperatura.

Para la realización del ensayo se recomienda el método descrito en la norma UNE 103302. Para su determina-

ción se utiliza un picnómetro, que consiste en un frasco de reducidas dimensiones (de 10 a 100 ml) con un tapón esmerilado y hueco, que permite mantener dentro del mismo un volumen de líquido constante.

Algunos modelos constan de un termómetro adosado a él, para conocer la temperatura del líquido que contiene.

Procedimiento

Se toman tres fracciones de 15 g por cuarteo de muestra del suelo que pase por el tamiz 5 UNE previamente seco y triturado hasta pasar por el tamiz 400 μ . Se determina el peso del picnómetro según el procedimiento indicado en la norma, y se obtiene el valor del peso del picnómetro M_1 , M_2 (sin el cuello). Posteriormente se reintroducen 15 g de muestra y se determina M_3 . Una vez cerrado el picnómetro se eliminan las burbujas de aire y siguiendo el mismo procedimiento que en los casos anteriores se determina la masa M_4 .

Resultados

La densidad relativa de las partículas de un suelo para cada porción ensayada a la temperatura t viene dada por la expresión simplificada equivalente:

$$G = \frac{M_3 - M_2}{(M_3 - M_2) + (M_1 - M_4)}$$

Se adopta como densidad relativa la media aritmética de los resultados obtenidos con las tres porciones ensayadas. Los resultados se refieren a la densidad del agua a 20 °C; en caso contrario, el valor obtenido se tiene que multiplicar por el coeficiente K que viene dado por la densidad del agua en función de la temperatura.

Porosidad del terreno

Para la determinación de la porosidad se debe conocer el volumen aparente del terreno, el peso de la muestra. Conocido el peso específico real del terreno, se determinará la porosidad, expresada por el volumen de los huecos o por el índice de huecos. Para la descripción del procedimiento de ensayo se ha seguido la norma UNE 7045.

Procedimiento

El volumen aparente se determinará según las características del terreno (suelos poco coherentes o suelos cohe-

rentes) y el instrumental normalizado. Posteriormente se determina el peso de la muestra con su humedad natural sobre dos vidrios de reloj tarados. Se determina el peso de la muestra con su humedad natural, el peso de la muestra seca y por último su peso específico real de acuerdo con la norma UNE 7001.

Resultados

Los resultados se obtendrán aplicando los valores obtenidos a las fórmulas siguientes:

$$n = \left(1 - \frac{G_s}{\gamma_s V} \right) \times 100$$

Donde n corresponde al volumen de huecos, G_s es el peso muestra seca, γ_s es el peso específico del terreno y V volumen aparente de la muestra.

$$\varepsilon = \frac{V \gamma_s}{G_s} - 1$$

Donde ε es el índice de poros

Medida de la retracción

Para la determinación del límite de retracción se recomiendan el ensayo descrito en la norma UNE 103108 (método A).

Procedimiento

Se prepara una pastilla con partículas del suelo que pase por el tamiz 400 μ amasadas con agua en cantidad suficiente para que la pasta del suelo alcance una humedad correspondiente al límite líquido.

Para el ensayo se precisa de una cápsula de retracción de base plana con medidas normalizadas. Se determina la capacidad de la cápsula de retracción en centímetros cúbicos, que coincide con el volumen de la pastilla del suelo húmedo. Se introduce la pasta de suelo en la cápsula en tres tandas, posteriormente se golpea la cápsula con el fin de eliminar las burbujas existentes. El proceso se repite tres veces.

Una vez terminada la operación se determina el peso de la cápsula con el suelo húmedo. Si se desea obtener la curva de retracción, se deja la pastilla expuesta al aire durante unas horas, permitiendo el secado parcial; cuando se separe de las paredes de dicha cápsula, se retira la mues-

tra y se determina su volumen por desplazamiento del mercurio, según el procedimiento indicado en la norma.

Resultados

Se calcula el contenido en humedad según el procedimiento indicado en la norma UNE 103300.

Existen dos procedimientos para expresar los resultados del límite de retracción: forma analítica y gráfica. De forma analítica el límite de retracción se calcula según la siguiente expresión:

$$W_s(\%) = w \frac{(V_1 - V_d) \rho_w}{(M_4 - M_1)} \times 100$$

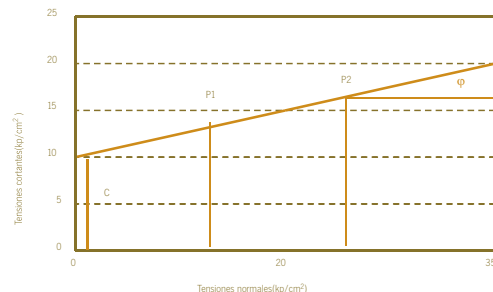
Donde M_1 es la masa de la cápsula de retracción, M_4 es la masa de la cápsula de retracción con el suelo seco, V_1 es el volumen de la pastilla del suelo húmedo y V_d el volumen de la pastilla de suelo seco.

El método gráfico se lleva a cabo mediante la curva de retracción que representa cada medida de volumen V_i y de la masa de la pastilla de suelo M_i durante el proceso de secado. Se calcula la humedad del volumen que corresponde a 100 g de suelo seco U_i mediante la siguiente expresión:

$$U_i = \frac{V_i}{M_d} \times 100$$

Se calcula la humedad w_i en % en cada medida mediante la siguiente expresión:

$$w_i = \frac{M_i - N_d}{M_d} \times 100$$



21. Ensayo de corte directo. C: cohesión; q: ángulo de rozamiento interno

En abscisas se representa la humedad w_i y en ordenadas el volumen correspondiente a 100 g de suelo seco U_i . Una vez representados los puntos en la gráfica se traza una paralela al eje de abscisas por el punto U_d (punto último obtenido al secar la muestra en una estufa) y una línea recta que pase a través del primer punto U_1 que mejor se adapta a la serie de puntos correspondientes a las primeras lecturas. Se toma como límite de retracción w_{s_r} el valor de la abscisa correspondiente al punto de corte de ambas rectas.

Resistencia a compresión simple

Esta determinación se lleva a cabo sobre suelos que presenten cierto grado de cohesión. Para la realización del ensayo se propone el método descrito en la norma UNE 109400.

Procedimiento

Se precisa de una probeta cilíndrica o prismática y cuyo diámetro o lado menor sea mayor a 35 mm, obtenida según el procedimiento indicado en la norma. Antes de someter la probeta a la prensa, ésta se mide con un calibre y posteriormente se pesa.

Resultados

Se pueden expresar de dos formas diferentes:

- Utilizando el gráfico rectas inclinadas (representación gráfica de la tensión en función de la deformación). Se calcula la tensión, dividiendo la carga (Q) por el área de la sección inicial de la probeta (S). Una vez representada la curva, se traza la tangente horizontal por el punto más alto hasta que corte el eje de ordenadas. La lectura correspondiente es la tensión de rotura corregida, denominada resistencia a compresión simple.

$$q_u = \frac{Q}{S}$$

- De forma analítica, mediante la representación de la curva tensión corregida-deformación en un sistema de ejes cartesianos. Si representa un máximo relativo, el valor de la ordenada corresponde al valor de la resistencia a compresión simple, y su abscisa a la deformación en rotura. Si no presenta un máximo relativo, se toma como valor de la resistencia a compresión simple el correspondiente al 15% de deformación.

Los resultados obtenidos mediante cualquiera de los procedimientos anteriores se deben expresar con una precisión de 5 KPa y del 0,1% en la deformación.

Ensayo de corte directo

Mediante este ensayo determinamos en laboratorio la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. En mecánica de suelos se ha organizado de tal manera que el estudio del equilibrio de un suelo cargado se traslada al instante de la rotura del mismo y como mecanismo resistente se utiliza la resistencia del mismo a esfuerzo cortante.

Se supone que un talud se derrumba cuando sobre una cierta superficie de fractura se producen unos esfuerzos cortantes que no son resistidos por el macizo. De la misma forma, una cimentación superficial colapsa cuando el suelo, deslizándose sobre una superficie de fractura (una vez superada la resistencia al esfuerzo cortante de la misma), fluye a la superficie.

En base a estas observaciones, se pensó en un ensayo que definiera el valor y ángulo de rozamiento interno; y para ello se utiliza, entre otros, el aparato de corte directo.

a) Procedimiento

El método operativo consiste en someter una pastilla de suelo a un esfuerzo constante, hasta la rotura, en una dirección determinada con deformación controlada y velocidad constante

b) Resultados

Se obtiene una recta (figura 21), que relaciona las tensiones tangenciales y normales a partir de al menos tres parejas de valores obtenidos de la forma indicada anteriormente. La ordenada en el origen nos define el valor de la cohesión y la pendiente de la recta (el ángulo de rozamiento interno).

$$\tau = c + \sigma \times \operatorname{tg} \varphi$$

Donde τ representa las tensiones cortantes, σ las tensiones normales y φ el ángulo de rozamiento interno.

Notas sobre autoría de los textos

¹Este capítulo ha sido realizado conjuntamente por Esther Ontiveros Ortega, del Centro de Intervención del IAPH, Ignacio Valverde Espinosa, del departamento de Construcciones Arquitectónicas (Universidad de Granada) y Eduardo Sebastián Pardo, del departamento de Mineralogía y Petrología (Universidad de Granada).

Bibliografía

Referencia

ACETTA, A. (1984) *Ecole d'estude de la stabilisation des terres par compactage*. Acta de Coloques Modernité de la construction en terre, Paris.

ALMAGRO, A. (1992) *El yeso material mudéjar*. Actas de III Simposium Internacional de mudéjarismo. Teruel: Diputación Provincial. Instituto de estudios turoloenses, CSIC

BARBETA SOLÀ, G. (2002) *Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el siglo XXI* (en línea) <http://www.tdx.cesca.es/TDX-1105102-161519/>

BARDOU, P.; Arzuomanian, V. (1979) *Arquitectura en adobe*. Barcelona: Ed. Gustavo Gili

BAZZANA, A. (1980) *Éléments d'archéologie musulmane dans Al-Andalus : caractères spécifiques se l'architecture militaire arabe de la région valencienne. Al-qantara: Revista de estudios árabes*, v. 1, n° 1/2, pp. 339-364

BRINDAN COMPTON, E. (1990) *Arquitectura vernácula en el valle Central de Chile. 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture*. Los Angeles (New Mexico), The Getty Conservation Institute, 14-19/X/1990, pp. 8-13

CEBALLOS, M. (1990) *Restauración en adobe en antiguos edificios coloniales de la antigua Guatemala. 6th Conference International on the Conservation of Earthen Architecture*. Los Angeles (New Mexico), The Getty Conservation Institute, 14-19/X/1990, pp. 24-28

COPE, M. (1984) *Une meuselleure connoissance du matériaux terre*. Acta de Coloques Modernité de la Constructure en terre, Paris, pp. 15-25

CRATERRE-EAG (1998) *Blocs de terre comprimée: Normes*. (Guide Série Technologies No. 11. CRATerre-EAG: Houben H, CDI: Bouverkeur S.; Bruxelles/Belgique/France, 1998

CRATERRE-EAG (1998) *Blocs de terre comprimée: Procédures d'essais*. (Guide Série Technologies No. 16. CRATerre-EAG: Houben H, CDI: Bouverkeur S.; Bruxelles/Belgique/France, 1998

DÍAZ DE ROMERAL, J.; BRINGAS, O. (1986) *La tierra, material de construcción en los centros de investigación*. Monografía n° 385-386, Instituto Eduardo Torroja, CSIC, pp. 17-19

DOAT, P.; HAYS, A.; HOUBEN, H.; MATUK, S.; VITOUX, F. (1983) *Construire en terre*. Paris: CRATerre Syros/ éditions alternatives

THE GETTY CONSERVATION INSTITUTE (2002) *GCI Project Terra Bibliography: Sorted by Author* (en línea)

www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/terrabil_alpha.pdf

THE GETTY CONSERVATION INSTITUTE (2002) *GCI Project Terra Bibliography: Sorted by General Category* (en línea) www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/terrabil_categories.pdf

THE GETTY CONSERVATION INSTITUTE (2002) *Summary Report, Project Terra Research Meeting* (en línea) www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/terrasummary.pdf

THE GETTY CONSERVATION INSTITUTE (2002) *Terra Consortium: Guidelines for Institutional Collaboration* (en línea) www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/terraguidelines.pdf

HOUBEN, M. (1982) *Construcción en tierra*. CONESCAL, n° 59/60, Méjico

HOUBEN, M.; GUILLAND, M. (1989) *Traité de constructure en terre*, v. 1, Marsella

ICOMOS (2004) *Architecture en Terre. Bibliography* (en línea) www.international.icomos.org/18thapril/earth-bibl.pdf

JIMÉNEZ DE SALAS, J.A.; JUSTO ALPAÑES (DE), J.L. (1975) *Geotecnia y cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas*. 2ª Edición. Madrid: Rueda

KRAEMER, C.; DEL VAL, M.A. (1993) *Firmes y pavimentos*. Madrid: Cátedra de Caminos y Aeropuertos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid

MENÉNDEZ PIDAL, R. (1955) *Primera crónica general de España*. Madrid: Gredos

ONTIVEROS, E. (1995) *Estudio de los materiales empleados en la construcción de los tapiales de las murallas de Granada*. Granada: Universidad (tesis doctoral. Publicación inédita)

ONTIVEROS, E.; VALVERDE, I.; SEBASTIÁN, E. (1996) *Técnicas de análisis aplicadas al estudio de los tapiales de las murallas de Granada. 3rd International Congress of Restoration of Building and Architectural Heritage*. Granada

OSTROM, H.E. (1961) Separation of clay minerals from carbonate rock by and acid. *Journal of Sedimentary Research*, v. 31, pp. 123-139

RAY, S.; GAULT, H.R.; DODD, C.G. (1957) The separation of clay mineral from carbonate rocks. *American Mineralogy*, n° 42, pp. 681-685

TORRES BALBÁS, L. (1985) *Ciudades hispanomusulmanas*. Madrid: Ministerio de Asuntos Exteriores. Instituto Hispanoárabe de Cultura

VALVERDE, I.; ONTIVEROS, E.; SEBASTIÁN, E. (1997) El tapial de las murallas de Granada. *Revista de edificación*, n° 26, pp. 58-64

VILLANUEVA (DE), J. (1827) *Arte de la albañilería. Artes del tiempo y del espacio*. Edición a cargo de Ángel Luis Fernández para la Editorial Nacional. Madrid, 1984

Normativa

Asociación Española de Normalización (AENOR). Normas

UNE 7045/25. Determinación de la porosidad de un terreno

UNE 103-400/93. Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo

UNE 103-104/93. Determinación del límite plástico de un suelo

UNE 103-103/93. Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande

UNE 103-300/93. Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa

UNE 103-204/93. Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico

UNE 103-200/93. Determinación del contenido de carbonatos en los suelos

UNE 103-500/94. Geotenia. Ensayo de compactación. Proctor normal

UNE 103-301/94. Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática

UNE 103 100/95. Preparación de las muestras para ensayos de suelos

UNE 103-202/95. Determinación cualitativa del contenido en sulfatos de un suelo

UNE 103 101/95. Análisis granulométrico de suelos por tamizado

UNE 103 102/95. Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro

UNE 109 109/95. Método de ensayo para determinar el índice "Equivalente de arena" de un suelo

UNE 103 108/96. Determinación de las características de retracción de un suelo

UNE 103401/98. Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo

UNE 103201/03. Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo

Normas de ensayo del laboratorio del transporte y mecánica del suelo" José Luis Escario.

NLT-101/72: Preparación de las muestras para ensayo de suelos.

NLT- 102/72: Humedad del suelo mediante secado en estufa

NLT-104/91: Granulometría de suelos por tamizado

NLT-105/72: Límite líquido por método de la Cuchara de Casagrande

NLT- 106/72: Límite plástico

NLT-107/91: Apisonado Proctor Normal

NLT108/91: Apisonado Proctor modificado

NLT-113/87: Equivalente de arena de un suelo

NLT-116/91: Contenido en carbonatos por el método del calcímetro de Bernard.

NLT-117/72: Contenido en materia orgánica por el método del agua oxigenada

NLT-202/72: Compresión simple de una probeta de suelo

PH cuadernos

La línea editorial de las publicaciones monográficas del IAPH se divide en las siguientes secciones:

Memorias. Proyectos llevados a cabo por el IAPH, desde su inicio hasta las conclusiones, estos abarcan aspectos metodológicos, técnicos y de investigación. Son la consecuencia de la necesidad y exigencia de transferir los conocimientos desarrollados en una institución pública, dedicada a la investigación, conservación y documentación del patrimonio cultural. Se trata de contenidos únicos y distintivos de la institución que los genera.

Manuales y guías. Responden a las necesidades detectadas por los profesionales del patrimonio en el desarrollo de su trabajo. Estas obras se componen de metodologías, herramientas y técnicas especializadas.

Pensamiento. Línea de reflexión que refleja el debate más avanzado en patrimonio cultural, desde cualquiera de sus ámbitos. Los destinatarios son los profesionales del patrimonio, que deben comprender y materializar en la práctica un marco de pensamiento a través de programas de actuación.

En esta ocasión, **PH cuadernos 19** *Programa de normalización de estudios previos aplicado a bienes inmuebles* se enmarca en la línea de Manuales, ya que se trata de un trabajo de síntesis y visión interdisciplinar, destinado a aquellos profesionales que se van a enfrentar a la intervención de un bien inmueble.

Títulos Publicados

Serie PH cuadernos

18. La rueda elevadora de agua de las minas romanas de Riotinto: memoria de intervención

Varios autores

17. Patrimonio inmaterial y gestión de la diversidad

Varios autores

16. Guía del Paisaje Cultural de la Ensenada de Bolonia. Avance

Varios autores

Serie Cuadernos

15. Territorio y Patrimonio: los Paisajes Andaluces

Varios autores

14. Repertorio de textos internacionales de patrimonio cultural

Varios autores

13. Arte y política en España: 1898-1939

Varios autores

12. Preservación de la arquitectura industrial en Iberoamérica y España

Varios autores

11. La arquitectura moderna en Andalucía: un patrimonio por documentar y conservar. La experiencia DOCOMOMO

Varios autores

10. Patrimonio etnológico. Nuevas perspectivas de estudio

Varios autores

9. Indicadores para la evaluación del estado de conservación de ciudades históricas / Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Centro del Patrimonio Mundial

Varios autores

8. Historia del arte y bienes culturales

Varios autores

7. Difusión del patrimonio histórico

Varios autores

6. Catalogación del patrimonio histórico. I Jornadas sobre catalogación del patrimonio histórico celebradas en Sevilla del 19 al 22 de abril de 1995

Varios autores

5. Patrimonio y ciudad: reflexión sobre centros históricos. II Jornadas de patrimonio de Priego de Córdoba celebradas en esa ciudad del 26 al 29 de octubre de 1994

Varios autores

4. Arquitectura y patrimonio: memoria del futuro. Una reflexión sobre la relación entre patrimonio y arquitectura. Curso-debate realizado en Sevilla del 14 al 18 de diciembre de 1992

Varios autores

3. Conservación arqueológica: reflexión y debate sobre teoría y práctica. Curso-debate realizado en Sevilla del 30 de noviembre al 4 de diciembre de 1992

Varios autores

2. La carta de riesgo: una experiencia italiana para la valoración global de los factores de degradación del patrimonio monumental. Curso internacional realizado en Granada del 16 al 18 de diciembre de 1991

Varios autores

1. Un proyecto para la Capilla Real de Granada: teorías, métodos y técnicas aplicadas a la conservación del patrimonio mueble. Curso internacional realizado en Granada del 9 al 12 de septiembre de 1991

Varios autores

Serie Cuadernos Técnicos

8. Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos

Varios autores

7. Antropología y patrimonio: investigación, documentación e intervención

Varios autores

6. Arqueos: sistema de información del patrimonio arqueológico de Andalucía

Varios autores

5. Conservación de colecciones de fotografía

Luis Pavao

4. Prevención de riesgos laborales en la investigación e intervención en patrimonio histórico

Antonio López Román

3. Principios del lenguaje epistemográfico: la representación del conocimiento sobre patrimonio histórico andaluz

Antonio García Gutiérrez

2. Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos

Varios autores

1. Procedimientos de análisis documental automático: estudio de caso

Antonio García Gutiérrez

