



## EL USO DE JUNTAS CONSTRUCTIVAS OBLICUAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TAPIA

José Gómez Voltan<sup>1</sup>, Silvia A. Cirvini<sup>2</sup>

Incihusa, CCT Mendoza, CONICET, Argentina.

<sup>1</sup>gvoltan@mendoza-conicet.gob.ar; <sup>2</sup>scirvini@mendoza-conicet.gob.ar

**Palabras claves:** contracción, junta oblicua, *rammed earth*, *joint*, *shrinkage*

### Resumen

La construcción de muros de tapia requiere realizar juntas constructivas. En las juntas verticales, suele aparecer fisuras y grietas por contracción que debilitan al muro. Se analizan los principales factores intervinientes en el proceso de compactación-contracción del suelo. Se construyen y ensayan muretes de tapia y probetas con juntas verticales y oblicuas con diferentes ángulos referidos a un plano horizontal. La evaluación de los resultados muestra la eficacia del uso de las juntas oblicuas superado cierto ángulo límite, tal que reduce significativamente la discontinuidad del material-suelo, mejorando así la respuesta estructural del muro de tapia, en especial ante cargas y acciones laterales como el sismo.

### 1. INTRODUCCIÓN

La tapia (*rammed earth*) es una antigua técnica (Guillaud, 2012) usada en la construcción de muros, en la que se utiliza suelo humedecido como material, el cual es compactado entre dos encofrados paralelos, denominados “tapiales”, cuya separación define el espesor del muro.

Los tapiales históricamente han sido tableros o entablados (Lacoste et al., 2012), aunque actualmente también se construyen con madera reconstituida, acero, mixtos, con dimensiones no estandarizadas, que varían entre 0,70 m a 1,10 m de altura por 1,50 m a 2,50 m de largo. El espesor de estos tableros debe asegurar la estabilidad del dispositivo y la capacidad para contener al suelo durante la compactación.

El procedimiento constructivo básico (Minke, 2005) consiste en humedecer la masa de suelo a usar, dejarla “reposar” para facilitar la homogeneización de la humedad, colocarla entre los tapiales en capas de 0,10 m a 0,15 m de altura y mediante pisón, manual o mecánico, compactar el material hasta que la impronta del golpe sea mínima.

El traslado del encofrado se hace por hiladas, construyendo los bloques en forma consecutiva o alternada, con el fin de reducir el efecto de la contracción. Finalizada la hilada, se ejecuta otra por encima de la anterior, pero desfasada en ½ tapia, obteniéndose un aparejo a soga (*running bond*). Continuando así, se obtiene un muro de 0,30 m a 0,80m de espesor, cuya altura podrá variar entre 1,80 m y 6,0 m dependiendo de su destino: cerca, vivienda o depósito.

Luego, el suelo perderá paulatinamente la humedad incorporada durante la conformación del muro hasta alcanzar un equilibrio higroscópico con el medio ambiente. Esta reducción de la humedad genera en el suelo una contracción volumétrica la cual suele evidenciarse con la aparición de fisuras o grietas coincidentes con las juntas constructivas verticales. En algunas regiones a la masa de suelo de construcción se incorpora fibra vegetal (paja) o animal (pelo) para reducir así los efectos de la retracción (Gandreau; Delboy, 2012).

Las fisuras verticales pueden alcanzar varios milímetros de espesor y son inherentes al procedimiento y material constructivo descripto. Abarcan con alternancia por hilada, la totalidad del muro y en general se localizan en los mismos planos verticales. Es evidente la

discontinuidad que se genera en el elemento estructural y la reducción de su capacidad mecánica ante cargas verticales y acciones dinámicas como la sísmica.

Para reducir el efecto de las juntas verticales se suele escarificar la cara lateral de la tapia receptora (anterior) previo a la compactación del nuevo bloque (posterior), en la búsqueda de una superficie de contacto “rugosa”, que mejore la continuidad. Sin embargo, el resultado no siempre es satisfactorio.

El objetivo de la presente investigación es desarrollar y evaluar un tipo de junta que minimice los efectos perjudiciales de las juntas constructivas verticales.

## 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 Estructura de los suelos

En una muestra de suelo se distinguen tres componentes: aire, agua y sólidos. Estos últimos a su vez desde un punto de vista dimensional, se suelen clasificar en gravas, arenas, limos y arcillas. Sin embargo, estas fracciones raramente se hallan como partículas primarias individuales y aisladas. Contar con un modelo que se aproxime a la textura real del suelo es imprescindible para comprender el fenómeno de la contracción que se desarrolla en las juntas de tapias.

Los limos y en particular las arcillas, por sus características mineralógicas y enlaces de superficie, se encuentran en un nivel estructural primario, formando cuasi cristales, los que a su vez se agrupan para dar lugar a ordenamientos naturales de mayor tamaño y complejos. Dexter (1988) los ordenó en: *clusters*, *domains*, micro-agregados y agregados. El grado de complejidad de estos conglomerados es tal que, al pasar de un nivel a otro, una partícula simple de un nivel puede estar compuesta por decenas, cientos o miles de partículas del orden jerárquico anterior. Este modelo referido a la estructuración del suelo se conoce como pedoestructura (*pedostructure*).

Durante la desecación de una muestra de suelo, las agrupaciones comienzan a diferenciarse una de otra, siguiendo las superficies de debilidad y aparecen los agregados denominados por Brewer (1965) de *ped* primarios.

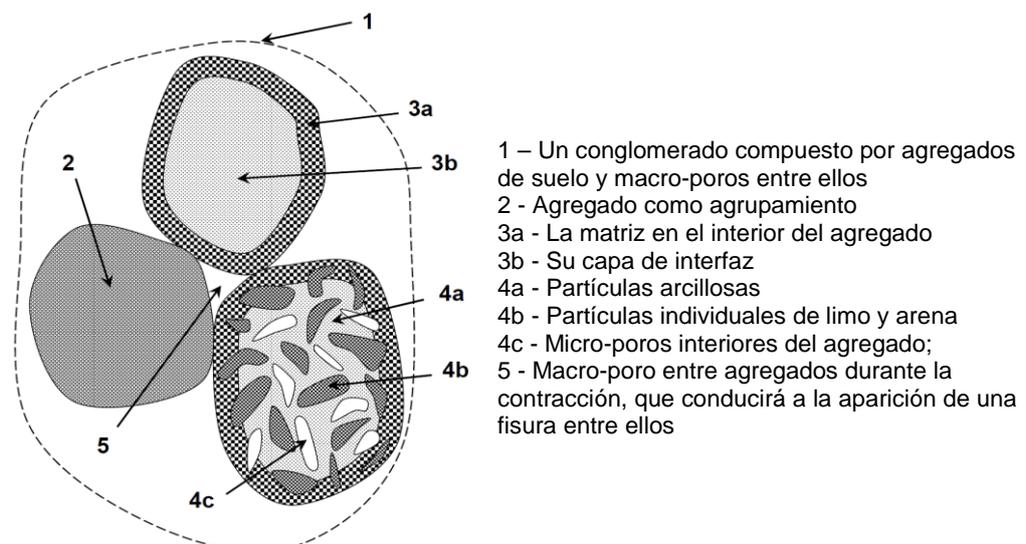


Figura 1. Representación de la estructura de suelo (Chertkov, 2014)

De acuerdo al modelo de la estructura suelo-agua descrito, es una fuerte simplificación hablar de poros del suelo de manera genérica. En efecto, se define en principio dos sistemas de poros: uno al interior del agregado, es decir la microporosidad; y otro entre los agregados, la macroporosidad.

En los agregados primarios, existen conglomerados con diferente grado de complejidad. A

su vez, pueden formar agrupamiento de pedos primarios, es decir, niveles superiores de ordenamientos naturales, los cuales finalizan en terrones, fácilmente visibles.

La interacción suelo-agua en la pedoestructura actuando sobre sus niveles más bajos o primarios: la matriz arcillosa, introduce tensiones hidráulicas cuyos efectos, observados en una escala macroscópica, definimos como propiedades físicas de la masa del suelo en estudio, por ejemplo, la contracción e hinchamiento de la masa de suelo.

## 2.2 Contracción (*shrinkage*)

El modelo suelo-agua que ofrece la pedoestructura es dinámico, de tal manera que un incremento de agua producirá una migración de la arcilla del núcleo del agregado hacia el exterior del mismo, con la correspondiente disminución de la concentración de la matriz arcillosa, modificando su ordenamiento, efecto que a simple vista representa el hinchamiento del suelo. Es decir, el volumen y concentración de la matriz arcillosa en el *ped* dependerá del contenido de humedad.

Recíprocamente, el incremento del contenido de minerales arcillosos en una muestra, aumenta la creación de poros texturales (micro-poros), lo que a su vez captan más agua durante un proceso de humedecimiento y luego en desecamiento acentúan las fisuras con un mayor ancho y profundidad.

Este modelo descripto permite explicar los tramos lineales enlazados por arcos de una curva del tipo sigmoide (Leong; Wijaya, 2015) conocida como curva de contracción (figura 2), que representa la evolución de la reducción del volumen de vacíos en función de la pérdida del contenido gravimétrico de humedad (deseccación). En esta curva CS se definen cuatro zonas: contracción estructural, normal, residual y nula (Braudeau; Mohtar, 2014).

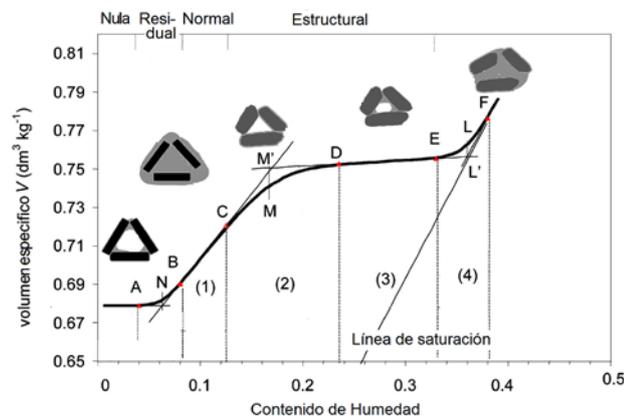


Figura 2. Partes de la curva de contracción CS - Relación de vacíos en función del contenido de humedad (Braudeau; Mohtar, 2004)

Según lo visto, durante el desecamiento de una muestra de suelo con fracción fina, se ponen en juego dos sistemas de porosidad texturales: uno al interior del agregado (micro-poro) y otro entre agregados (macro-poro). De acuerdo al tipo de poro afectado por las tensiones hidráulicas, se obtienen las distintas partes de la curva CS (Cornelis et al., 2006). En la figura 2, el tramo recto DE responde a los macro-poros y el BC, está dominado por la microporosidad. En los enlaces curvos DC y AB, trabajan ambos sistemas en conjunto.

Durante el desecado, se produce un retroceso del menisco del agua capilar que ocupa los poros, la acción del potencial hídrico del suelo genera tensiones efectivas de compresión en los agregados. En el caso de la tapia, los tenores de humedad no suelen sobrepasar al punto C, luego el tramo de la curva que interesa es el CBNA. Hay tres puntos significativos: el punto B representa el momento en que comienza a entrar aire a la muestra, iniciando un cambio de coloración de pardo oscuro a claro. El punto N, es la intersección de los tramos rectos anterior y posterior, y coincide aproximadamente con el límite de contracción (Atterberg, 1913). Por último, el punto A indica la finalización del proceso de contracción volumétrica, dando inicio a la fase de contracción nula. Si se continúa el proceso de

desecamiento la muestra de suelo no disminuye más su volumen, puesto que el contacto inter-agregado no lo permite, en cambio incrementará las micro-fisuras, creciendo estas en profundidad y espesor. El proceso continuará hasta lograr un equilibrio dinámico higroscópico con el aire ambiental, dependiente de la humedad relativa y la temperatura del mismo.

Una nueva disminución de la humedad del sistema no será viable de manera natural y se deberá forzar el desecamiento mediante el secado en estufa, donde perderá el agua remanente, alcanzando la máxima fisuración. Sin embargo, se mantendrá el agua de la capa de absorción, la cual como dipolo permanece unida eléctricamente a superficie cargada de los minerales arcillosos.

### 2.3 Compactación

El apisonado o compactación empleado en la construcción de tapia es un método muy antiguo, por la cual se deja caer libremente un pisón (maza sostenida por un mango) que impacta sobre el suelo aplicando una presión acompañada de choque y vibración. También se usan pisones neumáticos. El objetivo es mejorar las propiedades mecánicas de la masa de suelo, mediante la reducción del volumen de la muestra de suelo, es decir, aumento de la densidad (Rico; del Castillo, 2003).

Para aumentar la eficacia de la compactación de suelos y los efectos que ésta produce, es necesario humedecer el material. El agua intersticial mejora el deslizamiento entre las partículas y grumos del material facilitando su acomodamiento y la reducción del volumen de vacíos.

Dado que la velocidad de aplicación de la carga no permite un franco drenaje del agua, la energía de compactación produce el desplazamiento del aire ocluido en los poros estructurales entre-agregados, incrementando por ende el grado de saturación. Cuando los poros se encuentran saturados o cuasi-saturados (con aire disuelto en burbujas aisladas), la tensión neutra (Teerzaghi; Peck, 1967) del agua intersticial, hace insignificante el efecto de la compactación, puesto que la tensión efectiva es:

$$\sigma' = \sigma - \mu w \quad (1)$$

Donde:  $\sigma'$ : presión intergranular o presión efectiva (kPa);

$\sigma$ : tensión mecánica total actuante (kPa);

$\mu w$ : presión intersticial o neutra del agua en el poro (kPa)

Mediante el ensayo diseñado por Proctor (1933), se determina una humedad óptima de compactación (HO) para la cual se obtiene la mayor densidad aparente. Cuanto mayor sea la energía de compactación usada, tanto menor será la HO (Rico; del Castillo, 2003). Determinaciones realizadas con pisones manuales con un peso entre 29,4 N a 49 N (Sowers y Sowers, 1972, p. 283) actuando sobre capas de 3 cm a 8 cm de espesor, indicaron que la humedad adecuada suele estar entre 2% a 4% por encima de la óptima Proctor.

### 2.4 Contracción y compactación

Mientras la compactación está asociada a tensiones mecánicas y actúa sobre poros estructurales, la retracción está gobernada por tensiones del tipo hidráulico (Peth et al., 2010) y opera en el espacio de los poros texturales, asociados al mineral arcilloso. El potencial de una masa de suelo para reducir su volumen al secarse dependerá fundamentalmente de la humedad y del contenido de agregados finos presente en la masa de suelo, en particular de la cantidad y características mineralógicas de sus arcillas (Cornelis et al., 2006). Es decir, el fenómeno de la contracción durante la desecación, no está relacionado con la compactación que experimente ese suelo (Peng et al., 2012). Aunque ambos efectos producen reducción del volumen de la masa, cada uno trabaja sobre un

sistema distinto de poros. En otras palabras, un incremento en la energía de compactación no anulará el efecto de la contracción.

Luego, para evitar la aparición de fisuras o grietas que aparecen en las juntas constructivas verticales durante la construcción de muros de tapia, se supondría adecuado modificar los dos parámetros principales que controlan la contracción, esto es, el contenido de humedad y/o de arcilla presente en el suelo (Chao-Sheng et al., 2011).

Sin embargo, si se disminuye la humedad por debajo de la necesaria para la compactación, la "cohesión" de la fracción fina se opondrá al esfuerzo dando por resultado una compactación ineficiente, es decir, un material suelto.

Por otra parte, la reducción el contenido de arcillas conlleva una merma de los efectos positivos que la cohesión aporta. Así, la supresión completa de la arcilla del material-suelo, si es que ello fuera posible, daría por resultado una masa del tipo friccional que luego del desecamiento, produciría una estructura cuyo material fácilmente se desmoronaría en busca de su ángulo de reposo.

### **3. OBJETIVO**

El presente trabajo, tiene como objetivo general establecer un procedimiento constructivo que permita controlar la fisuración de las juntas verticales constructivas en muros de tapia durante su proceso de desecamiento. Para ello, en lugar de reducir los parámetros que controlan la contracción: contenido humedad y/o arcillas, se emplean aquellos para generar un mecanismo que actúe en la interfaz entre bloques-tapia consecutivos, dotando a la unión entre ellos de continuidad estructural. Para lograr este objetivo se propone cambiar la junta vertical tradicional por otra que forma un cierto ángulo con el plano horizontal, en adelante llamada "junta oblicua".

De este objetivo general se desprenden dos objetivos específicos: 1) Analizar las variables y procesos que intervienen en la generación de la apertura de la junta constructiva vertical durante el desecamiento y 2) Determinar a partir de ensayos de muretes y probetas, la eficacia de la solución propuesta y además definir el valor del ángulo mínimo de la junta oblicua para evitar la aparición de fisuras de retracción, tal que permita lograr un grado de continuidad estructural satisfactorio.

### **4. METODOLOGÍA**

Se realizaron dos series de tapia, ejecutadas con materiales y técnicas tradicionales usadas en la construcción de muros de tierra apisonada. En la primera serie, muretes, se trabaja con humedades por encima y debajo de la óptima Proctor. En la segunda, tapia-probetas se someten a flexión simple, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la unión entre los elementos. En ambas series se trabaja con juntas que forman diferentes ángulos de oblicuidad referidos al plano horizontal.

#### **4.1 Material y dispositivo**

El suelo usado en esta investigación pertenece a un horizonte superficial de suelo, tras el despeje, desbroce y retirada de la primera capa de tierra vegetal, es decir, material típico usado en tapia. La identificación según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) corresponde un suelo tipo SC: arena arcillosa, con un 17,4% de grava conformada por partículas duras angulosa de tamaño máximo 30 mm, entre las cuales un 5,9% corresponden a cantos redondeados, singulares en la masa de suelo (tamaño máximo 6,5 cm). Los granos arenosos son entre subredondeados y angulosos, con un 19,6% de finos de baja compresibilidad, mediana plasticidad y alta resistencia en seco. Se trata de un suelo transportado arenoso medianamente plástico de origen aluvial, tipificación definida de acuerdo a las normas IRAM 10509 (1982), ASTM D 2487 (2000), IRAM 10512 (1977), IRAM 10503 (2007).

La humedad óptima gravimétrica determinada en la muestra es 14,4% (figura 3). En la determinación se siguió las normas IRAM 10511 (1972) e IRAM 10519 (1970).

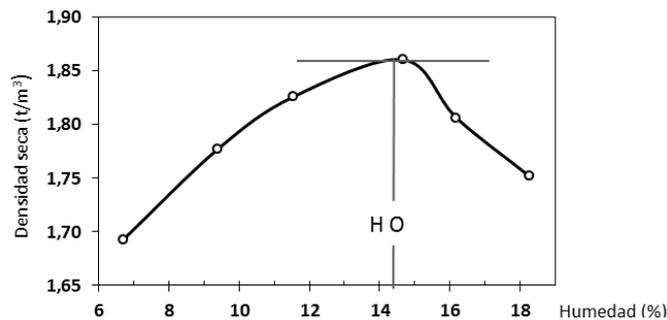


Figura 3. Ensayo Proctor estándar realizado sobre la muestra de suelo en estudio

Cada tapial de 0,75 m x 2,00 m de largo está formado por un tablero de madera contrachapada firmemente atornillado a un marco, con rigidizador central, de caño de acero soldado de 2 mm de espesor y (50x50) mm<sup>2</sup> de sección.

La compactación se realiza en tres pasadas por el mismo punto, lográndose una impronta final de 5 mm con rebote, acompañada de un sonido grave reconocible y característico en la construcción de tapia. El pisón usado es de madera dura (quebracho colorado), tiene una superficie de impacto rectangular de (6,5x5,0) cm<sup>2</sup> y un peso de 5,74 N, se deja caer libremente desde una altura de 0,30 m, dando por resultado una energía específica de compactación por impacto y unidad de volumen de 17,2 J/m<sup>3</sup>.

#### 4.2 Serie 1

Se construyen al aire libre cuatro muretes de tapias, de 0,63m de altura cada uno, caracterizados por su humedad de compactación y conformado cada uno por tres bloques-tapia de 0,18 m de ancho y largo variable de 0,58 m; 0,73 m y 0,73 m, ejecutados en seis capas de compactación. Se elige trabajar con una sola hilada (0,63m de altura), para facilitar la libre contracción volumétrica de los bloques horizontales.

Siguiendo la práctica usual en la construcción de muros de tapia, se reproduce la alternancia en la ejecución de los tres bloques-tapia que forman cada murete. Entonces, primero se realizan los bloques extremos del murete y 24 h después, el bloque central. Posteriormente, se protegen las muestras con una cubierta de chapa cincada que permite la libre circulación del aire, impidiendo el asoleamiento directo y el ingreso de la precipitación pluvial. Durante el desecamiento se registraron valores medios de temperatura máximo/mínimo de 33/20°C y humedad relativa media de 45%, datos extraídos del Servicio Meteorológico Nacional para la ciudad de Mendoza, Argentina.

Los tres bloques-tapia de cada murete se encuentran en contacto entre sí, por dos tipos de juntas distintas. La primera corresponde a la usualmente empleada: una junta vertical (90°), con escarificado de la cara lateral de la tapia “receptora” (anterior) que recibe a la tapia “nueva” (central). El segundo tipo de junta propuesta es una junta oblicua que forma un ángulo de 70° con el plano horizontal, construida mediante el tallado con azuela de la cara de contacto de la tapia receptora, laboreo realizado previo a la compactación de la tapia central (figura 4).

Durante dos meses posteriores a la construcción de los prototipos, se lleva un registro diario fotográfico de la evolución de las juntas verticales y oblicuas. En término medio, pasados 12 días se ha desarrollado la máxima apertura en junta vertical. Las juntas oblicuas no presentan apertura.

Finalizado el registro fotográfico se procedió a extraer muestras de cada murete. Se talló tres tipos de muestras por cada murete: sin junta, con junta oblicua y con junta vertical, ésta última sólo en el murete T4 que no mostró apertura. Sin embargo las dos probetas obtenidas rompieron durante su manipulación, evidenciando su baja capacidad mecánica.



Figura 4. A) Tapial y pisones. B) Vista general de la Serie1. C) Murete T1, juntas con contorneo en blanco. D) Registro de fisuras

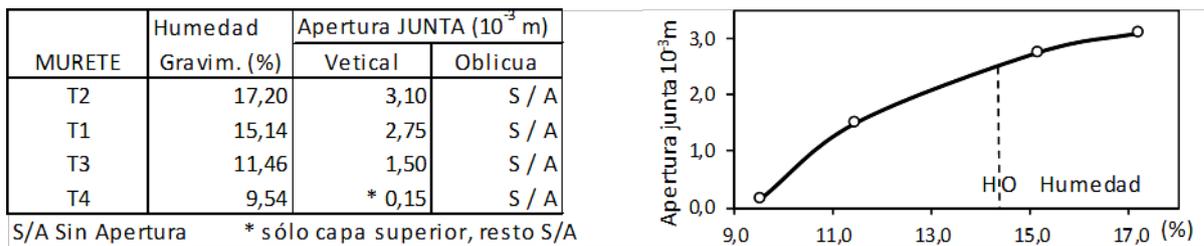


Figura 5. Valores de apertura medidos en función del grado de humedad de compactación y su representación gráfica

En los otros muretes T1, T2 y T3, con sus juntas verticales abiertas, se procede a retirar la tapia posterior y evaluar el estado de la cara de contacto de la tapia receptora, se observa la aparición de fisuras y microfisuras con forma de “V” invertida (figura 6).



Figura 6. Fisuras y microfisuras observadas en junta vertical, sobre cara de contacto de la tapia receptora

### 4.3 Serie 2

Se construyen al aire libre dos grupos de probetas, de 3,60 m de largo por 0,18 m de ancho, compuesto cada uno por 6 probetas-tapia construidas por compactación de una sola

tongada, con altura final de 8,3 cm. La base de las probetas es suelo natural humedecido a HO y compactado hasta obtener valores de densidad aparente semejante al murete T1. Entre la base y las probetas se interpone un film de polietileno para evitar la transferencia de humedad base-tapia.

Entre las probetas de cada grupo se emplea una junta oblicua con un ángulo referido al plano vertical que varía entre 64,3° a 31,7°. Al igual que en Serie 1, el ángulo en la cara receptora se obtiene por tallado con azuela y se mantiene la alternancia de un día en la construcción entre probetas consecutivas.

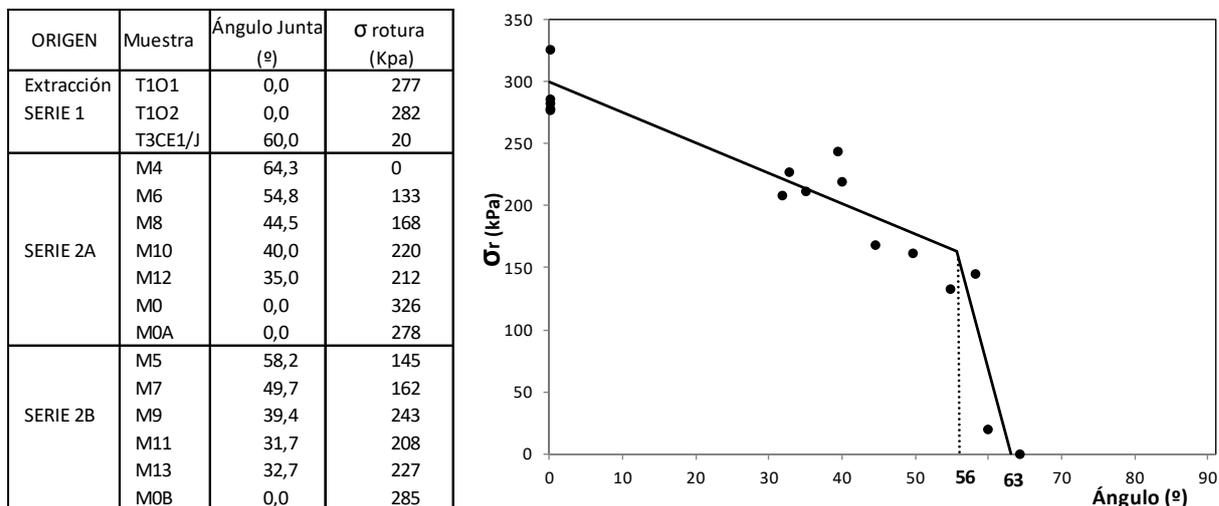


Figura 7. Tensión de rotura en flexión simple en función del ángulo de la junta oblicua y su representación gráfica

Durante el mes posterior a la construcción de la Serie 2, se lleva un registro diario fotográfico de la evolución de las juntas oblicuas. Posteriormente, cada grupo es cuidadosamente segmentado en 12 probetas de 0,42 m de largo, tal que su punto medio inferior coincide con el inicio de una junta oblicua. Finalmente, con el objetivo de evaluar la eficiencia de las juntas, cada probeta es ensayada a flexión simple, solicitadas por una carga concentrada creciente hasta la falla. Se sigue la norma ASTM C293 (2016). Sólo una probeta presenta apertura de su junta oblicua, con un valor máximo de 3,25 mm a los 4 días de finalizada, corresponde a la muestra M4, cuyo ángulo de junta con el plano horizontal es 64,30°.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Serie 1 indica que las juntas verticales constructivas de tapias ejecutadas con un suelo de las características antes descrita, generan apertura por contracción, cuya anchura está estrechamente relacionada con la humedad inicial de la muestra. Sólo una sensible reducción de la humedad de compactación ( $W=9,54\% < HO=14,4\%$ ) brinda una junta vertical sin apertura (murete T4). Sin embargo, este suelo se muestra disgregable y suelto en comparación con las otros muretes ensayados, además las probeta obtenidas de T4, fallaron en el plano de su junta, por manipulación al momento de retirarlas del murete, evidenciando una baja resistencia mecánica.

Ambas series de ensayos muestran claramente la eficacia de las juntas oblicuas en la construcción de tapia. En efecto, cuando se supera cierto ángulo límite referido al horizonte, 63° en este trabajo, se observa que la junta oblicua permanece cerrada y aún más, disminuyendo dicho ángulo, se obtienen valores de resistencia en la zona de interfaz comparables al material-suelo sin junta, lo que garantiza la continuidad estructural de la masa de suelo.

Se considera que la continuidad que brinda la junta oblicua se basa en tres fenómenos: 1) la difusión en la interfaz tapia receptora-posterior del agua intersticial y los minerales arcillosos

de la muestra, 2) el incremento de la energía de compactación al avanzar sobre la junta oblicua y 3) quizá más significativo, el efecto de la componente tangencial del impacto de la compactación que actúa en el plano de la interfaz entre tapias y su relación con la resistencia al corte de la masa de suelo.

### 5.1 Difusión de minerales arcillosos y el agua capilar

La figura 5 muestra claramente la estrecha relación entre la humedad inicial de la muestra de suelo y la contracción que esta experimenta durante su desecamiento. Se destaca que los prototipos ensayados comparten el mismo tipo de suelo e igual energía de compactación.

Una muestra de suelo durante su desecamiento evidencia un movimiento del agua que se inicia en las caras expuestas al ambiente que posee menor humedad, en dirección al núcleo de la masa debido a la retracción de los meniscos capilares. Además existe un movimiento de arriba hacia la base producido por la acción gravitatoria (Cirvini; Gómez Voltan, 2012). Entonces, una vez finalizada la construcción de la tapia posterior, esta se encuentra con un grado de humedad ligeramente superior que la tapia receptora, ejecutada el día anterior. Ello generaría la infiltración del agua desde la zona más húmeda a la más seca que se adiciona a un flujo gravitacional descendente. En el caso de las juntas oblicuas este flujo atraviesa la interfaz tapia receptora-nueva.

Esta difusión del agua produce un incremento de las tensiones hidráulicas y la modificación de la concentración de arcilla en la pedoestructura, como se vio más arriba. Luego, la compresión generada por la retracción de los meniscos del agua capilar se suma a la difusión de la arcilla en la interfaz, ambos efectos aportan cohesión y adherencia al plano interfaz facilitando la continuidad de la masa de suelo.

### 5.2 Incremento de la energía de compactación volumétrica

Un efecto evidente que produce la compactación sobre base inclinada es que la altura de la capa compactada disminuye linealmente en la medida que el pisón se aproxima a la tapia receptora, dando lugar a un incremento de la energía específica de compactación con una mayor reducción de vacíos que, por una parte mejora las propiedades mecánicas de la masa de suelo y por la otra, incrementa el grado de saturación, efecto que facilita la difusión del agua capilar y de arcillas visto anteriormente.

### 5.3 Componente tangencial del impacto de compactación

Al aplicar el esfuerzo de compactación se generan en el interior de la masa de suelo un estado tensional variable. En aquellos puntos en que la tensión tangencial alcanza la resistencia al corte del material, se agota la capacidad del suelo dando paso a una fisura o micro-fisura (*crack*) con alteración de la conductividad hidráulica. Se considera que esta fisuración es aprovechada durante la desecación para dar inicio a una contracción a partir de estos planos de falla, percibido macroscópicamente como el inicio de apertura de la junta constructiva.

Varios investigadores, Boussinesq (1885), Mindlin (1936), Fröhlich, (1942), Wastergard (1935), entre otros, han afrontado el problema de la distribución de tensiones en un semi-espacio sometido a diferentes tipos de cargas. La cuestión la abordan desde la teoría de la elasticidad, aplicada a un medio ideal (homogéneo, continuo, lineal, isótropo o estratificado y sin peso) bastante alejado de las características de la masa de suelo. Sin embargo, las soluciones halladas han brindado resultados satisfactorios a varios problemas prácticos de la Ingeniería de Suelos. Por ello, se sigue la solución propuesta por Boussinesq.

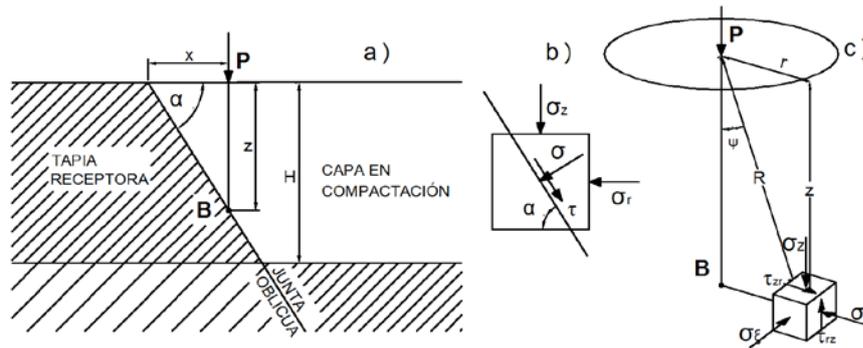


Figura 8. Estado tensional en un elemento B ubicado sobre la junta oblicua.

Para el caso de una carga concentrada:

$$\tau = \frac{3Pz^2 r}{2\pi R^5} \quad \sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} \quad \sigma_r = \frac{P}{2\pi R^2} \left[ \frac{3r^2 z}{R^3} + \frac{(1-2\nu)R}{(R+z)} \right] \quad \sigma_\xi = \frac{(1-2\nu)P}{2\pi R^2} \left[ \frac{z}{R} + \frac{R}{(R+z)} \right] \quad (2)$$

Donde: P: la carga concentrada actuando en el macizo semi-infinito (N).

ν: coeficiente de Poisson (adimensional).

R, Ψ, r: coordenadas polares del punto en estudio (m,rad,m, respectivamente).

z: profundidad del punto referido a la frontera del macizo (m).

τ, σ<sub>z</sub>, σ<sub>r</sub>, σ<sub>ξ</sub>: estado tensional generado por P a la profundidad z (kPa)

De acuerdo a estas expresiones, en un elemento ubicado sobre un plano paralelo a la frontera, el estado tensional será máximo cuando el punto en estudio se encuentre sobre la recta de acción de la carga P, en este caso las ecuaciones (2) toman la forma:

$$z = R; \quad r = 0; \quad \Psi = 0 \quad \tau = 0 \quad \sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \quad \sigma_r = \frac{(1-2\nu)P}{4\pi z^2} \quad \sigma_\xi = \frac{3(1-2\nu)P}{4\pi z^2} \quad (3)$$

De acuerdo a las ecuaciones (3) la tensión tangencial es nula, luego las otras tensiones corresponden a un estado principal, es decir, σ<sub>z</sub>= σ<sub>1</sub>; σ<sub>ξ</sub>= σ<sub>2</sub> y σ<sub>r</sub>= σ<sub>3</sub>.

Por otra parte, la resistencia al corte de la masa de suelo, definida en tensiones efectivas es:

$$\tau = c + \sigma' \operatorname{tg} \theta \quad (4)$$

Donde: τ: Resistencia al corte (kPa)

c: cohesión (kPa)

σ': Tensión efectiva según ecuación (1) (kPa)

tgθ: ángulo de fricción interna del suelo (adimensional)

El estado principal de la ecuación (3) puede ser representado junto con la resistencia al corte dado por (4) en un círculo de Mohr.

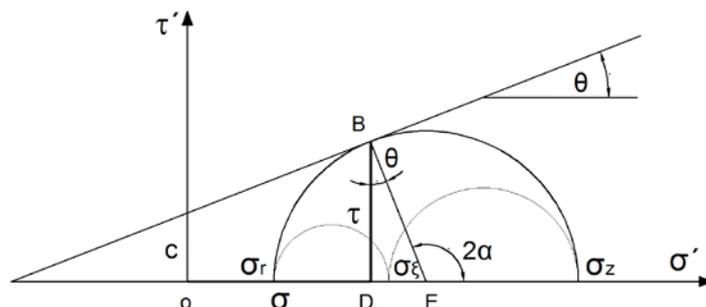


Figura 9. Círculo de Mohr. Representación gráfica de la resistencia al corte y del estado de falla

Se asume que la carga P es el choque o impacto que sobre la masa de suelo ejerce el pisón (no su peso), y que el plano de la junta oblicua corresponde a un plano de falla medido respecto la tensión principal  $\sigma_z = \sigma_1$ . El punto B representa la falla por corte de la masa de suelo originada en el golpe del pisón cuando se alcanza la resistencia al corte, mientras que los segmentos OD y DB corresponden respectivamente a las tensiones normal  $\sigma$  y tangencial  $\tau$  desarrolladas en ese plano de falla, luego de la Figura 9:

$$\theta = 2\alpha - \frac{\pi}{2} \quad \text{luego: } \alpha = \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

Donde:  $\theta$ : ángulo de fricción interna del suelo (rad)

$\alpha$ : ángulo entre el plano de falla y en plano de acción de la tensión principal  $\sigma_1 = \sigma_z$  (rad)

La ecuación (5) establece una relación entre el ángulo del plano de la junta y el ángulo de fricción interna del suelo usado, y por lo tanto define la condición límite para evitar la apertura en la junta oblicua:  $\alpha_{lim} = \theta/2 + 45^\circ$ , para  $\alpha$  y  $\theta$  expresados en grados.

La tensión tangencial  $\tau$  actuando en el plano de la junta, por una parte tiene un efecto beneficioso, pues produce el rolado del material suelto de la interfaz tapia receptora-posterior, que es desplazado hacia abajo, "limpiando" la junta. Por otro lado, estas tensiones pueden agotar la capacidad a corte de la masa, cuando se adquiere cierto rango de inclinación según la ecuación (5), dando lugar a la generación de fisuras y micro-fisuras que facilitan el inicio de la contracción en la interfaz.

Finalmente, desde el punto de vista práctico el uso de la junta oblicua presentaría dos inconvenientes: a) no es común disponer de parámetros geotécnicos del suelo como el ángulo de fricción interna y b) el tallado de la junta obliga al retiro de una parte que ya fue construida, o sea la duplicación del laboreo.

Para suelos como los empleados usualmente en la construcción de muros de tapias, un valor orientativo útil es el ángulo de reposo, es decir aquel que adquiere el material suelto acopiado en un montículo. Sin embargo, se debe notar que esta aproximación es tanto menos precisa cuanto mayor es la fracción fina presente en la muestra de suelo, en particular la proporción de arcillas.

La figura 7 indica el valor límite de  $\alpha_{lim} = 63^\circ$  para el suelo usado en este trabajo. El ángulo de reposo del mismo suelo fue  $\Theta_0 = 34^\circ$ , luego:  $\alpha_{lim} = \Theta_0/2 + 45 = 62^\circ$ , como se muestra, el ángulo de reposo brinda un valor orientativo, siempre que el contenido de finos no sea alto.

En relación a la doble labor que implica a junta oblicua, la figura 8 permite determinar la expresión de cálculo del volumen retirado, por unidad de espesor:

$$V_e = \frac{zx}{2} \quad \text{además: } x = ztg\alpha \quad , \text{reemplazando} \quad V_e = z^2tg\alpha \quad (6)$$

Dónde:  $V_e$ : Volumen por unidad de espesor ( $m^3/m$ )

$x$ ;  $z$ : respectivamente, abscisa y ordenada de un punto sobre la junta oblicua (m)

La ecuación 6 indica que volumen tiene variación cuadrática con la altura de la capa, luego, pequeñas disminuciones de la altura de la hilada provocan significativas reducciones del volumen a retirar en la tapia receptora. En otras palabras, se recomienda reducir en lo posible la altura de hilada en los muros con junta oblicua.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizaron las principales variables que intervienen en el proceso de contracción de las juntas verticales constructivas usadas en la ejecución de muros de tapia. Se concluye que el contenido de humedad y la fracción de minerales arcillosos de la masa del suelo, tienen un indiscutido protagonismo en el proceso.

Se construyeron muretes y probetas-tapia con las técnicas tradicionales y materiales usuales, las que luego se ensayaron. En la Serie1, los muretes, se mantuvo constante el

tipo de suelo, técnica y energía de compactación, variando en la muestra la humedad inicial empleada en la ejecución de los bloques e introduciendo el uso de las juntas oblicuas, además de las verticales de uso común. El seguimiento del proceso de desecamiento de las tapias muestra que las juntas oblicuas se mantuvieron cerradas en todos los casos, mientras que las verticales se abrieron, excepto en el murete que presentaba bajo contenido de humedad inicial. Sin embargo, este bloque se mostró más disgregable y suelto que los otros que tenían una mayor humedad inicial.

En la serie 2, se mantuvo invariable el tipo de suelo, técnica y energía de compactación y la humedad inicial (se usó la humedad óptima HO), variando solo el ángulo de la junta oblicua entre las probetas. Al mes de construidas las muestras se ensayaron a flexión simple hasta la rotura, haciendo coincidir el plano de aplicación de la carga con el inicio inferior de cada junta.

El ensayo demuestra la eficacia de la junta oblicua para permanecer cerrada durante el desecamiento y además mantener la continuidad estructural con valores de resistencia comparables a las muestras sin junta. Se analizaron los mecanismos que generan esta eficacia en la junta oblicua.

Los resultados obtenidos se consideran de valiosa implicancia práctica. En efecto, la junta vertical tradicional cuando presenta abertura provoca en el elemento muro un plano vertical de debilidad estructural con concentración de tensiones al inicio y fin de la junta. En cambio las juntas oblicuas mantienen el “monolitismo” del muro, es decir la continuidad estructural, que se traduce en una mayor capacidad mecánica antes cargas y acciones.

También se determinó la existencia de un ángulo límite de inclinación de la junta ( $\alpha_{lim} = 63^\circ$  para el suelo usado en este trabajo), tal que una vez superado, la junta oblicua pierde su eficacia siguiendo el comportamiento de una junta vertical común, es decir, la junta se abre por contracción durante el desecamiento.

En próximas investigaciones se evaluarán otros tipos de suelos, incluyendo la determinación de sus ángulos de fricción interna en cámara triaxial.

Finalmente, se brinda solución a inconvenientes de índole práctica derivados de este procedimiento: se propone el uso del ángulo de reposo como valor de referencia aproximado y, una merma en la altura de hilada para reducir el doble laboreo que implica el tallado de la tapia receptora.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C293 (2016). Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading). USA: ASTM International

ASTM D 2487 (2017). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). USA: ASTM International

Boussinesq, M. J. (1885). Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, avec des notes étendues sur divers points de physique mathématique et d'analyse. Paris: Gauthier-Villard imprimeur libraire.

Braudeau, E. F.; Mohtar, R. H. (2014). A framework for soil-water modeling using the pedostructure and Structural Representative Elementary Volume (SREV) concepts. *Frontiers in Environmental Science*, 2:24. Disponible en <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2014.00024/full>

Brewer, Roy (1965) Fabric and mineral analysis of soils. *Soil Science*, v.100, issue 1.

Chao-Sheng Tang, Bin Shi, Chun Liu, Wen-Bin Suo, Lei Gao. (2011). Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science* 52 (2011) 69–77.

Chertkov, V. Y (2014). An integrated approach to soil structure, shrinkage, and cracking in samples and layers. Israel: Technion – Israel Institute of Technology. Disponible en: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1404/1404.1696.pdf>

- Cirvini, S., Gómez Voltan, J. (2012). Test and device to evaluate the capillary absorption in soil specimens of adobe and rammed earth. *Rammed Earth Conservation, Restapia 2012*, Valencia, Spain, conservation (Editors: Mileto, Vegas, Cristini) Taylor and Francis Group- UK, pp. 643-648.
- Cornelis, M.; Corluy, J.; Medina H.; Díaz, J.; Hartmann, R.; Van Meirvenne M.; Ruiz, M., (2006) Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve. *Geoderma* 137 179–191.
- Dexter, A. R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 11:199-238. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- Fröhlich, O. K. (1942). La repartición de presiones en el terreno de cimentación con especial examen del fenómeno de plasticidad. España: *Revista de Obras Públicas*
- Gandreau, D.; Delboy, L. (2012). Inventaire de l'architecture de terre. Wheap - Programme du Patrimoine Mondial pour L'architecture de Terre. France: CRATerre-ENSAG. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002170/217037f.pdf>
- Guillaud, H. (2012) Pisé: evolution, innovations, resistences and future directions. En: C. Mileto, F. Vegas, V. Cristini (eds) *Rammed earth Conservation*. London: Taylor & Francis Group,
- IRAM 10503 (2007). Suelos disturbados. Método de determinación de la densidad relativa de los sólidos y de la densidad de los sólidos de un suelo. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- IRAM 10509 (1982). Mecánica de suelos. Clasificación de suelos, con propósitos ingenieriles. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- IRAM 10511 (1972). Mecánica de suelos. Método de ensayo de compactación en laboratorio. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- IRAM 10512 (1977). Mecánica de suelos. Métodos de análisis granulométrico. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- IRAM 10519 (1970). Mecánica de suelos. Método de laboratorio para la determinación de humedad. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- Lacoste, P.; Premat, E.; Castro, A.; Soto, N.; Aranda, M. (2012). Tapias y tapiales en Cuyo y Chile (Siglos XVI-XIX). *APUNTES*. vol. 25, núm.2., 182-199 Bogotá, Colombia.
- Leong, E. C; Wijaya, M. (2015). Universal soil shrinkage curve equation. *Geoderma* 237–238 (2015) 78–87.
- Mindlin, R. D. (1936). Force at a point in the interior of a semi-infinite solid. *American Institute of Physics (Department of Civil Engineering, Columbia University), Physics*, Volume 7, Issue 5, p.195-202. Columbia. USA.
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Alemania: Forschungslabor für Experimentelles Bauen, Universidad de Kassel.
- Peng, X.; Zhang, Z.B.; Wanga, L.; Gan, L. (2012). Does soil compaction change soil shrinkage behaviour. *Soil & Tillage Research* 125.
- Peth S.; Nellesen J.; Fischer G.; Horn R. (2010). Non-invasive 3D analysis of local soil deformation under mechanical and hydraulic stresses by  $\mu$ CT and digital image correlation. *Soil & Tillage Research* 111, 3-18.
- Proctor, R. R. (1933). Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News Record*, Vol. III. n. 9, p. 148-156. New York
- Rico, A.; del Castillo, H. (2003). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas*, Vol. 1. México: Limusa
- Sowers G.; Sowers F. (1972). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa-Wiley S.A.
- Teerzaghi K., Peck, B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley & Son, Inc.
- Westergaard, H. M. (1935). General solution of the problem of elastostatics of an n-dimensional homogeneous isotropic solid in an n-dimensional space. *Bulletin of American Mathematical Society*, v. 41, n. 10, p. 695-697. USA.

## AUTORES

José Gómez Voltan *ingeniero civil* (Universidad Nacional de Cuyo) con una formación de postgrado en el tema conservación patrimonial y restauración de edificios históricos en áreas sísmicas, así como una importante experiencia en el diagnóstico de patologías. Es *Profesional principal de CONICET* en el INCIHUSA – CCT Mendoza - Argentina. Coordina equipos en la restauración de edificios históricos y el desarrollo tecnológico, realiza tareas de transferencia y dirige el área técnica y experimental de la Unidad "Historia y Conservación Patrimonial". Es autor (junto a Cirvini) de una patente de invención de un dispositivo y procedimiento de ensayo de humedad capilar en muros de tierra cruda.

Silvia Augusta Cirvini es *doctora en Arquitectura* (Universidad Nacional de Tucumán) y *arquitecta*. Es *Investigadora principal de CONICET* en el INCIHUSA – CCT Mendoza - Argentina. Su formación y producción se orienta a la investigación histórica la investigación aplicada y transferencia vinculada al campo de la preservación y restauración del Patrimonio arquitectónico y urbano. Dirige en el INCIHUSA una unidad de trabajo con grandes proyectos sobre patrimonio cultural y rutas culturales. Ha formado recursos humanos en el campo de la gestión, la interpretación y la activación del patrimonio cultural.