

Variabilidad de la adherencia de revoques sobre paneles de tierra alivianada encofrada según distintos tipos de capa de agarre

Plaster adhesion variability on lightened earth panels with formwork according to different types of grip layer

Gonzalo García Villar (*)

RESUMEN

Los revoques de tierra son las capas finales de las construcciones con tierra y su función principal es protegerla de los efectos de la intemperie. En muros de tierra alivianada encofrada se generan adherencias diferenciales donde la madera de la estructura queda expuesta. Las posibles grietas y desprendimientos pueden afectar la protección de los muros y su durabilidad. Esta investigación propone capas de agarre previas a los revoques gruesos sobre las maderas expuestas, y evalúa la adherencia mediante ensayos de arrancamiento directo y cizallamiento. Los ensayos confirmaron que la compatibilidad del muro, capas de agarre, y revoques gruesos está dada por la similitud en los materiales componentes, como son tierra, arena y fibras, lo cual mejora la adherencia mecánica. Para arrancamiento directo el valor más elevado fue 0.07 N/mm², y para cizallamiento 0.08 N/mm².

Palabras clave: Revestimiento; arrancamiento directo; cizallamiento; durabilidad.

ABSTRACT

Earthen plasters are the final layers of constructions with earth and their main function is to protect it from the weathering. In formwork light earth walls, differential adhesions are generated where the wood of the structure is exposed. Possible cracks and detachments can affect the protection of the walls and their durability. This research proposes grip layers prior to thick plasters on exposed wood, and evaluates adhesion through direct pull-out and shear tests. The tests confirmed that the compatibility of the wall, grip layers, and thick plasters is given by the similarity in the component materials, such as earth, sand and fibers, which improves mechanical adhesion. For direct pull-out the highest value was 0.07 N / mm², and for shear 0.08 N / mm².

Keywords: Coating; direct pull-off; shearing; durability.

(*) Arquitecto. CONICET, FAU, Tucumán (Argentina).

Persona de contacto/Corresponding author: arqgonzalogv@gmail.com.ar (G. García Villar)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7697-4640> (G. García Villar)

Cómo citar este artículo/Citation: Gonzalo García Villar (2023). Variabilidad de la adherencia de revoques sobre paneles de tierra alivianada encofrada según distintos tipos de capa de agarre. *Informes de la Construcción*, 75(571): e507. <https://doi.org/10.3989/ic.6211>

Copyright: © 2023 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 11/07/2022
Aceptado/Accepted: 20/04/2023
Publicado on-line/Published on-line: 14/07/2023

1. INTRODUCCIÓN

Los revoques exteriores confieren a los muros una protección frente a los agentes atmosféricos y biológicos, por lo tanto, tienen la función de hacer frente al proceso de degradación involucrado (1, 2). De no estar presentes los revoques, estos agentes desencadenan procesos erosivos que pueden afectar la estabilidad y la función estructural de los muros (3). En las construcciones con tierra este rol de protección resulta especialmente importante en presencia de humedad, debido a la labilidad del material frente al agua. Sin embargo, los revoques también sufren los efectos del intemperismo, que se manifiestan de diversas formas: acción abrasiva del viento, desgaste mecánico por lluvia, lavado por escurrimiento de agua, grietas provocadas por movimientos sísmicos, fisuras por dilataciones y por contracciones de los materiales ante cambios de temperatura, fracturas por congelamiento del agua al interior del revoque o degradación por lluvia ácida (4, 5).

Asimismo, malas prácticas como el empleo de revoques a base de cemento sobre muros con tierra son habituales y pueden resultar contraproducentes. Estos revoques resultan en adherencias débiles y, en consecuencia, se agrietan con facilidad. Este aspecto es señalado por Stazi y colegas (6) como un factor clave en la pérdida de la adherencia: cuando existe gran diferencia entre el módulo de elasticidad de la pared y el del revoque, los cambios de tensión debidos a sobrecargas, humedad y variaciones de temperatura pueden generar una tensión diferencial capaz de reducir la adherencia entre el revoque y la superficie del muro, además de provocar agrietamientos y desprendimientos.

En cuanto a la adherencia, la norma IRAM 1764 (7) la define como la resistencia a tracción máxima entre un mortero y un soporte definido. Por su parte el Institut de Promoció Ceràmica expone que la adherencia es un fenómeno que tiene lugar cuando se está frente a un sistema formado por dos materiales que se pretenden unir denominados adherentes o adherendos, y un tercer material que se llama junta o unión adhesiva (8). En el caso de los revoques de tierra, la junta o unión adhesiva la conforma la cara interna de la mezcla del revoque, que también llamamos adherente, siendo la arcilla contenida en el revoque la principal responsable de ello. La adherencia puede ser mecánica o química. La primera es un fenómeno físico dado por trabazón entre los materiales componentes en los revoques y los soportes, donde la presencia de poros en las superficies favorece el proceso. La segunda se produce por la formación de compuestos e interacción química entre moléculas. En los revoques de tierra se dan los dos tipos de adherencia: la mecánica está posibilitada por los materiales empleados y la forma y rugosidad de las superficies, sean fibras, arenas, o limos contenidos en el revoque o en el sustrato, que proporcionan una trabazón al momento del secado; la química se da por interacción entre los materiales del sustrato, la arcilla y otros materiales cementantes contenidos en el revoque, que reaccionan estableciendo uniones durante el proceso de secado. Las capas de arcilla pueden adherirse unas a otras para formar bloques, y entre estos para integrar flóculos, a causa de cargas electroquímicas (9), esto le permite adherirse a los sustratos y generar mayor cohesión con otros materiales. Su mayor o menor fuerza adhesiva se da principalmente por la superficie específica de las arcillas, lo que está ligado a su capacidad de intercambio catiónico (10). Los revoques de tierra pueden aplicarse sobre distintas superficies, resultando más compatibles sobre paramentos del mismo material. Sin embargo, la adherencia del revoque puede sufrir variaciones cuando

se aplica sobre muros mixtos, es decir, que presentan distintos materiales en su confección; tal es el caso de la técnica constructiva tierra alivianada encofrada (TAE). Esta es una técnica de construcción con tierra del grupo de los entramados, es decir una técnica compuesta por una armazón de madera relleno con fibras embarradas que conforman bloques sólidos en los espacios vacíos de la estructura. Por la forma de resolución de TAE, ambos materiales quedan simultáneamente expuestas al momento de aplicar los revoques. Esto provoca adherencias diferenciales del revoque sobre el muro, y estas diferencias pueden verse reflejadas en fisuras paralelas a la estructura de madera y en una reducción de la adherencia general. Por lo tanto, para revocar sobre este tipo de muros es preciso la aplicación de una capa intermedia, o capa de agarre, que homogenice la superficie y garantice una adherencia uniforme. Al mismo tiempo, esta capa colabora en retardar la absorción del agua que ejerce la madera sobre la mezcla de revoque aplicado, cuestión que puede derivar en un desprendimiento o un agrietamiento excesivo del revoque (11).

Sobre las capas de agarre, el estudio realizado por Delinière y colegas (12) plantea que la aplicación de una capa previa que homogenice los sustratos de los muros colabora en reducir la dispersión de los valores de adherencia de las muestras evaluadas. Por su parte, Franz Volhard (13) plantea la posibilidad de recubrir toda la superficie de los muros de TAE con alguna malla como esterillas o cañizo para homogeneizar antes de aplicar el revoque, sin embargo, reconoce que finalmente posee poca solidez y el revoque se encuentra desvinculado de la pared. También propone la utilización de tela de arpillera, yute, o fibras de vidrio, no obstante, plantea que la técnica tradicional es realizar una subcapa, previa a los revoques, constituida por una mezcla con abundancia de fibras sobre las maderas expuestas. Moreteau (14) sugiere que dicha capa de agarre contenga, además de fibras, tierra y arena, harina de trigo en forma de engrudo. Según el autor, este preparado con harina mejora el cuerpo de sujeción, sobre todo cuando la tierra es débilmente arcillosa o el sustrato es relativamente liso. En referencia al engrudo de harina de trigo, se evaluó como adhesivo entre maderas obteniendo buenos resultados (15). Este material es considerado bio adhesivo, y otras investigaciones lo caracterizan como apto para diversos usos adhesivos como sellos postales, sellado de fondos de bolsas de papel, confección de cartón ondulado (16), y conservación de papel (17) entre otros. La harina refinada de trigo está compuesta por almidón, gluten, y otros azúcares; el almidón se compone de amilosa y amilopectina, las cuales químicamente son polisacáridos, largas cadenas poliméricas con uniones químicas difíciles de romper, la primera es lineal, y la segunda altamente ramificada, las que finalmente aportarían uniones adherentes. Por su parte, el gluten es químicamente una proteína, macromolécula que está compuesta por la unión de grandes cantidades de aminoácidos, lo que otorga una cohesión interna a diversos preparados (18).

Si bien existen algunos estudios sobre las propiedades adherentes de los revoques de tierra, estos están enfocados principalmente a muros de superficies continuas como muros de adobe, tapial o incluso ladrillo cerámico hueco (5, 19, 20). Sin embargo, no existen aún conocimiento científico acerca del desempeño de revoques aplicados sobre muros de composición mixta como es el caso de la técnica TAE, en donde las superficies no son continuas ni homogéneas y en el que se requiere un tratamiento más complejo para su resolución (12, 14); ni tampoco de la efectividad y conveniencia de uso de los

dos tipos de ensayos indicados en la normativa y literatura, arrancamiento directo (7) y corte o cizallamiento (19). En tal sentido, este estudio analiza, por un lado, la variabilidad de la adherencia de los revoques de tierra sobre los sectores con madera expuesta en muros de TAE con el objetivo de comparar el desempeño de distintas capas de agarre mediante los ensayos de arrancamiento directo y cizallamiento; por otro lado, compara el desempeño entre ambos ensayos señalados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales para muros, capas de agarre y revoques

Para llevar a cabo el estudio, el diseño experimental planteado contempló la ejecución de distintos tipos de capas de agarre aplicados en paneles de TAE sobre los que se ejecutaron los revoques de tierra a ensayar.

La tierra utilizada tanto en los paneles como en las capas de agarre y revoques procede del oeste de la ciudad de San Miguel de Tucumán (Tucumán, Argentina). Este suelo se desagregó, y se caracterizó por el método de Bouyoucos y por tamizado en seco (21). Se determinaron el índice de plasticidad según norma IRAM 10501 (22) y el coeficiente de actividad de las arcillas según el método propuesto por Skempton (23). La arena utilizada fue extraída de la cantera La Aguadita, al norte de la ciudad de Las Talitas y fue tamizada en tamiz N°10 obteniéndose partículas menores o iguales a 2 mm. La fibra empleada para la confección del muro de TAE, capas de agarre y revoques se denomina malhoja (24) o paja de caña (25) y es el residuo agrícola de cosecha de la caña de azúcar, *saccharum officinarum*, correspondiente a sus hojas, las cuales poseen un aspecto chato, un ancho entre 1,5 cm y 2,5 cm y un largo que varía según las roturas en la cosecha entre 4 y 20 cm. En este caso la malhoja se obtuvo en forma de mega fardo, procedente de la Ciudad de Los Ralos, al este de Tucumán. Los materiales empleados en las capas de agarre son: tela de lienzo, tela de arpillera, malhoja, tierra, engrudo de harina de trigo y arena. La tela de lienzo utilizada es un material de color blanco compuesto por fibras de algodón de trama cerrada, cuya separación entre fibras es imperceptible dando un aspecto continuo. La tela de arpillera utilizada es de color marrón claro, compuesta por fibras vegetales de 1 mm de espesor de yute, planta herbácea fibrosa, de tacto robusto, cuya separación entre fibras de 1,5 mm.

La tierra base (TB) para realizar capas de agarre y revoques consistió en una mezcla de 3 volúmenes de la tierra desagregada, y 1 volumen de bosta de vaca desagregada, ambas tamizadas en seco en tamiz nro. 10, y luego remojadas en un recipiente con agua hasta tapar la superficie y estacionada 30 días.

2.2. Preparación del muro experimental de TAE

Los paneles se realizaron con tabla de obra de pino de 1" x 5" y sus dimensiones fueron de 80 cm x 80 cm, con 3 tablas equidistantes entre sí dentro del panel. La tierra para la elaboración del relleno del panel se diluyó en agua durante 7 días con un batido diario para lograr la correcta humectación de todo el material. El encofrado se realizó con tablas de obra de 1" x 5" atornilladas a la estructura maestra del panel experimental. El procedimiento consistió en sumergir la malhoja en tierra previamente mezclada con 2 partes de agua, luego ir tomando manojos de fibras y escurrir todo el líquido hasta que no chorree, y posteriormente rellenar manualmente con

estas fibras la estructura encofrada, tomando la precaución de presionar lo máximo posible y ocupar todos los huecos. Luego del relleno total, se estacionaron los paneles durante 30 días para lograr el secado que permitiese la ejecución de las capas de agarre y revoques.

2.3. Determinación de dosificaciones para revoques experimentales

Para determinar la dosificación óptima de los materiales del revoque a utilizar se definieron cuatro muestras diferentes, presentadas en la tabla 1.

Tabla 1. Composición de las muestras.

Identificación	Composición en volumen
TD	Tierra desagregada (1)
TB	Tierra base= tierra: bosta (3:1)
TA1	Tierra base, arena, malhoja (1:1:0,5)
TA4	Tierra base, arena, malhoja (1:4:1)

La dosificación óptima debía proveer un revoque estable, firme, que no se fisurase, con la menor retracción posible para que, en el proceso de secado, no se desprendiera del soporte, es decir que no provocase disminución en la adherencia. Las cuatro muestras fueron sometidas a dos test simples de laboratorio: retracción lineal y adherencia por golpe.

a) Retracción lineal

Para la realización del test de retracción lineal se siguió un procedimiento similar al expuesto en la norma ASTM D4943 (26), pero agrandando la longitud del cajón para visualizar mejor los resultados. Se prepararon las muestras con cantidad de agua necesaria para lograr estado plástico, fueron mezcladas durante 2 minutos y colocadas en los moldes correspondientes al test, cuyas dimensiones son 60 cm x 4 cm x 4 cm. Se las dejó secar durante 15 días en un ambiente con una temperatura de 25°C y humedad constante. Para finalizar se observaron las retracciones lineales por secado de la muestra y se midieron en milímetros los anchos de los espacios vacíos.

b) Adherencia por golpe

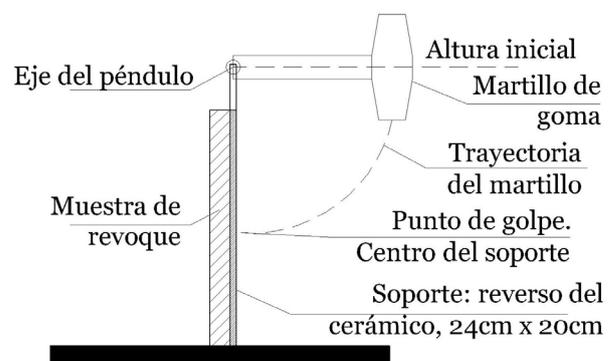


Figura 1. Test de adherencia por golpe.

Para la realización del test de adherencia por golpe se adaptó el procedimiento propuesto por Minke (27), reemplazando

ladrillos cerámicos macizos por el reverso de un cerámico de 24 cm x 20 cm, considerando que los segundos presentan una superficie más homogénea y estandarizada que los primeros. Se preparan las muestras con cantidad de agua necesaria para lograr plasticidad, se humedece la superficie posterior del cerámico y se aplican las mezclas con un espesor de 1,5 cm. Se dejan secar de forma horizontal durante 7 días en un ambiente con una temperatura de 25°C y humedad constante. Luego, las muestras de revoque que no se desprendieron del cerámico durante el secado, se sometieron a golpes con un martillo de goma en la parte central del frente del cerámico con caída desde un ángulo recto en forma de péndulo hasta lograr desprendimientos (figura 1).

2.4. Acondicionamiento de superficies y aplicación de capas de agarre

Se realizaron paneles experimentales de TAE para cada tipo de ensayo: arrancamiento directo y cizallamiento. Las capas de agarre están compuestas por un líquido que cumple la función de puente adherente para humedecer y justamente otorgar adherencia, y una trama de fibras para dar continuidad y homogeneidad al sustrato.

De esta forma el panel 1 se ejecutó con un puente adherente en base a una mezcla de arena, tierra en estado viscoso y engrudo de harina de trigo (C) en idénticas proporciones volumétricas (1:1:1); el panel 2 con un puente adherente a base de tierra en estado viscoso (T); y el panel 3 con un puente adherente a base de engrudo de harina de trigo (E). A su vez en cada uno de los paneles se ejecutaron tres tipos de trama de fibras de homogeneización para completar la capa de agarre: malhoja (M), lienzo (L) y arpillera (A). En la figura 2 se expone mediante un organigrama la propuesta de las capas agarre según cada panel.

PANEL	Capa de agarre			Tipo de ensayo
	PDA	ECF		
		Malhoja	Tela de lienzo	
1	Arena + Tierra + Engrudo			Arrancamiento directo
				Cizallamiento
2	Tierra			Arrancamiento directo
				Cizallamiento
3	Engrudo			Arrancamiento directo
				Cizallamiento

Figura 2. Organigrama de propuesta de capas de agarre por panel. (Los paneles de cizallamiento se duplicaron para lograr las 6 repeticiones por muestra).

a) Ensayo de arrancamiento directo

Sobre las tablas verticales internas se colocaron seis réplicas de capas de agarre equidistantes, de malhoja en el izquierdo, lienzo en el central y arpillera en el derecho. Cada trama de fibras se embebió en el puente adherente correspondiente al panel de trabajo antes de adherirlas. El tamaño de las capas de agarre fue de 14 cm x 7 cm, al igual que el revoque final, que se ejecutó con 1,5 cm de espesor (Figura 3).



Figura 3. Capas de agarre en paneles para arrancamiento directo.

b) Ensayo de cizallamiento

Sobre las tablas verticales internas se colocaron seis réplicas, en dos tandas, tres en una instancia y 3 tres en otra instancia, de capas de agarre equidistantes, de malhoja en el izquierdo, lienzo en el central y arpillera en el derecho. Cada trama de fibras se embebió en el puente adherente correspondiente al panel de trabajo antes de adherirlas. El tamaño de las capas de agarre es de 12 cm x 12 cm, y revoques finales circulares de 10 cm de diámetro y 1,5 cm de espesor (Figura 4).



Figura 4. Capas de agarre en paneles para cizallamiento.

2.5. Ejecución del ensayo de arrancamiento directo

El ensayo de arrancamiento directo consiste en someter una muestra de revoque a un esfuerzo de tracción y medir el valor de la fuerza que logra la separación de las partes. Para el ensayo se diseñó y construyó un instrumento de medición que consiste en una estructura metálica atornillada a la estructura vertical del panel. Esta estructura tiene una polea canal de 2,5 cm de diámetro en la parte inferior externa sujeta mediante tornillo roscado y tuerca, por la que desliza un cable de acero conectado a la pieza vinculada al revoque. Sobre el cable se amarra un recipiente plástico al que se le agrega peso para lograr el arrancamiento, 500 g cada 10 segundos, vertidos de manera paulatina en los primeros 5 segundos. La pieza que se vincula directamente al revoque es un rectángulo de chapa de 6 cm x 8 cm con un gancho para agarrar el cable, y está adherida con pegamento epoxi para elementos de construcción y anclajes Sikadur-31 (Figura 5). Este instrumental es una adaptación del explicitado en la norma IRAM 1764 (7) correspondiente a “Método de ensayo para revoques y carpetas”. La adaptación descrita responde a la experimentalidad de los paneles y los revoques a ensayar. El sector de ensayo en los muros contiene una madera de escuadría colocada en forma vertical por lo cual se diseñó el instrumental siguiendo esta ortogonalidad, cuya pieza que se adhiere al revoque es rectangular, diferente a la pieza circular expuesta en la norma antes mencionada. Además se agranda el tamaño de las muestras y del instrumental para lograr mayor fiabilidad de los ensayos y reducir la pérdida de exactitud por la experimentalidad del mismo.

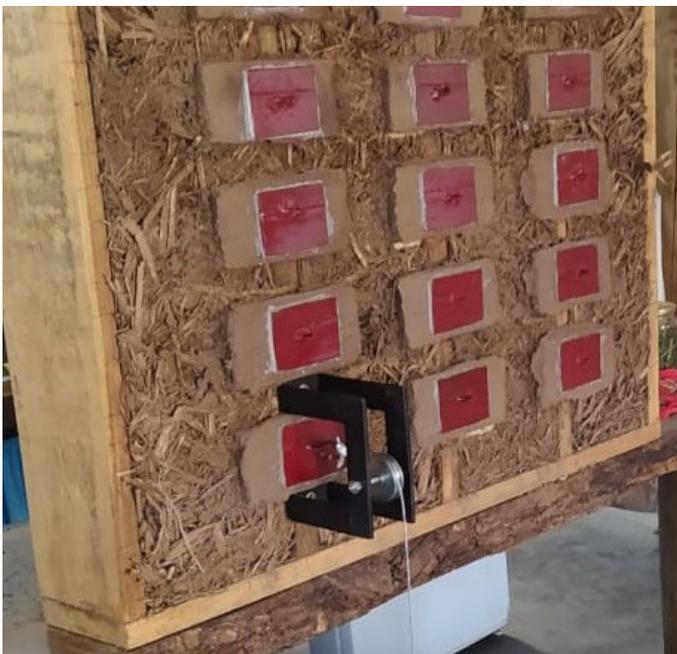


Figura 5. Instrumental de arrancamiento directo.

2.6. Ejecución del ensayo de cizallamiento

El ensayo de cizallamiento evalúa la adherencia del revoque sometiéndolo a un esfuerzo de corte. Para este ensayo se siguió una metodología similar a la expuesta por Hamard (19) y colegas, y las modificaciones se realizaron para disminuir fuerzas de vuelco lateral por excentricidad de la carga

y rozamientos del instrumental en la pared o sustrato como propone Cavicchioli y colegas (28). El instrumental consta de una abrazadera metálica a cremallera de 10 cm de diámetro ubicada en el revoque, de la que se colgó un cable de acero y un recipiente (Figura 6). Luego el ensayo se realizó colocando 500 g de arena en el recipiente cada 10 segundos, vertidos de manera paulatina en los primeros 5 segundos, hasta producir el corte en la muestra.



Figura 6. Instrumental de cizallamiento.

2.7. Tratamiento estadístico de los resultados.

Las mediciones de las series ensayadas fueron analizadas mediante el software estadístico SPSS para comprobar si las distribuciones resultaron normales mediante el test de normalidad de Shapiro-Wilk y si existía homogeneidad de las varianzas mediante el test de Levene. Estos análisis se realizaron para verificar si las diferencias entre series resultaron estadísticamente significativas mediante el test de ANOVA de un factor y luego se aplicó la prueba *post hoc* recurriendo al test de Tukey. Por otro lado la comparación entre los desempeños de los dos tipos de ensayo se realizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de la tierra utilizada

La tierra utilizada en la confección del muro, las capas de agarre y los revoques contiene un 32% de arcilla, 59% de limo y 9% de arena. Posee un índice de plasticidad de 20 % correspondiente a arcillas de baja plasticidad, y un alto coeficiente de actividad de las arcillas, correspondiente a 0,63.

3.2. Retracción lineal

Los resultados de las cuatro muestras exponen comportamientos diferentes a medida que a las muestras se le agregan fibras y/o arena. De esta forma se observa, por ejemplo, una retracción longitudinal de 44 mm y transversal de 4 mm en la muestra constituida solo por tierra, mientras que la muestra

TA4 presenta apenas una retracción longitudinal de 2 mm. La tabla 2 y la figura 7 muestran los resultados.

Tabla 2. Resultados de retracción lineal.

Muestra	Retracción lineal (mm)	
	longitudinal	transversal
TD	44	4
TB	35	4
TA1	21	2
TA4	2	0

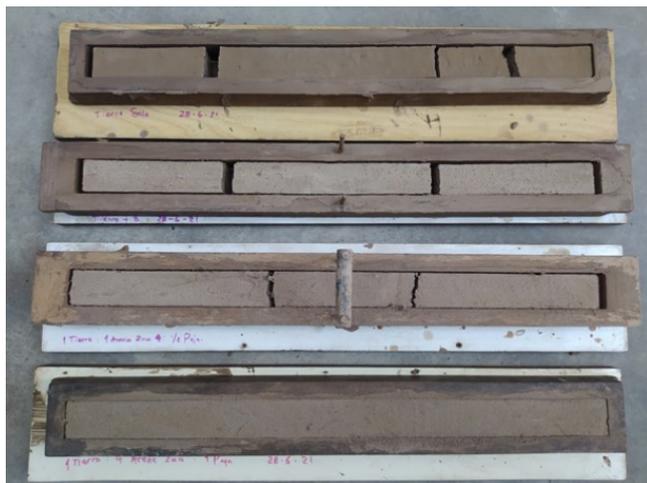


Figura 7. Resultados del test de retracción lineal (de arriba hacia abajo las muestras TD, TB, TA1, y TA4).

3.3. Adherencia por golpe

Las muestras TD y TB al secarse se desprendieron del cerámico por lo que no se les pudo realizar el test de adherencia por golpe. Las muestras TB y TA1 presentaron grietas luego del secado. Las muestras TA1 y TA4 no presentaron retracción en sus bordes luego del secado. Entre estas dos últimas la que mayor cantidad de golpes resistió fue TA4. Al igual que en el test de retracción lineal las muestras presentan mejores desempeños al agregarse fibras o arena, y la muestra TA4 fue la de mejor comportamiento.

Los resultados del test de adherencia por golpe se exponen en la tabla 3. Las muestras secas antes de realizar el ensayo se muestran en la figura 8.

Tabla 3. Resultados adherencia por golpes.

Muestra	Grietas	Retracción (mm)	Adherido	Cantidad de golpes
TD	no	8	no	0
TB	sí	8	no	0
TA1	sí	0	sí	4
TA4	no	0	sí	14

De los resultados de los ensayos de retracción lineal y adherencia por golpe se observa que la muestra TA4 presenta el mejor desempeño, por ello se la escogió para la ejecución de todos los revoques a ensayar. En esta muestra, por la propor-

ción de arena contenida, el porcentaje de arcilla final se redujo a un 6,4% respecto a la tierra inicial, la cual contenía 32%.



Figura 8. Muestras secas para el ensayo de adherencia por golpe. (De izquierda a derecha las muestras TD, TB, TA1, y TA4).

3.4. Arrancamiento directo

Todas las series del ensayo de arrancamiento directo presentaron distribuciones normales y homogeneidad de las varianzas. En todos los casos las muestras se desprendieron completas, es decir el fallo se dio entre la capa de agarre y el soporte. Los valores registrados de entre todas las series ensayadas se distribuyen dentro de un rango 0,094 N/mm² (mínimo 0,002 y máximo 0,096). De los resultados obtenidos se observa que las muestras que presentan mayores valores medios de adherencia son las que utilizaron el puente adherente de tierra, engrudo y arena (C) como componente constitutivo de la capa de agarre para todas las trama de fibras de homogeneización ensayadas (malhoja, lienzo y arpillera, sin diferencia estadísticamente significativa entre los mismos); pero sí demuestran diferencias significativas con las series que emplearon tierra y engrudo en sus capas de agarre. Si bien las resoluciones con el primer tipo de puente adherente (C) presentan los valores de dispersión más altos de todas las series (Tabla 4, valor σ) sus medias resultan superiores a 0,05 N/mm², valor mínimo sugerido por la normativa alemana DIN 18947 (29) para revoques de tierra (Figura 9). Solo la combinación de puente adherente de tierra, engrudo y arena con malhoja (CM) presenta una variabilidad en su serie siempre superior al valor mínimo indicado en la norma mencionada. Con menor desempeño se encuentran las series que emplearon tierra en estado viscoso (T) como puente adherente y por último las resueltas solo con engrudo (E). Esta última, a pesar de que muestra menor dispersión de datos, no arroja valores nada adecuados de adherencia de los revoques.

En lo que respecta a la trama de fibras de homogeneización, el empleo de malhoja resulta, para cualquiera de los puentes adherentes, con valores medios siempre superiores, aunque sin diferencia estadísticamente significativa respecto a sus equivalentes con telas de lienzo y arpillera. Solo para el caso del empleo de puente adherente de tierra, el empleo de malhoja (TM) y lienzo (TL) dan resultados significativamente distintos, en gran medida por el bajo desempeño del lienzo como trama de fibras de homogeneización.

3.5. Cizallamiento

Nuevamente, para el ensayo de cizallamiento todas las series presentaron distribuciones normales y homogeneidad de las varianzas. Solo la serie CM no presenta normalidad en su distribución. Esto se explica porque cuatro de los seis resultados son iguales, debido a que las muestras resistieron el máximo que el instrumental utilizado para realizar el ensayo permitió, 0,08 N/mm². En el caso de la homogeneidad de la varianza, si se considera la mediana como parámetro, en todos los casos se cumple y es posible calcular las significancias. Los valores registrados

de entre todas las series ensayadas se distribuyen dentro de un rango 0,078 N/mm² (mínimo 0,003 y máximo 0,081), menor que en el caso del arrancamiento directo.

Al igual que sucede con los resultados de arrancamiento directo, las series en las que se empleó el puente adherente de tierra, engrudo y arena (C) como componente de la capa de agarre para todas las tramas de fibras de homogeneización ensayados, nuevamente arroja los mayores valores con diferencias estadísticamente significativas en referencia a las demás series. En este caso, a diferencia de lo que mostró el ensayo de arrancamiento directo, las series presentan dispersiones bastante más reducidas (Tabla 5, valor σ), y para la serie C resistencias siempre mayores a 0,05 N/mm². Es para

destacar que la serie CM posee el valor medio más elevado (0,075 N/mm²) de todo el ensayo, incluso superior a su equivalente en el arrancamiento directo. En orden descendente de fuerza adherente se observan las series que emplearon puente adherente de tierra (T) y luego engrudo (E). En este caso, la mayor dispersión de datos se produce en los casos TM y TL (Figura 10).

Al igual que sucedió con el ensayo de arrancamiento directo, las series que emplearon malhoja como trama de fibras de homogeneización resultan con desempeños superiores respecto del empleo de lienzo o arpillera. Y en todos los casos el empleo de lienzo arroja malos resultados de adherencia para los puentes adherentes T y E.

Arrancamiento directo

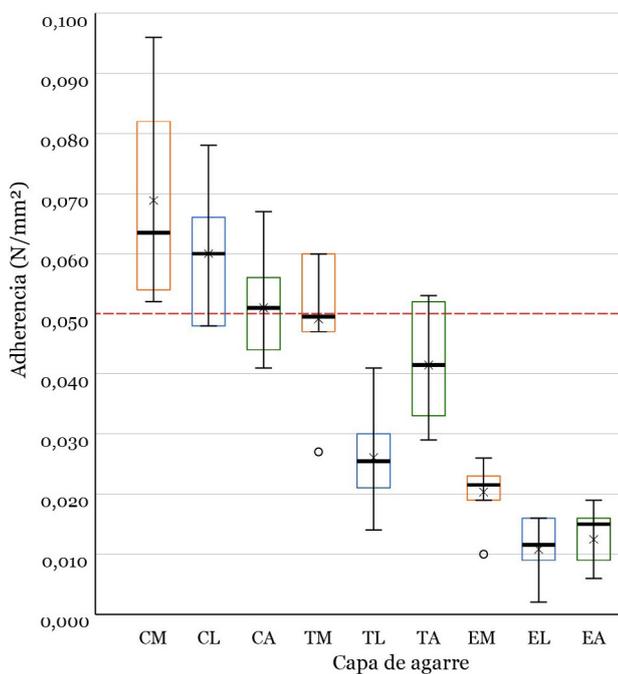


Figura 9. Diagrama de cajas del ensayo de arrancamiento directo. C: Puente adherente de tierra, engrudo y arena; T: Puente adherente de tierra; E: Puente adherente de engrudo; M: malhoja; L: lienzo; A: arpillera. La cruz en la caja indica la media. La línea roja en 0,05 N/mm² corresponde al límite inferior de la normativa DIN 18947.

Tabla 4. Resultados del ensayo de arrancamiento directo en N/mm², \bar{x} : media; σ : desvío standard.

Panel	Puente adherente	Arrancamiento directo (N/mm ²)					
		Malhoja		Lienzo		Arpillera	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
1	Tierra, engrudo, arena	0,069	0,017	0,060	0,012	0,052	0,010
2	Tierra en estado viscoso	0,049	0,011	0,026	0,008	0,042	0,09
3	Engrudo de harina de trigo	0,020	0,005	0,011	0,005	0,013	0,004

(0,098 N/mm² = 1 kgf/cm²)

Tabla 5. Resultados del ensayo de cizallamiento en N/mm², \bar{x} : media; σ : desvío standard.

Panel	Puente adherente	Cizallamiento (N/mm ²)					
		Malhoja		Lienzo		Arpillera	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
1	Tierra, engrudo, arena	0,077	0,007	0,059	0,004	0,061	0,008
2	Tierra en estado viscoso	0,035	0,011	0,020	0,007	0,034	0,005
3	Engrudo de harina de trigo	0,017	0,002	0,008	0,004	0,010	0,003

(0,098 N/mm² = 1 kgf/cm²)

Cizallamiento

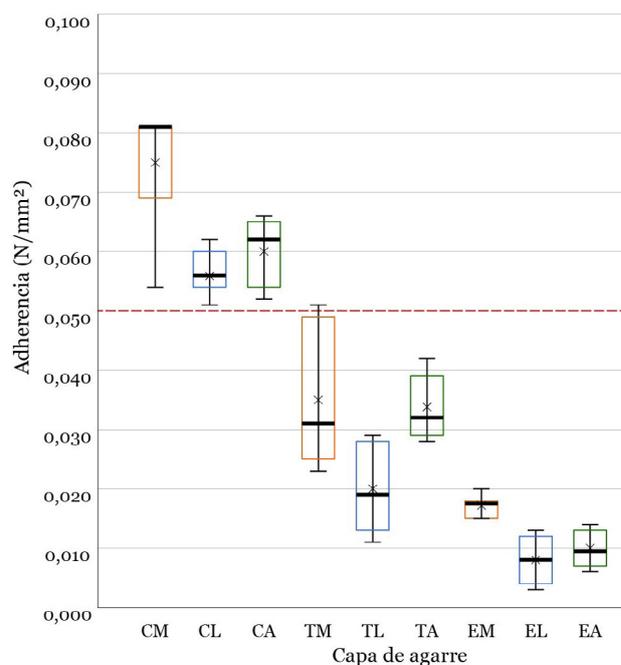


Figura 10. Diagrama de cajas del ensayo de cizallamiento. C: Puente adherente de tierra, engrudo y arena; T: Puente adherente de tierra; E: Puente adherente de engrudo; M: malhoja; L: lienzo; A: arpillera. La línea roja en 0,05 N/mm² corresponde al límite inferior de la normativa DIN 18947.

3.6. Comparación de resultados entre ensayos

Los ensayos de arrancamiento directo y cizallamiento arrojaron valores bastante semejantes entre sí. Por esta razón se corroboró la correlación entre los resultados de ambos ensayos empleando para tal caso los valores medios de cada serie de trama de fibras de homogeneización y se dispusieron en orden ascendente según tipo de puente adherente empleado (Figura 11). Los coeficientes de correlación expresan una fuerte correspondencia entre los datos obtenidos, todos encima del 90% (Tabla 6).

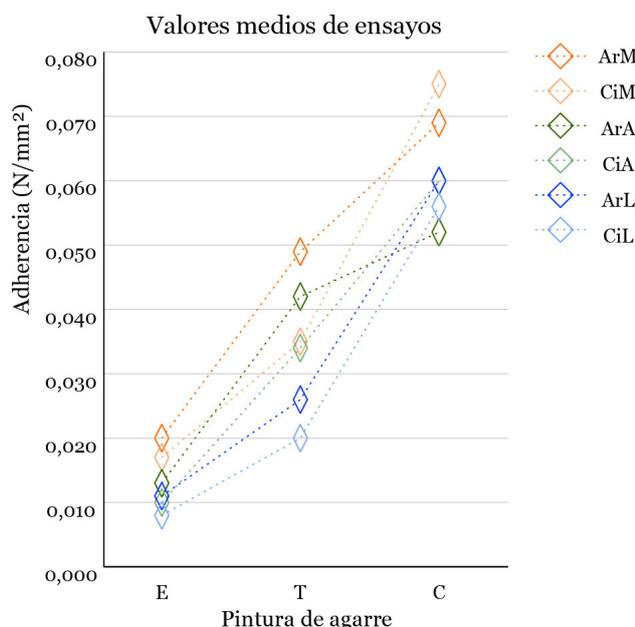


Figura 11. Representación de valores medios de los ensayos de arrancamiento directo (Ar) y cizallamiento (Ci). C: Puente adherente de tierra, engrudo y arena; T: Puente adherente de tierra; E: Puente adherente de engrudo; M: malhoja; L: lienzo; A: arpillera

Tabla 6. Coeficiente de correlación entre ensayos.

Trama de fibras	Coefficiente de correlación
Malhoja	0,949
Lienzo	0,998
Arpillera	0,956

4. DISCUSIÓN

La evaluación de la variabilidad de la adherencia de revoques de tierra aplicados sobre muros de TAE en los sectores con madera expuesta demuestra diferencias estadísticamente significativas considerando el tipo de puente adherente empleado para la capa de agarre antes que la trama de fibras de homogeneización. En tal sentido y en orden decreciente la combinación de tierra, engrudo y arena demostró ser la de mejor desempeño seguidas de las de tierra sola y engrudo solo. Internamente dentro de cada grupo de series, el empleo de la malhoja como trama de fibras de homogeneización mostró desempeños siempre superiores secundado por uso de tela arpillera y lienzo respectivamente. Esto expone la importancia en términos cualitativos sobre la naturaleza de los materiales empleados habitualmente en construcciones con tierra, en particular en esta investigación, y sus comportamientos en relación a las fuerzas de adherencia de los revoques.

El agregado de engrudo a un puente adherente que estaba compuesta por tierra y arena aumentó la adherencia, siendo mayor que un puente adherente de tierra sola, y mayor aún que el puente adherente de engrudo solo. En el puente adherente de engrudo solo (E) algunas capas de agarre tendían a desprenderse al momento de aplicar el revoque, esta situación expone la importancia de agregar engrudo mezclado en una matriz con otros materiales combinando la adherencia química del engrudo con la mecánica de la arena. En cuanto a las trama de fibras de homogeneización, se diferencian los no industrializados, en este caso la malhoja, de los industrializados, las telas. Si bien las capas de mejor comportamiento fueron las que utilizaron un material similar al conjunto, en este caso malhoja, las telas por su parte también se diferenciaron, comportándose mejor la tela de arpillera. Esta situación puede explicarse por el tamaño de las fibras de las telas y su textura generada por la separación de los hilos; una superficie de mayor anclaje que favorezca la adherencia mecánica resultará en un incremento de la adherencia, como es el caso de la arpillera; en cambio en el caso de la tela de lienzo se genera una superficie bastante lisa y cerrada limitando las posibilidades de anclaje mecánico. Estos resultados permiten interpretar que el empleo de materiales de naturaleza semejante entre el muro, la capa de agarre y los revoques tienden a mejorar la adherencia final del conjunto.

La formulación de capa de agarre con mejor desempeño, como ya se indicó, estaba compuesta por el puente adherente de tierra, engrudo y arena, y malhoja como trama de fibras homogeneizadora. Esta formulación es coincidente con las recomendaciones expuestas por Franz Volhard sobre la técnica tradicional de aplicar una mezcla previa con abundancia de fibras sobre las maderas expuestas. De esto se interpreta que los materiales constituyentes, tierra, arena y malhoja posiblemente aportan a la adherencia mecánica durante el secado, por trabazón entre ellos mismos, y con el sustrato en el que fueron aplicados, constituido por malhoja, tierra y madera. Por otro lado, colabora en la adherencia química la actividad de las arcillas, tanto para otorgar cohesividad a las muestras durante la preparación y el secado, como para unirse al sustrato que también está constituido por tierra con contenido de arcilla, y cuya madera se pinta antes de aplicar la capa propiamente dicha. Además, se interpreta que el agregado de engrudo de harina de trigo también aporta a la adherencia química.

En términos cuantitativos el rango de valores de fuerzas de adherencia resultó de 0,094 N/mm² para arrancamiento directo y de 0,078 N/mm² para cizallamiento, demostrando una menor dispersión general para el segundo ensayo. Incluso internamente dentro de cada serie, estas dispersiones son en general también menores que las respectivas series de arrancamiento directo. Si bien en el ensayo de arrancamiento directo la fuerza aplicada ejerce un esfuerzo de tracción en tanto que en el de cizallamiento corresponde a un esfuerzo de corte, se observa una correlación en las medias obtenidas para ambos ensayos (tabla 6). Esto plantea la necesidad de establecer la validez de cada tipo de ensayo y de analizar la posibilidad de prescindir de alguno para evaluar la adherencia. Sobre los métodos de ensayo Delinière y colegas señalan que la medición de resistencia al cizallamiento resulta el método más adecuado para evaluar adherencia dado que aplica una carga directa perpendicular al sustrato. Por su parte Faria y colegas (20) realizaron ensayos de cizallamiento y de arrancamiento directo, concluyendo que

el primero es de mejor adaptabilidad a muros in situ, y que los segundos pueden arrojar también resultados de cohesión internos del revoque, o del revoque con el muro. En este estudio, las muestras sometidas a arrancamiento directo fueron arrancadas completas durante el ensayo, lo que deja entrever que la cohesión interna resultó más fuerte que la adherencia.

Por su parte las capas de agarre CM, CL y CA para los dos tipos de ensayos, verifican las exigencias de la normativa alemana DIN 18947 (29) para revoques de tierra, sobre adherencia para categoría 1, con valores $\geq 0,05 \text{ N/mm}^2$. Esto expone la validez de las capas y revoques formulados. Si bien las muestras en este estudio no fueron sometidas a ensayos de compresión y flexión como lo indica la norma, Hamard interpreta que no es necesario someter a revoques a este tipo de ensayos debido a que en su vida útil no responden a esas exigencias; en igual sentido Faria y colegas (20) concluyen en que revoques con baja resistencia a compresión pueden tener un desempeño eficiente en cuanto a la adherencia. Sobre las otras investigaciones realizadas para evaluar adherencia de revoques de tierra cabe mencionar que, por ejemplo, la formulación de revoques de Hamard, con un contenido de arcilla de 6%, aplicada sobre pared de tierra apisonada o tapial, en el ensayo de cizallamiento in situ dio un resultado de $0,021 \text{ N/mm}^2$, valor que no verifica la normativa antes mencionada. Por su parte Faria y colegas (20) en el ensayo de cizallamiento, los resultados sobre ladrillo cerámico hueco y sobre adobe apenas alcanzan los $0,05 \text{ N/mm}^2$. Los mismos autores, en ensayos de arrancamiento directo obtuvieron valores más elevados, $0,15 \text{ N/mm}^2$ para adobe, y $0,14 \text{ N/mm}^2$ para ladrillo cerámico macizo. Si bien es esperable que los resultados de fuerzas adhesivas sobre técnicas mixtas como TAE sean menores que otras técnicas más homogéneas, en este caso se obtuvieron valores similares en cizallamiento a los obtenidos por otros autores sobre adobe y ladrillo cerámico hueco, y mayores que los obtenidos sobre tapial. En el caso de los ensayos de arrancamiento directo los valores obtenidos por Faria y colegas (20) son sustancialmente mayores que los resultados de esta investigación.

En referencia a la composición de la muestra TA4, elegida para ensayar revoques, luego de la compensación con arena, contenía un 6,4% de porción arcilla. Sobre este tema Hamard y colegas y Stazi y colegas mencionan en que el contenido de la fracción arcilla en la tierra tiene una importante incidencia en la adherencia de los revoques. Los segundos autores observaron que el incremento del contenido de arcilla mejora la adherencia; sin embargo, con valores superiores al 8% del mismo, el fenómeno de retracción comienza a ser predominante y disminuye la resistencia al corte o cizallamiento, incluso aquellas mezclas que alcanzaron el 20% directamente se desprendieron del sustrato. Ésta última cuestión se vio reflejada en la preparación del test de adherencia por golpe, en el cual, luego del secado, se desprendieron las muestras T y TB, ambas con 32% de fracción arcilla.

5. CONCLUSIONES

El escaso abordaje sobre la evaluación de la adherencia de capas de agarre para las técnicas mixtas o similares como el TAE, pone de manifiesto la importancia de los resultados obtenidos en esta investigación.

El valor de adherencia en la formulación de capa de agarre con mejor desempeño ($0,08 \text{ N/mm}^2$ para la capa CM en el ensayo de cizallamiento) permite concluir que, para el caso de esta técnica constructiva, la similitud de materiales constituyentes mejora la cohesión interna y la adherencia final del conjunto. Esta similitud en materiales permitiría un comportamiento similar ante posibles movimientos sísmicos, sobrecargas, cambios de humedad o temperatura dado por análogos módulos de elasticidad, cuestión que podría ser objeto de análisis en otras investigaciones.

La correlación observada entre los resultados de los dos ensayos de adherencia propuestos, arrancamiento directo y cizallamiento, permite proponer que resulta suficiente con aplicar solo uno de ellos a la hora de evaluar futuros revoques con capas de agarre sobre esta técnica constructiva, debido a que según esta investigación arroja resultados similares. Este tipo de verificación sobre la correlación entre ensayos no fue abordado en otras investigaciones hasta donde se tiene conocimiento.

Las capas de agarre que contenían puente adherente de tierra, engrudo y arena cumplen con las adherencias exigidas por la normativa alemana presentada para categoría 1, lo que muestra aptitud para su utilización. Sumado a esto, la malhoja como trama de fibras de homogeneización sería la de mayor rendimiento para este tipo de puente adherente.

Los resultados de la evaluación de dosificaciones de revoque permiten establecer que formulaciones que contienen aproximadamente 6% de fracción arcilla son suficientes para lograr revoques aptos en esta técnica constructiva, para este tipo de tierra, y para las formulaciones de capas de agarre propuestas.

6. FUTURAS INVESTIGACIONES

Para futuras investigaciones, se prevé comprobar las posibles adherencias químicas generadas por la arcilla y por el engrudo, comparar diferentes tipos de suelos con diverso contenido y tipos de arcilla. Además, llevar estas formulaciones a prototipos de mayor escala y expuestos a la intemperie para evaluar la incidencia de la misma en el comportamiento adherente de las capas de agarre y revoques analizados en esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo y colaboración en la formulación y corrección de este artículo del Dr. Guillermo Rolón. Esta investigación se realiza en el marco de la tesis doctoral del autor financiada por CONICET.

REFERENCIAS

- (1) Sosa, M., Latina, S., Castellote, M., Ferreyra, I., Chaila, J. (2011). Monitoreo de revestimientos de muro construidos con tierra. Caso Amaicha del Valle, Tucumán. *Libro de Resúmenes del 13º SIACOT* (pp. 1-12). Valparaíso.
- (2) Faria, P., Lima J. (2018). Robocos de Terra. En ARGUMENTUM (Editorial). *Cadernos de Construção com Terra*. Lisboa, Portugal.
- (3) Lara Calderón, M.L. (2017). Patología en tierra cruda, estudio de caso construcciones en el área andina. *Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVI Congreso de Control de Calidad en la Construcción*. Editores: Margita Kliewer, Angélica Ayala y Ruth Martinesi. Asunción, Paraguay.
- (4) Mattone, M. (2011). Intonaci in terra e gesso per la protezione delle costruzioni in terra cruda. *Construcción con tierra. Tecnología y Arquitectura. Congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos [online]*, (pp. 315-322). Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid.
- (5) Quiñónez, F., Ayala, V. (2014). Evaluación de la adherencia de revestimiento en paredes construidas con tierra mediante un equipo de laboratorio autoconstruido. *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* (pp. 1-10). Guayaquil.
- (6) Stazi, F., Nacci, A., Tittarelli, F., Pasqualini, E., Munafo, P. (2016). An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments. *Journal of Cultural Heritage*, 17, 27-41. <http://doi.org/10.1016/j.culher.2015.07.009>.
- (7) IRAM 1764 (2003). *Método de ensayo de adherencia de los revoques y las carpetas*. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- (8) Institut de Promoció Ceràmica (2007). *La adherencia*. Recuperado de <http://www.ipc.org.es/>.
- (9) Van Olphen, H. (1977). An introduction to clay colloid chemistry. 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York, London, Sydney, Toronto, 82(2), 236-237. <https://doi.org/10.1002/bbpc.197800022>.
- (10) Bueno Buelvas, R., Fernández Lizarazo, J.C. (2019). La capacidad de intercambio catiónico del suelo: una bóveda de nutrición clave en la producción de alimentos. *Ámbito Investigativo*, 4(1), 7-12. Recuperado de <https://ciencia.lasalle.edu.co/ai>.
- (11) Weismann, A., Bryce, K. (2009). *Enduits y peintures naturels, à base de chaux ou de terre*. Editorial La plage. Francia. pp. 161
- (12) Delinière, R., Aubert, J., Rojat, F., Gasc-Barbier, M. (2014). Physical, mineralogical and mechanical Characterization of ready-mixed clay plaster. *Building and Environment*, 80, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.012>.
- (13) Volhard F. (2016). *Construire en Terre Allégée*. Portugal. Actes Sud.
- (14) Moreteau, S. (2012). *Enduits de terre crue*. Editorial Terre Vivante.
- (15) D'Amico, S., Hrabalova, M., Müller, H., Berghofer, E. (2010). Bonding of spruce wood with wheat flour glue—Effect of press temperature on the adhesive bond strength. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 255–260 <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.11.001>.
- (16) Xu, Y., Sun, X., Wang, D. (2019). Wheat. En *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products* editado por Zhongli Pan Ruihong Zhang Steven Zicari. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00002-2>.
- (17) Morrison, R. (1980). Aqueous adhesives for paper conservation. *ICCM Bulletin*, 6(1), 51-68, <https://doi.org/10.1179/iccm.1980.6.1.008>.
- (18) Barrera, G. (2014). *Efecto del amidón dañado sobre las propiedades de las masas panarias y la calidad de los panificados*. (Tesis de doctorado no publicada). Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba.
- (19) Hamard, E., Morel, J., Salgado, F., Marcom, A., Meunier, N. (2013). A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 14(4), 109-115. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.005>.
- (20) Faria, P., Lima, J., Silva, V. (2019). Assessment of adhesive strength of an earth plaster on different substrates through different methods. 5th Historic Mortars Conference HMC2019. RILEM Publications SARL. In Proceedings. Pamplona, Spain. pp. 51-64.
- (21) Bouyoucos, G.J. (1936). Direction for Making mechanical analysis of soils by the hydrometer method. *Soil science*, 42, 225 – 230.
- (22) IRAM 10501 (2007). Determinación del límite líquido (LL) y del límite plástico (LP) de una muestra de suelo. Índice de fluidez (IF) e índice de plasticidad (IP). Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- (23) Skempton, D. (1953). The Colloidal “Activity” of Clays. *International society for soil mechanics and geotechnical engineering*. pp. 57-61. <https://doi.org/10.1680/sposm.02050.0009>.
- (24) Valeiro, A., Biaggi, C. (2019). Revisión crítica de la evolución tecnológica de la cosecha de la caña de azúcar en la Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. Edición INTA, pp. 31-39. Recuperado de <http://ria.inta.gov.ar/>.
- (25) Rubio-Gonzalez, A., Galindo Galindo, P., Pérez Egusquiza, F., Ríos Billini, P., Perdomo González, L., Pérez Castellanos, E., Rubio-Rodríguez, M.A. (2019). Estudio sobre el empleo de los residuos agrícolas cañeros como combustibles para la generación de electricidad en la industria azucarera cubana. Editorial Feijóo. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28822.09285>.
- (26) ASTM D4943 (2018). Standard test method for shrinkage factors of soils by the wax method. (ASTM Internacional).
- (27) Minke, G. (2005). Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. P. 114. Editorial Fin de Siglo, Montevideo.
- (28) Cavicchioli, A. Rolón, G. Odlyha, M. (2022). A chemical approach to the selection of soils for the reproduction of earth-based mortars for conservation purposes: case report from a Brazilian historic site. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2086504>.
- (29) DIN 18947 (2013). *Lehmputzmörtel – begriffe, anforderungen, prüfverfahren*. Alemania (DIN).