

PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA PARA REVESTIMIENTOS DE TIERRA

Diana Ayensa¹, Marcela Gallardo², Ignacio Conde³

¹Cooperativa Panal, Gremio Bioconstrucción de Chile A.G. mesatrabajominvu@gremiobioconstruccion.cl

²Bioconstrucción Oveja Negra, Gremio Bioconstrucción de Chile A.G. mgallardoandrade@gmail.com

³TramaLar, Gremio Bioconstrucción de Chile A.G. investigacionynormativa@gremiobioconstruccion.cl

Palabras clave: laboratorio, normativa, trabajo colaborativo, investigación, revoques

Resumen

El Gremio de Bioconstrucción de Chile es una red multidisciplinaria cuya misión, entre otras, es contribuir en la creación de normativas que permitan posicionar las distintas técnicas de bioconstrucción dentro de las soluciones constructivas accesibles para la sociedad y en especial la vivienda social. Es necesario incorporarlas en el listado del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, mediante fichas que requieren certificaciones obtenidas a través de ensayos en laboratorios aceptados por el ministerio. Por ello, gracias a una propuesta de parte de la división técnica de estudio y fomento habitacional, se gestionó una mesa de trabajo integrada por socias y socios del gremio para elaborar un listado de materiales naturales y soluciones constructivas ejecutadas con dichos materiales y ejecutar las probetas para poder ensayarlas según normativa chilena. Los ensayos de permeabilidad al vapor de agua en revoques de tierra son los primeros que se decidieron realizar. Los resultados obtenidos son algo superiores a otros valores observados en otros países, obteniendo un factor de resistencia al vapor de agua de 15,6 en revoque grueso y de 12,5 en revoque fino y son el punto de partida para avanzar en la inclusión de materiales naturales en la normativa vigente en Chile.

1 INTRODUCCIÓN

A la hora de diseñar soluciones constructivas es necesario realizar cálculos para comprobar que dichas soluciones cumplan con la normativa técnica. Una comprobación necesaria es verificar que no se produzcan condensaciones intersticiales en algunas de las capas de materiales seleccionados para dicha solución. Para realizar esta comprobación es necesario conocer la permeabilidad al vapor de agua de los materiales a emplear.

Actualmente en Chile no existe información acerca de este tipo de datos para materiales naturales. Una de las misiones de la Organización es la de crear normas para la construcción con materiales naturales, de tal manera que éstos puedan ser incluidos en los listados de materiales de construcción validados por los organismos competentes y que puedan ser una alternativa natural válida para el diseño de la vivienda pública, en especial la vivienda social, con estándares de eficiencia energética.

La división técnica de estudio y fomento habitacional (DITEC) del Ministerio de urbanismo y vivienda (MINVU) contactó con el Gremio de Bioconstrucción de Chile (GBC), para ofrecer la posibilidad de realizar ensayos a materiales naturales en laboratorios certificados y cuyos resultados pasarán a formar parte de las fichas de materiales de los listados oficiales de materiales de construcción.

El objetivo de este artículo es presentar el proceso de selección de técnicas a estudiar, la elaboración las probetas y los resultados de los ensayos realizados en laboratorio.

Cabe destacar que todo este trabajo, tanto la ejecución de probetas como el proceso de decisión, fue realizado de forma voluntaria autogestionada por parte de integrantes la mesa de trabajo.

2 METODOLOGÍA PARA SELECCIÓN Y REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

En aras de identificar materiales naturales y técnicas constructivas dignas de análisis, se estableció una mesa de trabajo colaborativo que durante varios meses trabajó para generar un listado que incluía desde revoques de tierra al adobillo incluyendo ensayos de varios tipos: permeabilidad al vapor de agua, conductividad térmica, aislación acústica, transmitancia térmica y resistencia al fuego.

Se formaron grupos de trabajo por cada material o técnica a estudiar. El objetivo del grupo de trabajo fue entregar una ficha técnica que incluyera las especificaciones técnicas, planos de detalle, materiales, herramientas y presupuesto necesarios para fabricar las probetas a ensayar.





FICHA TÉCNICA ENSAYES MINVU/DITEC – GBC

1.- IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN:

MATERIAL/SISTEMA CONSTRUCTIVO:	Revestimientos de tierra cruda con fibra de paja de trigo		
Responsable(s):	Jorge Broughton / Diana Ayensa / Marcela Gallardo / Anselmo Magaña / Ignacio Conde		
ENSAYES A APLICAR (marcar con una X)			
No combustibilidad		Conductividad Térmica	X
Aislación Acústica		Permeabilidad al vapor de agua	x
Otro:		Otro:	

2.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

N°	Partida	Descripción
	REVOQUE GRUESO BASE	Revoque grueso de espesor 3 cm elaborado a partir de tierra arenosa-arcillosa de alta plasticidad. Proporción aproximada de 1 parte de arcilla y 3 de arena de granulometría heterogénea y tamaño máximo del grano de 1 a 1,5 cm, tamaño máximo aproximado a la mitad el espesor del revoque; Una vez humectada y amasada la tierra, se deberá obtener una mezcla homogénea y pastosa, a la cual se le agrega 30% del volumen de paja de trigo de tamaño largo (5-15 cm). La mezcla deberá quedar tapada con nylon

Figura 1. Extracto de ficha técnica

El siguiente proceso que se llevó a cabo, una vez realizadas las fichas técnicas, fue realizar una votación para priorizar los materiales o técnicas a ensayar según la naturaleza del ensayo. El criterio base utilizado para dicha selección fue que la técnica o material a ensayar, tuviera una mirada práctica y no experimental, ya que una vez ensayada, esta sería incorporada para su uso en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas del Ministerio de Vivienda de Chile.

Tabla 1. Proceso de votación de prioridades del listado de materiales y técnicas constructivas

Técnica constructiva	Ensayo	Cantidad de votos	Orden de prioridad
Revoque grueso base	conductividad térmica	10	1
	permeabilidad	10	2
Adobe celulosa*	aislación acústica	9	3
Quincha (varillaje madera)	transmitancia térmica	8	4
Adobe celulosa	conductividad térmica	8	5
Revoque fino base	permeabilidad	8	6
	conductividad térmica	8	7
Pintura de tierra	permeabilidad	7	8
Barniz cera abeja	permeabilidad	6	9

Adobillo	conductividad térmica	5	10
Paja encofrada	permeabilidad	5	11
Adobe celulosa	permeabilidad	4	12
Tapial	resistencia al fuego	3	13
Adobillo	resistencia al fuego	3	14
Adobe celulosa	combustibilidad	2	15
Cascarilla de arroz	conductividad térmica	2	16
Tapial	transmitancia térmica	1	17
Adobillo	aislación acústica	1	18
Cascarilla de arroz	permeabilidad	1	19
Tapial	aislación acústica	0	-
Fardo avena	conductividad térmica	0	-
	permeabilidad	0	-
El adobe-celulosa es un material experimental compuesto por arcilla pura y un alto porcentaje de celulosa para crear ladrillos ligeros de dimensiones adecuadas para poder construir un muro de cerramiento. El material se encuentra en una etapa de investigación conjunta entre el gremio de bioconstrucción de Chile y la oficina de la red de arquitectos GAIA en Oslo en Noruega.			

Una vez realizadas las votaciones, desde la DITEC se abrieron los cupos para realizar los ensayos de permeabilidad al vapor de agua por lo que se procedió a ensayar, según el listado de prioridades, el revoque de tierra grueso y fino. Otra de las razones por las que se decidió elegir los revoques de tierra para ensayar en los primeros lugares es que es un revestimiento casi universal en todas las técnicas de construcción con tierra. En la tabla 2 se muestra un resumen de las necesidades de las técnicas a ensayar.

Tabla 2 – Programación para el ensayo de permeabilidad al vapor de agua

Técnica constructiva	Material	Dosificación	Probetas
Revoque grueso	tierra, arena, paja de trigo	según pruebas previas	5
Revoque fino	tierra, arena		5

3 EJECUCIÓN DE LAS PROBETAS

En este apartado se describe en detalle el proceso de elaboración de las probetas de revoque grueso y fino hasta su entrega en laboratorio. Se presentan los materiales empleados, incluyendo tierra arcillosa, arena gruesa, arena fina y paja de trigo, así como las dosificaciones utilizadas para ambos tipos de revoque. Se describe el equipo de trabajo y el lugar donde se confeccionaron las probetas, el procedimiento de preparación de la mezcla, el tiempo de reposo, la construcción de los marcos, la técnica de aplicación y otra información relevante.

3.1 Lugar y equipo de trabajo

Las probetas se realizaron a mediados del mes de septiembre (primavera), en la Región Metropolitana, Santiago (Chile), en un espacio taller ofrecido por un socio del gremio, ubicado en la comuna de Peñalolén.

El proceso de fabricación se llevó a cabo durante una semana corrida, de acuerdo a la disponibilidad de tiempo de los socios que conformaron la mesa de trabajo y otros socios compañeros del gremio que colaboraron en la instancia con su participación en terreno. En

total el equipo ejecutante contaba con siete personas y se invirtieron 70 horas de trabajo en total.

3.2 Materiales empleados

Para la realización de las probetas se utilizó tierra arcillosa disponible en el taller, que ya había sido utilizada por otros compañeros del gremio, por lo que ya se tenía conocimiento y experiencia frente a su comportamiento, por lo que no fue necesario caracterizarla. La tierra se pasó por un tamiz de 3 mm (nº6 ASTM) de paso de malla.

En lo referente a los áridos, se decidió adquirirlos a través de una cadena de ferretería con el objetivo de obtener un material tipificado, ya que los áridos obtenidos inicialmente en un lugar de venta cercano al taller, se observaban con un alto contenido de borra pudiendo afectar a los resultados de los ensayos.

Las arenas, compradas en ferretería, fue posible detectar varias impurezas, incluyendo conglomerados de arcilla, fragmentos de vidrio de gran tamaño, así como gravas y gravilla. La arena gruesa se cribó por una malla galvanizada de paso 6 mm (nº ¼" ASTM), quedando una granulometría final de 5mm de tamaño máximo. La arena fina, con un tamaño no mayor a 1 mm, también contenía gravas y gravillas que se retiraron manualmente.



Figura 2. Cribado de arena

Figura 3. Tierra arcillosa

Figura 4. Muestra de arena fina

La paja empleada fue paja de trigo y la donó una compañera del gremio. El fardo era procedente de la cosecha del verano anterior y durante el invierno estuvo guardado al exterior, pero de una forma no expuesta a las lluvias, por lo que presentaba un óptimo estado para su uso en las mezclas. De entre todos los fardos disponibles, se eligió el que mejor conservaba el tono amarillo dorado, asegurando se hubiera mantenido seco. La paja fue picada manualmente en fibras aproximadamente no mayores a 8 cm de largo.

Todos los materiales fueron trasladados hasta el taller donde se ejecutaron las probetas en el furgón de otra compañera agremiada participante de la mesa de trabajo.

3.3 Dosificación de la mezcla

Según las especificaciones del laboratorio del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM), las probetas debían tener unas dimensiones de 30x30x3 cm y eran necesarias 4 unidades por cada ensayo, por ello se decidió fabricar 10 probetas, cinco de cada tipo de revoque.

Para elegir la dosificación del mortero a emplear en las probetas se llevaron a cabo tres pruebas iniciales sobre un muro de adobe de una de las construcciones del taller, con un espesor aproximado de 3 cm, utilizando diferentes proporciones para cada una de ellas. Para la prueba de revoque grueso, se emplearon proporciones de una parte de tierra arcillosa, dos partes de arena gruesa y media parte de paja de trigo y se comprobó que, tras su secado, no presentó ningún tipo de fisuras o grietas.

En el caso de revoque fino se ejecutaron dos pruebas, para una se utilizó una parte de tierra arcillosa y por dos partes de arena fina; para la otra, una parte de tierra arcillosa y tres partes de arena fina. Después de tres días, se revisaron las pruebas realizadas sobre el muro de adobe observando que, aún no secas por completo, mostraron fisuras, originadas en primer lugar a su gran espesor en comparación con la granulometría empleada y en segunda instancia al no empleo de fibras en su mezcla. Frente a esto, el equipo de trabajo decidió elegir la prueba con mayor contenido de arena y ajustar la dosificación de áridos, esperando aumentar de esta forma la estabilidad de las pruebas para adaptarlas al espesor requerido para el ensayo.

Finalmente, las dosificaciones empleadas para las probetas fueron las siguientes:

- Revoque grueso: 1 parte de tierra arcillosa: 2 partes de arena gruesa: 0,5 parte de paja.
- Revoque fino: 1 parte de tierra arcillosa: 4 arena (1,5 gruesa + 2,5 fina).



Figura 5. Prueba dosificación de revoque grueso



Figura 6. Prueba dosificación de revoque fino



Figura 7. Prueba dosificación de revoque fino

3.4 Preparación de las mezclas

Las mezclas se realizaron en seco siguiendo las proporciones establecidas, agregando el agua de forma gradual según la consistencia que iba mostrando el mortero.



Figura 8. Proceso de mezclado



Figura 9. Proceso de mezclado

Para ambas mezclas se preparó primero una barbotina de tierra para incorporar después gradualmente los áridos, y por último la paja en el caso de la mezcla de revoque grueso, garantizando de esta forma una homogeneización adecuada de las mezclas.

Para la confección de las mezclas se utilizó un taladro con broca mezcladora, prestado por uno de los agremiados colaboradores.

Después de la preparación de las mezclas, se dejaron reposar durante 48 horas permitiendo que la mezcla adquiriera mayor cohesión y plasticidad.

3.5 Construcción de marcos para las probetas

De forma simultánea a la preparación de las mezclas, se construyeron 10 marcos de madera de pino, de dimensiones interiores 30x30x3 cm, siguiendo las indicaciones proporcionadas por el laboratorio para las dimensiones finales de las probetas. Fue necesaria la confección de estos marcos para proporcionar un moldaje adecuado que contuviera la mezcla de revoque, y a la vez permitiera la extracción posterior sin dañar las probetas.



Figura 10. Fabricación de moldes

3.6 Elaboración de las probetas

Una vez cumplidas las 48 horas de reposo de las mezclas, las probetas se elaboraron aplicando la técnica del chicoteo en los marcos fabricados, sobre una superficie plana y plastificada previamente, para evitar pudiera quedar la mezcla adherida. Posteriormente se niveló, relleno y compactó la mezcla dentro de los marcos ejerciendo una presión moderada.



Figura 11. Elaboración probetas revoque grueso



Figura 12. Elaboración probetas revoque fino

Una vez la mezcla se asentó un poco y quedó más firme, en el proceso de compresión, se requirió sacar uno de los lados de cada marco para permitir eliminar el aire atrapado en la mezcla y mejorar la compactación otorgando mayor resistencia final al revoque. A intervalos regulares de dos horas durante tres veces, se volvió a compactar cada probeta con un platacho (herramienta de madera utilizada para revocar). Posteriormente, con el fin de corregir cualquier desviación en las dimensiones y cuadratura de las probetas, se colocaron los marcos y se volvió a compactar por última vez la mezcla. Finalmente, como la meteorología lo permitía, las probetas se dejaron secar a la intemperie, al sol y sombra, sin necesidad de protegerlas de la lluvia.

Se realizaron cinco probetas para cada tipo de revoque, manteniendo ante cualquier imprevisto, un margen de una probeta adicional por sobre las cuatro que solicita el laboratorio.



Figura 13. Probetas revoque fino en los marcos



Figura 14. Probetas revoque grueso en los marcos

Durante el proceso de secado, uno de los socios colaboradores revisó diariamente las probetas, velando que cumplieran con un secado lento y progresivo. Se comenzó a observar que las probetas estaban prácticamente secas después del octavo día a contar desde la fecha de su fabricación.



Figura 15. Estado final probeta revoque fino



Figura 16. Estado final probeta revoque fino



Figura 17. Estado final probeta revoque fino

3.7 Traslado de probetas

Una vez finalizado el secado a la intemperie, las probetas se etiquetaron y transportaron al laboratorio donde terminaron el proceso de secado hasta alcanzar masa constante. El transporte se realizó en el vehículo propio de una socia colaboradora, embaladas en poliestireno expandido y protegidas con una esponja para evitar cualquier potencial daño durante el traslado. Los ensayos tuvieron lugar el 24 de octubre de 2022.



Figura 18. Probetas revoque grueso y fino. Foto de los autores



Figura 19. Cámara de ensayos. Foto de los autores



Figura 20. Vaso de ensayo. Foto de los autores

4 RESULTADOS

Los ensayos se realizaron bajo las directrices de la norma chilena Nch2457/2014: en los laboratorios del IDIEM. Los resultados se exponen en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio

Tipo de revestimiento	Densidad (kg/m ³)	Densidad flujo vapor de agua, g [kg/(m ² ·s)]	Permeancia al vapor de agua; W [kg/(m ² ·s·Pa)]	Permeabilidad al vapor de agua; δ [kg/(m·s·Pa)]
Revoque grueso	1645,6	5,4 E-07	3,9 E-10	1,2 E-11
Revoque fino	1882,9	5,7 E-07	4,0 E-10	1,5 E-11

De los resultados interesa, en primer lugar, la permeabilidad al vapor de agua. μ Para poder compararlo con valores de otros materiales es necesario obtener el factor de resistencia al vapor de agua (μ), para ello se debe relacionar este valor con la permeabilidad al vapor de agua del aire según la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{\delta_{aire}}{\delta}$$

Donde: $\delta_{aire} = 0,675 \text{ mg/m h Pa}$

Realizando el cambio de unidades pertinente y aplicando la fórmula antes descrita se obtiene los valores presentados en la tabla 4

Tabla 4. Factor de resistencia al vapor de agua μ (valor adimensional)

Tipo de revestimiento	μ
Revoque grueso	15,6
Revoque fino	12,5

Cuanto menor es este valor, mayor es la capacidad del material para dejar pasar el vapor de agua a través de sí mismo, es más transpirable. Para poner en contexto estos resultados es necesario compararlos con otros materiales tanto industriales como naturales.

Tabla 5. Factor de resistencia al vapor de agua μ de otros materiales

Material	μ	Fuente
Revoque tierra grueso	15,6	Autores
Revoque tierra fino	12,5	Autores
Revoque de barro arcilloso	8	Minke, 2005, p. 36
Revoque de barro limoso	10	Minke, 2005, p.36
Revoque de cal	11	Minke, 2005, p. 36
Mortero de cemento	82	RCP, 2016, p.151-152
Lana de oveja (Bioiaslant)	3,084	Ficha técnica producto
Lana mineral (Ursa Terra)	<1	Ficha técnica producto
Panel lana mineral (Ursa Air)	4.017	Ficha técnica producto
Barrera de vapor (Volcanwrap)	125.839	Ficha técnica producto

5 CONSIDERACIONES FINALES

Si bien los resultados obtenidos son algo más elevados de lo esperado al observar otros valores de permeabilidad de los revoques de tierra en otras regiones del planeta, son buenos resultados que indican una alta permeabilidad frente a materiales industriales basados en derivados del petróleo.

Estos ensayos son los primeros de su tipo realizados sobre revoques de tierra y ejecutados en un laboratorio oficial validado por el ministerio de vivienda y urbanismo de Chile, por lo que los resultados se incluirán dentro de los listados de materiales de construcción aprobados por dicha institución.

Aparte de lo mencionado, es importante destacar que todo ha sido posible gracias a un trabajo colaborativo gestado desde el Gremio de Bioconstrucción de Chile. En un futuro próximo se espera realizar más ensayos, tanto de permeabilidad de vapor de agua como de conductividad térmica en otros materiales naturales y que puedan ser validados frente a los organismos gubernamentales y de esta manera ayudar a aumentar su uso por parte de la sociedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Minke, G. (2005). Manual de construcción en tierra. Uruguay: Editorial Fin de siglo.

RCP – Red de construcción con paja (2016). Reglas profesionales de construcción con paja. Barcelona: Icaria editorial.

Nch 2457/2014 – Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificios – Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua. Chile: Instituto Nacional de Normalización

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de alguna manera en la realización de los ensayos: Jorge Broughton, Anselmo Magaña, Sebastián Gutierrez, Claudia Aracena, Alejandro Osses, Julio Pérez, Marta Riccò, Daniele Santavicca, Vanesa Hauway, Marcelo Cortés, Claudio Vega, Víctor Águila y Catalina Inostroza. Asimismo, queremos agradecer a Camilo Lanata por ofrecernos la oportunidad de ensayar materiales naturales a través de la DITEC.

Notas: las fotos presentadas en el artículo son de autoría de los propios autores

AUTORES

Diana Ayensa, master en Gestión de Proyectos de Bioconstrucción; grado en Edificación por la ETSIE de la Universidad de Granada en España, y la Universidad de Nebrija; constructora y artesana del trabajo con tierra; socia del Gremio de Bioconstrucción de Chile y de Cooperativa de Trabajo Panal.

Marcela Gallardo, técnico en Construcción Sustentable por el Centro de Formación Técnica del Medio Ambiente de Santiago de Chile; constructora, promotora, entusiasta independiente en la construcción de viviendas con materiales naturales en Bioconstrucción Oveja Negra; socia fundadora del Gremio de Bioconstrucción de Chile.

Ignacio Conde, licenciado arquitecto por la universidad Alfonso X El Sabio de España; constructor especializado en materiales naturales; cofundador de TramaLar (Bioconstrucción y arte textil); socio del gremio de bioconstrucción de Chile.