

**Proyecto de iniciación a la investigación 2019**  
**Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo**  
**Universidad de la República**

**MUROS DE TIERRA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**  
**GUILLERMO ZUBELDIA**

**Tutor: Alejandro Ferreiro**

## MUROS DE TIERRA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

### RESUMEN

La tierra es un material milenario. Diversas culturas en todo el planeta lo han utilizado mediante técnicas locales que siguen vigentes. Algunos ejemplos construidos continúan en pie luego de miles de años, demostrando tanto su valor cultural como su durabilidad, resistencia mecánica y confort higrotérmico. El avance tecnológico permitió que no solo se pudieran lograr arquitecturas formalmente orgánicas sino que el reencuentro con este material hizo posible la conformación de diversas geometrías y espacios contemporáneos, redefiniendo, contextualizando y haciendo posible su resignificación. La tapia, el bloque de tierra comprimida (BTC) y el adobe, son técnicas que tienen a la tierra como materia prima fundamental. La primera es una técnica constructiva a base de tierra compactada en encofrados de madera mientras que las otras son técnicas de mampostería. Es de destacar la importancia de la eficiencia energética y del medioambiente como parte intrínseca de las problemáticas actuales, aportando desde diversos lugares una mirada transdisciplinar al abordaje de las problemáticas. Contar con datos y características específicas del material a nivel local permitirá que pueda ingresar al catálogo de materiales normalizados, para hacer posible su evaluación en cuanto a eficiencia energética. Este trabajo pretende ser un avance hacia la inclusión de técnicas no convencionales dentro del abanico normativo de modo de incorporar materiales y técnicas más sustentables, con menor cantidad de energía incorporada y menores emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para la confección de este trabajo se realizaron coordinaciones con Facultad de Ingeniería (FING), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) y Facultad de Química (FQ) de la Universidad de la República (UDELAR).

### PALABRAS CLAVE

Sustentabilidad, Eficiencia Energética, Muros de tierra, Conductividad térmica, Envolverte.

### CONTEXTO

En la actualidad, el problema de la Eficiencia Energética (en adelante EE) conlleva un rol fundamental a la hora de proyectar en arquitectura. La complejidad radica no solo en la confección de espacios que aseguren un uso eficiente de la energía sino también en un plano más profundo en la materialización de los mismos, poniendo atención en el tipo de fabricación y obtención de materias primas del material a emplear.

En el ámbito internacional se han llevado a cabo proyectos que involucran a la EE como eje fundamental, la crisis energética y medioambiental dan lugar al tratado de Kyoto (1997), en donde se hace responsable a la construcción de gran parte las emisiones de CO<sub>2</sub>. En ese sentido la Unión Europea debería reducir antes del 2050 un 85% el uso de cemento, 87% de acero y 90% de aluminio. También es el caso de la "Agenda 2030 para el desarrollo sostenible" aprobada por la ONU en 2015 en donde se establecen 17 objetivos para el desarrollo sostenible. En esta misma línea se encuentran las directrices de EE españolas de 2002 que desencadenaron otra serie de normativas dentro del mismo país incluyendo el etiquetado energético edilicio con la norma RD 47/2007.

A partir de aquí, se detectan cambios en la política local que busca estrategias para mejorar la EE. Algunos ejemplos son el pliego tarifario de la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones (UTE), programas de difusión de EE, programa de normalización y etiquetado de EE, entre otros. Una consecuencia de este avance es el “Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015 - 2024” impulsado por el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) en el cual se plantea aumentar la energía evitada, pero también se plantea el desarrollo de un etiquetado edilicio. El mismo depende de datos climáticos y de la envolvente, dato vital para el cálculo de la EE de un edificio.

La ley N°18597 de Uso eficiente de la energía, aprobada en 2009 declara de interés nacional el uso eficiente de la energía con el propósito de contribuir con la competitividad de la economía nacional y el desarrollo sostenible del país. Constituye el marco jurídico-institucional para el desarrollo de una política de eficiencia energética y establece, entre otras cosas, la elaboración del plan nacional de Eficiencia Energética y la definición de una meta de energía evitada. La energía evitada es la energía no consumida como consecuencia de la aplicación de medidas de eficiencia energética.

El uso eficiente de la energía implica una disminución económicamente conveniente de la cantidad de energía necesaria para producir los bienes y servicios que requieren las personas, asegurando un igual o superior nivel de calidad y una disminución de los impactos ambientales negativos. *[Plan nacional de Eficiencia Energética 2015-2024]*

El término de Construcción Sostenible abarca, no sólo los edificios propiamente dichos, sino que también debe tener en cuenta su entorno y la manera cómo se comportan para formar las ciudades. El desarrollo urbano sostenible deberá tener la intención de crear un entorno urbano que no atente contra el medio ambiente, con recursos, no sólo en cuanto a las formas y la eficiencia energética, sino también en su función, como un lugar para vivir. *[WWF, 1993]*

Los edificios, a lo largo de su construcción, uso y demolición, ocasionan una gran cantidad de impactos ambientales que nacen de nuestra actividad económica. Éstos generan un gran impacto en el ambiente global a través de la energía utilizada para proveer a los edificios de los servicios necesarios y de la energía contenida en los materiales utilizados en la construcción. Los edificios son responsables de aproximadamente el 50% de energía utilizada y de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Otro aspecto que incide en el adelgazamiento de la capa de ozono es la utilización masiva de productos químicos, como por ejemplo los clorofluorocarbonados (CFC's), hidroclorofluorocarbonados (HCFC's) y halones, utilizados comúnmente como refrigerantes. *[Baldwin, 1996].*

La producción de materiales de construcción fabricados industrialmente y productos semielaborados utiliza una cantidad extrema de energía. Por ejemplo para producir 1 kg de cemento se necesita 1 kWh de energía, el acero necesita unos 7 kWh y el aluminio más de 70 kWh por kilogramo. Un metro cúbico de hormigón consume entre 400 y 800 kWh, para producir ladrillos comunes perforados se necesitan 590 kWh/m<sup>3</sup> y para ladrillos macizos (de prensa) hasta 1140 kWh/m<sup>3</sup>. Esto significa que los ladrillos macizos necesitan el doble de energía que concreto.

Por otro lado, los materiales naturales como la tierra solo necesitan hasta 5 kWh por metro cúbico. Por lo tanto, el hormigón necesita unas 100 veces más energía que la tierra. La razón de esto es que, en el caso del cemento, por ejemplo, se consume mucha energía no sólo para la quema, sino también en el pulverizado, empaque y transportación.

Sin embargo, para la producción de ladrillos de tierra o para la construcción de un muro de tapia, no se necesita energía para el material en sí y muy poca para transporte y manipulación en obra. *[Houben, H 1994]*

El crecimiento de la construcción civil implica el desarrollo de una cadena de empresas vinculadas a la producción de insumos y servicios, lo que consecuentemente torna la

actividad una gran consumidora de materiales, agua, energía, y la hace responsable por un elevado impacto ambiental. La escasez de los recursos naturales en los países desarrollados y el elevado consumo energético de las edificaciones movilizaron la discusión y la búsqueda por alternativas que minimizasen la degradación ambiental y permitiesen el mejor control y uso racional de los materiales [Neumann A. et al. 2005].

La envolvente de un edificio debe, entre otras cosas, actuar como elemento moderador de las condiciones ambientales externas y delimitar los espacios arquitectónicos en donde se desarrollan las distintas actividades humanas, con el fin de lograr un ambiente interior confortable, eficiente y saludable, en otras palabras, debe estar preparada para brindar a sus ocupantes protección contra las agresiones externas: lluvia, ruido, radiación solar, etc. [MAS, J. M. et. al. 2011]

Comúnmente el aspecto térmico se ve relegado al momento de construir, debido a que cobran más relevancia temas tales como el costo económico o la situación socio-cultural. Sin embargo, la respuesta térmica de una vivienda tiene influencia sobre las personas que viven en ella. Es importante que la habitabilidad del interior de la vivienda sea la adecuada para lograr el confort térmico y de esa forma, proporcionar una mejora en la calidad de vida. [Cuitiño, G. et. al. 2015]

La humanidad utiliza, desde sus primeros pasos, tierra como material de construcción, destinándola a todo tipo de edificaciones: castillos, murallas, mezquitas, graneros y viviendas. Prácticamente se pueden encontrar ejemplos de todas las funciones arquitectónicas que se construyeron usándola como material principal. En España se encuentran vestigios de su empleo que se remontan a la edad de bronce. En el sureste de Irán, las ruinas de Tepe Yahya, datan de 3.400 años aC. En América, hacia el 1.000 aC, aparecen las primeras viviendas de arcilla cuyo máximo esplendor fue alrededor del año 200 de nuestra era. Cachan y Paramonga en Perú, Paquimé en México, Tular en Chile, son ejemplos representativos de esto. [Alderete C. et. al. 2006].

El uso de la tierra, se ha visto relegado a causa de su asociación con estados de pobreza e insalubridad. Esto ha llevado a que fuera reemplazada por materiales cada vez más manufacturados, es así, que en las ciudades al momento de construir, la primera opción es el hormigón y la mampostería de ladrillos cocidos, sobretodo en lugares sísmicos. Actualmente, la demanda de viviendas crece rápidamente, y no en todos los casos se puede tener acceso a una vivienda tradicional, de hormigón y ladrillo. Esto genera un aumento del déficit habitacional que se incrementa año a año. [Cuitiño, G. et. al. 2015]

La afirmación de que gusanos o insectos pueden vivir en muros de tierra es infundada cuando estos son macizos. Los insectos solo pueden existir si hay huecos en muros de bajareque o de adobe. En Sudamérica el mal de chagas que conduce a la ceguera proviene de insectos que viven en los muros de bajareque. Los huecos se pueden evitar construyendo muros de tierra apisonada o con bloques de barro con juntas totalmente rellenas. [Minke, 2013]

Una de las consultas más frecuentes respecto a los insectos es sobre el problema de la vinchuca. Cabe citar aquí el artículo sobre la enfermedad de Chagas publicado en la revista Arquitectura Popular y basado en una investigación realizada en Paraguay. El artículo es muy claro respecto a que "...sin importar el material de construcción utilizado para la paredes, la infestación se da, no en función de los materiales de construcción utilizados, sino de la terminación del paramento interior (las superficies) y de las condiciones favorables o no del ambiente...". [Mazzeo, J. et. al. 2007]

## OBJETIVOS

Objetivos generales:

A. Estudiar y evaluar el desempeño físico y energético de los componentes construidos con tierra.

Objetivos específicos:

1. Realizar ensayos de desempeño higrotérmico y resistencia mecánica a compresión de componentes constructivos con tierra, particularmente de adobes y BTC.
2. Comparar y evaluar parámetros de eficiencia energética en técnicas constructivas con tierra y técnicas convencionales.
3. Difundir y promocionar aquellas técnicas constructivas de bajo impacto ambiental.

## METODOLOGÍA

Se inició el trabajo en base a bibliografía y entrevistas a decisores del ámbito público y emprendedores del sector privado para determinar el estado del arte de la eficiencia energética y su relación con la construcción en tierra en el Uruguay.

Posteriormente se realizaron coordinaciones con otros servicios de Udelar para la realización de ensayos de laboratorio de muestras de diferentes departamentos (Canelones, Colonia, Maldonado, Montevideo y Rocha) en adobes, bloques de tierra comprimida (BTC) y muestras de tierra en estado natural, que permitan conocer en detalle las características físicas del material.

Se trazó un mapa de interrelación con los diferentes actores que intervienen en las decisiones de políticas públicas, productivas, económicas y educativas de la construcción con tierra y su relación con la eficiencia energética. Luego de establecer el mapeo se coordinaron entrevistas con personas involucradas en cada uno de los campos o instituciones.

Para el armado de la pauta de la entrevista si bien había una gran diversidad de disciplinas entre los entrevistados, se previó indagar sobre temas generales de eficiencia energética y construcción con tierra y luego se profundizó en la disciplina de cada profesional aprovechando el *expertiz* del entrevistado.

En paralelo a la realización de probetas se procesaron las entrevistas realizadas. Posterior a la entrega del informe parcial se amplió el abanico de ensayos de laboratorio que estaban planteados en el inicio de la investigación, se tuvieron en cuenta los valores microscópicos de la composición de las muestras por medio de ensayos en facultad de química (difracción de rayos X y Raman) y se agregaron también ensayos de resistencia mecánica a la compresión en facultad de arquitectura.

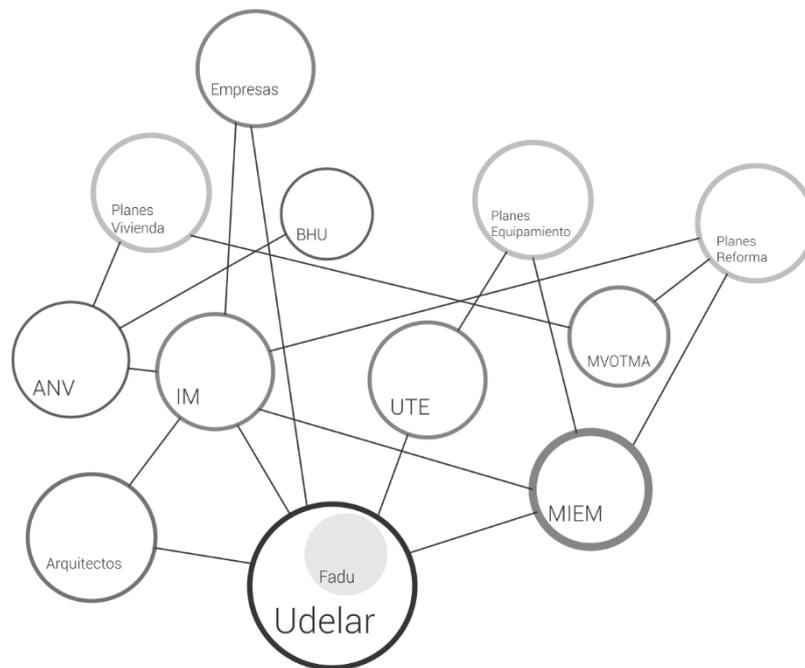
Finalmente se procesaron los datos recabados y se elaboraron los modelos para correr las simulaciones correspondientes.

## DESARROLLO

En base a la revisión bibliográfica y a dudas y consultas que se visualizaron como persistentes en la línea de la construcción con tierra se pudo detectar una serie de interrogantes, en dicha

revisión se confeccionaron las baterías de preguntas y algunas pautas a ser aplicadas en las futuras entrevistas a los referentes que se seleccionarán en la etapa posterior.

Para la coordinación de las entrevistas se tomó en cuenta el diagrama o red de instituciones como se muestra en la Figura 1, que se confeccionó con el fin de detectar actores o instituciones de relevancia en el tema, luego se coordinaron las entrevistas presenciales con las personas correspondientes. Se grabaron la totalidad de las entrevistas previo consentimiento de los entrevistados, y fueron desgrabadas manualmente y procesadas para destacar las partes relevantes de las mismas.



**Figura 1** – Red de decisores (elaboración propia)

Se propusieron entrevistas de 30 minutos aproximadamente, con algunas preguntas pautadas pero dejando un espacio libre a la indagación de otras cuestiones que pudieran aportar datos o una visión más integral de asunto.

Se coordinaron estas entrevistas con referentes del ámbito académico como la Prof. Arq. Alicia Picción de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU-UDELAR), de la construcción con formación en arquitectura como la Arq. Cecilia Alderton, la Arq. Helena Gallardo, la Arq. Rosario Etchebarne y la Arq. Cecilia Laffite; del ámbito empresarial productivo se entrevistó a las empresas Lecos, Ancestral, Ecoblock, Ladrillera Julio, Ladrillera de Andrés y Ladrillera de Néstor; y del sector institucional-normativo se entrevistó a la Arq. Alicia Mimbacas del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM-DNE) y Marianela Elizalde de la Intendencia de Montevideo (IM). Se intentaron también coordinaciones con otras instituciones como UTE, ANV, MVOTMA y BHU pero no fueron exitosas.

En las entrevistas a arquitectos vinculados a la construcción con tierra dentro y fuera del ámbito académico se recabaron datos de proveedores de materiales de construcción logrando un sondeo del mercado para la obtención de muestras de sus productos a ser ensayados en laboratorio. En dichas oportunidades resultaban recurrentes algunos proveedores de adobes y BTC a los que luego se los entrevistó y al mismo tiempo se retiraron las muestras para los futuros ensayos. Las muestras fueron elegidas in situ y de manera aleatoria para lograr mayor diversidad de la misma y para evitar resultados sesgados por

tandas de producción que pudieran arrojar resultados particulares por alguna dificultad en confección de los mampuestos.

Posteriormente se procedió a definir el cronograma de ensayos con los laboratorios y estudiar la elaboración de las muestras a ensayar. En este proceso se identificaron los aparatos y las normas que previamente se habían relevado para la realización de los ensayos, en algunos casos por ser equipos de una alta especificidad y de fabricación en el exterior necesitaban calibración, lo que retrasó en algunos casos los resultados.

En el caso de ensayo de resistencia a la compresión de adobes se realizaron según norma ABNT NBR 16814:2020, por tal motivo hubo que confeccionar cubos pequeños a partir del adobe original y encabezarlos con mortero de arena y portland en proporción de arena-cemento (2:1), luego se estabilizaron en cámara controlada (temperatura 20°C y 50% de humedad relativa aproximadamente) hasta lograr peso constante. Se elaboraron 8 muestras como mínimo de cada proveedor y se comprimieron hasta la rotura como se muestra más adelante.

Para ensayar los BTC a resistencia a compresión según norma UNE 41410:2008 se tuvo que retirar previamente las rebabas con sierra sensitiva y luego dejar estabilizar en la cámara controlada descrita anteriormente hasta llegar a peso constante ya que en el proceso de cortado absorbieron una cantidad considerable de humedad en la sierra.

Para la confección de las muestras para ensayos de conductividad se fabricaron moldes de 20 x 20 x 5 cm en madera, se desgranaron los adobes originales hasta llegar a polvo con las fibras y se volvió a humedecer para el llenado de los moldes, luego se dejó secar al exterior en un lugar techado para simular la producción normal del adobe. Para llegar a las medidas de la muestra a ensayar (15 x 15 x 3 cm) se cortó la muestra con sierra circular de mesa y para lograr ángulos rectos, finalmente se alisaron las caras con lijadora de banda de grano 40 para lograr una superficie lisa en las caras de contacto de 15 x 15cm.

Posteriormente al igual que en ensayos de resistencia a compresión se dejaron las muestras confeccionadas en cámara controlada de humedad y temperatura para lograr estabilizarlas. El ensayo de conductividad se realizó según norma UNE-EN 12664 con el equipo Meter EP500e de placa caliente.

Para los ensayos de permeabilidad al vapor de agua se realizaron probetas a medida de forma cilíndrica de 85mm de diámetro y 2 cm de espesor para ser analizadas con método de copa según la norma ISO 12572:2016, dichas probetas se confeccionaron a partir de placas de 20 x 20 x 2 cm y luego se cortaron con mecha copa de 90mm.

Para los ensayos de composición se partieron trozos pequeños de adobes y BTC para llevarlos a polvo en motero y envasarlos en recipientes de vidrio para su posterior ensayo de DRX (Difracción de Rayos X) en Facultad de Química.

Luego se calcularon valores de densidad para todas las muestras y se tomaron valores de permeabilidad al vapor de agua según bibliografía para lograr comparar su comportamiento higrotérmico con otras tecnologías constructivas. Para ello se ingresaron valores de densidad, conductividad térmica, permeabilidad al vapor de agua, calor específico y factor de resistencia al vapor de agua en software HTERM 3.0, creando así un nuevo material y poder correr la simulación de un muro para visualizar sus posibles riesgos de condensación.

De igual manera se comparan valores de conductividad térmica de muros compuestos por técnicas a base de tierra y muros de construcción tradicional, para estos se usarán valores de conductividad tomados de los ensayos de laboratorio y los valores que se encuentran en el simulador de la página web de la IM.

## RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de las entrevistas que se pudo obtener una idea mas cercana al estado actual y su posible proyección hacia el futuro de la temática.

Se detecta un gran avance de la construcción y la eficiencia energética respecto a nuevos materiales y a la generación energética. Se puede afirmar que existe una preocupación actual

de impulsar medidas en pos de reducir emisiones y reducir el consumo energético aumentando los valores de energía evitada pero quedan en evidencia demandas insatisfechas en el ámbito normativo de la construcción con tierra.

Por otro lado algunos programas de impulso institucional relacionados con energías renovables o eficiencia en edificaciones han quedado sin efecto o se han debilitado debido en parte a su escasa difusión y a cambios de prioridades en la agenda.

Desde el punto de vista profesional y empresarial se percibe un fuerte convencimiento de que este sería el camino correcto, pero que falta apoyo estatal, marco normativo y datos científicos. Por ende existen agrupaciones de profesionales, constructores y empresas que impulsan este tipo de técnicas constructivas.

## COMPOSICIÓN DE LA TIERRA

Los adobes y BTC fueron obtenidos de diferentes proveedores y poseen diversas medidas como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 - Presentación de muestras

Tipo	ID	Origen	Medidas L.a.h(cm)
Adobe	A1	Montevideo	22.5x11.6x5.8
	A2	Canelones	23.5x12.0x6.1
	A3	Canelones	22.2x12.1x5.9
BTC	B1	Rocha	24.9x12.3x6.4
	B2	Canelones	24.9x12.6x5.6
	B3	Colonia	25.1x12.7x5.7

Origen: Elaboración propia

A nivel general, los suelos se pueden clasificar según la proporción de arena, limo y arcilla que contienen. Los porcentajes aproximados de cada uno de estos permiten clasificarlos como: Suelo arenoso (0–10 % arcilla, 0–10 % limo, 80–100% arena), Suelo arcilloso (50–100 % arcilla, 0–40 % limo, 0–45% arena), Suelo limoso (0–15 % arcilla, 85–100 % limo, 0–20% arena), Suelo franco (10–30 % arcilla, 30–50 % limo, 25–50% arena), como se esquematiza en la Figura 2 y se representa en el primer diagrama de la Figura 3.

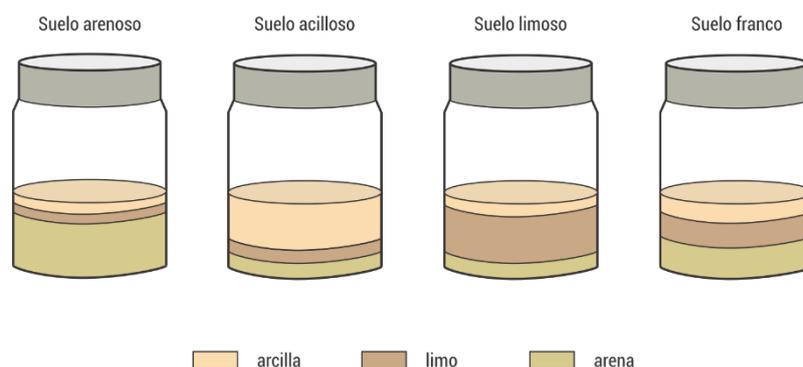


Figura 2 – Esquema de prueba de campo por sedimentación

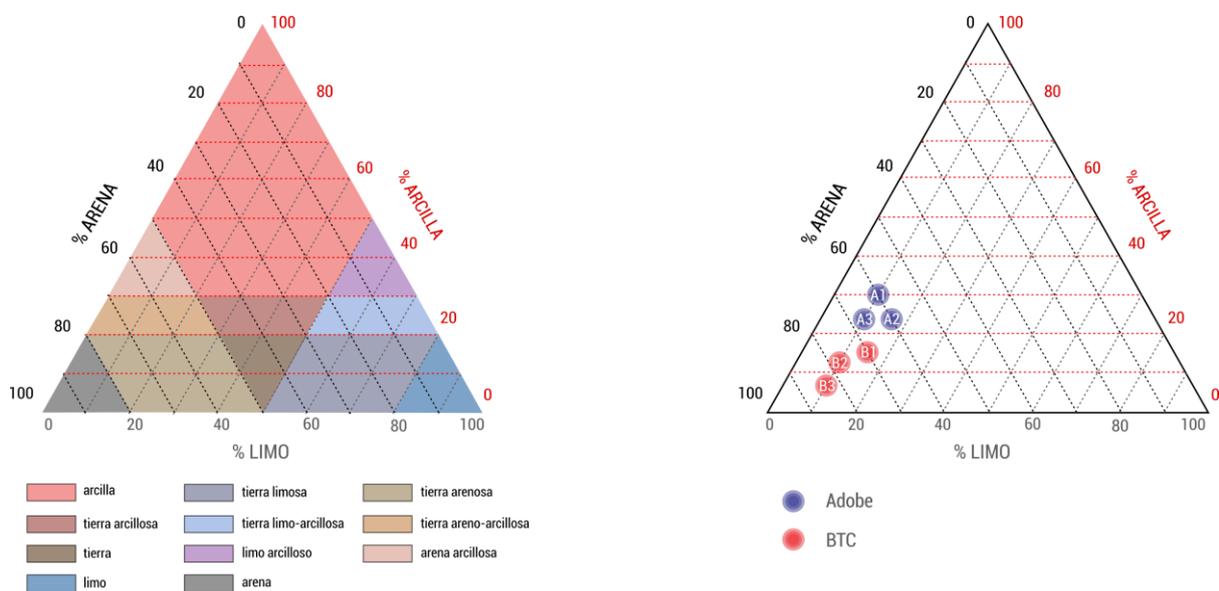
Para este trabajo de investigación se realizaron pruebas de campo para determinar su composición granulométrica por sedimentación, obteniéndose una composición que se encuentra dentro de los márgenes establecidos por la norma ABNT NBR 16814:2020 para adobes y por la norma UNE 41410 - 2008 para BTC y que se encuentran expresados en la Tabla 2.

La clasificación correspondería a una tierra areno-arcillosa y a una arena arcillosa para los adobes y una tierra arenosa para el caso de los BTC como se muestra en la Figura 3.

**Tabla 2 -** composición de muestras

Tipo	ID	Origen	% Arena	% Limo	% Arcilla
Adobe	A1	Montevideo	60	10	30
	A2	Canelones	60	15	25
	A3	Canelones	65	10	25
BTC	B1	Rocha	70	15	15
	B2	Canelones	75	10	15
	B3	Colonia	80	10	10

*Origen: Elaboración propia*

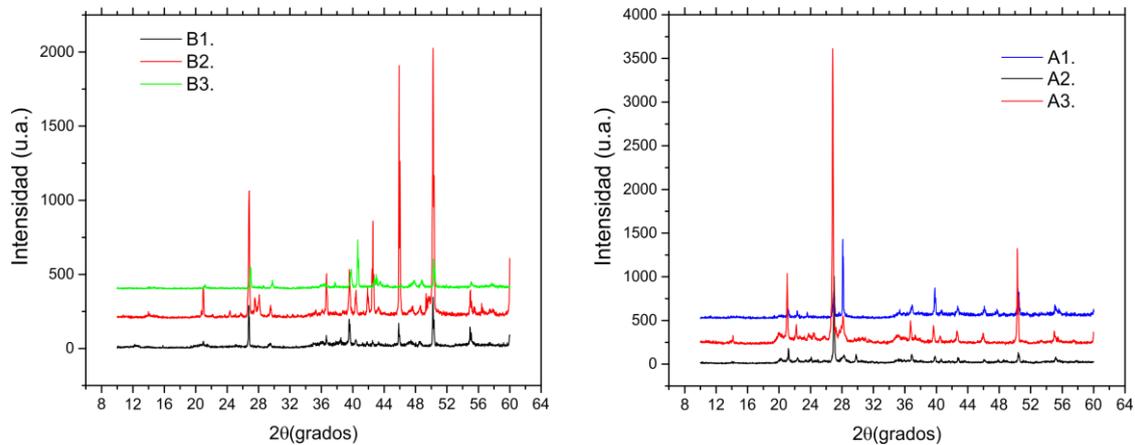


**Figura 3 –** Composición de suelo (elaboración propia a partir de USDA)

De los ensayos por difracción de rayos X se concluye que en las muestras de adobes A1, A2 y A3 hay un alto grado de correspondencia con el dióxido de silicio y silicatos de sodio y calcio, y por otro lado las muestras de BTC muestran gran correspondencia con dióxido de silicio, cuarzo y carbonato de calcio.

No fue necesario realizar ningún tipo de tratamiento sobre las muestras suministradas. Se realizó un diagrama de difracción de rayos X por muestra utilizando un difractómetro de polvo RIGAKU ULTIMA IV, operando en las siguientes condiciones:

Radiación CuK $\alpha$ , rango de  $2\theta$  barrido = 10.00 a 60.00°, paso = 0.02°, segundos por paso = 2, voltaje de la fuente = 40 kV, corriente = 30 mA, geometría: Bragg-Brentano. La composición cristalina fue analizada mediante el software SearchMatch como se muestra en la Figura 4.

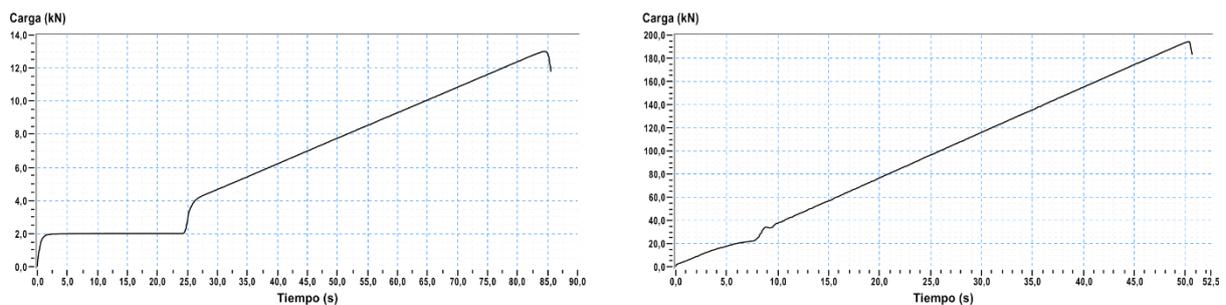


**Figura 4 – Resultados de Difracción de Rayos X**

## RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La velocidad de carga empleada para los ensayos de adobes fue de 0.05 MPa/s mientras que para los BTC fue de 0.150MPa/s.

En los gráficos de la Figura 5 se representan dos muestras, la A2-A1 y la B2-H1 de Adobe y BTC respectivamente, donde se ve claramente donde colapsa el mampuesto pero con cargas visiblemente diferentes resistiendo 4.16MPa y 7.37MPa respectivamente.



**Figura 5 – Gráfico de resistencia a compresión de adobe y BTC respectivamente**

Según la norma ABNT NBR 16814:2020 entendemos que las muestras A1, A2 y A3 cumplen con el requisito de tener resistencias a compresión mayores a 1,5MPa.

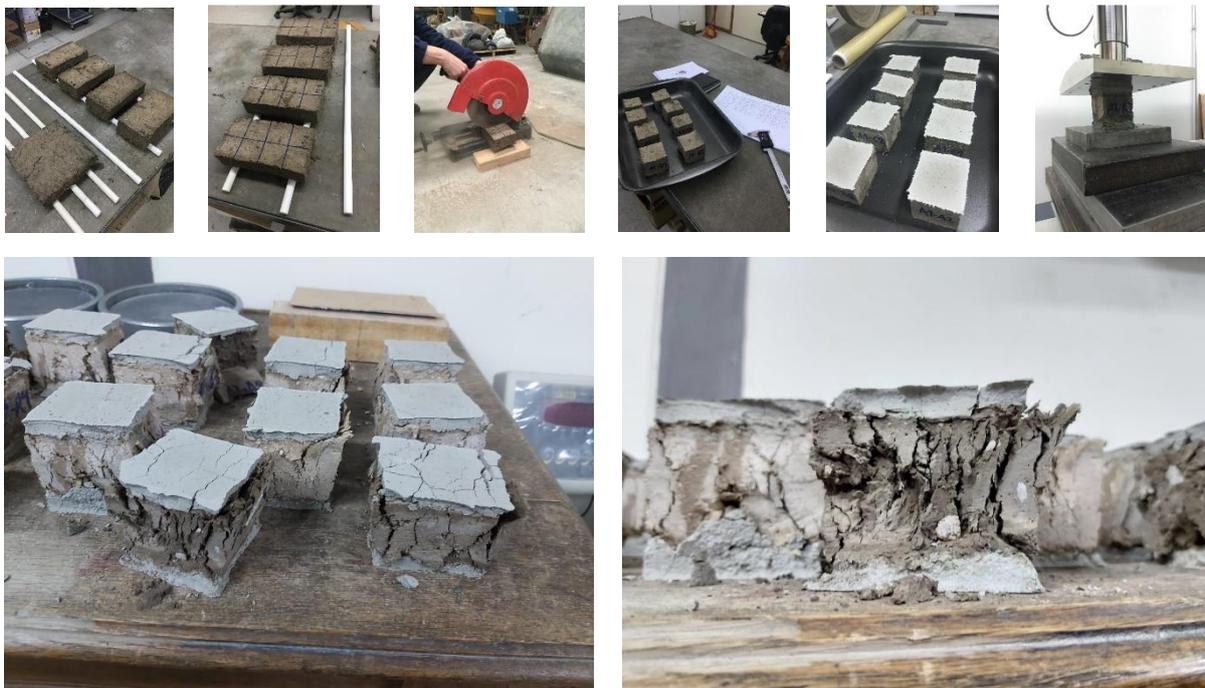
Por otro lado según la norma UNE 41410:2008 podemos afirmar que los resultados obtenidos para las muestras B2 y B2 corresponden a la clasificación BTC5 (resistencias mayores a 5MPa) mientras que la muestra B1 corresponde a la BTC1(resistencia mayor a 1,3MPa), esto se debe que a esta muestra no contiene agregados cementicios en su composición como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3** - Resistencia a la compresión en MPa:

Muestra	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	Valor
<b>A1</b>	3.95	4.43	3.68	4.34	3.82	3.15	3.2	3.87	<b>3.81</b>
<b>A2</b>	4.16	4.24	3.5	3.5	4	4.04	3.96	3.91	<b>3.91</b>
<b>A3</b>	2.82	3.29	3.23	2.88	2.44	2.64	3.16	3.49	<b>2.99</b>
<hr/>									
BTC	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	
<b>B1</b>	1.84	1.58	2.28	1.41	1.72	2.48	1.79	1.65	<b>1.84</b>
<b>B2</b>	7.37	6.52	6.16	6.18	7.91	3.62	7.36	8.02	<b>7.67</b>
<b>B3</b>	6.6	6.17	6.45	7.12	6.95	7.06			<b>6.67</b>

Origen: *Elaboración propia*

A diferencia de la rotura plástica presentada por los BTC, en donde la gráfica de compresión expone un pico que representa el colapso de la muestra, en los adobes este fenómeno se representa de forma elástica, en donde finalmente la muestra colapsa pero su rotura es de manera progresiva y los restos siguen teniendo cohesión como se muestra en la figura 6.



**Figura 6** – Fotos de procedimientos en ensayos de compresión en adobes

## DENSIDAD Y PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

Las probetas fueron elaboradas a partir de los mampuestos obtenidos, se pulverizaron para generar nuevamente la mezcla y llegar al espesor requerido, luego fueron cortados con mecha copa como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7** – Imágenes de proceso de obtención de probetas para ensayo PVA

Los valores de densidad fueron obtenidos a partir de muestras estabilizadas en laboratorio de los tres fabricantes de adobes y tres fabricantes de BTC, se encuentran dentro de los rangos esperados según la bibliografía consultada.

Los valores de permeabilidad al vapor de agua (PVA) representados en la Tabla 4 corresponden a cerámicos cocidos para poder completar la simulación de riesgo de condensación en HTERM 3.0, estos valores no pudieron ser obtenidos en laboratorio. A pesar de esto según bibliografía consultada los resultados pudieron haber sido más favorables, por lo tanto estamos dentro del margen de seguridad.

**Tabla 4** - Densidad y PVA

Tipo	ID	Origen	Densidad kg/m <sup>3</sup>	PVA Kg/m.s.PA
Adobe	A1	Montevideo	1273	1.98e-11
	A2	Canelones	1550	1.98e-11
	A3	Canelones	1415	1.98e-11
BTC	B1	Rocha	1670	1.98e-11
	B2	Canelones	2030	1.98e-11
	B3	Colonia	2030	1.98e-11

*Origen:* Elaboración propia

## CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Al igual que para permeabilidad al vapor de agua se elaboraron probetas a medida para ensayar su conductividad térmica. Se realizaron moldes y luego del proceso de secado se cortaron en sierra y se lijaron para lograr superficies lisas requeridas para el ensayo como se muestra en la figura 8, y sus correspondientes valores de conductividad en la Tabla 5.

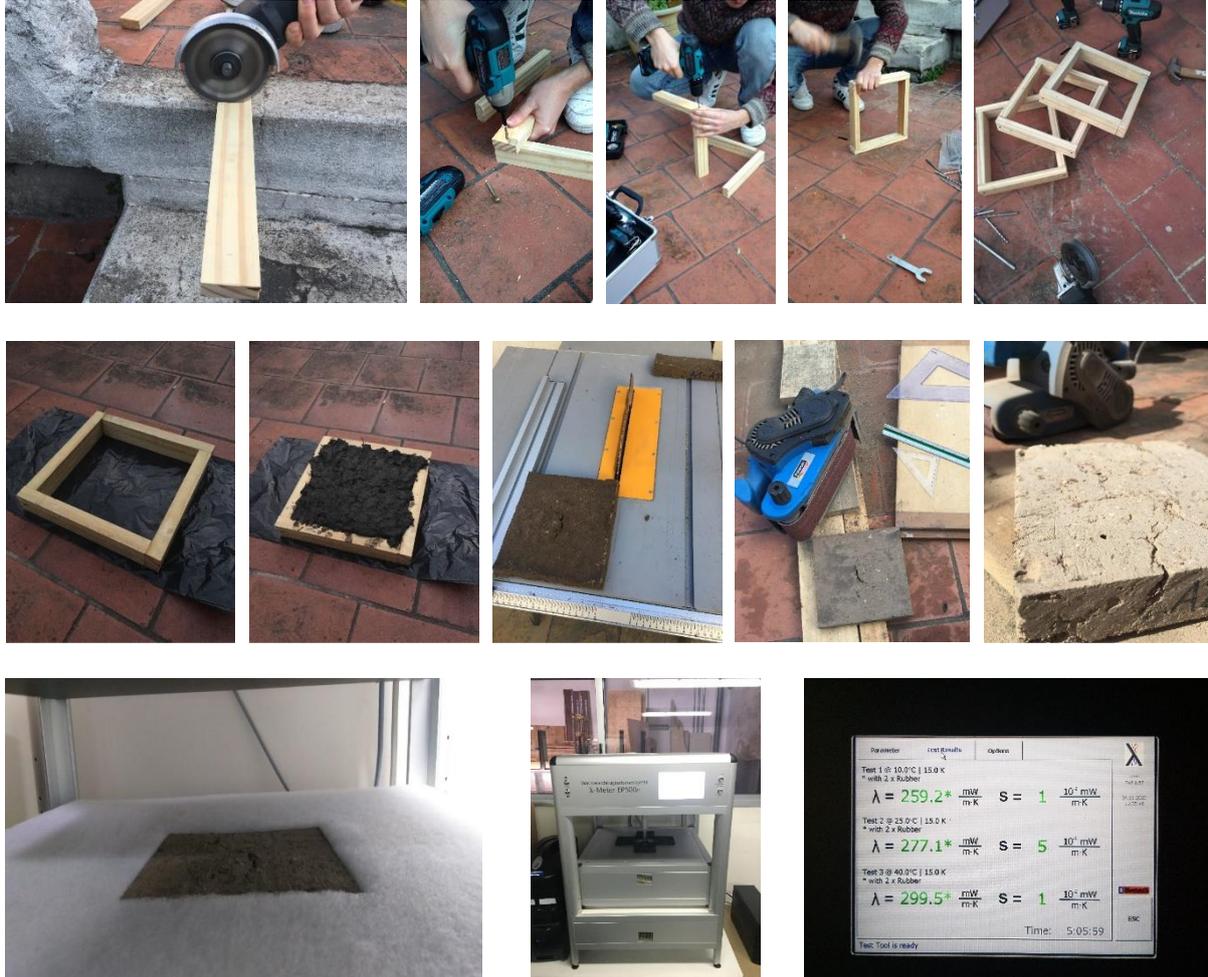


Figura 8 – Fotos de procedimientos en ensayos de conductividad en adobes

Tabla 5 - Resultados conductividad térmica W/(m.K)

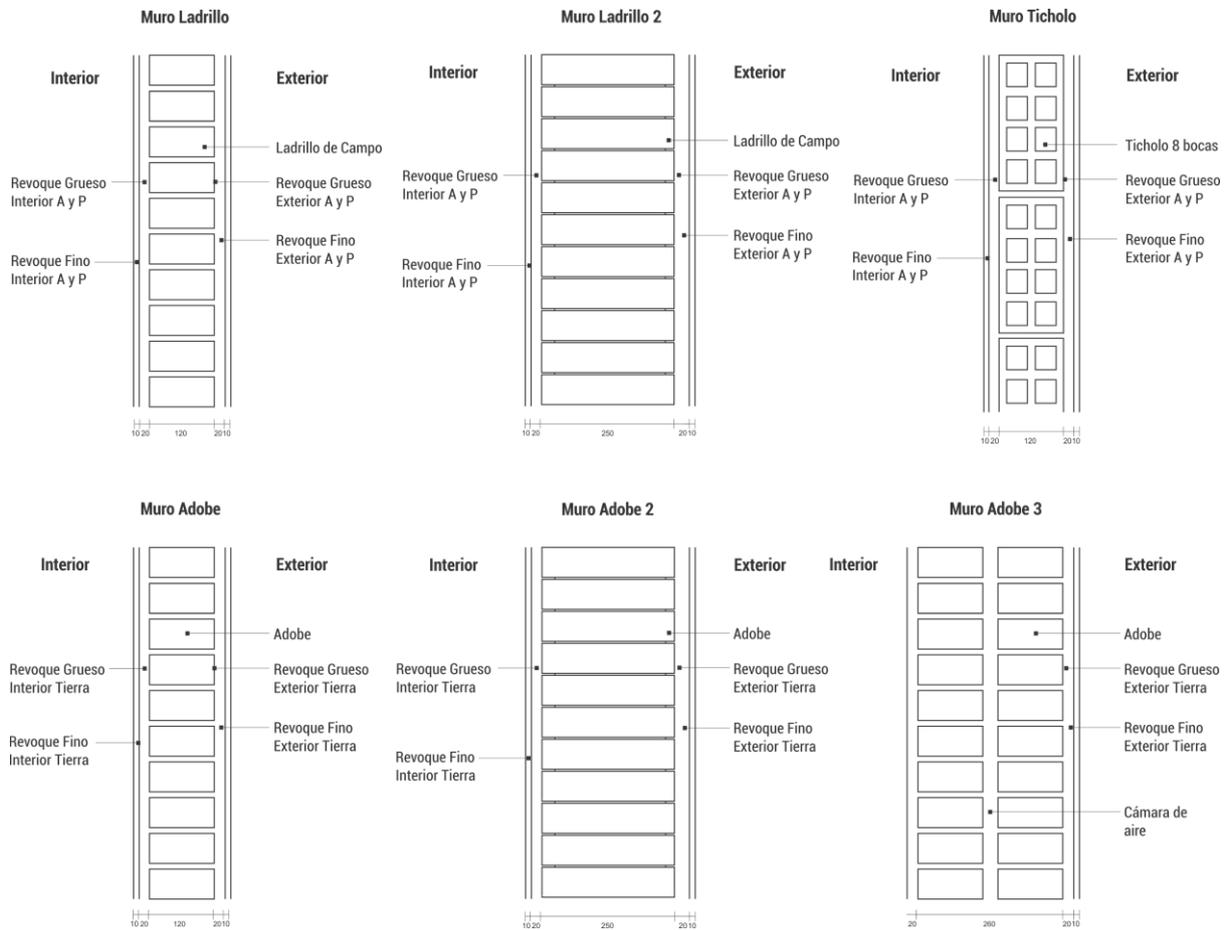
Temperatura	10°C	25°C	40°C	Final
<b>Muestra</b>				
<b>A1</b>	0.209	0.229	0.253	0.229
<b>A2</b>	0.259	0.277	0.300	0.277
<b>A3</b>	0.350	0.369	0.406	0.369

Origen: Elaboración propia

## SIMULACIONES

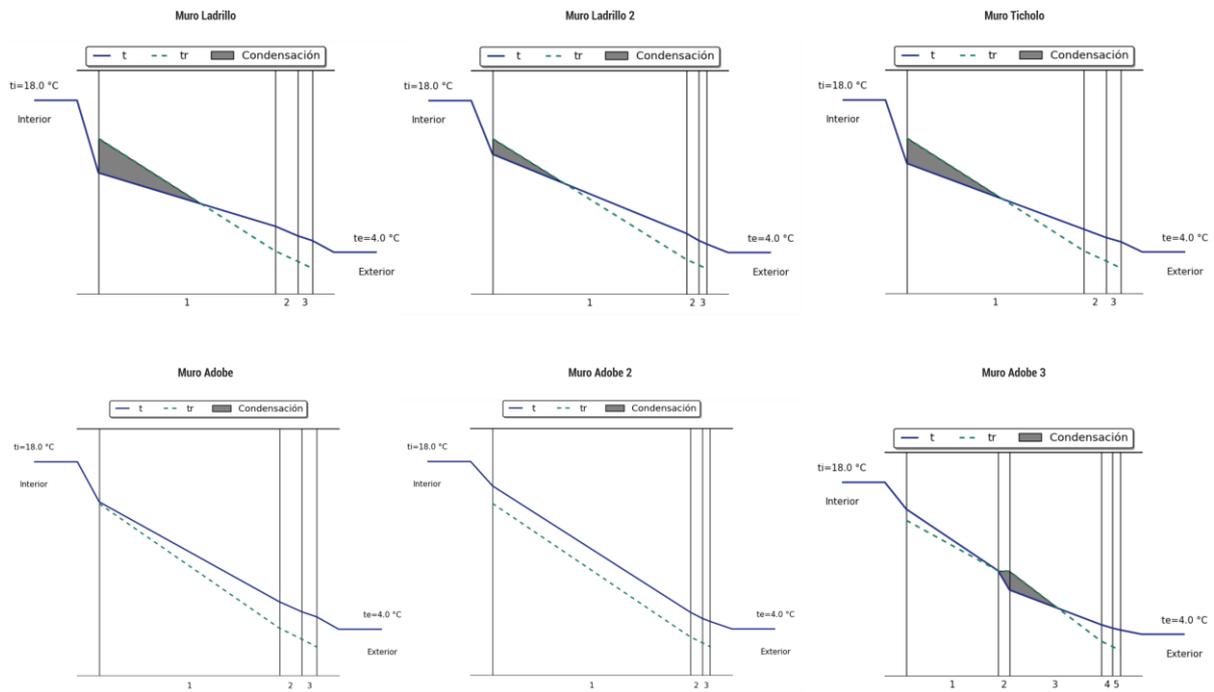
A partir de simulaciones se comparó el desempeño higrotérmico de muros de construcción tradicional con muros de adobe.

En los siguientes diagramas de la Figura 9 se esquematizan los componentes de muros tradicionales de mampuestos cerámicos y muros de adobes.



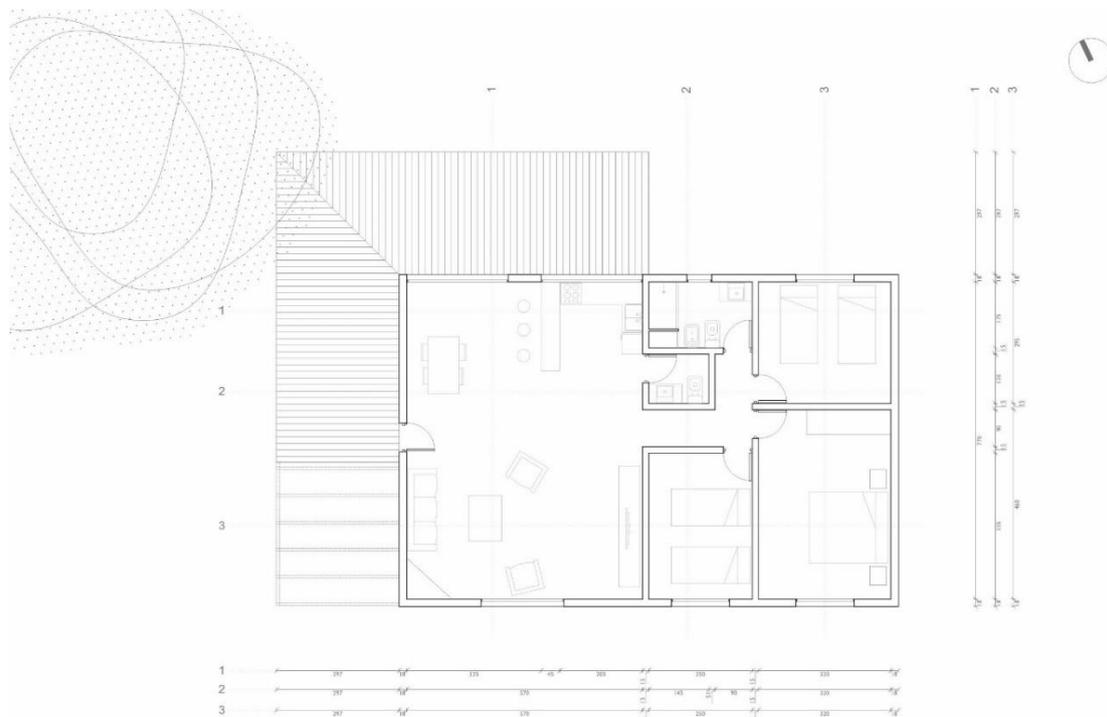
**Figura 9 – Muros elegidos para la simulación**

A partir de estos esquemas se procedió a ingresar los valores de componentes de los cerramientos, se tomaron los datos de los 3 fabricantes de adobes y se los comparó con muros de construcción tradicional con cerámicos (ladrillo de campo y ticholo) en HTERM 3.0. Se utilizó una temperatura interior  $T_i=4^{\circ}\text{C}$ , temperatura exterior  $T_e=18^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa exterior  $H_{re}=90\%$  y humedad relativa interior  $H_{ri}=80\%$ . Se utilizaron también los valores de conductividad para adobes obtenidos de los ensayos correspondiente al valor menos favorable de  $0.369\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  y la permeabilidad al vapor de agua y los espesores de muros expresados en las tablas y gráficos anteriores, para evaluar los riesgos de condensación dentro de los muros arrojando los resultados expresados en la Figura 10.



**Figura 10** – imágenes obtenidas de simulaciones en HTERM 3.0

Para calcular los consumos de energéticos en el período frío y caluroso se tomó una vivienda unifamiliar de 100 m<sup>2</sup> con el plano y sus respectivas orientaciones como se muestra en la Figura 11.



**Figura 11** – Planta modelo elaborada para simulaciones de consumo energético

Se procedió a correr la simulación de consumos de energéticos con los mismos criterios de envolvente que para la comparación de condensaciones (Comparación de muros tradicionales cerámicos con muros de adobes).

Previamente se ingresaron valores de superficies y orientaciones de cada cerramiento de la envolvente así como su factor de huecos para el modelo de la vivienda ubicada en Montevideo. De igual manera se ingresó el valor Transmitancia térmica (U) de cada cerramiento, para los muros de construcción tradicional se calculó a partir del dato de conductividad térmica aportado por HTERM 3.0 ( $\lambda=0.79\text{W/m.k}$  y  $U=2.63\text{W/m}^2\text{k}$ ) y para el caso de los adobes se calculó la Transmitancia en base a la conductividad térmica resultante de los ensayos, obteniendo los resultados representados en la Figura 12 y Figura 13.

### Simulación con muro simple de ladrillo de espesor 30cm

**Demandas energéticas de calefacción y refrigeración**  
 Demanda cal 38,13 kWh/m<sup>2</sup>-año; Dcal,lim 54,78 kWh/m<sup>2</sup>-año; CUMPLE  
 Demanda ref 13,77 kWh/m<sup>2</sup>-año; Dref,lim 14,26 kWh/m<sup>2</sup>-año; CUMPLE

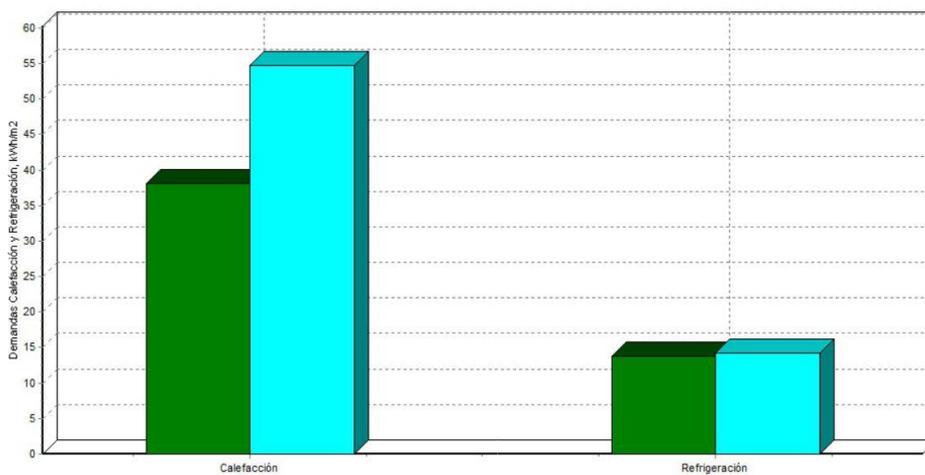


Figura 12 – Imagen resultado de la simulación en EDEE con muro tradicional.

### Simulación con muro simple de Adobe de espesor 30cm

**Demandas energéticas de calefacción y refrigeración**  
 Demanda cal 24,58 kWh/m<sup>2</sup>-año; Dcal,lim 54,78 kWh/m<sup>2</sup>-año; CUMPLE  
 Demanda ref 12,22 kWh/m<sup>2</sup>-año; Dref,lim 14,26 kWh/m<sup>2</sup>-año; CUMPLE

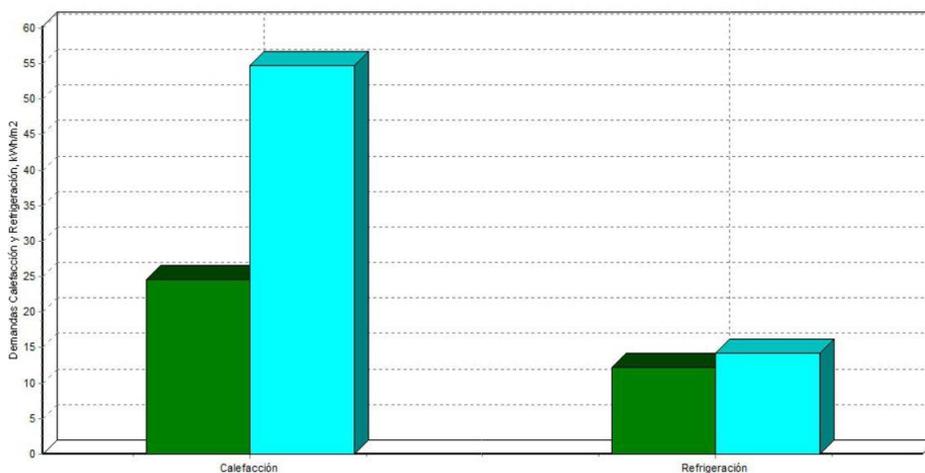


Figura 13 – Imagen resultado de la simulación en EDEE con muro de adobe.

Resultaron favorables las simulaciones de consumo energético e higrotérmico, en las cuales los consumos energéticos en los períodos frío y caluroso fueron menores con muros de adobe así como el riesgo de condensación de agua dentro de los mismos.

## CONCLUSIONES

Se detectaron algunas coincidencias y contradicciones a la hora del procesamiento de entrevistas para descubrir el estado del arte de la temática, por un lado se percibe un cierto pesimismo o desprotección institucional con respecto a la construcción con tierra y a las regulaciones correspondientes así como una falta de impulso o promoción de dichas técnicas desde las instituciones, sin embargo se encuentran convencidos de que la construcción con tierra resulta una respuesta aceptable a la hora de reducir impacto ambiental y emisiones de gases de efecto invernadero. Con respecto a la EE se percibe una fuerte evolución de planes y políticas, pero han ido perdiendo fuerza y apoyo en los últimos años por falta de recursos y la discontinuación de algunos planes.

La eficiencia energética en la construcción no solo implica tener en cuenta un cerramiento que cumpla con los requisitos constructivos en su composición para un bajo consumo energético en el acondicionamiento interior, sino también tener en cuenta orientaciones de los cerramientos, vanos y sus respectivas protecciones, asoleamiento, vientos, y todo un conjunto de decisiones que terminan incidiendo en el consumo energético de un espacio, variables que deben ser tenidas en cuenta como un todo cuando se proyecta un espacio.

En la actualidad, se ha hablado mucho sobre sustentabilidad y productos amigables con el medioambiente, la construcción no escapa a esta realidad y existen infinitudes de productos que intentan satisfacer las necesidades en relación a estas discusiones y sus demandas. De tal manera surge en la actualidad concepto GreenWashing, en el cual se intenta introducir en el mercado un producto con alguna característica sustentable pero que sin la correcta aplicación termina siendo igual o peor que las técnicas o tecnologías tradicionales.

La tierra como materia prima es un material natural, abundante, económico, no contaminante, fácilmente extraíble y al alcance de todos. Quizá por eso genera tantas controversias en la industria de la construcción, porque de alguna manera va a contracorriente de las lógicas y maneras de pensar de la economía productiva de los tiempos que corren.

A diferencia de algunos países europeos, España por ejemplo, del cual Uruguay ha tomado como modelo en varios aspectos en temas de energía, estamos aun lejos de poder llegar cumplir algunas metas (por ejemplo etiquetado edilicio) en cuanto a la eficiencia energética en las construcciones, todavía no poseemos una política clara a nivel nacional en estos temas y muchas decisiones quedan libradas a cada municipio, teniendo cada una, normativa y contralor independientes.

En base a los datos recabados podemos concluir que la tierra como material de construcción no solo puede ofrecer una resistencia a los esfuerzos mecánicos y un buen rendimiento higrotérmico sino que también aporta a reducir el impacto ambiental al ser un material que posee muy baja energía incorporada para su obtención.

En el futuro se espera continuar estudiando y profundizando los ensayos higrotérmicos con una cantidad mayor de muestras y ampliando el abanico a otras técnicas no convencionales con el fin de profundizar el conocimiento de este material tan noble.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alderete C., Arias, L., Latina, S., Mellace, R., Sosa, M., Ferreyra, I. : (2006) El suelo-cemento, un recurso tecnológico para la construcción de edificios.
- Baldwin, R.: (1996) Environmental Assessment and Management of Buildings (The UK viewpoint, Report 7150/1 for consultation, BSRIA)
- Correia, M., Dipasquale, L., Mecca, S. : (2014) "Versus : heritage for tomorrow - Vernacular Knowledge for Sustainable Architecture"
- Cuitiño, G., Esteves, A., Maldonado, G., Rotondaro, R. : (2015) Análisis de la transmitancia térmica y resistencia al impacto de los muros de quincha. Informes de la Construcción.
- Houben, H.: (1994) Ecological and energy-saving advantages and benefits of building with Earth.
- Ley N° 18597 (2009) "Ley de uso eficiente de la energía". Uruguay. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18597-2009>
- MAS, Jorge Marcelo; KIRSCHBAUM, Carlos Federico; TONELLO, Graciela Lucía. "Vivienda rural en suelo-cemento: Investigación, transferencia y autoconstrucción". En: Construcción con tierra. Tecnología y Arquitectura. Congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2010/2011. [online].
- Mazzeo, J, Lasus, O, Calone, M, Sanguinetti, J, Ferreiro, A, Márquez, J y Mato, L. (2007.). Proyecto hornero: prototipo global de experimentación construcción con materiales naturales. Udelar.
- Minke, G.: (2013) "Manual de construcción en tierra"
- Ministerio de Industria Energía y Minería (2015) "Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015-2024". Disponible en: <http://www.miem.gub.uy/documents/10192/0/Plan%20Nacional%20de%20Eficiencia%20Energetica.pdf>
- Ministerio de Industria Energía y Minería. Dirección Nacional de Energía (2017) "Manual de eficiencia energética y energía renovable para viviendas sociales" (2017). Disponible en: <http://www.dne.gub.uy/-/manual-de-eficiencia-energetica-y-energias-renovables-para-viviendas-sociales>
- Neumann A. et al.: (2005) Investigación e impacto ambiental de los edificios. La energía
- WWF: ( 1993): The Built Environment Sector, Pre-Seminar.

### Paginas web:

- <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>  
[consulta: 20 julio 2020]
- [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-86212016000100105](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212016000100105)  
[consulta: 30 agosto 2020]
- <https://www.aenor.es/aenor/normas/buscadornormas/>  
[consulta: 30 julio 2020]

### Normas:

- ABNT NBR 1681 4:2020 – Adobe, requisitos y métodos de ensayo.
- AENOR. (2008). Norma UNE 41410 - 2008 Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. AENOR.
- AENOR. (2002). Norma UNE-EN 12667:2002 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. AENOR.
- ISO. (2016) Norma ISO 12572:2016 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method. ISO.
- ISO. (1991). Norma ISO 8302:1991 Thermal insulation - Determination of steady state thermal resistance and related properties. Guarded hot plate apparatus. International Organization for Standardization.
- ISO. (2011). Norma ISO 50001:2011 Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso. ISO.
- ISO. (2006). Norma UNE-EN ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. ISO.

**FICHA TÉCNICA<sup>5</sup>**  
**Llamado interino Facultad de Arquitectura**  
**Proyectos de Investigación e Iniciación a la Investigación**

A) Transcriba los objetivos específicos o metas planteadas en el proyecto.

1. Realizar ensayos de desempeño higrotérmico y resistencia mecánica a compresión de componentes constructivos con tierra, particularmente de adobes y BTC.
2. Comparar y evaluar parámetros de eficiencia energética en técnicas constructivas con tierra y técnicas convencionales.
3. Difundir y promocionar aquellas técnicas constructivas de bajo impacto ambiental.

B) Detalle las actividades desarrolladas.

Se inició el trabajo en base a bibliografía y entrevistas a decisores del ámbito público y emprendedores del sector privado para determinar el estado del arte de la eficiencia energética y su relación con la construcción en tierra en el Uruguay.

Posteriormente se realizaron coordinaciones con otros servicios de Udelar para la realización de ensayos de laboratorio de muestras de diferentes departamentos (Canelones, Colonia, Maldonado, Montevideo y Rocha) en adobes, bloques de tierra comprimida (BTC) y muestras de tierra en estado natural, que permitan conocer en detalle las características físicas del material.

Se coordinaron entrevistas con personas en el campo productivo e institucional involucradas con la temática.

Se realizaron probetas para ensayos de conductividad térmica y se procesaron las entrevistas realizadas.

Posteriormente se amplió el abanico de ensayos de laboratorio que estaban planteados en el inicio de la investigación, se tuvieron en cuenta los valores microscópicos de la composición de las muestras por medio de ensayos en facultad de química (difracción de rayos X y Raman) y se agregaron también ensayos de resistencia mecánica a la compresión en facultad de arquitectura.

Finalmente se procesaron los datos recabados y se elaboraron los modelos para correr las simulaciones correspondientes.

C) Indique si se han logrado realizar todas las fases planteadas y en los plazos establecidos en el proyecto. En caso de no realización o modificación, justifique la misma y evalúe en qué medida afectó la ejecución global.

Hubo inconvenientes y demoras por la pandemia, retaso en ensayos de laboratorio y coordinaciones presenciales que eran necesarias para el desarrollo del trabajo.

D) Autoevaluación. Realice la evaluación que a su juicio merece la ejecución del proyecto, tomando en consideración lo que corresponda:

- 1) Conocimientos originales aportados  
Ampliación de conocimientos higrotérmicos y mecánicos sobre el material a nivel local
  - 2) Productos obtenidos
-

El informe podrá servir para una futura profundización, transmisión y aplicación práctica de los temas relacionados.

- 3) Aplicaciones inmediatas  
Transmisión de conocimiento en aulas y congresos
- 4) Formación de Recursos Humanos

-

5) Contribución a su formación como investigador  
Experiencia enriquecedora desde lo metodológico, aporta criterios que serán perfeccionadas en la siguiente investigación

E) Otras consideraciones y/o recomendaciones que usted considere pertinente realizar.

-

F) El proyecto desarrollado en el marco de este Llamado:

- 1) ¿Tiene previsto continuar?

Si

- 2) ¿Cuáles serían sus futuras aplicaciones?

Aplicaciones relacionadas a la construcción (diversas tecnologías) y la eficiencia energética.