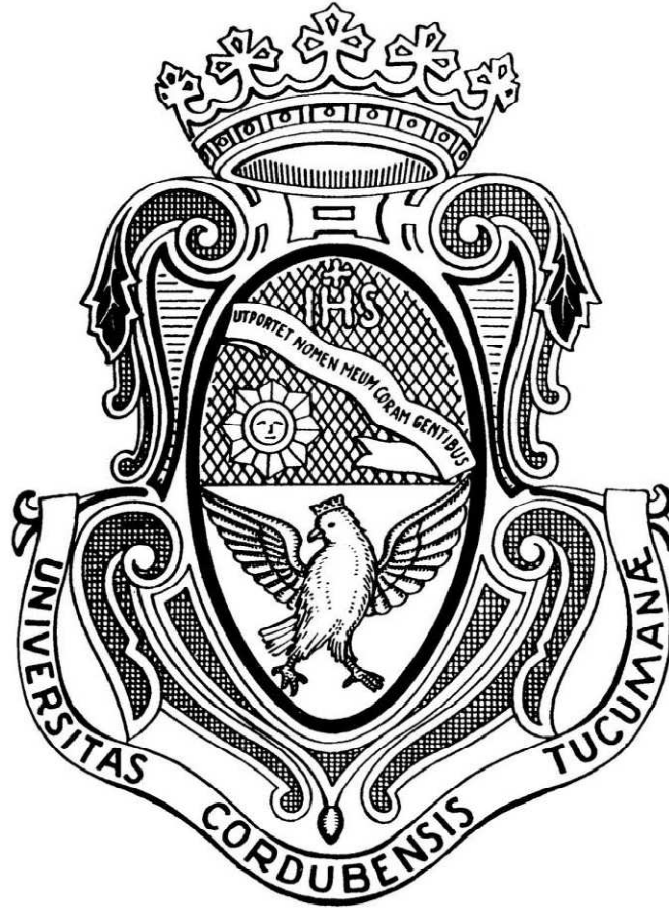


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
INGENIERÍA CIVIL



PRÁCTICA SUPERVISADA

***AHORRO ENERGÉTICO EN CONSTRUCCIONES CON
CERRAMIENTOS DE MAMPUESTOS NO CONVENCIONALES***

Evelyn I. Delacoste

Tutor: Dra. Ing. Magalí E. Carro Pérez

Supervisor externo: Dr. Ing. Franco M. Francisca

Lugar: Centro de vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos.

Junio 2015

RESUMEN

El presente trabajo forma parte de una práctica supervisada de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC). El trabajo se llevó a cabo en el Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos de la FCEFyN de la UNC. El objeto de este trabajo es demostrar que la utilización de ladrillos de suelo-cemento compactados para la construcción de viviendas comunes resulta una opción viable tanto económica como energéticamente.

En el informe se desarrolla por un lado la información bibliográfica recolectada acerca de las construcciones con ladrillos de suelo-cemento; y por el otro se estudian y caracterizan ladrillos de suelo-cemento de producción local con el objeto de determinar las propiedades térmicas fundamentales de los mismos.

En la caracterización se detallan las propiedades del suelo componente de la mezcla y las propiedades del ladrillo como unidad. Luego de manera específica, se determinan las propiedades térmicas en laboratorio de la muestra en cuestión y se comparan en función con otros materiales comúnmente usados en las obras de arquitectura y construcciones civiles.

Luego, a partir de los valores de conductividad térmica obtenidos y apoyo bibliográfico se comparan 6 alternativas de construcción de muros de una vivienda tipo con el objeto de realizar un análisis energético y económico. Las opciones se desarrollan usando materiales comunes en la construcción, como ladrillos de arcilla, cerámicos, bloques de hormigón y ladrillos de hormigón especial.

El análisis energético se determinó mediante balances térmicos realizados sobre un modelo de cálculo de la vivienda tipo variando los materiales de los muros exteriores. Para el cálculo de las cargas térmicas se utilizó un software libre llamado BT6 creado por Dilasoft.

Para el análisis económico, se determina la inversión inicial mediante el presupuesto de cada opción variando los costos unitarios de mano de obra y de materiales según el tipo de muro. Y también el costo por año en sistemas de acondicionamiento térmico artificiales de calefacción y refrigeración diseñados a partir de los balances térmicos.

Los resultados obtenidos satisfacen los objetivos propuestos: la construcción de muros utilizando ladrillos de suelo-cemento compactado es una solución económica, de simple ejecución en obra y energéticamente eficiente para la construcción de viviendas económicas en la ciudad de Córdoba, Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Especiales agradecimientos a mis tutores de la práctica por su dedicación y enseñanza constante

Dra. Ing. Magalí E. Carro Pérez

Dr. Ing. Franco M. Francisca

A mi familia por su apoyo incondicional durante el cursado de la carrera, este trabajo va dedicado a ustedes

Mis padres, Claudio y Claudia

Mi hermana y conviviente, Sasha

Mi hermanitos, Simón y Zoe

A mis amigos de la carrera, con quienes compartí grandes y buenos momentos de este recorrido, haciéndolo más gratificante.

A mis amigas de la vida por estar.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: MARCO DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA6	
1.1. Ámbito de desarrollo	6
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Actividades desarrolladas	7
1.4. Aplicación de conocimientos de materias cursadas en la carrera de Ingeniería Civil	7
1.5. Organización del informe	7
CAPÍTULO 2: LADRILLOS DE SUELO-CEMENTO	9
2.1. Introducción.....	9
2.2. Suelo-Cemento.....	10
2.3. Antecedentes.....	11
2.4. Elaboración y fabricación de ladrillos de suelo-cemento.....	12
2.4.1. Suelo	12
2.4.2. Cemento.....	13
2.4.3. Agua	13
2.4.4. Elaboración de la mezcla	14
2.4.5. Fabricación.....	15
2.4.6. Armado de muros	17
2.5. Caracterización del ladrillo de Suelo –Cemento estudiado	19
2.5.1. Suelo	19
2.5.2. Ladrillo	21
CAPÍTULO 3: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	24
3.1. Procesos de transferencia de calor	24
3.1.1. Fenómeno de conducción	25
3.1.2. Propiedades térmicas de los materiales	27
3.2. Metodología de análisis	29
3.2.1. Calibración del equipo	30
3.2.2. Procedimiento de medición.....	31
3.3. Resultados	34
3.3.1. Poliamida	34
3.3.2. Ladrillo de Hormigón Celular Curado en Autoclaves (retak).....	34

3.3.3. Ladrillo de arcilla cocido	35
3.3.4. Ladrillo de suelo-cemento	36
3.4. Análisis y comparación de resultados	37
CAPÍTULO 4: TRANSMITANCIA TÉRMICA.....	38
4.1. La envolvente.....	38
4.1.1. Eficiencia energética	39
4.2. Transmisión de calor en muros	39
4.2.1. Condensación en muros	42
4.3. Normativa.....	43
4.4. Determinación del coeficiente K para distintos tipos de muros.....	47
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	52
5.1. Condiciones de confort de una vivienda.	52
5.2. Balance térmico.....	53
5.3. Desarrollo	58
5.3.1. Vivienda tipo analizada.....	58
5.3.2. Modelo de cálculo	60
5.3.3. Determinación de cargas térmicas y diseño de sistemas artificiales de refrigeración-calefacción.....	62
5.3.4. Análisis energético de alternativas	64
5.3.5. Análisis económico de alternativas	67
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	75
CAPÍTULO 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

CAPÍTULO 1: MARCO DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

1.1. Ámbito de desarrollo

La Práctica Supervisada (PS) se llevó a cabo en el Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos de la FCEFyN de la UNC. Durante la ejecución del mismo se utilizaron y aplicaron conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera de Ingeniería Civil.

Las tareas e investigaciones se realizaron con el objetivo de evaluar las principales propiedades físicas y térmicas de ladrillos de suelo-cemento compactados. Durante el estudio se puso especial énfasis en su capacidad para aislar el calor generando la posibilidad de ser una alternativa sustentable y económica frente a los materiales convencionalmente usados en la construcción.

1.2. Objetivos

El enfoque principal del trabajo es indicar que se puede apelar a un tipo de construcción económica y simple y que además, esté en equilibrio con el medio ambiente ofreciendo iguales o mejores resultados que los materiales convencionales usados en la construcción.

Para ello se pretende evaluar la eficiencia de distintas alternativas de materiales usados en la construcción de viviendas en base al ahorro energético que generan en uso de sistemas artificiales de acondicionamiento térmico, tales como calefacción y refrigeración. En particular se puso especial énfasis en las alternativas de construcción utilizando ladrillos de suelo-cemento.

En cuanto a las actividades profesionales realizadas en el desarrollo del trabajo, se pueden mencionar:

- Analizar e interpretar variables a estudiar para un determinado enfoque.
- Ampliar y aplicar conocimientos vistos durante el cursado de la carrera e incorporar nuevos.
- Desarrollar criterios para evaluar cuáles son las alternativas más convenientes.

1.3. Actividades desarrolladas

Durante el desarrollo de la PS, se han realizado las siguientes tareas:

- Análisis bibliográfico y de antecedentes.
- Estudio de las técnicas y equipos utilizados en la medición de propiedades térmicas.
- Ejecución de ensayos de laboratorio y desarrollo de modelos de simulación mediante programas computacionales.
- Análisis de los resultados obtenidos
- Evaluación de las distintas alternativas de materiales de construcción

1.4. Aplicación de conocimientos de materias cursadas en la carrera de Ingeniería Civil

Para llevar a cabo el desarrollo de la PS se utilizaron conocimientos aprendidos en las siguientes materias durante el cursado de la carrera de Ingeniería Civil:

“Física I” y *“Termotecnia”*, cursadas en primer y segundo año, permitieron entender el fenómeno de la transferencia de calor y sus modos.

“Geotecnia II”, de segundo año, proveyó las metodologías y procedimientos de ensayo para la clasificación de suelos.

En *“Instalaciones en Edificios I y II”*, en el cuarto año, se aprendió a calcular sistemas artificiales de calefacción y refrigeración, balances térmicos de los edificios, como también la importancia del uso racional de los mismos.

En *“Proyecto, evaluación y dirección de Obras”*, cursada en el quinto año, se incorporaron conocimientos para el desarrollo de proyectos de inversión.

1.5. Organización del informe

Este informe está compuesto por 6 capítulos.

En el *Primer Capítulo: Marco de desarrollo de la Práctica supervisada*, se indican las actividades y objetivos de la PS.

En el *Segundo Capítulo: Ladrillos de suelo-cemento* se describen antecedentes y características de los ladrillos de suelo cemento, de manera generalizada en un principio y luego detallada específicamente en relación con las muestras usadas en la elaboración de este trabajo.

En el *Tercer Capítulo: Conductividad térmica* se presenta la explicación teórica del fenómeno de transferencia de calor y luego se describen los ensayos realizados para la determinación del coeficiente de conductividad de las muestras.

En el *Cuarto Capítulo: Transmitancia térmica* se define e indica la importancia de la determinación del coeficiente de transmitancia térmica en materiales constructivos, se describe la normativa a seguir y se indica el cálculo de los coeficientes de transmitancia en las distintas alternativas.

En el *Quinto Capítulo: Evaluación de alternativas* se evalúan 6 alternativas de materiales de construcción para una vivienda simple en cuanto al costo de construcción y a los costos en sistemas artificiales de calefacción-refrigeración dimensionados a partir de los resultados de balances térmicos realizados en la vivienda tipo para cada alternativa. Y también se evalúan los impactos que producen en su vida útil como en sus procesos de elaboración.

Finalmente en el *Sexto Capítulo: Conclusiones* se detallan las principales conclusiones alcanzadas en este trabajo y en *Referencias Bibliográficas* se detalla el material teórico consultado para el desarrollo de este informe.

CAPÍTULO 2: LADRILLOS DE SUELO-CEMENTO

2.1. Introducción

Hoy en día, con la creciente crisis energética y el énfasis otorgado a políticas ambientalistas, surge la necesidad de evaluar el desarrollo sustentable y la eficiencia energética para lograr una reducción en el uso de energía y a su vez disminuir el impacto sobre el medio ambiente. Esto también debe conseguirse en el ámbito de la construcción, especialmente sobre el acondicionamiento térmico de las edificaciones.

La industria de la construcción es una de las más importantes consumidoras de materias primas y recursos no renovables. La misma implica un gran impacto ambiental no sólo durante los procesos de extracción y elaboración de las materias primas, sino también durante la construcción de edificios, su utilización y aún después, cuando el edificio es demolido y reciclado (Edwards; 2008).

El concepto de desarrollo sostenible se puede resumir en 3 principios:

- Análisis del ciclo de vida de los materiales
- Desarrollo del uso de materias primas y energías renovables
- Reducción de las cantidades de materiales y energía utilizados.

Estas ideas se pueden reunir mediante la *arquitectura sustentable* que se basa en desarrollar técnicas de construcción de viviendas tradicionales que minimicen el impacto sobre el medio ambiente y sus habitantes como también optimicen los recursos naturales.

Dentro de las variables que permiten obtener ahorro energético y mejorar el confort habitacional en una vivienda, se encuentra la *aislación térmica* de los locales la cual se materializa en los elementos constructivos que conforman la envolvente del hogar. La capacidad de aislar térmicamente de un material se puede interpretar mediante una magnitud fundamental denominada *conductividad térmica* (λ).

La necesidad de una adecuada aislación térmica es importante en dos aspectos, por un lado por la condensación de la humedad en el muro (debido a los gradientes de temperatura de una cara y otra) y por otro lado para el ahorro de sistemas de calefacción/refrigeración de las viviendas.

En este trabajo se introduce la conocida mezcla de suelo-cemento para la elaboración de ladrillos poniendo énfasis en sus cualidades aislantes del calor. Además, se pretende comprobar que este material posee ventajas en cuanto a economía y simpleza en la elaboración, frente a otros materiales convencionalmente usados en la construcción.

El material más utilizado en viviendas comunes hoy en día es el ladrillo de arcilla cocido, pero en su proceso de fabricación produce una degradación enorme del suelo sumado a la emanación de gases tóxicos producto de la quema de combustibles para cocer el ladrillo. Lo mismo ocurre con los ladrillos cerámicos huecos, cuya producción se encuentra industrializada. Frente a esto, el ladrillo de suelo-cemento evita la emisión de gases debido a que no requiere cocción, ya que al incorporarle cemento éste modifica el comportamiento de sus partículas mejorando su estabilidad y confiriéndole mayor resistencia y durabilidad.

Otra ventaja que presenta esta propuesta es que no requiere de equipamientos especiales, simplemente de una prensa manual de accionamiento sencillo para fabricar los mampuestos, por lo que no se necesita de personal especializado ni se generan grandes consumos de energía.

2.2. Suelo-Cemento

No cabe duda que el suelo es el material más antiguo empleado por el hombre en la construcción. Hoy en día, aun con la evolución de la tecnología de los materiales, sigue presentándose como la solución más simple y efectiva para la construcción de una vivienda con las condiciones mínimas de habitabilidad (Toirac Corral; 2008).

Las tradicionales técnicas de *adobe* (ladrillos de suelo arcilloso secados al sol) y *tapial* (muros de suelos arcillosos con fibras vegetales) han desafiado el paso del tiempo y en la actualidad se pueden observar estructuras construidas con estos materiales aun en pie. Pero estas técnicas presentan limitaciones en cuanto a resistencias mecánicas y muros de gran espesor, vulnerabilidad a los agentes atmosféricos y erosión por agentes internos (Gatani; 2000). Para mejorar estas características se agrega un agente estabilizante, como el cemento o la cal, surgiendo de este modo el material de suelo-cemento.

Una definición específica del suelo cemento sería, dada por PCA (Portland Cement Association): “*el suelo cemento es una mezcla íntima de suelo, convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mejor densidad. Cuando el cemento se hidrata se transforma en un material duro, durable y rígido.*”. Otras definiciones: “*un material endurecido formado por el curado de una mezcla íntima de suelo, cemento y agua que se compacta*”(O`Flagerty; 1968).

La adición de cemento genera ventajosas características a la muestra frente a los ladrillos convencionales. A modo de resumen, los efectos del cemento en el suelo (Kezdy, 1979; Ayuso, 1998 y López-Lara et al., 1999) son:

- Disminuye el peso específico
- Aumenta la resistencia a la compresión
- Disminuye la sensibilidad a la acción del agua

- Disminuye la retracción por secado
- Aumenta la resistencia a la erosión

Por estas razones, la mezcla de suelo-cemento constituye una alternativa con una gran cantidad de cualidades para ser considerado un material económico y apto para construcciones de viviendas. Los ladrillos construidos con este material pueden ser utilizados en muros de carácter portante o no. Una ventaja adicional es que en la construcción, el costo del flete es elevado, por lo que el uso de la tierra del lugar donde se planea edificar posibilita reducir costos.

2.3. Antecedentes

La construcción en suelo-cemento, a pesar de ser una técnica conocida desde hace muchos años, no se utiliza en la actualidad salvo en poblaciones indígenas y de bajo recursos económicos. Su uso es más bien aplicado en la construcción de obras viales donde es necesario darle estabilidad a los suelos de la zona para ejecutar el pavimento. También, se ha empleado en construcciones rurales, como silos elevados y subterráneos, pisos en general y galpones etc.

Se tiene conocimiento que este material comenzó a ser utilizado por los constructores al comienzo del uso del cemento portland, para la confección de pisos y muros. Su aplicación en forma metódica y científica se originó entre 1910 y 1920, de manera casi simultánea e independiente en E.U.A. e Inglaterra, recibiendo el gran impulso en ocasión de la Segunda Guerra Mundial, al ser utilizado en la construcción de 130 aeropuertos con fines militares. Luego comenzó a decaer su uso debido a la aparición de otros materiales de construcción como el hormigón y el acero. Asimismo, se volvió a ver fortalecido a partir de la crisis energética y económica internacional de 1972, como alternativa de ahorro de energía (Begliardo et al.; 2003).

La construcción de la primera vivienda de suelo-cemento en nuestro país estuvo a cargo de los ingenieros Adolfo Grissi y Victor Carri, del Laboratorio de Ensayos de la Provincia de Buenos Aires en 1943. Existen experiencias con mampuestos de suelo-cemento en numerosas provincias argentinas: Chaco en 1960, Tucumán en 1967, Jujuy en 1969, Buenos Aires en las localidades de Lobos en 1971 y Junín en 1973, en Mendoza en 1977, en Salta en 1981, en Chaco en 1991, con muy buenos resultados.

La gran inercia térmica que presenta el suelo naturalmente, colabora a que el ladrillo presente una importante aislación térmica. La experiencia ha demostrado que una pared de 20 cm de espesor construida con mezcla de suelo-cemento ofrece la misma aislación térmica que una pared de 30 cm construida con ladrillos comunes (Roseto; 1996).

2.4. Elaboración y fabricación de ladrillos de suelo-cemento

Los bloques de suelo-cemento comprimidos, tienen la ventaja frente a otros conformados por materiales industrializados de poder ser diseñados para responder a las necesidades de cada caso en particular (Arias et al. 2003). Por este motivo, el diseño de un bloque de suelo-cemento comprende la cuantificación o dosificación de la cantidad necesaria de cada uno de los componentes que forman la mezcla a emplear en la fabricación como también las dimensiones y formas del propio ladrillo.

Las variaciones en las cantidades a utilizar de cemento, suelo y agua, modifican la resistencia del elemento, y la geometría de los bloques está relacionada con el comportamiento desde el punto de vista térmico ya que a mayor espesor (de un material cualquiera), menor transmisión de calor, y por lo tanto, mejores condiciones de confort dentro de la vivienda.

2.4.1. Suelo

El suelo utilizado para la elaboración del suelo-cemento puede ser de cualquier tipo: granular limpio, granulares y finos, arcillosos, limosos. Sin embargo, el suelo ideal para la elaboración de la mezcla suelen ser arenas, con una proporción de finos para darle la cohesión necesaria.

Una proporción adecuada sugerida por Roseto (1996) es:

- Arcilla: 5-10%
- Limo: 10-20 %
- Arena: 60-80%

Otras sugerencias, recopiladas por Kless y Natalini(1999) se presentan en la Tabla 2.1

Tabla 2.1: Proporciones de limo, arcilla y arena para mezclas de suelo-cemento por diferentes criterios

Criterio de	Composición (%)		
	Arena	Arcilla	Limo
ICPA	70 a 85	5 a 10	10 a 20
Houben	40 a 70	20 a 30	0 a 30
CINVA	45 a 80	Suma: 20 a 55	
MERRIL	Más de 50	Suma: Menor de 50	

Técnicamente todo suelo exento de materia orgánica, puede ser usado para ser estabilizado con cemento. Debe estar formado por una mezcla de arena, limo y arcilla; estos dos últimos en proporción tal que den cohesión suficiente a la mezcla

y buena composición granulométrica, sin que se originen contracciones perjudiciales.

Para conocer los distintos porcentajes de los constituyentes básicos del suelo se recurre al análisis granulométrico del mismo.

2.4.2. Cemento

En cuanto al cemento, en general se considera que los cementos Portland normal resultan aptos para la construcción de ladrillos de suelos-cemento. Frente a la presencia de sulfatos en el suelo, se debe recurrir a cementos especiales (Norma IRAM 50001) ya que el efecto de las sales afecta la durabilidad y la resistencia del ladrillo.

Se ha comprobado que en suelos con alto contenido de finos, los cementos expansivos contribuyen a reducir la fisuración por contracción (Begliardo et al.; 2003).

La determinación práctica del porcentaje de cemento en las mezclas utilizadas se realiza experimentalmente variando la proporción del volumen de cemento entre un 8 % y un 12 %. La norma VN-E20-66 (DNV; 1966) establece el procedimiento de ensayo para la determinación de las cantidades de cemento portland con que se deben ensayar las mezclas de suelo y cemento para establecer el menor porcentaje de cemento que le confiere al suelo características de estabilidad duraderas. El procedimiento consiste en clasificar el suelo según la metodología de H.R.B. y con la misma, a partir de tablas dadas por la norma se determina el porcentaje de cemento en peso a agregar.

Con la simple incorporación de arena se consiguen suelos artificiales que pueden ser estabilizados con cemento. Sólo es necesario realizar el reconocimiento del tipo de suelo con el que se va a trabajar, para definirla necesidad o no de la incorporación de arena y determinar el porcentaje de cemento a utilizar. En general, suelos con un porcentaje de arena del 50%, se pueden estabilizar con un 10% de cemento (Kless y Natalini; 1999).

2.4.3. Agua

La cantidad de agua que se utiliza es un factor fundamental. La falta o exceso de agua exige un mayor trabajo en la compactación, dificultando la cohesión de los componentes de la mezcla. También afecta la resistencia y durabilidad del material.

Cada tipo de suelo requiere un grado de humedad determinado para su correcta compactación. La cantidad de agua total oscila generalmente entre 8 y 16% (Kless y Natalini; 1999).

El agua debe cumplir con todas las condiciones regladas por la norma para la elaboración de hormigones Norma IRAM 1601 y el reglamento CIRSOC 201. En términos generales, el agua que sea potable es aceptable.

La función del agua, además de provocar la reacción química de endurecimiento del cemento, es proveer trabajabilidad a la mezcla.

2.4.4. Elaboración de la mezcla

La metodología de elaboración de un ladrillo de suelo-cemento sigue los siguientes pasos básicos:

1- Preparación del suelo

Debe ser pulverizado y separado con tamices. El suelo se pulveriza hasta obtener una granulometría que pase por una zaranda de 5 mm de abertura.

El material sin pulverizar (que queda retenido en la malla) se elimina por ser la parte de suelo con mayor contenido de arcilla (Roseto; 1996).

2- Preparación de la mezcla

Una vez determinada la dosificación, se procede a mezclar las cantidades de cemento con suelo hasta obtener una mezcla homogénea. Luego, se va añadiendo agua en pequeñas cantidades a la mezcla preparada hasta alcanzar el contenido óptimo en función de la prensa a emplear. El suelo se debe mezclar con el cemento en su humedad natural.

Es preferible una pequeña falta de agua y no su exceso, pues con menos humedad que la óptima, puede obtenerse la compacidad máxima con una fuerte compresión, mientras que su exceso impide la correcta compactación y favorece la formación de fisuras por contracción del bloque al perder la humedad de amasado de la mezcla (Roseto; 1996).

3- Prensado de la mezcla

Una vez preparada la mezcla, se procede a la fabricación de los bloques en forma inmediata, no debiéndose preparar más mezcla que la necesaria para dos horas de trabajo como máximo (Roseto; 1996).

Para la elaboración de los ladrillos se coloca la mezcla en la prensa, se los compacta y luego de extraer los ladrillos de la prensa y se los coloca sobre una plancha metálica rígida para trasladarlos al área de curado.

4- Curado

Después de 4 a 6 horas de preparado el ladrillo, debe llevarse a una cámara de curado. El curado es como mínimo por 7 días, incorporando agua a los elementos 3 o 4 veces por día con una regadera.

5- Utilización de los ladrillos

La edad mínima para la utilización de los ladrillos es 21 días, de manera que haya ocurrido toda la retracción del material debido al fraguado del cementante. Los bloques presentan buena impermeabilidad, no siendo necesario realizar revoque a la pared terminada.

2.4.5. Fabricación

Actualmente, la fabricación de los ladrillos de suelo-cemento compactados se realiza mediante una prensa portátil de operación manual denominada CETA-RAM. Tiene un funcionamiento muy sencillo inspirado en la primera prensa utilizada para estas tareas conocidas con el nombre de CINVA-RAM.

La CIVA-RAM fue creada a principios del año cincuenta por el ingeniero chileno Raúl Ramírez (Lou Ma; 1981).Consta básicamente en una caja o molde dentro del cual un pistón actuando por medio de un dispositivo de brazo palanca, comprime la mezcla para formar el ladrillo de suelo-cemento. Luego, el mismo brazo palanca accionado inversamente expulsa el ladrillo permitiendo ser retirado para su curado por 7 días.

En abril de 1976, el ingeniero Roberto Lou Ma basándose en el diseño de la CIVA-RAM creó la hoy en día utilizada CETA-RAM, la cual permite crear bloques huecos o macizos de suelo-cemento. Esta última se compone de 3 elementos principales, los cuales se pueden observar en la Figura 2. 1.

- *Caja o molde con su tapa.* La tapa se abre y cierra girando 90° en su plano horizontal permitiendo la incorporación de la mezcla y la expulsión del ladrillo. Puede adaptarse según se trate de ladrillos huecos o macizos y en función de las dimensiones del mampuesto necesarias.
- *Pistón,* compuesto por dos piezas tubulares que encajan y deslizan sobre sendas verticales.
- *Dispositivo de palanca* que activa el pistón tanto para comprimir la mezcla como para expulsar el ladrillo ya armado.

La prensa se trata de una máquina simple cuyo diseño no ha sido ni será patentado por lo que presenta la ventaja de poder fabricarse de manera independiente basándose en manuales de fabricación disponibles en la web.

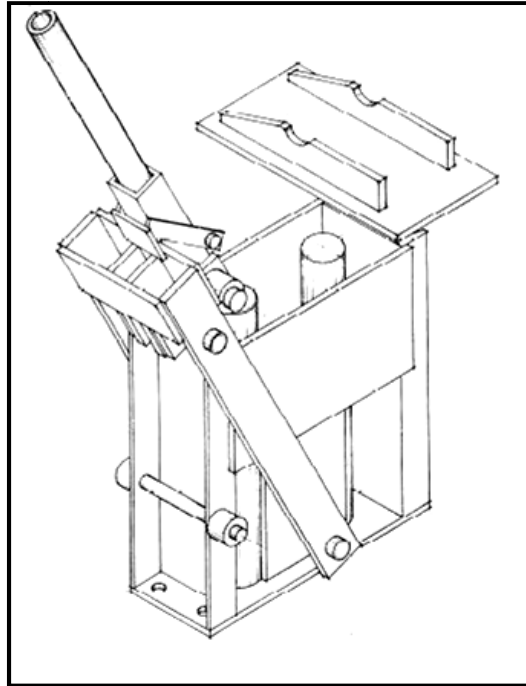


Figura 2. 1: Partes componentes de la CETI-RAM

El modo de operación de cada una de las máquinas es similar (Figura 2.2). Se llena el molde con la cantidad adecuada de mezcla, se coloca la tapa; se lleva manualmente la palanca en posición vertical, y luego asegurando el presillo de ajuste se lleva la palanca hasta que quede en posición horizontal. Al accionar la palanca en sentido inverso, retirada previamente la tapa, es expulsado el ladrillo. Este proceso se puede repetir varias veces hasta obtener la compactación requerida del ladrillo.

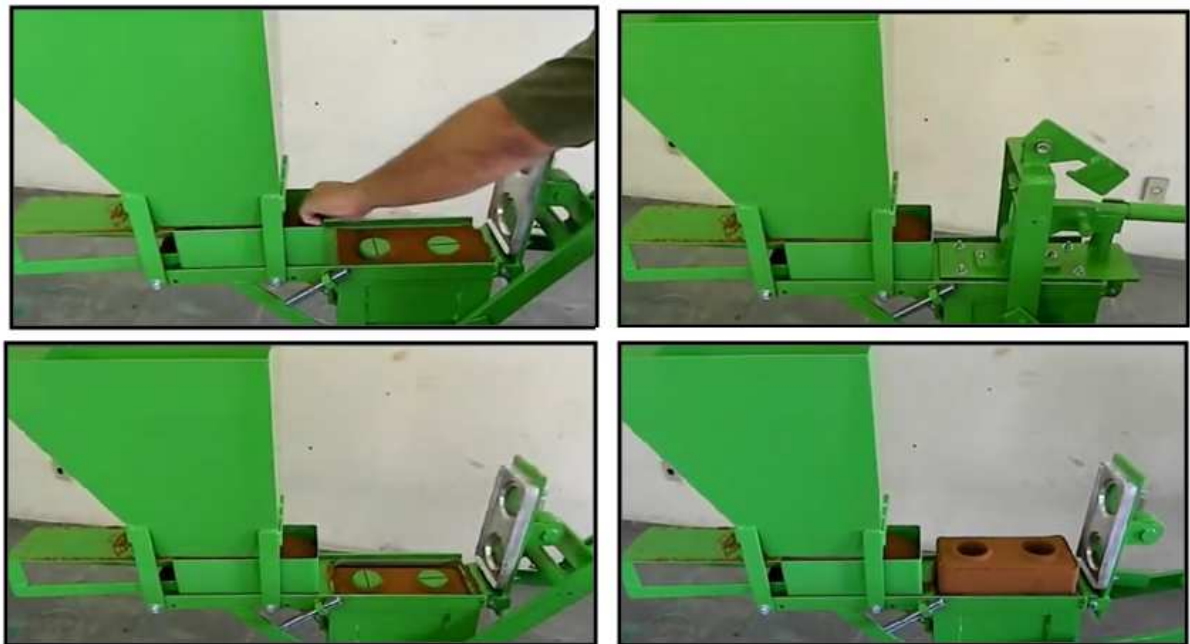


Figura 2.2: Modo de acción de la CETI-RAM

2.4.6. Armado de muros

Las aplicaciones de este sistema son múltiples, abarcando no sólo la construcción de paredes, sino también columnas y pisos. Entre los aspectos diferenciadores y de competitividad que esta solución ofrece se tiene: fácil y rápida instalación del sistema, cumplimiento de mínimos plazos, presupuestos claramente establecidos, tecnología con altos estándares de calidad, durabilidad y resistencia.

La innovación consiste en el levantamiento de paredes uniendo ladrillos con un adhesivo semejante a la silicona que se aplica con pistola manual, ver Figura 2.3. Los ladrillos modulares en tamaño son casi iguales a los tradicionalmente hechos de barro cocido, siendo semejantes a las piezas de ensamblaje de juegos infantiles como el Rasti o el Mil Ladrillos.

Este sistema, no requiere de gran cantidad de mortero para unir las piezas. Sólo basta con aplicar una línea de mortero con una manga como se indica en la Figura 2.3. Estos ladrillos tienen uniones hembra y macho, por lo que encajan unos con otros haciendo más sencillo, económico y rápido el proceso de construcción.

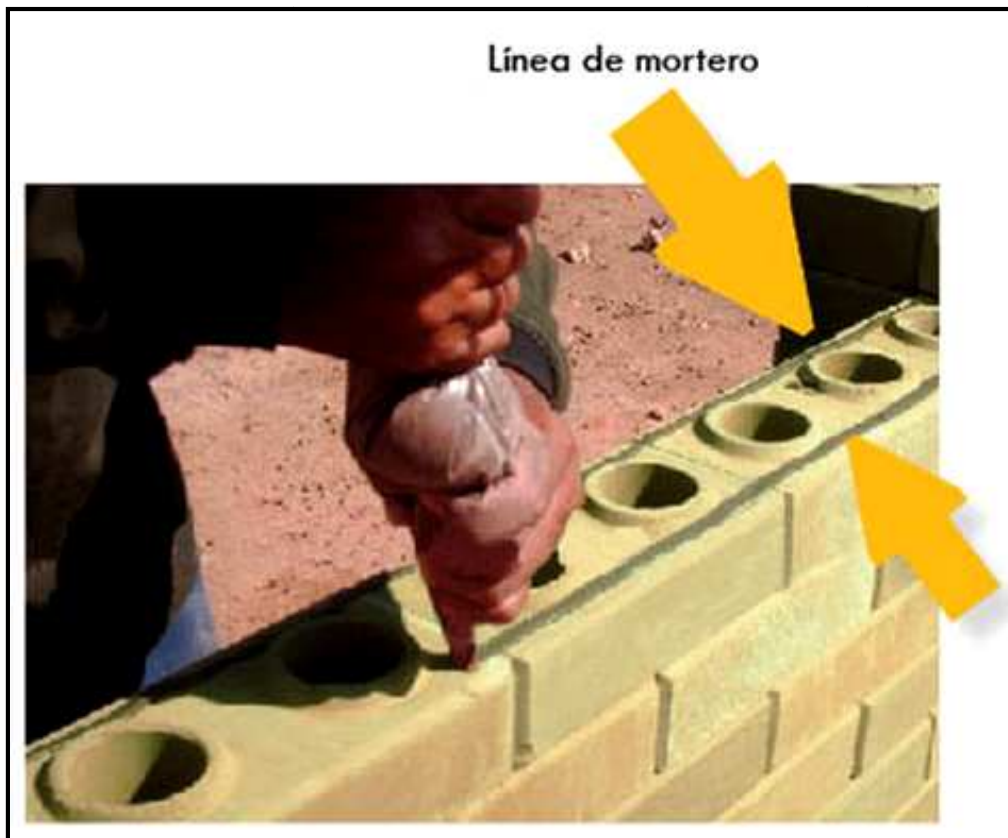


Figura 2.3: Armado de muros con mampuestos de suelo-cemento

La columna se puede elaborar con el propio ladrillo, ahorrando el encofrado tradicional, la madera y el exceso de cemento para llenar la columna. Como se observa en la Figura 2. 4 la columna se hace con los ladrillos conectándolos

mediante la aplicación de armaduras longitudinales y estribos, donde finalmente se llena con mortero o lechada cementicia cada uno de los huecos.

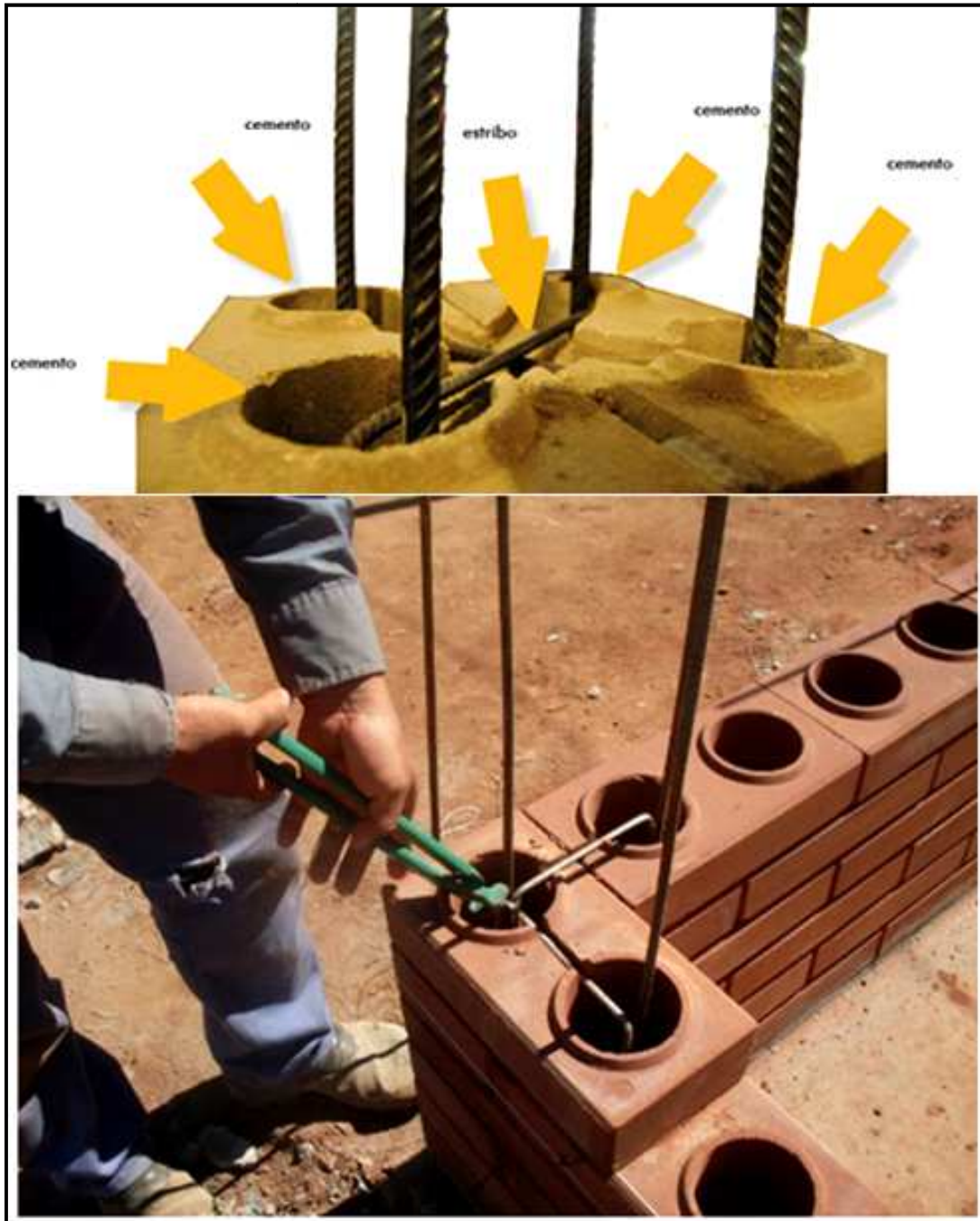


Figura 2. 4: Armado de columnas con el sistema de ladrillos de suelo-cemento

Durante su elaboración, el ladrillo no sufre de contracciones o deformaciones por cocción, esto implica una metodología de construcción mucho más práctica con paredes lisas que no requieren revoque impermeabilizante. En la Figura 2.5, se muestra una vivienda terminada elaborada con ladrillos de suelo-cemento.



Figura 2.5: Vivienda construida con mampuestos de suelo-cemento vistos

2.5. Caracterización del ladrillo de Suelo –Cemento estudiado

Las muestras de ladrillo utilizadas en este trabajo para las mediciones de conductividad fueron proporcionadas por el Ingeniero Civil Ariel E. Abasolo, que se encarga de fabricarlas de forma independiente en La Cumbre, provincia de Córdoba; Argentina.

2.5.1. Suelo

El suelo utilizado es autóctono de la zona.

Clasificación del suelo

Para la clasificación del suelo se realizó el análisis granulométrico y la determinación de los límites de Atterberg.

El análisis granulométrico es una manera de determinar las proporciones de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa dada. La metodología para hacer la granulometría se dicta en la norma ASTM D-422 y consiste en ir separando una muestra determinada de suelo por una serie de tamices de diferentes aperturas, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.7.

La determinación de los límites de Atterberg se realizó con el método de Casagrande (Figura 2.6).

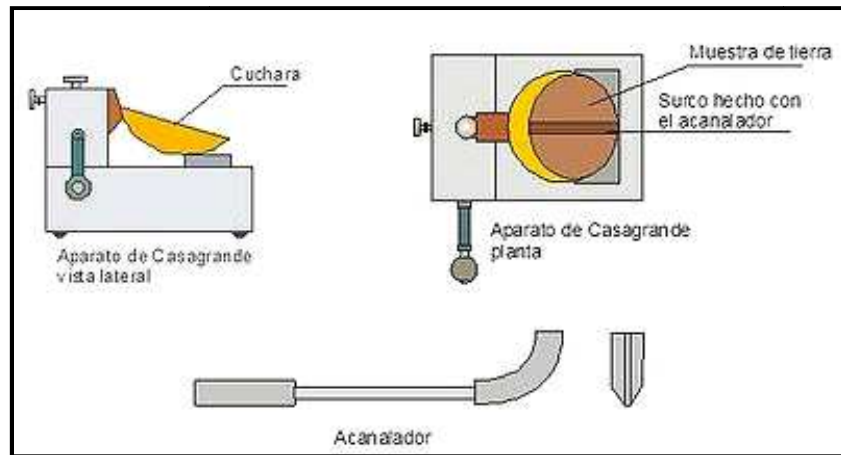


Figura 2.6: Ensayo de Casagrande

Los límites se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El límite líquido (LL) es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico y está a punto de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso. El límite plástico (LP) es el contenido de humedad del suelo al cual pasa de un estado semi-sólido a un estado plástico. El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre el LL y el LP y es una medida que indica el comportamiento entre estos dos estados en cuanto a la variación del porcentaje de humedad. En la Tabla 2. 2 se indican los resultados obtenidos del ensayo.

Tabla 2. 2: Límites de Atterberg de la muestra ensayada.

Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)
28,50	24,70	3,80

Con los límites y la granulometría basándose en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el material fue clasificado como SM (arena limosa).

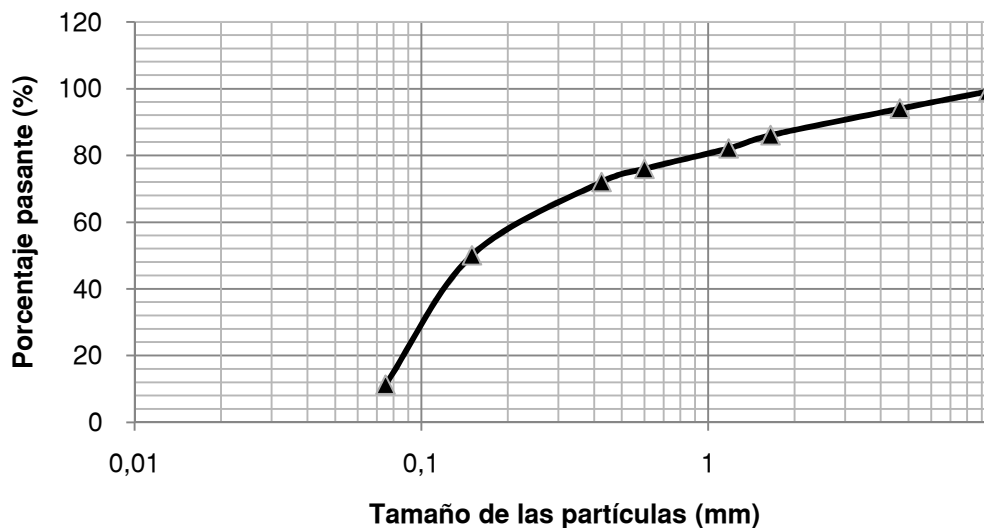


Figura 2.7: Curva granulométrica del suelo utilizado en los ladrillos de suelo-cemento

Potencial Hidrógeno del suelo

La zona de donde fue extraído el suelo se caracteriza por presentar suelos ácidos por lo que se determinó el Potencial Hidrógeno (pH) del mismo mediante un PH-metro portable marca HANNA.

En la Tabla 2.3 se indica la clasificación de los rangos de pH del suelo según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Tabla 2.3: Clasificación suelos según pH.

Denominación	pH
Ultra ácido	< 3,5
Ácido extremo	3,5 – 4,4
Ácido muy fuerte	4,5 – 5,0
Ácido fuerte	5,1 – 5,5
Moderadamente ácido	5,6 – 6,0
Ligeramente ácido	6,1 – 6,5
Neutro	6,6 – 7,3
Ligeramente alcalino	7,4 – 7,8
Moderadamente alcalino	7,9 – 7,8
Alcalino fuerte	8,5 – 9,0
Alcalino muy fuerte	> 9,0

El pH del suelo es de 5,15 lo que indica que es ácido fuerte. La acidez del suelo se puede deber a altas precipitaciones, uso de fertilizantes o por encontrarse en zonas de lluvia ácida.

2.5.2. Ladrillo

Las muestras utilizadas en las mediciones, son ladrillos huecos y macizos de 240x120x54 mm. Las muestras poseen un color amarronado grisáceo con textura levemente rugosa, como se puede observar en el ladrillo de la Figura 2. 8.

Densidad

Se entiende como densidad de una muestra a su relación entre la masa de la misma y su volumen. Se denomina densidad aparente a la relación entre su masa total considerando las partículas sólidas y el contenido de agua en sus poros y su volumen.

Entonces, por definición la determinación de la densidad en laboratorio consiste en obtener el peso de la muestra en una balanza de precisión y el volumen de la misma. Para esto último se recurrió al método de la parafina, que se basa en determinar el peso sumergido de la muestra parafinada previamente y la estimación del volumen por diferencia respecto al peso al aire (Principio de Arquímedes),

deduciendo así el volumen de la muestra. El valor de la densidad de la muestra obtenido es de $4,40 \text{ gr/cm}^3$.



Figura 2. 8: Muestra de ladrillo suelo-cemento estudiado

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la máxima carga de compresión que soporta el ladrillo antes de romperse. Es una de las propiedades más importantes ya que de la misma depende la resistencia de los muros y elementos estructurales que se vayan a construir.

Estudios realizados (Mas y Kirschbaum; 2012) indican que la resistencia a la compresión en ladrillos de suelo-cemento depende de 2 factores, por un lado del aumento de la presión de fabricación y por otro, del aumento de la proporción de suelo arcilloso con respecto a la proporción de suelo arenoso. A medida que aumenta la presión de fabricación, aumenta la resistencia a la compresión y las dosificaciones en las cuales se aumenta la relación entre la cantidad de suelo arcilloso con respecto a la de suelo arenoso, producen un aumento de la resistencia a la rotura. De igual manera, se conoce de la literatura que la resistencia tiende a crecer significativamente con el contenido de cemento y disminuye de manera importante a medida que crece la relación agua/cemento.

A la entrega de este informe, la resistencia de las muestras estudiadas en este trabajo estaba siendo analizada en el Laboratorio de Estructuras de la FCEFyN de la UNC.

Dosificación

La dosificación de los ladrillos se puede realizar según la metodología indicada anteriormente siguiendo la Norma VN-E20-66.

En la realidad, las dosificaciones de la mezcla se suelen tomar en función de valores estándar. Las proporciones más comunes son 1:7; 1:8; 1:9 y 1:10 (cemento: suelo). Trabajando con la mezcla de 9 partes de suelo con 1 parte de cemento en volumen se cubren las necesidades para estabilizar todos los suelos definidos como óptimos (Klees y Natalini; 1999).

Las muestras analizadas tienen una parte de cemento, una parte de cal y suelo en proporciones 1:1:8.

CAPÍTULO 3: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

3.1. Procesos de transferencia de calor

La transferencia de calor se puede definir como la circulación de calor en un medio debido a la diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos.

Existen diferentes procesos de transferencia de calor, como se observa en la Figura 3.1. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario (sólido o fluido) se utiliza el término de *conducción* para referirnos a la transferencia de calor que se producirá a través del medio. En cambio, se utiliza el término de *convección* para definir la transferencia que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. Finalmente, el tercer modo de transferencia se denomina *radiación* y se debe a que todas las superficies con temperatura finita emiten radiación en forma de ondas electromagnéticas; por lo tanto, en ausencia de un medio, existe una transferencia de calor entre superficies que se encuentran a diferente temperatura.



Figura 3.1: Modos de transferencia de calor

En los materiales de construcción, la transferencia de calor es considerada como conducción pura, pero como es imposible encontrar un material que sea netamente homogéneo, también se produce transferencia de calor por radiación y por convección en sus poros (Erazo Andrade, 2007).

3.1.1. Fenómeno de conducción

Para entender el fenómeno de la conducción de calor se debe atender a los fenómenos atómicos y moleculares, ya que la transferencia depende de los procesos que ocurren a ese nivel. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.

El mecanismo físico de la conducción se puede explicar por medio de una asociación con el fenómeno de difusión de energía debido a la actividad molecular. Si se analiza un gas en el que existe un gradiente de temperatura y no hay movimiento global, el gas ocupa el espacio entre dos superficies que se mantienen a diferente temperatura como se muestra en la Figura 3.2.

Asociando la temperatura de cualquier punto con la energía de las moléculas del gas en la proximidad del punto (esta energía está relacionada con el movimiento traslacional aleatorio) así como también con los movimientos internos de rotación y vibración de las moléculas de modo que las temperaturas altas se asocian con las energías moleculares más altas; ocurre que cuando las moléculas chocan se transfiere energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas. Entonces en presencia de un gradiente de energía, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir entonces en la dirección de la temperatura decreciente.

Como se observa en la Figura 3.2 las moléculas, procedentes de arriba y de abajo, cruzan constantemente el plano hipotético en x_0 gracias a su movimiento aleatorio. Sin embargo, las moléculas de arriba están asociadas con una temperatura mayor que las de abajo, en cuyo caso debe haber una transferencia neta de energía en la dirección positiva de x . De este modo, se puede definir la transferencia neta de energía debido al movimiento molecular aleatorio como una difusión de energía.

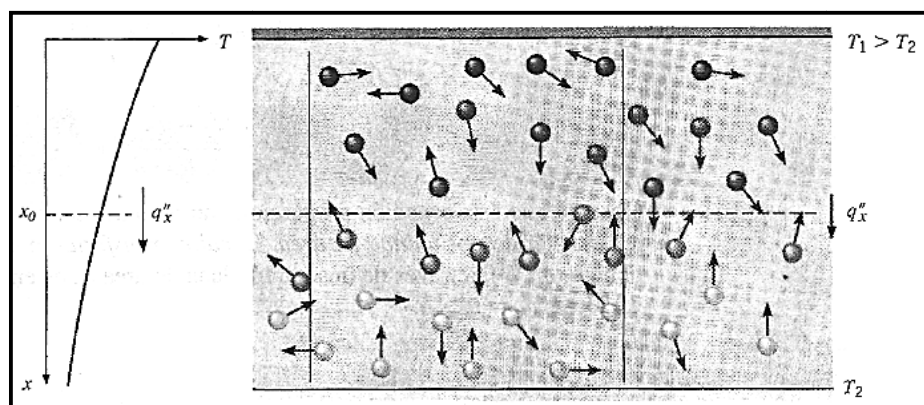


Figura 3.2: Difusión de energía debido a la actividad molecular (Incropera y De Witt; 1999)

En un sólido, la conducción se atribuye a la actividad atómica en forma de vibraciones. Desde este punto de vista, se atribuye la transferencia de energía a

ondas reticulares inducidas por el movimiento atómico. En un material no conductor, la transferencia de energía se da exclusivamente por la vía de estas ondas reticulares; en un conductor, la transferencia de energía también se debe al movimiento de traslación de los electrones libres.

Existen modelizaciones matemáticas que permiten cuantificar la conducción en materiales basadas en la Ley de Fourier. Esta ley surgió de la observación de variados fenómenos que demostraron tener un comportamiento en común y expresa, en términos generales, la proporcionalidad entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura como se indica en la ecuación (1).

$$Q \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Siendo: Q: flujo de calor en la dirección analizada, A: área de la sección transversal, Δx : longitud del elemento en la dirección analizada, ΔT : diferencia de temperatura.

De esta manera se puede observar que si mantenemos constante ΔT y Δx y variamos A, el flujo de calor tendrá una variación directamente proporcional. Del mismo modo pasa con ΔT . En cambio, si mantenemos ΔT y A el flujo de calor varía inversamente con Δx .

Al cambiar de material, se observa que el comportamiento sigue siendo el mismo pero con la particularidad de que el flujo de calor suele ser menor cuando se trata de una material plástico, por ejemplo, y mayor cuando es un material metálico. Esta variación se cuantifica con una constante de proporcionalidad denominada *coeficiente de conductividad térmica* que se identifica con la letra λ .

Mediante la expresión matemática dada por la ecuación (2) se puede modelizar el comportamiento térmico de los materiales.

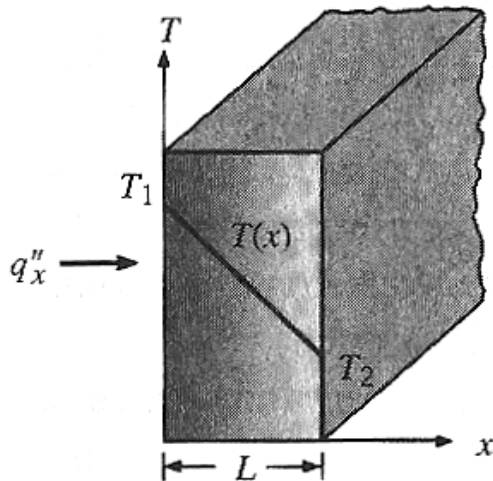
$$q_x = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

Siendo: q_x : flujo de calor en la dirección x, A: área de la sección transversal, Δx : longitud del elemento en x, ΔT : diferencia de temperatura; λ : coeficiente de conductividad térmica.

Donde el flujo de calor q_x representa la velocidad con la que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de flujo y es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. La constante de proporcionalidad, λ , denominada conductividad térmica es una característica

propia de cada material. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente.

En condiciones de flujo estable, como se muestra en la Figura 3.3, el gradiente de temperatura está dado por una relación lineal como se muestra a continuación en las ecuaciones (3) y (4).



$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3)$$

El flujo de calor es entonces

$$q_x = -\lambda \frac{\Delta T}{L} \quad (4)$$

Figura 3.3: Transferencia de calor unidimensional

Uno de los fenómenos más comunes asociados al proceso de conducción de calor es el de pérdida de energía de una habitación caliente hacia el exterior, en un día invernal. Este fenómeno se debe a la transferencia de calor por conducción a través de la pared que separa el aire de la habitación del aire exterior. Este fenómeno trae acarreado grandes problemas de eficiencia de energía en sistemas de calefacción y refrigeración cuando los materiales con los cuales se construyen las viviendas no disponen de capacidades aislantes.

3.1.2. Propiedades térmicas de los materiales

La definición de la Ley de Fourier hace obligatorio el conocimiento de la conductividad térmica. Esta propiedad proporciona una indicación de la velocidad a la que se transfiere energía mediante el proceso de difusión antes explicado y depende de la estructura física, molecular y atómica del material en cuestión; razón por la cual, el flujo de calor que circula en diferentes materiales con el mismo gradiente de energía difícilmente es el mismo. Las unidades que se emplean son (W/m °C).

El coeficiente de conductividad térmica es mucho mayor en sólidos que en líquidos o gases como se puede observar en la Figura 3.4 alcanzando un valor 4 veces mayor en sólidos en comparación con gases.

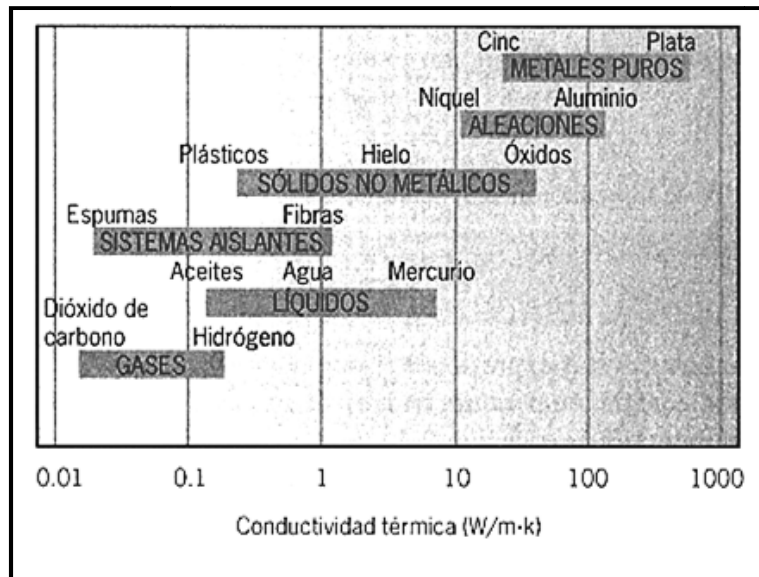


Figura 3.4: Variación de valores de CT en relación con los distintos estados de la materia. (Incropera y De Witt; 1999)

La conductividad térmica en materiales se puede deducir de la ecuación de Fourier, indicada con el número (2), de la siguiente manera

$$\lambda = -\frac{q_x}{\Delta T/L} \quad (5)$$

Siendo: q_x = flujo de calor en la dirección x, ΔT = diferencia de temperatura; λ = coeficiente de conductividad térmica, L = longitud del elemento.

Una sustancia que presenta una alta λ es un buen conductor del calor, mientras que un material con un bajo λ es un aislante de calor. No hay ninguna sustancia que sea perfectamente conductora ($\lambda = \infty$) o un aislador perfecto ($\lambda = 0$). Existen valores de λ determinados para materiales comunes en estado seco y a una temperatura constante de 20 °C, algunos de ellos se muestran en la

Tabla 3. 1: **Valores de conductividad térmica en materiales**, indicados en las unidades del Sistema Internacional (W/m K).

Los valores de conductividad térmica de cada material dependen principalmente de 3 factores: 1- densidad; 2-temperatura; 3-contenido de humedad. Y en menor medida de la anisotropía, color y presión atmosférica a la cual se encuentra el material a ensayar (Erazo Andrade, 2007).

Se conoce que el aire quieto posee una conductividad térmica muy pequeña, por lo que la *densidad* del material, que es indirectamente proporcional a la cantidad de poros dentro de la masa, tiene influencia en el valor de λ . De todos modos, existe un valor de densidad límite a partir de la cual cuanto más disminuya, comenzará a

aumentar la transferencia de calor por convección debido al tamaño mayor de los poros.

Por otro lado, la *temperatura* influye en el valor de λ en relación a la efectividad de la transferencia de calor. A mayor temperatura, es mayor el flujo de calor circulante y viceversa.

El agua es aproximadamente 20 veces mayor conductor de calor que el aire y presenta un elevado calor específico (4,184 J /cm³ K). Por lo que la presencia de *humedad* en la muestra aumenta el valor del coeficiente de conductividad térmica.

Tabla 3. 1: Valores de conductividad térmica en materiales

Material	Coefficiente de CT (W/m °C)
Agua	0,556
Aire	0,024
Hormigón	1,80
Acero inoxidable	14 -16
Aluminio	202
Cobre	385
Madera	0,08
Vidrio	0,78
Corcho	0,04 – 0,30
Fibra de vidrio	0,038
Polietileno expandido	0,025 – 0,045

Como se observa en la Tabla 3. 1 los metales presentan una buena condición de transferencia de calor, tratándose de valores de λ , 10³ o 10⁴ veces mayores que los buenos aislantes del calor como el corcho, fibra de vidrio o el polietileno.

En cuanto a confort en edificios, la conductividad térmica de los materiales de los elementos constructivos constituye un factor muy importante en cuanto al acondicionamiento térmico ya que la resistencia térmica del elemento está dada por la λ y el espesor del mismo.

3.2. Metodología de análisis

Las mediciones de conductividad térmica realizadas en los materiales constructivos se llevaron a cabo con un sensor de aguja simple marca East 30 Sensors (Figura 3.5). El sensor consta de una aguja de acero inoxidable de 1 mm de diámetro y 60 mm de largo que dispone en su interior de una fuente de calor de hilo de Evanohm y una termocupla de 1°C de precisión.

La conductividad térmica se determina insertando la aguja en el material a ensayar, como se indica en la Figura 3.6, y luego por medio de la aplicación de corriente continua a la fuente de calor se genera el flujo de calor, mientras que la termocupla va monitoreando la variación de la temperatura.



Figura 3.5: Sensor de aguja simple EAST-30.

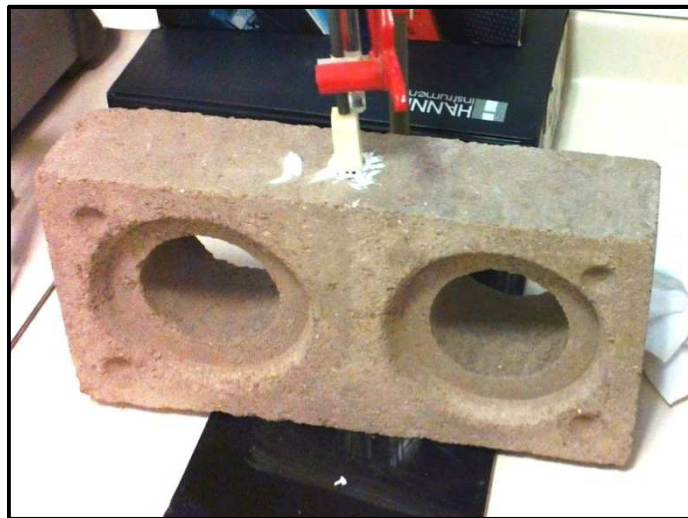


Figura 3.6: Medición de CT en ladrillo de suelo-cemento.

El coeficiente de conductividad térmica se obtiene con el voltaje aplicado para la generación de corriente y con la variación de temperatura tomada por 1 o 2 minutos.

3.2.1. Calibración del equipo

La normativa utilizada para el cálculo de la CT es la norma ASTM D-5334 (ASTM; 2007), la misma presenta el procedimiento a seguir para determinar la

conductividad térmica en suelos y rocas. La norma establece que la aguja debe ser calibrada antes de usarse, la calibración de la misma se realiza comparando los valores de λ determinados con el equipo en materiales con propiedades conocidas.

El procedimiento se realizó insertando el sensor en un recipiente cilíndrico de diámetro mínimo de 51 mm y un largo de 30 mm con contenido de distintos materiales estudiados. Los materiales ensayados se muestran en la Tabla 3.2 con las comparaciones correspondientes admitiendo una variación estándar.

Tabla 3.2: Materiales de CT conocida usados en la calibración

Materiales	λ (W/m °C)	λ teórico (W/m °C)
Agua destilada	0,59	0,60 ± 0,03
Alcohol etílico	0,21	0,17 ± 0,03
Glicerina	0,30	0,29 ± 0,03

Previo a esto, es necesario determinar la ecuación de calibración que establezca una relación entre las variaciones de voltaje tomadas por la termocupla y la variación de temperatura.

Esto se realizó midiendo por un lado la temperatura con una placa calefactora DB-IVA HOT PLATE, de un recipiente con agua destilada y por otro la medición del sensor dentro del mismo recipiente. Los resultados obtenidos se indican en la Figura 3.7. Y la ecuación de calibración se indica a continuación, obtenida mediante una regresión lineal.

$$T = 16241V + 21,33 \quad (6)$$

Donde: T= temperatura (°C), V= voltaje (V)

3.2.2. Procedimiento de medición

El procedimiento de medición en el ladrillo, consistió en realizar una perforación de un diámetro mayor al de la aguja en el centro de la muestra con taladro para luego poder introducir la misma en la muestra.

Para la medición, primero se llenó la perforación con un material altamente conductor ($\lambda = 0,75$ W/m °C) y luego se introdujo la aguja en la muestra, este procedimiento se realizó para evitar que la aguja estuviera en contacto con el aire y se dañara. Debido a que el material de contacto con la aguja es altamente conductor, las mediciones no se vieron afectadas por el mismo. El tiempo de medición fue de 1'30" y el voltaje aplicado fue variando en función de la muestra, a

modo de asegurar que la máxima variación temperatura que tome la aguja fuera de 2°C o 3°C.

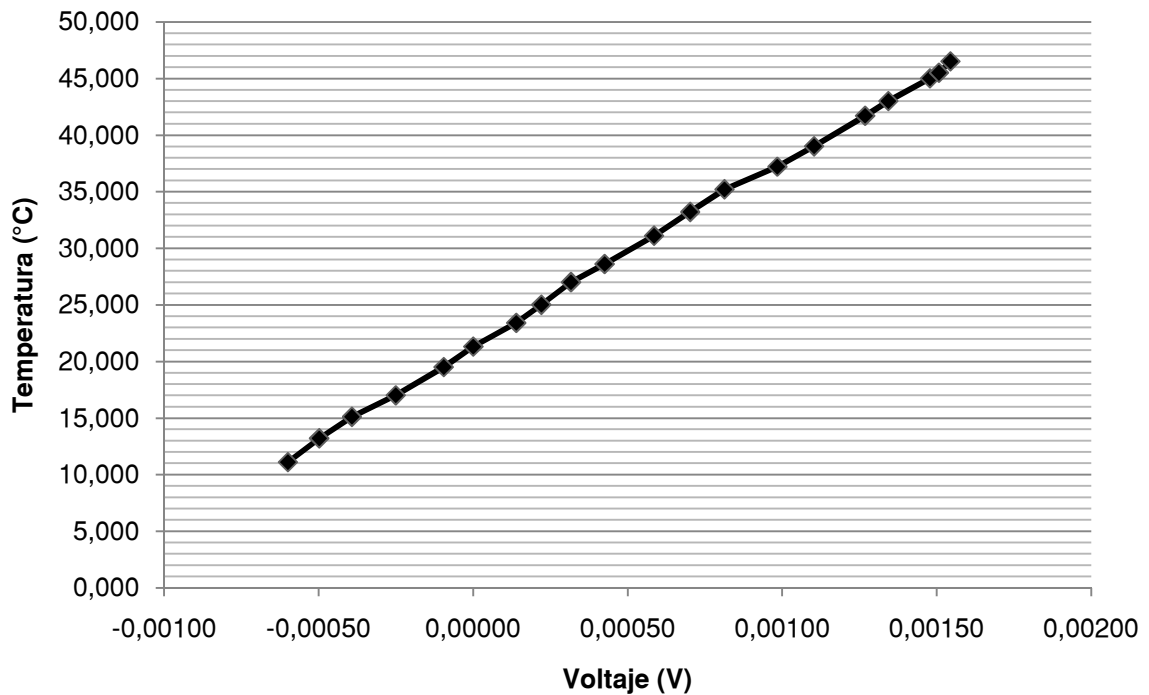


Figura 3.7: Curva de calibración con agua

El procedimiento de cálculo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D-5334.

Las lecturas tomadas por el equipo se pueden expresar en un gráfico del tipo indicado en la Figura 3.8 donde se puede observar que pasados los primeros 20 segundos de medición comienzan a afectar las condiciones de borde del elemento que se está midiendo. Por ello, se suele tomar la proporción de los datos que se incluyen en la curva inicial y dibujarlos en un gráfico semi-logarítmico como el de la Figura 3.9.

Tomando la porción indicada en la curva anterior, se puede aproximar a una regresión lineal y calcular la conductividad térmica a partir de la relación indicada en la ecuación (7)

$$\lambda = \frac{Q}{4 \pi (T_2 - T_1)} \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (7)$$

Donde: Q= calor generado por la corriente eléctrica (W/m), Ti = temperaturas medidas por la termocupla (°C), ti= tiempo de lectura de las temperaturas Ti (seg). De esta forma la pendiente de la regresión lineal se utiliza para determinar el coeficiente de conductividad térmica λ .

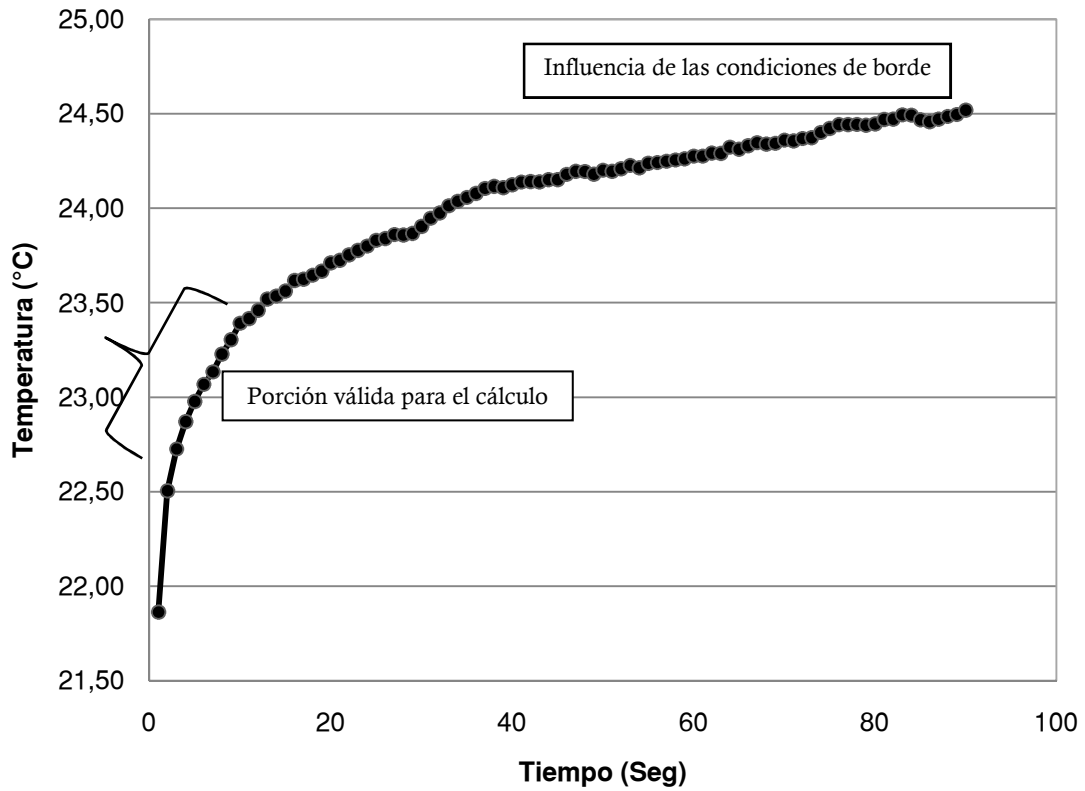


Figura 3.8: Resultados de una medición

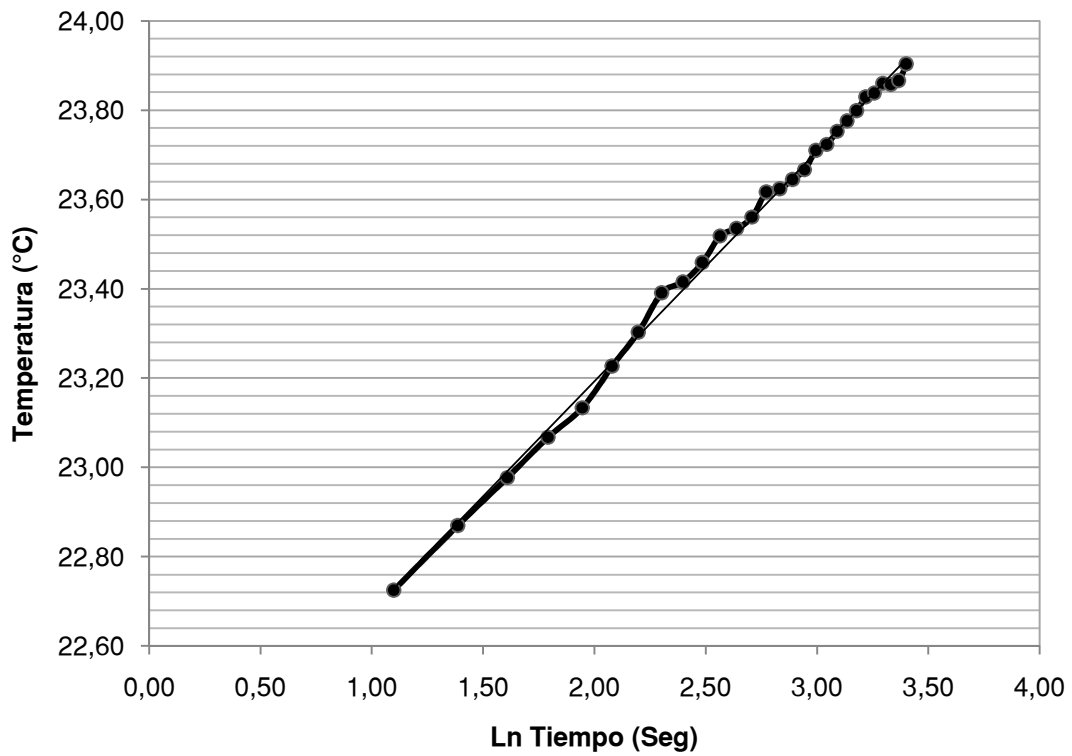


Figura 3.9: Gráfico semi-logarítmico

3.3. Resultados

A modo de tener un punto comparativo, se procedió a medir valores de conductividad térmica en distintos materiales utilizados en la construcción de viviendas.

3.3.1. Poliamida

Las poliamidas (PA), también conocidas como nylon, son polímeros semi-cristalinos; usados generalmente como plástico de ingeniería de uso universal, en construcciones mecánicas y trabajos de mantenimiento industrial.

Dentro de las numerosas ventajas que presenta este material se pueden mencionar gran resistencia mecánica, dureza, rigidez y tenacidad medias-elevadas; elevada capacidad de amortiguación mecánica; buena resistencia a la fatiga; excelente resistencia al desgaste; y buenas propiedades de deslizamiento. En la Tabla 3.3 se indican las principales características.

Tabla 3.3: Características generales de la PA

Densidad (g/cm ³)	1,14
Calor específico (J/ mol K)	1,67
Resistividad eléctrica (Wm)	6 x 10 ¹²
Tensión de tracción (MPa)	79,29
Módulo de tracción (Mpa)	2965
Coefficiente cinético de fricción	0,45

El ensayo para determinar λ se ejecutó sobre una muestra cilíndrica y se procedió a realizar una perforación del diámetro de la aguja para poder introducirla dentro de la muestra. Los resultados obtenidos se indican en el gráfico de la Figura 3. 10.

Realizando un promedio de las mediciones, se obtuvo que el valor de λ es de $0,29 \frac{W}{^{\circ}Cm}$ con una desviación estándar de 0,013.

3.3.2. Ladrillo de Hormigón Celular Curado en Autoclaves (retak)

El ladrillo comercialmente conocido como retak, está compuesto por un hormigón especial denominado Hormigón Celular Curado en Autoclaves (HCCA). El HCCA posee una gran capacidad de aislación térmica, esto se debe a las millones de micro burbujas de aire incorporadas en su masa que actúan como cámaras de aire dándole una gran ventaja frente a otros materiales constructivos.

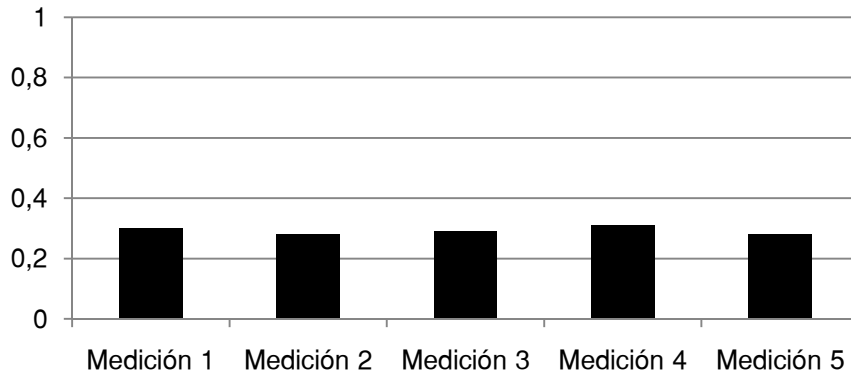


Figura 3. 10: Mediciones de CT tomadas sobre muestra de poliamida

Dentro de las principales características de este material, se pueden mencionar:

- ✓ Buena aislación térmica
- ✓ Baja absorción de agua
- ✓ Aislación acústica
- ✓ Liviandad
- ✓ Precisión industrial
- ✓ Resistencia al fuego
- ✓ Buena capacidad portante (a partir de muros de 15 cm)

El ensayo para determinar λ_{se} se realizó sobre una muestra rectangular, del mismo modo que se midió en la poliamida. Los resultados de la medición se indican en la Figura 3. 11. Del promedio de valores medidos, se obtuvo un valor de λ de $0,26 \frac{W}{^{\circ}Cm}$, mientras que la desviación estándar de los resultados obtenidos fue de 0,008.

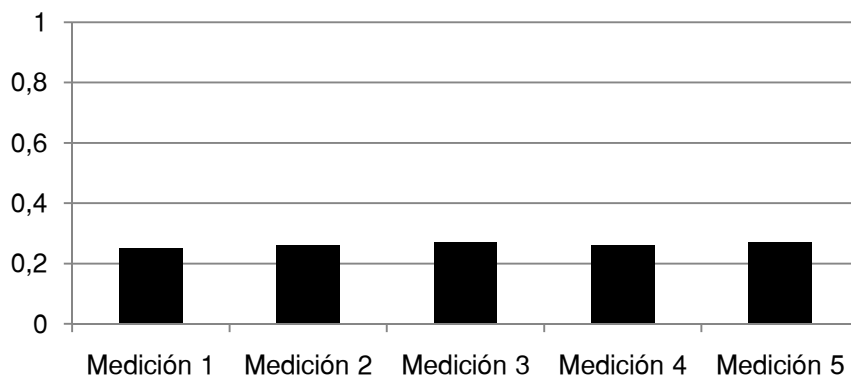


Figura 3. 11: Mediciones de CT en ladrillo de HCCA (retak)

3.3.3. Ladrillo de arcilla cocido

El ladrillo de arcilla cocido es el elemento más tradicional usado en la construcción. Está compuesto por arcilla cocida a altas temperaturas. Se emplea en la

construcción en diversos elementos, como muros, tabiques portantes, entre otros. Posee un buen comportamiento resistente e impermeabilizante, aunque no tiene grandes cualidades en cuanto a la aislación térmica.

Los resultados obtenidos en las mediciones de conductividad térmica se muestran en la Figura 3.12, a partir de los cuales se obtuvo un valor promedio de λ de $0,69 \frac{W}{^{\circ}Cm}$, mientras que la desviación estándar de los resultados obtenidos fue de 0,068.

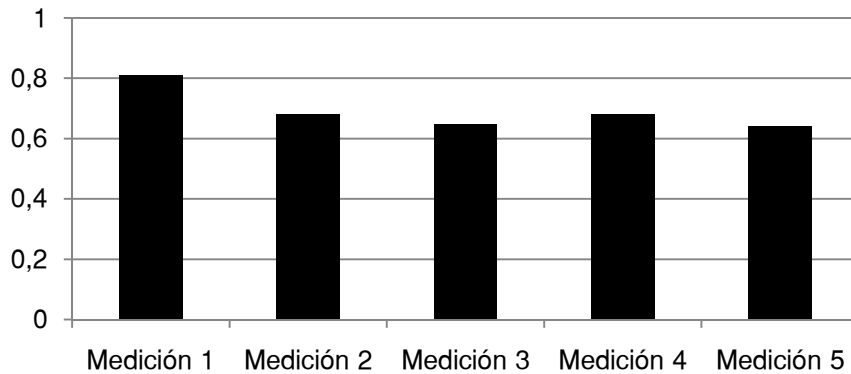


Figura 3.12: Mediciones de CT sobre ladrillo de arcilla cocido.

3.3.4. Ladrillo de suelo-cemento

En la Figura 3.13 se presentan los resultados de las mediciones realizadas sobre el ladrillo de suelo cemento, el cual fue construido con una dosificación de 8:1:1 (suelo: cemento: cal). Los resultados obtenidos arrojaron un valor medio de $\lambda = 0,46 \frac{W}{^{\circ}Cm}$, mientras que la desviación estándar de los resultados obtenidos fue de 0,021.

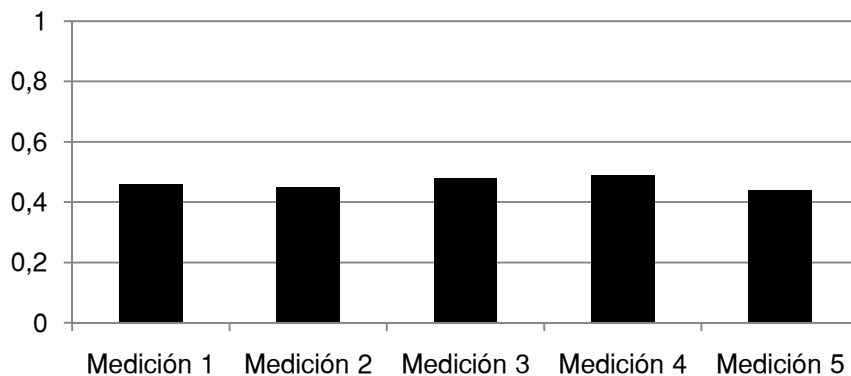


Figura 3.13: Mediciones CT sobre ladrillo de suelo-cemento

3.4. Análisis y comparación de resultados

En la Tabla 3. 4 se resumen los valores de conductividad térmica de cada uno de los materiales ensayados.

Tabla 3. 4: Valores de conductividad térmica obtenidos en los ensayos

Material	λ (W/m °C)
Poliamida 6	0,29
Ladrillo HCCA (Retak)	0,26
Ladrillo de arcilla cocido	0,69
Ladrillo suelo-cemento	0,48

A partir de los resultados presentados en la Tabla 3.4 se puede observar que el material que mayores cualidades aislantes presenta es el ladrillo retak (HCCA). Sin embargo, este material al estar compuesto de hormigón especial no suele ser económico para ser empleado en construcciones de viviendas comunes o en viviendas sociales.

Respecto a los restantes materiales, la poliamida tampoco resulta una opción viable para la construcción de viviendas ya que se suele emplear en elementos de ingeniería mecánica. Por lo tanto, de los materiales ensayados el ladrillo cocido y especialmente el ladrillo de suelo-cemento presentan mejores cualidades desde el punto de vista térmico ya que mostraron relativamente baja conductividad térmica. Estos resultados indican que los ladrillos de suelo-cemento compactado presentarían un buen desempeño al utilizarlos para la aislación térmica de ambientes en obras de arquitectura.

CAPÍTULO 4: TRANSMITANCIA TÉRMICA

4.1. La envolvente

La envolvente de un edificio o vivienda define, en gran medida, las condiciones de confort de los ocupantes y el gasto energético. Se consideran envolventes de la edificación a muros, ventanas, cerramientos; es decir, todo elemento que vincula el interior y el exterior de la vivienda.

Se puede proyectar una envolvente con distintos objetivos, pero actualmente, en tiempos donde incrementa la concientización ambiental, adquiere relevancia la cuestión del confort térmico combinado con la eficiencia energética. En la proyección se definen por un lado, los materiales componentes y por el otro la morfología y diseño estético. Ambos elementos contribuyen al comportamiento térmico interno.

El clima de una localidad es otra variable que define el confort dentro de una vivienda pero a diferencia de la envolvente del edificio no es modificable, es por ello que los materiales y la morfología con que se diseña la vivienda o edificio se encuentran condicionados por el clima del lugar donde se encuentran.

Las ventanas en los climas cálidos deben ser más protegidas del sol y en climas fríos deben captar el calor solar, mientras que deben tener cierto espesor para no perderlo. En países de latitudes próximas al ecuador la cubierta resulta fundamental en la protección del edificio contra la radiación solar y debe ser muy bien aislada. En latitudes mayores, con larga estación fría, los muros empiezan a tener más importancia en las pérdidas de calor. En climas extremos como es el caso del cálido seco el proyecto bioclimático más adecuado debe presentar muros con inercia térmica (Gregorio Atem; 2012).

En un clima templado con las cuatro estaciones bien definidas, como el de la ciudad de Córdoba, la mayor complicación se presenta en diseñar una edificación que funcione adecuadamente tanto en verano como en invierno. El consumo de energía en edificaciones está relacionado con el aprovechamiento de la luz natural por las aberturas y con las ganancias y pérdidas de calor a través de la envolvente de la edificación. A esto se agrega la carga interna generada por la ocupación, por los equipos y por la iluminación artificial. Estos factores suelen disminuir el confort natural de los habitantes provocando el uso de sistemas artificiales de calefacción y de refrigeración según el caso.

En este trabajo, se estudian las características de los muros en la envolvente de una vivienda económica. La principal función de los muros exteriores junto a las cubiertas y cerramientos traslúcidos es establecer una barrera entre los ambientes

exterior e interior, de modo que el interior pueda ser ajustado y esté en determinadas condiciones térmicas, lumínicas y acústicas. Un muro exterior debe reunir una serie de características: estabilidad, durabilidad y proveer protección frente al viento, lluvia, radiación solar, calor, ruido, fuego, insectos, animales y hasta los propios humanos.

4.1.1. Eficiencia energética

En el desarrollo de la bioconstrucción, lo que se busca es encontrar alternativas de materiales de construcción que colaboren a disminuir el valor de la transmitancia térmica a modo de contribuir con el mantenimiento de la temperatura confortable dentro de una vivienda, ya sea verano o invierno, con un ahorro significativo del sistema de calefacción-refrigeración utilizado.

Raja et al. (2001) considera que el impacto en el control térmico de los edificios se presenta en tres caminos diferentes: 1- transmisión del ambiente externo a través de la envolvente del edificio; 2-Transmisión de la energía solar y de la iluminación natural a través de las áreas vidriadas; 3- Infiltración a través puertas y ventanas, fisuras y grietas.

Si bien este trabajo se pone énfasis en las características del material, es importante mencionar que el uso apropiado de los sistemas de control (la ventilación natural; uso de cortinas y persianas, termostatos etc.) juega un rol importante en el comportamiento térmico en el interior de la vivienda y en el mejoramiento del grado de satisfacción de los habitantes.

Está comprobado que un diseño particular y una selección de los componentes del edificio en las etapas preliminares del proceso de diseño pueden ayudar a alcanzar confort térmico con un mínimo de encendido de los sistemas de acondicionamiento mecánicos, por lo tanto mínimos requerimientos de energía (Al-Homoud ,2005).

4.2. Transmisión de calor en muros

Para que exista transmisión de calor, debe existir un diferencial de temperatura entre las dos caras del elemento en cuestión (Figura 4.1).Las tres formas de transmisión de calor, ya mencionadas en el capítulo anterior, son conducción, convección y radiación.

Frente a la radiación solar, los materiales de construcción se comportan de forma diferente, por lo tanto se distinguen entre los cerramientos opacos y los transparentes. La principal diferencia entre los dos es justamente su capacidad (transparentes) o incapacidad (opacos) de transmitir la radiación solar para el

ambiente interno directamente. La parte de la radiación transmitida para el interior actuará en las condiciones de confort, siendo por lo tanto la principal porción de ganancias térmicas en ambientes.

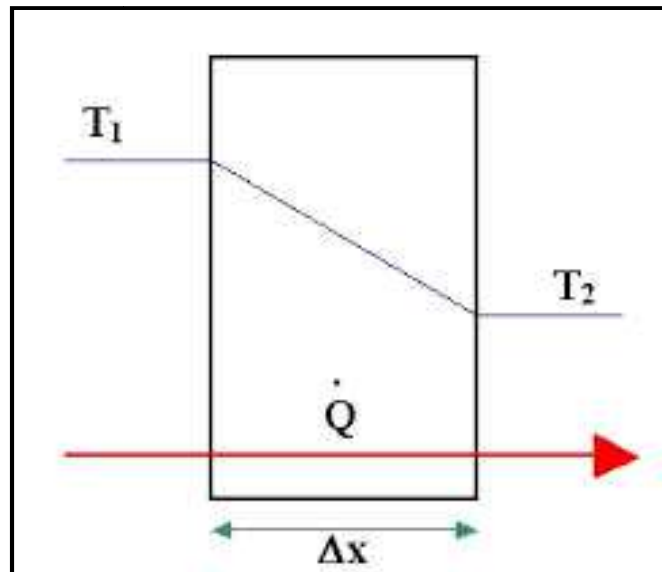


Figura 4.1: Transmisión de calor a través de una pared

Cuanto mayor es el diferencial de temperatura, mayor es el flujo de calor. Por lo que es lógico pensar que en un día frío con muy bajas temperaturas en el exterior, el interior de la casa estará calefaccionado presentando mayores temperaturas provocado un flujo de calor mayor a través de los cerramientos, por lo que la solución está en utilizar materiales que presenten mayor resistencia al flujo libre de calor.

Según Gonzales (2002) se pueden determinar tres propiedades básicas para la definición de las características térmicas de un material: Conductividad térmica (λ), Calor Específico (C_p) y densidad (ρ). A partir de las mismas se pueden calcular propiedades con importantes aplicaciones en el estudio de los cerramientos de una edificación como lo son la Resistencia Térmica (R), la Transmitancia Térmica (K), Capacidad Térmica (C_t) y Factor Solar (FS).

La Resistencia térmica (R) representa la capacidad del material de oponerse al traspaso del flujo del calor. En el caso de materiales homogéneos es la razón entre el espesor y la conductividad del material como se indica en la ecuación (8).

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (8)$$

Donde: R_i = resistencia térmica del material ($m^2 \text{ }^\circ\text{C}/ W$), e_i = espesor del material (m), λ_i = conductividad térmica del material ($W /m^2 \text{ }^\circ\text{C}$).

La transmitancia térmica es la inversa de R y representa la medida de flujo de calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, transferido a través de un elemento, de caras plano paralelas, cuando hay un gradiente térmico de 1°C (1 K) de temperatura entre los dos ambientes que éste separa. Entonces, el coeficiente de transmitancia K se calcula con la ecuación (9) que se muestra a continuación.

$$K_i = \frac{1}{R_i} = \frac{\lambda_i}{e_i} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (9)$$

Donde: K_i = transmitancia térmica del material ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A la hora de determinar la eficiencia energética de una edificación se utiliza el coeficiente K, entre otros parámetros, dado que su valor incluye la resistencia térmica de ambas caras del sistema, cuanto menor sea el valor de K, menor será el traspaso de energía entre ambas caras, y por tanto mejor las capacidades aislantes del elemento.

Con el objeto de verificar experimentalmente el flujo y traspaso de calor a través de un ladrillo desuelo cemento compactado se realizó una experiencia de calentamiento. En este ensayo se instrumentó un ladrillo con dos termocuplas en sus caras y luego se procedió a colocar el mismo sobre una superficie caliente y medir la temperatura en ambas caras en función del tiempo para verificar el calentamiento de las mismas. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.2. Los resultados permiten ver la variación de temperatura con el tiempo en ambas caras del ladrillo. La curva de la termocupla T1 tiene mayor temperatura al comienzo y al transcurrir el tiempo comienza a disminuir hasta estabilizarse a temperatura ambiente, mientras que la temperatura de la termocupla T2 aumenta con el tiempo hasta que se equilibra después de un determinado lapso de tiempo.

Esto se puede interpretar como el flujo del calor generado a través de la tabla del ladrillo a causa de un diferencial de temperatura entre los cantos del ladrillo. Es lógico pensar que cuanto menor es el coeficiente de conductividad térmica λ , mayor será la resistencia al paso del calor y tardará mayor cantidad de tiempo en producirse el equilibrio de temperaturas entre ambos cantos. A partir de lo expresado en el apartado anterior, el flujo de calor en el cuerpo del ladrillo resulta proporcional a la diferencia de temperatura entre ambas caras (termocupla T1 y T2). Por lo tanto, el flujo de calor es máximo al inicio y disminuye con el tiempo a medida que el mismo fue alcanzando la temperatura de equilibrio. Este resultado se debe fundamentalmente a que durante el ensayo no se mantuvo la fuente de calor en la cara caliente y por ello se observa la disminución de temperatura con el tiempo en la termocupla T1.

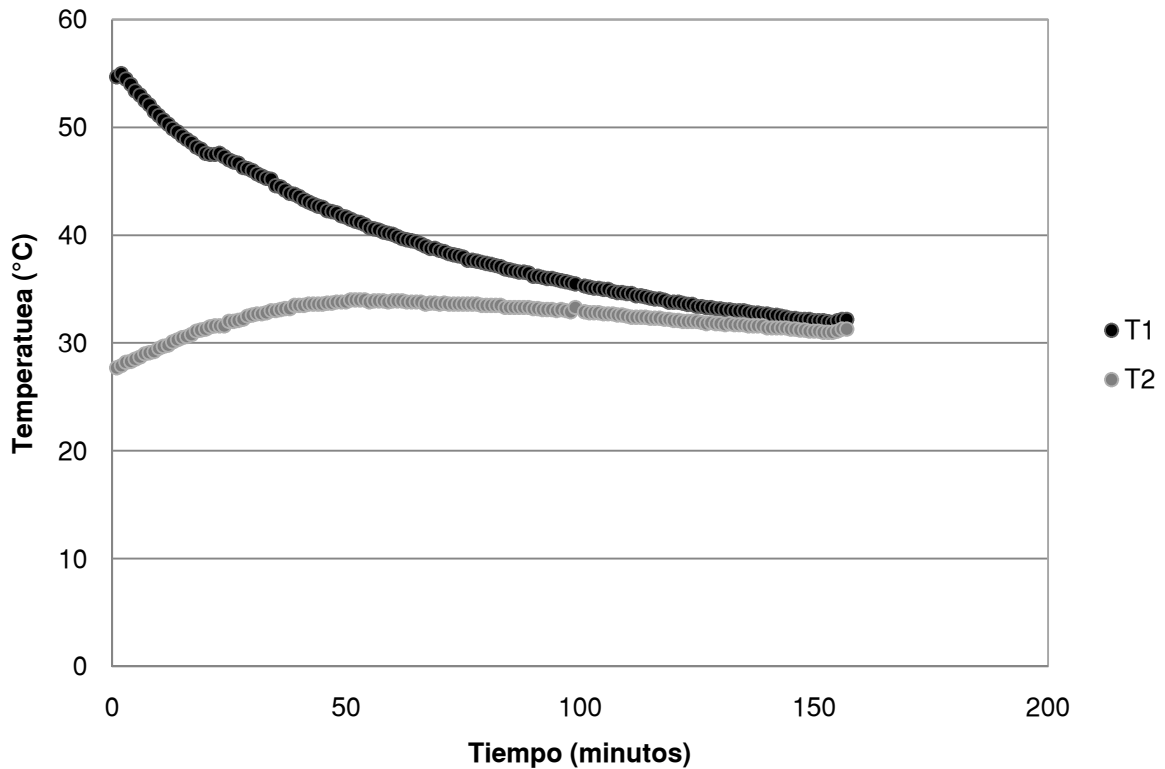


Figura 4.2: Variación de la temperatura en el tiempo entre cantos de un ladrillo. Obtenido en laboratorio.

4.2.1. Condensación en muros

Si bien no es el enfoque de este trabajo, vale mencionar que la presencia de humedad en las construcciones es la causa y efecto de un importante número de procesos patológicos que afectan el confort de los usuarios y comprometen su salud. La existencia de condensación en muros está relacionada con el coeficiente de transmitancia K.

Las humedades de condensación se originan por el cambio de estado de parte del vapor de agua contenido en el aire, que se encuentra o se genera en los edificios, sobre las superficies interiores de los muros o dentro de los mismos. La condensación se produce, o bien por un incremento de la cantidad de vapor de agua del ambiente sin modificación significativa de las temperatura del aire o por un descenso de la temperatura, sin variar el contenido de vapor de agua del aire. Ambos procesos generan un aumento de la Humedad Relativa (HR). Si la condensación se produce en la superficie interior de un muro se llama *condensación superficial* y si ocurre dentro del muro se denomina *condensación intersticial*. En la Figura 4.3 se indican las consecuencias de la presencia de humedad en una edificación.

La ocurrencia de estos fenómenos dependerá de las condiciones de temperatura y humedad relativa interior y exterior en relación directa con las características de cada localidad.



Figura 4.3: Moho y hongos en muros y techos

La condensación intersticial no depende únicamente de la cantidad de vapor de agua que atraviese el muro y de la temperatura del mismo, sino además de la constitución del propio cerramiento, la disposición de las distintas capas que lo forman, la permisividad al paso de vapor de agua y de su coeficiente de aislamiento. Los fenómenos de condensación se agravan cuanto mayor sea el coeficiente K del muro exterior, verificándose en rincones y aristas superiores o detrás de muebles y cuadros en contacto con muros exteriores debido a que en esos lugares la circulación del aire se dificulta por razones geométricas o de interposición de elementos. Esto aumenta la resistencia térmica superficial interna que trae como consecuencia una reducción abrupta del gradiente de temperatura alcanzándose de esta forma una temperatura superficial inferior a la del resto del muro. Para ello se recomienda que el valor de K no supere $1,78 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ para controlar el desarrollo de condensación. La norma IRAM 11625 (IRAM; 2000) da las especificaciones para verificar el riesgo de condensación bajo condiciones normales de uso.

4.3. Normativa

Los valores máximos del coeficiente K, como otros parámetros determinantes en la evaluación energética de una vivienda se encuentran reglamentados por normas IRAM.

La norma IRAM 11601 (IRAM; 2004): “*Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo*”. Establece los valores y métodos fundamentales para el cálculo de las

propiedades térmica de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Determina el cálculo del coeficiente de transmitancia térmica para muros, entre otros elementos, como se indica en la siguiente ecuación

$$K = \frac{1}{R_T} \quad (10)$$

Donde: R_T = Resistencia térmica total

La resistencia total está dada por la suma representada mediante la ecuación (11)

$$R_T = R_{si} + R_t + R_c + R_{se} \quad (11)$$

Donde: R_{si} = resistencia térmica interna superficial, R_t = resistencia térmica de los componentes estructurales, R_c = resistencia térmica de las cámaras de aire, R_{se} = resistencia térmica externa superficial.

Las resistencias R_{si} y R_{se} se encuentran tabuladas en la norma en función de la dirección del flujo. Para muros sus valores son $R_{si} = 0,13$ y para $R_{se} = 0,04$. Las resistencias R_c se encuentran descritas en la normativa en función del espesor de la cámara de aire. Mientras que la R_t se determina con la ecuación (8) indicada anteriormente.

Como se mencionó al comienzo de este capítulo el clima en el que está localizada una edificación es clave para proyectar el diseño del mismo. La norma IRAM 11603 (IRAM; 1996): “Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina” establece una zonificación de nuestro país de acuerdo con un criterio bioambiental, indicando las características climáticas de cada zona. Donde, para cada una de ellas, se dan pautas generales para el diseño, la evaluación de las orientaciones favorables y el cumplimiento del asoleamiento mínimo de los edificios destinados a vivienda.

Se definieron seis zonas de acuerdo con los índices de confort de la temperatura efectiva corregida (TEC) y el parámetro de Grados-días. En la Figura 4. 4 se indica la clasificación.

- Zona I: Muy cálida

Comprende la región donde los valores de TEC media, en el día típicamente cálido, son mayores que 26,3 °C. Se tienen 2 subdivisiones:

Subzona Ia: amplitudes térmicas mayores que 14°C

Subzona Ib: amplitudes térmicas menores que 14 ° C

- Zona II: Cálida

Limitada entre las isolíneas de TEC 26,3 °C y 24,6 °C. También tiene 2 subdivisiones:

Subzona IIa: amplitudes térmicas mayores que 14°C

Subzona IIb: amplitudes térmicas menores que 14°C

- Zona III: Templada Cálida

Limitada por las isolíneas de TEC 24,6 °C y 22,9 °C. Con dos subdivisiones:

Subzona IIIa: amplitudes térmicas mayores que 14°C

Subzona IIIb: amplitudes térmicas menores que 14°C

- Zona IV: Templada Fría

Esta zona tiene como límite superior la isolínea de 1 170 grados días (coincidente con la isolínea de 22,9 °C de TEC), y como límite inferior la isolínea de 1 950 grados días. Esta zona se subdivide en cuatro subzonas mediante las líneas de amplitud térmica de 14 °C y 18 °C:

Subzona IVa: de montaña.

Subzona IVb: de máxima irradiación.

Subzona IVc: de transición.

Subzona IVd: marítima.

- Zona V: Fría

Limitada entre las isolíneas de 1 950 grados días y 2 730 grados días.

- Zona VI: Muy Fría

Ubicada en la región donde los valores en grados días son mayores que 2 730.

La provincia de Córdoba se encuentra en la zona IIIa: Templada cálida con amplitudes térmicas mayores que 14°C.

La norma IRAM 11.605 (IRAM; 2001): “*Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos admisibles de transmitancia térmica en cerramientos opacos*”, indica la transmitancia térmica máxima admisible para invierno y verano, con tres niveles de calidad:

- A:Óptimo
- B:Normal
- C:Mínima

La Secretaría de Vivienda exige el cumplimiento de Nivel C para vivienda de interés social. La versión anterior de la norma (IRAM; 1996) permitía mayor transmitancia térmica en paredes con mayor capacidad térmica considerando su peso superficial en kilogramos por metro cuadrado. Sin embargo, a fin de simplificar la verificación de cumplimiento, la norma actual sólo considera la transmitancia térmica como indicador del comportamiento térmico de un elemento constructivo.

En las Tabla 4. 1 y Tabla 4. 2 se indican los valores máximos para muros en función del nivel de calidad elegido.

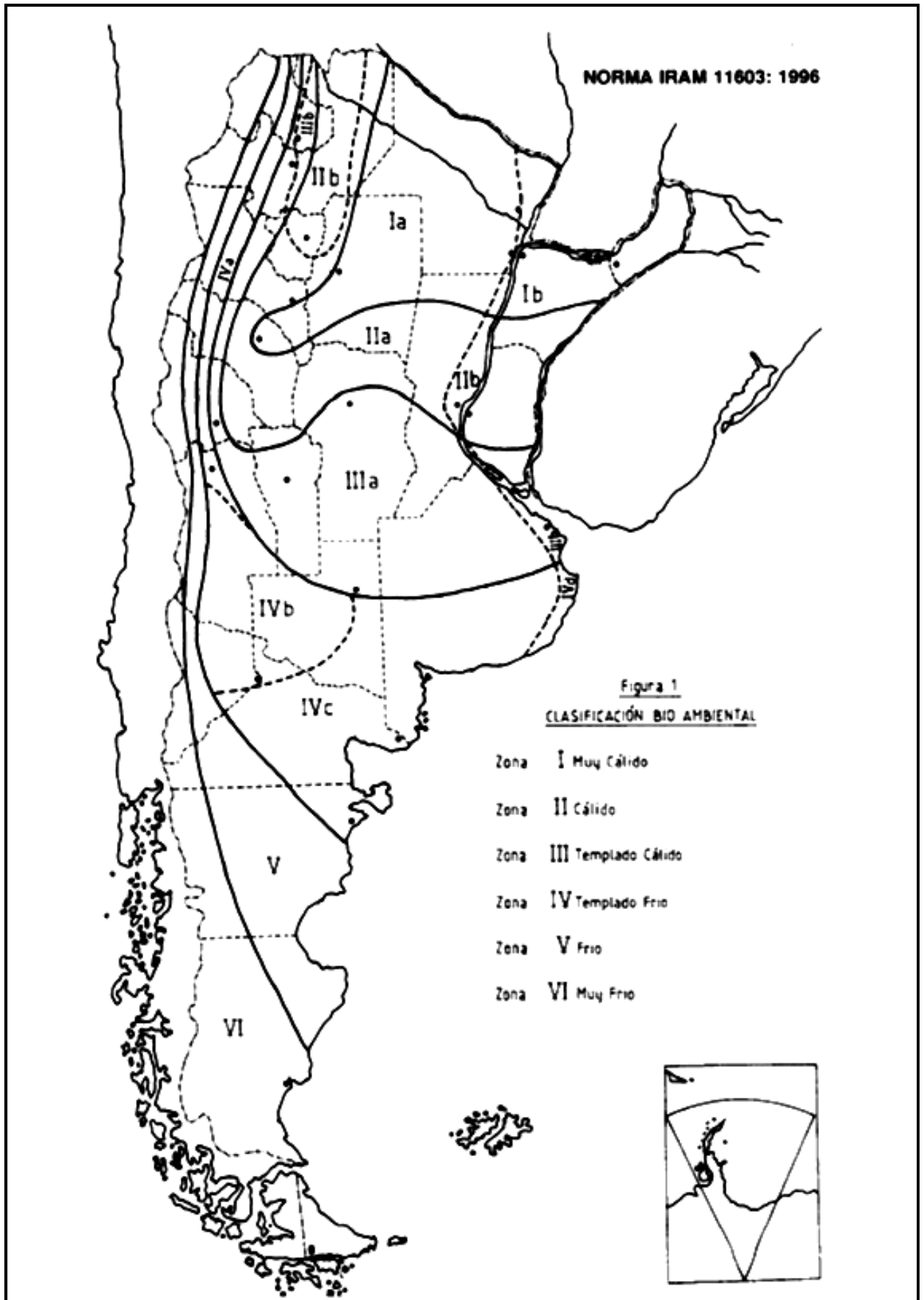


Figura 4. 4: Zonas bioclimáticas de la República Argentina (Norma IRAM 11603-96)

Tabla 4. 1: Valores máximos admisibles de K para condición de invierno en muros (Norma IRAM 11605)

en W/m²K

Temperatura exterior de diseño (t _{ed}) [°C]	Nivel A		Nivel B		Nivel C	
	Muros	Techos	Muros	Techos	Muros	Techos
- 15	0,23	0,20	0,60	0,52	1,01	1,00
- 14	0,23	0,20	0,61	0,53	1,04	1,00
- 13	0,24	0,21	0,63	0,55	1,08	1,00
- 12	0,25	0,21	0,65	0,56	1,11	1,00
- 11	0,25	0,22	0,67	0,58	1,15	1,00
- 10	0,26	0,23	0,69	0,60	1,19	1,00
- 9	0,27	0,23	0,72	0,61	1,23	1,00
- 8	0,28	0,24	0,74	0,63	1,28	1,00
- 7	0,29	0,25	0,77	0,65	1,33	1,00
- 6	0,30	0,26	0,80	0,67	1,39	1,00
- 5	0,31	0,27	0,83	0,69	1,45	1,00
- 4	0,32	0,28	0,87	0,72	1,52	1,00
- 3	0,33	0,29	0,91	0,74	1,59	1,00
- 2	0,35	0,30	0,95	0,77	1,67	1,00
- 1	0,36	0,31	0,99	0,80	1,75	1,00
≥ 0	0,38	0,32	1,00	0,83	1,85	1,00

* Para valores de t_{ed} intermedios, los valores de K_{MAX ADM} se obtienen por interpolación lineal.

Tabla 4. 2: Valores máximos admisibles de K para condición de verano en muros (Norma IRAM 11605)

en W/m².K

Zona Bioambiental	Nivel A	Nivel B	Nivel C
I y II	0,45	1,10	1,80
III y IV	0,50	1,25	2,00

4.4. Determinación del coeficiente K para distintos tipos de muros

Para el análisis energético y económico de una vivienda tipo fue necesario determinar los valores de los coeficientes K de cada una de las alternativas estudiadas.

Se determinaron 6 valores de transmitancia para muros exteriores y muros interiores. Los materiales analizados fueron:

- 1- Ladrillo macizo de arcilla cocido con revoque
- 2- Ladrillo hueco cerámico con revoque
- 3- Ladrillo hueco de hormigón con revoque
- 4- Ladrillo hueco de hormigón sin revoque
- 5- Ladrillo macizo de HCCA (Retak) con revoque
- 6- Ladrillo hueco de suelo-cemento compactado con revoque

La determinación del coeficiente K se realizó en forma de sumatoria de resistencias en paralelo de la forma que se indica en la Figura 4. 5 siguiendo los lineamientos de la Norma IRAM 11601, utilizando las ecuaciones (10) y (11) sin considerar la existencia de cámaras de aire en ningún muro.

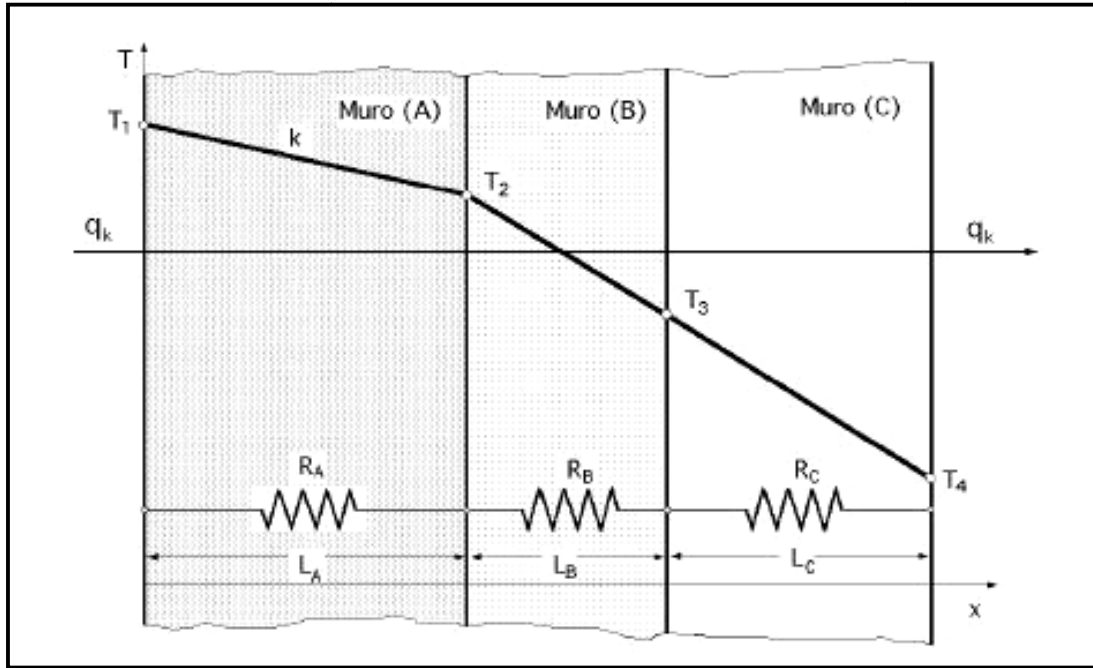


Figura 4. 5: Forma de cálculo del coeficiente K en los muros estudiados

Los resultados se indican en la Tabla 4. 3 a continuación.

Tabla 4. 3: Cálculo del coeficiente K en los muros estudiados

Material del muro	Muro	Capa de materiales	Espesor (m)	λ (W/m°C)	R (°C m ² /W)	K (W/m ² °C)	
Ladrillo Común Revocado	Exterior	Rsi			0,13000	1,553	
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469		
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724		
		Muro	0,3	0,69	0,43478		
		Revoque exterior	0,02	1,16	0,01724		
		Rse			0,04000		
		Resistencia Total			0,64395		
	Interior	Rsi				0,13000	1,918
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469		
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724		
		Muro	0,15	0,69	0,21739		
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724		
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469		
		Rsi			0,13000		
Resistencia Total			0,52125				

Material del muro	Muro	Capa de materiales	Espesor (m)	λ (W/m°C)	R (°C m²/W)	K (W/m²°C)
Ladrillo Cerámico Revocado	Exterior	Rsi			0,13000	1,684
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,2	0,52	0,38462	
		Revoque exterior	0,02	1,16	0,01724	
		Rse			0,04000	
		Resistencia Total				
	Interior	Rsi			0,13000	1,870
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,12	0,52	0,23077	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Rsi			0,13000	
Resistencia Total				0,53463		
Ladrillo Hormigón Revocado	Exterior	Rsi			0,13000	1,483
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,3	0,65	0,46512	
		Revoque exterior	0,02	1,16	0,01724	
		Rse			0,04000	
		Resistencia Total				
	Interior	Rsi			0,13000	1,870
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,15	0,65	0,23077	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Rsi			0,13000	
Resistencia Total				0,53463		
Ladrillo de Hormigón Visto	Exterior	Rsi			0,13000	1,530
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,3	0,65	0,46154	
		Rse			0,04000	
		Resistencia Total				

Material del muro	Muro	Capa de materiales	Espesor (m)	λ (W/m°C)	R (°C m²/W)	K (W/m²°C)
Ladrillo de Hormigón Visto	Interior	Rsi			0,13000	1,870
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,15	0,65	0,23077	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Rsi			0,13000	
		Resistencia Total				
Ladrillo de HHCA (Retak) Revocado	Exterior	Rsi			0,13000	1,022
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,2	0,26	0,76923	
		Revoque exterior	0,02	1,16	0,01724	
		Rse			0,04000	
		Resistencia Total				
	Interior	Rsi			0,13000	1,123
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,15	0,26	0,57692	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Rsi			0,14000	
Resistencia Total				0,89078		
Ladrillo de Suelo-Cemento Revocado	Exterior	Rsi			0,13000	1,368
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,24	0,46	0,52174	
		Revoque exterior	0,02	1,16	0,01724	
		Rse			0,04000	
		Resistencia Total				
	Interior	Rsi			0,13000	1,771
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Muro	0,12	0,46	0,26087	
		Revoque interior	0,02	1,16	0,01724	
		Enlucido de yeso	0,003	0,64	0,00469	
		Rsi			0,13000	
Resistencia Total				0,56473		

Los valores de conductividad usados en los cálculos fueron los obtenidos en laboratorio mediante la metodología de medición indicada en el capítulo 3. Los valores de λ de materiales convencionales que no fueron ensayados en laboratorio fueron extraídos de la norma IRAM 11.601.

A modo de cierre de este capítulo se evalúan los valores de los coeficientes K obtenidos para muros exteriores según las indicaciones en la Norma IRAM 11.605 para un tipo de vivienda C. El análisis se encuentra indicado en la Tabla 4. 4.

Tabla 4. 4: Verificación de K máx. según IRAM 11605

Material	K (W/m²°C)	K máx. INVIERNO (W/m²°C)	K máx. VERANO (W/m²°C)	IRAM 11.605
Común	1,553	1,850	2,000	Verifica
Cerámico	1,684	1,850	2,000	Verifica
Hormigón	1,483	1,850	2,000	Verifica
Hormigón Visto	1,530	1,850	2,000	Verifica
HCCA (Retak)	1,022	1,850	2,000	Verifica
Suelo-Cemento	1,368	1,850	2,000	Verifica

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

5.1. Condiciones de confort de una vivienda.

Las condiciones de habitabilidad de una vivienda se pueden definir como la capacidad de proveer un ambiente confortable, en relación no solo con el bienestar térmico, sino también acústico, visual y de calidad de aire.

El bienestar térmico es fundamental para proveer un ambiente confortable. Variados estudios definen que la zona de confort depende de la temperatura y humedad relativa del ambiente, velocidad del aire, vestimenta de las personas, y temperatura de las superficies de los espacios. ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers) define la zona de confort con un límite inferior de 21,8°C de temperatura ambiente y 73% de humedad relativa, y un límite superior de 26,3°C de temperatura ambiente y 22% de humedad relativa, para velocidades del aire menores a 0,22 m/s (Bedoya y Neila, 1992; Fairey, 1981).

Por estas razones, el diseño de una vivienda debería incluir una etapa integrada que apunte al diseño arquitectónico de los ambientes, uso de los materiales y sistemas constructivos que definan una construcción sustentable. Si bien la utilización de sistemas de refrigeración y calefacción no puede suprimirse, está comprobado que con un adecuado diseño, puede disminuir su uso y por ende la demanda de energía del local.

La vivienda es un sistema dinámico, por lo que el análisis de su comportamiento térmico no se circunscribe sólo a evaluar las propiedades térmicas de los materiales constituyentes, sino que a entender su funcionamiento como un sistema integral (Hunn, 1996). El comportamiento térmico de la vivienda depende de diversos factores (ver Figura 5.1), los que interactúan a través del tiempo y gobiernan los mecanismos de transferencia de calor desde y hacia el interior de la edificación, cuyo resultado es la temperatura del ambiente interior.

En una vivienda se producen ganancias y pérdidas de calor con respecto a la temperatura de confort (generalmente $20 \pm 2^\circ\text{C}$). Realizando un balance térmico se puede determinar las cargas de calefacción y refrigeración requeridas para mantener la temperatura de confort en el ambiente (Vera y Ordenes; 2002).

Se pueden presentar distintas estrategias ecológicas para la adecuación térmica de una vivienda. Ejemplos de ellas son:

- Calefacción solar pasiva
- Aislación térmica de la envolvente (Techos y Muros)
- Protección solar

- Uso de materiales y elementos constructivos con propiedades térmicas adecuadas.

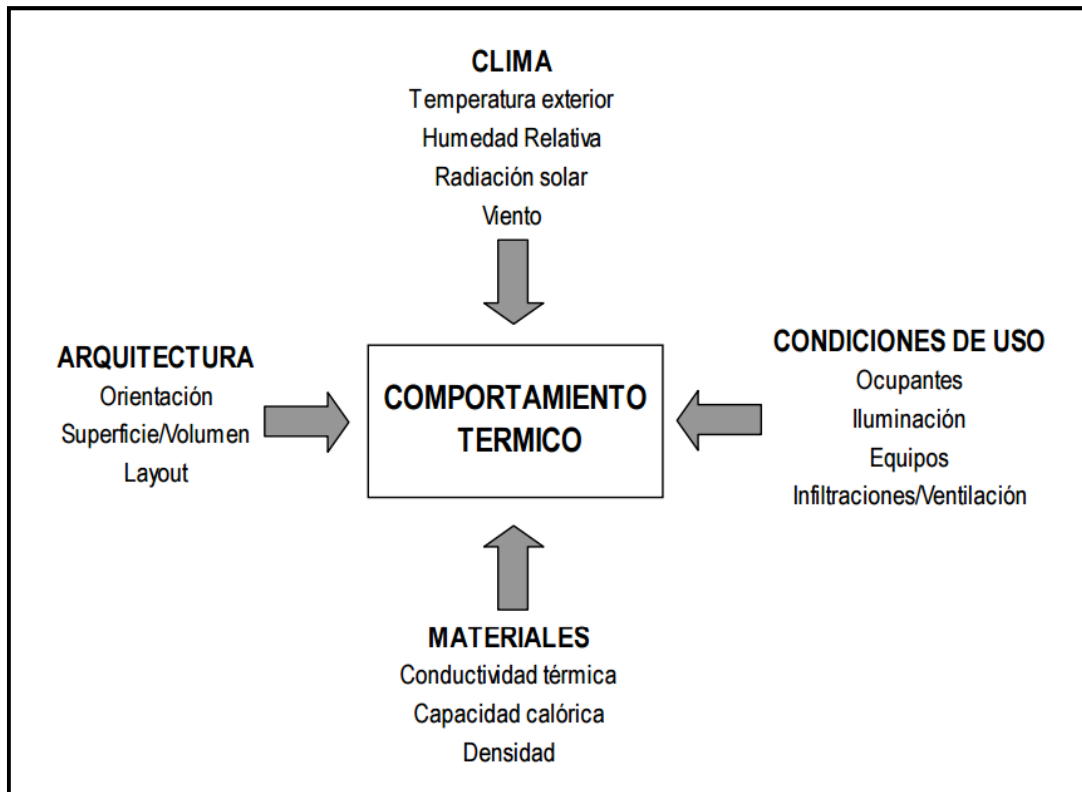


Figura 5.1: Factores influyentes en el comportamiento térmico de una vivienda (Vera y Ordenes, 2002).

Estas herramientas deben ser analizadas tanto en verano como el invierno, ya que una solución puede resultar conveniente en invierno, pero en verano, contraproducente. Por ejemplo, la colocación de sistemas de protección en las ventanas. La elección de uno u otro, dependerá de cual situación resulta menos desfavorable.

5.2. Balance térmico

Del estudio de la Termodinámica, se conoce que el calor fluye espontáneamente desde una fuente de mayor temperatura hacia una de menor temperatura buscando el equilibrio térmico. Incorporando este concepto en una vivienda podemos establecer que dentro de un local, en invierno, el ambiente interior se encuentra a mayor temperatura que el exterior, por ende el calor tenderá a escapar a través de la envolvente del lugar generando *pérdidas de calor*. En cambio, en verano, ocurre el fenómeno inverso. El calor tiene a ingresar al interior generando una *ganancia de calor*, con el aporte del calor generado por las personas y los artefactos.

Para conocer el comportamiento térmico de un local es necesario determinar las pérdidas y ganancias de calor que se producirían bajo determinadas condiciones. Esta tarea se denomina *balance térmico*, un método analítico que permite obtener las

cargas térmicas de una vivienda. Con la determinación de las cargas térmicas se puede estimar la demanda de sistemas artificiales de calefacción o refrigeración de un local ya que nos dan la cantidad de calor que se deberá suministrar o eliminar del ambiente a climatizar, para compensar las pérdidas o ganancias de calor producidas entre el interior y el exterior.

En términos más específicos, dentro de las *pérdidas* podemos nombrar: pérdidas por ventilación (fugas de aire caliente), pérdida a través de techos y muros, pérdida por el suelo, pérdidas por flujo de aire indeseado (infiltración de aire) por rendijas de puertas y ventanas. Las pérdidas por puertas y ventanas que poseen una resistencia térmica relativamente menores que los muros y techo son por tanto más importantes, dependiendo de su superficie comparativa. Y dentro de las *ganancias* se presentan en forma de aportaciones por aparatos de calefacción, aparatos que producen calor, aportaciones por el calor emitido por los ocupantes del edificio, ganancias por conducción a través de muros y techos en verano, y aportaciones solares a través de superficies acristaladas principalmente por su efecto invernadero.

Por las razones antes explicadas, se debe realizar un balance térmico en invierno y otro en verano. La estimación de las cargas térmicas se puede resumir en 4 puntos clave: 1- Condiciones exteriores. 2- Condiciones interiores. 3- Pérdidas en invierno. 4- Ganancias en verano.

Condiciones exteriores

En este punto se deben reunir las temperaturas (verano-invierno), valores máximos y mínimos correspondientes a valores estadísticos de cada zona en particular. Esta tarea se encuentra resumida en la norma IRAM 11603 (IRAM; 1996) que establece las condiciones climáticas diferenciadas en zonas del todo el país. La zonificación de nuestro país se puede observar en la Figura 4. 4.

Condiciones interiores

Las condiciones de temperatura y humedad en el interior de un local dependen de varios factores:

- La actividad, a mayor actividad, mayor desprendimiento de calor.
- Temperatura radiante media de los cerramientos
- Velocidad del aire. Debe tener un valor entre 1 m/s y 0,1 m/s para evitar molestias en los habitantes y permitir una renovación constante del aire.

Ganancias y pérdidas de calor sensible por cerramientos opacos (muros)

Se define al calor sensible como: aquel que recibe un cuerpo o un objeto y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado. (Incropera y DeWitt, 1999)

Las transferencias de calor en un muro, tanto en invierno como en verano, se dan por *conducción* en régimen estable o en régimen variable. El régimen estable se suele utilizar en balances para invierno, mientras que en verano se suele considerar el régimen variable debido a la importante influencia de la radiación del día en los cerramientos.

Las posibilidades de que el flujo de calor atraviese el muro en mayor o menor medida se calcula de la siguiente manera

$$Q_o = K * S * \Delta T \quad (12)$$

Donde: Q_o = flujo de calor a través del cerramiento opaco (Kcal/ h); K =coeficiente global de transmitancia térmica del muro (Kcal/m²Ch), S =superficie del cerramiento (m²), ΔT = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior (°C).

Ganancias y pérdidas de calor sensible por cerramientos translúcidos (vidrios)

En este caso ocurren transferencias de calor por medio de dos fenómenos: 1- *Conducción*, del mismo modo que ocurre en los muros- 2- *Radiación*

En el caso de la conducción, tendremos tanto ganancias como pérdidas. Y su determinación se realiza de la misma forma que con los cerramientos opacos, con la fórmula número 12. La radiación sólo produce ganancias. El flujo de calor ganado producido por la radiación se puede analizar bajo la siguiente ecuación

$$Q_t = RS * S * fr \quad (13)$$

Donde: Q_t = flujo de calor a través del cerramiento traslúcido (Kcal/h); RS =coeficiente de radiación solar incidente en los cerramientos (Kcal/h m²); S =superficie expuesta a los rayos solares (m²), fr = factor de reducción

El valor de RS resulta difícil de calcular, ya que depende de la posición relativa del sol con respecto al cerramiento en cuestión, y esta posición está relacionada con su orientación, con la latitud del lugar y la hora del día. Los valores de fr representan la existencia de elementos que impiden o limitan la incidencia de los rayos solares y han sido determinados empíricamente según el caso que se trate.

Cargas de calor latente

Se define el calor latente como: la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido(calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización). Se debe tener en cuenta que esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura.

Este análisis es importante en verano donde el contenido de humedad tiende a ser mayor del recomendable o deseable, debido a varias razones, entre las más

importantes: las personas, artefactos electrónicos y el aire exterior que normalmente contiene altos contenidos de humedad. Entonces, resulta necesario secar el aire y para ello es necesario disminuir su contenido de humedad, esto sólo se consigue mediante el enfriamiento del aire por debajo del punto de rocío del mismo, ya que a partir de ese punto se produce la condensación del vapor de agua contenido en su masa. Esta cantidad de calor se conoce como el calor latente, el cual no modifica la temperatura pero si el estado del vapor del aire. Esta tarea se realiza mediante algún equipo de refrigeración, por ello es útil determinar la cantidad de calor que implica la eliminación del vapor en el aire y con ello el gasto energético del equipo.

Ganancias de calor sensible y latente por cargas internas

Las cargas o aporte del calor en el interior de un local se pueden deber a las personas habitantes, los artefactos del lugar y la iluminación. Los primeros dos casos generan aumentos de calor latente y sensible. Mientras que la iluminación genera solamente aumento en la temperatura.

Las personas debido a su metabolismo producen calor como residuo, el cual será mayor cuanto más intensa sea la actividad física que estén realizando. Este calor generado, deberá disiparse en el medio utilizando para ello el cuerpo humano los mecanismos de conducción, convección y radiación, lo que significa un aporte de calor sensible. Otro mecanismo para equilibrar el cuerpo es el proceso de transpiración, con el cual aporta vapor de agua al medio, generando un aporte de calor latente.

La iluminación artificial, como toda energía genera calor, provocando un aporte de calor sensible en el medio independientemente del tipo de fuente de luz utilizada.

En lo referido a los artefactos, dependen de una fuente externa de energía para funcionar (electricidad, gas, vapor, etc.), de modo que si conocemos la cantidad de energía consumida, podremos saber cuánto calor sensible estarán aportando al local. Y por otro lado, algunos artefactos, el resultado de su funcionamiento puede llevar a un aporte de vapor de agua (cafeteras, ollas, secadores de cabello, etc.) al ambiente, generando una fuente de calor latente.

Ganancias y pérdidas de calor sensible y latente debido al ingreso de aire exterior

El aire exterior que se infiltra a través de las hendiduras de los cerramientos móviles, o que penetra voluntariamente a través de las aberturas y tomas especiales resulta una carga térmica para el equipo de calefacción o refrigeración, ya que el aire ingresa con la temperatura y humedad exterior y se debe acondicionar a las condiciones interiores del ambiente. Por ello se debe realizar una estimación de la cantidad de aire a tratar.

El aire ingresante se puede dividir en dos tipos: 1- Aire exterior de infiltración. 2- Aire exterior de renovación higiénica.

El aire exterior de infiltración se estima con la ecuación (14)

$$Q_{ai} = L * C \quad (14)$$

Donde: Q_{ai} = caudal de aire de infiltración por las aberturas (m^3/h), L = longitud total de aberturas en metros lineales (m), C_a = coeficiente de aberturas (m^3/mh).

El C_a representa la cantidad de aire que entra por abertura, se encuentran tabulados según el tipo de abertura que se trate.

El aire de renovación se determina con la ecuación (15)

$$Q_{ar} = N_p * C_r \quad (15)$$

Donde: Q_{ar} = caudal de aire de renovación higiénica (m^3/h), N_p = número de personas que ocupan el local, C_r = coeficiente de renovación de aire por persona ($m^3/persona$).

Esta cantidad de aire para renovación suele ser muy superior al aire que ingresa por aberturas, de modo que generalmente para cubrir los mínimos necesarios, se debe recurrir a una Toma de Aire Exterior (TAE) que estará dimensionada para

$$Q_{TAE} = Q_{ar} - Q_{ai} \quad (16)$$

Donde: Q_{TAE} = caudal para dimensionado de las bocas de toma de aire (m^3/h).

Una vez obtenidos los caudales de aire se deben estimar los ingresos de calor sensible y latente que producen en función de coeficientes de calor volumétricos y diferencias de temperaturas.

Factor de calor sensible

En verano, es necesario enfriar el aire que se ingresa a un local para acondicionarlo, y quitarle humedad, hasta llegar a los parámetros establecidos previamente de temperatura y humedad relativa. De modo que el aire que se insufla al interior del ambiente deberá estar más frío y más seco que el aire existente en ese local. Por ello es necesario conocer exactamente las proporciones de calor sensible y calor latente que componen este calor total. Esto se evalúa en un coeficiente adimensional denominado factor de calor sensible. Este factor se utiliza en el diseño de conductos de aire para sistemas de refrigeración.

$$FCS = \frac{Q_{cs}}{Q_t} \quad (17)$$

Donde: FCS= Factor de calor sensible, Q_{cs} = cantidad de calor sensible total del local (Kcal/h), Q_t = cantidad de calor total en el local (Kcal/h).

5.3. Desarrollo

Para comparar el efecto que produce la utilización de distintos tipos de cerramientos, se adoptó una vivienda tipo y se realizó un estudio económico y energético mediante un balance térmico sobre la vivienda. El análisis económico se basó en comparar los costos de inversión de construcción y los costos asociados al uso de sistemas de acondicionamientos térmicos y gastos de energía de cada cerramiento, obteniendo la rentabilidad económica de cada alternativa. Mientras que en el estudio energético se evaluó de manera cuantitativa los consumos de energía durante la vida útil de la vivienda y con un análisis cualitativo se consideraron los impactos ambientales más importantes que produce cada material en su proceso de fabricación, a modo de evaluar cuan amigable es cada alternativa con el ambiente.

Se consideró una vivienda tipo construida con distintos materiales disponibles en el mercado de la construcción. Las alternativas estudiadas fueron las siguientes.

- Vivienda con muros de ladrillos de macizos comunes revocado.
- Vivienda con muros de ladrillos huecos cerámicos revocados.
- Vivienda con muros de ladrillos huecos de hormigón revocados.
- Vivienda con muros de ladrillos huecos de hormigón visto.
- Vivienda con muros de ladrillos macizos de HCCA (Retak) revocados.
- Vivienda con muros de ladrillos huecos de suelo-cemento revocados.

5.3.1. Vivienda tipo analizada

El modelo de vivienda usado fue tomado de los planos tipos ofrecidos por el gobierno para el plan de construcciones de vivienda de PROCREAR. En la Figura 5. 2se presentan las vistas de la vivienda elegida.

La vivienda tiene una morfología rectangular, dispone de un dormitorio, estar comedor-cocina, baño y toilette. Se consideraron en el análisis 2 ambientes: dormitorio y el estar-comedor.

Para realizar el balance térmico se variaron únicamente los materiales de los muros, de manera que se pudiera hacer una comparación con pocas variables.

En cuanto a los sistemas de artificiales de acondicionamiento térmico de la vivienda se dispusieron, teniendo en cuenta que son viviendas económicas, para

calefacción estufas a gas natural de tiro balanceado y para refrigeración sistemas de aire acondicionado tipo split.

Para el cálculo del balance térmico, fue necesario ubicar la vivienda en una orientación, se dispuso en una dirección ficticia en Bolivia 150, Barrio Nueva Córdoba, Córdoba, donde la parte frontal de la vivienda se encuentra orientada al Sur.



Figura 5. 2: Vistas de frente y contrafrente de la vivienda



Figura 5. 3: Planta de la vivienda tipo

5.3.2. Modelo de cálculo

Para realizar el balance térmico se utilizó un programa computacional denominado BT6 de Dilasoft, que es una empresa fundada en el año 2012. La versión utilizada fue un demo gratuito de prueba por 60 días. El programa permite la realización de cálculos térmicos para calefacción y aire acondicionado en locales, casas, comercios y edificios de hasta 50 ambientes. Utiliza el método de cálculo según las funciones de transferencia de calor.

El programa está preparado para trabajar tanto en latitud Norte como en latitud Sur. Al elegir la ciudad de cálculo automáticamente se determina en que latitud se va a trabajar. Posee una base de datos abierta con datos de ciudades, coeficientes de transmisión de cargas varias, materiales, paredes, pisos, techos y vidrios. Está preparado para trabajar con unidades internacionales (Watt), unidades métricas (Kcal/h) y unidades inglesas (Btu/h), cambiando las mismas en cualquier momento.

Permite el cálculo de nuevos coeficientes de transmisión para paredes, pisos y techos, utilizando los materiales contenidos en la base de datos. Como también el ingreso de K especiales, permitiendo realizar el balance térmico que motiva el presente trabajo.

En la Tabla 5.1 se detallan los materiales utilizados para los elementos generales de la vivienda junto con el coeficiente de transmitancia K que poseen en conjunto. Los datos exigidos por el programa para realizar el balance térmico son:

- Vidrios: superficie, tipo de protección, material y orientación
- Paredes interiores: superficie y material
- Paredes exteriores: superficie, material y orientación
- Pisos y techos: superficie y material
- Personas, actividad, luces y cargas.

Tabla 5.1: Valores de K para techos y pisos

Ambiente : Cocina-Comedor		
Elemento	Material	K (W/m²°C)
Ventanas	Vidrio simple	5,820
Piso	GRES calcáreo	3,503
Techo	Terraza con baldosas cerámicas. Cieloraso de H° visto	0,988
Ambiente : Dormitorio		
Ventanas	Vidrio simple	5,820
Piso	GRES calcáreo	3,503
Techo	Terraza con baldosas cerámicas. Cieloraso revocado	0,963

En la Tabla 5. 2 se describen las condiciones en cuanto a la actividad e iluminación para cada ambiente.

Tabla 5. 2: Cargas térmicas de cada ambiente según actividad.

Ambiente	Personas	Aire exterior (m ³ /h)	Luces (W)	Cargas Sensible (W)	Cargas Latente (W)
Cocina Comedor	3	51	418	1926	267
Dormitorio	2	24	106	300	-

De este modo se creó un modelo tipo del cual luego se fueron modificando los valores de transmitancia térmica de los muros con cada uno de los materiales en cuestión. En la Figura 5.4 se muestran las pestañas de los datos estándar ingresados.

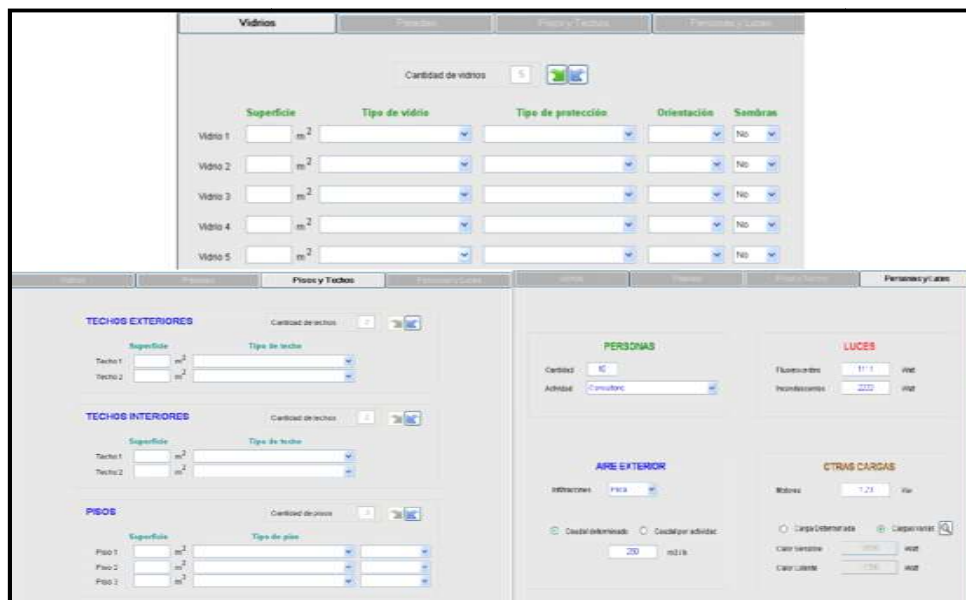


Figura 5.4: Pestañas de datos del programa BT6 de Dilasoft.

En la Tabla 5.3 se indican los coeficientes utilizados para cada tipo de muro diferenciando entre muros interiores y exteriores, que fueron calculados en la sección 4.4 del capítulo anterior.

Tabla 5.3: Valores de K para los 6 tipos de muros

Material del muro	Coeficiente K (W/ m ² °C)	
	Muro exterior	Muro interior
Común Revocado	1,553	1,918
Cerámico Revocado	1,684	1,870
Hormigón Revocado	1,483	1,870
Hormigón Visto	1,530	1,870
HCCA (retak) Revocado	1,022	1,123
Suelo-Cemento Revocado	1,368	1,771

Las variaciones del coeficiente K en función de los materiales utilizados para la fabricación del muro se pueden apreciar en la Figura 5. 5. Como se explicó anteriormente, cuanto menor es el valor de la transmitancia térmica mayor aislamiento térmico presenta el muro y por ende menores pérdidas de calor se presentarán en el ambiente encerrado por el mismo. Se puede observar que los menores valores de K se dan con los materiales HCCA, suelo-cemento y hormigón anticipándose que los mejores resultados serán proporcionados por estos materiales. Mientras que el coeficiente más alto y por lo tanto, el más desfavorable está dado por el material de ladrillos cerámicos.

A la hora de decidir con cual material construir, es importante evaluar la conveniencia de uno u otro no sólo en función de sus cualidades aislantes sino también en función de su precio. Por ello se realiza un análisis económico de cada alternativa considerando su inversión inicial y el gasto en energía eléctrica y gas para mantener las condiciones de confort necesarias durante el año.

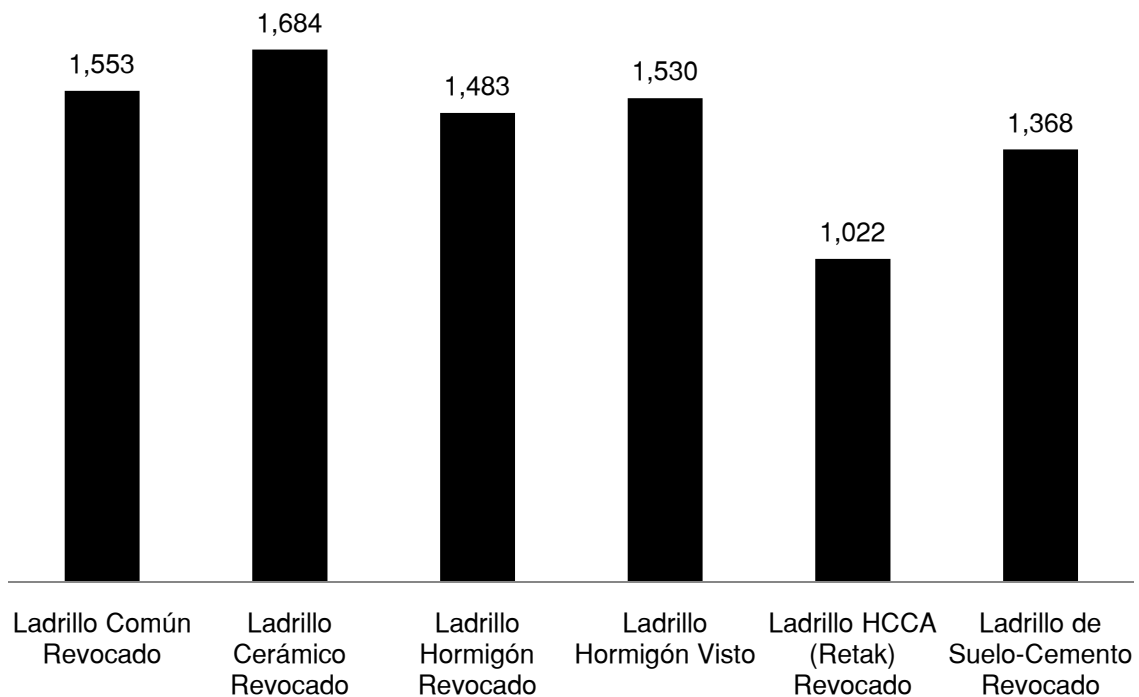


Figura 5. 5: Comparaciones de valores de K en muros exteriores

5.3.3. Determinación de cargas térmicas y diseño de sistemas artificiales de refrigeración-calefacción.

A partir del modelo descrito en la sección 5.3.2 para los distintos materiales y muros se obtuvieron las pérdidas y/o ganancias de calor sensible y latente según el caso.

Las temperaturas de diseño fueron adoptadas teniendo en cuenta que la vivienda está ubicada en la ciudad de Córdoba, y utilizando la base de datos del programa computacional

Condición verano

Temperatura exterior: 34.2 °C
 Temperatura interior: 25.0 °C
 Humedad relativa exterior: 33 %
 Humedad relativa interior: 55 %

Condición invierno

Temperatura exterior: 1.3 °C
 Temperatura interior: 20.0 °C

Los resultados obtenidos se indican para cada ambiente analizado y para la condición de verano en la Tabla 5.4 e invierno en la Tabla 5.5.

Tabla 5.4: Cargas térmicas de calor sensible y latente en verano

Material del muro	COCINA-COMEDOR			DORMITORIO		
	Calor sensible (W)	Calor latente (W)	Calor Total (W)	Calor sensible (W)	Calor latente (W)	Calor Total (W)
Común revocado	5369	440	5809	2159	143	2302
Cerámico revocado	5932	440	6372	2177	143	2320
Hormigón revocado	5805	440	6245	2112	143	2255
Hormigón visto	5839	440	6279	2130	143	2273
HCCA(retak) revocado	5324	440	5764	1717	143	1860
Suelo-cemento revocado	5697	440	6137	2030	143	2173

Tabla 5.5: Pérdidas de calor sensible en invierno

Material del muro	Calor sensible Cocina-Comedor (W)	Calor sensible Dormitorio (W)
Común revocado	5541	2889
Cerámico revocado	5638	2907
Hormigón revocado	5433	2130
Hormigón visto	5489	2837
HCCA(retak) revocado	4592	2120
Suelo-cemento revocado	5247	2670

Con los resultados obtenidos de cada balance, se procedió a dimensionar los sistemas de calefacción y refrigeración de cada caso. Para el verano, se dispusieron 2 Aires Acondicionados dentro de la vivienda. Uno en la cocina-comedor y otro en el dormitorio. La capacidad del equipo para cada alternativa fue se determinó a partir de los resultados de cada balance térmico como se indica en la Tabla 5.6. Para el invierno, se dispusieron 2 calefactores uno en la cocina-comedor y otro en el

dormitorio. Ambos de tiro balanceado. Las capacidades de cada estufa se indican en la Tabla 5.7

Tabla 5.6: Capacidad elegida de los equipos de refrigeración en cada caso

COCINA COMEDOR			
Material del muro	Calor total (Kcal/h)	Capacidad elegida (Frig)	Consumo corriente (A)
Común revocado	4996	4500	8,4
Cerámico revocado	5480	6000	12,0
Hormigón revocado	5371	6000	12,0
Hormigón visto	5400	6000	12,0
HCCA(retak) revocado	4957	4500	8,4
Suelo-cemento revocado	5278	4500	8,4
DORMITORIO			
Material del muro	Calor total (Kcal/h)	Capacidad elegida (Frig)	Consumo corriente (A)
Común revocado	1980	2250	4,1
Cerámico revocado	1995	2250	4,1
Hormigón revocado	1939	2250	4,1
Hormigón visto	1955	2250	4,1
HCCA(retak) revocado	1600	2250	4,1
Suelo-cemento revocado	1869	2250	4,1

Tabla 5.7: Capacidades de los calefactores para cada alternativa

Material del muro	COCINA COMEDOR		DORMITORIO	
	Calor total (Kcal/h)	Capacidad equipo (Kcal/h)	Calor total (Kcal/h)	Capacidad equipo (Kcal/h)
Común revocado	4765	5000	2485	3000
Cerámico revocado	4849	5000	2500	3000
Hormigón revocado	4672	5000	1832	2000
Hormigón visto	4721	5000	2440	3000
HCCA(retak) revocado	3949	4000	1823	2000
Suelo-cemento revocado	4512	5000	2296	2000

5.3.4. Análisis energético de alternativas

Para evaluar la rentabilidad ambiental de cada alternativa se comparó la cantidad de energía consumida por cada alternativa y se evaluaron los principales impactos

negativos que generan al medio ambiente los procesos de elaboración de cada material. De esta manera, independizándonos del valor monetario que provocan, se puede deducir cuales soluciones son sustentables con el medio ambiente.

En la Figura 5. 6 se representa mediante un gráfico de barras el consumo de energía en Kcal necesario para contrarrestar las ganancias de calor en verano de la vivienda y el consumo de energía en invierno para las mismas condiciones. Los mayores consumos de energía se dan, sin distinción del material, en el verano. Esto puede deberse por un lado al clima de la localidad que estamos analizando y por otro lado a la orientación de la vivienda y posición de los cerramientos en relación a la misma.

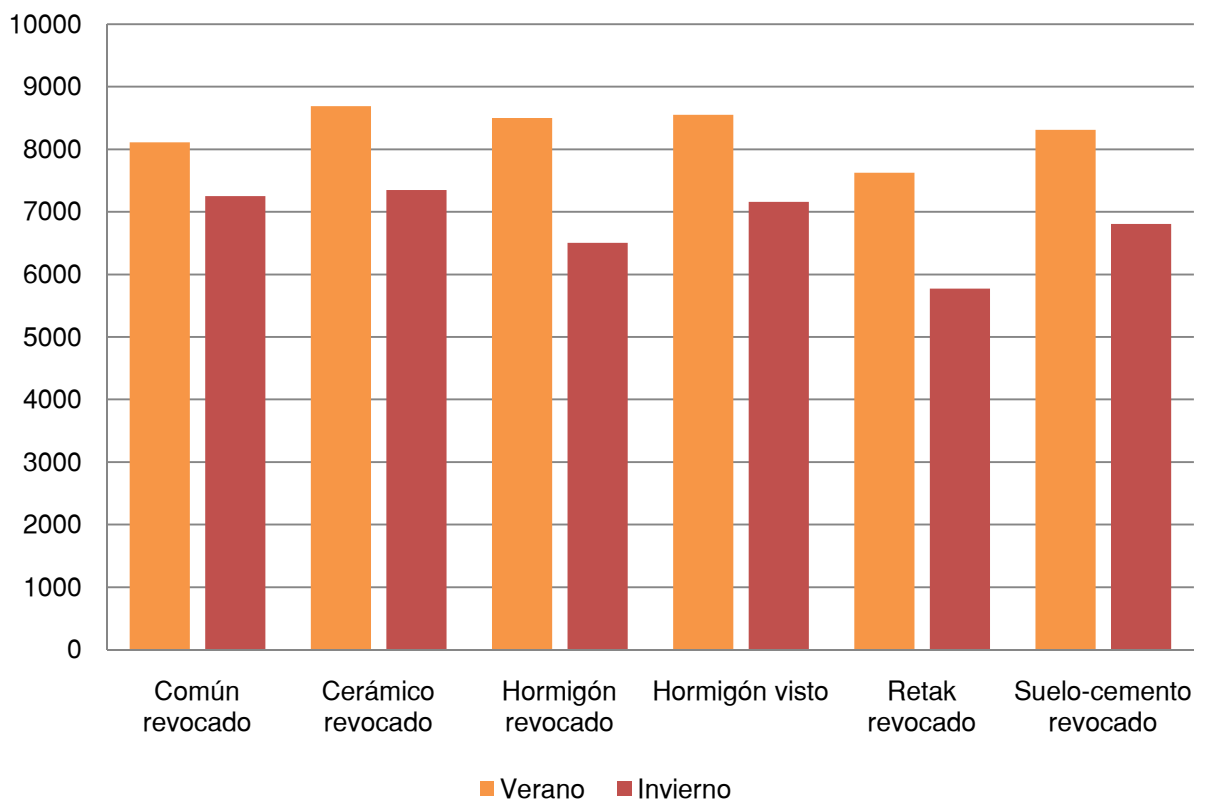


Figura 5. 6: Consumo de energía en verano e invierno

Es interesante observar que el comportamiento en verano e invierno de algunas alternativas puede ser contradictorio. Por ejemplo, las viviendas con muros de ladrillos de hormigón revocados generan uno de los menores consumos de energía en invierno mientras que en verano el consumo pasa a ser uno de los mayores; contrarrestándose el ahorro en emisiones. A pesar de esta particularidad, es una de las opciones con menores emisiones. Otras soluciones, como los ladrillos HCCA y ladrillos de suelo-cemento tienen un comportamiento satisfactorio en ambas estaciones siendo las opciones que aparentan ser más sustentables. Otra observación es la diferencia en los consumos de una vivienda hecha con ladrillos de hormigón con y sin revoque exterior, se indica en la Figura 5. 6 que en verano el comportamiento es prácticamente el mismo mientras que en invierno se obtienen

mayores consumos en vivienda sin revoque exterior, esto se debe a que los muros revocados tienen una aislación adicional generada por los materiales normalmente usados para esa tarea. Propiedad que también se observa en la Figura 5. 5 donde se presentan los valores K de cada solución.

En Figura 5. 7 se representaron los consumos acumulados totales a lo largo de 30 años para cada alternativa. Observándose que el mejor comportamiento está dado por los ladrillos de HCCA, hormigón y suelo-cemento como se predijo anteriormente. Mientras que la opción menos favorable son los ladrillos cerámicos. Ahora bien, lo que se intenta demostrar en esta sección es cual solución genera menores impactos en el ambiente. Analizando la vida útil de una vivienda, se concluye que las opciones más amigables son los ladrillos de HCCA pero también es importante evaluar cuanto daño al ambiente el proceso de elaboración de los mismos.

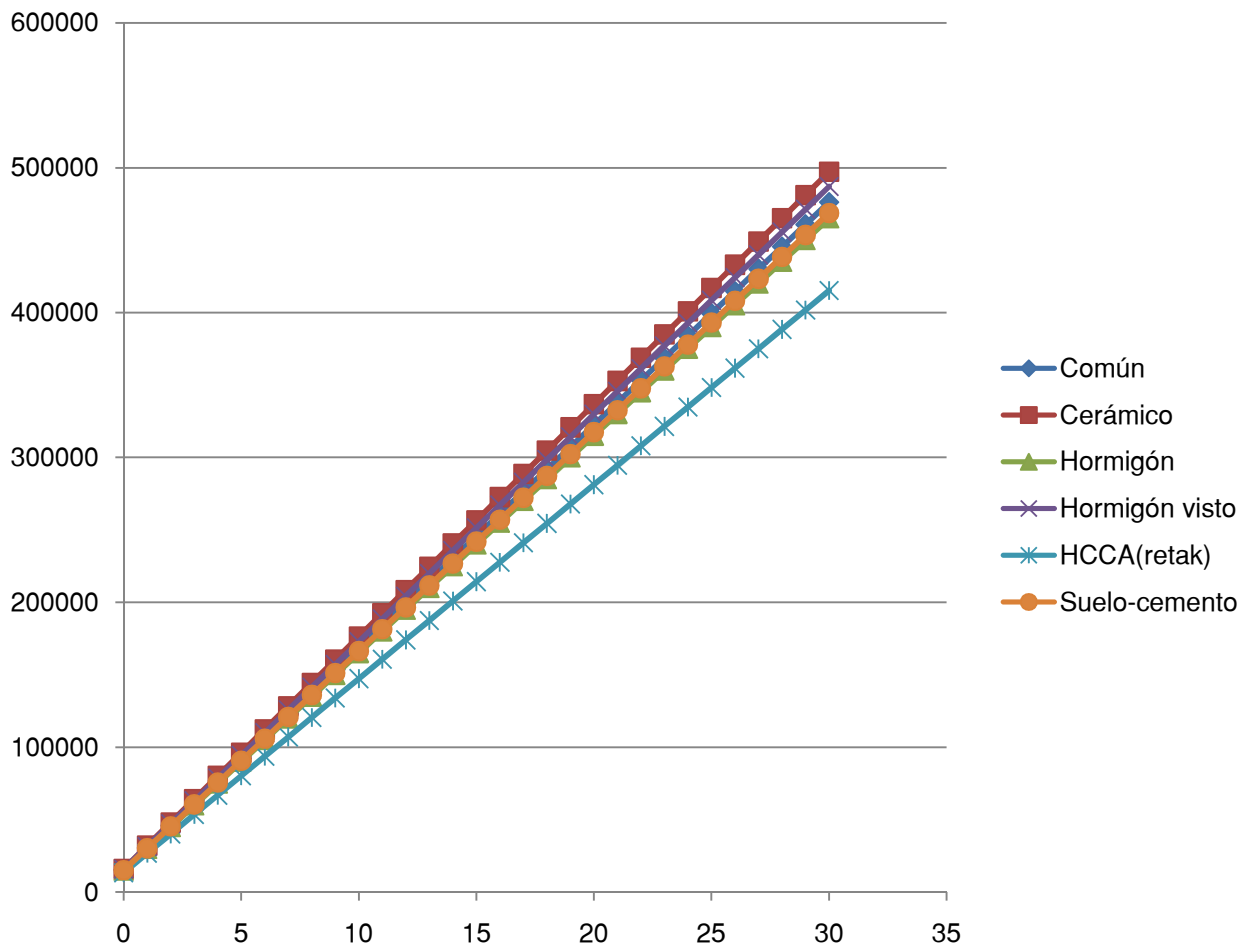


Figura 5. 7: Consumo de energía acumulada por 30 años

Sin escapar del alcance de este trabajo, de manera cualitativa se detallan los principales efectos negativos en el ambiente que genera la fabricación de cada material.

Según la bibliografía estudiada, los principales impactos ambientales generados por la producción de ladrillos de arcilla cocidos tradicionales son: 1- contaminación atmosférica por la quema de combustibles para la cocción, 2- contaminación del aire por la extracción de la arcilla, 3- producción de residuos sólidos y líquidos, 4- degradación del suelo. Para la producción de ladrillos cerámicos genera los mismos impactos, con mayores emisiones atmosféricas y altos consumos de energía ya que tanto la mezcla de los materiales como la cocción se encuentran mecanizadas. Por otro lado, a la fabricación de bloques de hormigón se atribuyen las siguientes acciones contaminantes: 1- extracción de áridos de las canteras, 2- impacto ambiental producido para la elaboración de cemento, 3- consumo energético debido al proceso de elaboración mecanizado. Los ladrillos de HCCA poseen los mismos materiales que los ladrillos de hormigón común, otorgándoseles los impactos ambientales generados por la extracción de material en canteras y la producción de cemento; además su fabricación se encuentra industrializada generando altos consumos de energía. En cuanto a la producción de ladrillos de suelo-cemento, se puede atribuir como mayor impacto ambiental la utilización de cemento en la mezcla; vale mencionar que las cantidades de cemento que se usan en este material son insignificantes frente al hormigón.

Con este leve análisis se estima que la solución con menores daños ambientales en su proceso de elaboración es la de ladrillos de suelo-cemento, afirmaciones que fueron mencionadas al comienzo de este trabajo.

Finalmente, tomando las dos variables analizadas, se puede concluir que la alternativa que resulta más sustentable es la de ladrillos de suelo-cemento, ya que genera un bajo consumo de energía durante su vida útil y también el menor impacto ambiental en su elaboración evitando emisiones de gases contaminantes, degradación del suelo y contaminación asociada a sistemas mecanizados y extracción de áridos de canteras. Además su elaboración es un proceso sencillo, apto para ser ejecutado por cualquier operador. La construcción con ladrillos de suelo-cemento es una solución que combina con la bio-construcción.

5.3.5. Análisis económico de alternativas

Para evaluar la rentabilidad de cada alternativa se determinó el costo de construcción de cada opción, para ello se desarrolló un presupuesto modelo variando el costo de los materiales en el ítem de construcción de muros. Los valores unitarios del material y de la mano de obra se obtuvieron de las tablas de precios unitarios de construcción proporcionadas por el colegio de ingenieros en formato digital. Los resultados se encuentran indicados en la Tabla 5. 8.

Para los ladrillos de suelo-cemento se hizo un cálculo estimativo del costo del cemento que se usa para una unidad y se consideró un costo mínimo del suelo ya

que se utiliza el suelo local para su producción. Para la mano de obra se consideraron costos un poco menores ya el armado de muros es más sencillo como se detalló en el capítulo 2.

Tabla 5. 8: Precios Material y Mano de Obra por m²

Material	Tipo de muro	Precio un. Material (\$)	Cantidad por m²	Precio m² MO (\$/m²)	Precio total (\$/m²)
Común	Interior	\$ 3,50	60	\$ 210,00	\$ 420,00
	Exterior	\$ 3,50	120	\$ 250,00	\$ 670,00
Cerámico	Interior	\$ 10,00	20	\$ 130,00	\$ 330,00
	Exterior	\$ 15,00	20	\$ 140,00	\$ 440,00
Hormigón	Interior	\$ 10,00	15	\$ 130,00	\$ 280,00
	Exterior	\$ 20,00	15	\$ 140,00	\$ 440,00
HCCA(retak)	Interior	\$ 35,00	8	\$ 115,00	\$ 395,00
	Exterior	\$ 50,00	8	\$ 130,00	\$ 530,00
Suelo-cemento	Interior	\$ 2,00	60	\$ 90,00	\$ 210,00
	Exterior	\$ 2,00	120	\$ 120,00	\$ 360,00

La inversión inicial que conlleva cada alternativa se indica en la Tabla 5. 9. Se calcularon los costos totales y los costos por m² de muro. En los resultados obtenidos se puede observar que si bien el material que mayor costo unitario tiene es el ladrillo de HCCA (Tabla 5. 8) no constituye la alternativa más costosa, esto se debe a que la construcción con estos materiales suele ser menos laboriosa que otras alternativas generando un costo de MO menor; de todos modos representa una de las opciones con costos más elevados. La construcción con ladrillos comunes resulta ser la más onerosa, por lo que no es conveniente. Los ladrillos cerámicos y bloques de hormigón generan un costo neutro dentro de las opciones, siendo los ladrillos cerámicos más costosos. Mientras que la construcción de muros con ladrillos de suelo-cemento constituye la opción más económica, lo cual se debe al bajo costo unitario del material y a la simpleza en el levantamiento de los muros.

En la Figura 5.8 se representa el ahorro en costo de inversión en función de la alternativa más costosa: muros de ladrillos comunes revocados. A simple vista, considerando únicamente este factor, el mayor ahorro se da construyendo con ladrillos de suelo-cemento. Este análisis puede ser determinante en proyectos en donde la disponibilidad de capital para invertir a la hora de construir sea determinante. Además este tipo de material se puede fabricar a pie de obra, simplificando el presupuesto del proyecto. Los muros con ladrillos de hormigón visto también presentan ventajas económicas.

Tabla 5. 9: Costos de construcción de cada alternativa

Material del muro	Inversión total (\$)	Costo por m ² muro (\$/m ²)
Común revocado	\$ 509.997	\$ 559
Cerámico revocado	\$ 488.857	\$ 391
Hormigón revocado	\$ 486.057	\$ 369
Hormigón visto	\$ 476.799	\$ 327
HCCA(retak) revocado	\$ 498.797	\$ 470
Suelo-cemento revocado	\$ 476.537	\$ 293

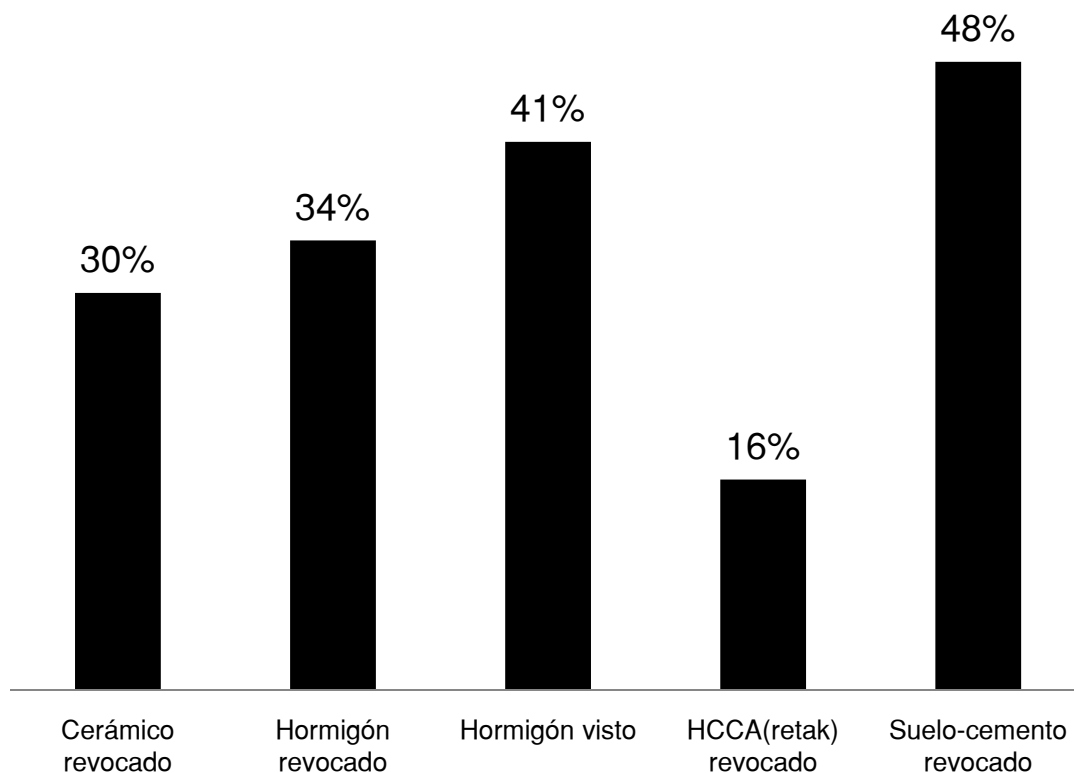


Figura 5.8: Ahorro porcentual de inversión en función de la alternativa más cara

Ahora bien, para evaluar la eficiencia energética que puede presentar una u otra alternativa se determinó el costo monetario anual generado por el uso de sistemas de calefacción y refrigeración de cada opción. Con los equipos calculados en función del balance térmico en secciones anteriores, se realizó una estimación de las horas de uso y con ello se determinó el gasto.

Para el consumo en energía eléctrica, con las características técnicas de cada equipo y la tarifa por KW de energía eléctrica proporcionado por EPEC se obtuvieron los gastos por año en electricidad sólo por el uso de los AA. Los resultados finales obtenidos, se indican en la Tabla 5.10

Tabla 5.10: Gastos en aire acondicionado por año

Material del muro	Costo total (\$/año)
Común revocado	\$ 387
Cerámico revocado	\$ 521
Hormigón revocado	\$ 512
Hormigón visto	\$ 514
HCCA (retak) revocado	\$ 377
Suelo-cemento revocado	\$ 399

Para el gasto en gas natural, se realizando un análisis similar se obtuvieron los resultados indicados en laTabla 5.11.

Tabla 5.11: Gastos en calefacción por año

Material del muro	Costo total (\$/año)
Común revocado	\$ 368
Cerámico revocado	\$ 373
Hormigón revocado	\$ 324
Hormigón visto	\$ 364
HCCA (retak) revocado	\$ 238
Suelo-cemento revocado	\$ 325

En la Figura 5. 9 se muestra el costo total por año generado por el uso en sistemas de refrigeración-calefacción artificial y el costo por m² de muro de cada solución. Observando la Figura 5. 9 se concluye que una vivienda de ladrillos comunes tiene costos moderados en sistemas de acondicionamiento por año pero es la opción con mayor inversión inicial por lo que frente a otras alternativas que presentan consumos menores anuales e inversiones más económicas, como los ladrillos de suelo-cemento, no resulta rentable. La construcción con ladrillos de hormigón muestra altos costos en AA pero bajos en calefacción por lo que a lo largo de un año se equilibran, pero frente a otras opciones generan un alto costo anual. Dentro de los ladrillos de hormigón el mejor comportamiento se da en muros con revestimiento. Los ladrillos cerámicos representan el mayor costo anual, pero el costo del m² es un aceptable. Mientras que construyendo con HCCA se obtienen los menores gastos en acondicionamiento siendo un resultado lógico debido a que es un material específicamente creado para proveer altos valores de aislación y si bien el costo por m² es uno de los más altos, los beneficios que contrae el material equiparan el costo adicional. El suelo-cemento a pesar de ser un material de elaboración muy sencilla, presenta excelentes resultados en cuanto a consumo en AA y calefacción representando una de las soluciones más económicas. Además es la solución con menor costo por m² generando una ventaja importante en proyectos en donde el capital para invertir en construcción se encuentra limitado. Además,

vale la pena recordar el resultado obtenido en la sección anterior: de todas las soluciones presentadas la construcción con suelo-cemento produce los menores impactos en el medio ambiente.

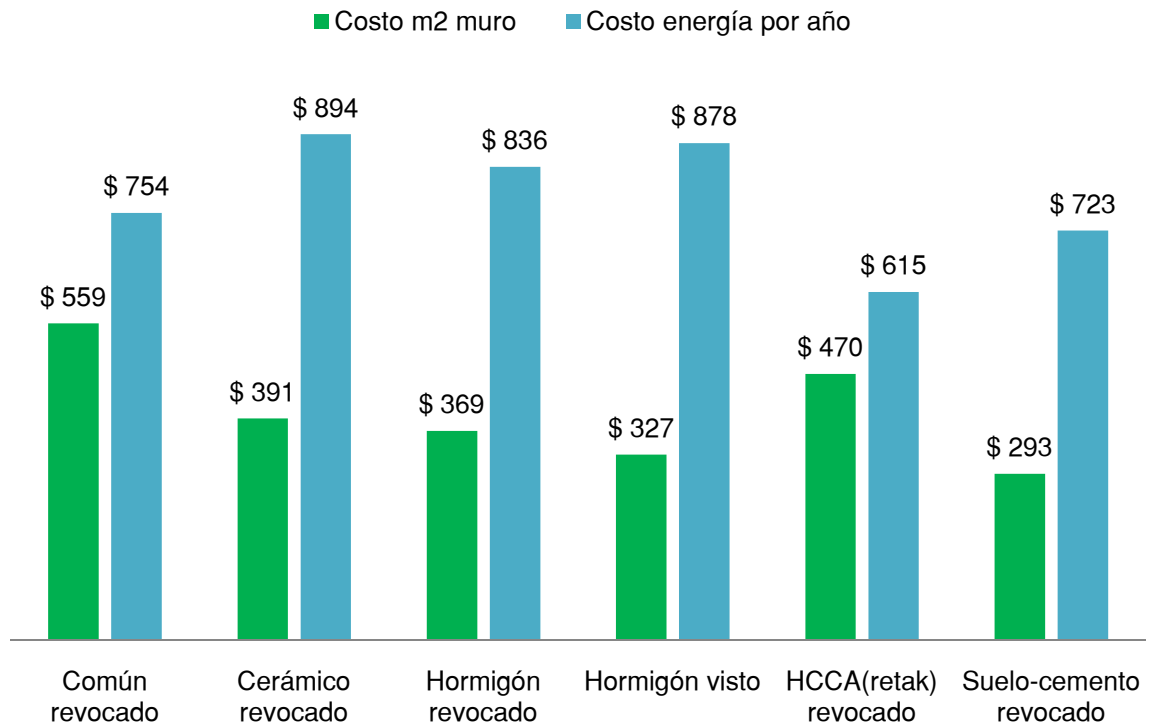


Figura 5. 9: Costos por m² de muro y costos por año en sistemas de refrigeración-calefacción

Continuando con el análisis de costos anuales, en la Figura 5. 10 se representaron los costos en sistemas de AA y calefacción acumulados por año partiendo desde una inversión inicial representada por el costo de los equipos de refrigeración-calefacción de cada alternativa.

La evaluación se realizó con un horizonte de 30 años y los costos de los equipos se obtuvieron de catálogos de la cadena de electrodomésticos Frévega en función de las capacidades determinadas por el balance térmico.

Los resultados obtenidos indican que construir con diferentes materiales condiciona no solo el gasto por año sino inversión del equipo que se va a colocar en la vivienda. Observándose que con materiales con mayores capacidades aislantes, como HCCA y suelo-cemento, se tienen menores costos en equipos generándose grandes ventajas económicas. Otro comportamiento observable es como se materializa la línea a lo largo de los años. Se puede analizar que la línea de ladrillos comunes representa una división entre las opciones con mejor y peor comportamiento. Como ya se mencionó, la construcción con ladrillos comunes presenta resultados aceptables pero es la inversión es más costosa y además tiene un alto impacto ambiental en su elaboración por lo que no se considera rentable. Por

encima de esta opción, se encuentran las opciones con mayores gastos: ladrillos de hormigón y cerámicos, presentando estos últimos el peor comportamiento térmico. Y por debajo se encuentran las opciones con mejor comportamiento: ladrillos de HCCA y de suelo-cemento.

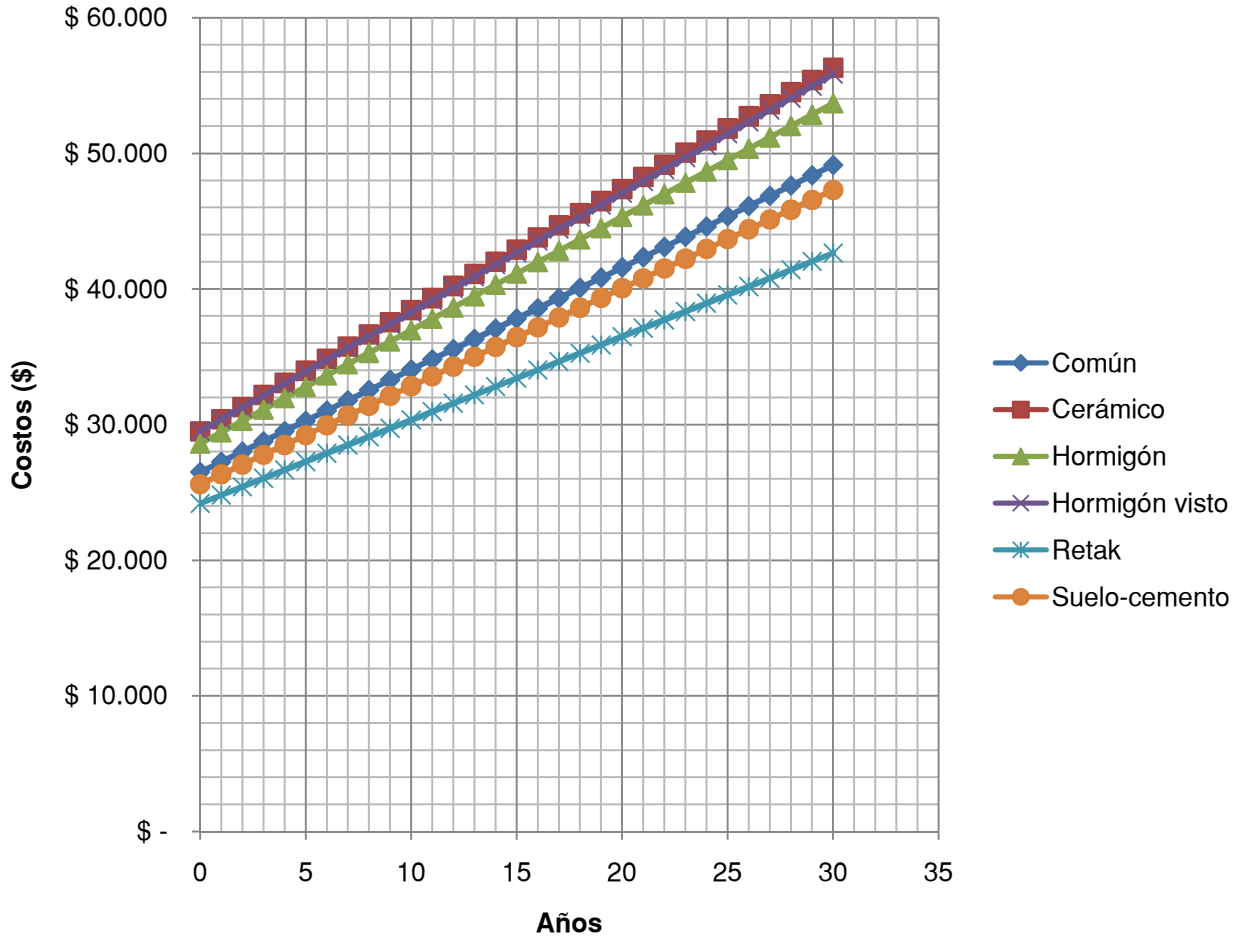


Figura 5. 10: Costos acumulados por año en sistemas de acondicionamiento térmico

Los resultados arrojan que el material más eficiente es el ladrillo de HCCA (retak), pero vale mencionar que esta solución es más costosa y además la fabricación del material es un proceso industrializado que genera impactos ambientales considerables y grandes consumos de energía.

Como el enfoque de este trabajo es demostrar las ventajas de construir con suelo-cemento; en la Figura 5. 11 se representaron los costos de inversión y los gastos anuales normalizados en función a la alternativa de suelo-cemento con un horizonte a 30 años. De esta manera las alternativas que estén por encima de la línea de suelo-cemento serán a largo plazo más costosas y menos eficientes mientras que las que estén por debajo demostrarán mejor comportamiento que los ladrillos de suelo-cemento.

Del análisis hecho surge que, exceptuando los ladrillos de HCCA, todas las alternativas se ven desfavorecidas frente a la solución con suelo-cemento ya que no sólo son más costosas, sino que generan mayor gasto a lo largo de la vida útil de la vivienda. En cuanto a los ladrillos de HCCA se demuestra que si bien tienen una mayor inversión inicial, esta se contrarresta rápidamente con el gasto anual en sistemas de acondicionamiento artificial por lo que se considera una solución altamente rentable.

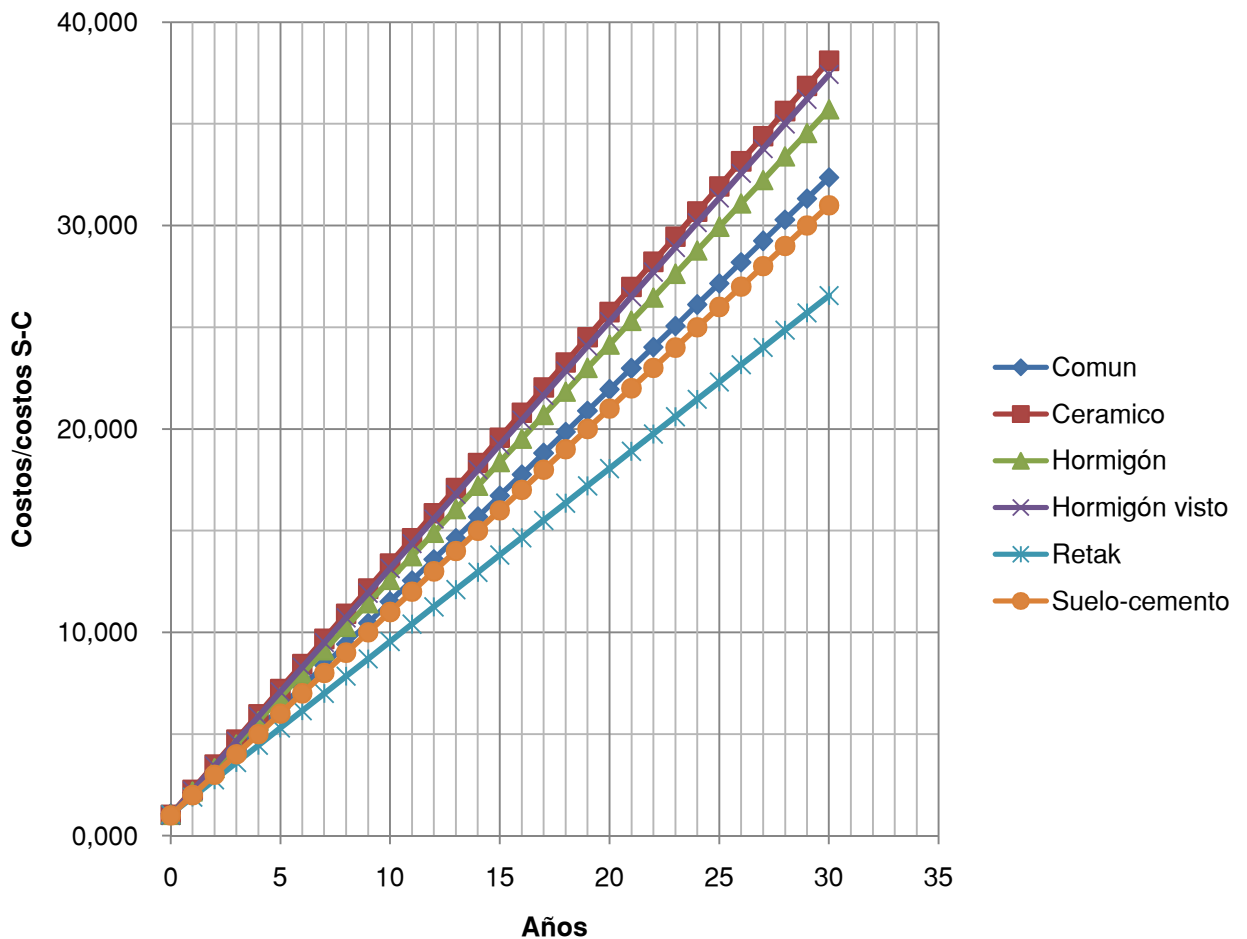


Figura 5. 11: Costos acumulados normalizados en función de la solución de suelo-cemento

A modo de cierre del capítulo, se destacan las principales deducciones:

- La construcción con ladrillos de arcilla comunes presenta un comportamiento aceptable en cuanto a eficiencia energética pero se ve desfavorecido frente a su alta inversión inicial. El consumo de energía de una vivienda construida con este material es neutro frente a las restantes alternativas, pero la producción del ladrillo genera un gran impacto ambiental. Por estas razones no se considera una solución eficiente.

- Los ladrillos cerámicos presentan un costo de inversión acorde con las restantes alternativas, pero dan malos resultados en cuanto ahorro en sistemas de calefacción-refrigeración. Tampoco se considera una alternativa amigable con el medio ambiente.
- Los bloques de hormigón, ya sean muros sin revestimiento o con, generan un consumo de energía aceptable, pero no son materiales con bajos impactos ambientales en su proceso de elaboración. También presentan un costo de inversión razonable pero no dan buenos resultados en cuanto al ahorro de energía. Los muros de hormigón visto tienen un buen comportamiento en invierno, pero en verano ocurre la situación inversa.
- Construir con ladrillos de HCCA o retakda los mejores resultados en ahorro económico ya que si bien tiene el mayor costo de inversión, representa los menores gastos anuales en sistemas de acondicionamiento térmico artificial viéndose amortiguado el costo adicional de inversión. Vale mencionar que el consumo de energía que generan es bajo, pero su proceso de elaboración se encuentra industrializado provocando altos impactos ambientales.
- Finalmente, los ladrillos de suelo-cemento representan la menor inversión inicial y un bajo costo anual en calefacción y aire acondicionado, levemente mayor al gasto anual generado por construcciones con retak. Además, dentro de las alternativas estudiadas, son materiales que en su proceso de elaboración generan bajos impactos ambientales. Se concluye que es una solución verde y económica.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

A modo de resumen, se pueden detallar las principales ventajas encontradas en este trabajo al utilizar ladrillos de suelo-cemento compactado como material de construcción:

- La materia prima principal es suelo: material natural, abundante, económico, no contaminante, fácilmente extraíble y al alcance de todos.
- El uso de prensas manuales como técnica de fabricación, no sólo requiere menor energía de fabricación que otros materiales, sino que reduce de manera considerable el impacto ambiental evitando la emisión de gases productos de la combustión; considerándose un material de producción sustentable con el medio ambiente, aspecto estudiado y verificado en este trabajo.
- El proceso de elaboración admite fabricar tanto mampuestos huecos como macizos, variando sus dimensiones según las necesidades del proyecto.
- En cuanto a los costos de construcción, se pueden destacar 3 puntos: 1- los ladrillos pueden fabricarse a pie de obra eliminando el gasto en transporte de materiales; 2- Presentan un sistema de levantamiento simplificado ahorrando en mortero de asiento y en el costo de mano de obra; 3- el costo de material es considerablemente menor en relación con otros mampuestos. Estos 3 aspectos generan un costo por m² mucho menor en relación con otros materiales.
- Presentan buena aislación térmica, adaptándose a los lineamientos dados por las normativas IRAM. Admitiendo ahorros, comprobados en este trabajo, en sistemas de calefacción y refrigeración.

Por otro lado, la alternativa de construcción en ladrillos de HCCA (retak) dio los mejores resultados en cuanto ahorro energético y si bien presentó uno de los mayores costos por m² de construcción, se comprobó que dicho gasto adicional garantiza menores costos anuales en acondicionamiento durante la vida útil viéndose amortizado el alto precio inicial. Por lo tanto, se considera una solución altamente rentable. Esta solución se puede ver desfavorecida frente a la construcción con suelo-cemento en casos en donde el capital para invertir sea bajo y este limitado. Además se concluyó que en cuanto a eficiencia ambiental estos ladrillos generan grandes ahorros en consumos de energía durante el uso de una vivienda, pero su producción al encontrarse industrializada genera grandes impactos ambientales.

En cuanto a las restantes alternativas estudiadas se dedujo que no presentan resultados competitivos frente al retak o los ladrillos de suelo-cemento en ninguno de los 3 aspectos generales analizados: ahorro en usos de sistemas de acondicionamiento, economía en la construcción e impactos ambientales.

Finalmente, se puede afirmar que la construcción de viviendas con ladrillos de suelo-cemento compactado, además de ser una solución sustentable y económica, brinda excelentes resultados en cuanto a ahorro en sistemas artificiales de acondicionamiento interno. De todos modos, se requieren de estudios adicionales para verificar las demás exigencias para el ladrillo de acuerdo a las normas vigentes (e.g. durabilidad, resistencia mecánica, etc.).

CAPÍTULO 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Begliardo Hugo, Sánchez Mirta, Panigatti M. Cecilia, Casenave Silvia, Fornero Gerardo (2008); “Ladrillos de suelo-cemento elaborados con suelos superficiales y barras de excavación para pilotes”.

Caffaro G.; CruzM.P. (2012); “Caracterización geotérmica de ecomuros de suelo-cemento”. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2012 CAMSIG XXI, Rosario, Santa Fe, Argentina,

Erazo Andrade Rodrigo Manuel (2007); “Variación de la conductividad térmica con la humedad en materiales de construcción”. Tesis de grado. Facultad de Cs. Físicas y matemáticas. Universidad de Chile.

Gregorio Atem Camila (2012); “La influencia de distintos muros exteriores en el confort térmico de vivienda en un clima subtropical húmedo”. Tesis de Master. Universitat Politècnica de Catalunya. Brasil.

Gatani, Mariana P. (2000); “Ladrillos de suelo-cemento: mampuesto tradicional en base a un material sostenible. Madrid: Editorial Ecu.

Gonzalo G, Ledesma S, Nota V, Martinez C, Cisterna S, Quiñónez G, Márquez G, Tortonese A, Garay A. (2000); “Determinación y análisis de los requerimientos energéticos para el acondicionamiento térmico de un prototipo de vivienda ubicada en San Miguel de Tucumán”. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 4. ISSN 0329-5184. Ed. Milor. Salta, Argentina.

Gálvez HuertaM. A. (2012); “Instalaciones y Servicios Técnicos”. Publicación de la Sección de Instalaciones de edificios, UPM.

Incropera Frank P.; DeWitt David P. (1999); “Fundamentos de la transferencia de calor”. 4ta Edición. Editorial: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

Klees Delia R., Natalini Mario B. (1999); “Fabricación de Componentes Modulares para la Construcción de Viviendas de Bajo Costo Utilizando Suelo-

Cemento”. COMUNICACIONES CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS - Corrientes, Arg. Vol 7. Pag. 4.

Lou Ma Roberto (1981); “Manual para la construcción de la CETARAM” CICON Centro de Investigaciones de Ingeniería

Laguna María Cabo (2011); “Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción” Trabajo de grado (Ingeniero Técnico Agrícola en Explotaciones Agropecuarias). Navarra. Universidad Pública de Navarra. 121 p.

Mas Jorge Marcelo, Kirschbaum Carlos Federico (2012); “Estudios de resistencia a la compresión en bloques de suelo-cemento”. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 16, 2012. Impreso en la Argentina.

Mas Jorge Marcelo, Kirschbaum Carlos Federico, Tonello Graciera Lucía (2011); “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 2010/11 (pp. 351-366). Cátedra Juan de Villanueva.

Norma ASTM D5334 (2007): Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure

Norma IRAM 11601(2004): Aislamiento térmico de edificios. Método de cálculo.

Norma IRAM 11603(1996): Acondicionamiento Térmico de edificios. Clasificación Bioambiental de la República Argentina.

Norma IRAM 11605(1996): Acondicionamiento Térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos admisibles de transmitancia térmica en cerramiento opacos.

Página web: <http://www.colegio-arquitectos.com.ar>. Tablas de precios unitarios de construcción de materiales y mano de obra. Actualización Abril 2015.

Página web: <http://ladrillosecomodulares.com>. Descripción del sistema modular de levantamiento de muros de mampuestos de suelo-cemento.

Patrone Juan Carlos, Evans Jonh Martin (2006); “Evaluación térmica de una vivienda de suelo-cemento en Florencio Varela”. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 10.

Roseto Omar (1996); “Bloques con Mezclas Hipercomprimidas de Suelo-Cemento" Revista Cemento. Año 2. Vol. 7. Instituto del Cemento Portland Argentino

Toirac Corral José (2008); “El suelo-cemento como material de construcción”.Ciencia y Sociedad, vol. XXXIII, núm. 4, octubre-diciembre, 2008, pp. 520-571, Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana.

Vera Sergio, Ordenes Martín (2002); “Evaluación del desempeño enero-térmico de una vivienda social en Chile utilizando un programa de simulación energética de edificios”Revista Ingeniería De Construcción. Volumen 17 N°3 Páginas 133-142.