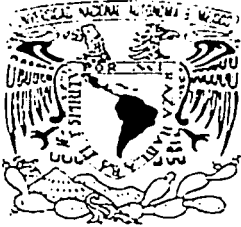


01127
5



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“ESTUDIO COMPARATIVO DE UN SISTEMA
DE CONCRETO CELULAR Y AISLANTES
TÉRMICOS EN EDIFICACIONES”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A :

HIRAM FRANCISCO CÁCERES LUCERO



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MÉXICO, D.F.

2003

I



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



GRACIAS: A mi madre, la Señora Maria Luisa. A mis ángeles de la guarda:
la Señora Yolanda Martínez y la Señora Silvia. Y finalmente a
DIOS.

A LA QUERIDA MEMORIA DE:

Elizabeth Montgomery (15/4/1933 – 18/5/1995)

y

George Sheehan (5/11/1918 – 1/11/1993)

Por reconstruirme, por sostenerme...

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

	Página.
1. Introducción	1
2. Los aislantes térmicos y el sistema constructivo basado en el concreto celular	3
2.1 El sistema constructivo basado en el concreto celular	3
2.1.1 Antecedentes	3
2.1.2 Proceso de producción	3
2.2 Aislantes térmicos y sus características	4
2.2.1 Acabados (impermeabilizante)	5
2.3 El estudio experimental comparativo de aislamiento térmico	6
2.4 Propiedades térmicas	7
2.4.1 Capacitancia térmica	7
2.4.2 Conductividad y resistencia térmica "R"	8
2.4.3 La difusividad térmica (a)	8
2.4.4 Propiedades térmicas de los materiales empleados en el estudio experimental comparativo de aislamiento térmico	9
3. Estudio experimental y resultados	10
3.1 El estudio experimental comparativo de aislamiento térmico	10
3.2 Resultados del estudio experimental comparativo de aislamiento térmico	18
3.2.1 El resumen de los resultados obtenidos en el estudio experimental comparativo de aislamiento térmico (gráficas de comportamiento promedio)	22
4. Análisis de resultados térmicos y ahorro de energía	31
4.1 El análisis de resultados térmicos	31
4.1.1 Enunciado de Clausius de la segunda ley de la termodinámica	31
4.1.2 El estudio correlacional de los resultados experimentales	32
4.1.3 Definición de las variables	32
4.1.4 Grado de correlación deseable entre T* y consumo*	33
4.1.5 Definición de recubrimientos	34

4.1.6 Estudio correlacional de las variables T^* y consumo* para módulo tradicional	34
4.1.7 Gráfica (T^* contra consumo*) para módulo tradicional	35
4.1.8 Conclusión del estudio correlacional T^* contra consumo* (para recubrimientos aplicados sobre la losa del techo del módulo tradicional)	36
4.1.9 Estudio correlacional de las variables T^* y consumo* para módulo celular	42
4.1.10 Gráfica (T^* contra consumo*) para módulo celular	43
4.1.11 Conclusión del estudio correlacional T^* contra consumo* (para recubrimientos aplicados sobre la losa del techo del módulo celular)	44
4.2 Ahorro de energía	45
5. Propuesta de criterios térmicos (resistencia y capacitancia térmicas)	49
5.1 Definición de criterio térmico (resistencia y capacitancia térmicas)	49
5.2 El circuito eléctrico	49
5.3 Analogías eléctricas y térmicas	51
5.3.1 Análogo de la intensidad de corriente y de la carga eléctrica	52
5.3.2 Análogo del producto de la resistencia por la capacitancia eléctrica (RC)	53
5.3.3 Análogo térmico de $\exp(-t/RC)$	54
5.3.4 El tiempo característico (t_c)	55
5.4 El producto de la resistencia y la capacitancia térmicas y el número de Fourier	57
5.5 Energía transferida a través de una pared	57
5.5.1 Análisis de la ecuación 5.23B	59
5.6 Ecuaciones $Q(t)$	60
5.7 Las gráficas de Q contra t	61
5.8 El criterio resistencia y capacitancia térmicas	65
5.9 Reducción de energía transferida (concreto celular y concreto tradicional)	69
6. Conclusiones y recomendaciones	70
Agradecimientos	74
Bibliografía	75

Capítulo No. 1

INTRODUCCIÓN

Los equipos de aire acondicionado se utilizan ampliamente en naves industriales, oficinas empresariales y de gobierno, bancos, fábricas, casas habitación, hoteles, cinemas... En algunos de estos lugares el uso de unidades de aire acondicionado es considerado un símbolo de bienestar y capacidad económica, un lujo de gente rica. En lugares como la ciudad de Monterrey, Nuevo León, en donde la temperatura puede llegar hasta los 45 [°C] en verano, el uso de estos equipos es una necesidad.

La necesidad de usar equipos de aire acondicionado proporciona una amplia oportunidad de desarrollo a industrias relacionadas con estos equipos, como son las compañías que los fabrican, instalan y les dan mantenimiento.

Existen industrias que parecieran contrarias a la industria del aire acondicionado, como la industria de los materiales termoaislantes de construcción, pero, que preocupadas por dar un mejor servicio a sus clientes, se han propuesto estudiar las propiedades térmicas de los materiales termoaislantes de construcción que fabrican, con el objetivo de identificar las propiedades que disminuyen en mayor medida la ganancia de calor de las edificaciones construidas con dichos materiales. En los últimos años se han estudiado las propiedades térmicas del concreto celular y el impacto de las mismas sobre el consumo de energía de las unidades de aire acondicionado que se encuentran en el interior de habitaciones construidas con el material antes mencionado. Los estudios citados anteriormente han sido realizados por CTL (Construction Technology Laboratories) en los Estados Unidos de América, por el Instituto Fraunhofer para Física de la Arquitectura (en Alemania) y por una empresa dedicada a la fabricación de concreto celular que tiene su planta instalada en Monterrey, Nuevo León¹. Esta última desarrolló una investigación que denominó:

¹ El nombre de la empresa se menciona en los agradecimientos que aparecen expresados al final del capítulo No.6.

"Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico", en el verano de 1998.

Esta tesis presenta el desarrollo y resultados obtenidos por el estudio comparativo antes citado, profundiza en su análisis, explica porqué y en qué condiciones ocurre el fenómeno de transferencia de calor observado y presenta propuestas en torno a la utilización de los siguientes materiales: concreto celular, concreto tradicional y aislantes térmicos (poliestireno y poliuretano), para reducir la ganancia de calor de una habitación.

El autor de esta tesis no tomó parte en los experimentos realizados en 1998, solo analizó los resultados del experimento a través de un estudio correlacional de datos experimentales (ver capítulo No. 4) y desarrolló un modelo matemático, por medio del uso de las analogías eléctricas y térmicas, para explicar el fenómeno de transferencia de calor observado (ver capítulo No. 5).

Capítulo No. 2

LOS AISLANTES TÉRMICOS Y EL SISTEMA CONSTRUCTIVO BASADO EN EL CONCRETO CELULAR

2.1 EL SISTEMA CONSTRUCTIVO BASADO EN EL CONCRETO CELULAR

2.1.1 ANTECEDENTES

En 1943 Josef Hebel, previniendo las consecuencias de la reconstrucción de Alemania por la 2ª Guerra Mundial, se convenció de la necesidad de un nuevo material constructivo que combinase las mejores características de los materiales existentes, comenzó a producir concreto celular en una fábrica cercana a Munich, Alemania. Las ventajas de este material ligero y a la vez resistente pronto fueron reconocidas por la industria de la construcción y su uso se fue generalizando en todo tipo de edificación.

2.1.2 PROCESO DE PRODUCCIÓN

El concreto celular se elabora a partir de cuatro materias primas: arena, cal, cemento, yeso y agua combinada con un agente expansor. En la figura 2.1 se puede observar que el proceso de producción del concreto celular inicia cuando la arena se muele al tamaño de grano requerido por un molino de bolas. Posteriormente, la arena y el yeso molidos se mezclan con la cal y el cemento que son almacenados en silos, con agua y un agente expansor. Estas materias primas son dosificadas automáticamente por peso. La mezcla se vacía en moldes metálicos en los cuales el agente expansor reacciona con los otros elementos. El agente mencionado se expande en la mezcla formando millones de burbujas o celdas de aire independiente uniformemente distribuidas en la masa. En este punto, el producto pasa a un proceso de precurado (este último es un proceso previo al paso del producto de una condición plástica a un producto endurecido) por varias horas y después se transporta a la cortadora de hilos. El proceso de corte se realiza mediante hilos metálicos

cortándose de la pieza inicial los elementos de construcción a las dimensiones requeridas. La consistencia del producto y la tecnología de corte dan como resultado piezas con tolerancias dimensionales de ± 1.5 mm. La fase final del proceso de producción consiste en el curado del material, el cual se lleva a cabo en autoclaves a condiciones controladas de temperatura, humedad y presión. Tras 12 horas de curado, los elementos reciben un empaque y se transportan al almacén de producto terminado.

PROCESO DE PRODUCCION (PRODUCTO NO REFORZADO)

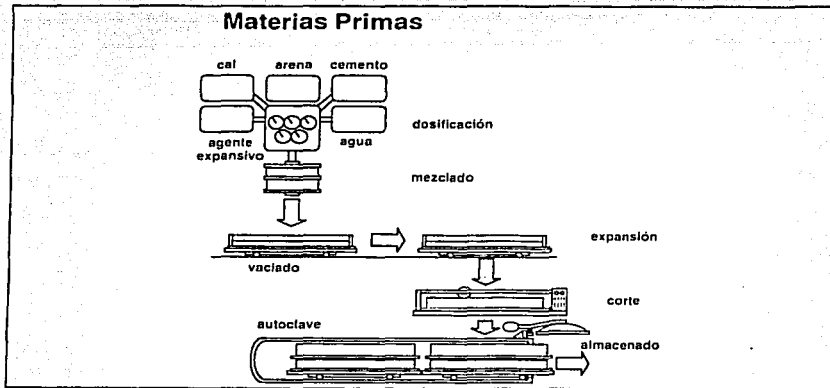


Figura 2.1

2.2 AISLANTES TÉRMICOS Y SUS CARACTERÍSTICAS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En general, las personas se sienten más cómodas si el aire dentro de un edificio se mantiene dentro de un intervalo limitado de temperaturas y de humedades relativas. El aire acondicionado y los aislantes térmicos son medios para lograr este fin. Teniendo esto en cuenta a continuación se estudiarán algunas características de los aislantes térmicos, los usos propuestos y su relación con el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico.

- Poliuretano (PUR)

El poliuretano es un polímero que se caracteriza por poseer el grupo uretano (NHCOO) en su estructura. A causa de las variaciones en la composición química y el procesamiento, los poliuretanos pueden ser termoplásticos (polímeros que se vuelven suaves y deformables al calentarlos), termofijos (polímeros rígidos y frágiles que se degradan a elevadas temperaturas), o elastómeros (polímeros con características elásticas).

La mayor aplicación de los poliuretanos son las espumas. Estas abarcan un rango entre comportamiento elastomérico y rígido. Las espumas rígidas se usan como materiales de relleno en los tableros de las construcciones y en las paredes de los refrigeradores. En este tipo de aplicaciones, el material brinda un excelente aislamiento térmico.

- Poliestireno (PS)

Es un polímero termoplástico basado en el monómero de estireno. El PS es transparente, fácilmente coloreable y moldeable, pero se degrada a temperaturas elevadas y se disuelve en varios solventes, es notable por su fragilidad. El poliestireno se utiliza en empaques bajo la forma de espumas de poliestireno.

El nombre de poliestireno expandido es un término genérico que comprende al poliestireno en sí, y a copolímeros del estireno suministrados en un sólo compuesto que contiene agentes expansores y otros aditivos.

El mayor mercado para el poliestireno expandido es como elemento de aislamiento térmico en la industria de la construcción.

2.2.1 ACABADOS (Impermeabilizante)

Con el objeto de preservar del deterioro a los materiales que se utilizan como aislantes térmicos y mejorar su apariencia estos se recubren con impermeabilizantes.

La loza de la azotea o la capa de aislante térmico que se coloca sobre ella reciben acabado recubriéndolas con impermeabilizante colocado en frío.

El color de la capa de impermeabilizante puede favorecer o no a una mayor ganancia de energía radiante proveniente del sol. La absorptividad solar (fracción de energía radiante que se absorbe) de la pintura varía de acuerdo con su color, siendo mayor para los colores oscuros y menor para los colores claros. En el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico no será motivo de estudio la absorptividad de la capa de impermeabilizante, sólo se señalará que cuando el impermeabilizante es de color negro las condiciones serán extremas por el motivo antes mencionado.

2.3 EL ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE AISLAMIENTO TÉRMICO

En el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico se observa el efecto, sobre el consumo de energía de un equipo de aire acondicionado que controla la temperatura interior de una habitación, de las propiedades térmicas del concreto celular en contraste con la de los materiales constructivos tradicionales, para ello fue construida una habitación piloto edificada con concreto celular y una habitación idéntica construida con los materiales tradicionales (losa construida de concreto reforzado y muros de tabique ligero [el tabique ligero es un elemento de construcción fabricado con cemento, arena, tepetate y agua]). La ganancia de calor de la habitación edificada con los materiales constructivos tradicionales (módulo tradicional), se restringe instalando sobre su techo los siguientes materiales: capa de poliuretano de 1" de espesor, capa de poliestireno de 2" de espesor y placa térmica² de 5 y 10 cm de espesor. La ganancia de calor de la

² La placa térmica es un panel elaborado con base en el concreto celular aereado y curado en autoclave. La capacidad de la placa térmica en disminuir la ganancia de calor de una habitación radica en su elevada capacitancia térmica. No es considerado un aislante térmico porque su conductividad térmica es mucho mayor que la de los materiales comúnmente considerados como aislantes térmicos.

habitación edificada con concreto celular (módulo celular), se restringe instalando sobre su techo los mismos materiales aplicados sobre el techo del módulo tradicional, con excepción de la capa de poliestireno de 2" de espesor.

2.4 PROPIEDADES TÉRMICAS

Las propiedades térmicas que determinan el flujo de calor transferido por un material se muestran a continuación.

2.4.1 CAPACITANCIA TÉRMICA

La capacitancia térmica de un material se define como el producto de la masa del material por su calor específico.

$$\text{Entonces,} \quad C = c \cdot m \quad (2.1)$$

Donde: C: Capacitancia térmica del material [J/K]

c: Calor específico del material [J/kg K]

m: Masa del material [kg]

A partir de esta definición, se ve que si al agregar Q unidades de calor a un material le produce un cambio de una temperatura inicial a una temperatura final.

$$\text{Entonces,} \quad Q = C (T_f - T_i) \quad (2.2)$$

Donde: Q: Unidades de calor que se agregan al material [J]

C: Capacitancia térmica del material [J/K]

T_i: Temperatura inicial del material [K]

T_f: Temperatura final del material [K]

Luego, la capacitancia térmica determina la cantidad de energía calorífica que un material cede o absorbe al variar su temperatura.

2.4.2 CONDUCTIVIDAD Y RESISTENCIA TÉRMICA "R"

La temperatura interior en una construcción depende de manera importante de la cantidad de calor que transmiten los elementos muros y losas que los componen. El gradiente de temperatura interior en un elemento de una construcción se obtiene dividiendo la diferencia de temperaturas entre las caras exterior y la cara interior entre el espesor del elemento. La cantidad de calor que transmite el elemento es igual al producto del gradiente de temperaturas y la conductividad térmica.

$$\text{Luego,} \quad q = k (T_e - T_i) / e \quad (2.3)$$

Donde: q: Flujo de calor que transfiere el elemento de construcción [W/m²]

k: Conductividad térmica [W/ m K]

e: Espesor del elemento de construcción [m]

T_e: Temperatura exterior [K]

T_i: Temperatura Interior [K]

Entre menor sea el valor de la conductividad térmica k, menor será la cantidad de calor que transmite el elemento, y mayor será su poder de aislamiento térmico. La resistencia térmica o valor R de un elemento se define como el cociente del espesor del elemento entre la conductividad térmica del material.

$$\text{Entonces,} \quad R = e / k \quad (2.4)$$

Donde: R: Valor R del material (resistencia térmica) [m² K/W]

k: Conductividad térmica [W/ m K]

e: Espesor del elemento de construcción [m]

2.4.3 LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α)

La difusividad térmica (α) es una propiedad termofísica de los materiales, la cual determina la velocidad de la variación de la temperatura en un punto de un material sólido. Cuanto mayor es α , mayor es la velocidad con la que cambia la

temperatura del sólido. La difusividad térmica se define como el cociente de la conductividad térmica y el calor específico por unidad de volumen:

$$\alpha = k / (c \rho) \quad (2.5)$$

Donde:

α : Difusividad térmica [m^2/s]

k: Conductividad térmica [$W/m K$]

c: Calor específico [$J/kg K$]

ρ : Densidad [kg/m^3]

2.4.4 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE AISLAMIENTO TÉRMICO

Las propiedades térmicas de los materiales empleados en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico aparecen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Espesor, densidad (ρ), calor específico (c), resistencia (R), capacitancia (C), difusividad (α) y conductividad térmica (k) de aislantes térmicos y materiales de construcción						
Material y espesor.	ρ [kg/m^3]	c [$J/kg K$]	R [$m^2 K/W$]	C [kJ/K]	α [m^2/s]	k [$W/m K$]
Poliuretano 0.0254 [m]	28	1045	1.257	13.4	6.904×10^{-07}	0.0202
Poliestireno 0.0508 [m]	16	1210	1.303	17.7	2.014×10^{-06}	0.039
Concreto Tradicional 0.1 [m]	2400	837.2	0.069	3,616.7	7.167×10^{-07}	1.44
Concreto celular 0.1 [m]	650	1000	0.526	1,170	2.923×10^{-07}	0.19
Placa térmica 0.05 [m]	450	1000	0.417	405	2.667×10^{-07}	0.12
Placa térmica 0.1 [m]	450	1000	0.833	810	2.667×10^{-07}	0.12

Recopilada de: MANUAL TÉCNICO, 2ª edición, Por CONTEC MEXICANA, México 1997. Groover Mikell P, Fundamentos de Manufactura Moderna (Materiales, Procesos y Sistemas), Prentice Hall, México 1997. Silva Lourdes y Granados Héctor, Empleo de aislamientos térmicos en techos de casa habitación en climas cálidos para el ahorro de energía en los equipos de aire acondicionado.

Capítulo No. 3

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

3.1 EL ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE AISLAMIENTO TÉRMICO

1.- ¿Qué observación da origen al Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico ?

Ciertos habitantes de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, que tienen una vivienda construida con concreto celular, señalan que pagan menores tarifas de energía eléctrica a la CFE por concepto de aire acondicionado, que sus vecinos que cuentan con viviendas similares construidas con los materiales tradicionales de construcción.

2.- ¿De ser cierta la observación anterior a que podría deberse?

Parte muy importante de la experimentación científica es formular una hipótesis (suposición provisional basada en el conocimiento, los antecedentes y la experiencia) para dar explicación al fenómeno observado.

HIPÓTESIS. El valor R de los techos y muros de cualquier tipo de edificación y la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior determinan el flujo de calor que ingresa o emana de la misma. Para una edificación fabricada con concreto celular, parte del flujo de calor que ingresa es absorbido por dicho material, debido a su alta capacitancia térmica, la otra parte la absorbe el aire interior de la edificación. Si el mismo flujo de calor ingresa a una edificación hecha con los materiales tradicionales con R baja, solo una minúscula parte del flujo podría ser absorbida por los muros, debido a su menor capacitancia térmica, dando lugar a una mayor ganancia de calor del aire interior de una edificación tradicional que la de una edificada con concreto celular. Esto se refleja en las cuotas pagadas por el uso del aire

acondicionado, a pesar de que ambas edificaciones tengan el mismo valor R (en techos y muros) y la misma diferencia de temperaturas (del aire) entre el interior y el exterior. La carga de calor ganado por el aire dentro de la edificación tendrá que ser removida por el uso de equipos de aire acondicionado, en caso de no tener estos equipos el calor absorbido por el concreto celular se transmitirá finalmente al interior de la edificación sin beneficio alguno.

3.- ¿Cuál es el método para averiguar la veracidad o falsedad de la observación e hipótesis anteriormente enunciadas?

Por medio de un experimento, el cual se define como un esfuerzo planificado que responde a una o varias preguntas haciendo que un fenómeno físico ocurra en condiciones controladas. El experimento se diseña de modo de que se aporten pruebas suficientes para corroborar o contradecir la observación efectuada y en caso de resultar cierta la observación, se aporten pruebas suficientes para confirmar o desmentir la hipótesis propuesta.

Parte muy importante de la experimentación científica es el diseño del experimento. El diseño del experimento es una consecuencia lógica de la observación y de la hipótesis enunciada, con base en ellas el experimentador determina las características de los sujetos de experimentación, de control (ver siguiente pregunta) y los procedimientos experimentales que ha de aplicarles con el fin de: 1) someter a verificación la observación y 2) probar la hipótesis enunciada.

En el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico, el diseño del experimento tiene dos objetivos fundamentales:

1. Verificar la autenticidad de la observación realizada por algunos habitantes de Monterrey, Nuevo León.

Si la observación resulta cierta se perseguirá el objetivo que a continuación se menciona, el cual está íntimamente ligado a la hipótesis enunciada:

2. Investigar las causas del desempeño (ahorro de energía) de una habitación construida con concreto celular contra una habitación idéntica edificada con los materiales tradicionales de construcción.

4.- ¿ Qué son los sujetos de experimentación y los sujetos de control?

Un sujeto es aquello cuyo comportamiento y reacciones se observan en un experimento. En un experimento existen dos clases de sujetos: sujetos de experimentación y sujetos de control, ambos tipos de sujetos son iguales en todas sus características (conocidas con el nombre de variables independientes). Típicamente el experimentador manipula una de esas variables independientes en los sujetos de experimentación, al someter a los mismos procedimientos experimentales a los sujetos de experimentación y control, las diferencias en sus comportamientos (conocidas por el nombre de variables dependientes) son atribuidas a la manipulación de la variable independiente.

En el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico, el sujeto de experimentación es una habitación hecha con concreto celular aereado y curado en autoclave (módulo celular), el sujeto de control es una "habitación idéntica" construida con los materiales tradicionales de construcción (módulo tradicional). La variable independiente implica el uso del concreto celular en los sujetos de experimentación en lugar de los materiales tradicionales de construcción y la variable dependiente más importante es el consumo de energía del equipo de aire acondicionado. Entiéndase el término "habitación idéntica" estrictamente en el sentido de que los módulos son iguales, como dos gotas de agua, pero solo en el sentido arquitectónico (forma, orientación y dimensiones) sin que esto implique que el material o el valor R de los techos de los módulos es el mismo.

Existe otro factor por considerar: la cuestión del muestreo. El experimento no prueba a todas las habitaciones construidas con concreto celular, ni a todas las habitaciones construidas con los materiales de construcción tradicionales. La estadística indica que para poder hacer afirmaciones referentes a la población con base en la muestra, la muestra ha de ser lo más grande posible. La única manera de estar razonablemente seguros de que los resultados son representativos es someter a prueba a tantos sujetos de experimentación y control como sea posible, entre más sujetos tenga la muestra, tanto más segura será la conclusión.

Realizar un experimento con un gran número de sujetos por lo general implica un alto costo monetario, la empresa que realizó el experimento no dispone de recursos económico suficientes para la investigación, sólo los necesarios para edificar un módulo experimental, otro módulo de control y realizar el monitoreo de ambas. El experimento deberá de repetirse al día siguiente para poder obtener una muestra de mayor tamaño, ante la absoluta imposibilidad de que las condiciones meteorológicas se repitan de un día a otro, el muestreo deberá realizarse con condiciones cambiantes de temperatura exterior. Esto introduce otra variable independiente: la temperatura exterior, por lo que se requiere el análisis dimensional para poder sortear la dificultad que entraña la existencia de dos variables independientes.

El análisis dimensional es un método que permite reducir el número y la complejidad de las variables que intervienen en la descripción de un fenómeno físico, con ayuda de una serie de técnicas. El análisis dimensional es útil en estudios teóricos, en planificación de experimentos y cuando se requiere presentar resultados de forma compacta, se aborda este tema más a fondo en el capítulo No. 5.

5.- ¿Qué partes integran a un módulo Celular y a un módulo Tradicional?

Las partes que integran a un módulo celular y a un módulo tradicional se ilustran en la figura 3.1 y 3.2.

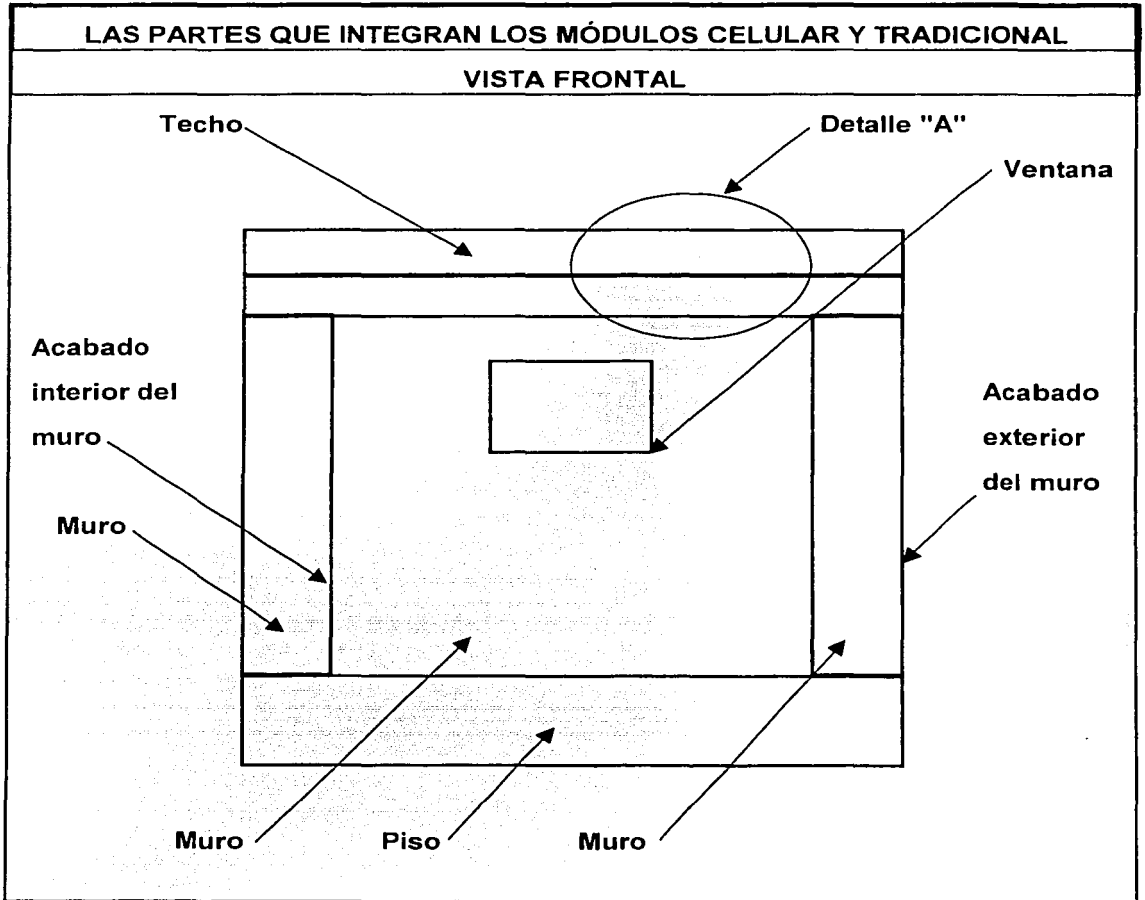


Figura 3.1

El detalle "A" se muestra amplificado en la figura 3.2.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

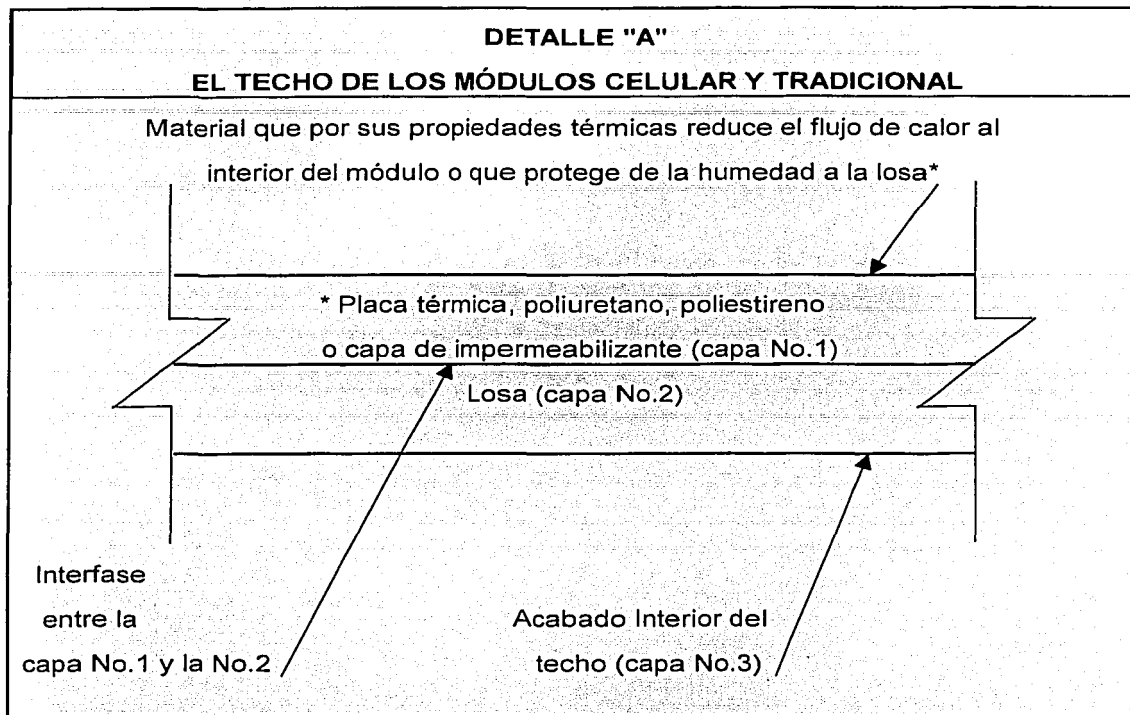


Figura 3.2

Los materiales utilizados en la construcción de las partes que aparecen en las figuras 3.1 y 3.2 para los módulos celular y tradicional se especifican a continuación: El módulo celular posee muros y losa de concreto celular, piso de concreto reforzado, ventana con panel de vidrio de sosa-cal sin sombreado. El acabado exterior de los muros es un sellador hidrofugante pintado con pintura vinil-acrílica color marfil. Los muros y techo no tienen acabado interior.

El módulo tradicional posee muros de tabique ligero, (el tabique ligero es un elemento de construcción elaborado con cemento, arena, tepetate y agua), losa y piso de concreto reforzado, ventana con panel de vidrio de sosa-cal sin sombreado. El acabado exterior de los muros es un sellador hidrofugante pintado con pintura vinil-acrílica color marfil. Los muros y techo no tienen acabado interior.

Con el objetivo de facilitar la realización de los procedimientos experimentales

(ver siguiente pregunta) y la presentación de resultados que ellos arrojen, el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico se desarrolló en varias etapas³, las cuales se describen a continuación. Lo anterior con base en la descripción del material instalado sobre la losa del techo para reducir el flujo de calor al interior de los módulos tradicional y celular, con acabados que brindan protección contra la humedad. [el material citado anteriormente fue representado en la figura 3.2 (detalle "A") y en ella se le identificó con el nombre de "capa No.1"].

Etapas 01A: Aplicar pintura elastomérica color negro (impermeabilizante), aplicada en frío, sobre la losa de los módulos tradicional y celular .

Etapas 03: Aplicar pintura elastomérica color blanco (impermeabilizante), aplicada en frío, sobre la losa de los módulos tradicional y celular .

Etapas 05: Instalar una placa térmica de 5 cm de espesor, impermeabilizada con pintura elastomérica color blanco, sobre la losa de los módulos tradicional y celular.

Etapas 07: Instalar una placa térmica de 10 cm de espesor, impermeabilizada con pintura elastomérica color blanco, sobre la losa de los módulos tradicional y celular.

Etapas 15: Instalar una capa de Poliuretano, con espesor de 1" y densidad de 28 kg/m³ impermeabilizada con pintura elastomérica color blanco, sobre la losa de los módulos tradicional y celular.

Etapas 16: Instalar una capa de Poliuretano, con espesor de 1" y densidad de 28 kg/m³ impermeabilizada con pintura elastomérica color blanco, sobre la losa del módulo tradicional. La losa del módulo celular, sin capa de poliuretano de 1", solo se le protege de la humedad con pintura elastomérica blanca (impermeabilizante) aplicada en frío.

Etapas 17: Instalar una placa térmica de 5 cm de espesor, impermeabilizada con pintura elastomérica color blanco, sobre la losa del módulo tradicional. La losa del módulo celular, sin placa adicional de 5 cm de espesor, solo se le protege de la humedad con pintura elastomérica blanca (impermeabilizante) aplicada en frío.

³ El que la numeración de las etapas sea discontinua obedece a que las etapas que se omiten no son motivo de estudio de esta tesis (etapas que prescinden del uso de aire acondicionado).

Etapa 18: Instalar una capa de poliestireno, con espesor de 2" y densidad de 16 kg/m^3 impermeabilizada en frío con pintura elastomérica color blanco, sobre la losa del módulo tradicional. La losa del módulo celular, sin capa de poliestireno de 2", solo se le protege de la humedad con pintura elastomérica blanca (impermeabilizante) aplicada en frío.

Los módulos (tradicional y celular) poseen las dimensiones ilustradas en el croquis de la figura 3.3.

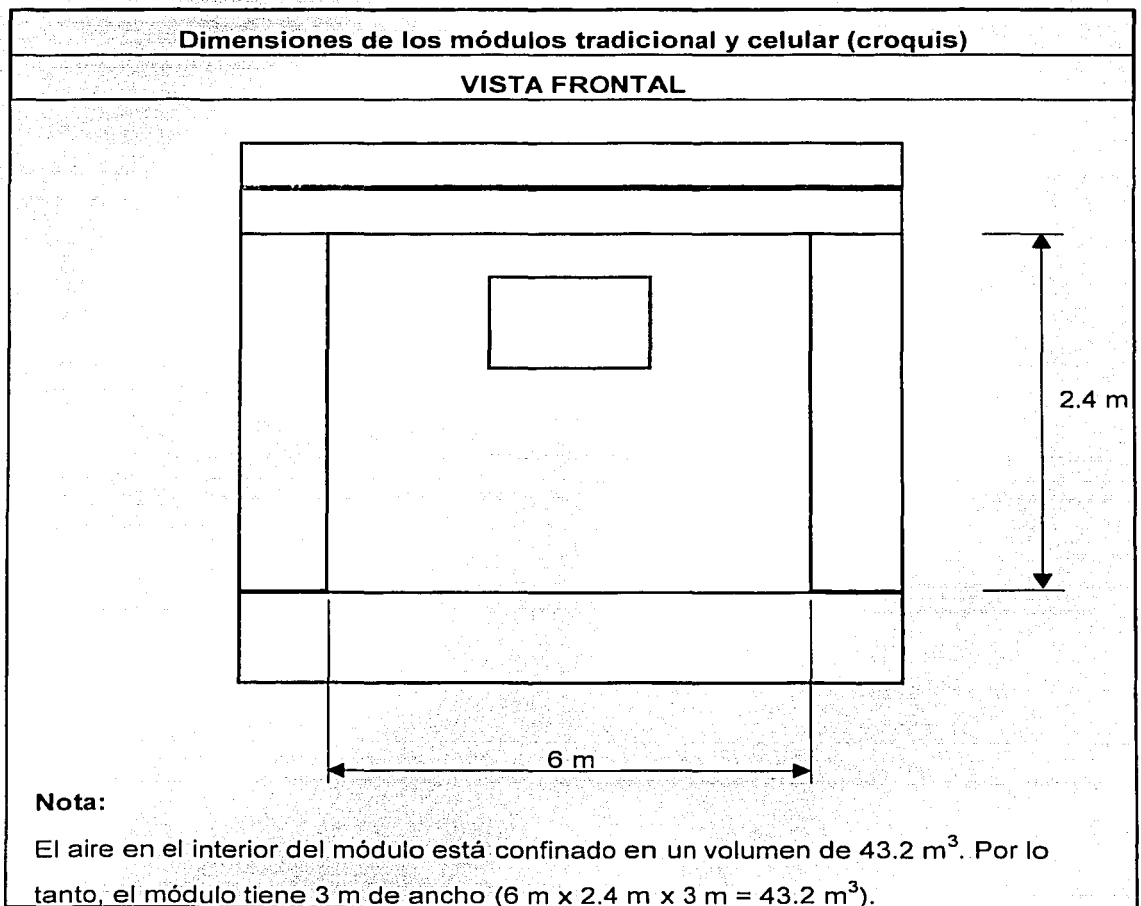


Figura 3.3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE AISLAMIENTO TÉRMICO

6.- ¿Qué son los procedimientos experimentales?

Los procedimientos experimentales son un conjunto de acciones que son efectuadas en los sujetos de investigación (sujetos de experimentación y de control) con el fin de someter a verificación la hipótesis propuesta.

En el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico los procedimientos experimentales son los siguientes:

1. Someter al módulo celular y al módulo tradicional (pertenecientes a la misma etapa) a idénticas condiciones meteorológicas.

Lo anterior implica edificar los módulos (tradicional y celular) a la intemperie, próximos el uno del otro, pero sin afectación entre ellos, para que las condiciones meteorológicas tales como: temperatura ambiental, humedad del aire, velocidad del viento, presión atmosférica... sean semejantes para ambos módulos.

2. Efectuar la medición de las variables (una variable es una propiedad que puede cambiar y cuyo cambio es susceptible de medirse) indicadas en la tabla 3.1 de 9:00 a 19.00 hrs, una vez por hora. Anotar la fecha en que se hace la medición.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.1 Variables que se han de medir en los Módulos Tradicional y Celular			
Variable	Unidad	No. de Lecturas	Comentarios
Temperatura exterior de losa	°C	2	Tomar una lectura de dos puntos distintos escogidos al azar
Temperatura interior de losa	°C	2	
Temperatura del Muro poniente (interior)	°C	2	
Temperatura del Muro sur (interior)	°C	1	Tomar una lectura de un punto escogido al azar
Temperatura del aire interior a 1.7 m del suelo	°C	4	Tomar una lectura de cuatro puntos distintos escogidos al azar
Temperatura del aire interior a 1.2 m del suelo	°C	4	
Temperatura exterior	°C	1	Temperatura ambiente en la zona
Energía eléctrica consumida por el equipo de aire acondicionado	kWh	1	Mantener el equipo de aire acondicionado encendido las 24 horas del día con el termostato ajustado en 27 [°C]

7.- ¿Con que equipos e instrumentos se han de realizar la medición de las variables?

Lista de instrumentos de medición y equipos (por cada módulo):

- Un reloj ajustado con la hora del centro (hora local en Monterrey, Nuevo León).
- Siete termopares. Usar cuatro de ellos para medir la temperatura de la losa, dos para medir la temperatura del muro poniente y uno para medir la temperatura del muro sur.
- Ocho termómetros de mercurio⁴. Usar los instrumentos antes citados para medir la temperatura del aire en el interior del módulo a 1.7 y 1.2 [m] sobre el suelo.
- Un equipo de aire acondicionado de una tonelada de capacidad.
- Un watthorímetro (del tipo F-121 aprobado por la CFE) acoplado a la unidad de aire acondicionado.

⁴ Cabe aclarar que el número total de termómetros de mercurio a utilizar es de 17; ocho de ellos para el módulo celular, otros ocho para el módulo tradicional y uno adicional para medir la temperatura exterior en la zona (temperatura ambiental).

8.- ¿Como se ha de recopilar la información?

Una de las fases más importantes del experimento es hacer registros precisos de los valores que toman las variables medidas. Las lecturas arrojadas por los instrumentos de medición deben de anotarse en el formato de registro de variables indicado en la tabla 3.2 (como ejemplo en la etapa No.18), observe en dicha tabla que:

- La esquina superior izquierda indica: el número y el nombre de la etapa , las variables registradas y el módulo en el cual fueron medidas (celular o tradicional)
- Las lecturas se registran una vez por hora desde las nueve de la mañana hasta las siete de la noche.
- Existen celdas en que se evalúa el promedio de los valores que se registran en las filas o en las columnas.
- El Consumo acumulado de energía eléctrica a una hora es la sumatoria de todos los consumos hasta esa hora.
- La temperatura interior promedio de los módulos en estudio (celular o tradicional) es la media aritmética de las temperaturas promedio del aire interior evaluadas a 1.2 y 1.7 m del suelo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.2 El formato de registro de variables para el módulo tradicional y celular

ETAPA 18: Poliestireno con espesor de 2" (aplicado solo en módulo tradicional). Temperatura de Losas, Muros y Aire Interior en el Módulo Tradicional*																	FECHA: 22-SEP-98											
Hora	EXTERIOR DE LOSAS			INTERIOR DE LOSAS			MURO PONIENTE			MURO SUR	Temperatura del aire interior a 1.7 m del suelo					Temperatura del aire interior a 1.2 m del suelo					Temp. Exterior	kWh			Tradicional Temp. int. Prom.			
	T1	T2	Prom	T3	T4	Prom	T5	T6	Prom		T7	T8	T9	T10	T11	Prom	T8	T9	T10	T11		Prom	T12	Lect		Cons	Acum	
09.00	26.5	26.0	26.25	30.0	29.0	29.50	30.0	29.0	29.50	28.0	29.0	29.5	30.0	28.0	29.13	28.5	28.0	28.5	28.5	28.38	29.0	392.9	0	0	28.75			
10.00	27.5	27.0	27.25	28.0	29.0	28.50	28.0	27.0	27.50	25.0	27.0	27.5	28.5	26.0	27.25	26.0	26.0	26.5	26.5	26.25	29.5	393.3	0.4	0.4	26.75			
11.00	27.5	27.5	27.50	29.0	28.0	28.50	27.0	27.0	27.00	25.0	27.0	27.5	28.5	26.5	27.38	26.5	26.5	26.5	27.0	26.63	30.0	394.0	0.7	1.1	27.00			
12.00	30.5	30.0	30.25	28.0	27.0	27.50	27.0	27.0	27.00	25.0	27.0	27.5	28.5	26.5	27.38	26.5	26.5	26.5	26.5	26.50	33.5	394.9	0.9	2	26.94			
13.00	33.5	33.5	33.50	27.0	27.0	27.00	27.0	27.0	27.00	25.0	26.5	27.0	28.0	26.0	26.88	25.5	26.0	25.5	26.0	25.75	34.0	395.8	0.9	2.9	26.31			
14.00	36.5	36.0	36.25	28.0	27.0	27.50	28.0	28.0	28.00	25.0	27.0	27.5	28.5	26.5	27.38	26.5	26.5	26.5	26.5	26.50	38.0	396.8	1	3.9	26.94			
15.00	36.0	36.0	36.00	28.0	27.0	27.50	29.0	29.0	29.00	25.0	26.5	27.5	28.5	26.0	27.13	26.0	26.5	26.5	26.5	26.38	36.5	398.0	1.2	5.1	26.75			
16.00	36.0	35.5	35.75	28.0	27.0	27.50	29.0	29.0	29.00	25.0	27.0	27.5	28.0	26.0	27.13	26.5	26.5	26.5	26.5	26.50	36.5	399.3	1.3	6.4	26.81			
17.00	35.0	34.5	34.75	29.0	27.0	28.00	29.0	29.0	29.00	25.0	27.5	28.5	28.5	26.5	27.75	26.5	26.5	26.5	27.0	26.63	34.5	400.5	1.2	7.6	27.19			
18.00	31.5	30.5	31.00	29.0	27.0	28.00	30.0	29.0	29.50	25.0	27.5	28.0	28.5	26.0	27.50	26.5	26.0	26.5	27.5	26.63	31.5	401.8	1.3	8.9	27.06			
19.00	28.0	27.0	27.50	29.0	27.0	28.00	29.0	29.0	29.00	25.0	27.0	27.5	28.0	25.5	27.00	26.5	26.0	26.5	26.5	26.38	28.0	403.0	1.2	10.1	26.69			
Prom											27.44					Prom					26.59			32.82	Prom			27.02

* La unidad en que se registran las temperaturas que aparecen en la tabla es el (°C), la temperatura registrada para los muros sur y poniente es específicamente la temperatura de la cara interna.

ETAPA 18: Poliestireno con espesor de 2" (aplicado solo en módulo tradicional). Temperatura de Losas, Muros y Aire Interior en el Módulo Celular*																	FECHA: 22-SEP-98											
Hora	EXTERIOR DE LOSAS			INTERIOR DE LOSAS			MURO PONIENTE			MURO SUR	Temperatura del aire interior a 1.7 m del suelo					Temperatura del aire interior a 1.2 m del suelo					Temp. Exterior	kWh			CONTEC Temp. int. Prom.			
	T1	T2	Prom	T3	T4	Prom	T5	T6	Prom		T7	T8	T9	T10	T11	Prom	T8	T9	T10	T11		Prom	T12	Lect		Cons	Acum	
09.00	28.5	29.5	29.00	28.0	29.0	28.50	28.0	29.0	28.50	26.0	26.5	27.5	27.5	27.5	27.25	27.5	27.5	28.0	27.5	27.63	29.0	874.3	0	0	27.44			
10.00	28.5	29.5	29.00	27.0	28.0	27.50	27.0	29.0	28.00	25.0	26.0	26.5	26.5	26.5	26.38	26.0	26.5	27.0	26.5	26.50	29.5	874.7	0.4	0.4	26.44			
11.00	29.5	30.0	29.75	27.0	28.0	27.50	27.0	28.0	27.50	25.0	25.5	26.0	26.5	26.0	26.00	26.0	26.5	26.5	26.5	26.38	30.0	875.0	0.3	0.7	26.19			
12.00	33.5	33.5	33.50	28.0	29.0	28.50	27.0	29.0	28.00	25.0	26.5	27.0	27.0	27.0	26.88	26.5	27.5	27.5	27.5	27.25	33.5	875.4	0.4	1.1	27.06			
13.00	35.5	35.5	35.50	28.0	28.0	28.00	27.0	28.0	27.50	25.0	25.5	26.5	26.5	26.0	26.13	26.0	26.5	26.5	26.5	26.38	34.0	876.0	0.6	1.7	26.25			
14.00	37.5	37.5	37.50	28.0	29.0	28.50	27.0	29.0	28.00	24.0	25.5	26.5	26.5	26.5	26.25	26.5	27.0	27.5	27.5	27.13	38.0	876.7	0.7	2.4	26.69			
15.00	37.5	37.5	37.50	29.0	29.0	29.00	27.0	29.0	28.00	25.0	26.5	27.0	27.0	27.0	26.88	27.0	27.5	27.5	27.5	27.38	36.5	877.4	0.7	3.1	27.13			
16.00	37.5	37.5	37.50	28.0	29.0	28.50	27.0	29.0	28.00	24.0	24.5	25.0	25.5	25.5	25.13	25.0	25.5	26.0	25.5	25.50	36.5	878.2	0.8	3.9	25.31			
17.00	36.0	36.0	36.00	29.0	29.0	29.00	27.0	29.0	28.00	25.0	26.0	26.5	26.5	26.5	26.38	26.5	27.0	27.0	26.5	26.75	34.5	879.0	0.8	4.7	26.56			
18.00	31.5	32.5	32.00	28.0	28.0	28.00	27.0	29.0	28.00	24.0	24.5	25.5	25.5	25.5	25.25	25.0	25.5	25.5	26.0	25.50	31.5	879.8	0.8	5.5	25.38			
19.00	28.5	28.5	28.50	28.0	29.0	28.50	27.0	29.0	28.00	24.0	24.5	25.5	25.5	26.0	25.38	25.5	26.5	26.5	26.5	26.25	28.0	880.6	0.8	6.3	25.81			
Prom											26.17					Prom					26.60			32.82	Prom			26.39

* La unidad en que se registran las temperaturas que aparecen en la tabla es el (°C), la temperatura registrada para los muros sur y poniente es específicamente la temperatura de la cara interna.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

3.2.1 EL RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE AISLAMIENTO TÉRMICO (Gráficas de comportamiento Promedio)

Con el objeto de exponer un resumen del comportamiento de las variables recabadas por el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico (temperatura exterior, temperatura del aire interior y consumo de energía del equipo de aire acondicionado), a continuación se presentan las gráficas de comportamiento promedio. Estas gráficas presentan el valor promedio de las variables antes mencionadas, registradas durante los días en que se realizaron los procedimientos experimentales, para los módulos celular y tradicional descritos en cada etapa. Cada valor que aparece como un punto en estas gráficas se calcula como a continuación se describe: se calcula el promedio de los valores registrados en los días en que se realizaron las pruebas experimentales (para una variable en particular en cierta hora del día).

Por cada etapa en estudio se ofrece un par de gráficas de comportamiento promedio las cuales se nombran a continuación:

1) Comportamiento térmico promedio diario interior y exterior

Son gráficas que exponen la temperatura promedio diaria del aire interior de los módulos celular y tradicional además de la temperatura ambiental promedio en función de la hora del día.

2) Consumo promedio diario de energía eléctrica.

En estas gráficas se presenta el consumo promedio diario acumulado de energía eléctrica para el modulo tradicional y celular.

Se puede conseguir una copia de los resultados completos (sin resumir) del Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico, mediante una solicitud dirigida a la empresa que realizó el experimento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

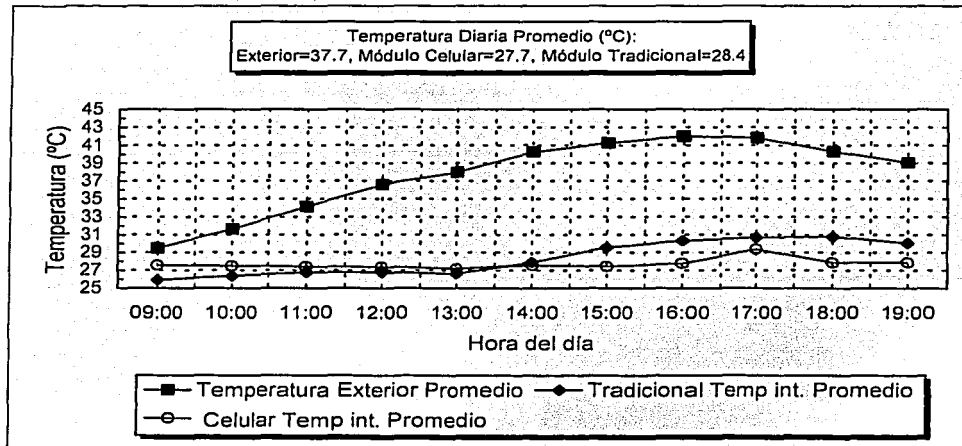
GRÁFICAS DE COMPORTAMIENTO PROMEDIO

ETAPA 01A: SIN MATERIAL PARA REDUCIR EL FLUJO DE CALOR
(AMBOS MÓDULOS)

Uso de impermeabilizante color negro (ambos módulos)

Comportamiento Térmico Promedio Diario Interior y Exterior

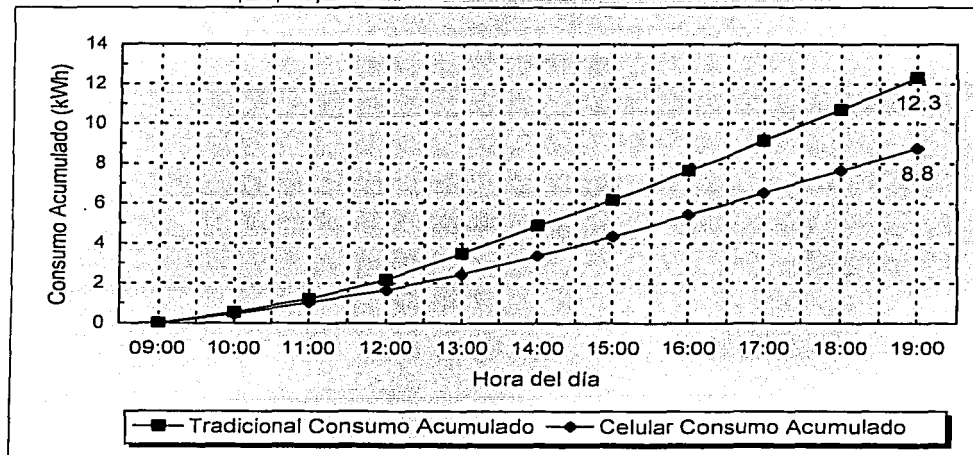
Muestra: Días 20,21,22,23 Jul/98



Gráfica
01A-1

Consumo Promedio Diario de Energía Eléctrica

Muestra: Días 20,21,22,23 Jul/98



Gráfica
01A-2

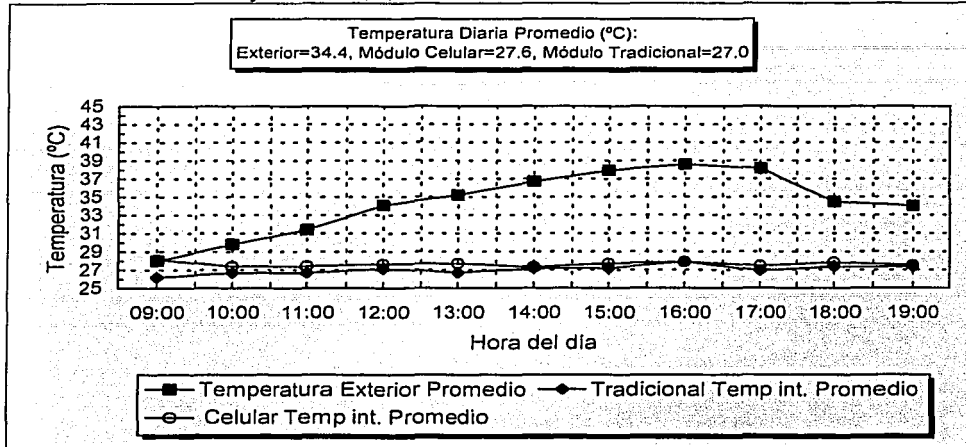
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

**ETAPA 03: SIN MATERIAL PARA REDUCIR EL FLUJO DE CALOR
(AMBOS MÓDULOS)**

Uso de impermeabilizante color blanco (ambos módulos)

Comportamiento Térmico Promedio Diario Interior y Exterior

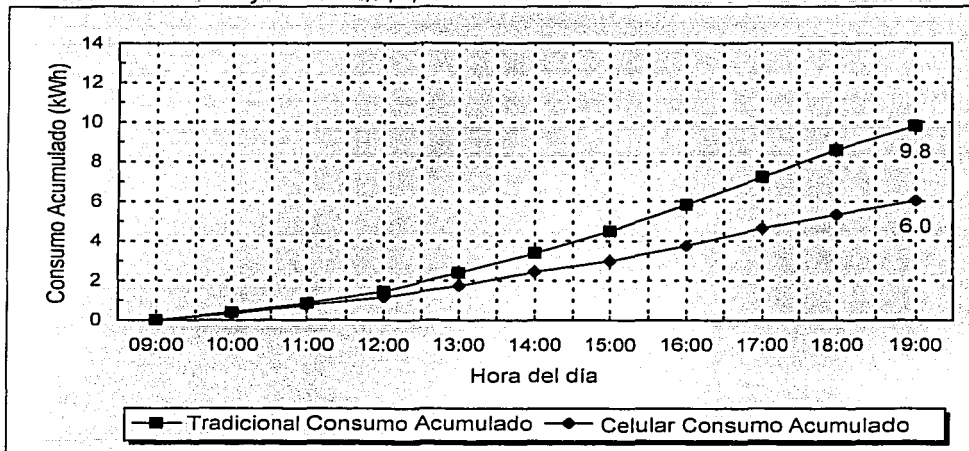
Muestra: Días 29 y 30 Jun ,1,2,3 Jul/98



**Gráfica
03-1**

Consumo Promedio Diario de Energía Eléctrica

Muestra: Días 29 y 30 Jun ,1,2,3 Jul/98



**Gráfica
03-2**

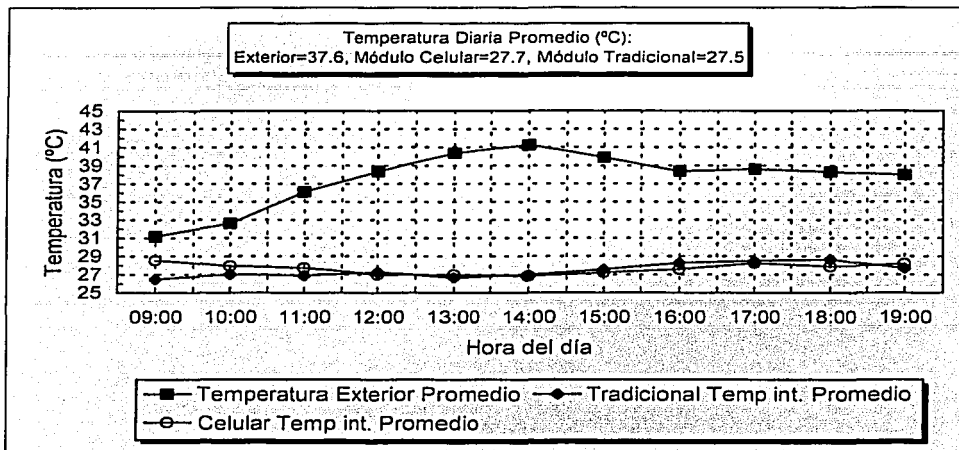
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

ETAPA 05: PLACA TÉRMICA CON ESPESOR DE 5 cm

(Instalada en ambos módulos)

Comportamiento Térmico Promedio Diario Interior y Exterior

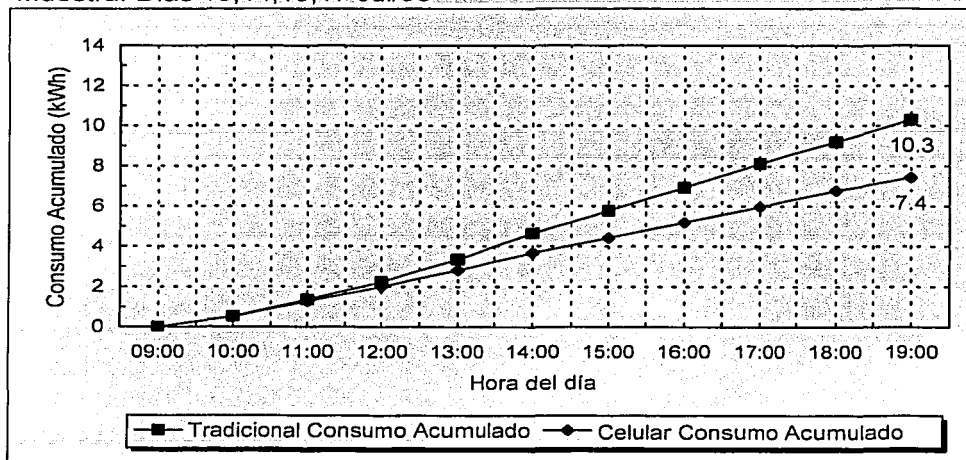
Muestra: Días 13,14,16,17 Jul/98



Gráfica 05-1

Consumo Promedio Diario de Energía Eléctrica

Muestra: Días 13,14,16,17 Jul/98



Gráfica 05-2

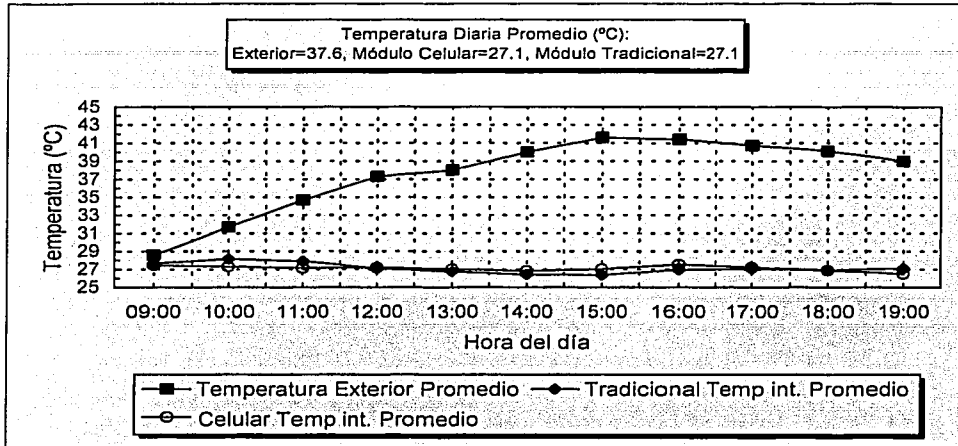
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

ETAPA 07: PLACA TÉRMICA CON ESPESOR DE 10 cm

(Instalada en ambos módulos)

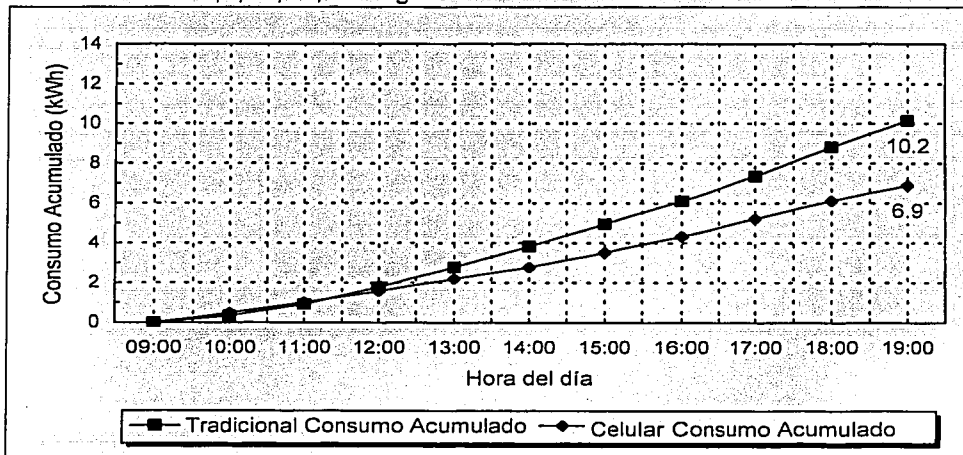
Comportamiento Térmico Promedio Diario Interior y Exterior

Muestra: Días 3,4,10,11,12 Aug/98



Consumo Promedio Diario de Energía Eléctrica

Muestra: Días 3,4,10,11,12 Aug/98



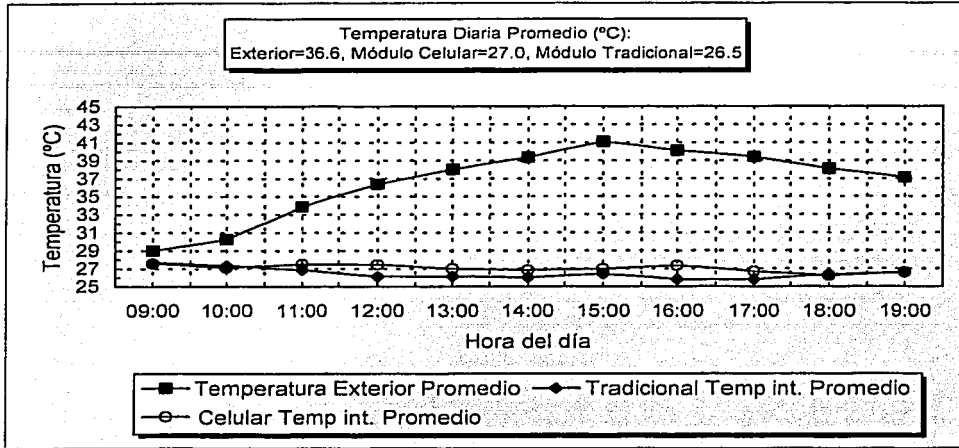
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ETAPA 15: POLIURETANO CON ESPESOR DE 1"

(Aplicado en ambos módulos)

Comportamiento Térmico Promedio Diario Interior y Exterior

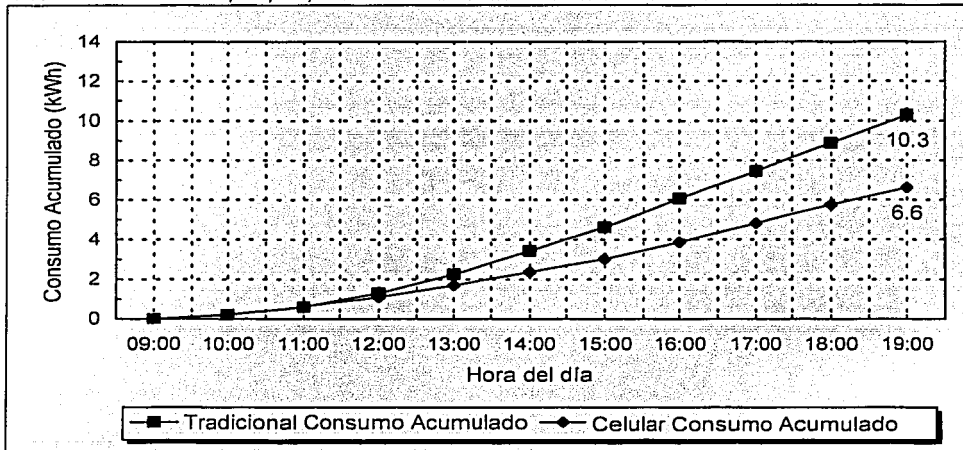
Muestra: Días 28,29,30,31 Jul/98



Gráfica 15-1

Consumo Promedio Diario de Energía Eléctrica

Muestra: Días 28,29,30,31 Jul/98



Gráfica 15-2

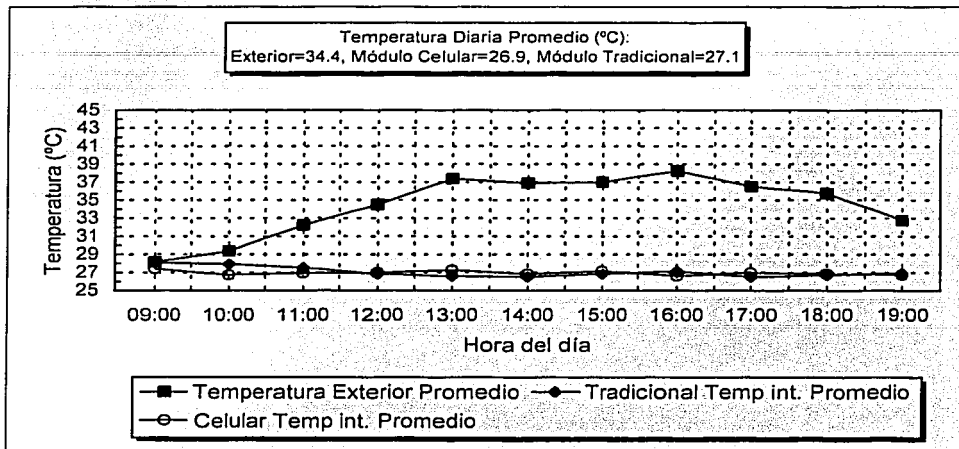
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ETAPA 16: POLIURETANO CON ESPESOR DE 1"

(Aplicado solo en módulo tradicional)

Comportamiento Térmico Promedio Diario Interior y Exterior

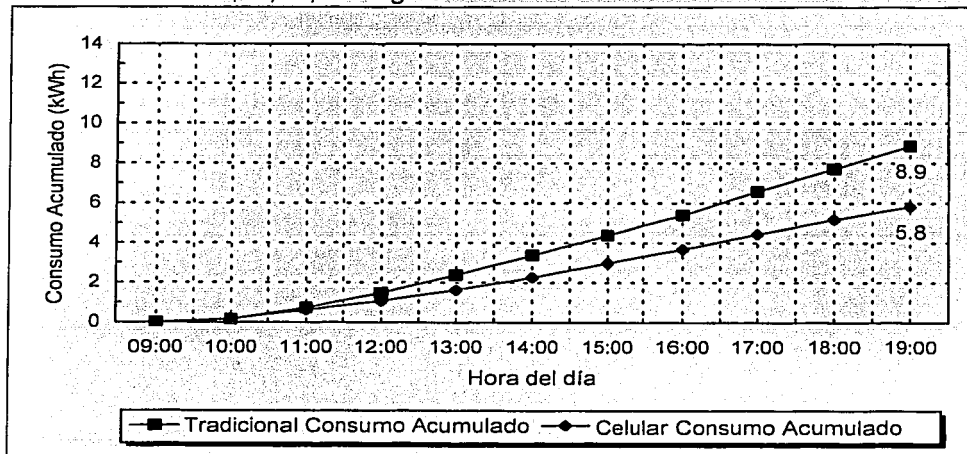
Muestra: Días 17,19,25,26 Aug/98



Gráfica
16-1

Consumo Promedio Diario de Energía Eléctrica

Muestra: Días 17,19,25,26 Aug/98



Gráfica
16-2

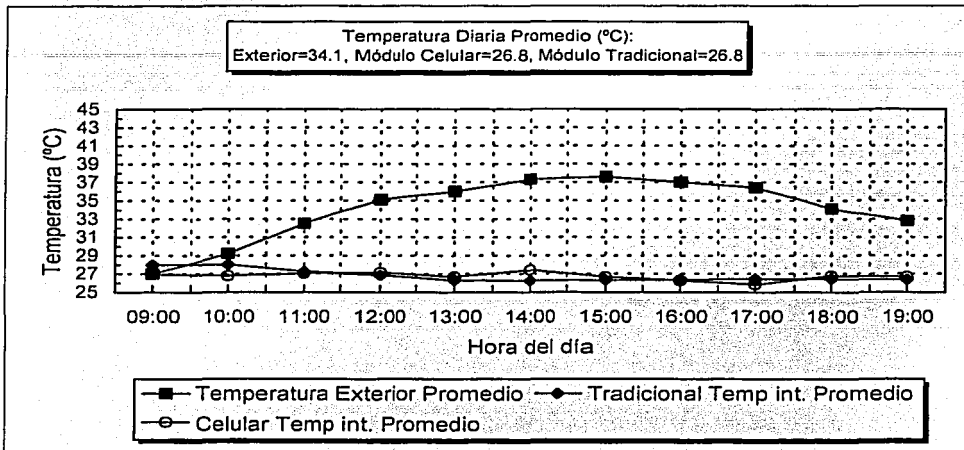
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

ETAPA 17: PLACA TÉRMICA CON ESPESOR DE 5 cm

(Instalada solo en módulo tradicional)

Comportamiento Térmico Promedio Diario Interior y Exterior

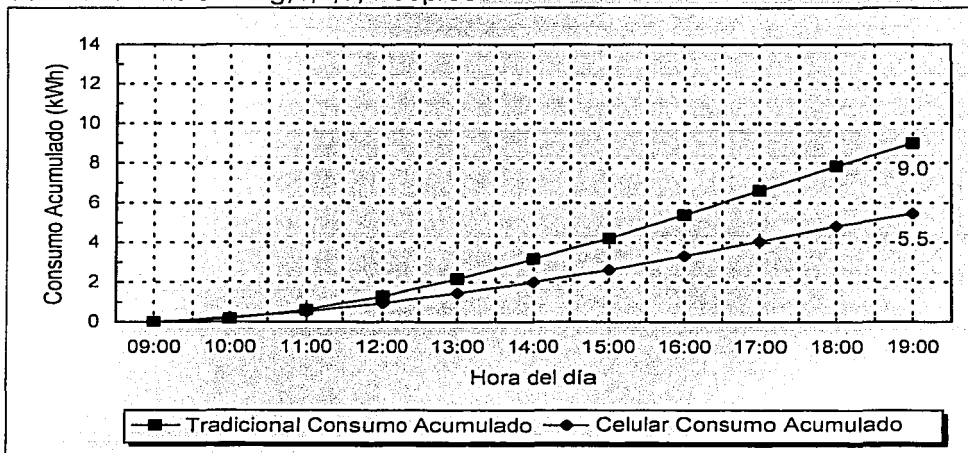
Muestra: Días 31 Aug,1,2,3,4 Sep/98



Gráfica 17-1

Consumo Promedio Diario de Energía Eléctrica

Muestra: Días 31 Aug,1,2,3,4 Sep/98



Gráfica 17-2

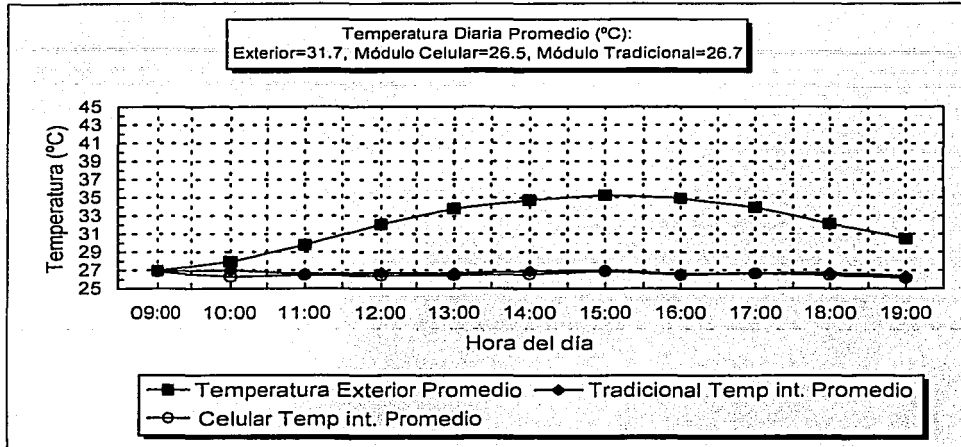
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ETAPA 18: POLIESTIRENO CON ESPESOR DE 2"

(Aplicado solo en módulo tradicional)

Comportamiento Térmico Promedio Diario Interior y Exterior

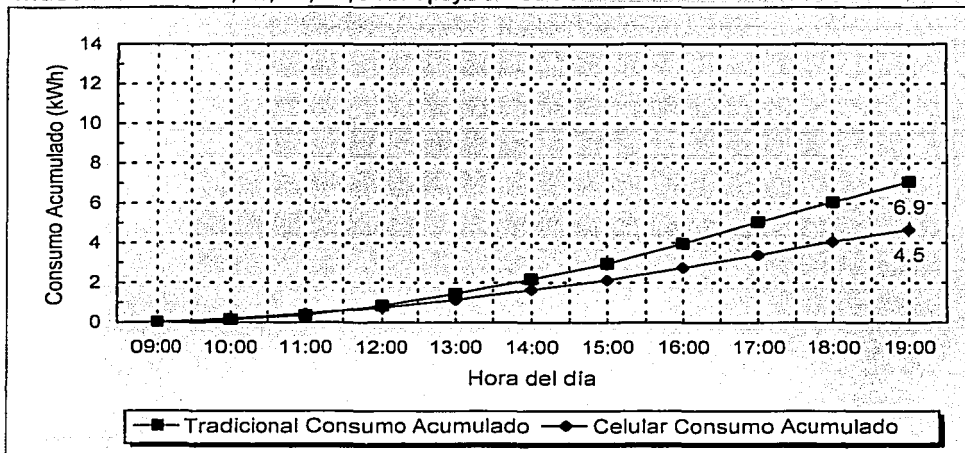
Muestra: Días 22,24,25,29,30 Sep y 1 Oct/98



Gráfica
18-1

Consumo Promedio Diario de Energía Eléctrica

Muestra: Días 22,24,25,29,30 Sep y 1 Oct/98



Gráfica
18-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo No. 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS TÉRMICOS Y AHORRO DE ENERGÍA

4.1 EL ANÁLISIS DE RESULTADOS TÉRMICOS

1.-¿ Cómo se realiza el análisis de los resultados obtenidos en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico?

Los datos recopilados y registrados en un experimento deben de ordenarse para que tengan sentido. Esto puede hacerse a través de una rama de las matemáticas denominada Estadística, la cual se define como la ciencia que se ocupa de la recopilación, tabulación, análisis, interpretación y presentación de datos cuantitativos. La estadística es un instrumento muy útil para examinar datos; puede hacer que una masa difusa de éstos se convierta en algo mucho más ordenado.

Antes de analizar los resultados obtenidos en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico, por medio de un estudio correlacional, es necesario explicar el proceso físico mediante el cual se transfiere el calor, del exterior al interior de una habitación, lo anterior en términos del enunciado de Clausius de la segunda ley de la termodinámica.

4.1.1 ENUNCIADO DE CLAUSIUS DE LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

"Es imposible construir una máquina cíclica que no tenga otro efecto que transferir calor continuamente de un cuerpo hacia otro que se encuentra a una temperatura más elevada."

El enunciado de Clausius de la segunda ley de la termodinámica indica la dirección del flujo de calor entre dos cuerpos a diferente temperatura, de acuerdo con la segunda ley, el calor no puede fluir espontáneamente de un objeto frío a uno caliente, el calor solo fluirá de un objeto frío a uno caliente si se hace trabajo sobre el

sistema.

En verano, cuando se presenta una diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de una habitación, el calor fluye espontáneamente al interior de la misma, por lo que la ganancia de calor de la habitación aumenta. Se debe hacer trabajo, sobre la unidad de aire acondicionado, para poder transferir el calor al exterior de la habitación, con el consecuente consumo de energía eléctrica resultante. Si la ganancia de calor de la habitación aumenta, el consumo de energía necesario para desalojarlo también aumenta. Se puede forzar la disminución del consumo de energía del equipo de aire acondicionado, instalando sobre el techo de la habitación un material que por sus propiedades térmicas (resistencia y capacitancia térmicas), reduzca la ganancia de calor de la misma.

4.1.2 EL ESTUDIO CORRELACIONAL DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Investigar la correlación existente entre la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de un módulo y el consumo de energía del equipo de aire acondicionado, con la finalidad de identificar al recubrimiento que reduce, en mayor medida, la ganancia de calor del módulo

4.1.3 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES

La diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de un módulo (T^*), se define como la diferencia entre la temperatura exterior (ambiental) y la temperatura interior promedio del aire que se encuentra dentro del módulo en estudio, (ambas registradas a la misma hora en el formato de registro de variables).

Entonces, $T^* = (\text{Temp. exterior}) - (\text{T. int. prom.})$ **(4.1)**

Donde: T^* : Diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior del módulo, es la variable independiente [°C].

Temp. exterior: Temperatura exterior (ambiental) [°C].

Temp. int. prom.: Temperatura ambiente interior promedio del aire que se encuentra dentro del módulo en estudio [°C].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El consumo de energía del equipo de aire acondicionado, en el lapso de una hora (consumo*), se define como la diferencia de las lecturas del wathhorimetro registradas con una hora de diferencia. Consumo* es la variable dependiente.

Con la finalidad de exponer un ejemplo del modo de calcular T* y consumo* se ofrece, en la tabla 4.1, un conjunto de datos necesarios para calcular las variables antes mencionadas.

Tabla 4.1 Fragmento de un formato de registro de variables⁵					
[ETAPA 15: Capa de poliuretano de 1" de espesor.					
Módulo Celular			Fecha: 29/Jul/98]		
Hora	Temp. Exterior	Lectura del wathhorimetro	Consumo [kWh]	Consumo Acumulado [kWh]	Módulo Celular Temp. int. Prom.
9:00	28.5	633.6	0.0	0.0	28.50
10:00	30.0	633.8	0.2	0.2	27.44
11:00	34.0	634.1	0.3	0.5	28.5

En la tabla 4.2 se exponen los cálculos necesarios para obtener T* y consumo* con base en los datos de la tabla 4.1.

Tabla 4.2 Pares de puntos (T*, consumo*)						
[Datos: módulo celular en la etapa 15 (29/Jul/98)]						
Hora	T* [°C]			Consumo* [kWh]		
9:00	28.5-28.50	=	0.00	633.6-633.6	=	0
10:00	30.0-27.44	=	2.56	633.8-633.6	=	0.2
11:00	34.0-28.5	=	5.50	634.1-633.8	=	0.3

4.1.4 GRADO DE CORRELACIÓN DESEABLE ENTRE T* Y CONSUMO*

Cuando se desea obtener una ecuación lineal de la forma: $\text{consumo}^* = a + bT^*$ con base en un conjunto de pares de puntos (T*, consumo*), lo primero es calcular el coeficiente de correlación entre esas variables. El objetivo es investigar si la adopción de una línea recta, es un modelo matemático aceptable para representar el fenómeno

⁵ La unidad en que se registran las temperaturas que aparecen en la tabla es el [°C].

en estudio. Si el coeficiente de correlación es alto [0.6, 0.8) o muy alto [0.8, 1], es correcto representar la relación entre las variables en estudio a través de una ecuación lineal.

4.1.5 DEFINICIÓN DE RECUBRIMIENTOS

Entiéndase, en esta tesis, el término recubrimiento, como un conjunto de materiales instalados sobre la losa del techo del módulo tradicional o celular con el objetivo de reducir el flujo de calor al interior de los mismos o proteger a la losa de la humedad. La tabla 4.3 enumera a los recubrimientos empleados e indica el módulo donde se instalaron.

Recubrimiento	Módulo de instalación
1. Impermeabilizante color negro	Tradicional y Celular
2. Impermeabilizante color blanco	
3. Placa térmica (5 cm de espesor)	
4. Capa de poliuretano de 1" de espesor	
5. Placa térmica (10 cm de espesor)	
6. Capa de Poliestireno de 2" de espesor	Tradicional

Se desea conocer cual de los recubrimientos listados es el más eficaz, en lo que se refiere a obtener la máxima diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior (T^*) con el menor consumo de energía del equipo de aire acondicionado (consumo*).

4.1.6 ESTUDIO CORRELACIONAL DE LAS VARIABLES T^* Y CONSUMO* PARA MÓDULO TRADICIONAL

A continuación se presenta el estudio que correlaciona a las variables T^* y consumo* para los recubrimientos instalados sobre la losa del techo del módulo tradicional. La tabla 4.4 indica las etapas cuyos datos se recomienda utilizar para

calcular las variables T^* y consumo*, de acuerdo con el tipo de recubrimiento aplicado sobre la losa de la azotea del módulo tradicional, así como el coeficiente de correlación y el grado de correlación entre las variables antes mencionadas.

Tabla 4.4 Coeficiente de correlación, grado de correlación y etapas cuyos datos se recomienda utilizar para calcular T^* y consumo* (Módulo Tradicional)		
Material colocado sobre la losa del techo (recubrimientos)	Etapas del módulo tradicional que implican el uso del recubrimiento en cuestión y cuyos datos se recomienda utilizar para calcular T^* y consumo*	Coefficiente de correlación (r) entre T^* y consumo* (y grado de correlación entre dichas variables)
Impermeabilizante color negro	Todos los de la etapa 01A	$r=0.79826$ (Alto)
Impermeabilizante color blanco	Todos los de la etapa 03	$r=0.75164$ (Alto)
Placa térmica de 5 cm de espesor	Todos los de la etapa 17	$r=0.80413$ (Muy alto)
Placa térmica de 10 cm de espesor	Todos los de la etapa 07	$r=0.88848$ (Muy alto)
Poliuretano de 1" de espesor	Todos los de las etapas 15 y 16,	$r=0.83958$ (Muy alto)
Poliestireno de 2" de espesor	Todos los de la etapa No.18, salvo los días 1 de Oct., 22 y 24 de Sep ⁶ .	$r=0.72187$ (Alto)

Observe, en la tabla 4.4, que todos los grados de correlación para las variables T^* y consumo* son "altos" o "muy altos". Eso implica que es completamente aceptable representar la relación existente entre T^* y consumo* con una línea recta de la forma: $\text{consumo}^* = a + bT^*$.

4.1.7 GRÁFICA (T^* contra CONSUMO*) PARA MÓDULO TRADICIONAL

La gráfica de la figura 4.1 muestra el lugar geométrico de las rectas que mejor representan la relación existente entre las variables T^* y consumo*, para los recubrimientos instalados sobre la losa del techo del módulo tradicional.

⁶ No se tomaron en cuenta los días 24 de Sep. y 1 de Oct. porque en estos días la temperatura exterior promedio fue inferior a 31°C, esta temperatura no es típica de un día de verano en la ciudad de Monterrey. No se tomó en cuenta el día 22 de septiembre porque en este día se registraron crecimientos y decrecimientos bruscos de la temperatura exterior, la temperatura exterior creció 8°C en 3 horas de (11:00 a 14:00 hrs) y decreció 8.5 °C en tres horas (de 16:00 a 19:00 hrs).

MÓDULO TRADICIONAL⁷

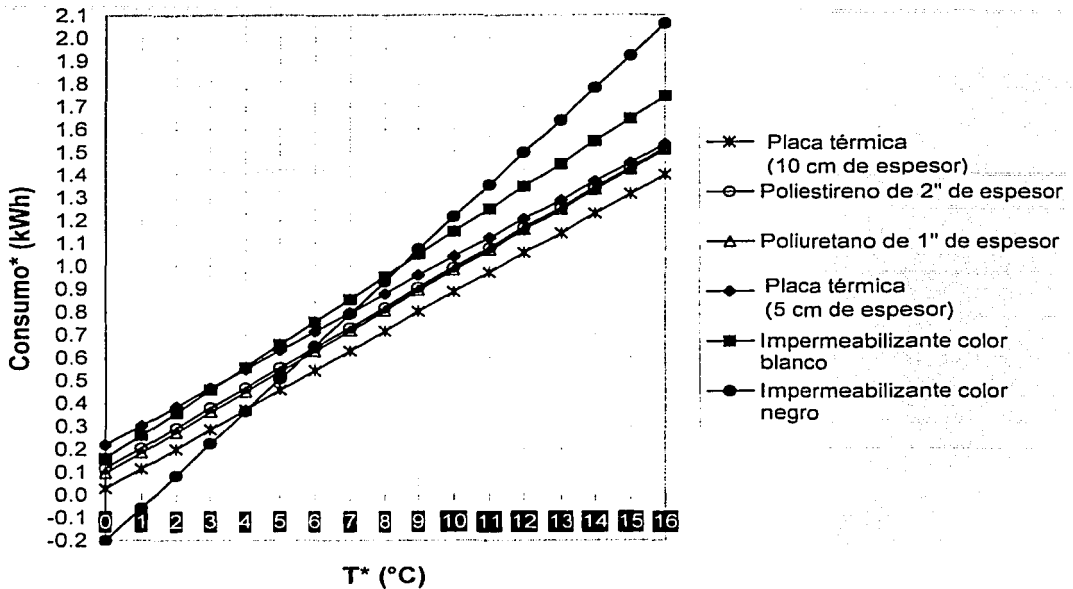


Figura 4.1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.1.8 CONCLUSIÓN DEL ESTUDIO CORRELACIONAL

T* CONTRA CONSUMO*

(Para recubrimientos aplicados sobre la losa del techo del módulo tradicional).

La gráfica de la figura 4.1 permite concluir lo siguiente:

⁷ En la figura 4.1 se observa que la ordenada de origen de la recta que representa el comportamiento de la variable consumo* con respecto a la variable T*, para la capa de impermeabilizante color negro aplicada sobre el módulo tradicional, toma un valor negativo. Lo anterior se debe a que algunos de los valores que generaron la recta de regresión, asignan un consumo de energía nulo, del equipo de aire acondicionado, para una diferencia de temperaturas pequeña o negativa entre el exterior y el interior. Esto ocurre invariablemente a las 9:00 hrs, justo cuando inicia el experimento, por lo que el consumo de energía del equipo de aire acondicionado en ese instante es nulo, y la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior es pequeña o negativa, por tratarse de las primeras horas de la mañana.

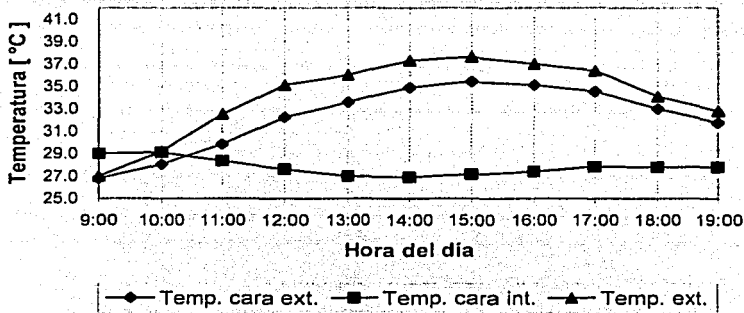
1. De los recubrimientos instalados sobre la losa del módulo tradicional, es la placa térmica de 10 cm de espesor la que induce un menor consumo de energía del equipo de aire acondicionado. El valor "R" de esta placa es de $0.833 \text{ [m}^2/\text{K W]}$, lo que representa el 63.93% de la capacidad aislante de la capa de poliestireno de 2" de espesor. Entonces, ¿Porqué reduce de manera más eficaz la ganancia de calor dentro del módulo? La clave de la respuesta a esa pregunta radica en el término denominado "capacitancia térmica". Una fracción de la energía calorífica que fluye al interior del módulo tradicional se transfiere a las moléculas que integran la placa térmica, aumentando constantemente su energía cinética molecular. A nivel macroscópico, este fenómeno se manifiesta con un aumento constante de la temperatura de la placa conforme pasa el tiempo y en la aparición de gradientes térmicos (variaciones de la temperatura con respecto a la posición), los cuales permiten el flujo de calor al interior del módulo. Así pues, una parte de la energía que se transfiere al interior del módulo se queda almacenada en la placa térmica, en lugar de ingresar al módulo, provocando una menor ganancia de calor que la producida por la capa de poliestireno de 2" de espesor.

La capacidad de almacenamiento de energía de un material depende de su capacitancia térmica: cuanto mayor es la capacitancia térmica, mayor es la capacidad de almacenamiento de energía calorífica que posee el material y menor la ganancia de calor de la habitación, producida por la instalación del mismo. La placa térmica, de 10 cm de espesor, posee una capacitancia térmica 45 veces mayor que la capa de poliestireno de 2" de espesor, propiedad con la cual compensa su menor resistencia térmica, dando lugar a una mayor reducción del flujo de calor, al interior del módulo tradicional, con respecto a la capa de poliestireno de 2" de espesor, lo que conlleva a un menor consumo de energía del equipo de aire acondicionado. [La tabla 2.1 se muestra la resistencia y capacitancia térmicas de los recubrimientos instalados sobre el techo del módulo tradicional sin considerar las capas de impermeabilizante].

Las gráficas de las figuras 4.2 a 4.5 son la evidencia experimental que

prueba la existencia de gradientes térmicos y que la transferencia de calor a través del techo de una habitación es un fenómeno en estado transitorio.

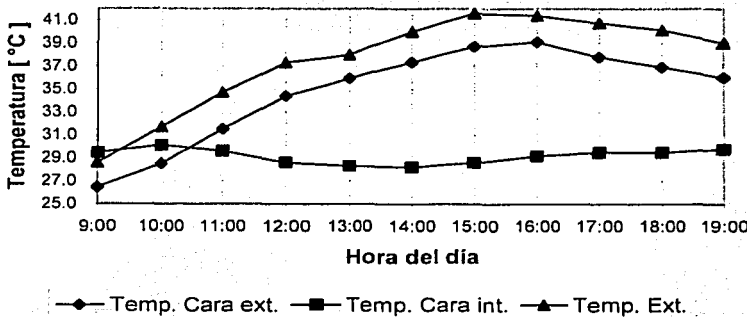
La gráfica de la figura 4.2 muestra la temperatura de las caras exterior e interior del techo del módulo tradicional, a consecuencia de la aplicación de la placa térmica de 5 cm de espesor.



Temperatura promedio exterior: 34.1°C
 Temperatura promedio cara exterior: 32.3°C
 Temperatura promedio cara interior: 27.8°C
 Muestra: Etapa No.17

Figura 4.2

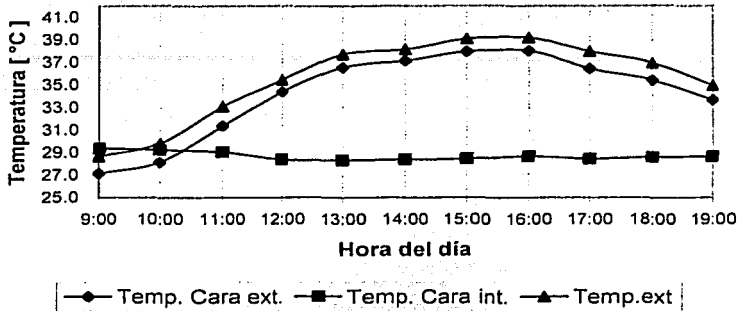
La gráfica de la figura 4.3 muestra la temperatura de las caras exterior e interior del techo del módulo tradicional, a consecuencia de la aplicación de la placa térmica de 10 cm de espesor.



Temperatura promedio exterior: 37.6°C
 Temperatura promedio cara exterior: 34.8°C
 Temperatura promedio cara interior: 29.2°C
 Muestra: Etapa No. 07

Figura 4.3

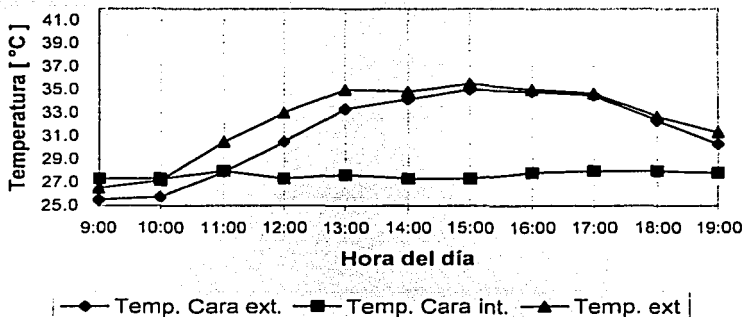
La gráfica de la figura 4.4 muestra la temperatura de las caras exterior e interior del techo del módulo tradicional, a consecuencia de la aplicación de la capa de poliuretano de 1" de espesor.



Temperatura promedio exterior: 35.5°C
 Temperatura promedio cara exterior: 34.2°C
 Temperatura promedio cara interior: 28.7 °C
 Muestra: Etapas No. 15 y No.16

Figura 4.4

La gráfica de la figura 4.5 muestra la temperatura de las caras exterior e interior del techo del módulo tradicional, a consecuencia de la aplicación de la capa de poliestireno de 2" de espesor.



Temperatura promedio exterior: 32.4°C
 Temperatura promedio cara exterior: 31.3°C
 Temperatura promedio cara interior: 27.6°C
 Muestra: Etapa No. 18, días 25, 29 y 30 de Sep⁸.

Figura 4.5

⁸ Los motivos por los cuales se eligieron estos días: no se registraron cambios bruscos de la temperatura exterior y la temperatura exterior promedio fluctuó entre los 31 y los 40°C, lo que es común en verano en la ciudad de Monterrey, N.L.

Las gráficas expuestas en las figuras 4.2 a 4.5 anteriores permiten llegar a las siguientes conclusiones:

1.1. La temperatura de las caras exterior e interior del techo no son constantes a lo largo del día, por lo que la transferencia de calor a través del techo de una habitación es un problema en estado transitorio.

1.2. La temperatura de la cara exterior del techo es superior a la temperatura de la cara interior, esta diferencia de temperaturas a lo largo del espesor del techo (gradiente térmico) hace fluir el calor a través de dicho elemento, de la cara superior hacia la cara inferior, mediante un mecanismo conocido con el nombre de conducción.

2. Un mayor consumo de energía de la unidad de aire acondicionado, que por la instalación de la placa térmica de 10 cm de espesor sobre la losa del módulo tradicional, se obtuvo, en igual medida, por la aplicación de la capa de poliuretano de 1" de espesor (valor "R" de $1.25 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) o por la aplicación de la capa de poliestireno de 2" de espesor (valor "R" de $1.30 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) sobre la losa del módulo tradicional. Los valores "R" de estas capas de aislante térmico son casi iguales, lo mismo que sus capacitancias térmicas (ver tabla 2.1); lo anterior justifica que, en la gráfica de la figura 4.1, las rectas que representan a estos recubrimientos presenten casi la misma pendiente y ordenada de origen. El comportamiento tan similar mostrado por estos materiales experimentalmente, está plenamente justificado por la teoría.

3. La placa térmica de 5 cm de espesor promueve aún mayor consumo de energía del equipo de aire acondicionado, con respecto a los materiales citados anteriormente (placa térmica, poliuretano y poliestireno de 10 cm, 1" y 2" de espesor respectivamente). Lo anterior se debe a que el valor "R" de la placa térmica de 5 cm de espesor es de $0.417 \text{ (m}^2 \text{ K/W)}$, lo que representa menos de un tercio de la capacidad aislante de la capa de poliuretano de 1" de espesor o de la

capa de poliestireno de 2" de espesor (ver tabla 2.1). Ni aun la elevada capacitancia térmica de la placa térmica de 5 cm de espesor (405 kJ/K) le permite competir con las capas de poliuretano y de poliestireno, (de 1" y 2" de espesor respectivamente), en lo que se refiere a reducir la ganancia de calor al interior del módulo tradicional. [La capacitancia térmica de la placa térmica de 5 cm de espesor es mucho mayor que la capacitancia térmica de las capas de poliuretano de 1" de espesor y de poliestireno de 2" de espesor (ver tabla 2.1)].

4. La mayor ganancia de calor y en consecuencia el mayor consumo de energía de la unidad de aire acondicionado, se obtuvo con los módulos cuya losa no fue aislada térmicamente (con materiales como el poliuretano o el poliestireno) y que tampoco cuentan con una placa térmica, instalada sobre la losa del techo, para reducir la ganancia de calor del aire en el interior del módulo. Los módulos a los cuales se está haciendo referencia en este punto son los siguientes:

- a) El módulo cuya losa de concreto tradicional se protege de la humedad con pintura elastomérica color blanco (impermeabilizante color blanco).
- b) El módulo cuya losa de concreto tradicional se protege de la humedad con pintura elastomérica color negro (impermeabilizante color negro).

La absorptancia solar de la pintura elastomérica color blanco es de 0.25** (lo que significa que el 25% de la energía radiante que incide sobre dicho material se absorbe y el 75% restante es reflejado), mientras que la absorptancia solar de la pintura elastomérica color negro es de 0.95** (lo que significa que el 95% de la energía radiante que incide sobre dicho material se absorbe y se refleja el 5% restante).

En la gráfica de la figura 4.1 se observa que el módulo cuya losa se protege de la humedad con impermeabilizante color blanco, tiene un menor consumo de energía de la unidad de aire acondicionado, con respecto al módulo cuya losa se protege de la humedad con impermeabilizante color negro. Lo anterior tiene su fundamento en el hecho que el impermeabilizante color negro, absorbe más energía radiante que el impermeabilizante color blanco. Lo que repercute en una mayor

** Fuente: Mills Anthony F., Transferencia de Calor, McGraw-Hill/Irwin, Colombia 1997.

ganancia de calor , y en consecuencia, en un mayor consumo de energía del equipo de aire acondicionado instalado en el módulo protegido contra la humedad con impermeabilizante color negro.

4.1.9 ESTUDIO CORRELACIONAL DE LAS VARIABLES T* Y CONSUMO* PARA MÓDULO CELULAR

A continuación se presenta el estudio que correlaciona las variables T* y consumo* para los recubrimientos instalados sobre la losa del techo del módulo celular. La tabla 4.5 indica las etapas cuyos datos se recomienda utilizar para calcular las variables T* y consumo*, de acuerdo con el tipo de recubrimiento aplicado sobre la losa del techo del módulo celular, así como el coeficiente de correlación y el grado de correlación entre las variables antes mencionadas. Cabe hacer notar que no se aplicó la capa de poliestireno de 2" de espesor sobre el techo del módulo celular (de acuerdo con lo estipulado en la tabla 4.3).

Tabla 4.5 Coeficiente de correlación, grado de correlación y etapas cuyos datos se recomienda utilizar para calcular T* y consumo* (módulo celular)		
Material colocado sobre la losa del techo (recubrimientos)	Etapas del módulo celular que implican el uso del recubrimiento en cuestión y cuyos datos se recomienda utilizar para calcular T* y consumo*	Coeficiente de correlación (r) entre T* y consumo* (y grado de correlación entre dichas variables)
Impermeabilizante color negro	Todos los de la etapa 01A	r=0.90263 (Muy alto)
Impermeabilizante color blanco	Todos los de la etapa 03	r=0.79867 (Alto)
Placa térmica de 5 cm de espesor	13 y 14 de Julio (de 9:00 a 14:00 hrs) ⁹ , 16 Y 17 de Julio. Etapa 05	r=0.81941 (Muy alto)
Placa térmica de 10 cm de espesor	Todos los de la etapa 07	r=0.77642 (Alto)
Poliuretano de 1" de espesor	Todos los de la etapa 15	r=0.85067 (Muy alto)

⁹ El día 13 de julio la temperatura interior de la habitación aumento 4°C (de 14:00 a 19:00 hrs), esta gran variación de la temperatura interior fue provocada por una temperatura exterior inusualmente elevada, que alcanzó su máximo a las 16:00 hrs (45.5°C), la temperatura promedio exterior fue de 41.35°C. Lo anterior hace que no sea recomendable considerar las lecturas registradas a partir de las 14:00 hrs. El día 14 de julio la temperatura exterior vario bruscamente [11.5°C en un lapso de dos horas (de 14:00 a 16:00 hrs)], por lo que no se toman en cuenta las lecturas registrados a partir de las 14:00 hrs.

La tabla 4.5 muestra que el coeficiente de correlación entre las variables T^* y consumo* es "alto" o "muy alto", por lo que es posible representar la relación entre ambas variables con una relación lineal de la forma $\text{consumo}^* = a + bT^*$.

4.1.10 GRÁFICA (T^* contra CONSUMO*) PARA MÓDULO CELULAR

La gráfica de la figura 4.6 muestra el lugar geométrico de las rectas que mejor representan la relación existente entre las variables T^* y consumo*, para los recubrimientos instalados sobre la losa del techo del módulo celular.

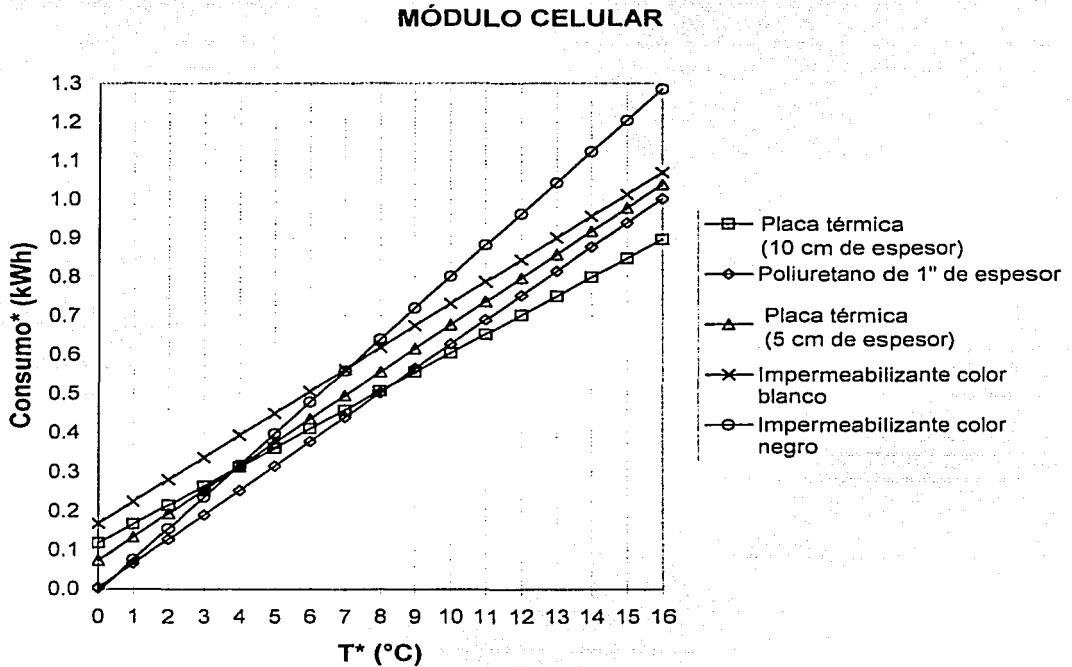


Figura 4.6

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.1.11 CONCLUSIÓN DEL ESTUDIO CORRELACIONAL

T* CONTRA CONSUMO*

(Para recubrimientos aplicados sobre la losa del techo del módulo celular).

La gráfica de la figura 4.6 pone de manifiesto, la habilidad de los recubrimientos en estudio, de reducir la ganancia de calor. Ello se ve reflejado en el menor consumo de energía del equipo de aire acondicionado.

Dichos recubrimientos aparecen en listados a continuación, en orden decreciente de capacidad de reducción del flujo de calor al interior del módulo celular:

1. Placa térmica de 10 cm de espesor.
2. Capa de poliuretano de 1" de espesor.
3. Placa térmica de 5 cm de espesor.
4. Impermeabilizante color blanco.
5. Impermeabilizante color negro.

Ese mismo orden decreciente de capacidad de reducción del flujo de calor al interior del módulo celular, fue evidenciado por esos mismos recubrimientos al aplicarlos sobre el techo del módulo tradicional. Lo anterior es una evidencia del hecho de que la capacidad de los recubrimientos de reducir el flujo de calor, es independiente del tipo de módulo sobre el cual se aplica (tradicional o celular) y es una comprobación de las conclusiones enunciadas en el estudio correlacional de las variables T* y consumo*, para los recubrimientos instalados sobre la losa del techo del módulo tradicional (ver apartado 4.1.8)

Una observación importante que cabe señalar: La placa térmica (de 10 cm de espesor) es la que ocasiona que el equipo de aire acondicionado se vea menos exigido, ante las grandes diferencias de temperaturas entre el exterior y el interior (T*), en comparación con los otros recubrimientos. Esto se refleja no solo en la menor pendiente de la recta que representa la relación T* y consumo* para la placa térmica de 10 cm de espesor, sino que es precisamente por esa tendencia que dicho material ocasiona un menor consumo de energía, del equipo de

aire acondicionado, que el producido por la capa de poliuretano de 1" de espesor, [esto para T^* mayores o iguales a 9°C (ver figura 4.6)]¹⁰. En lugares cálidos es fácil que se registren diferencias de temperaturas entre el exterior y el interior mayores o iguales a 9°C , sobre todo si se cuenta con equipo de aire acondicionado. La explicación de este fenómeno se ofrece a continuación:

Para $T^* < 9 [^\circ\text{C}]$, la placa térmica depende principalmente de su resistencia térmica para disminuir la ganancia de calor del módulo celular. En cambio para $(9 [^\circ\text{C}] < T^* < 17.5 [^\circ\text{C}])$ ¹¹, la resistencia y capacitancia térmicas de la placa, actúan conjuntamente para reducir la ganancia de calor del módulo.

4.2 AHORRO DE ENERGÍA

2.- Si se ordena a los módulos tradicionales y celulares en forma descendente, de acuerdo a su capacidad de lograr mayores diferencias de temperaturas entre el exterior y el interior (T^*), con menores consumos de energía del equipo de aire acondicionado (consumo*). ¿Qué lugar ocuparían?

En la tabla 4.6 aparece el lugar (clasificación), que en ese sentido, obtuvieron los módulos tradicional y celular que toman parte en El Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico. En dicha tabla, la columna denominada "No. de módulo" asocia a cada módulo con un número romano, el objetivo es tener, en lo subsiguiente, la alternativa de hacer alusión a un módulo solo indicando su número.

¹⁰ Observe, en la figura 4.6, que para $T^* > 9 [^\circ\text{C}]$ el consumo de energía de la unidad de aire acondicionado, obtenido con la instalación de la placa térmica de 10 cm de espesor, es menor que el obtenido con la instalación de la capa de poliuretano de 1" de espesor. En cambio para $T^* < 9 [^\circ\text{C}]$, la situación es inversa: el consumo de energía de la unidad de aire acondicionado, obtenido con la instalación de la capa de poliuretano de 1" de espesor, es menor que el obtenido con la instalación de la placa térmica de 10 cm de espesor.

¹¹ La máxima diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior registrada en un módulo celular, ocurrió el día 13 de Julio a las 16:00 hrs y fue de $17.5 [^\circ\text{C}]$.

Tabla 4.6 Lugar adjudicado (clasificación) por los módulos celulares y tradicionales de acuerdo con su capacidad de lograr mayores diferencias de temperaturas entre el exterior y el interior con el menor consumo de energía del equipo de aire acondicionado

LUGAR	No. de módulo	Módulo	RECUBRIMIENTO APLICADO SOBRE LA LOSA DEL MÓDULO
1°	I	Celular	Placa térmica (10 cm de espesor)
2°	II	Celular	Capa de poliuretano de 1" de espesor
3°	III	Celular	Placa térmica (5 cm de espesor)
4°	IV	Celular	Impermeabilizante color blanco
5°	V	Celular	Impermeabilizante color negro
6°	VI	Tradicional	Placa térmica (10 cm de espesor)
7°	VII	Tradicional	Capa de poliestireno de 2" de espesor
	VIII	Tradicional	Capa de poliuretano de 1" de espesor
8°	IX	Tradicional	Placa térmica (5 cm de espesor)
9°	X	Tradicional	Impermeabilizante color blanco
10°	XI	Tradicional	Impermeabilizante color negro

La gráfica T* contra consumo* (para los módulos tradicionales y celulares, de la figura 4.7) da sustento a la clasificación presentada en la tabla 4.6. El recuadro que aparece al lado de la gráfica identifica, con números romanos, a los módulos a los cuales se hace referencia (de acuerdo con lo estipulado por la tabla 4.6).

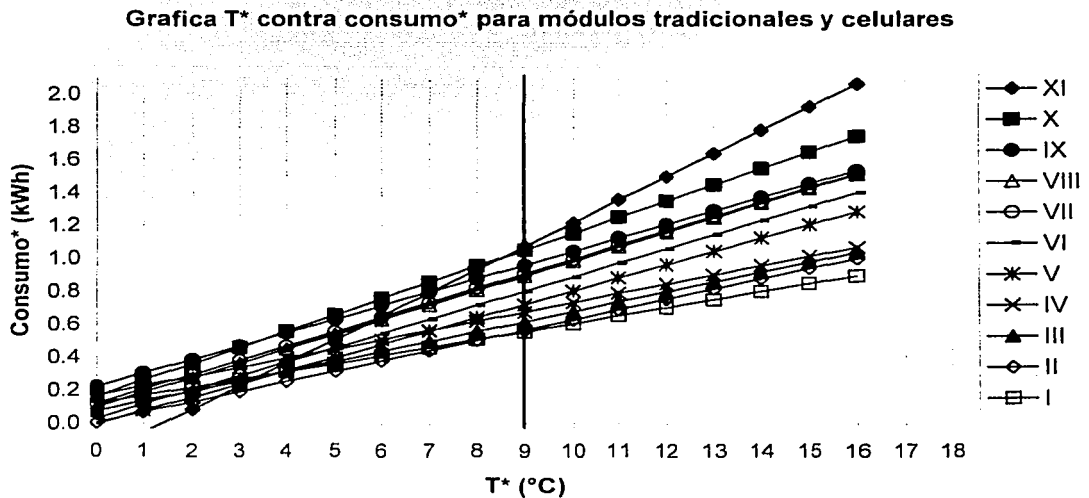


Figura 4.7

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El modelo matemático de las rectas que aparecen en la figura 4.7 se ofrece en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Coeficientes a y b de la ecuación: consumo*=a+bT* para módulos tradicionales y celulares

No. de módulo	Módulo y [Recubrimiento]	a [kWh]	b [kWh/°C]
I	Celular [Placa térmica (10 cm de espesor)]	0.11849	0.04861
II	Celular [Capa de poliuretano de 1" de espesor]	0.00366	0.06238
III	Celular [Placa térmica (5 cm de espesor)]	0.07372	0.06028
IV	Celular [Impermeabilizante color blanco]	0.1686	0.05628
V	Celular [Impermeabilizante color negro]	-0.0053**	0.08064
VI	Tradicional [Placa térmica (10 cm de espesor)]	0.02893	0.08575
VII	Tradicional [Capa de poliestireno de 2" de espesor]	0.11748	0.08755
VIII	Tradicional [Capa de poliuretano de 1" de espesor]	0.09711	0.08846
IX	Tradicional [Placa térmica (5 cm de espesor)]	0.22076	0.08213
X	Tradicional [Impermeabilizante color blanco]	0.16178	0.09892
XI	Tradicional [Impermeabilizante color negro]	-0.1997**	0.14142

3.- De acuerdo con las ecuaciones que aparecen en la tabla 4.7, ¿Que ahorro de energía cabe esperar del módulo celular con respecto al módulo tradicional?

En la tabla 4.8 aparece el consumo de energía (medido en kWh) que los módulos en estudio requieren para sostener, durante una hora, una diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de 9°C (T*=9°C), con el porcentaje de

** La ordenada de origen toma un valor negativo a consecuencia de que algunos de los valores que generaron la recta de regresión, asignan un consumo de energía nulo, del equipo de aire acondicionado, para una diferencia de temperaturas pequeña o negativa entre el exterior y el interior. Esto ocurre invariablemente a las 9:00 hrs, justo cuando inicia el experimento, por lo que el consumo de energía del equipo de aire acondicionado en ese instante es nulo, y la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior es pequeña o negativa, por tratarse de las primeras horas de la mañana.

ahorro de energía eléctrica de la unidad de aire acondicionado. Los números romanos entre paréntesis, que aparecen debajo de los consumos, indican el número de módulo cuya ecuación, $\text{consumo}^* = a + bT^*$, debe ser evaluada para obtener el consumo manifestado en el recuadro correspondiente (ver tabla 4.7).

Tabla 4.8 Energía requerida en kWh para sostener una diferencia de temperaturas de 9°C durante una hora, de los módulos tradicional y celular, con su correspondiente porcentaje de ahorro de energía ¹²			
Recubrimiento aplicado sobre la losa del techo del módulo tradicional y celular	Módulo Celular	Módulo Tradicional	% de ahorro de energía
Placa térmica (10 cm de espesor)	0.55598 (I)	0.80068 (VI)	30.562
Capa de poliuretano de 1" de espesor	0.56508 (II)	0.89325 (VIII)	36.739
Placa térmica (5 cm de espesor)	0.61624 (III)	0.95993 (IX)	35.804
Impermeabilizante color blanco	0.67512 (IV)	1.05206 (X)	35.829
Impermeabilizante color negro	0.72046 (V)	1.07308 (XI)	32.861
Promedio.			34.359

Así pues, el ahorro de energía arrojado por un módulo celular (34.359%), con respecto a un módulo tradicional idéntico en forma, orientación y dimensiones, se debe a que cierta combinación de las propiedades térmicas (resistencia y capacitancia térmicas) de la losa de concreto celular inducen a una menor ganancia de calor que la inducida por la combinación de las propiedades térmicas (resistencia y capacitancia térmicas) de la losa de concreto tradicional. En la tabla 2.1 aparece la resistencia y capacitancia térmicas de las losas de concreto celular y de concreto tradicional utilizadas en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico.

En el siguiente capítulo se considera la importancia de la difusividad térmica (α) en el problema de transferencia de calor estudiado hasta el momento y su relación con la resistencia y la capacitancia térmicas de un material.

¹² Es importante señalar el hecho que la capa de poliestireno de 2" de espesor, se aplicó única y exclusivamente sobre la losa del módulo tradicional. En consecuencia, la tabla 4.8 no reporta el ahorro de energía obtenido por el módulo celular, en comparación con el módulo tradicional, cuando sobre el techo de ambos módulos se instala el recubrimiento citado anteriormente.

Capítulo No. 5
PROPUESTA DE CRITERIOS TÉRMICOS
(RESISTENCIA Y CAPACITANCIA TÉRMICAS)

5.1 DEFINICIÓN DE CRITERIO TÉRMICO
(Resistencia y capacitancia térmicas)

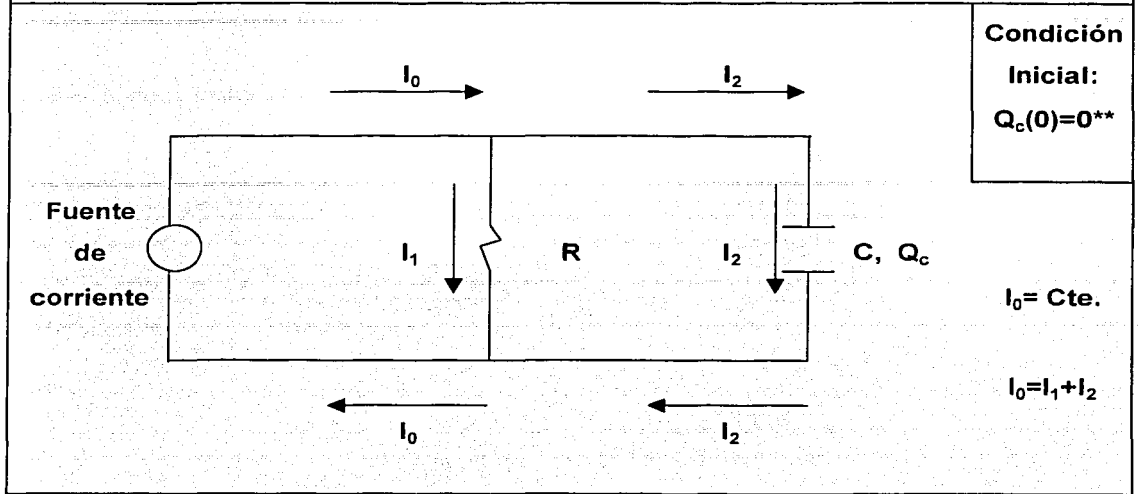
Entiéndase el término "criterio térmico" como una especificación para juzgar la capacidad de un material de construcción o de un aislante térmico para reducir la ganancia de calor de una habitación. Ello con base en la resistencia térmica y la capacitancia térmica que el material posee. Para poder obtener el criterio citado anteriormente, es necesario entender el proceso físico mediante el cual un block de concreto celular absorbe y transfiere el calor. Para ello es necesario hacer análogo el fenómeno antes mencionado con un circuito eléctrico formado por un resistor¹³ (de resistencia R) y un capacitor (de capacitancia C) conectados en paralelo a una fuente de corriente (una fuente de corriente proporciona una intensidad de corriente constante al circuito al que se conecta).

5.2 EL CIRCUITO ELÉCTRICO

La figura 5.1 muestra un circuito formado por un capacitor y un resistor, ambos conectados en paralelo a una fuente de corriente. Cabe hacer notar que si bien la corriente de la fuente (I_0) es constante, la corriente a través del resistor (I_1) y la corriente del capacitor (I_2) varían en función del tiempo, de acuerdo con lo establecido por las ecuaciones 5.1 y 5.2.

¹³ La resistencia es una propiedad de los materiales, a los dispositivos que se fabrican especialmente con el fin de emplear tal propiedad se les conoce como resistores. La fuente de dicha afirmación aparece en el libro de Ing. Gabriel A. Jaramillo Morales, titulado: "Electricidad y Magnetismo", ed. Trillas, México 1990, en la página 206.

Figura 5.1 CAPACITOR Y RESISTOR CONECTADOS EN PARALELO A UNA FUENTE DE CORRIENTE



La intensidad de corriente a través del resistor (I_1), la intensidad de corriente del capacitor (I_2) y la carga del capacitor (Q_c) vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$I_1(t) = I_0 [1 - \exp(-t/RC)] \quad (5.1)$$

$$I_2(t) = I_0 \exp(-t/RC) \quad (5.2)$$

$$Q_c(t) = RC I_0 [1 - \exp(-t/RC)] \quad (5.3)$$

Donde:

- | | |
|---|--------------------------------------|
| I_1 : Intensidad de corriente a través del resistor [A] | t : tiempo [s] |
| I_2 : Intensidad de corriente del capacitor [A] | Q_c : Carga del capacitor [C] |
| I_0 : Intensidad de corriente de la fuente [A] | R : Resistencia del resistor [V/A] |
| $\exp(-t/RC) = e^{(-t/RC)}$ | C : Capacitancia del capacitor [F] |

La intensidad de corriente a través de un alambre conductor de la electricidad, que forma parte de un circuito eléctrico, se define a través de la siguiente expresión:

$$I = d Q_r / dt \quad (5.4)$$

** El capacitor se encuentra descargado al momento de conectar la fuente de corriente al circuito.

Donde:

I : Intensidad de corriente que circula a través de un alambre conductor de la electricidad que forma parte de un circuito eléctrico.

dQ_r/dt : Variación de la cantidad de carga eléctrica (Q_r) que pasa por un alambre, a través del área de su sección transversal, con respecto del tiempo (t).

Si se desea conocer la cantidad de carga eléctrica que pasa a través del resistor (R) del circuito representado en la figura 5.1, en un lapso de tiempo dado, es necesario igualar las ecuaciones 5.1 y 5.4 e integrar.

Este proceso se muestra a continuación:

Igualando las ecuaciones 5.1 y 5.4:

$$dQ_r/dt = I_0[1 - \exp(-t/RC)] \quad (5.5)$$

Despejando dQ_r :

$$dQ_r = I_0[1 - \exp(-t/RC)]dt$$

Integrando:

$$\int_0^{Q_r} dQ_r = \int_0^t I_0 [1 - \exp(-t/RC)]dt \quad (5.6)$$

I_0 es una constante:

$$Q_r = I_0 \int_0^t [1 - \exp(-t/RC)]dt \quad (5.7)$$

$$Q_r = I_0[t + RC \exp(-t/RC)]_0^t \quad (5.8)$$

Valuando de cero a t :

$$Q_r = I_0[t + RC \exp(-t/RC) - RC] \quad (5.9)$$

Por lo que la cantidad de carga que atraviesa al resistor, en un intervalo de tiempo definido de cero a t segundos, viene dada por la ecuación 5.9.

5.3 ANALOGÍAS ELÉCTRICAS Y TÉRMICAS

A continuación se presentan argumentos para sustentar una ecuación

que sea análoga a la ecuación 5.9, la cual ha de tener aplicación en el problema de transferencia de calor que ocupa a esta tesis.

5.3.1 ANÁLOGO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE Y DE LA CARGA ELÉCTRICA

1.- El análogo de la intensidad de corriente (medida en [C/s]) es la transferencia de calor (medida en [J /s]).

2.- El análogo de la carga eléctrica transportada a través de un segmento de alambre conductor (la cual se mide en [C]), es la energía térmica transferida a través del techo de una habitación (la cual se mide en [J]).

En un circuito eléctrico la ley de Ohm indica la intensidad de corriente que circula a través de un resistor, a consecuencia de la diferencia de potencial entre las terminales del mismo. El análogo térmico de esta ley indica la transferencia de calor a través del techo o el muro de una habitación, como consecuencia de la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior. El análogo térmico de la ley de Ohm se presenta a continuación.

$$\dot{Q} = A [(1 / h_i) + R + (1 / h_e)]^{-1} T^* \quad (5.10)$$

Donde:

\dot{Q} : Transferencia de calor que ingresa al interior del elemento en estudio (techo o muro) [W]

A: Área del elemento en estudio (techo o muro) por el que fluye el calor [m²]

h_i : Coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior de la habitación [W/m² K]

R: Resistencia térmica del elemento de la habitación en estudio (techo o muro) [m² K/W]

h_e : Coeficiente de transferencia de calor por convección en el exterior de la habitación [W/m²K]

T*: Diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de la habitación [K]

5.3.2 ANÁLOGO DEL PRODUCTO DE LA RESISTENCIA POR LA CAPACITANCIA ELÉCTRICA (RC)

El producto de la resistencia por la capacitancia eléctrica (RC) tiene unidades de tiempo. Parece sensato sugerir que el análogo térmico de este producto es el producto de la resistencia por la capacitancia térmicas, sin embargo, este producto no tiene unidades de tiempo, los siguientes análisis dimensionales demuestran lo anterior.

Análisis dimensional del producto de la resistencia y la capacitancia eléctricas:

$$[(V/A)(C/V)]=[C/A]=[A \text{ s}/A]=[s]$$

Análisis dimensional del producto de la resistencia y la capacitancia térmicas:

$$[(m^2 \text{ K}/W)(J/K)]=[m^2 \text{ J}/W]=[m^2 \text{ J}/(J/s)]=[m^2 \text{ s}]$$

EL producto de la resistencia por la capacitancia térmicas tiene unidades de $[m^2 \text{ s}]$. Luego, es necesario dividir este producto por una área para poder obtener unidades de tiempo. Dicha área es la de la superficie que tiene interacción con sus alrededores. En el caso de un techo de ancho "a", largo "l" y espesor "L" el área del techo que interactúa con sus alrededores se considera que es igual a $2al$ (se ha ignorado el área de los bordes del techo). Por lo que el análogo del producto de la resistencia por la capacitancia eléctricas está dada por la siguiente expresión:

$$RC/2al \tag{5.11}$$

Donde:

R: Resistencia térmica del techo $[m^2 \text{ K}/W]$ a: Ancho del techo $[m]$

C: Capacitancia térmica del techo $[J/K]$ l: Largo del techo $[m]$

Con los valores de los parámetros para obtener la R y la C, la ecuación (5.11) se presenta a continuación.

$$RC / 2al = (L / k) (a l L \rho c) / 2 a l = L^2 \rho c / 2 k \tag{5.12}$$

Donde:

k: Conductividad térmica del material [W/m K] a: Ancho del techo [m]
c: Calor específico del material [J/kg K] l: Largo del techo [m]
 ρ : Densidad del techo [kg/m³] L: Espesor del techo [m]

Sustituyendo en la ecuación 5.12 la difusividad térmica del material (α),
($\alpha = k / c \rho$), se tiene.

$$RC / 2al = L^2 / 2\alpha \quad (5.13)$$

Donde:

α : Difusividad térmica del material [m²/s] L: Espesor del techo [m]
C: Capacitancia térmica del techo [J/K]
R: Resistencia térmica del techo [m² K/W]

5.3.3 ANÁLOGO TÉRMICO DE EXP (-t/RC)

En un circuito formado por un capacitor (inicialmente descargado) y un resistor conectados en paralelo a una fuente de corriente, la corriente a través del resistor está expresada por la siguiente fórmula:

$$I_1(t) = I_0[1 - \exp(-t/RC)] \quad (5.14)$$

Donde:

I_1 : Intensidad de corriente a través del resistor [A] t: tiempo [s]
 I_0 : Intensidad de corriente de la fuente [A] R: Resistencia del resistor [V/A]
 $\exp(-t/RC) = e^{(-t/RC)}$ C: Capacitancia del capacitor [F]

Un parámetro adimensional que permitiría expresar la ecuación 5.14 de un modo más compacto es el tiempo adimensional T_a , el cual se define como:

$$T_a = t/RC \quad (5.15)$$

Por lo que la ecuación 5.14 puede expresarse de la siguiente manera:

$$I_1(t) = I_0[1 - \exp(-T_a)] \quad (5.16)$$

El análogo térmico del tiempo adimensional eléctrico T_a utilizado comúnmente en problemas de transferencia de calor por conducción en estado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

transitorio se denomina con el nombre de número de Fourier (Fo), el cual queda definido como se expresa a continuación:

$$Fo = \alpha t / L^2 \quad (5.17)$$

Donde:

Fo : Número de Fourier.

α : Difusividad térmica del material del que está hecha la pared [m^2/s]

L : Espesor de la pared [m]

t : Instante de tiempo en el que se desea estudiar el fenómeno de conducción de calor [s]

Por lo tanto, el análogo térmico del término eléctrico $\exp(-t/RC)$ es $\exp(-Fo)$. Es importante aclarar que el término t/RC es un tiempo adimensional usado en circuitos eléctricos, mientras que el número de Fourier (Fo) es un tiempo adimensional usado en circuitos térmicos. No debe asumirse que es posible obtener el número de Fourier (expresado en la ecuación 5.17) de dividir el tiempo entre el producto de la resistencia y la capacitancia térmicas. La expresión del número de Fourier en términos de la resistencia y la capacitancia térmicas se presentará en el apartado 5.4.

5.3.4 EL TIEMPO CARACTERÍSTICO (t_c)

Si se define a t_c como el tiempo característico para problemas de transferencia de calor a través de una pared, y considerando el número de Fourier como:

$$Fo = \alpha t / L^2 \quad (5.18)$$

De la ecuación 5.18 se deja al tiempo (t) en el numerador y a la difusividad térmica (α) y al espesor de la pared (L) en el denominador, la ecuación toma la siguiente forma:

$$Fo = t / (L^2/\alpha) = t / t_c \quad (5.19)$$

$$\text{Donde: } t_c = L^2 / \alpha$$

Para entender mejor cual es el significado físico del tiempo característico (t_c) es necesario recurrir a las analogías eléctricas y térmicas.

En un circuito eléctrico formado por un resistor (de resistencia R) y un

capacitor (de capacitancia C) conectados en paralelo a una fuente de corriente, se establece (por convención) que: cuatro veces el tiempo característico del circuito ($4RC$), determina el tiempo necesario para que la conducción de corriente a través del circuito pase del estado transitorio al estado permanente, punto después del cual la corriente que circula por el circuito no muestra fluctuaciones, con respecto al tiempo, que sean significativas.

Análogamente, si se considera que el tiempo necesario para que la conducción de calor a través de una pared pase del estado transitorio al estado permanente es cuatro veces el tiempo característico ($4t_c$); entonces, después de transcurrido ese tiempo, el flujo de calor (medido en W/m^2) no ha de mostrar fluctuaciones significativas con respecto al tiempo.

La tabla 5.1 muestra el tiempo necesario para que el fenómeno de transferencia de calor a través de las losas y placas, sometidas a prueba en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico, pasen del estado transitorio al estado permanente.

MATERIAL	L [m]	α [m²/s]	$t_c=L^2/\alpha$ [s]	$4t_c$ [h]
Placa de poliuretano	0.0254	6.904×10^{-07}	934.5	1.04
Placa de poliestireno	0.0508	2.014×10^{-06}	1,281.1	1.42
Losa de concreto tradicional	0.1	7.167×10^{-07}	13,953.3	15.50
Losa de concreto celular ¹⁴	0.1	2.923×10^{-07}	34,210.5	38.01
Placa térmica ¹⁴	0.05	2.667×10^{-07}	9,375.0	10.42
	0.1	2.667×10^{-07}	37,500.0	41.67

La tabla 5.1 pone de manifiesto que el alcanzar el estado permanente tarda desde 1.04 hasta 41.67 horas, dependiendo del tipo de material. Antes de una

¹⁴ El que la difusividad térmica (α) de la placa térmica y de la losa de concreto celular sean diferentes se debe a que el concreto celular empleado en la elaboración de la placa térmica, es de menor densidad y conductividad térmica que el empleado para elaborar la losa de concreto celular. La losa de concreto celular es la base sobre la cual se instala la placa térmica, dando lugar a la configuración del techo requerida por el módulo celular en las etapas No. 5 y 7.

hora todos los materiales de la tabla 5.1 conducen calor en estado transitorio, el conocimiento anterior toma gran importancia en el siguiente apartado 5.7.

5.4 EL PRODUCTO DE LA RESISTENCIA Y LA CAPACITANCIA TÉRMICAS Y EL NÚMERO DE FOURIER

El número de Fourier, en problemas de transferencia de calor por conducción en estado transitorio, es de gran utilidad. Sin embargo, no se ha estudiado con profundidad la combinación de la resistencia y la capacitancia térmicas en problemas de transferencia de calor en estado transitorio. A continuación se demuestra como el producto de la resistencia y la capacitancia térmicas y el número de Fourier se encuentran íntimamente relacionados.

De la ecuación 5.13 se observa que el producto del ancho (a) por el largo del techo (l) es su área superficial (A). Luego, el producto de la resistencia por la capacitancia térmica puede escribirse como:

$$RC = A L^2 / \alpha \quad (5.20)$$

Despejando α / L^2 :

$$\alpha / L^2 = A / RC \quad (5.21)$$

Si se sustituye la ecuación anterior en la expresión del número de Fourier se tiene:

$$Fo = \alpha t / L^2 = A t / R C \quad (5.22)$$

El número de Fourier expresado en términos de la resistencia y la capacitancia térmicas de una pared (ecuación 5.22), demuestra la importancia de las propiedades citadas anteriormente en los problemas de transferencia de calor por conducción en estado transitorio.

5.5 ENERGÍA TRANSFERIDA A TRAVÉS DE UNA PARED

Ahora que se han presentado los análogos térmicos de todas las variables eléctricas que forman parte de la ecuación (5.9), se está en capacidad de expresar una ecuación que indica la energía térmica que en total se transfiere a través de

una pared, (que forma parte de una habitación), hasta el instante de tiempo (t). Lo anterior tomando en cuenta la combinación de las propiedades térmicas de la pared. La ecuación antes mencionada se obtiene sustituyendo las variables eléctricas que aparecen en la ecuación 5.9 por sus respectivos análogos térmicos, generándose la ecuación que se presenta a continuación:

$$Q = \{A [(1/h_i) + R + (1/h_o)]^{-1} T^* \} \{t + (RC/2a) \exp(-Fo) - (RC/2a)\} \quad (5.23)$$

Donde:

Q: Energía que se ha transferido a través de la pared (hasta el instante t) [J]

t: Instante de tiempo hasta el cual se desea conocer la cantidad total de energía térmica que se ha transferido a través de la pared [s],

Fo: Número de Fourier de la pared (ver sección 5.3.3)

h_i: Coeficiente de transferencia de calor por convección, del lado de la pared que corresponde al interior de la habitación [W/m² K]

h_e: Coeficiente de transferencia de calor por convección, del lado de la pared que corresponde al exterior de la habitación [W/m² K]

T*: Diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de la habitación [K]

R: Resistencia térmica de la pared [m² K/W] a: Ancho de la pared [m]

C: Capacitancia térmica de la pared [J/K] l: Largo de la pared [m]

A: Área superficial de la pared por la que fluye el calor [m²]

El producto del ancho por el largo de una pared (al) es el área superficial de la misma (A). Luego la ecuación 5.23 puede también escribirse como aparece a continuación.

$$Q = \{A [(1/h_i) + R + (1/h_o)]^{-1} T^* \} \{t + (RC/2A) \exp(-Fo) - (RC/2A)\} \quad (5.23A)$$

Al despejar del número de Fourier el producto de la resistencia por la capacitancia térmicas se obtiene:

$$RC = At/Fo \quad (5.24)$$

y al sustituir en 5.23A se obtiene:

$$Q = \{A [(1/h_i) + R + (1/h_o)]^{-1} T^* \} \{t + (t/2Fo) \exp(-Fo) - (t/2Fo)\} \quad (5.23B)$$

5.5.1 ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN 5.23B

Un examen cuidadoso de la ecuación 5.23B muestra que si se ignoran factores ajenos al material tales como la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de la habitación (T^*) y los coeficientes de transferencia de calor por convección en el exterior y en el interior de la habitación (h_i y h_e), entonces la energía transferida a través de una pared (Q) depende del área de la pared (A), de su resistencia térmica (R) y del número de Fourier (Fo) (este último es función del tiempo, del área de la pared y del producto de la resistencia y la capacitancia térmicas).

Considere ahora la transferencia de calor a través de una pared que separa dos regiones a diferente temperatura.

Una manera de disminuir la cantidad de energía térmica que se transfiere a través de una pared que separa a dos regiones a diferente temperatura es aumentar el espesor de la pared.

Si el espesor de una pared que separa a dos regiones a diferente temperatura aumenta, también aumenta la resistencia térmica de la pared y disminuye su número de Fourier (ver ecuación 5.17).

Si el número de Fourier de una pared disminuye, entonces el producto de su resistencia por su capacitancia térmica aumenta (ver ecuación 5.22).

El aumento del producto de la resistencia por la capacitancia térmica de una pared puede hacerse edificando la pared con un material de baja difusividad térmica (ver ecuación 5.20).

Si la difusividad térmica del material del que está hecha una pared, (que separa a dos regiones a diferente temperatura), es pequeña, la pared cambiará su temperatura (con respecto a la posición y con respecto al tiempo) lentamente.

Si una pared cambia su temperatura lentamente (con respecto al tiempo y con respecto a la posición), entonces el tiempo que la pared tarda en pasar del estado transitorio al estado permanente de transferencia de calor es elevado. Tiempo durante

el cual los cambios de temperatura con respecto al tiempo y con respecto a la posición de la pared deben ser a expensas de la energía térmica que se transfiere entre las dos regiones a diferente temperatura. Dicho de otro modo, durante el tiempo que la transferencia de calor a través de la pared es en estado transitorio, la pared modifica su temperatura (con respecto del tiempo y de la posición) absorbiendo una parte de la energía térmica que fluye entre las dos regiones a diferente temperatura, lo anterior, en combinación con la resistencia térmica de la pared, disminuye la cantidad de energía térmica que fluye a la región a baja temperatura.

Cuando la transferencia de calor a través de la pared llega al estado permanente de transferencia de calor, la pared no cambia más su temperatura con respecto al tiempo, por lo que ya no absorbe más energía térmica de la transferida entre las dos regiones a diferente temperatura. Por lo que la cantidad de energía térmica que la pared transfiere a la región a baja temperatura (medida en [W]), depende de: la resistencia térmica de la pared, de su área superficial y de la diferencia de temperaturas existente.

Cuando la transferencia de calor es en estado transitorio, la transferencia de calor a través de la pared depende tanto de la resistencia térmica de la pared como de su número de Fourier [el que la transferencia de calor dependa del número de Fourier implica que el área de la pared, el tiempo que las dos regiones a diferente temperatura interactúan a ambos lados de la pared y el producto de la resistencia y la capacitancia térmica de la pared están involucrados (ver ecuación 5.22)].

5.6 ECUACIONES $Q(t)$

Con la ayuda de la información presentada hasta el momento es posible evaluar la ecuación (5.23), para todos los materiales utilizados en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico, las cuales se presentan a continuación y que son validas para las siguientes condiciones externas:

Diferencia de temperaturas promedio entre el exterior y el interior (T^*) igual a 8.23 [K]**.

Coefficientes de transferencia de calor en el exterior y el interior de la habitación de 2 [W/m² K] ($h_i=h_e=2$ [W/m² K])**.*.

Poliuretano de 1" de espesor

$$Q(t) = 65.623 [t + 467.262 \exp(- 0.0010701 t) - 467.262] \quad (5.25)$$

Poliestireno de 2" de espesor

$$Q(t) = 64.337 [t + 640.528 \exp(- 0.0007806 t) - 640.528] \quad (5.26)$$

Placa térmica de 10 cm de espesor

$$Q(t) = 80.804 [t + 18750.000 \exp(- 0.0000267 t) - 18750.000] \quad (5.27)$$

Losa de concreto celular de 10 cm de espesor

$$Q(t) = 97.057 [t + 17105.263 \exp(- 0.0000292 t) - 17105.263] \quad (5.28)$$

Placa térmica de 5 cm de espesor

$$Q(t) = 104.569 [t + 4687.500 \exp(- 0.0001067 t) - 4687.500] \quad (5.29)$$

Losa de concreto tradicional de 10 cm de espesor

$$Q(t) = 138.521 [t + 6976.667 \exp(- 0.0000717 t) - 6976.667] \quad (5.30)$$

5.7 LAS GRÁFICAS DE Q CONTRA t

A continuación se presentan las gráficas de la energía térmica transferida por los materiales que toman parte en el Estudio Experimental comparativo de Aislamiento Térmico en función del tiempo transcurrido.

La gráfica de la figura 5.2 muestra la energía térmica transferida por los materiales que toman parte en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico cuando estos transfieren calor en estado transitorio, esto ocurre para cualquier intervalo de tiempo menor a una hora (3600 [s]) (ver tabla 5.1).

** Esta elección obedece al hecho que la diferencia de temperaturas promedio (de 9:00 a 19:00 hrs.) registrada por los módulos tradicionales y celular que toman parte en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico es de 8.23 [K].

*** Por ser los mínimos en convección libre.

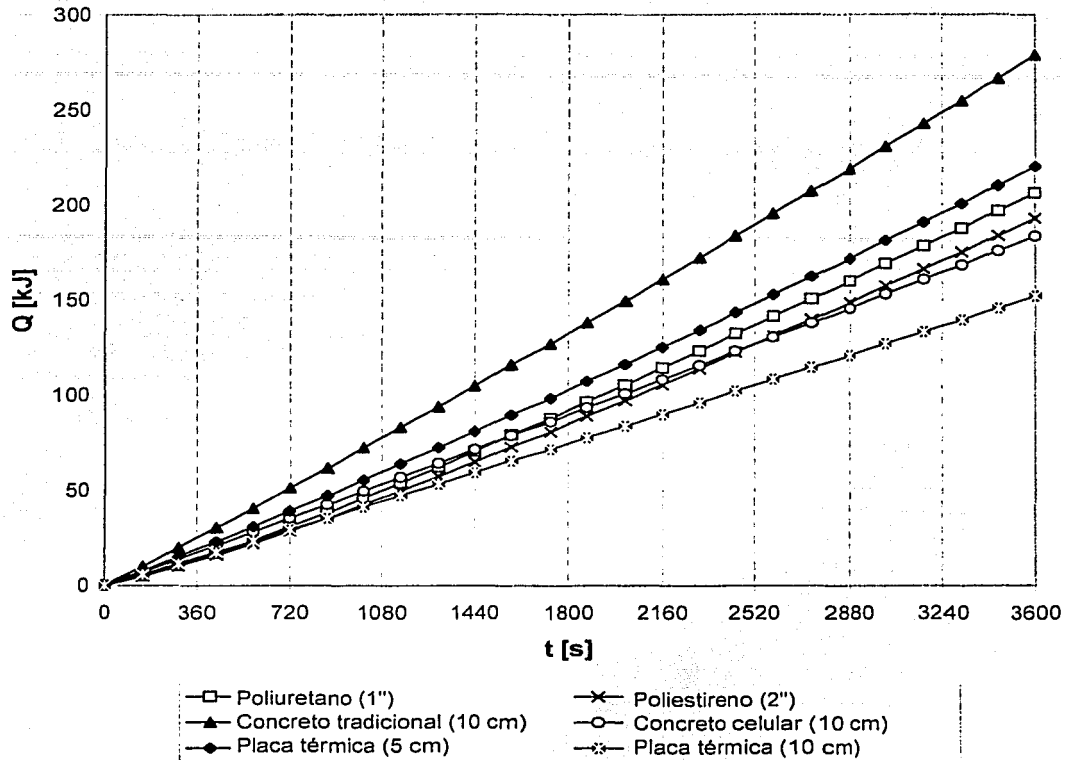


Figura 5.2

La figura anterior muestra que cuando los materiales que toman parte en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico transfieren calor en estado transitorio, las mejores opciones, en orden decreciente de importancia, son:

	Valor "R" [m ² K/W]
1.- La placa térmica de 10 cm de espesor	0.833
2.- La losa de Concreto Celular de 10 cm de espesor	0.526
3.- La capa de poliestireno de 2" de espesor	1.303
4.- La capa de poliuretano de 1" de espesor	1.257
5.- La placa térmica de 5 cm de espesor	0.417
6.- La losa de concreto tradicional de 10 cm de espesor	0.069

Si se deja de considerar los materiales con los que se edificó el módulo tradicional (concreto tradicional) y el módulo celular (concreto celular) y se toma únicamente en cuenta los materiales que se instalaron sobre el techo del módulo celular y del módulo tradicional, las mejores opciones son:

	Valor "R" [m ² K/W]
1.- La placa térmica de 10 cm de espesor	0.833
2.- La capa de poliestireno de 2" de espesor	1.303
3.- La capa de poliuretano de 1" de espesor	1.257
(Estas dos últimas muestran un desempeño casi idéntico, ver figura 5.2)	
4.- La placa térmica de 5 cm de espesor	0.417

El orden anterior calculado sería el mismo para valores de una diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior (T^*) mayor a 8.23 [K], y es el mismo que se expresa en las conclusiones del capítulo No.4 para $T^* > 9$ [°C].

CONCLUSIÓN:

Cuando la transferencia de calor a través de una pared, que separa a dos regiones a diferente temperatura, es en estado transitorio, la resistencia térmica del material no es determinante en la cantidad de energía térmica que se transfiere a la región de baja temperatura. Existe otro factor involucrado que concierne a la pared: la difusividad térmica y en términos adimensionales el número de Fourier (valores pequeños o grandes). Un material que reduce significativamente la ganancia de calor de una habitación, cuando transfiere calor en estado transitorio, posee una elevada resistencia térmica y una difusividad térmica baja, por lo que su número de Fourier es pequeño y su tiempo característico es grande (ver ecuación 5.19).

La gráfica de la figura 5.3 muestra la energía térmica transferida por los materiales que toman parte en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico, cuando todos ellos operan en estado permanente, esto ocurre para intervalos de tiempo cuya duración es mayor a 42 horas (151200 [s]) (ver tabla 5.1).

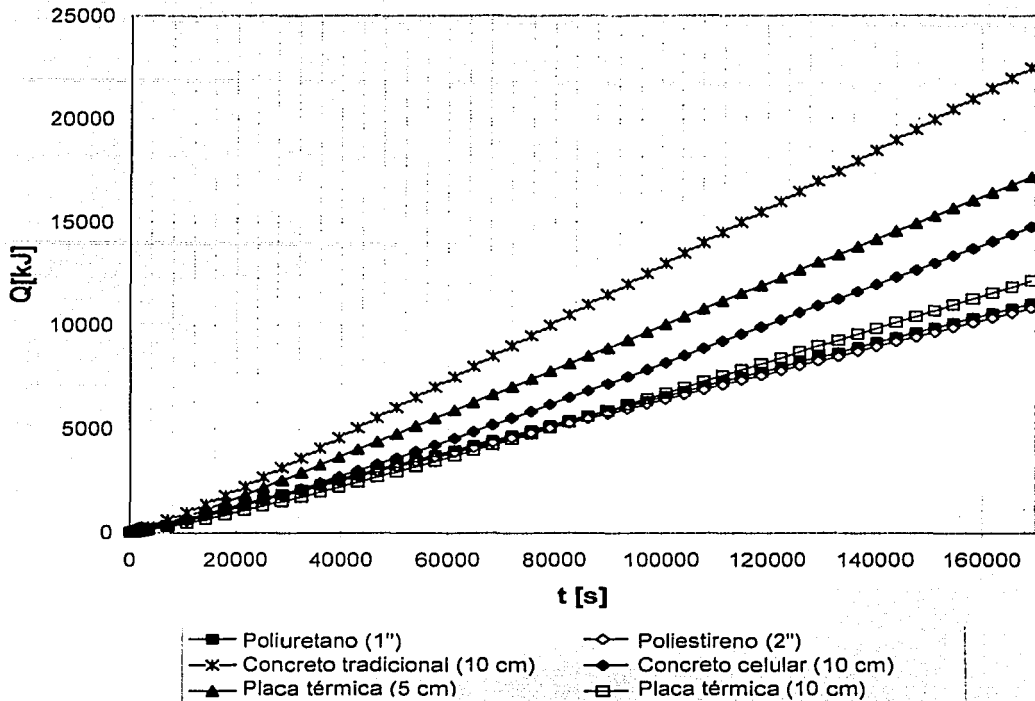


Figura 5.3

La figura anterior muestra que cuando los materiales que toman parte en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico conducen calor en estado permanente, las mejores opciones, en orden decreciente de importancia, son:

	Valor "R" [m ² K/W]
1.- La capa de poliestireno de 2" de espesor	1.303
2.- La capa de poliuretano de 1" de espesor	1.257
(Estas dos últimas muestran un desempeño casi idéntico, ver figura 5.3)	
3.- La placa térmica de 10 cm de espesor	0.833
4.- La losa de Concreto Celular de 10 cm de espesor	0.526
5.- La placa térmica de 5 cm de espesor	0.417
6.- La losa de concreto tradicional de 10 cm de espesor	0.069

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIÓN:

Cuando la conducción de calor a través de una pared, que separa a dos regiones a diferente temperatura, es en estado permanente, el material que transfiere menos energía térmica por unidad de área es aquel que posee mayor resistencia térmica, no existe ningún otro factor involucrado (que concierna a la pared).

5.8 EL CRITERIO RESISTENCIA Y CAPACITANCIA TÉRMICAS

Si se tuviera la necesidad de sustituir una capa de poliuretano de 1" de espesor por materiales tales como: el poliestireno, la placa térmica, el concreto celular y el concreto tradicional, de manera que la capa de material sustituto transfiriera la misma cantidad de calor que la capa de poliuretano es capaz de conducir en una hora, ¿de que espesor serían las capas de material sustituto?

Las tablas 5.2 y 5.3 contestan la pregunta anterior, muestran las propiedades de capas de material cuyo espesor es el requerido para dicho propósito. El espesor fue determinado al proponer un espesor para cada material, con base en dicho espesor se determina la forma que toma la ecuación que relaciona la cantidad de energía térmica transferida por un material hasta el instante t (ecuación 5.23) y se evalúa para las siguientes condiciones: Diferencia de temperaturas promedio entre las regiones separadas por la pared (T^*) igual a $8.23 [K]^{**}$, coeficiente de transferencia de calor por convección a ambos lados de la pared igual $2 [W/ m^2 K]^{***}$ y tiempo igual a $3600 [s]$ (una hora). El proceso anterior se repite, hasta que el espesor propuesto arroje que la energía térmica transferida por el material en una hora, es la misma que la transferida por la capa de poliuretano de 1" de espesor (durante ese mismo intervalo de tiempo).

** $8.23 [K]$ es la T^* promedio registrada de 9:00 a 19:00 hrs por los módulos tradicional y celular que toman parte en el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico.

*** Por ser los mínimos en convección libre.

Tabla 5.2 Espesor (L), conductividad térmica (k), densidad (ρ), calor específico (c), difusividad térmica (α) y área superficial (A) de materiales que transfieren 206 [kJ/h]

MATERIAL	L [m]	k [W/m K]	ρ [kg/m ³]	c [J/kg K]	α [m ² /s]	A [m ²]
Poliuretano	0.0254	0.0202	28	1045	6.904x10 ⁻⁰⁷	18
Poliestireno	0.047048	0.039	16	1210	2.014x10 ⁻⁰⁶	18
Concreto Tradicional	0.4346	1.44	2400	837.2	7.167x10 ⁻⁰⁷	18
Concreto celular	0.0765	0.19	650	1000	2.923x10 ⁻⁰⁷	18
Placa térmica	0.05639	0.12	450	1000	2.667x 10 ⁻⁰⁷	18

Tabla 5.3 Resistencia térmica (R), Capacitancia térmica (C), ancho (a), y largo (l) de materiales que transfieren 206 [kJ/h]

MATERIAL	R [m ² K/W]	C [kJ/K]	a [m]	l [m]	Q [kJ]
Poliuretano	1.257	13.4	6	3	206
Poliestireno	1.206	16.4	6	3	206
Concreto Tradicional	0.302	15,718.2	6	3	206
Concreto celular	0.403	895.1	6	3	206
Placa térmica	0.470	457	6	3	206

Los valores de la tabla 5.3 de R y C permiten conformar la siguiente gráfica, tal que las paredes pueden conducir la misma cantidad de calor en una hora (206 [kJ]).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

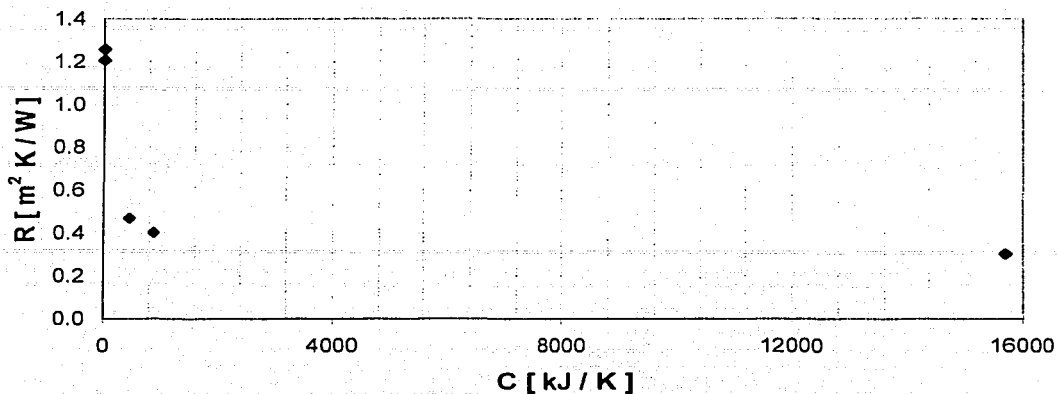


Figura 5.4

Para poder obtener un modelo matemático de los puntos que aparecen en la gráfica anterior, el primer paso es linealizar, una manera de hacerlo es graficar los puntos que aparecen en la figura 5.4 en papel logarítmico, como se muestra a continuación:

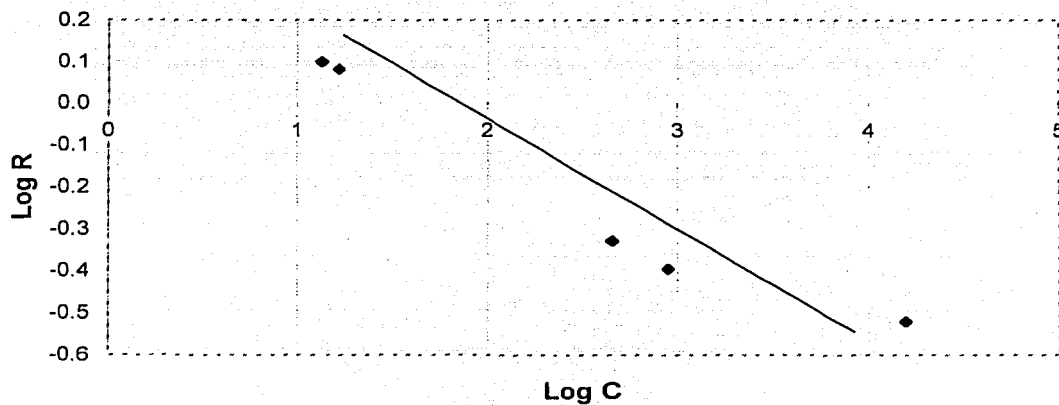


Figura 5.5

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los puntos que aparecen en la gráfica anterior tienden a mostrar un patrón lineal. Luego, el siguiente paso es encontrar una ecuación que relacione a Log C y Log R, a través de una recta de la forma:

$$\text{Log } R = M (\text{Log } C) + B \quad (5.31)$$

Donde M y B son constantes a determinar por medio del método de pares de puntos.

Es posible demostrar que los valores óptimos de M y B son:

$$M = -0.215874 \quad B = 0.312056$$

Si a la base de los logaritmos comunes se le pone como exponente a ambos miembros de la ecuación 5.31 se tiene.

$$10^{\text{Log } R} = R = 10^{(M \text{ log } C + B)} \quad (5.32)$$

$$R = 10^{(M \text{ log } C + B)} = 10^B 10^{M \text{ log } C} \quad (5.33)$$

$$R = 10^B (C^M) \quad (5.34)$$

Al sustituir los valores de B y M en la ecuación 5.34 se obtiene:

$$R = 2.051425 C^{-0.215874} \quad (5.35)$$

Donde:

R se mide en $[m^2 K/W]$ y C se mide en $[kJ/K]$.

La ecuación 5.35 se grafica a continuación junto con los puntos que la generaron.

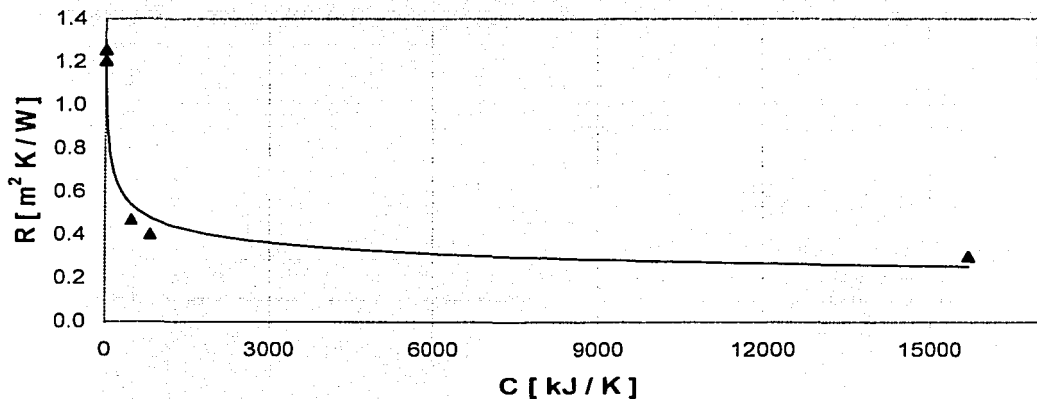


Figura 5.6

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las paredes cuya capacitancia y resistencia térmica se encuentra relacionada por medio de la ecuación 5.35, transfieren la misma cantidad de energía térmica a la región de baja temperatura después de una hora. Lo anterior bajo las condiciones indicadas al principio del apartado 5.8.

5.9 REDUCCIÓN DE ENERGÍA TRANSFERIDA (Concreto celular y concreto tradicional)

A continuación aparecen las ecuaciones que describen la energía transferida a través de una pared de concreto celular y de una pared de concreto tradicional, ambas de 10 cm de espesor, evaluadas para una hora (3600 s):

Losa de concreto celular de 10 cm de espesor

$$Q(t) = 97.057 [t + 17105.263 \exp (- 0.0000292 t) - 17105.263] \quad (5.36)$$

$$Q (3600) = 183.581 \quad [\text{kJ}]$$

Losa de concreto tradicional de 10 cm de espesor

$$Q(t) = 138.521 [t + 6976.667 \exp (- 0.0000717 t) - 6976.667] \quad (5.37)$$

$$Q (3600) = 278.905 \quad [\text{kJ}]$$

Si se calcula el porcentaje de energía que transfiere el concreto celular con respecto del concreto tradicional se tiene:

$$\% \text{ de energía transferida} = [(183.581 - 278.905) / 278.905] 100 = - 34.178 \%$$

Por lo que el porcentaje de energía térmica que una pared de concreto celular deja de transferir, con respecto a una pared del mismo espesor de concreto tradicional, es del 34.178%.

Sin embargo, lo anterior no necesariamente refleja lo que ocurre a lo largo del día. Durante la noche, cuando el concreto celular se enfría, la energía térmica almacenada en su interior fluye al interior y al exterior de la habitación. La energía térmica que fluye al interior de la habitación reduce significativamente el ahorro de energía obtenido durante la mañana y la tarde. Por lo que el ahorro de energía que cabe esperar, en un periodo de 24 horas, es mucho menor al 34%.

Capítulo No. 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones siguientes bastarán para situar el Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico en la perspectiva adecuada:

1.- Cuando la transferencia de calor a través de una pared de una edificación que separa a dos regiones a diferente temperatura sea considerada en estado permanente, o cuando la diferencia de temperaturas sea muy grande, el flujo de calor que se transfiere a la región de baja temperatura depende de la resistencia térmica del material y de su área superficial.

Existen otros factores que influyen sobre el flujo de calor transferido, pero, que son ajenos al material, tales como: la diferencia de temperaturas entre las regiones separadas por la pared y el coeficiente de transferencia de calor por convección a ambos lados de la misma.

2.- Cuando la transferencia de calor a través de una pared que separa a dos regiones a diferente temperatura es en estado transitorio, el calor transferido a través de la pared depende de: la resistencia térmica de la pared y del número de Fourier.

Si un material tiene una difusividad térmica baja, su número de Fourier es pequeño y su tiempo característico es grande. Estos materiales alcanzan lentamente el estado permanente de transferencia de calor y su capacidad de reducir la ganancia de calor de una habitación (cuando conducen calor en estado transitorio) depende de la combinación su resistencia térmica y de su difusividad térmica (una difusividad térmica baja implica, por lo general, que el producto de la densidad y el calor específico del material es elevado, por lo que la capacitancia térmica del material es alta).

Si un material tiene una difusividad térmica alta, su número de Fourier es alto y su tiempo característico es pequeño. Estos materiales alcanzan rápidamente

el estado permanente de transferencia de calor y su capacidad de reducir la ganancia de calor de una habitación (cuando conducen calor en estado transitorio) depende casi totalmente de su resistencia térmica y en un grado mínimo a su difusividad térmica. (Una difusividad térmica alta implica, por lo general, que el producto de la densidad y el calor específico del material es pequeño, por lo que la capacitancia térmica del material es pequeña).

Los factores ajenos al material que influyen sobre el flujo de calor transferido son los mismos que para la transferencia de calor en estado permanente.

3.- Se puede especificar para las edificaciones, materiales cuya resistencia y capacitancia térmicas, sean como se muestra en la gráfica de la figura 6.1, que permiten conducir la misma cantidad de energía térmica a la región de baja temperatura en el lapso de una hora (11.44 kJ/m^2)¹⁵. (Lo anterior tomando en cuenta que la transferencia de calor es en estado transitorio y que los materiales empleados no sean sometidos a enfriamiento).

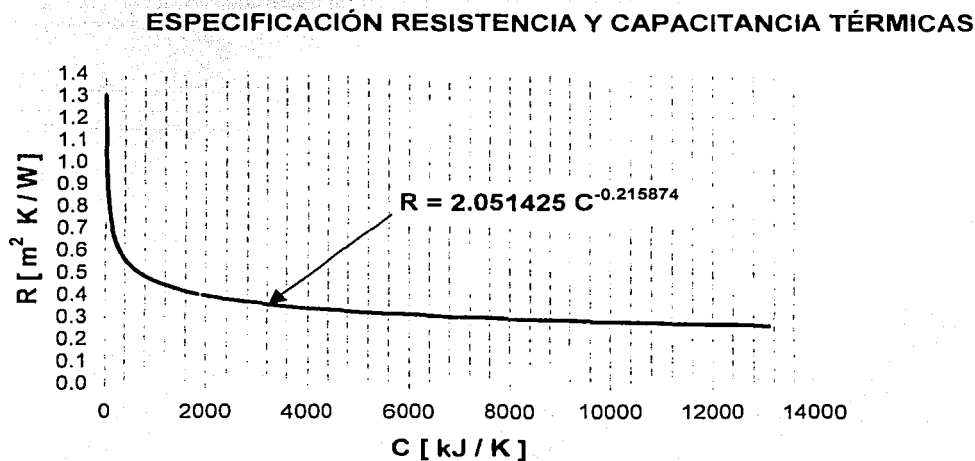


Figura 6.1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

¹⁵ Considerando que la diferencia promedio de temperaturas entre el exterior y el interior es de 8.23 [K] y los coeficientes de transferencia de calor por convección son los mínimos en convección libre ($h_i = h_e = 2 \text{ [W / m}^2 \text{ K]}$).

4.- Para diferencias de temperatura entre el exterior y el interior del módulo celular menores a 9 [K] ($T^* < 9$ [K]), la capa de poliuretano de 1" de espesor (cuyo valor "R" es 1.257 [$m^2 K / W$]) reduce en mayor medida la ganancia de calor del módulo que la placa térmica de 10 cm de espesor (cuyo valor "R" es 0.833 [$m^2 K / W$]). En cambio para diferencias de temperatura entre el exterior y el interior del módulo mayores a 9 [K] ($T^* > 9$ [K]), la placa térmica de 10 cm de espesor reduce en mayor medida la ganancia de calor del módulo que la capa de poliuretano de 1" de espesor (ver apartado 4.1.11).

Lo anterior se debe a que para $T^* < 9$ [K], la placa térmica depende principalmente de su resistencia térmica para disminuir la ganancia de calor del módulo celular. En cambio para (9 [K] $< T^* < 17.5$ [K])¹⁶, la resistencia y capacitancia térmicas de la placa, actúan conjuntamente para reducir la ganancia de calor del módulo. De lo anterior, se desprende el hecho que una habitación 100% hecha con concreto celular debe de contar con un equipo de aire acondicionado, para lograr una T^* entre 9 [K] y 17.5 [K], y así obtener el ahorro de energía resultante. En caso que el módulo celular no cuente con unidad de aire acondicionado, y en consecuencia la T^* sea menor a 9 [K], se recomienda aislar térmicamente el techo del módulo con una capa de poliuretano de 1" de espesor y evitar el uso de la placa térmica de 10 cm de espesor.

El fenómeno anterior pone de manifiesto el hecho que la capacidad del concreto celular (material del cual está hecha la placa térmica), de reducir la ganancia de calor de una habitación, varía en función de la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior (T^*). Dicho comportamiento no pudo ser simulado satisfactoriamente por el modelo matemático desarrollado en el capítulo No. 5 (ecuación 5.23), dicho modelo pone de manifiesto que la capacidad del concreto celular, de reducir la ganancia de calor de una habitación, varía en función de la capacitancia y resistencia térmicas del material y del estado en el cual se

¹⁶ La máxima diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior registrada en un módulo celular, ocurrió el día 13 de Julio a las 16:00 hrs y fue de 17.5 [K].

transfiere el calor (transitorio o permanente). Lo anterior se debe a que para modelar el fenómeno en estudio se utilizó el número de Fourier, el cual no es función de T^* , sino que es función de: la difusividad térmica, del espesor del material y del tiempo.

Con base en el comportamiento experimental y la teoría desarrollada en el capítulo No. 5, se concluye que la capacidad del concreto celular, de reducir la ganancia de calor de una habitación, depende no solo del estado en que se transfiere el calor (transitorio o permanente), sino también de la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de la habitación (T^*). La combinación de la resistencia y la capacitancia térmicas del concreto celular pueden ser aprovechadas al máximo, para reducir la ganancia de calor de una habitación, si la transferencia de calor es en estado transitorio¹⁷ y la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior (T^*) fluctúa entre $9 [K]$ y $17.5 [K]$, por lo que el uso de un equipo de aire acondicionado es una obligación en habitaciones 100% edificadas con concreto celular.

La necesidad de controlar la temperatura interior de una habitación es razón suficiente para utilizar un equipo de aire acondicionado. Sin embargo, el uso de cierto tipo de material de construcción (concreto celular) para edificar una habitación, no debería de obligar al usuario a utilizar un equipo de aire acondicionado, ya que el uso de dicho material no es una necesidad. El anterior es motivo suficiente para desaconsejar el uso del concreto celular, ya que el usuario deberá de correr con los gastos de construcción de su casa y además con los gastos derivados del uso del equipo de aire acondicionado (adquisición, instalación y mantenimiento). Los gastos derivados del uso del equipo de aire acondicionado no tendría que ser realizado, de manera obligada, si el usuario recurriera a los aislantes térmicos tradicionales (poliuretano y poliestireno) para aislar su casa.

¹⁷ La variación de la temperatura exterior de una habitación, en función de la hora del día, garantiza que la transferencia de calor a través de los muros y el techo de la habitación sea siempre en estado transitorio.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea, finalmente, dar las gracias a la empresa y a las personas que tan generosamente proporcionaron la información y ayuda que se necesitó para realizar esta tesis, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible.

Un sincero reconocimiento a:

CONTEC MEXICANA, S.A. de C.V

Ing. Francisco Madla de la Garza

Ing. Adrián Valera Negrete

Hiram Francisco Cáceres Lucero.

BIBLIOGRAFÍA

Capítulo No. 1

Libros.

1. MANUAL TÉCNICO, 2ª edición, por CONTEC MEXICANA, México 1997.

Capítulo No. 2

Libros.

1. Mills Anthony F., Transferencia de Calor, McGraw-Hill/Irwin, Colombia 1997.
2. MANUAL TÉCNICO, 2ª edición, Por CONTEC MEXICANA, México 1997.
3. Groover Mikell P., Fundamentos de Manufactura Moderna (Materiales, Procesos y Sistemas), Prentice Hall, México 1997.

Tesis.

1. Silva Lourdes y Granados Héctor, Empleo de aislamientos térmicos en techos de casa habitación en climas cálidos para el ahorro de energía en los equipos de aire acondicionado.

Capítulo No. 3

Libros.

1. El Estudio Experimental Comparativo de Aislamiento Térmico, por CONTEC MEXICANA, México 1998.
2. MANUAL TÉCNICO, 2ª edición, por CONTEC MEXICANA, México 1997.
3. White Frank M., Mecánica de Fluidos, McGraw-Hill, México 1988.

Sitios de Internet.

1. Investigación y Ciencia
<http://purace.ucauca.edu.co>

Capítulo No. 4

Libros.

1. Mills Anthony F., Transferencia de Calor, McGraw-Hill/Irwin, Colombia 1997.
2. Serway Raymond A., Física (Tomo No. 1), 3ª edición revisada, McGraw-Hill, México 1993.
3. Walpole Ronald E. y Myers Raymond H., Probabilidad y Estadística, cuarta edición (tercera edición en español), McGraw-Hill, México 1992.
4. Nahmias Steven, Análisis de la Producción y las Operaciones, primera edición en español (tercera edición en inglés), CECSA, México 1999.
5. Besterfield Dale H., Control de Calidad, cuarta edición, Prentice Hall, México 1995.

Capítulo No. 5

Libros.

1. Mills Anthony F., Transferencia de Calor, McGraw-Hill/Irwin, Colombia 1997.
2. Serway Raymond A., Física (Tomo No. 2), 3ª edición revisada, McGraw-Hill, México 1993.
3. Jaramillo Morales Gabriel A. y Alvarado Castellanos Alfonso, Electricidad y Magnetismo, Trillas, México 1990.
4. Mata Hernández Gloria, Prácticas de Laboratorio de Medición e Instrumentación, U.N.A.M., Facultad de Ingeniería.