

**ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL**

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

“ DISEÑO Y CONSTRUCCION DE EQUIPOS PARA LA DETERMINACION DE CALOR ESPECIFICO, CONDUCTIVIDAD Y TRANSMITANCIA TERMICAS EN MATERIALES Y ELEMENTOS DE CONSTRUCCION ”

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentada por:

CARLOS IVAN MUÑOZ AGUILAR

1.987

Guayaquil - Ecuador

AGRADECIMIENTO

Al Ing. GUIDO FRANCO MUJICA, Director de Tesis, cuya valiosa colaboración hizo posible la realización del presente trabajo.

Al CICYT por su apoyo económico y logístico para el desarrollo de esta tesis.

Al Ing. JORGE DUQUE R. director del proyecto y amigo.

Al Sr. FERNANDO ESCOBAR por su ayuda desinteresada y cordial durante el desarrollo del presente trabajo.

D E D I C A T O R I A

A mis PADRES y HERMANOS

A mi HIJA.

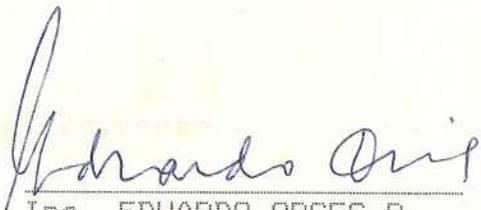
DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Carlos', is written over a horizontal dotted line.

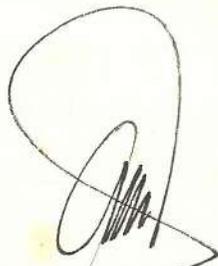
CARLOS IVAN MUÑOZ AGUILAR



Ing. EDUARDO ORCES P.
DECANO DE LA FACULTAD
DE ING. MECANICA



Ing. GUIDO FRANCO M.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. GALO BETANCOURT S.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Ing. FRANCISCO ANDRADE
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

RESUMEN

El presente trabajo ha sido concebido con el objeto de diseñar y construir los equipos necesarios para poder determinar algunas de las propiedades térmicas de materiales de construcción usados en nuestro medio.

Se han construido equipos para la determinación de tres propiedades, que juegan un papel importante en el establecimiento de las condiciones óptimas para obtener confort térmico de viviendas y sobre todo de las no tradicionales.

La primera propiedad es el calor específico medio, medido sobre un rango de temperatura específico, mediante el clásico método de mezcla, utilizando como fluido calorimétrico el agua. El rango de temperatura es de 20°C a 100°C.

La segunda propiedad es la conductividad térmica determinada mediante el método de la placa caliente resguardada. La máxima temperatura de operación de este equipo es de 80°C.

La tercera propiedad es la transmitancia térmica a través de paredes; se la determina mediante el método de la caja caliente resguardada, que ha sido diseñada para trabajar sobre paredes con sus dimensiones reales.

INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN.....	6
INDICE GENERAL.....	8
INTRODUCCION.....	12
CAPITULO I	
GENERALIDADES	
1.1 DEFINICION DE PROPIEDADES A DETERMINARSE.....	14
1.1.1 Calor Específico Medio.....	14
1.1.2 Conductividad Térmica.....	15
1.1.3 Conductancia Térmica.....	16
1.1.4 Coeficiente de Superficie o de Transferencia de calor por Convección.....	17
1.1.5 Transmitancia Térmica o Coeficiente Total de Transferencia de Calor.....	17
1.2 NORMAS SELECCIONADAS.....	18
CAPITULO II	
DISEÑO DE CALORIMETRO	
2.1 ALCANCE Y FUNDAMENTOS.....	21

2.2 DEFINICIONES.....	22
2.2.1 Cantidad Equivalente de Agua (E).....	22
2.2.2 Capacidad Térmica ($M_e C_e$).....	22
2.2.3 Calor específico medio.....	23
2.3 DISEÑO Y SELECCION DE EQUIPOS.....	23
2.3.1 Calorímetro y Accesorios.....	23
2.3.2 Termómetro Diferencial Beckmann.....	24
2.3.3 Cápsula, Probeta estándar y Termocupla.....	24
2.3.4 Calentador.....	26
2.3.5 Potencia necesaria para el Calentador.....	27
2.4 PROCEDIMIENTO.....	29
2.4.1 Especímenes de Prueba.....	29
2.4.2 Determinación de la cantidad equivalente de agua y capacidad térmica de la cápsula...	30
2.4.3 Determinación del Calor Específico.....	30
2.5 CALCULOS Y REPORTE.....	32
2.5.1 Cálculo de la Temperatura de la mezcla (T_m) y temperatura del calorímetro (T_c).....	32
2.5.2 Cálculo de la cantidad equivalente del agua.	32
2.5.3 Cálculo de la capacidad Térmica de la cápsula.....	33
2.5.4 Cálculo del calor Específico del espécimen..	34
2.5.5 Presentación de Resultados.....	34
2.6 ANALISIS DE ERRORES.....	36
2.7 CALIBRACION Y DETERMINACION DEL CALOR ESPECIFICO DE UN MATERIAL.....	46

CAPITULO III

DISEÑO DE LA PLACA CALIENTE RESGUARDADA

3.1 ALCANCE.....	49
3.2 DISEÑO Y SELECCION DE EQUIPOS.....	50
3.2.1 Unidad de calentamiento.....	50
3.2.2 Potencia requerida para el calentador central.....	53
3.2.3 Unidad de enfriamiento.....	55
3.2.4 Flujo de agua requerido para el enfriamiento	56
3.3 PROCEDIMIENTO, CALCULOS Y REPORTE.....	57
3.3.1 Especímenes de Prueba.....	57
3.3.2 Determinación de la conductividad Térmica...	58
3.3.3 Cálculos.....	59
3.3.4 Presentación de Resultados.....	60
3.4 CALIBRACION Y DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE UN MATERIAL.....	63
3.5 ANALISIS DE ERRORES.....	64

CAPITULO IV

DISEÑO DE CAJA CALIENTE RESGUARDADA

4.1 ALCANCE.....	68
4.2 DISEÑO Y SELECCION DE EQUIPOS.....	69
4.2.1 Consideraciones generales.....	69
4.2.2 Caja de medición.....	70
4.2.3 Caja de Resguardo.....	73
4.2.4 Caja Fría.....	75

4.2.5 Potencia requerida.....	76
4.3 PROCEDIMIENTO, CALCULOS Y REPORTE.....	82
4.3.1 Especímenes de Prueba.....	82
4.3.2 Pérdidas de calor a través de las paredes de la caja de medición.....	83
4.3.3 Determinación de los coeficientes de superficie h_o y h_i	84
4.3.4 Determinación de la Transmitancia térmica U.	85
4.3.5 Presentación de Resultados.....	86
4.4 CALIBRACION Y DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES h_o , h_i y U DE UN MATERIAL.....	92
4.5 ANALISIS DE ERRORES.....	93
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
APENDICE.....	102
RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	103
PLANOS.....	107
BIBLIOGRAFIA.....	120

INTRODUCCION

En el Ecuador desde hace mucho tiempo atrás, se ha venido trabajando con datos de propiedades de materiales dados por tablas, las cuales son elaboradas en otros países y se carece, por lo tanto, de datos de propiedades de materiales de construcción utilizados en nuestro medio.

El objeto de nuestro trabajo consiste en construir los equipos que sirvan para la determinación del calor específico medio, conductividad térmica y transmitancia térmica, y elaborar el procedimiento para el cálculo de estas propiedades.

Al comparar los datos dados por algunas tablas, como por ejemplo la ASHRAE y General Electric, se nota que existe una pequeña discrepancia en dichos valores, la cual es debida entre otras causas a las condiciones de cada prueba, tales como temperatura, humedad ambiente y presión de trabajo; de tal manera que existe entonces la necesidad de obte-

ner tales propiedades bajo condiciones similares a las de empleo del material en nuestro medio.

El presente trabajo se desarrollará bajo la siguiente forma:

I) Generalidades (definición de propiedades); II) Diseño de calorímetro; III) Diseño de placa caliente resguardada; IV) Diseño de caja caliente resguardada, y Conclusiones y Recomendaciones.

De las observaciones efectuadas en la calibración de los equipos se concluyó que su operación es sencilla y se pueden obtener valores de alta confiabilidad para el caso del calorímetro y la placa caliente resguardada, y una confiabilidad aceptable para los valores obtenidos en la caja caliente resguardada. Asimismo se verificó la gran influencia que tiene sobre los valores obtenidos, la exactitud con que se realicen las mediciones de temperatura.

Es de indicar que el instrumental utilizado es el existente en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica, tratando siempre de cumplir con las normas dadas por la ASTM. Los equipos fueron construidos en la ESPOL y están disponibles para la realización, en el futuro, de un estudio sistemático sobre materiales de construcción típicos de nuestro medio, utilizando los mismos equipos o mejorados.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 DEFINICION DE LAS PROPIEDADES A DETERMINARSE

1.1.1 Calor Específico Medio

Se define como la cantidad de calor requerida para cambiar la temperatura de una unidad de masa, de una sustancia, en un grado, medido como la cantidad promedio sobre un rango de temperatura específico. La unidad de medición es el $\text{KJ/Kg}^\circ\text{C}$.

Es una propiedad esencial de un material aislante térmico, cuando este es usado bajo condiciones de flujo de calor no estacionario o transiente. Es una parte del parámetro de difusividad térmica, el cual gobierna la razón de difusión de calor a través del aislamiento. Es una propiedad básica

de todas las sustancias y depende sobre todo de la composición química, temperatura y presión.

1.1.2 Conductividad Térmica

Se define, bajo condiciones de estado estable, como la razón de flujo de calor en una unidad de tiempo a través de una unidad de área de una placa de una unidad de espesor que tiene una unidad de gradiente de temperatura entre sus caras, en la dirección perpendicular a una superficie isotérmica. En el sistema internacional se expresa en $W/m^{\circ}C$ y para una placa plana está dada por:

$$K = \frac{Q * L}{A(T_1 - T_2)} \quad (1)$$

donde: K = conductividad termica [$W/m^{\circ}C$]

Q = flujo de calor normal al área A [W]

L = espesor de la placa [m]

T_1 = temperatura de la cara caliente [$^{\circ}C$]

T_2 = temperatura de la cara fría [$^{\circ}C$]

A = área de la superficie isotérmica [m^2]

Mientras que la razón a la cual se transfiere calor a un cuerpo es dependiente solamente de la conductividad y los otros factores anotados, el

incremento en la temperatura que este calor producirá, variará con el calor específico C_p y la densidad δ del cuerpo. La constante que toma en cuenta esto fue llamada por Kelvin como difusividad térmica σ y está dada por la relación:

$$\sigma = \frac{K}{C_p \delta} \quad (2)$$

La expresión para la conductividad es válida para materiales homogéneos y su valor no cambia al variar el espesor del material.

1.1.3 Conductancia Térmica

Se define, bajo condiciones de estado estable, como la razón de flujo de calor a través de un cuerpo, entre dos superficies isotérmicas especificadas, por unidad de área y por unidad de diferencia de temperatura de las superficies isotérmicas bajo consideración; está dada por:

$$C = \frac{Q}{A(T_1 - T_2)} \quad (3)$$

donde C es la conductancia térmica en $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$. La expresión es válida tanto para materiales homogéneos como materiales heterogéneos.

1.1.4 Coefficiente de Superficie o de Transferencia de Calor por Convección

Es la relación de intercambio de calor, en estado estacionario, entre la superficie y su medio ambiente exterior. Está expresado en términos de la razón de flujo de calor por los efectos combinados de radiación, conducción y convección, por unidad de área de una superficie particular y por una unidad de diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido. Está dado por:

$$h = \frac{Q}{A(T_n - T_2)} \quad (4)$$

donde: h = coeficiente de superficie exterior
[W/m² °C]

T_n = temperatura del fluido [°C]

T_2 = temperatura de la superficie [°C]

1.1.5 Transmitancia Térmica

También conocida como coeficiente total de transferencia de calor, se define como la razón de flujo de calor por unidad de área, bajo condiciones de estado estable, a través de un cuerpo, por una unidad de diferencia de temperatura del aire o

fluido en los dos lados de dicho cuerpo; está dado por:

$$U = \frac{Q}{A(T_h - T_c)} \quad (5)$$

donde U = transmitancia térmica [$W/m^2 \cdot ^\circ C$], y puede ser expresada en función de los coeficientes de superficie y la conductancia térmica como:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{l}{C} + \frac{1}{h_o} \quad (6)$$

donde: h_o = coeficiente de superficie exterior

h_i = coeficiente de superficie interior

1.2 NORMAS SELECCIONADAS

Las normas fueron obtenidas de "The American Society for Testing and Materials" (ASTM) la cual presenta un conjunto de normas completas para la determinación experimental de las propiedades físicas de materiales y elementos de construcción. Las normas seleccionadas fueron las siguientes: (1)

- a) ASTM C 351-61

Standard Method of test for

MEAN SPECIFIC HEAT OF THERMAL INSULATION

(Método estándar de prueba para calor específico medio de aislamiento térmico).

b) ASTM C 177-71

Standard method of test for
THERMAL CONDUCTIVITY OF MATERIALS BY MEANS OF
THE GUARDED HOT PLATE

(Método estándar de prueba para conductividad térmica por medio de la placa caliente resguardada).

c) ASTM C 236-66

Standard Method of test for
THERMAL CONDUCTANCE AND TRANSMITTANCE OF
BUILT-UP SECTIONS BY MEANS OF THE GUARDED
HOT BOX

(Método estándar de prueba para conductancia y transmitancia térmicas de secciones de construcción por medio de la caja caliente resguardada).

La exactitud requerida por las normas ASTM es alta, lo que exige disponer de una instrumentación adecuada para cumplir con estos requerimientos. La gran mayoría del instrumental existente en los laboratorios cumple con estas exigencias, sin embargo, en los casos en

que ésto no se cumple, el error que puede cometerse en las mediciones tendrá poca relevancia para los propósitos prácticos en los que estos equipos pudieran ser utilizados.

CAPITULO II

DISEÑO DE CALORIMETRO

2.1 ALCANCE Y FUNDAMENTOS

El método cubre la determinación del calor específico medio de materiales aislantes. Los materiales a ser probados deben ser homogéneos y estar compuestos de materia en estado sólido.

Se emplea el clásico método de mezcla, el cual consiste esencialmente en la adición de una masa conocida de material a alta temperatura, a una masa de agua conocida a menor temperatura y la determinación de la temperatura de equilibrio de la mezcla que se obtiene. El calor absorbido por el agua y el vaso que la contiene puede ser calculado y este valor igualado a la expresión para el calor específico del material caliente. De esta ecuación el calor específico del material, cuyo valor se desconoce, puede ser calculado.

Este método provee de una herramienta valiosa para obtener calores específicos de materiales con una adecuada exactitud.

El fluido calorimétrico usado es el agua, la que nos da un rango de temperatura de trabajo entre 20°C y 100°C. Sustituyendo el fluido calorimétrico, el rango de temperatura de trabajo puede ser cambiado a voluntad. Un diagrama esquemático del conjunto se muestra en el plano N° 1.

2.2 DEFINICIONES

2.2.1 Cantidad Equivalente de Agua (E)

Es la masa de agua que requiere de la misma cantidad de calor como el dado por el cuerpo de tal manera que su temperatura cambie en igual magnitud.

2.2.2 Capacidad Térmica (MC)

Es la cantidad de calor necesario para cambiar la temperatura de un cuerpo en un grado. Para un cuerpo de material homogéneo es igual al producto de la masa y el calor específico. Para un

cuerpo de material no homogéneo es igual a la suma de los productos de masa y calor específico de los constituyentes individuales; en el sistema internacional tiene las unidades de $\text{KJ}/^\circ\text{C}$.

2.2.3 Calor Específico Medio (C_p)

Como ya se definió en la sección 1.1.1, es la cantidad de calor requerido para cambiar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado, medido como la cantidad promedio sobre un rango de temperatura específico; sus unidades en el sistema internacional son $\text{KJ}/\text{Kg}^\circ\text{C}$.

2.3 DISEÑO Y SELECCION DE EQUIPOS

2.3.1 Calorímetro y Accesorios

Como calorímetro se utiliza un frasco Dewar (termo) de boca ancha, de 750 c.c. de capacidad, cubierto en su parte superior con un material aislante, en el cual se practicó un agujero para que pueda pasar el termómetro diferencial Beckmann.

Para asegurar la menor influencia de la temperatura del cuarto en que se va a trabajar, la cual

debe mantenerse lo más estable que sea posible, el termo está recubierto en su parte lateral con lana de vidrio y colocado dentro de una pequeña caja de madera sin fondo; para mantener la temperatura uniforme en toda la masa de agua se utiliza un agitador magnético con control de velocidad.

2.3.2 Termómetro diferencial Beckmann

La norma recomienda que el incremento de temperatura en el agua durante la prueba sea medida con una resolución de por lo menos 0.01°C . Se utiliza para esto un termómetro diferencial Beckmann cuyo rango de medición es de 5°C y tiene una resolución de 0.01°C . Se debe calibrar el termómetro de tal manera que la lectura más baja corresponda a la temperatura del cuarto. Se utiliza una lupa para tomar las lecturas más fácilmente y con mayor exactitud.

2.3.3 Cápsula, Probeta Estándar y Termocupla

La cápsula está hecha en bronce, con tapa removible y con una cavidad en ella para alojar una termocupla. La cápsula es hermética, de tal modo que se asegura que no exista filtración de agua

hacia la muestra; esto se lo consigue con una junta tórica de caucho colocada entre la tapa y el cuerpo de la cápsula.

Las dimensiones de la cápsula están dadas en el plano N^o 2 y su espesor máximo es de 0.38 m.m., para que el valor de la capacidad térmica de la cápsula no exceda de 10.5×10^{-3} KJ/°C; el volumen de la cápsula es de 25.7 c.c.

La probeta estandar es de cobre electrolítico y sus dimensiones están dadas en el plano N^o 2. El valor de su calor específico es usado como estandar para determinar la cantidad equivalente de agua (E) del termo y sus accesorios. Para el rango de temperatura cubierto en esta prueba (20 a 100°C), el calor específico medio del cobre electrolítico es de 0.3897 KJ/Kg°C.

Debido a que en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica existen medidores de temperatura calibrados para termocupla tipo J, se utiliza este tipo de termocupla; este tipo utiliza alambre de hierro como positivo y uno de constantán como negativo; para un rango de temperaturas de 40°C - 100°C, tiene un alto valor de fuerza

electromotriz (fem), lo cual la hace muy sensible a pequeños cambios de temperatura, que es lo que recomienda la norma ASTM. La exactitud de los medidores de temperatura utilizados es de 0.1°C .

2.3.4 Calentador

Como se muestra en el plano N^o 3, el calentador está construido sobre un tubo de bronce de 38 m.m. de diámetro y 254 m.m. de longitud, cubierto con papel de asbesto de 1.6 m.m. de espesor; sobre éste va enrollado alrededor de 60 vueltas de alambre laminado de nicrom.

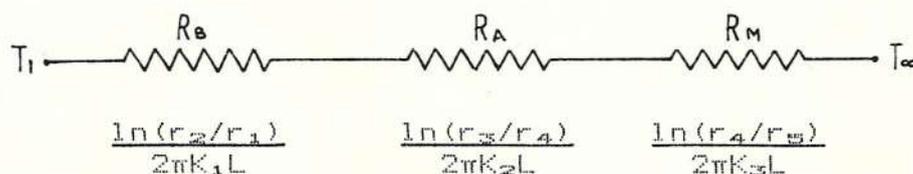
Aislando el conjunto se tiene primero una capa de asbesto de 10 m.m. de espesor y esto va alojado en un cilindro de madera hueco de 15 m.m. de espesor (se utiliza madera por tener baja conductividad térmica y además sirve como elemento de soporte para el conjunto).

La temperatura del calentador se la controla primero ajustando el voltaje de salida de un transformador de voltaje variable (variac), consiguiendo de esta manera una pequeña variación con respecto a la temperatura deseada (100°C). Para mini-

mizar las fluctuaciones que pudieran resultar, se utiliza un controlador de temperatura cuya salida está en serie con la bobina de un contactor conectado al variac ajustado al voltaje seleccionado. De este modo se logra que la variación de la temperatura en el calentador o más específicamente de la cápsula con la muestra sea de $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

2.3.5 Potencia Necesaria para el Calentador

Refiriéndonos a la figura 1 y para un flujo de calor unidimensional a través de las múltiples secciones cilíndricas del calentador, se tiene la siguiente analogía eléctrica:



Los valores para las constantes son:

$r_1 = 17 \text{ m.m.}$	$K_1 = 83 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
$r_2 = 19 \text{ m.m.}$	$K_2 = 0.161 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
$r_3 = 30 \text{ m.m.}$	$K_3 = 0.166 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
$r_4 = 45 \text{ m.m.}$	$T_1 = 100^\circ\text{C}$
$L = 254 \text{ m.m.}$	$T_\infty = 25^\circ\text{C}$

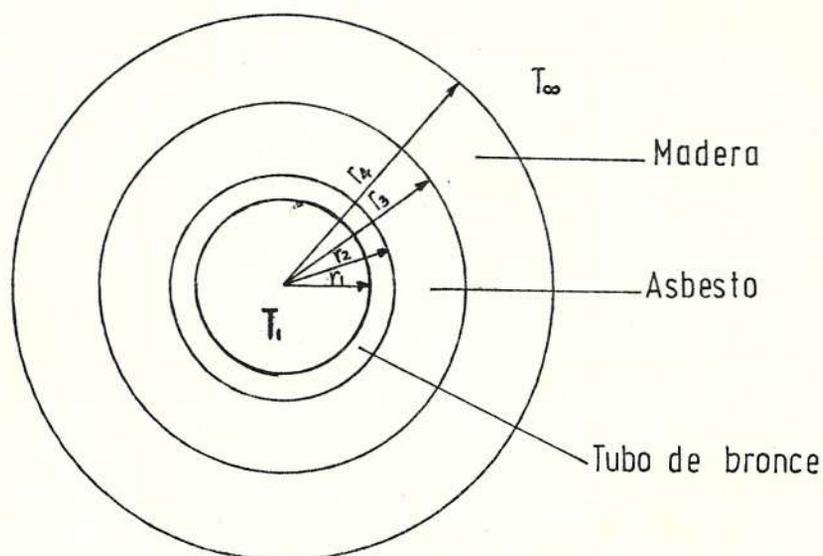


Fig 1. Vista seccional del calentador

Entonces se tiene que el calor transmitido a través del cilindro será:

$$Q = \frac{2\pi L(T_1 - T_\infty)}{\frac{\ln(r_1/r_2)}{K_1} + \frac{\ln(r_3/r_4)}{K_2} + \frac{\ln(r_4/r_5)}{K_3}} \quad (7)$$

$$Q = 22.66 \text{ W}$$

Asumiendo una pérdida por los bordes del 5%, tenemos que la potencia necesaria al calentador es de 23.79 W. Como la resistencia total del devanado es de 53 Ω , por lo tanto el voltaje necesario a suministrarse, para mantener una temperatura en el centro del calentador de 100°C, es de 35.51 Voltios.

2.4 PROCEDIMIENTO

2.4.1 Especímenes de Prueba

Todos los especímenes deben ser secados a una temperatura constante entre los 105 a 120°C en una estufa, durante por lo menos 4 horas, dependiendo del contenido de humedad de la muestra, de tal manera que la humedad antes de la prueba sea mínima.

Se debe tener la mayor masa posible de material dentro de la cápsula, por lo que para materiales de baja densidad, como las maderas, se comprime previamente la muestra antes de introducirla en la cápsula.

Se pesa tanto la cápsula vacía como con el espécimen seco y comprimido, en una balanza de precisión, para de esta manera determinar el peso del espécimen a ser probado.

Debe tenerse cuidado de que la cápsula, con el espécimen dentro, quede bien sellada para que no haya la introducción de agua; la prueba se rechaza si el peso de la cápsula con el especi-

men después de la prueba aumenta en 0.001grs. y se evita que esto suceda cambiando la junta tórica de caucho por lo menos después de cada tres pruebas.

2.4.2 Determinación de la Cantidad Equivalente de Agua y la Capacidad Térmica de la Cápsula

Para la determinación de la cantidad equivalente del agua se sigue el mismo procedimiento que el descrito en la sección 2.4.3 para la determinación del calor específico, excepto que se sustituye la cápsula y el espécimen por la probeta estandar cuyo valor de calor específico es conocido.

Una vez hallada la masa equivalente de agua se obtiene la capacidad térmica de la cápsula, por el mismo procedimiento seguido en la sección 2.4.3 pero en este caso la cápsula entra al calorímetro completamente vacía.

2.4.3 Determinación del Calor Específico

Conocido el peso del espécimen a ser probado, se lo calienta hasta alcanzar una temperatura de

$100 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, manteniéndose a esa temperatura por lo menos durante 5 minutos. Cuando se alcanza el equilibrio térmico entre el calentador y la cápsula, se vierte en el termo 300 ± 5 grs. de agua destilada a 20°C (temperatura menor que la del medio ambiente para asegurar que exista una transferencia de calor desde el medio ambiente hacia el calorímetro), la cual se mantiene en agitación constante mediante el agitador magnético.

Es de mucha importancia que el termo se destape solamente en el momento de introducir la cápsula y que se mantenga la misma velocidad de agitación antes y durante la prueba, para que el calor ganado por el agua, por efectos de la agitación, sea constante.

Se registra la temperatura del calorímetro para un periodo de tiempo de 10 minutos, a intervalos de 1 minuto; inmediatamente antes del final del décimo minuto se destapa el termo, se introduce rápidamente la cápsula con el espécimen y se vuelve a tapar. Se toman lecturas para los 10 minutos siguientes a intervalos de 1 minuto.

Una vez terminada la prueba se pesa nuevamente la cápsula con el espécimen para verificar si no ha habido aumento de masa debido a introducción de agua.

2.5 CALCULOS Y REPORTE

2.5.1 Cálculo de la Temperatura de Mezcla (T_m) y Temperatura de Calorímetro (T_c)

En una gráfica temperatura de la mezcla vs. tiempo (Fig. 2) se determinan los valores de T_m y T_c por extrapolación. El intercambio térmico entre la cápsula y el calorímetro es proporcional a la diferencia de temperatura instantánea ($T_m - T_c$).

2.5.2 Cálculo de la cantidad de Agua Equivalente (E)

La cantidad de agua equivalente está dada por la siguiente relación:

$$E = \frac{M_r C_r (T_h - T_m)}{C_w (T_m - T_c)} - M_w \quad [\text{Kg}] \quad (8)$$

donde:

M_r = masa de la probeta estandar [Kg].

C_r = calor específico estandar = 0.3897 KJ/kg°C

T_h = temperatura de calentamiento de la probeta [°C].

T_m = temperatura de la mezcla [°C]

T_c = temperatura del agua antes de introducir la probeta [°C].

C_w = calor específico del agua = 4.1855 KJ/kg°C

M_w = masa del agua en el calorímetro [Kg]

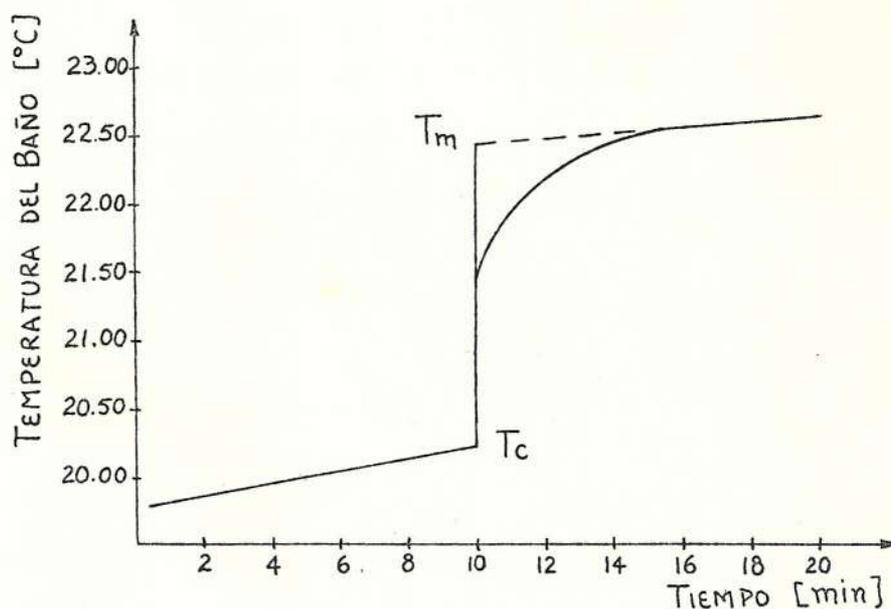


Fig. 2 Temperatura de la Mezcla vs. Tiempo

2.5.3 Cálculo de la capacidad térmica de la cápsula

$(M_c C_c)$.

Es calculada con una aproximación de una milésima mediante la siguiente relación:

$$M_c C_c = (M_w + E) C_w \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} \quad [\text{KJ}/^\circ\text{C}] \quad (9)$$

donde: T_h = temperatura de calentamiento de la cápsula [$^{\circ}\text{C}$].

T_c = temperatura del agua antes de introducir la cápsula, cuyo valor es el promedio de tres determinaciones.

2.5.4 Cálculo del Calor Específico del Especimen (C_p)

El calor específico medio es el promedio de los tres mejores valores de acuerdo con la sección 2.4.1, y cuyo valor está dado por la siguiente relación:

$$C_p = [(M_w + E)C_w \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} - M_c C_c] / M_m \quad (10)$$

donde: T_h = temperatura de calentamiento de la probeta y el especimen [$^{\circ}\text{C}$]

T_c = temperatura del agua antes de introducir el especimen [$^{\circ}\text{C}$]

2.5.5 Presentación de Resultados

Los datos y resultados de cada prueba son tabulados en una hoja de trabajo como la indicada en la fig. 3. El valor del calor específico de cada material probado, tomado como el promedio

Fig. 3.- HOJA DE TRABAJO PARA LA DETERMINACION DEL CALOR ESPECIFICO MEDIO DE MATERIALES AISLANTES

Método de Mezcla; Fluido calorimétrico Agua

Prueba No.....FECHA:.....Hora:.....
 ESPECIMEN:.....
 MASA INICIAL:.....Kgs. MASA FINAL:.....Kgs
 DESECADO si:.....no:.....Temperatura:.....°C
 COMPRIMIDO si:.....no:.....Carga:.....KPa
 TEMPERATURA AMBIENTE:.....°C HUMEDAD AMBIENTAL:.....%
 TEMPERATURA DEL AGUA:.....°C MASA DEL AGUA (M_w):.....Kgs

DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA

Antes de la Inmersión

En la Mezcla

Minuto	Temp. Beckmann T_c [°C]	Temp. Cápsula [°C]	Minuto	Temp. Beckmann T_m [°C]	Observaciones
1			11		
2			12		
3			13		
4			14		
5			15		
6			16		
7			17		
8			18		
9			19		
10			20		

$$C_r = 0.3897 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

$$C_w = 4.1855 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

$$M_r = 72.046 \text{ grs}$$

$$E = \dots\dots\dots\text{Kgs}$$

$$T_{c10} = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$$

$$M_c C_c = \dots\dots\dots\text{KJ/}^\circ\text{C}$$

$$T_{m10} = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$$

$$C_p = \dots\dots\dots\text{KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

de tres determinaciones, debe incluir además el rango de la temperatura de prueba y la densidad del material probado.

2.6 ANALISIS DE ERRORES

Se trata de encontrar o estimar la inexactitud total de un sistema de medición formado de un número de componentes individuales, cada uno de los cuales tiene una inexactitud individual conocida o estimada. Se supone que los instrumentos utilizados han sido calibrados y de esta manera el error sistemático reducido a cero por lo que los errores individuales se deben principalmente a errores de imprecisión o aleatorios (2).

El error absoluto en el cálculo de una magnitud cualquiera N , que es función de n variables independientes $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$; esto es:

$$N = f(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n) \quad (11)$$

está dado por:

$$E_n = N = \Delta\mu_1 \frac{\delta f}{\delta\mu_1} + \Delta\mu_2 \frac{\delta f}{\delta\mu_2} + \dots + \Delta\mu_n \frac{\delta f}{\delta\mu_n} \quad (12)$$

donde $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ son las cantidades medidas, $\Delta\mu_1, \Delta\mu_2, \dots, \Delta\mu_n$ los errores de estas medidas que pueden considerarse como límites absolutos en los errores.

El error relativo está dado por:

$$E_r = \frac{\Delta N}{N} * 100 = \frac{100E_a}{N} \quad (13)$$

Si los errores en las mediciones $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ son considerados como límites estadísticos tal como límites $\pm 3S$ (S desviación estandar de la muestra), errores probables o inciertos, entonces el error estadístico total está dado por:

$$E_{ar\text{mm}} = \sqrt{\frac{(\Delta\mu_1 \delta f)^2}{\delta\mu_1} + \frac{(\Delta\mu_2 \delta f)^2}{\delta\mu_2} + \dots + \frac{(\Delta\mu_n \delta f)^2}{\delta\mu_n}} \quad (14)$$

entonces el error total tiene el mismo significado que los errores individuales, si $\Delta\mu_1$ representa un límite $\pm 3S$ sobre μ_1 , entonces $E_{ar\text{mm}}$ representa un límite $\pm 3S$ sobre N y se puede esperar que el 99.7% de los valores de N caigan dentro de estos límites. Este error $E_{ar\text{mm}}$ es siempre menor que el error absoluto E_a .

Para la determinación del calor específico entran en juego las ecuaciones (8), (9) y (10).

$$C_p = [(M_w + E)C_w \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} - M_c C_c] / M_s \quad (10)$$

$$M_c C_c = (M_w + E)C_w \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} \quad (9)$$

$$E = \frac{M_r C_r (T_h - T_m)}{C_w (T_m - T_c)} - M_w \quad (8)$$

Los valores para C_w y C_r son valores estandar y son iguales a 4.1855 KJ/kg°C y 0.3897 KJ/kg°C respectivamente. La temperatura de la muestra (T_h) es medida con un termómetro digital calibrado para termocupla tipo J, cuyo error se lo puede considerar como $\pm 0.10^\circ\text{C}$ para el rango de temperaturas dado.

Las temperaturas instantáneas del baño (T_m) y (T_c) antes y después de la inmersión de la cápsula son obtenidas por extrapolación en una gráfica como la de la fig. 2 y la medición se la realiza con un termómetro diferencial cuya menor escala de lectura es de 0.01°C ; la lectura se la realiza con la ayuda de una lupa, por lo que se puede asumir que existe un error de apreciación de $\pm 0.002^\circ\text{C}$ y se desprecia el error cometido en la extrapolación.

La masa de agua M_w se la pesa en una balanza cuya mínima escala de lectura es de 0.1 grs. y se asume que el error que se comete es de ± 0.1 grs. La masa de la probeta estandar se la determina en una balanza electromecánica

cuya mínima escala de lectura es de 0.0001 gr. y se asume un error de ± 0.0001 grs.

Para el caso de la cantidad equivalente de agua E se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} M_r &= 72.0496 \pm 0.0001 \text{ grs.} & M_w &= 301.5 \pm 0.10 \text{ grs.} \\ C_r &= 0.3897 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C} & T_h &= 100.1^\circ\text{C} \pm 0.10^\circ\text{C} \\ C_w &= 4.1855 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C} & T_m &= 21.67^\circ\text{C} \pm 0.002^\circ\text{C} \\ & & T_c &= 20.02^\circ\text{C} \pm 0.002^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$E = \frac{(0.3897)}{4.1855} \frac{M_r (T_h - T_m)}{T_m - T_c} - M_w$$

$$E = 18.43 \text{ grs.}$$

$$\frac{\delta E}{\delta M_r} = (0.0931) \frac{(T_h - T_m)}{T_m - T_c} = 4.45$$

$$\frac{\delta E}{\delta M_w} = -1$$

$$\frac{\delta E}{\delta T_h} = (0.0931) \frac{M_r}{T_m - T_c} = 4.09 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta E}{\delta T_m} &= -(0.0931) M_r \left[\frac{(T_m - T_c)(-1) - (T_h - T_m)}{(T_m - T_c)^2} \right] \\ &= -199.69 \end{aligned}$$

$$\frac{\delta E}{\delta T_c} = (0.931) M_r (-1) \frac{(T_h - T_m)}{(T_m - T_c)^2} = -195.60$$

Entonces los errores absoluto y estadístico serán:

$$E_a = (4.45)(0.0001) + (1)(0.10) + (4.09)(0.10) \\ + (199.69)(0.002) + (195.6)(0.002)$$

$$E_a = 0.0004 + 0.10 + 0.41 + 0.40 + 0.39 \quad (16)$$

$$E_a = \pm 1.30 \text{ grs.} \quad (17)$$

$$E_{ar_{max}} = \pm 0.70 \text{ grs.} \quad (18)$$

Por lo tanto la cantidad equivalente de agua es de 18.43 grs. con un error máximo de ± 1.30 grs., pero probablemente menor a ± 0.70 grs. (3.8% error relativo).

En el cálculo de la capacidad calorífica de la cápsula se tiene lo siguiente:

$$M_w = 299.5 \pm 0.10 \text{ grs.} \quad T_h = 100.1 \pm 0.10^\circ\text{C}$$

$$E = 18.43 \pm 0.70 \text{ grs.} \quad T_m = 20.80 \pm 0.002^\circ\text{C}$$

$$C_w = 4.1855 \text{ KJ/}^\circ\text{C} \quad T_c = 20.23 \pm 0.002^\circ\text{C}$$

$$M_c C_c = 4.186 \times 10^{-3} \frac{\text{KJ}}{\text{gr}^\circ\text{C}} (M_w + E) \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} \quad (19)$$

$$Y = M_c C_c = 9.895 \times 10^{-3} \text{ KJ/}^\circ\text{C}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta M_w} = 4.1855 \times 10^{-3} \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} = 3.10 \times 10^{-5}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta E} = 4.1855 \times 10^{-3} \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} = 3.10 \times 10^{-5}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta T_c} = 4.1855 \times 10^{-3} \frac{(M_w + E)}{(T_h - T_m)} = -17.30 \times 10^{-3} \quad (20)$$

$$\frac{\delta Y}{\delta T_m} = 4.1855 \times 10^{-3} (M_w + E) \left[\frac{(T_h - T_m) - (T_m - T_c)}{(T_h - T_m)^2} \right]$$

$$= 17.71 \times 10^{-3}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta T_h} = - 4.1855 \times 10^{-3} (M_w + E) \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)}$$

$$= - 0.129 \times 10^{-3}$$

Los errores absoluto y estadístico serán:

$$E_a = (0.10)(3.1 \times 10^{-5}) + (0.70)(3.1 \times 10^{-5}) +$$

$$(0.002)(17.3 \times 10^{-3}) + (0.002)(17.71 \times 10^{-3}) \quad (21)$$

$$+ (0.10)(0.129 \times 10^{-3})$$

$$E_a = 0.31 \times 10^{-5} + 2.17 \times 10^{-5} + 3.54 \times 10^{-5} +$$

$$3.46 \times 10^{-5} + 1.29 \times 10^{-5} \quad (22)$$

$$E_a = \pm 0.108 \times 10^{-3} \text{ KJ/}^\circ\text{C} \quad (23)$$

$$E_{\text{arbitr}} = 0.056 \times 10^{-3} \text{ KJ/}^\circ\text{C} \quad (24)$$

Por lo tanto $M_c C_c = 9.895 \times 10^{-3} \text{ KJ/}^\circ\text{C}$ con un error probable de $\pm 0.056 \times 10^{-3} \text{ KJ/}^\circ\text{C}$ (0.6% de error relativo).

En el cálculo del calor específico de un material cualquiera (madera de balsa en este caso) se tiene los siguientes datos:

$$M_w = 300.7 \pm 0.10 \text{ grs.} \quad T_h = 100.1 \pm 0.10^\circ\text{C}$$

$$E = 18.43 \pm 0.70 \text{ grs.} \quad T_m = 20.94 \pm 0.002^\circ\text{C}$$

$$C_w = 4.186 \times 10^{-3} \text{ KJ/gr}^\circ\text{C} \quad T_c = 20.05 \pm 0.002^\circ\text{C}$$

$$M_b = 3.3754 \pm 0.0001 \text{ grs.}$$

$$M_c C_c = (9.895 \pm 0.056) \times 10^{-3} \text{ KJ/}^\circ\text{C}$$

$$C_p = [4.1855 \times 10^{-3} (M_w + E) \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} - M_c C_c] / M_m \quad (25)$$

$$C_p = 1.518 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

$$\frac{\delta C_p}{\delta M_w} = (4.186 \times 10^{-3}) \frac{(T_m - T_c)}{M_m (T_h - T_m)} = 0.139$$

$$\frac{\delta C_p}{\delta E} = (4.186 \times 10^{-3}) \frac{(T_m - T_c)}{M_m (T_h - T_m)} = 0.0139$$

$$\frac{\delta C_p}{\delta T_c} = (4.186 \times 10^{-3}) \frac{(M_w + E)}{M_m (T_h - T_m)} = -5.00 \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta C_p}{\delta T_m} &= (4.186 \times 10^{-3}) \frac{(M_w + E) [(T_m - T_c) - (T_m - T_c)]}{M_m (T_h - T_m)^2} \\ &= 4.94 \end{aligned}$$

$$\frac{\delta C_p}{\delta T_h} = -(4.186 \times 10^{-3}) \frac{(M_w + E) (T_m - T_c)}{M_m (T_h - T_m)^2} = -0.056$$

$$\frac{\delta C_p}{\delta M_c C_c} = -\frac{1}{M_m} = -296.30$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta C_p}{\delta M_m} &= -[(4.186 \times 10^{-3}) (M_w + E) \frac{(T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} - M_c C_c] / M_m^2 \\ &= -449.87 \end{aligned}$$

Entonces los errores absoluto y estadístico serán:

$$\begin{aligned} E_m &= (0.0139)(0.10) + (0.0139)(0.70) \\ &+ (5.00)(0.002) + (4.94)(0.002) \\ &+ (0.056)(0.10) + (296.30)(0.056 \times 10^{-3}) \\ &+ (449.87)(0.0001) \end{aligned} \quad (27)$$

$$E_a = 0.0014 + 0.0097 + 0.010 + 0.010 + 0.0056 \\ + 0.017 + 0.045 \quad (28)$$

$$E_a = \pm 0.098 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C} \quad (29)$$

$$E_{arab} = \pm 0.051 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C} \quad (30)$$

Por lo tanto tenemos que $C_p = 1.518 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$ con un error probable de $\pm 0.051 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$ (3.4% de error relativo).

Del cálculo de errores expuesto se desprende lo siguiente:

- En la determinación de la cantidad equivalente de agua (Ec.8) se puede apreciar de las Ecs. (16) y (17) que el error cometido depende en su mayor parte del error que se comete en la medición de T_h , T_m y T_c . Si se disminuye el error o se aumenta la precisión en la medición de T_h , el error total disminuiría notablemente. Como el error en T_m y T_c es de apreciación, esta se disminuye en gran medida utilizando una lupa para su lectura.

El error total cometido es de 3.8%, con una probabilidad del 99.7%, error aleatorio que influye tanto en la determinación de la capacidad calorífica y el calor específico, y por lo tanto tiene que ser lo más bajo posible. En este caso el valor del error obtenido, con

los valores de los errores individuales asumidos, es aceptable.

- En la determinación de la capacidad calorífica de la cápsula (Ec.9) se puede notar de las Ec. (21) y (22) que el error cometido depende nuevamente del error que se cometa en la determinación de T_h , T_m y T_c , siendo necesario utilizar la lupa para una mejor apreciación y que la temperatura de la cápsula (T_h) se mantenga constante durante un tiempo antes de la prueba para asegurar una mayor estabilización del equipo.

El error total de la medición es de 0.6% y la aportación del error de la cantidad equivalente de agua en el error total es significativa y es de aproximadamente 20% del error total.

- En la determinación del error en el calor específico (Ec.10) y en este caso particular el calor específico de la balsa se puede apreciar de las ecuaciones (27) y (28) que la mayor aportación proviene de la determinación de la masa del espécimen M_s , por lo que resalta a la vista la necesidad de tener la mayor cantidad de masa del espécimen que sea posible, esto se logra comprimiendo previamente la muestra mediante una prensa manual. La masa M_s aparece en todo el grupo de

ecuaciones (26) como denominador y por lo tanto mientras mayor masa M_s se tenga menores serán las aportaciones de los errores de las mediciones al error total.

El error total en la medición del calor específico de la balsa es de 3.4% valor que es bastante elevado y se debe principalmente a la poca masa que se tiene, debido a la baja densidad del espécimen. La aportación en el error total del error cometido en la determinación de la cantidad equivalente de agua es de 10% que es un valor relativamente bajo, pero significativo. La aportación del error cometido en la determinación de la capacidad calorífica es de 17.4%.

Se puede concluir que la mayor confiabilidad en la determinación del calor específico depende principalmente de la exactitud con que se tomen las lecturas de temperatura de la mezcla y de la cantidad de masa del espécimen que se tenga. De la exactitud con que se determine la cantidad de agua equivalente y la capacidad calorífica de la cápsula, dependerá en gran medida la mayor o menor confiabilidad de los valores de calores específicos obtenidos.

2.7 CALIBRACION Y DETERMINACION DEL CALOR ESPECIFICO DE UN MATERIAL

La temperatura deseada en el centro del calentador es de $100 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ por lo que se ajusta el voltaje de salida del variac hasta conseguir que la temperatura se mantenga dentro de estos límites. El voltaje de salida fue de aproximadamente 25 V (con variaciones debido a la variación en el voltaje de la línea de suministro 125 - 130 V). El ajuste fino se lo consigue como ya se dijo anteriormente mediante un controlador de temperatura; el tiempo de estabilización del calentador es de aproximadamente 20 minutos.

La temperatura del agua del calorímetro tiene que ser menor que la del medio ambiente (2 o 3 grados menos) para conseguir que la pendiente de la curva de calentamiento de la figura 3 sea positiva antes y después de la inmersión del espécimen. Para evitar encerrar el termómetro diferencial Beckmann con respecto a la temperatura ambiente de cada prueba, se anota la lectura inicial del termómetro diferencial y la temperatura inicial del agua utilizando un termómetro de precisión (ASTM 63C). La temperatura antes de la inmersión (T_c) es entonces la lectura inicial del termómetro de precisión más la diferencia entre la lectura del décimo minuto menos la lec-

tura inicial del termómetro diferencial. La temperatura inmediatamente después de la inmersión se la obtiene por extrapolación de la curva de calentamiento tomada como el valor en el décimo minuto de la recta tangente a la curva de calentamiento; se utiliza el método de regresión a partir del valor en que la curva de calentamiento tiende a ser una línea recta.

Por ejemplo en la determinación del calor específico de la balsa se tiene los siguientes datos:

$$E = 15.43 \text{ grs.}$$

$$M_c C_c = 9.895 \times 10^{-3} \text{ KJ/}^\circ\text{C}$$

$$C_w = 4.186 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$M_w = 300.7 \text{ grs.}$$

$$\text{Masa inicial} = 3.3754 \text{ grs.}$$

$$\text{Masa final} = 3.3800 \text{ grs.}$$

$$\text{Temperatura ambiente} = 28^\circ\text{C}$$

$$T_h = 100.1^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura inicial agua} = 19.90^\circ\text{C}$$

$$\text{Lectura inicial de termómetro diferencial} = 2.825^\circ\text{C}$$

$$\text{Lectura antes de inmersión} = 2.977^\circ\text{C}$$

$$\text{Lectura después de inmersión (extrapolación)} = 3.869^\circ\text{C}$$

$$T_c = 19.90 + (2.977 - 2.825) = 20.052^\circ\text{C}$$

$$T_m = 19.90 + (3.869 - 2.825) = 20.944^\circ\text{C}$$

$$M_w = 3.3754 \text{ gr.}$$

Entonces se tiene:

$$C_p = [4.186 \times 10^{-3} (300.7 + 18.43) \frac{(20.944 - 20.052)}{(100.10 - 20.944)} - 9.895 \times 10^{-3}] / 3.3754 \times 10^{-3}$$

$$C_p = 1.518 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

Este calor específico obtenido es el promedio de tres pruebas consistentes.

CAPITULO III

DISEÑO DE PLACA CALIENTE RESGUARDADA

3.1 ALCANCE

Este método cubre la determinación de la conductividad térmica de especímenes secos de materiales de aislamiento o construcción homogéneos, incluyendo aquellos en los cuales la radiación y convección contribuyen al transporte total de calor, cuya conductancia térmica no sea mayor que $60 \text{ W/m}^2\text{°C}$ y su espesor no exceda los 33 m.m. Los valores obtenidos se aplican solo para las condiciones ambientales de cada prueba. Por razones de construcción este equipo no puede ser operado a una temperatura de placa fría menor de 5°C .

La conductividad térmica de un material puede variar: a) por variación de las muestras, b) por presencia de humedad y c) cambiar con el tiempo o alta temperatura; por consiguiente la selección para un determinado valor

típico representativo de un material debe estar basada sobre la consideración de estos factores y una cantidad adecuada de pruebas de información.

3.2 DISEÑO Y SELECCION DE EQUIPOS

En los planos N^{os} 4 y 5 se muestra un diagrama esquemático del conjunto. El término placa caliente resguardada se aplica al equipo en conjunto, el cual incluye: una unidad de calentamiento, unidad de enfriamiento y el borde de aislamiento.

3.2.1 Unidad de Calentamiento



La unidad de calentamiento consiste en una sección central o sección de medición y una sección de resguardo. La sección de medición consiste a su vez de un calentador central y dos placas de superficie centrales o placas calientes. La sección de resguardo consiste de un calentador de resguardo, que rodea completamente al calentador central y dos placas de superficie de resguardo.

Las dimensiones de la unidad de calentamiento dependen de las dimensiones escogidas para la sección de medición. De acuerdo con la norma ASTM

se utiliza una sección central cuadrada de 100 m.m de lado, correspondiendo una sección de resguardo de 50 m.m. de ancho, estas medidas están en relación con el máximo espesor del espécimen a ser probado. La separación entre la placa central y la de resguardo es de 1.6 m.m.

Los núcleos para el calentador central y de resguardo son de bakelita (nombre comercial CELERON) de 1.6 m.m. de espesor. La bakelita soporta hasta una temperatura de 100°C sin quemarse ni deformarse y es lo que restringe el rango de temperaturas de prueba. Se utiliza alambre laminado de nicrom para los devanados tanto del calentador central como el de resguardo y su resistencia es de 34,5 Ω y 96 Ω respectivamente. Su arreglo se muestra en los planos N^o 6 y N^o 7.

NO

NO

Sobre los devanados va una placa de bakelita a cada lado, que actúan como separadores entre éstos y las placas de superficie centrales y de resguardo. Las placas de superficie son de aluminio de 3 m.m. de espesor cuya conductividad térmica es de 204 W/m°C, este valor no es tan alto como el del cobre (386 W/m°C) que es el recomendado por la norma ASTM, pero en cambio se puede trabajar con

mucha mayor facilidad consiguiendo además superficies más planas.

El conjunto de la unidad de calentamiento y los detalles de construcción en los espacios de separación de las áreas de medición y de resguardo se encuentran en el ~~plano~~^{DIBUJO} ~~Nº 6~~.

La medición de la temperatura se la hace mediante termocuplas tipo J y su arreglo se muestra en el ~~plano~~^{DIBUJO} ~~Nº 7~~; se tiene una termocupla por lado para la medición de temperatura de la placa central y dos termocuplas por lado para la medición de la temperatura de los bordes de la placa de resguardo. Las temperaturas son medidas con una exactitud de 0.1°C .

La diferencia de temperatura entre la placa central y la de resguardo no debe ser mayor de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ y esto se lo consigue utilizando un controlador de temperatura, que controla el voltaje de salida de un variac previamente ajustado a un voltaje predeterminado para alcanzar la temperatura deseada, (este voltaje es de aproximadamente 3 veces el voltaje seleccionado para el calentador central).

3.2.2 Potencia requerida para el calentador Central

La temperatura media de prueba para el tipo de materiales a ser probados debe estar entre 30 y 40°C; por lo que si tenemos una temperatura de placa fría de 25°C, la máxima temperatura que se requiere en la placa central estará entre 35 y 55°C, lo que da una diferencia de temperatura máxima de 30°C. Asumiendo que se prueba un material con una conductancia de 50 W/m²°C se tiene entonces que el calor máximo necesario para dos muestras a la vez (superior e inferior) es de:

$$Q = 2C*(T_1 - T_2)*A \quad (31)$$

$$Q = 30 \text{ [W]}$$

por lo tanto el voltaje máximo necesario, teniendo en cuenta que la resistencia total del calentador central es de 34.5 Ω, será de:

$$V_t = P*R \quad (32)$$

$$V_t = 32.2 \text{ [V] (máximo)}$$

La resistencia efectiva del área de medición, la resistencia total menos la resistencia de los terminales desde la fuente de poder hasta la en-

trada del calentador, es de 27.5 Ω . Entonces la potencia efectiva entregada al calentador central (área de medición) será:

$$P = \frac{V_t^2 * R_z}{R_t^2} \quad [\text{Watt}] \quad (33)$$

donde: V_t = voltaje total al calentador central

R_t = resistencia total del calentador y terminales (34.5 Ω)

R_z = Resistencia efectiva del calentador central (27.5 Ω).

Por lo tanto se tiene que la potencia es:

$$P = Q = 0.0231 * V_t^2 \quad [\text{Watt}] \quad (34)$$

En el calentador de resguardo se tiene una resistencia 96 Ω y el área es de 0.3 m² es decir 3 veces el área del calentador central, por lo que el calor necesario es 3 veces el requerido por el calentador central (90 W) y como la relación de resistencias es de aproximadamente 3, entonces el voltaje a seleccionarse deberá ser 3 veces el voltaje seleccionado para el calentador central. El voltaje es medido con una exactitud de 0.01V.

3.2.3 Unidad de Enfriamiento

La unidad de enfriamiento es básicamente un intercambiador de calor de placa plana construido en placa de aluminio de 3 m.m. de espesor, material resistente a la corrosión; consta de 5 canales con paredes de aluminio y las dimensiones están dadas de acuerdo a las de la unidad de calentamiento. Los detalles de construcción se muestran en los planos N^o 8 y N^o 9.

Se utiliza agua como fluido refrigerante que circula a través del intercambiador mediante una pequeña bomba centrífuga. Se mantiene constante la temperatura del agua del reservorio mediante la adición de hielo. Si se requiere de una menor temperatura en la placa fría se deberá añadir al agua una solución de etileno-glicol, para bajar el punto de congelamiento del agua e introducir un serpentín de refrigeración y un termostato para el control de la temperatura, con lo que se conseguiría temperaturas de placa fría de hasta 0°C o menor.

La temperatura de la placa fría se la mide en el centro del intercambiador mediante una termocupla

tipo J y con la misma exactitud que las anteriores.

Los intercambiadores de calor, muestras a ser probadas y la unidad de calentamiento, van cubiertas por los seis lados con lana de vidrio, que asegura que las pérdidas de calor a través de los bordes sean mínimas y además se mantiene una temperatura estable e independiente de la del medio ambiente durante el desarrollo de la prueba, manteniendo todos los componentes dentro de una caja de madera.

3.2.4 Flujo de Agua requerido para el enfriamiento

Si se supone un flujo de calor máximo de 120 W (30 W calentador central y 90 W calentador de resguardo), se tiene un tanque de 40 gal. de capacidad y se quiere que la temperatura del agua se incremente en 0.2°C como máximo, se tiene entonces que el tiempo necesario para que esto suceda es:

$$Q = \frac{mC_p \Delta T}{t} \quad (35)$$

$$t = \frac{\delta VC_p \Delta T}{q} \quad (36)$$

$$t = 280 \text{ seg}$$

Entonces el gasto de agua necesario será de:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{40 \text{ lts}}{280 \text{ seg}} \quad (37)$$

$$Q = 0.14 \text{ lts/seg}$$

$$\text{o } Q = 2.3 \text{ GPM}$$

3.3 PROCEDIMIENTO, CALCULOS Y REPORTE

3.3.1 Especímenes de prueba

Se requieren dos especímenes de 200 x 200 m.m. para cada material, con dimensiones lo más exactas posibles, de tal modo que se cubra toda la unidad de calentamiento. El espesor del espécimen tiene que ser lo suficientemente representativo para dar un promedio válido del valor de conductividad, y el espesor de las dos muestras tiene que ser igual. La superficie debe ser lo más plana y lisa posible de tal forma que asegure un buen contacto entre las superficies; además deben estar bien secos (libres de humedad).*

Se determina el peso del espécimen antes y después de la prueba, así como también el espesor y el volumen por mediciones hechas al final de la prueba, bajo condiciones de temperatura de equili-

brio. Se deben hacer entre 10 y 15 mediciones del espesor para cada espécimen, con el objeto de obtener un buen promedio.

3.3.2 Determinación de la Conductividad Térmica

Para cualquier prueba se debe tener presente que la diferencia de temperatura entre las superficies caliente y fría no sea menor que 5°C .

Se suministra energía a las resistencias de los calentadores y las fluctuaciones o cambios en la potencia de entrada no deben causar que el cambio de la temperatura de las superficies de las placas calientes, durante una hora dentro de un periodo de prueba, sea mayor que el 0.5% de la diferencia de temperatura entre las placas caliente y fría (en este caso máximo $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$). Se regula el flujo de agua a los intercambiadores de tal manera que la caída de temperatura a través de cada uno de los especímenes no difiera por más del 1% (en este caso $\pm 0.30^{\circ}\text{C}$ como máximo).

Una vez que se ha estabilizado el equipo, lo cual toma un tiempo de 1 a 3 horas dependiendo del material que se prueba, se mide las temperaturas

de las placas caliente y fría y el voltaje de entrada al calentador central. La norma ASTM recomienda que para una buena determinación de la conductividad térmica de un material, se deben tomar lecturas de temperatura a intervalos de por lo menos 30 minutos, de tal forma que los valores de la conductividad térmica para cuatro intervalos sucesivos no difieran en más del 1%.

HASTA 20 U

3.3.3 Cálculos

La conductividad térmica se la calcula por medio de la ecuación (1)

$$K = \frac{QL}{A(T_1 - T_2)} \quad (1)$$

donde: $A = 9.752 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$$Q = \frac{0.0231 V_t^2 L}{2} \quad (\text{dos especímenes}) \quad (38)$$

entonces se tiene:

$$K = \frac{1.184 V_t^2 L}{(T_1 - T_2)} \quad (39)$$

HASTA 1
2000

La densidad del material está dada por:

$$\delta = \frac{W_1}{V} \quad (40)$$

donde: δ = densidad [Kg/m³]

W_1 = peso de la muestra antes de la prueba
[Kg]

V = volumen durante la prueba [m³]

La ganancia de humedad del especimen se la calcula empleando la siguiente fórmula:

$$R_v = \frac{(W_2 - W_1) * 100 \%}{1000V} \quad (41)$$

donde: R_v = ganancia de humedad durante la prueba
porcentaje en volumen [%]

W_2 = peso de la muestra después de la
prueba [Kg]

Lo último se aplica principalmente para maderas las cuales son muy susceptibles a ganar humedad del ambiente, si están bien secas, o perder humedad si aun están húmedas.

3.3.4 Presentación de Resultados

Los datos y resultados de las pruebas son tabulados en una hoja de trabajo como la indicada en la fig. 4 en donde se incluye el espesor del material, densidad, ganancia de humedad, temperaturas

Fig. 4.- Continuación.....

$$T_1 = (T_7 + T_8)/2$$

$$T_2 = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6)/6$$

$$q = 0.0116 * V_t^2$$

$$K = 1.184 * \frac{L * V_t^2}{T_1 - T_2}$$

CONDUCTIVIDAD PROMEDIO

K =W/m°C

TEMPERATURA MEDIA DE PRUEBA $T_m = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$

Observaciones:

.....

.....

.....

de placas caliente y fría, voltaje, flujo de calor, conductividad térmica y temperatura media de prueba.

El valor de la conductividad térmica de cada material, tomado como el promedio para los especímenes probados, debe incluir la densidad del material, espesor y temperatura media de prueba.

3.4 CALIBRACION Y DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DE UN MATERIAL

Como ejemplo tomamos la determinación de la conductividad de una placa de asbesto-cemento, de 6.05 m.m. de espesor (promedio) y cuya densidad es de 1640 Kg/m³, pesa 409.5 grs. y no existe ganancia de humedad.

Se ajusta tentativamente el voltaje de entrada al calentador central hasta obtener una temperatura más o menos estable, entonces se fija el voltaje en 18.50 V lo que nos mantiene la temperatura en 47°C aproximadamente. A la par se ajusta el voltaje al calentador de resguardo en 56 V; se espera a que el sistema se estabilice (durante un periodo de tiempo de dos horas y media aproximadamente), manteniendo el flujo de agua constante y

controlando a su vez que la temperatura no varíe en más de 0.2°C.

Cuando el sistema se ha estabilizado se toman las lecturas de temperatura y voltaje. Los cuatro últimos conjuntos de valores se dan a continuación:

Temp. Placa Caliente T ₁ [°C]	Temp. Placa Fría T ₂ [°C]	Voltaje Cal. Cent. V _t [V]	ΔT [°C]	K*
47.0	27.0	18.65	20.0	0.125
47.1	27.0	18.60	20.1	0.123
47.0	26.9	18.54	20.1	0.122
47.0	27.0	18.68	20.0	0.125

$$* K = \frac{1.184 V_t^2 L}{(T_1 - T_2)}$$

por lo tanto el valor promedio de la conductividad es:

$$K = 0.124 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

3.5 ANALISIS DE ERRORES

Para la determinación de la conductividad térmica se utiliza la ecuación (1)

$$K = \frac{QL}{A(T_1 - T_2)} \quad (1)$$

donde Q está dado por la ecuación (38) en la cual se considera que se comete error solamente en la determinación del voltaje total V_t . El error dado por el fabricante de la fuente de poder es de ± 0.10 V, para todo el rango de voltaje de salida. El espesor L del espécimen se lo determina con un tornillo micrométrico cuya mínima escala es de 0.01 m.m. y por lo tanto el error se puede considerar como ± 0.005 m.m. El área A de la sección de medición o área de la placa caliente central se la determina con un calibrador cuya mínima escala de lectura es de 0.01 m.m., por lo que el error cometido en la medición de los lados se puede considerar como ± 0.01 m.m. y el error total al determinar el área como ± 1.98 m.m.². El error que se comete al medir las temperaturas es de $\pm 0.10^\circ\text{C}$.

Considerando los siguientes datos correspondientes a la placa de asbesto-cemento:

$$T_1 = 47.0 \pm 0.10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 27.0 \pm 0.10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$L = 6.05 \pm 0.005 \text{ m.m.}$$

$$A = 9752.0 \pm 1.98 \text{ m.m.}^2$$

$$V_t = 18.65 \pm 0.10 \text{ V}$$

se tiene:

$$K = \frac{0.0231 V_t^2 L}{2A(T_1 - T_2)} \quad (42)$$

$$K = 0.1246 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\frac{\delta K}{\delta V_t} = \frac{(0.0231)(2)V_t L}{2A(T_1 - T_2)} = 0.013$$

$$\frac{\delta K}{\delta L} = \frac{(0.231)V_t^2}{2A(T_1 - T_2)} = 0.021$$

$$\frac{\delta K}{\delta T_1} = - \frac{(0.231)V_t^2 L}{2A(T_1 - T_2)^2} = - 0.0062 \quad (43)$$

$$\frac{\delta K}{\delta T_2} = \frac{(0.231)V_t^2 L}{2A(T_1 - T_2)} = 0.0062$$

$$\frac{\delta K}{\delta A} = - \frac{(0.231)V_t^2 L}{2A^2(T_1 - T_2)} = - 0.013$$

Los errores absoluto y estadístico serán:

$$\begin{aligned} E_m &= (0.10)(0.013) + (0.005 \times 10^{-3})(0.021) + \\ &\quad + (0.10)(0.0062) + (0.10)(0.0062) + \\ &\quad + (1.98 \times 10^{-3})(0.013) \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} E_m &= 0.0013 + 1.03 \times 10^{-7} + 0.0006 + 0.0006 \\ &\quad + 2.5 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (45)$$

$$E_m = \pm 0.0025 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (46)$$

$$E_{\text{error}} = \pm 0.0016 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (47)$$

por lo tanto $K = 0.1246 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, con un error probable de $\pm 0.0016 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (1.3% error relativo).

Como se puede apreciar en las ecuaciones (44) y (45) la mayor contribución al error total la realizan las mediciones de voltaje y temperatura; en consecuencia es imprescindible que se utilice una fuente de voltaje de gran estabilidad y exactitud, para mantener bajo el error. De igual manera debe mantenerse la temperatura del agua de enfriamiento lo más estable que sea posible de tal forma que no varíe en más de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ durante el desarrollo de la prueba.

CAPITULO IV

DISEÑO DE CAJA CALIENTE RESGUARDADA

4.1 ALCANCE

Este método cubre la determinación de la conductancia térmica (C) y la transmitancia térmica o coeficiente total de transferencia de calor (U) de elementos de construcción como paredes, paneles, puertas y en general elementos de construcción no homogéneos. Puede ser aplicado para cualquier panel de construcción siempre y cuando tenga las medidas apropiadas para el equipo.

En paneles con espacios de aire interiores, se deberá tener un número entero de espacios dentro del área de medición, para prevenir el intercambio de aire entre el área de prueba y el área de resguardo.

4.2 DISEÑO Y SELECCION DE EQUIPOS

4.2.1 Consideraciones Generales

La caja caliente resguardada es un aparato diseñado para determinar U y C para paneles de construcción representativos y es, en esencia, un arreglo mediante el cual puede establecerse una diferencia de temperatura estable en el tiempo para asegurar un flujo de calor constante y temperatura estacionaria y medir estas cantidades con la exactitud deseada. Básicamente consta de tres partes: Caja de Medición, Caja caliente de Resguardo y Caja Fría. En el plano N^o 10 se muestra un diagrama esquemático del conjunto.

No representa mayor problema medir el área de la sección de medición y las temperaturas, sin embargo, la medición del flujo de calor Q , se tiene que hacerla de una manera indirecta utilizando para ello una caja de medición de cinco lados, colocada con su lado abierto contra el lado caliente del panel de prueba.

Idealmente todo el calor generado dentro de la caja de medición debería fluir a través del área

del panel de prueba, pero esto no es así y existe un intercambio de calor entre la caja de medición y el espacio circundante de la caja de resguardo. Por lo tanto, el flujo neto de calor a través del panel de prueba es la diferencia entre el calor generado menos el calor a través de las paredes de la caja de medición.

4.2.2 Caja de Medición

El tamaño de la caja de medición determina el tamaño mínimo de los otros elementos, y está en función del área de medición requerida para obtener un área de prueba representativa del panel.

Las dimensiones seleccionadas de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM C-236 son de un metro de alto por un metro de ancho; la profundidad es de 0.45 mts, cuyo espacio es suficiente para acomodar en su interior el ventilador y las resistencias requeridos para la circulación y calentamiento del aire interior como se muestra en el plano N^o 11.

Se requiere que la transferencia de calor a través de las paredes de la caja de medición sea mínima y

por ende, que la diferencia de temperatura interior y exterior de la caja también sea mínima, por lo que la caja en su totalidad está hecha de madera de balsa, pegada para asegurar estanqueidad y evitar la formación de aletas disipadoras de calor como podrían ser los clavos ($K_{\text{hierro}} = 59 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y $K_{\text{balsa}} = 0.059 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ es decir el hierro es mil veces mejor conductor que la balsa). Por tener la balsa un valor de conductividad térmica tan bajo, se reduce considerablemente el espesor de la pared de la caja. Los bordes de contacto de la caja de medición con el panel de prueba son biselados y con una ranura para alojar un sello de asbesto de 5 m.m.; el área de medición del panel es el área encerrada entre las líneas de centros de los sellos.

Una resistencia eléctrica de 10Ω va montada en un ducto cuadrado de madera plywood de 0.20 m. de lado y 6 m.m. de espesor, inmediatamente sobre un ventilador pequeño que asegura la circulación de aire hacia abajo, entre el bafle y el panel de prueba. Para evitar el choque de aire caliente contra la pared superior de la caja, va colocada una rejilla de madera y en la parte superior del bafle van montados dos álabes curvos para suavizar

la entrada de aire al espacio entre el baffle y el panel de prueba.

La temperatura de la caja de medición se la controla ajustando el voltaje de salida de un variac, al cual se conecta la resistencia eléctrica. La medición de la potencia eléctrica entregada a la caja se la realiza midiendo el voltaje y la corriente a la resistencia y el ventilador. El voltaje se lo mide con una exactitud de 0.1 V y la corriente con una exactitud de 1 mA.

Para medir el flujo de calor a través de las paredes de la caja de medición, existen 10 termocuplas colocadas, interior y exteriormente, en el centro de la superficie de cada uno de los cinco lados de la caja, conectadas en paralelo de tal modo que se mida la temperatura de superficie promedio exterior e interior.

La medición de la temperatura dentro de la caja de medición se la realiza en dos zonas: la temperatura del aire, con 4 termocuplas colocadas a 75 m.m. de la pared del panel de prueba y distribuidas para que abarquen igual superficie de medición. La segunda zona es la temperatura de la

superficie del panel, también con cuatro termocuplas dispuestas en la misma dirección que las anteriores. El arreglo y distribución de las termocuplas en la caja de medición se muestra en la figura 5.

4.2.3 Caja de Resguardo

Las dimensiones para la caja de resguardo están de acuerdo a las escogidas para la caja de medición y son de 1.60 mts. de ancho por 2.00 mts. de alto y por 0.65 mts. de profundidad; está construída en madera plywood de 15 m.m. de espesor cubierta interiormente con plancha de poliestireno de 15 m.m. de espesor de tal forma que se tiene una conductancia térmica relativamente baja por lo que la pérdida de calor a través de las paredes es pequeña.

Dos resistencias eléctricas están colocadas a la salida de dos ventiladores pequeños situados en vértices opuestos de la caja de resguardo, con lo que se consigue una buena circulación de aire caliente alrededor de la caja de medición y panel de prueba.

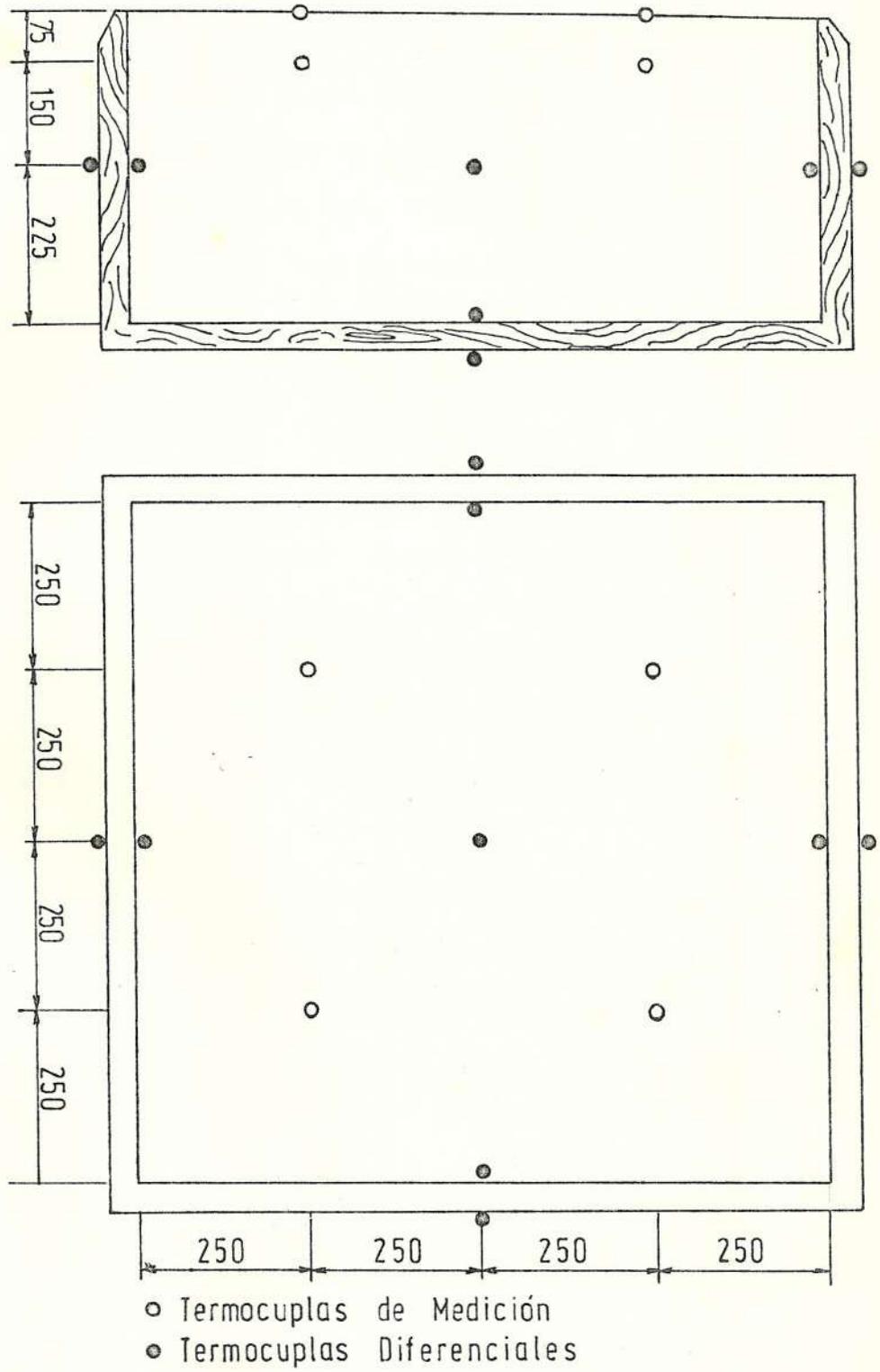


Fig. 5 Distribución de Termocuplas en Caja de Medición

La temperatura de la caja de resguardo se la controla primero ajustando el voltaje de salida de un variac, al cual están conectadas las resistencias y un segundo control, mucho más fino, se lo hace por medio de un controlador de temperatura conectado en serie con el variac.

Se tiene 4 termocuplas para la medición de la temperatura del aire, colocadas a 75 mm. de la pared del panel de prueba y dispuestas en cada uno de los cuatro lados de la superficie de resguardo.

4.2.4 Caja Fría

Las dimensiones de la caja fría son de 1.60 mts. de ancho por 2.00 mts. de alto y 0.45 mts. de profundidad. Su construcción es del mismo tipo que la de resguardo y se muestra en el plano N^o 12.

Por el espacio existente entre el panel de prueba y el baffle colocado a 150 m.m. de este, circula aire frío de abajo hacia arriba, proveniente de una unidad de aire acondicionado.

La temperatura se la controla ajustando el voltaje de salida de un variac, al cual están conectadas

cuatro resistencias colocadas a la salida del ducto de descarga del aire acondicionado.

Se tiene 4 termocuplas para la medición de la temperatura de la superficie fría y 4 termocuplas para la medición de la temperatura del aire, colocadas a 75 m.m. de la pared del panel de prueba. Estas termocuplas están distribuidas directamente opuestas a las termocuplas de la caja de medición.

Todas las temperaturas son medidas con termocuplas tipo J, con una resolución de 0.1°C y con un error de $\pm 0.10^{\circ}\text{C}$.

4.2.5 Potencia Requerida

Asumiendo que se tiene un panel de prueba formado de una placa de fibra vegetal-cemento de 6 m.m., poliuretano expandido de 32 m.m. ($\delta = 30 \text{ Kg/m}^3$), y placa de fibra vegetal-cemento de 6 m.m., bajo las siguientes condiciones de prueba (fig. 6):

- Temperatura de la caja fría = 18°C
- Temperatura exterior ambiente = 30°C
- Temperatura de la caja caliente = 40°C
- Temperatura de la caja protectora = 37°C

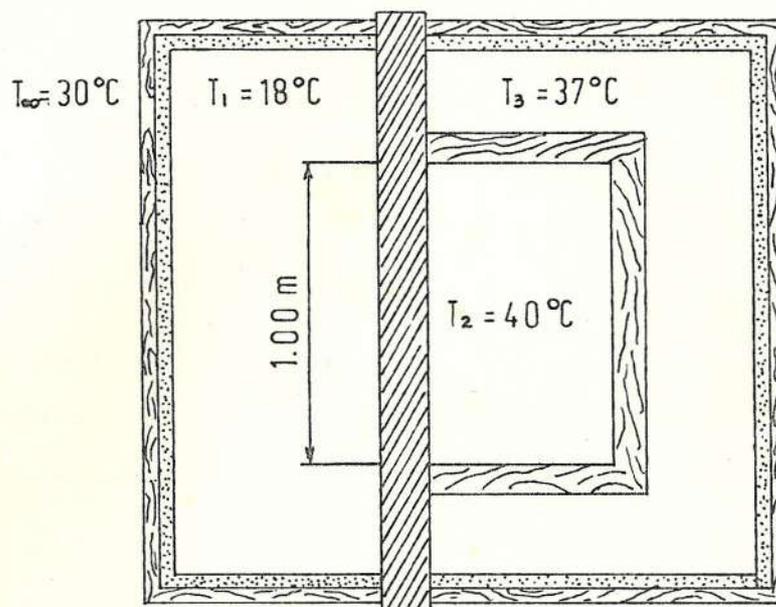


fig. 6 Caja caliente con panel de prueba

Dimensiones:

Caja de resguardo	2.00 x 1.60 x 0.65 mts.
Caja de medición	1.00 x 1.00 x 0.45 mts.
Caja fría	2.00 x 1.60 x 0.45 mts.

TABLA Nº 1. Propiedades de los materiales usados

Material	Conductividad K [W/m°C]	Espesor L [m.m.]
- balsa	0.059 (***)	40
- Madera plywood	0.094 (**)	15
- Poliéstireno	0.044 (**)	15
- Fibra vegetal-cemento	0.122 (***)	6
- Poliuretano expandido ($\delta = 30 \text{ Kg/m}^3$)	0.034 (***)	32

(**) Heat Transfer, General Electric, Section 515.24 pag 4, 1974

(***) Valores determinados mediante el método de la placa caliente resguardada

TABLA N^o 2. Conductancias de superficie para aire con superficies no reflectivas*

Posición de la superficie	Dirección del flujo de calor	h W/m ² °C
<u>Aire tranquilo</u>		
- Horizontal	Hacia arriba	9.26
- Horizontal	Hacia abajo	6.13
- Vertical	Horizontal	8.29
<u>Aire moviéndose</u> [3.4 m/seg]		
- Cualquier posición	Cualquiera	22.72

* Valores obtenidos de ASHRAE 1985 FUNDAMENTALS HANDBOOK, tabla 1, pag. 23.3, Cap. 23.

La resistencia a la transmisión de calor a través de paredes es igual a la suma algebraica de las resistencias de todas las partes componentes añadidos en serie.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (48)$$

donde R es la resistencia total de los elementos y R_1, R_2, \dots, R_n son las resistencias individuales de las partes, que para el caso de un material homogéneo de conductividad K y espesor L la resistencia es igual a L/K .

La resistencia total es la resultante de añadir a R las resistencias de las películas de aire exterior e interior $R_o = 1/h_o$ y $R_i = 1/h_i$ respectivamente, por lo que la resistencia total es:

$$R_t = R_i + R + R_o \quad (49)$$

y el coeficiente total de transferencia de calor o transmitancia térmica es igual al inverso de la resistencia total, es decir:

$$U = 1/R_t \quad (50)$$

y el flujo de calor a través de un elemento es igual a:

$$Q = UA T \quad [\text{Watt}] \quad (51)$$

Potencia requerida para la caja de medición

El valor de U para los diferentes elementos es:

- Panel de prueba

$$\frac{1}{U_1} = \frac{1}{22.72} + \frac{6 \times 10^{-3}}{0.122} + \frac{0.032}{0.034} + \frac{6 \times 10^{-3}}{0.122} + \frac{1}{22.72}$$

$$1/U_1 = 1.13$$

$$U_1 = 0.89 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Pared de balsa

$$\frac{1}{U_2} = \frac{1}{22.72} + \frac{0.040}{0.059} + \frac{1}{22.72}$$

$$U_2 = 1.31 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces el calor requerido para mantener la diferencia de temperatura seleccionada será:

$$\begin{aligned} Q &= U_1 A_1 (T_2 - T_1) + U_2 A_2 (T_2 - T_3) \\ &= (0.89)(1)(40 - 18) + (1.31)(2.80)(40 - 37) \\ Q &= 30.59 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Si el motor del ventilador consume 25 W, los cuales son entregados al aire de la caja de medición, entonces el calor o potencia que debe ser entregado a la resistencia es de 5.59 W y estimando un error del 10% en el cálculo de la potencia teórica, se tiene que la potencia necesaria a la resistencia es de 8.65 W; por lo tanto es necesario usar un variac para regular el voltaje de entrada a la resistencia entre 9 y 10 Voltios.

Potencia requerida para la caja de resguardo

El valor de U para los diferentes elementos es;

- Panel de prueba

$$U_1 = 0.89 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Pared de balsa

$$U_2 = 1.31 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Pared de plywood-poliestireno

$$\frac{1}{U_3} = \frac{1}{22.72} + \frac{0.015}{0.094} + \frac{0.015}{0.044} + \frac{1}{8.29}$$

$$U_3 = 1.50 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces el calor necesario es:

$$\begin{aligned} Q &= U_1 A_1 (T_3 - T_1) + U_2 A_2 (T_3 - T_2) + U_3 A_3 (T_3 - T_0) \\ &= (0.89) (2.2) (37 - 18) + (1.31) (2.8) (37 - 40) \\ &\quad + (1.50) (7.9) (37 - 30) \end{aligned}$$

$$Q = 108.94 \text{ Watt}$$

Más un 10% de error en el cálculo, se tiene que el calor necesario es de 120 W, menos 50 W de los dos motores de los ventiladores, entonces la potencia de entrada necesaria a las resistencias es de 70 W.

Cálculo de carga para la caja fría

El valor de U para los diferentes elementos es de:

- panel de prueba

$$U_1 = 0.89 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Pared de plywood-poliestireno

$$U_2 = 1.50 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces la carga de enfriamiento es de:

$$Q = (0.89)(2.2)(37 - 18) + (0.89)(1)(40 - 18) \\ + (1.50)(6.4)(30 - 18)$$

$$Q = 172.70 \text{ Watt}$$

Más un 10% de error en el cálculo como lo hemos asumido en los casos anteriores, se tiene que la carga de enfriamiento necesaria es de 190 W.

4.3 PROCEDIMIENTO, CALCULOS Y REPORTE

4.3.1 Especímenes de Prueba

El espécimen debe ser seleccionado y preparado de tal manera que sea representativo del tipo de construcción que va a ser investigado y de ser necesario tiene que ser modificado para que se adapte a las medidas y/o requerimientos del equipo. La prueba, preferentemente, solo es adecuada para paneles cuyo contenido de humedad sea mínimo.

Al colocar el panel de prueba se debe tener cuidado de que la caja de medición quede completamente sellada contra la superficie del panel para evitar la infiltración de aire hacia afuera o hacia aden-

tro de la caja de medición, lo cual alteraría las mediciones de calor. Cuando está instalado se procede a aislar todos los bordes del panel, para minimizar los efectos de borde y evitar un mayor consumo de energía.

4.3.2 Pérdidas de calor a través de las paredes de la caja de medición

El calor perdido a través de las paredes es proporcional a la diferencia de temperatura que existe entre las termocuplas de superficie colocadas interna y externamente en cada una de las paredes de la caja de medición. Esta constante de proporcionalidad se la puede determinar de dos maneras: la primera es colocando un panel de prueba estándar cuya transmitancia de calor U sea conocida y manteniendo una temperatura en la caja de medición primero más fría y luego más caliente que la correspondiente de la caja de resguardo, con una diferencia de 5°C . Se tiene entonces la siguiente expresión:

$$Q + Q_p = UA T \quad (52)$$

$$Q_p = M(T_e - T_i) \quad (53)$$

donde:

M = constante de proporcionalidad

T_e = temperatura de la superficie exterior °C

T_i = temperatura de la superficie interior °C

Q_p = calor perdido a través de las paredes de la caja.

y el lado izquierdo de la ecuación representa el calor a través del panel de prueba, el valor de Q es conocido y entonces el valor de M (promedio) se puede despejar de las ecuaciones que resultan.

La segunda manera de determinar la constante de proporcionalidad es asumiendo que a través de las paredes existe solamente transferencia de calor por conducción, de esta forma se tiene que $M = KA/L$ donde K es la conductividad de la balsa ($K = 0.059 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$), A es el área de la superficie lateral ($A = 2.8 \text{ m}^2$) y L es el espesor de las paredes de la caja ($L = 0.04 \text{ m}$); se tiene entonces que el valor de M es $4.13 \text{ W/}^\circ\text{C}$.

4.3.3 Determinación de los coeficientes de superficie h_o y h_i .

Una vez que se han obtenido las condiciones de temperatura de estado estable, cuyo tiempo varía dependiendo principalmente de las condiciones de

temperatura y del tipo de panel que se está probando, se toman las lecturas de temperatura y se obtiene el flujo de calor a través del panel.

La velocidad del aire entre el panel y el baffle en la caja de medición es de 1.2 m/seg. y en la caja fría es de 1.0 m/seg. Los coeficientes de superficie exterior e interior están dados por las siguientes ecuaciones:

$$h_o = \frac{Q_t}{A(T_h - T_1)} \quad (54)$$

$$h_i = \frac{Q_t}{A(T_2 - T_c)} \quad (55)$$

donde Q_t es el calor total en la caja de medición

$$Q_t = Q + M(T_{ew} - T_1) \quad (56)$$

4.3.4 Determinación de la Transmitancia Térmica U

Las lecturas de temperatura del aire, lado frío y lado caliente, bajo condiciones de estado estable, nos sirven para determinar el valor de la transmitancia térmica. El periodo de prueba se extiende a por lo menos 4 horas después que se han conseguido condiciones de estado estable (aproximadamente entre 6 y 10 horas), pero la prueba no

se da por terminada hasta que los valores obtenidos para transmitancia térmica U en dos periodos sucesivos de 4 horas no difieran en más del 1%.

El valor de la transmitancia térmica se la calcula a partir de la ecuación 5.

$$U = \frac{Q_t}{A(T_h - T_c)} \quad (5)$$

donde Q_t es el calor total a la caja de medición.
Ec. (56).

4.3.5 Presentación de Resultados

Los datos y resultados de cada prueba son tabulados en una hoja de trabajo como la indicada en la figura 7, donde se incluye entre otras cosas: espesor de la pared (de los distintos elementos constitutivos), temperaturas del aire caliente y frío, temperaturas de superficie caliente y fría, temperaturas interior y exterior de la caja de medición, voltaje y corriente a ventilador y resistencia, flujo de calor, valor de transmitancia térmica, coeficientes de superficie exterior e interior, temperatura media de prueba y además un

Fig. 7.- Continuación

Tiempo [min]	0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
Termoc No	30	90	150	210	270	330	390	450	510	570	630
Temper. Amb. [°C]											
Humed. Amb. [°C]											
Voltaje Resist. V_r [V]											
Voltaje Ventil. V_v [V]											
Amper. Resist. I_r [mA]											
Amper. Ventil. I_v [mA]											

VELOCIDAD DEL AIRE (m/seg)

? ¿cómo se calcula?

Caja de Medición	Caja de Resguardo	Caja Fría

CALCULOS

$$T_h = (T_5 + T_6 + T_7 + T_8) / 4$$

Temp. aire caliente

$$T_e = T_9$$

Temp. exterior caja de medición

$$T_i = T_{10}$$

Temp. interior caja de medición

$$T_c = (T_{11} + T_{12} + T_{13} + T_{14}) / 4$$

Temp. aire frío

$$T_2 = (T_5 + T_6 + T_7 + T_8) / 4$$

Temp. pared fría

$$T_1 = (T_9 + T_{10} + T_{11} + T_{12}) / 4$$

Temp. pared caliente

$$P_r = V_r I_r$$

Potencia a la resistencia

$$P_v = V_v I_v$$

Potencia al ventilador

$$Q = P_r + P_v$$

Calor a caja de medición

Fig. 7.- Continuación

Tiempo [min]									
Q [W]									
Q _p [W]									
Q _t [W]									
U [W/m ² C]									
h ₁ [W/m ² C]									
h _o [W/m ² C]									

U_{promedio} = [W/m²C]

h_{1promedio} = [W/m²C]

h_{opromedio} = [W/m²C]

Temp. promedio de prueba =°C

diagrama de la pared con los distintos elementos y materiales de que está compuesta.

En el reporte final se deben dar los valores de transmitancia térmica, coeficientes de superficie exterior e interior, temperatura media de prueba y un diagrama esquemático en perspectiva de la pared.

4.4 CALIBRACION Y DETERMINACION DE TRANSMITANCIA TERMICA Y LOS COEFICIENTES h_o Y h_i DE UN MATERIAL

Como ejemplo tomamos la determinación de la transmitancia térmica U de un panel formado por dos placas de fibra-vegetal-cemento de 6 m.m. de espesor y en medio de ellas una capa de poliuretano expandido ($\delta = 30 \text{ kg/m}^3$) de 32 m.m. de espesor, con listones de madera colocados en los bordes como elementos estructurales.

Se instala el panel asegurándose de que no existan zonas de fuga de aire, principalmente en los bordes de la caja de medición, se prenden los ventiladores y la unidad de aire acondicionado, luego se fija tentativamente el voltaje de entrada a la resistencia de la caja de medición en 24 V y el de entrada a la resistencia de la caja de resguardo de tal forma que la diferencia entre la

temperatura de la caja de medición y la de resguardo sea de 3°C. como máximo.

Una vez que el equipo se estabiliza, lo cual sucede en este caso después de 7 horas, se toman las lecturas de temperatura, corriente y voltaje en los puntos correspondientes, el conjunto de los seis últimos valores, se muestran en la tabla N^o 3, y los resultados son los siguientes:

$$U = 2.30 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$h_i = 15.52 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$h_o = 33.86 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$T \text{ media de prueba} = 28.5\text{°C}$$

4.5 ANALISIS DE ERRORES

La transmitancia térmica se la calcula mediante la ecuación (5).

$$U = \frac{Q_t}{A(T_h - T_c)} \quad (5)$$

$$\text{donde: } Q_t = Q + Q_p \quad (57)$$

$$Q_p = 4.13(T_o - T_i) \quad (58)$$

$$Q = V_r I_r + V_v I_v \quad (59)$$

TABLA Nº 3 DATOS PARA LA DETERMINACION DE LA TRANSMITANCIA TERMICA PARA UN PANEL FORMADO POR DOS PLACAS DE ASBESTO CEMENTO Y POLIURETANO EXPANDIDO

Tiempo [min]	480	510	540	570	600	630
T_h [°C]	37.0	37.3	37.7	37.7	37.8	37.8
T_c [°C]	20.0	20.0	19.7	20.0	19.7	19.6
T_1 [°C]	36.1	36.8	36.2	36.8	36.9	36.9
T_e [°C]	36.3	36.7	37.1	37.3	37.4	37.6
T_2 [°C]	22.3	22.4	22.2	22.6	22.5	22.4
T_1 [°C]	35.7	38.2	36.5	36.5	36.6	36.5
Voltaje a Resistencia V_r [V]	24.2	24.1	23.9	24.0	24.0	24.3
Voltaje a Ventilador V_v [V]	128.5	128.4	127.3	127.5	127.5	128.3
Corriente a resistencia I_r [mA]	479	480	481	477	474	476
Corriente a Ventilador I_v [mA]	258	259	260	256	253	256
Potencia a Resistencia $P_r = V_r I_r$ [W]	11.59	11.57	11.49	11.45	11.38	11.37
Potencia a Ventilador $P_v = V_v I_v$ [W]	33.54	33.38	32.84	32.64	32.26	32.84
Calor a Caja Medición $Q = P_v + P_r$ [W]	45.13	44.95	44.33	44.09	43.64	44.41
Calor a través de Paredes $Q_p = 4.13(T_e - T_1)$ [W]	-0.83	0.41	-3.72	-2.06	-2.06	-2.89
Calor Total a Caja de Medición $Q_t = Q + Q_p$ [W]	44.30	45.36	40.01	42.03	41.58	41.52
Transmitancia Térmica $U = Q_t / (T_h - T_c)$	2.61	2.62	2.26	2.37	2.30	2.28
$h_i = Q_t / (T_2 - T_c)$	19.26	18.90	16.24	16.16	14.85	14.83
$h_o = Q_t / (T_h - T_1)$	34.08	41.24	33.81	35.02	34.65	31.94

Las temperaturas son medidas con un termómetro digital cuyo error máximo es de $\pm 0.10^\circ\text{C}$, se supone que el error cometido al determinar el área es despreciable. Los voltajes son medidos con un multímetro digital cuyo error es de $\pm 0.40\text{ V}$ y la variación en el voltaje de la línea es del orden de 6% sobre el voltaje normal de 125 V. La corriente es medida con un multímetro digital cuyo error es de $\pm 5\text{ mA}$.

En el cálculo del error para la transmitancia térmica del panel del ejemplo anterior para un conjunto de datos se tiene la siguiente información:

$$T_h = 37.80 \pm 0.10^\circ\text{C}$$

$$T_c = 19.70 \pm 0.10^\circ\text{C}$$

$$T_a = 36.90 \pm 0.10^\circ\text{C}$$

$$T_w = 37.40 \pm 0.10^\circ\text{C}$$

$$V_r = 24.00 \pm 0.40\text{ V}$$

$$V_v = 127.50 \pm 0.40\text{ V}$$

$$I_r = 474 \pm 5\text{ mA}$$

$$I_v = 253 \pm 5\text{ mA}$$

Entonces combinadas las ecuaciones (57), (58) y (59) se tiene:

$$U = \frac{V_r I_r + V_v I_v + 4.13(T_w - T_a)}{A(T_h - T_c)} \quad (60)$$

$$U = 2.305 \text{ [W/m}^2\text{ C]}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\delta U}{\delta V_r} &= \frac{I_r}{A(T_h - T_c)} = 0.026 \\
 \frac{\delta U}{\delta I_r} &= \frac{V_r}{A(T_h - T_c)} = 1.326 \\
 \frac{\delta U}{\delta V_v} &= \frac{I_v}{A(T_h - T_c)} = 0.014 \\
 \frac{\delta U}{\delta I_v} &= \frac{V_v}{A(T_h - T_c)} = 7.044 \\
 \frac{\delta U}{\delta T_m} &= \frac{4.13}{A(T_h - T_c)} = 0.228 \\
 \frac{\delta U}{\delta T_s} &= \frac{-4.13}{A(T_h - T_c)} = -0.228 \\
 \frac{\delta U}{\delta T_h} &= \frac{-[V_r I_r + V_v I_v + 4.13(T_m - T_s)]}{A(T_h - T_s)^2} = -0.127 \\
 \frac{\delta U}{\delta T_c} &= \frac{V_r I_r + V_v I_v + 4.13(T_m - T_s)}{A(T_h - T_c)^2} = 0.127
 \end{aligned} \tag{61}$$

Entonces los errores absoluto y estadístico serán:

$$\begin{aligned}
 E_a &= (0.40)(0.026) + (0.005)(1.326) + \\
 &\quad (0.40)(0.014) + (0.005)(7.044) + \\
 &\quad (0.10)(0.228) + (0.10)(0.228) + \\
 &\quad (0.10)(0.127) + (0.10)(0.127)
 \end{aligned} \tag{62}$$

$$\begin{aligned}
 E_a &= 0.010 + 0.0066 + 0.0056 + 0.035 + \\
 &\quad 0.0023 + 0.0023 + 0.0013 + 0.013
 \end{aligned} \tag{63}$$

$$E_a = 0.064 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{64}$$

$$E_{\text{arms}} = 0.038 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{65}$$

Entonces el valor de U es de $2.305 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ con un error probable de $0.038 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (1.65% de error relativo).

Como se puede apreciar en las ecuaciones (62) y (63) las magnitudes que más contribuyen al error del valor de la transmitancia térmica son los errores cometidos al medir las temperaturas exterior e interior de las paredes de la caja de medición, como este error no puede ser disminuido aumentando la exactitud de la medición, se debe tener mucho cuidado en la determinación de estas temperaturas y se debería esperar que en el transcurso de toda la prueba su valor no cambie en más de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. Esto se lo puede conseguir ajustando el voltaje de salida del variac a las resistencias de la caja de resguardo a uno tal que se tenga la mínima variación de temperatura dentro de la caja de resguardo con respecto a la caja de medición y luego realizar un ajuste más fino mediante un controlador de temperatura.

La segunda aportación importante al error total es debido a la medición de las temperaturas del aire caliente y frío, para reducir esta contribución primero se debe asegurar que existan condiciones de estado estable, temperatura constante en el lado caliente y sobre todo en la caja de medición y una mínima variación de la temperatura de la caja fría.

Para el control de la temperatura de la caja fría se utiliza un controlador de temperatura que regula el

paso de corriente a un grupo de resistencias colocadas a la descarga del ducto de aire acondicionado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- De las pruebas preliminares que se llevaron a cabo, respecto a la operación de los equipos, podemos concluir lo siguiente:

- El funcionamiento del calorímetro fue como el que se había esperado, resultó fácil de operar y los valores obtenidos tienen una confiabilidad aceptable, comparados con los dados por tablas.
- En la operación de la placa caliente resguardada se presentó un pequeño problema en el control de la temperatura de placa fría. Una variación mayor de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ de esta temperatura contribuye en gran medida a que el valor obtenido para la conductividad térmica varíe en más de lo previsto (1% de variación en cuatro intervalos sucesivos). Pero en general el equipo resultó ser de fácil operación y en el cual se pueden obtener valores confiables.

- La operación de la caja caliente resguardada es más complicada que los anteriores equipos y se determinó que hay que tener extremo cuidado en cuanto a que los bordes de la caja de medición quedan completamente sellados. También es importante que la diferencia de temperatura entre la caja de resguardo y la de medición sea mínima y además que la primera tenga una fluctuación mínima (máximo $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$).

2.- En cuanto a la confiabilidad de los resultados que se pueden obtener con estos equipos, creemos conveniente mencionar algunos de los factores que influirán sobre estos resultados:

- Es necesario tener termocuplas calibradas y/o equipo calibrador de termocuplas, ya que como se ha visto en los análisis de errores, el error cometido en la determinación de la temperatura en todos los equipos, contribuye de manera significativa al error final.
- Utilizar medidores de temperaturas más exactos, por ejemplo con lecturas de hasta una centésima de grado centígrado.
- Tener un voltaje constante en la línea de alimentación

o bien utilizar un regulador de voltaje, ya que la variación actual es del orden del 6%.

Las experiencias recogidas a lo largo del presente trabajo nos ponen en capacidad de hacer las siguientes recomendaciones:

- a) Ya que los equipos están contruidos y disponibles, sería conveniente realizar un estudio sistemático sobre materiales de construcción típicos en nuestro medio, utilizando los mismos equipos o mejorados.
- b) Solamente en base a estudios y pruebas experimentales se podría mejorar el sistema de construcción de paredes tradicionales, como el panel de caña revestido con cemento, o de nueva tecnología, como el panel de placas de fibra vegetal-cemento con poliuretano.
- c) A la par de la determinación de estas propiedades, se debería emprender un estudio sobre la inflamabilidad de paneles de construcción.

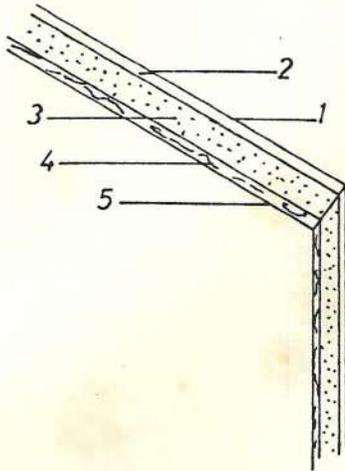
A P E N D I C E

RESULTADOS EXPERIMENTALES

TABLA N^o 3. VALORES DE CALOR ESPECIFICO Y CONDUCTIVIDAD
 TERMICA OBTENIDOS PARA ALGUNOS
 MATERIALES DE CONSTRUCCION

MATERIAL	CALOR ESPECIFICO		CONDUCT. TERMICA	
	Temp. °C	KJ/Kg°C	Temp. °C	W/m°C
-Asbesto-cemento	20-100	.924	37	.1853
-Fibra vegetal- cemento	-	-	38	.1834
-Piedra pómez	20-100	.851	-	-
-Yeso	20-100	.800	-	-
-Ladrillo rojo	20-100	.699	-	-
-Cemento	20-100	.679	41.7	.520
-Mortero de cemento	-	-	39.4	.425
-Cementina	20-100	.986	39.4	.3384
-Marmol (sin pulir)	-	-	35	.601
-Poliuretano	-	-	41	.035
expandido (denso)	-	-	-	-
-Poliuretano exp. ($\delta = 30 \text{ Kg/m}^3$)	-	-	40	.053
<u>MADERAS</u>				
- Aglomerado fenólico	20-100	1.413	37.5	.1227
- Aglomerado simple	-	-	37.5	.1127
- Balsa	20-100	1.583	43.8	.0890
- Caña guadúa	20-100	1.487	-	-
- Fernán Sánchez	20-100	1.324	35.5	.1346
- Laurel	20-100	1.456	37.5	.0978
- Madera contrachapada	-	-	38	.148

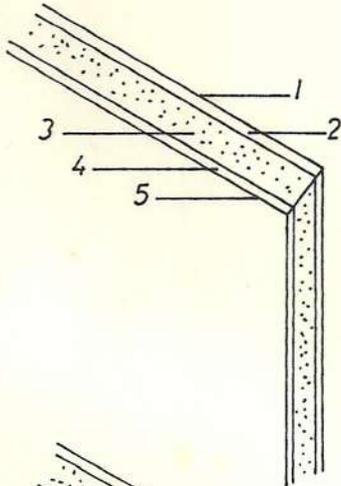
TABLA Nº 4. VALORES DE TRANSMITANCIA TERMICA OBTENIDOS
PARA ALGUNOS PANELES DE CONSTRUCCION



1. Superficie exterior caliente
2. Placa de asbesto-cemento de 4 m.m. de espesor
3. Poliuretano expandido de 30 m.m. (denso)
4. Aglomerado de madera 6 m.m.
5. Superficie interior fría

$$U = 2.203 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

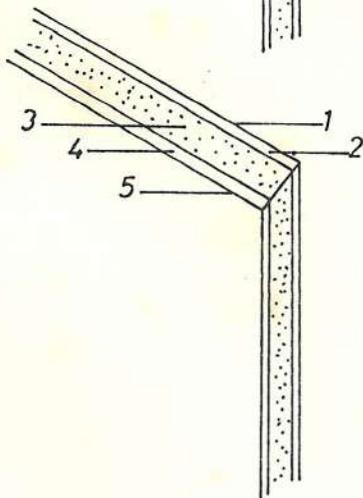
$$\text{temp. media} = 29^\circ\text{C}$$



1. Superficie exterior caliente
2. Placa asbesto-cemento 4 m.m.
3. Poliuretano expandido 32 m.m. (denso)
4. Placa asbesto-cemento 4 m.m.
5. Superficie interior fría

$$U = 4.306 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Temp. media} = 25^\circ\text{C}$$

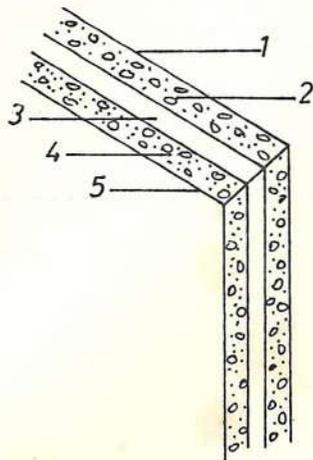


1. Superficie exterior caliente
2. Placa fibra vegetal-cemento 7 m.m.
3. Poliuretano expandido 55 m.m. (densidad = 30 Kg/m³)
4. Placa fibra vegetal-cemento 7 m.m.
5. Superficie interior fría

$$U = 2.252 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Temp. media} = 28.5^\circ\text{C}$$

TABLA Nº 4 Continuación...



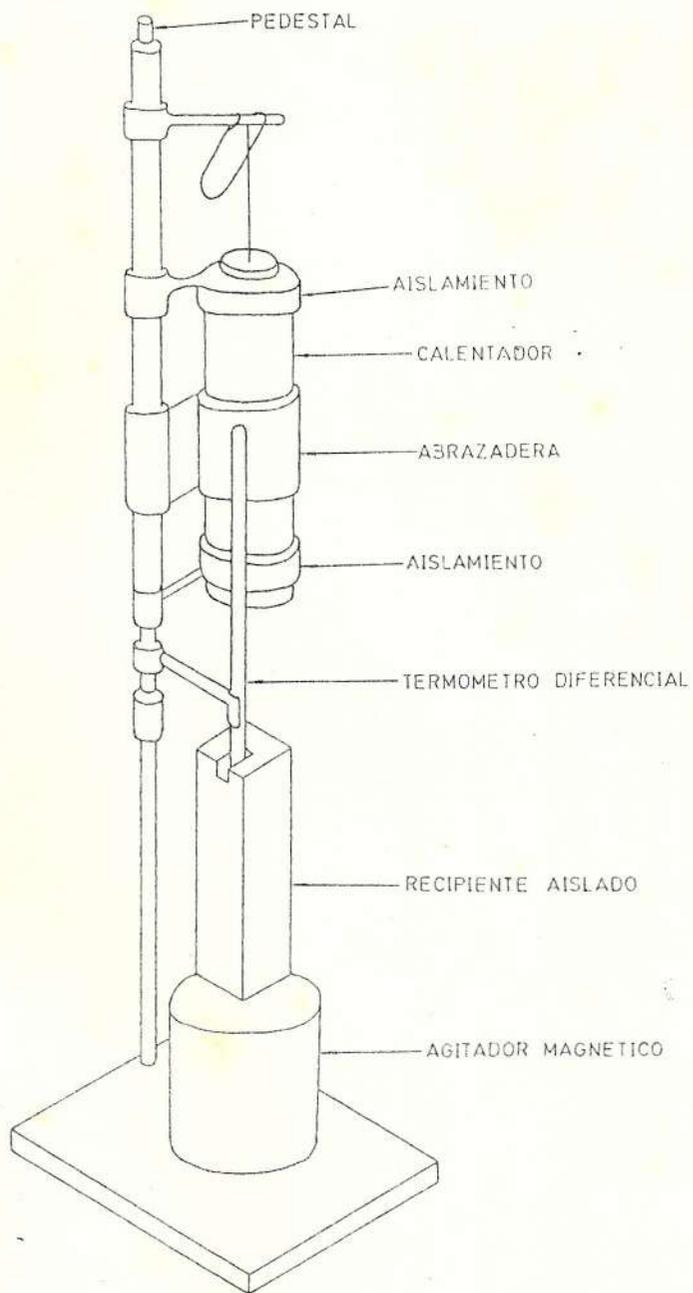
1. Superficie exterior caliente
2. Mortero de cemento (superficie rugosa) 25 m.m.
3. Caña guadúa 12 m.m.
4. Mortero de cemento (superficie rugosa) 25 m.m.
5. Superficie interior fría

$$U = 4.496 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

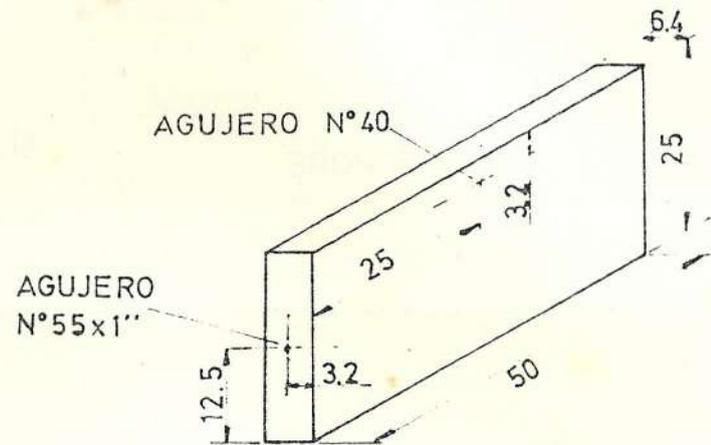
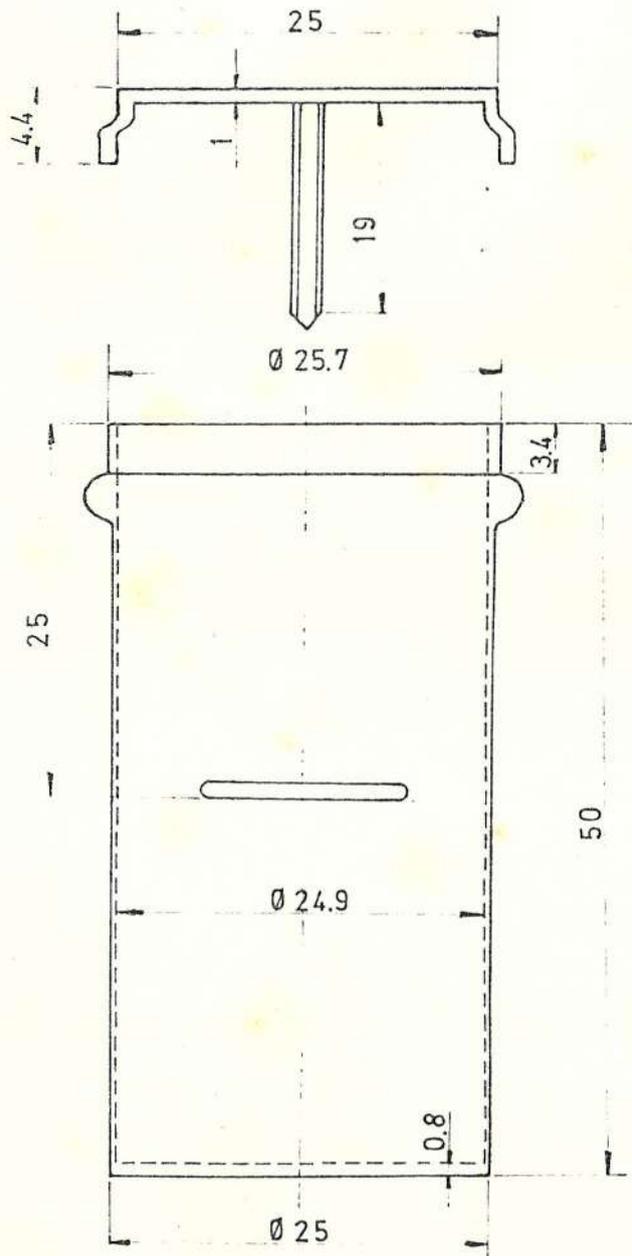
$$\text{Temp. media} = 26^\circ\text{C}$$

PLANOS

Nº	<u>Descripción</u>
01	Calorímetro
02	Cápsula y Probeta
03	Calentador de Calorímetro
04	Esquema de Placa Caliente Resguardada
05	Placa Caliente Resguardada
06	Unidad de Calentamiento Placa Caliente
07	Calentador Central y de Resguardo
08	Intercambiador de Calor
09	Cabezal de Intercambiador de Calor
10	Esquema de Caja Caliente
11	Caja de Medición
12	Caja Fría



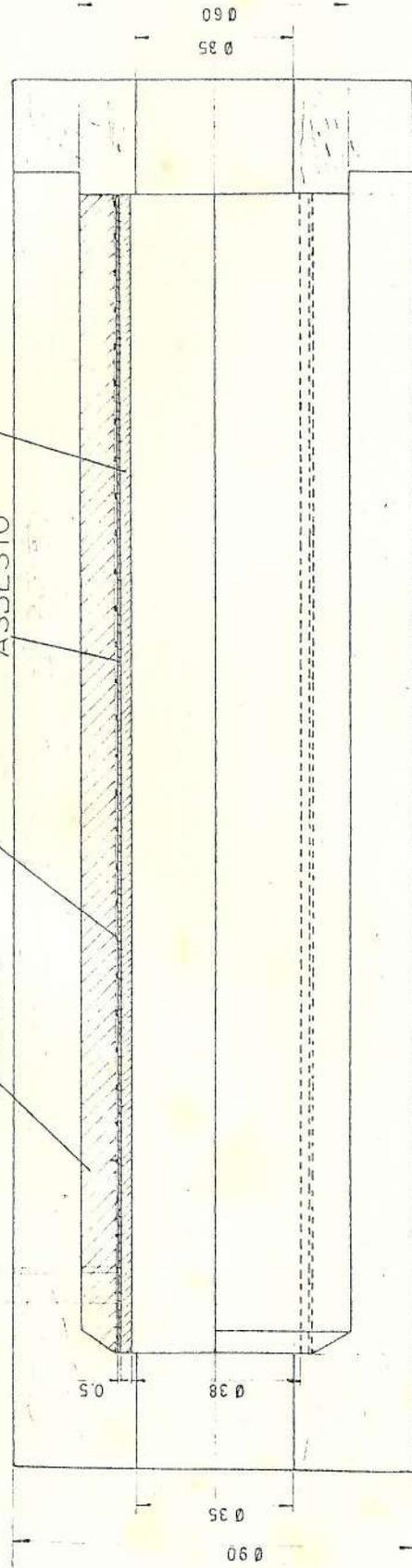
FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DEJ	J. CASTRO		
REVIS	MUNOZ		
APRO	ING. FRANCO		
CALORIMETRO			01



ESCALA 1:1

FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DIJUN	J. CASTRO		
REVIS	MUÑOZ		
APRO	ING. FRANCO		
E	CAPSULA Y PROBETA		02
2:1			

AISLANTE
RESISTENCIA
ASBESTO
BRONCE



250

300

25

FECH: 28/8/86
DIBUJ: J. CASTRO
REVIS: M. MUÑOZ
APRO: ING. FRANCO

28/8/86
J. CASTRO
M. MUÑOZ
ING. FRANCO

FACULTAD DE
ING. MECANICA

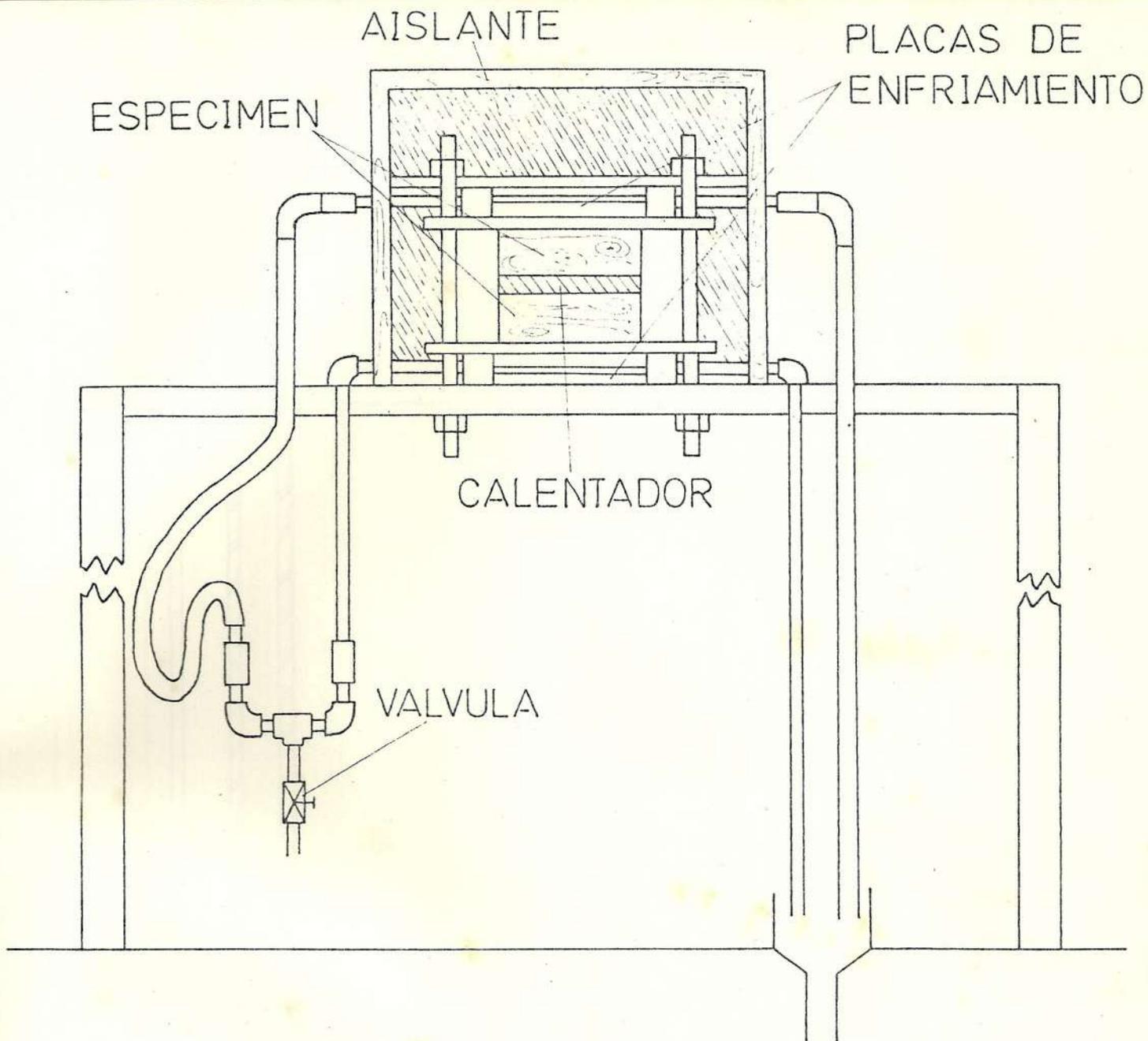
ESPOL

E

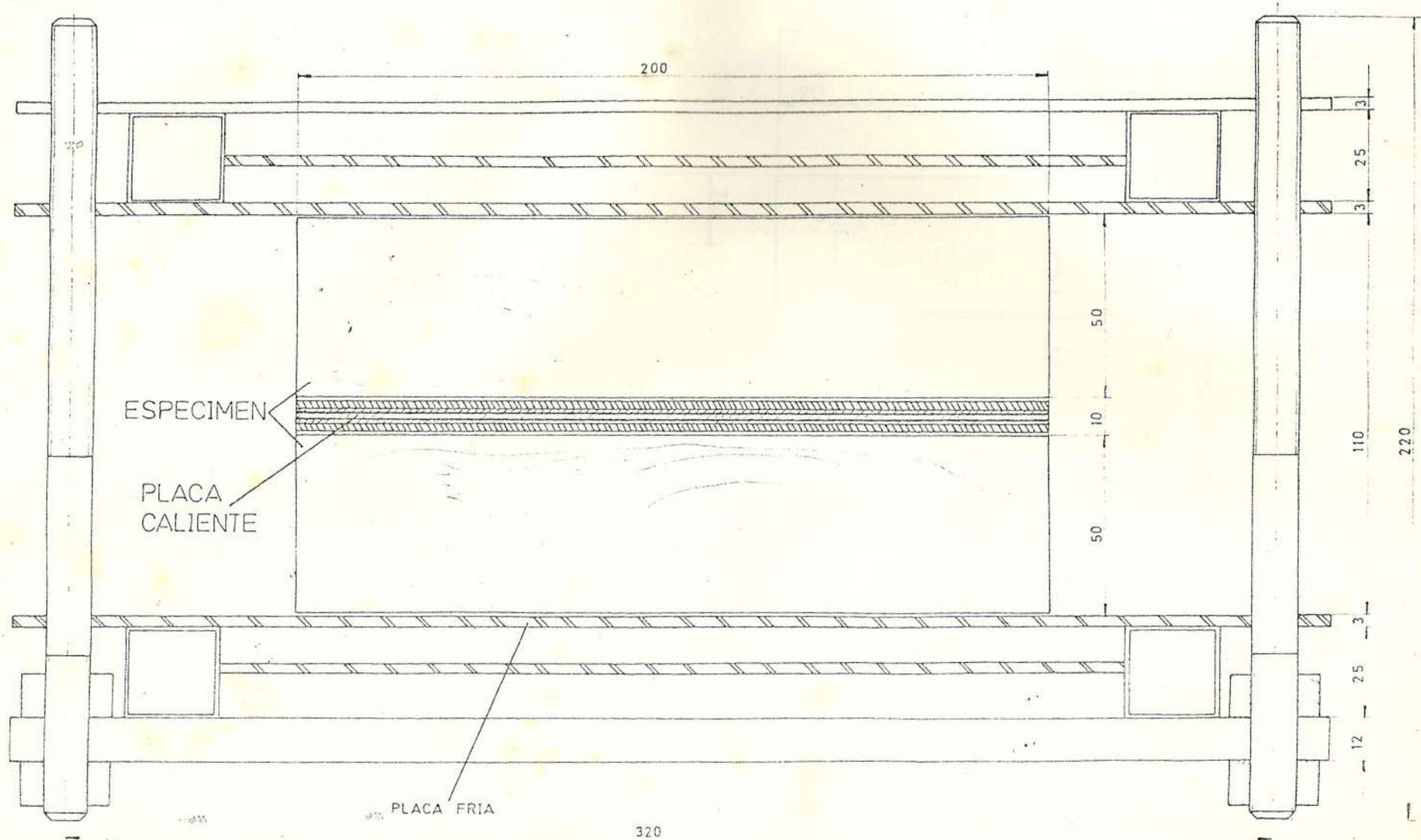
1:1

CALENTADOR DE
CALORIMETRO

03

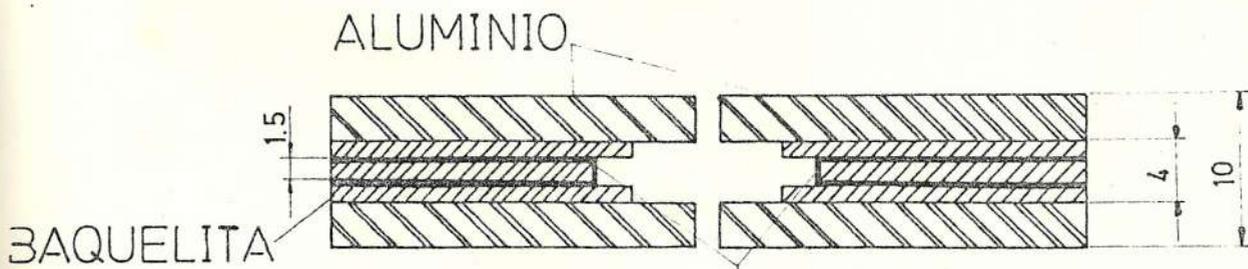
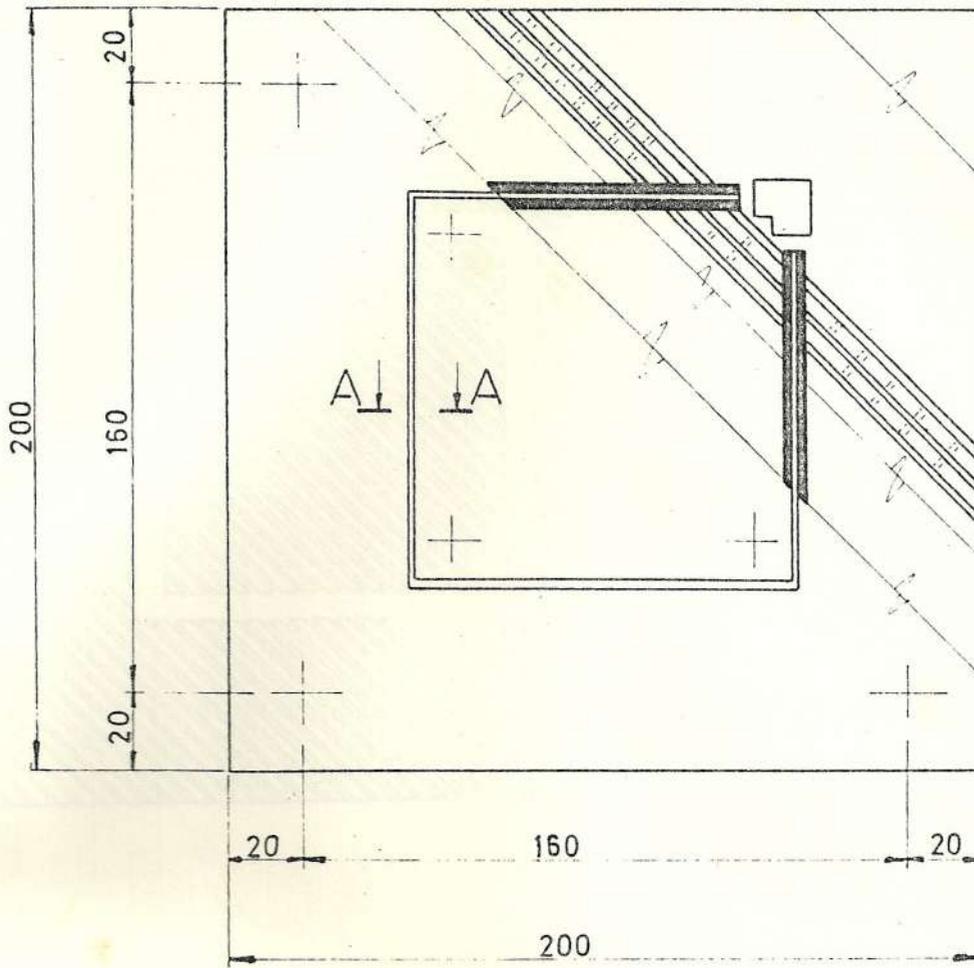


FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DIBUJ	J. CASTRO		
REVI	. MUÑOZ		
APRO	ING. FRANCO		
ESQUEMA DE PLACA CALIETE RESGUARDADA			04



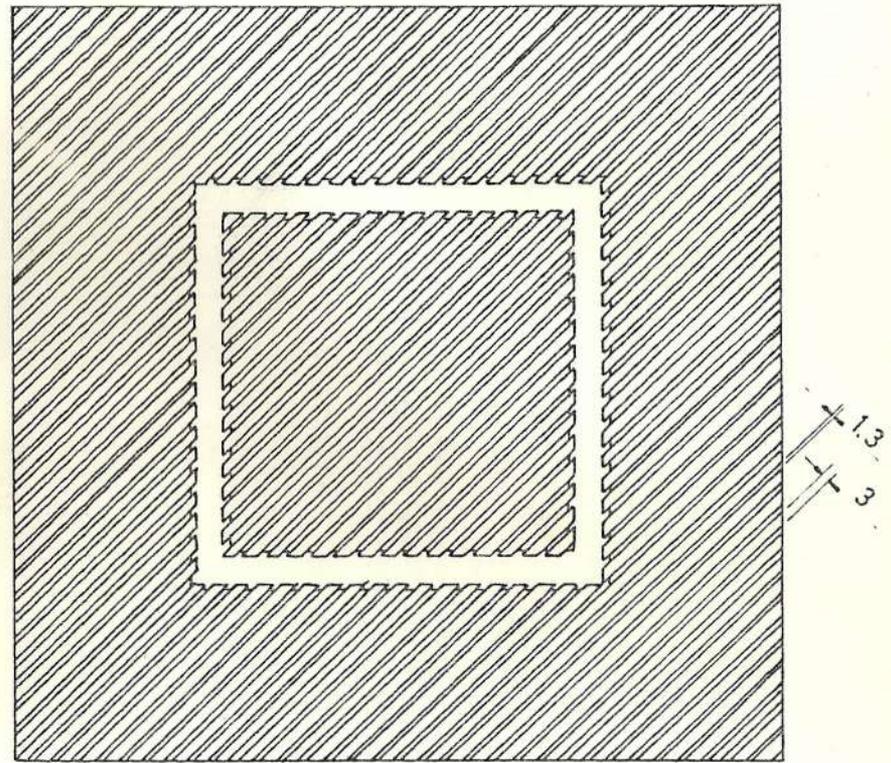
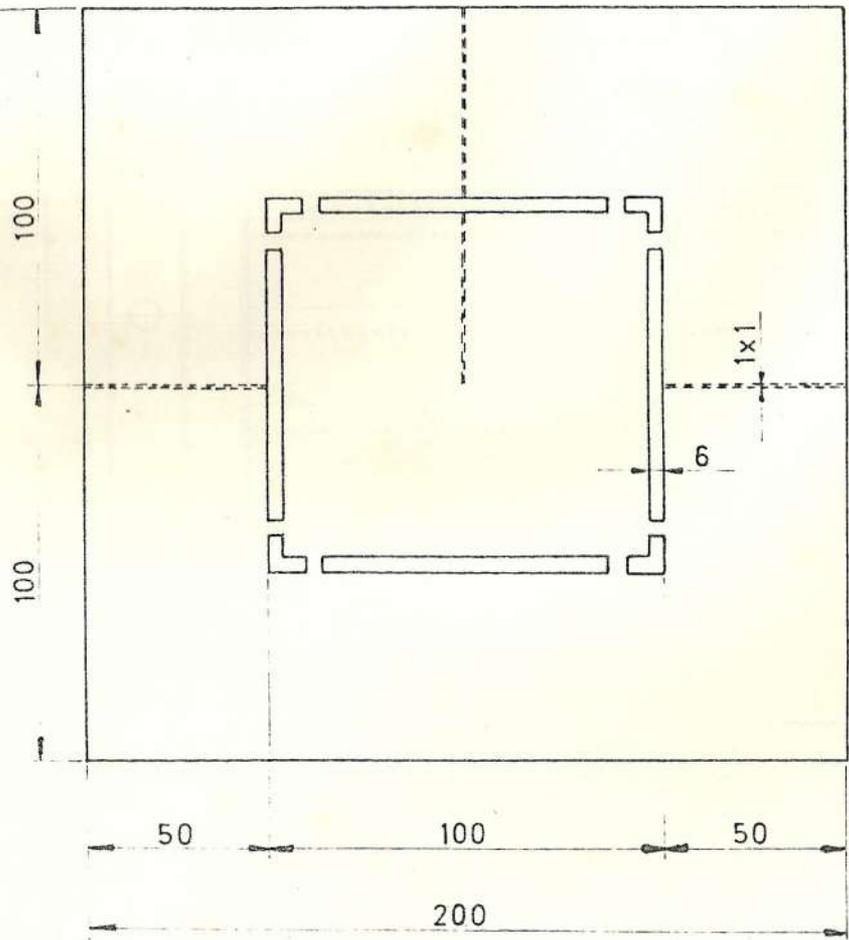
320

FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DEJU	J. CASTRO		
REVIS	MUNOZ		
APRO	ING. FRANCO		
E	PLACA CALIENTE RESGUARDADA		05
1:1			

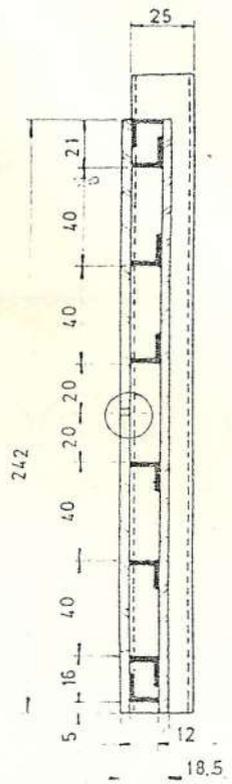
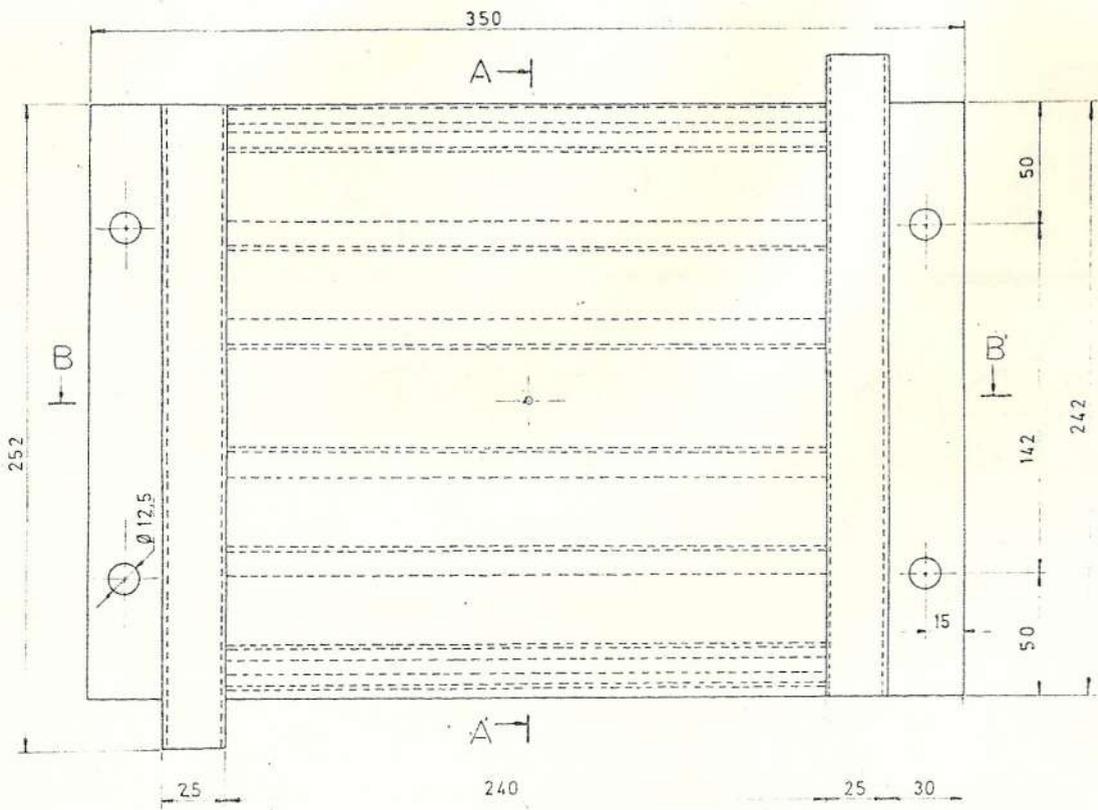


RESISTENCIA
CORTE A A

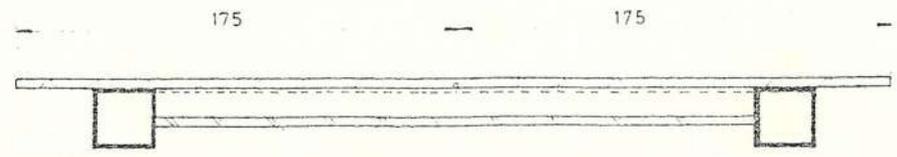
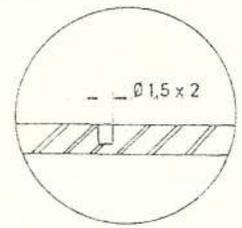
FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DIBUJ	J. CASTRO		
REVIS	MUÑOZ		
APRO	ING. FRANCO		
E	UNIDAD DE CALENTAMIENTO PLACA CALIENTE		06
1:2			



FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DIBUJ	J. CASTRO		
REVIS	MUNOZ		
APRO	ING. FRANCO		
E	CALENTADOR CENTRAL Y DE RESGUARDO		07
1:2			

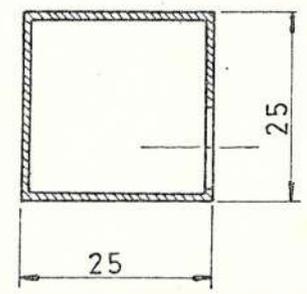
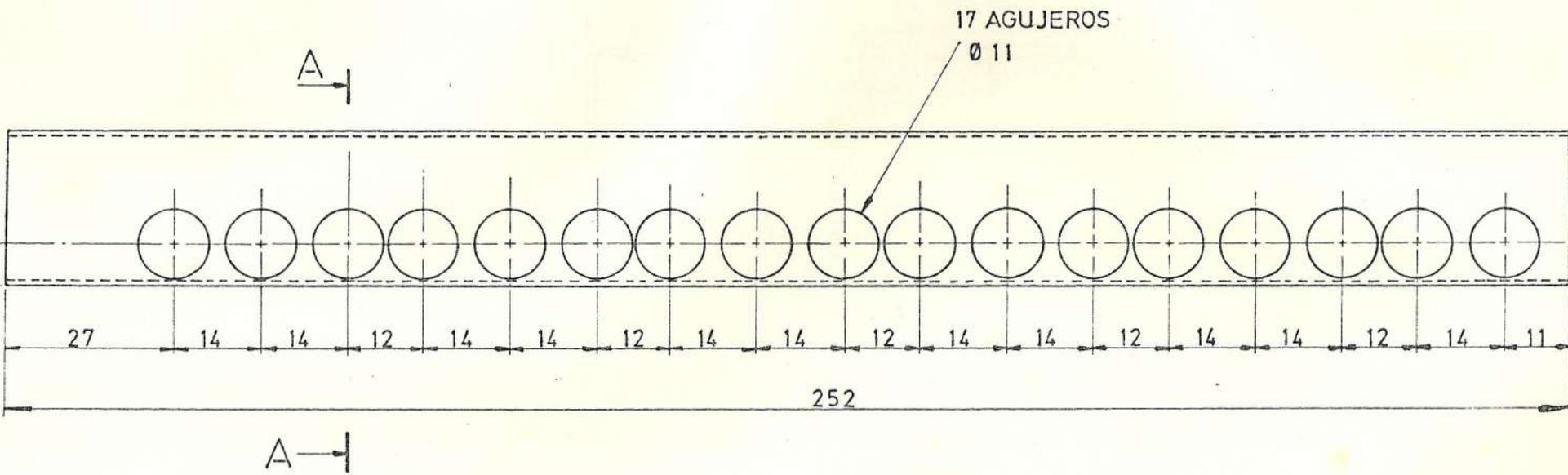


CORTE A A



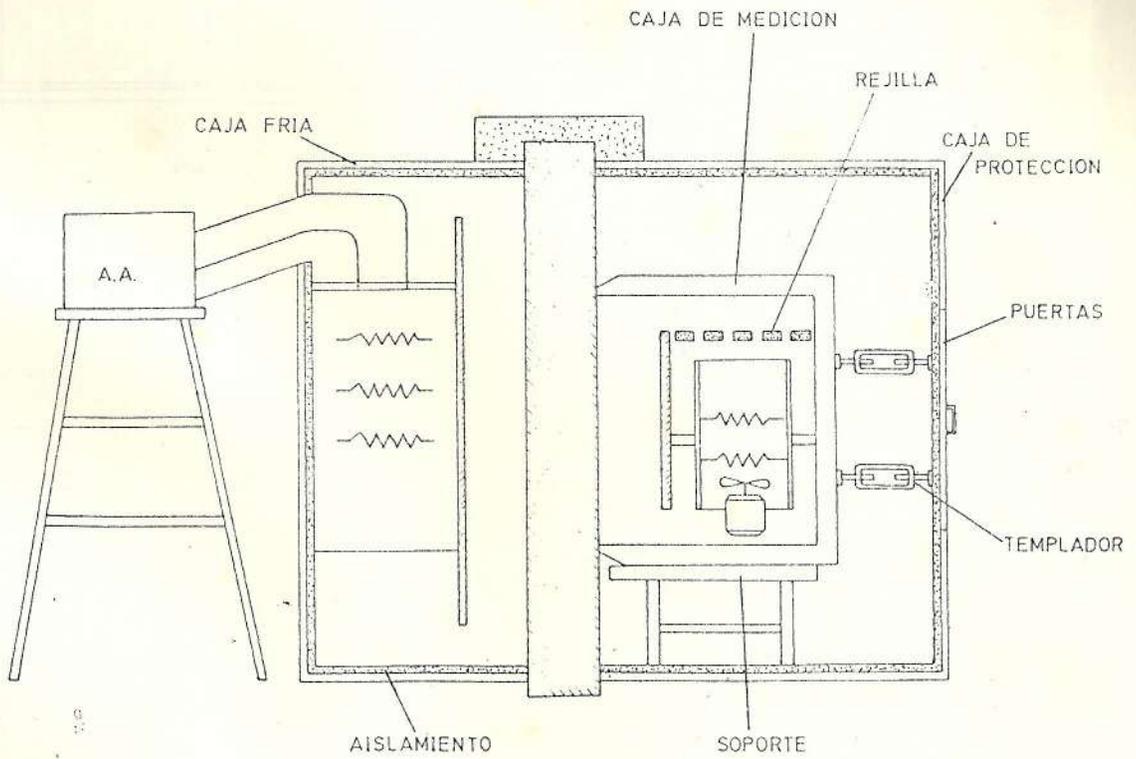
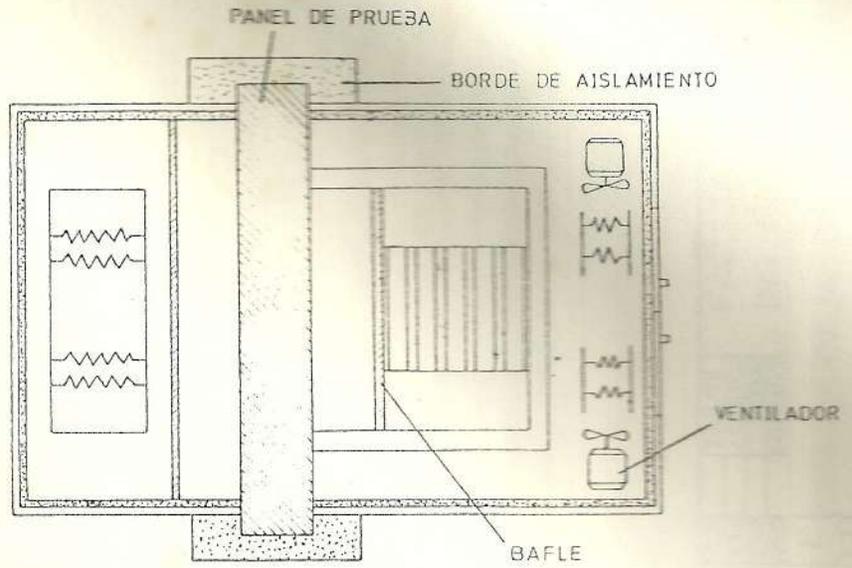
CORTE B B'

FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DEJU	J. CASTRO		
REVIS	MUNOZ		
APRO	INGERANCO		
E	1:2	INTERCAMBIADOR DE CALOR	08



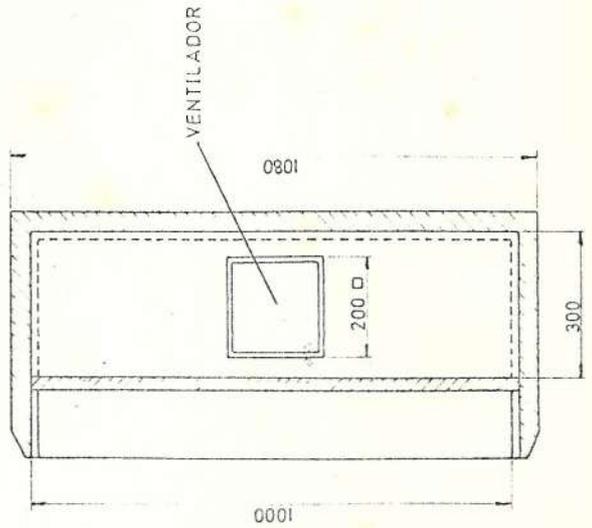
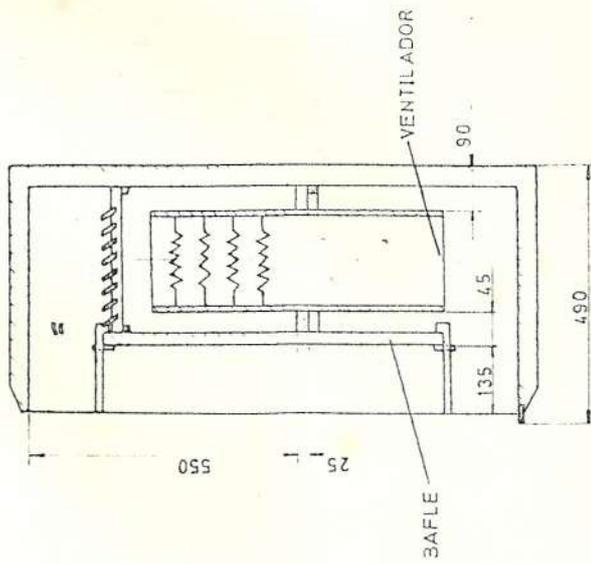
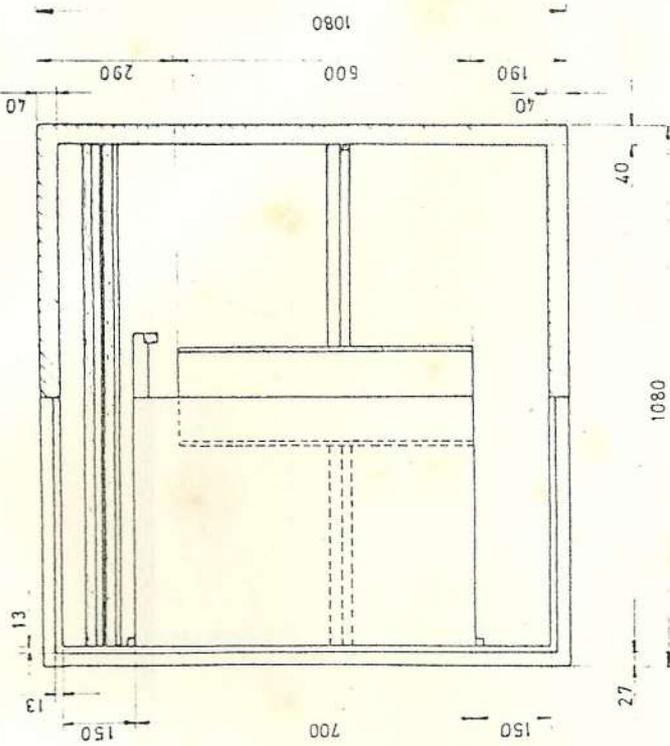
CORTE AA

FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DIBUJ	J. CASTRO		
REVIS	MUNOZ		
APRO	ING. FRANCO		
E	CABEZAL DE INTERCAMBIADOR DE CALOR		09
1:1			



FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DEW	J. CASTRO		
REVIS	MUÑOZ		
APRO	ING. FRANCO		

ESQUEMA DE CAJA
CALIENTE RESGUARDADA



FECH 28/8/86
 DIBUJ J. CASTRO
 REVIS MUNOZ
 APRO ING. FRANCO

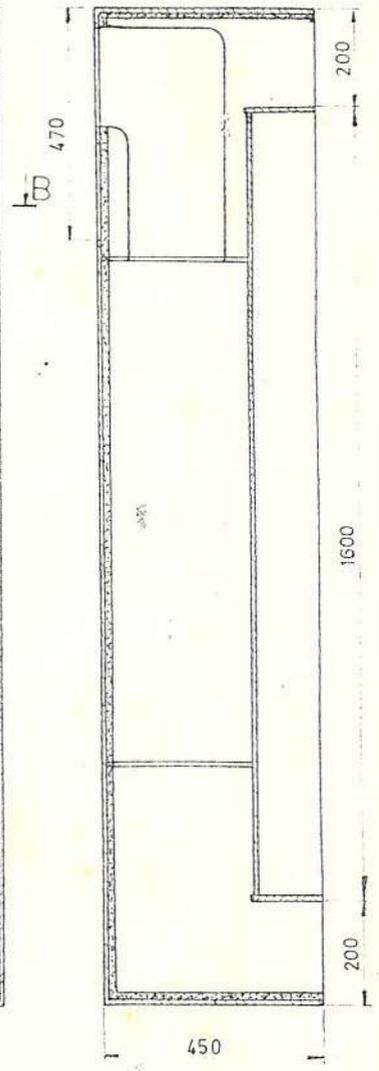
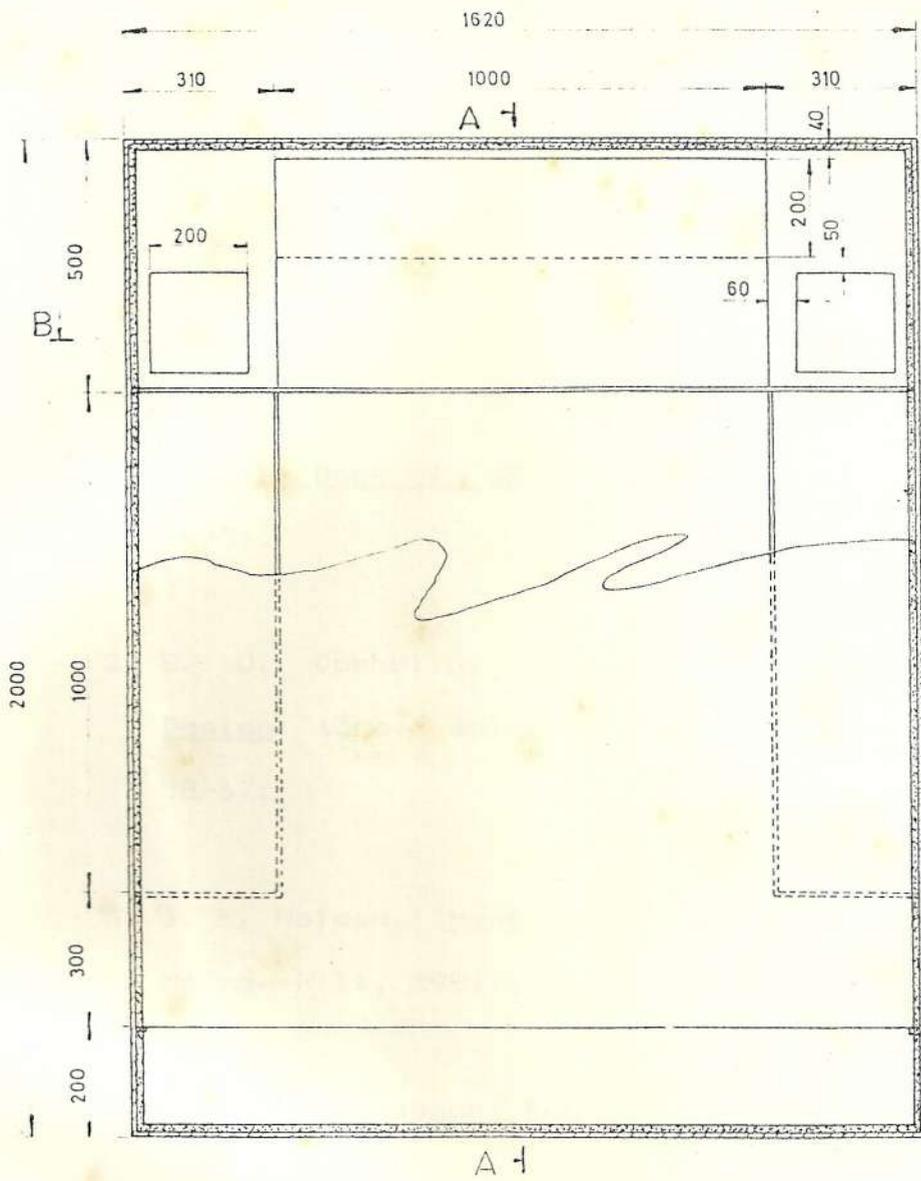
FACULTAD DE
 ING. MECANICA

ESPOL

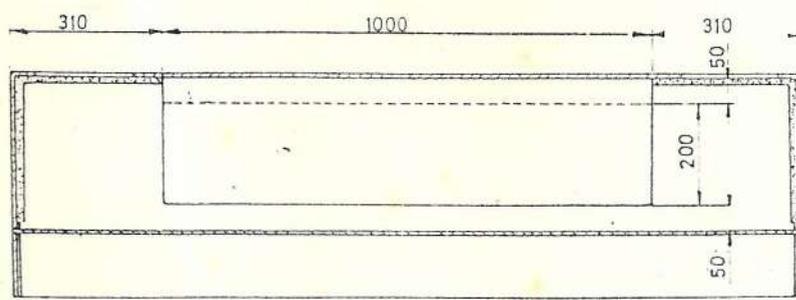
CAJA DE
 MEDICION

11

E
 1:10



CORTE AA



CORTE BB

BAFLE DE MADERA

AISLAMIENTO

FECH	28/8/86	FACULTAD DE ING. MECANICA	ESPOL
DEJ	J. CASTRO		
REVIS	MUÑOZ		
APRO	ING. FRANCO		
E		CAJA FRIA	12
1:10			

BIBLIOGRAFIA

1. Annual Book of ASTM, Volumen 14 (Washington D.C.: ASTM, 1973).
2. E. O. Doebelin, Measurements Systems: Application and Design (3ra. edición; New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 58-67.
3. J. P. Holman, Heat Transfer (5ta. edición; New York: McGraw-Hill, 1981), pp. 1-48.
4. ASHRAE Handbook Fundamentals, Cap 23 (Washington D.C.: ASHRAE, 1985).