

**DISEÑO DE UNA INSTALACION EXPERIMENTAL PARA EL CALCULO DEL  
COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR “U”**

**WILMER POLO YANCES**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
CARTAGENA D. T. Y C.**

**2009**

**DISEÑO DE UNA INSTALACION EXPERIMENTAL PARA EL CALCULO DEL  
COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR “U”**

**WILMER POLO YANCES**

**Tesis De Grado Del Proyecto De Optimización Energética En Buques Tipo  
Nodriza, presentada como requisito para optar el título de Ingeniero  
Mecánico**

**Director**

**Bienvenido Sarría López**

**Ingeniero Mecánico Phd, Msc**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

**CARTAGENA D. T. Y C.**

**2009**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

Cartagena de Indias D. T. y C. Enero de 2009

Señores:

**Departamento de Investigaciones**

**Universidad Tecnológica de Bolívar**

Cartagena D. T. y C.

Respetados Señores:

Presento para su consideración la tesis de grado titulada "**DISEÑO DE UNA INSTALACION EXPERIMENTAL PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR "U"**" como requisito para obtener el título de Ingeniero Mecánico.

Atentamente

---

**WILMER POLO YANCES**

Cartagena de Indias D. T y C. Junio de 2009

Señores:

**Departamento de Investigaciones**

**Universidad Tecnológica de Bolívar**

Cartagena D. T. y C.

Respetados Señores:

Tengo el agrado de presentar a su consideración, estudio y aprobación, la tesis de grado con título: **“DISEÑO DE UNA INSTALACION EXPERIMENTAL PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR “U”**, desarrollada por el estudiante Wilmer Polo Yances.

Al respecto me permito comunicar que he dirigido el citado trabajo, el cual considero de gran importancia y utilidad.

Atentamente,

---

**BIENVENIDO SARRÍA LOPEZ**

Ingeniero Mecánico. Phd, Msc  
Director.

---

**JUAN FAJARDO**

Ingeniero Mecánico. Msc  
Director.

## **AUTORIZACION**

Cartagena de Indias, D. T. C. H.

Yo **Wilmer Polo Yances**, identificado con número de cédula 9.289.745 de Turbaco (Bolívar), autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en le catálogo online de la Biblioteca.

Atentamente,

---

**WILMER POLO YANCES**

Dedico este trabajo a mi madre-abuela Vilma Sofía, a mi hijo querido Juan Esteban, a mi Esposa Ana Teresa por su amor, apoyo y confianza la cual fue base para alcanzar este sueño y escalón en mi vida.

**WILMER POLO YANCES**

## **AGRADECIMIENTOS**

Wilmer Polo expresa su agradecimiento:

A Dios creador del cielo, la tierra, el universo y todo aquello que nos rodea, por darnos el arma de la razón que es la nos ayuda a luchar y a defendernos en las adversidades de la vida.

Al Doctor Bienvenido Sarría, por su apoyo incondicional y por haber depositado toda su confianza en mí.

Al Profesor Juan Fajardo, por vincularme al proyecto y por su ayuda como soporte técnico a mi tesis de grado.

A mi amiga del alma Rina Margarita Tirado, por su apoyo moral y espiritual.

A mi amigo Carlos Rodríguez, que con su orientación y disposición me ayudo a realizar este trabajo.

Al grupo de trabajo EOLITO, por su gran aporte al proyecto y enriquecer mi conocimiento técnico en software de diseño.

Agradecimiento especial al compañero Alfredo de Ávila, por su gran dedicación y apoyo en la parte de Solid Edge.



## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	15
OBJETIVO GENERAL .....	16
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
1 PROCESO DE TRANSFERENCIA DEL CALOR .....	18
1.1 CONDUCCIÓN .....	18
1.2 CONVECCIÓN.....	20
1.3 RADIACIÓN.....	21
1.4 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U .....	24
1.4.1 Concepto de resistencia térmica.....	24
1.4.2 Red de resistencias térmicas .....	26
1.5 COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE DISEÑO [6] .....	30
1.5.1 Trayectoria del flujo de calor en serie y paralelo.....	31
1.5.2 Flujo de calor a través de paneles que contienen metal .....	32
1.5.3 Flujo de calor en serie a través de áreas desiguales. ....	36
1.5.4 Concepto de $U_0$ .....	37
2 MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICIÓN DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRASMISIÓN DE CALOR U .....	39
2.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN [7].....	39
3 DISPOSITIVOS QUE MIDEN EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U .....	44
3.1 CAJA CALIENTE ROTABLE CON GUARDA, Universidad de Massachussets.[8].....	44
3.1.1 Lado frío.....	45
3.1.2 Lado caliente .....	45
3.2 CAJA CALIENTE ROTABLE DEL LABORATORIO NACIONAL DE FÍSICA (NPL), INGLATERRA [9].....	47
3.3 HOT BOX ESTÁTICA DEL CENTRO DE ENERGÍA RENOVABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA (CEERE), ESTADOS UNIDOS, UMASS. [8] .....	48
4 AISLANTES TERMICOS QUE USAN EN COTECMAR .....	52
5 CONDUCTIVIDAD TERMICA .....	55

5.1	EXPERIENCIA CON EL CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN MATERIALES COMPUESTOS.....	55
5.1.1	Informe de ensayo .....	56
5.1.2	Parámetros a medir.....	57
5.1.3	Dificultades encontradas .....	58
5.1.4	Equipos utilizados en el ensayo .....	59
5.1.5	Descripción del ensayo .....	59
5.1.6	Resultados .....	63
6	INSTALACION EXPERIMENTAL .....	64
7	RESUMEN NORMA ISO 8990 [13].....	71
7.1	REFERENCIAS DE LA NORMA.....	71
7.1.1	Definiciones .....	71
7.2	SIMBOLOS, RELACIONES Y UNIDADES.....	72
7.3	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	73
7.3.1	Caja caliente con guarda .....	74
7.3.2	Caja caliente calibrada .....	75
7.4	LIMITACIONES Y FUENTES DE ERRORES.....	76
7.4.1	Limitaciones en el desequilibrio de la resolución de la caja caliente .....	76
7.5	REQUERIMIENTOS DE DISEÑO .....	78
7.6	CAJA DE MEDICION.....	79
7.6.1	Construcción de las paredes de la caja.....	79
7.6.2	Suministro de calor y circulación de aire.....	79
7.6.3	Caja con guarda.....	80
7.6.4	El marco de la muestra.....	81
7.6.5	Cámara del lado frio.....	81
7.6.6	Medición de la temperatura.....	83
7.6.7	Termocuplas .....	84
7.6.8	Temperatura superficial del equipo.....	85
7.6.9	Control de la temperatura.....	85
7.6.10	Instrumentación.....	85
7.7	CALIBRACIÓN Y EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO .....	86
7.7.1	Revisión inicial .....	86

7.7.2	Mediciones complementarias.....	86
7.7.3	Calibración .....	87
7.8	INTRODUCCION A LA PRUEBA.....	89
7.8.1	Acondicionamiento de la muestra.....	89
7.8.2	Selección y montaje de la muestra.....	89
7.8.3	Condiciones de prueba .....	91
7.8.4	Períodos de medición .....	92
7.8.5	Muestras homogéneas .....	92
7.8.6	Muestras no homogéneas .....	93
7.8.7	Informe de la prueba .....	93
8	TAMAÑO DE MUESTRAS Y ESPESORES DE AISLANTES.....	96
9	DETALLES DE LA INSTRUMENTACIÓN DE LA INSTALACIÓN [14] .....	99
9.1	INSTRUMENTACION.....	99
9.2	TERMOCUPLAS.....	99
9.3	DEFLECTORES .....	100
9.4	NUMERO DE SENSORES .....	100
9.5	CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL AIRE.....	100
9.6	SELLADO.....	101
9.7	RANGO DE VELOCIDADES .....	101
9.8	RANGO DE VALORES DE TEMPERATURA .....	101
10	ORIENTACIONES DE LA MUESTRA [15] .....	102
11	DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE LA CAJA.....	103
11.1	CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL EJE .....	108
11.2	DISEÑO DE LOS ENGRANAJES [19] .....	110
12	DISEÑO DEL DUCTO DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL .....	113
	CONCLUSIONES .....	117
	RECOMENDACIONES .....	118
	BIBLIOGRAFÍA .....	119

## LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1-1 Conducción del calor (A y B).....	19
Ilustración 1-2 Proceso de convección (C y D) .....	21
Ilustración 1-3 Proceso de radiación [5] .....	23
Ilustración 1-4 Cubierta del techo de yeso con T con nervio [6].....	33
Ilustración 1-5 Ampliación de la Zona A de la ilustración 1-4 [6].....	33
Ilustración 3-1 Caja Caliente rotable con guarda (UMASS).....	46
Ilustración 3-2 Caja Caliente Rotable (NPL).....	47
Ilustración 3-3 Hot Box Estática.....	48
Ilustración 3-4 Ubicación del ducto en el interior de la caja .....	49
Ilustración 3-5 Ductos Aislados con Ventilador Montado .....	50
Ilustración 3-6 Direccionamiento del flujo de aire .....	50
Ilustración 3-7 Direccionamiento del flujo de aire en el interior de la caja.....	51
Ilustración 4-1 Lámina de poliuretano.....	53
Ilustración 4-2 Muestra de fibra de vidrio .....	53
Ilustración 4-3 Muestra de lana de roca .....	54
Ilustración 5-1 Esquemático del prototipo para medir conductividad térmica ....	60
Ilustración 5-2 Muestra vista desde arriba .....	61
Ilustración 5-3 Prototipo para medir la conductividad térmica .....	62
Ilustración 5-4 Vista superior del prototipo.....	62
Ilustración 6-1 Cámara caliente .....	66
Ilustración 6-2 Cámara fría .....	66
Ilustración 6-3 Parte trasera de la cámara fría (suministro y retorno) .....	67
Ilustración 6-4 Marco para colocar la muestra .....	67
Ilustración 6-5 Muestra alojada en el marco.....	68
Ilustración 6-6 Montaje de las cámaras caliente y fría incluida la muestra.....	68
Ilustración 6-7 Despiece del montaje de las cámaras.....	69
Ilustración 6-8 Ensamble de cámaras y sistema de rotación de la instalación experimental.....	69
Ilustración 6-9 Sistema de rotación en conjunto con la caja .....	70
Ilustración 7-1 Caja Caliente con guarda .....	74

Ilustración 7-2 Caja caliente calibrada .....	75
Ilustración 7-3 Vista Superior de la Caja Caliente con guarda.....	81
Ilustración 7-4 Vista Superior de la Caja Caliente calibrada.....	82
Ilustración 8-1 Area de la sección transversal de la muestra. ....	96
Ilustración 8-2 Refuerzo en T. Esta geometría corresponde a la instalación del aislante térmico en los buques tipo nodriza 7 y 8. ....	97
Ilustración 8-3 Refuerzo tipo bulbo. Esta geometría corresponde a la instalación del aislante térmico en los buques tipo nodriza 7 y 8.....	98
Ilustración 10-1 Orientaciones de la Muestra .....	102
Ilustración 11-1 Esquema de la viga. [16] .....	103
Ilustración 11-2 Diagrama de cortante. [16].....	105
Ilustración 11-3 Diagrama de momento flector. [16].....	105
Ilustración 11-4 esquema viga 2 [16] .....	106
Ilustración 11-5 Diagrama de cortante viga 2. [16] .....	107
Ilustración 11-6 Diagrama de momento flector viga 2. [16].....	107
Ilustración 11-7 Esquema del eje. [16].....	108
Ilustración 11-8 Diagrama de cortante del eje. [16].....	109
Ilustración 11-9 Diagrama de momento flector del eje. [16].....	109
Ilustración 12-1 Gráfica de fricción [20] .....	113
Ilustración 12-2 Formas del ducto .....	114
Ilustración 12-3 Ductulador. [21].....	115

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1 Cálculo de resistencia térmica sobre área [6].....	35
Tabla 1-2 Cálculo de la resistencia total [6].....	35
Tabla 2-1 Métodos comunes de medición de la conductividad térmica o de la difusividad térmica.....	42
Tabla 5-1 Resultados de los ensayos.....	63
Tabla 8-1 Materiales aislantes y sus respectivos espesores (refuerzo en T).....	97
Tabla 8-2 Materiales aislantes y sus respectivos espesores (refuerzo tipo bulbo) .....	98

## INTRODUCCION

La selección de espesores de los aislantes requeridos para los espacios refrigerados y acondicionados en COTECMAR (Corporación de Ciencias y Tecnología para el Desarrollo de la industria Naval, Marítima y Fluvial) se realiza siguiendo las recomendaciones de la SNAME (Sociedad de Arquitectos e Ingenieros Navales). Pero algunos estudios expresan que los valores de U establecidos por la SNAME en su Reporte de Aislamiento Térmico 3 no son adecuados puesto que estos no tienen en cuenta las nuevas geometrías de los refuerzos y materiales aislantes usados en la construcción naval. Dicho estudio también demostró que el uso de los valores propuestos produce espesores de aislamientos mayores a los realmente requeridos, esto se debe principalmente a que las configuraciones de los refuerzos empleados en la construcción naval, así como el espaciado de los mismos, espesores, y profundidad, han venido variando a lo largo de los años, y este elemento afecta considerablemente el flujo de calor a través de las estructuras navales, debido a que a través de ellos se producen puentes térmicos, por ser los refuerzos de un material metálico con mayor conductividad térmica que atraviesa el aislamiento con menor conductividad.

Por otro lado, mientras hay varias opciones disponibles para la selección de diferentes materiales como aislamientos en un buque, los datos publicados por la SNAME en su reporte se enfocan en los valores del coeficiente global U para estructuras aisladas con fibra de vidrio semi-rígida; en el caso particular de los buques tipo Nodriza Fluvial de tercera generación, el aislamiento empleado es poliuretano expandido, esto genera errores en el cálculo de la carga térmica ya que los valores del factor U empleados en el momento de determinar la carga por transmisión no son adecuados.

Con la ejecución exitosa de este proyecto se pretende reevaluar los valores del factor U debido a que los requerimientos térmicos inadecuados por el uso de valores errados resultan en exceso de peso y costos por consumo de combustible, así como también en costos excesivos por generadores y equipos de acondicionamiento de aire y de ventilación sobredimensionados.

## **OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar una instalación experimental capaz de calcular el coeficiente global de transferencia de calor  $U$  y la conductividad térmica.



## OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Conocer las características y propiedades de los materiales aislantes.
- Conocer algunos apartes e ítems de las normas ISO 8990, ASTM 1363 y ASTM 1045 (reguladoras de la construcción de una instalación para ensayos de materiales aislantes y de construcción por medio del método de la caja caliente).
- Identificar las instalaciones que miden propiedades térmicas que existen y entender su funcionamiento.
- Elaborar la metodología de ensayos de la instalación experimental.

## 1 PROCESO DE TRANSFERENCIA DEL CALOR

Cuando dos cuerpos o medios se encuentran a temperaturas diferentes, se produce un flujo de calor del cuerpo más caliente al más frío, hasta que se alcanza el equilibrio térmico.

El calor se puede transferir por tres modos diferentes: **conducción, convección y radiación**. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja.

### 1.1 CONDUCCIÓN

En este caso el calor se transmite de molécula a molécula sin cambio aparente de materia, por lo que esta forma de cambio de calor interesa esencialmente a los sólidos, aunque se produce también en líquidos y gases.

La elevación de temperatura aumenta la excitación de las partículas más elementales de la materia, transmitiéndose dicha excitación a las más próximas de su entorno y con ello su energía calorífica, continuándose el proceso en el cuerpo en cuestión de la zona más caliente a la más fría.

Cuanto más denso, compacto y pesado es un cuerpo, más próximas están las moléculas entre sí y, por tanto, el cambio se realiza con mayor facilidad.

La velocidad de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.

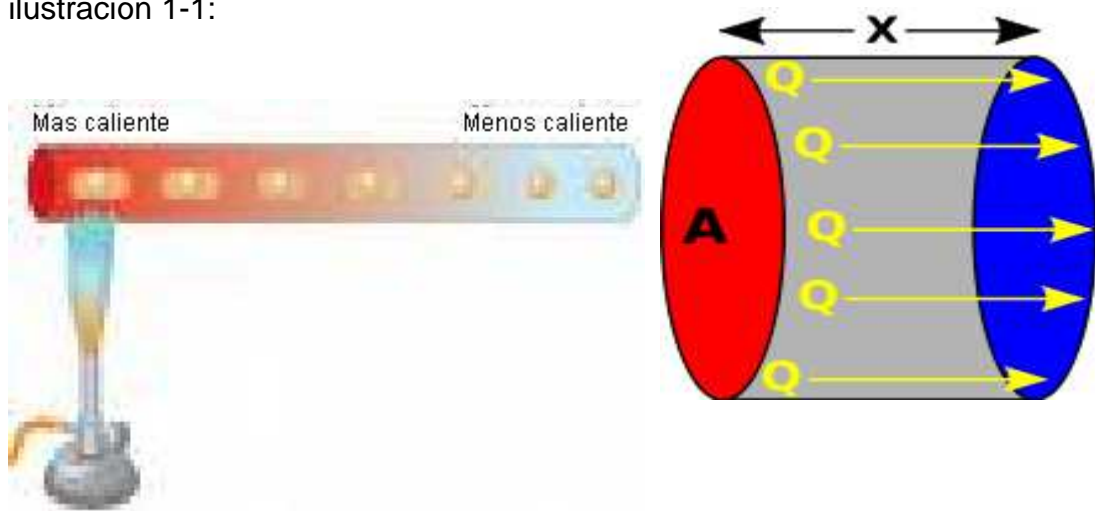
La conducción se expresa por la **ley de Fourier de la conducción de calor** como:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1) [1]$$

donde  $k$  es la conductividad térmica del material,  $A$  es el área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor y  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura. La magnitud de la velocidad de conducción de calor a través de una capa plana de espesor  $L$  se expresa por:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (2) [1]$$

donde  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura de uno a otro lado de la capa. Gráficamente el proceso de conducción se muestra en las figuras A y B ilustración 1-1:



A) Mechón calentando una barra metálica[2]

B) Calor atravesando un bloque [3]

Ilustración 1-1 Conducción del calor (A y B)

## 1.2 CONVECCIÓN

Esta forma de transferencia de calor se da entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que se encuentran en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y del fluido en movimiento.

La convección recibe el nombre de **convección forzada** si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. La **convección natural** es el movimiento del fluido causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido.

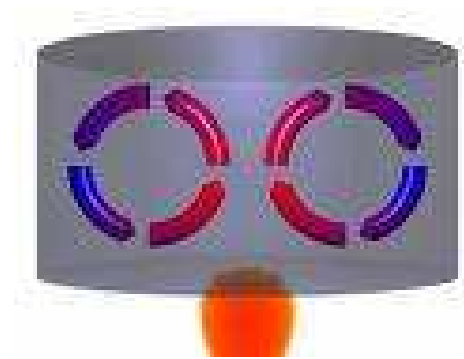
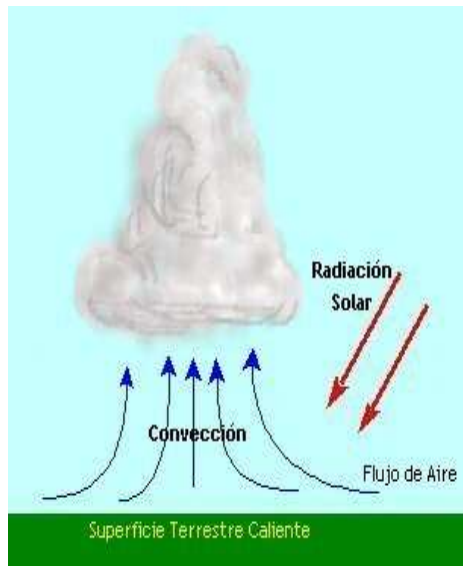
La velocidad de transferencia de calor por convección se expresa por la **ley de enfriamiento de Newton** como:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (3) [1]$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $A_s$  es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie.

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad del mismo.

El fenómeno de convección se muestra en la ilustración 1-2(C y D).



D) La llama calienta el metal. El líquido se calienta desde la parte inferior del recipiente y ese calor se va transmitiendo hasta calentar su totalidad. [2]

C) El sol calienta la tierra y ese aire se calienta desde la parte mas baja a la superficie terrestre hasta llegar a la parte mas fría. [4]

Ilustración 1-2 Proceso de convección (C y D)

### 1.3 RADIACIÓN

La radiación es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Mientras las dos formas de transmisión anteriores (conducción y convección) necesitan de un medio material; la transmisión por radiación puede realizarse en el vacío.

En los estudios de transferencia de calor es de interés la *radiación térmica*, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados.

La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura absoluta  $T_s$  se expresa por la **ley de Stefan – Boltzmann** como:

$$\dot{Q}_{emitida,máx} = \sigma A_s T_s^4 \quad (4) [1]$$

Donde  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4 = 0,1714 \times 10^{-8} Btu / h \cdot ft^2 \cdot R^4$  es la constante de Stefan – Boltzmann.

La superficie ideal que emite radiación a esta velocidad máxima se llama *cuerpo negro*.

La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (5) [1]$$

Donde  $\varepsilon$  es la **emisividad** de la superficie y su valor que esta en el intervalo  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual  $\varepsilon = 1$ .

Otra propiedad relativa a la radiación de una superficie es su **absortividad**  $\alpha$  que es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Su valor también está en el intervalo  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

La velocidad a la cual una superficie absorbe radiación se determina a partir de :

$$\dot{Q}_{absorbido} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (6) [1]$$

En donde  $\dot{Q}_{incidente}$  es la velocidad a la cual la radiación incide sobre la superficie y  $\alpha$  la absortividad de la superficie.

La diferencia entre las velocidades de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación. En general, la determinación de la velocidad neta de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies es complicada, ya que depende de las propiedades de las superficies, de la orientación de una con respecto a la otra y de la interacción del medio que existe entre ellas con la radiación.

Cuando una superficie o cuerpo de emisividad  $\varepsilon$  y área superficial  $A_1$  que se encuentra a una temperatura absoluta  $T_1$  esta completamente encerrada por una superficie mayor (o negra) que se encuentra a una temperatura absoluta  $T_2$  y separada por un gas (como el aire) que no interviene con la radiación, la rapidez neta de transferencia de calor por radiación entre las dos superficies se expresa por:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A_1(T_1^4 - T_2^4) \quad (7) [1]$$

En este caso la emisividad y el área superficial de la superficie circundante no tienen efecto sobre la transferencia neta de calor por radiación.

El fenómeno de la radiación se muestra en la ilustración 1-3.

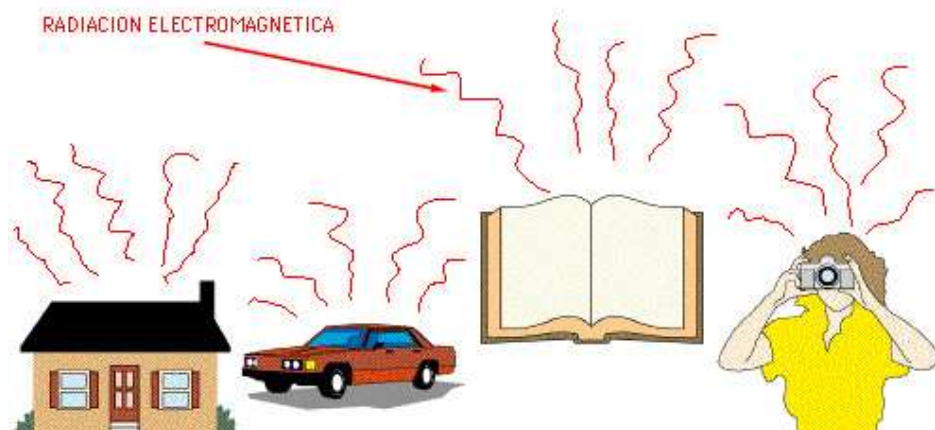


Ilustración 1-3 Proceso de radiación [5]

## 1.4 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U

En la mayoría de los problemas de transferencia de calor en estado estable, puede ocurrir más de un modo de transferencia de calor. Por ello es conveniente combinar todos los coeficientes de transferencia de calor en un coeficiente global o total de tal forma que la transferencia de calor total pueda ser determinada a partir de la diferencia de temperatura. Para hacer mucho más fácil la solución de este problema se emplea el concepto de circuito térmico y resistencia térmica.

### 1.4.1 Concepto de resistencia térmica

Podemos definir la resistencia térmica como la capacidad de oposición al paso del calor, y el valor o forma de cálculo varía dependiendo del tipo de método de transmisión de calor que se esté dando en el momento es decir (conducción, convección o radiación), en otras palabras si un flujo de calor  $Q$  atraviesa una superficie de área  $A$ , espesor  $L$ , y desde una temperatura  $T_1$  a una temperatura  $T_2$ :

En un medio conductivo la resistencia térmica es:

$$Q = \frac{k \times A \times (T_1 - T_2)}{L} \text{ Ecuación de la transmisión del calor por conducción.}$$

Si dividimos esa ecuación por el término  $k \times A$ , nos queda:

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L}{k \times A}}, \text{ el término } \frac{L}{k \times A} \text{ es lo que se conoce como resistencia térmica,}$$

reduciendo esta ecuación nos queda:

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{termica}}.$$



La ecuación de transmisión del calor por convección esta dada por:

$Q = h \times A \times (T_s - T_\infty)$ , dividiendo esta parte de la ecuación por el término  $h \times A$ , nos queda:

$Q = \frac{(T_s - T_\infty)}{\frac{1}{h \times A}}$ , la expresión  $\frac{1}{h \times A}$  es lo que se conoce como resistencia térmica

por convección. Reduciendo la ecuación nos queda:

$Q = \frac{(T_s - T_\infty)}{R_{\text{Térmica}}}$ . Un esquema de lo anterior se puede en la siguiente figura:

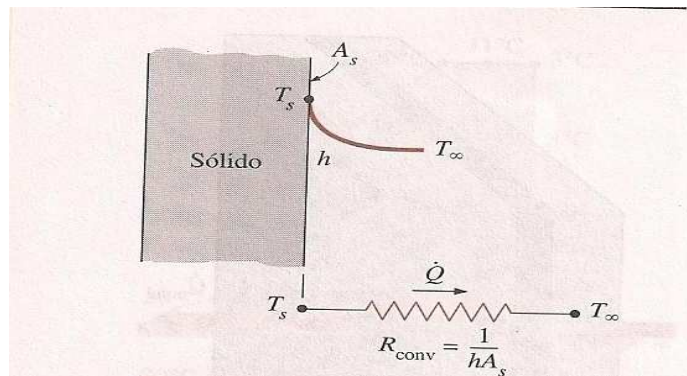


Ilustración 1-4 Resistencia a la convección [1]

Cuando la pared está rodeada por un gas, los efectos de la radiación, que se han pasado por alto, pueden llegar a ser significativos y es posible que sea necesario tenerlos en cuenta y analizarlos. La transferencia de calor por radiación entre una superficie de emisividad  $\varepsilon$  y área  $A_s$ , que está a la temperatura  $T_s$ , y los alrededores a una temperatura promedio ambiente,  $T_\infty$  se expresa como:

$$Q_{Rad} = \varepsilon \times \sigma \times A_S \times (T_S^4 - T_\infty^4) = h_{Rad} \times A_S \times (T_S - T_\infty) = \frac{T_S - T_\infty}{\frac{1}{h_{Rad} \times A_S}}$$

El término  $\frac{1}{h_{Rad} \times A_S}$ , es lo que se conoce como resistencia térmica por radiación.

#### 1.4.2 Red de resistencias térmicas

Para lograr un mejor entendimiento de este concepto, se explica de una manera cómoda, tomando como ejemplo una pared sencilla de área transversal  $A$  y espesor  $L$  que está expuesta a la convección por ambos lados a las temperaturas  $T_{\infty 1}$  y  $T_{\infty 2}$ , con coeficientes convectivos de calor  $h_1$  y  $h_2$ , respectivamente como se muestra en la ilustración 1-5.

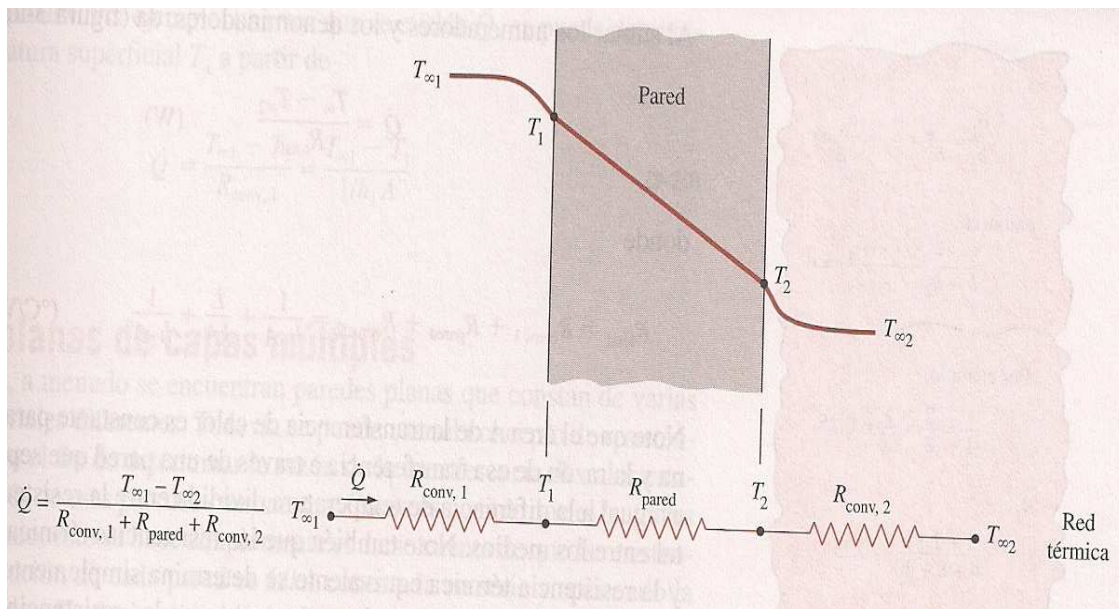


Ilustración 1-5 Red de resistencias térmicas [1]

Gráficamente este esquema lo que nos quiere decir es que cada medio en el que se encuentra la pared ofrece una resistencia térmica diferente, por encontrarse entre dos temperaturas distintas. También observamos que el flujo

de calor que atraviesa la pared es el mismo en cualquiera de los medios, teniendo en cuenta esta consideración podemos decir que:

$$Q = h_1 \times A(T_{\infty 1} - T_1) = k \times A\left(\frac{T_1 - T_2}{L}\right) = h_2 \times A(T_2 - T_{\infty 2})$$

El primer término de la igualdad representa el flujo de calor por convección hacia la pared, el segundo flujo de calor en el interior de la pared (conducción) y el último flujo de calor por convección de la pared hacia el medio.

Reacomodando la ecuación anterior nos queda:

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{\frac{1}{h_1 \times A}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k \times A}} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{\frac{1}{h_2 \times A}}$$

$$= \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{conv1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{R_{conv2}}$$

Sumando los numeradores y los denominadores resulta esta ecuación simplificada:

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}}, \text{ expresada en Watios (W)}$$

$$\text{Donde } R_{total} = R_{conv1} + R_{pared} + R_{conv2} = \frac{1}{h_1 \times A} + \frac{L}{k \times A} + \frac{1}{h_2 \times A} \text{ (8), dada en } (^\circ\text{C} / \text{W})$$

En resumen el flujo de calor a través de una superficie de área A conocida y espesor L queda definido por el cociente entre la diferencia de temperaturas de los medios convectivos y la resistencia total esto es:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{total}}$$

En la mayoría de las aplicaciones industriales el calor es transferido de un fluido a otro en tres pasos en un proceso en estado estacionario: desde un

fluido más caliente a una pared sólida, el paso a través de la pared sólida, y de aquí al fluido más frío. Se emplea comúnmente el coeficiente global de transferencia de calor  $U$ , basado en la diferencia total de temperatura entre los dos fluidos,  $\Delta T = T_{\infty 1} - T_{\infty 2}$

$$Q = U \times A \times \Delta T \quad (9) [1]$$

Al comparar la ecuación anterior con esta  $Q = \frac{\Delta T}{R_{total}}$ , nos damos cuenta que

$$U \times A = \frac{1}{R_{total}}$$

Si analizamos con mas detalle esta ecuación se evidencia que para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor no es necesario conocer las temperaturas superficiales de la pared, simplemente lo que necesitamos son los coeficientes de transferencia de calor por convección, la resistencia térmica de la pared, el área de la sección transversal por donde atraviesa el flujo de calor y el espesor de la pared.

Para el caso que no se tenga una pared si no dos o mas la resistencia térmica se calcula de la misma manera que el caso anterior solo que le vamos a agregar una resistencia mas a la parte de conducción, gráficamente lo podemos observar en la ilustración 1-6

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}}$$

Donde  $R_{\text{total}}$  es la resistencia térmica total, expresada de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} R_{\text{total}} &= R_{\text{conv}, 1} + R_{\text{pared}, 1} + R_{\text{pared}, 2} + R_{\text{conv}, 2} \\ &= \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_2 A} \end{aligned}$$

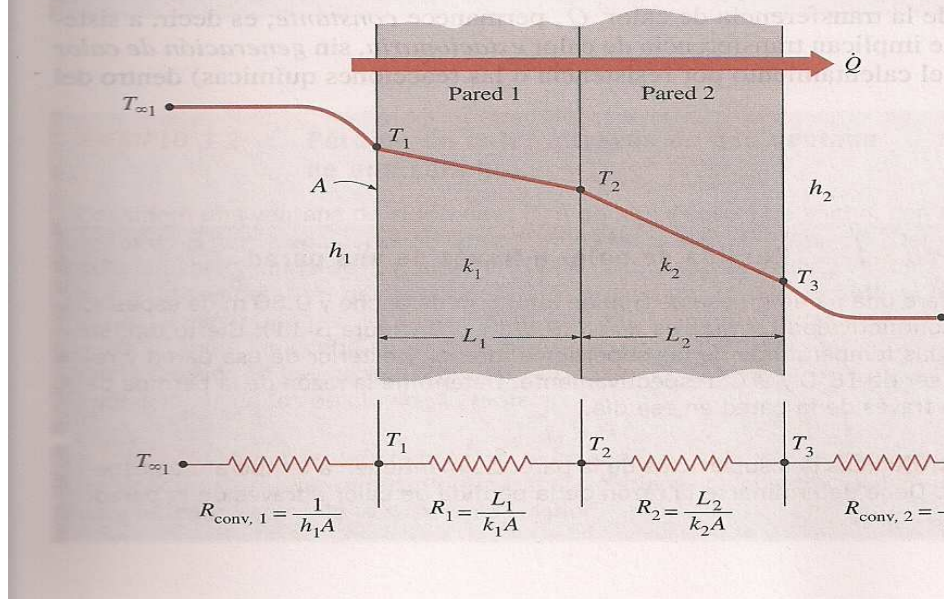


Ilustración 1-6 Esquema de las resistencias térmicas para 2 paredes [1]

## 1.5 COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE DISEÑO [6]

El diseño de un sistema de calefacción, refrigeración y aire acondicionado, incluyendo la selección del aislamiento, el dimensionamiento de tuberías y ductos, o la evaluación del desempeño térmico de partes del sistema, se basa en los principios de la transferencia de Calor. Las ecuaciones que mayormente se usan para estimar la carga de transferencia de calor en las diferentes partes del sistema, generalmente determinan la velocidad de transferencia de calor bajo condiciones de estado estable. Para un parte dada bajo condiciones estándar, esa velocidad de transferencia es un valor específico, **U**, el **coeficiente global de transmisión de calor** o **trasmitancia térmica**.

Estos coeficientes pueden ser determinados por ensayos o pruebas, o computados de los valores conocidos de conductancia térmica de los diferentes componentes. Debido a que es impráctico ensayar todas las combinaciones de materiales para determinar el coeficiente U, se dan tablas de valores de diseño para las construcciones más comunes.

*Para computar el valor de U de una construcción determinada, es necesario conocer primero la conductividad y el espesor de los materiales homogéneos, la conductancia de los materiales no homogéneos (como un bloque de concreto), la conductancia superficial de los dos lados de la construcción, y la conductancia de cualquier espacio de aire (cavidad) o la resistencia térmica de los elementos individuales.*

Si las conductividades de los materiales en una pared dependen altamente de la temperatura, se debe conocer la temperatura media para asignar el valor correcto. En tales casos, quizás sea más conveniente usar un procedimiento de ensayo y error para el cálculo de la resistencia total  $R_T$ . Primero, se estima la

temperatura media de operación para cada capa y se selecciona la conductividad  $k$  o la conductancia  $C$ .

La temperatura media de cada componente (la media aritmética de las temperaturas de superficie) puede usarse para obtener la conductividad  $k$  o la conductancia  $C$ . Este procedimiento se puede repetir hasta que se hayan seleccionado correctamente los valores de conductividad o conductancia para el resultado correspondiente de temperatura media. Generalmente, esto puede realizarse en dos o tres ensayos.

#### 1.5.1 Trayectoria del flujo de calor en serie y paralelo

En muchas instalaciones, el arreglo de los componentes es tal que resultan trayectorias del flujo de calor en paralelo de las diferentes conductancias. Si no hay flujo de calor lateral entre las trayectorias, puede considerarse que cada trayectoria se extiende desde el interior al exterior, y es posible calcular la transmitancia de cada recorrido, para obtener un valor promedio con la ecuación 8

$$U_{(prom)} = a(U_a) + b(U_b) + \dots + n(U_n) \quad (9)$$

donde  $a, b, \dots, n$  son las respectivas fracciones de un área típica compuesta de diferentes recorridos cuyas transmitancias son  $U_a, U_b, \dots, U_n$ .

Si el calor puede fluir lateralmente en una capa continua de modo que resulten planos isotérmicos transversales, la resistencia total promedio  $R_{T(prom)}$  será la suma de las resistencias de las capas entre dichos planos.

La transmitancia calculada, asumiendo únicamente flujo de calor en paralelo, por lo general es considerablemente más baja que la calculada cuando se

asume un flujo de calor combinado en serie–paralelo. La transmitancia real será un valor entre los valores calculados. En ausencia de valores de ensayos para la combinación, debe usarse un valor intermedio; normalmente una evaluación de la construcción o de la estructura mostrará que se debe usar un valor más cercano ya sea al mayor o al menor valor calculado. Generalmente, si la construcción contiene una capa con una alta conductividad en la cual la conducción lateral es muy alta en comparación con la transmitancia a través de la pared, se debe usar un valor más cercano al obtenido en los cálculos de la combinación en serie – paralelo. Sin embargo, si no hay una capa con alta conductancia lateral, debe usarse un valor más cercano al obtenido en los cálculos del flujo de calor en paralelo (ver ejemplo ASHRAE Fundamentals 1977 cap 22.3)

#### 1.5.2 Flujo de calor a través de paneles que contienen metal

La transmitancia de un panel que involucre un metal u otro material de alta conductividad que atraviese total o parcialmente el aislamiento debe ser determinada, si es posible, por ensayos en la **Caja Caliente con Caja de Guarda**.

Cuando sea requerido un cálculo se puede hacer una buena aproximación por el **Método de Zona**. Este requiere de dos cálculos por separado: uno para una porción limitada escogida, *Zona A*, que contiene el elemento con alta conductividad; el otro para la porción restante más sencilla de la construcción, llamada *Zona B*. Se combinan los dos cálculos, y se calcula la transmitancia por unidad de área total.

Se aplican las leyes básicas de la transferencia de calor sumando las conductancias de las áreas  $C \cdot A$  de los *elementos en paralelo*, y sumando las resistencias del área  $R \cdot A$  de los *elementos en serie*.

La forma de la superficie de la *Zona A* se determina a partir del elemento de metal. Para una viga de metal (como se muestra en las ilustraciones 1-4 y 1-5),



la superficie de la Zona A es una tira de ancho  $W$ , en el centro de la viga. Para una barra perpendicular a la superficie del panel, es un círculo de diámetro  $W$ . El valor de  $W$  se calcula de la ecuación empírica:

$$W = m + 2d \quad (10)$$

Donde,

$m$  = Ancho o diámetro del final de la trayectoria de calor en el metal, en pulgadas

$d$  = Distancia desde la superficie del panel al metal, en pulgadas. El valor de  $d$  no deber ser tomado menor a 0,5 pulgadas (para aire quieto).

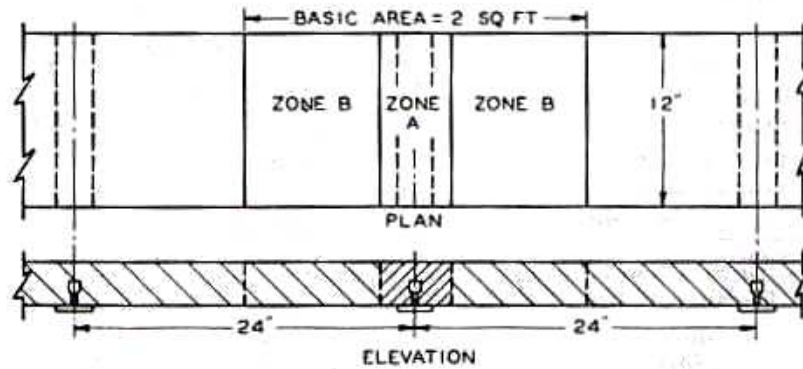


Ilustración 1-4 Cubierta del techo de yeso con T con nervio [6]

Para un aumento de la sección de la Zona A, ver la ILUSTRACIÓN 1-5

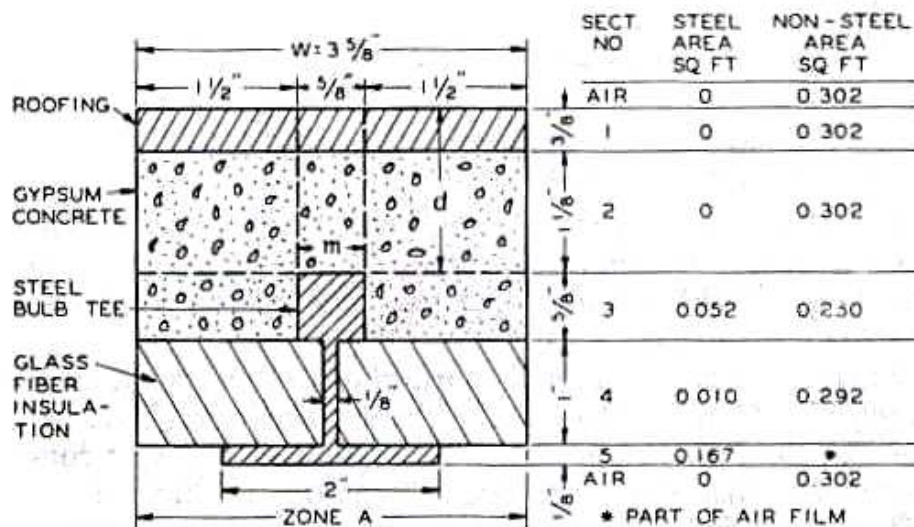


Ilustración 1-5 Ampliación de la Zona A de la ilustración 1-4 [6]

En general, el valor de  $W$  debe ser calculado por la ecuación (10) para cada extremo de la trayectoria de calor del metal, y debe usarse el valor mas grande en los límites del área fundamental como se muestra en el siguiente ejemplo:

Ejemplo: Calcular la transmitancia de la cubierta del tejado que se muestra en las ilustraciones 1-4 y 1-5. Una barra en T centrada a 24 pulg. sostiene una placa de fibra de vidrio, concreto de yeso y un techado armado. Las conductividades de los componentes son: acero 312, concreto de yeso 1,66; fibra de vidrio 0,25. La conductancia del techado armado es de 3.

El área fundamental es de  $2 \text{ ft}^2$  (24 in x 12 in), con una barra en T (12 in de largo) en la mitad. El área se divide en una Zona A y una B.

De la ecuación (9) se determina la Zona A de la siguiente manera:

Parte superior  $W = m + 2d = 0,625 + 2 \times 1,5 = 3,625 \text{ in.}$

Parte inferior:  $W = m + 2d = 2 + 2 \times 0,5 = 3 \text{ in}$

Se usa el mayor valor de  $W$ , tendiendo que el área de la Zona A es  $(12 \times 3,625) / 144 = 0,302 \text{ ft}^2$ . El área de la Zona B es  $2 - 0,325 = 1,698 \text{ ft}^2$ .

Para determinar la transmitancia del área de la Zona A, se divide la estructura de la zona en cinco secciones paralelas a las superficies superior e inferior como se muestra en la ilustración 1-5. La conductancia del área  $C \cdot A$  de cada sección se calcula sumando las conductancias de área de las trayectorias por el metal y por la parte no metálica. Las conductancias de área de las secciones se convierten a resistencias de área mediante la expresión  $1/(C \cdot A)$ , sumándose para obtener la resistencia total de la zona A.

Section	Area × Conductance	C · A	1/(C · A) = R/A
Air (outside, 15 mph)	0.302 × 6.0	1.812	0.552
No. 1, Roofing	0.302 × 3.0	0.906	1.104
No. 2, Gypsum concrete	0.302 × 1.66/1.125	0.446	2.242
No. 3, Steel	0.052 × 312.0/0.625	26.0	}0.038
No. 3, Gypsum concrete	0.250 × 1.66/0.625	0.664	
No. 4, Steel	0.0104 × 312/1.00	3.24	}0.302
No. 4, Glass fiber	0.292 × 0.25/1.00	0.073	
No. 5, Steel	0.167 × 312/0.125	416.83	0.002
Air (inside)	0.302 × 1.63	0.492	2.031
Total R/A =			6.271

Tabla 1-1 Cálculo de resistencia térmica sobre área [6]

La transmitancia de la zona A =  $1/(R/A) = 1/6,271 = 0,159$

Para la zona B, se suman las resistencias unitarias y luego se convierten a transmitancia de área como se muestra en la tabla:

Section	Resistance, R
Air (outside, 15 mph)	1/6.0 = 0.167
Roofing	1/3.0 = 0.333
Gypsum concrete	1.75/1.66 = 1.054
Glass fiber	1.00/0.25 = 4.000
Air (inside)	1/1.63 = 0.613
Total resistance	= 6.167

Tabla 1-2 Cálculo de la resistencia total [6]

Transmitancia Unitaria  $U = 1/R = 0,162$

Transmitancia de área  $U \cdot A$

$$\text{Para la Zona B} = 1,698 \times 0,162 = 0,275$$

$$\text{Para la Zona A} \quad \underline{0,159}$$

Transmitancia total de área para el área fundamental 0,434

$$\text{Transmitancia por } ft^2 = 0,434 / 2 = 0,217$$

En pruebas hechas por el método de la caja caliente con caja de guarda a construcciones similares, un laboratorio reportó un valor de  $U$  de  $0,219 Btu / (hr \cdot ft^2 \cdot F)$ , y otro reportó un valor de  $U$  de  $0,206 Btu / (hr \cdot ft^2 \cdot F)$  obteniéndose un porcentaje de error del valor calculado con respecto a los reportados de 0,9 y 5% respectivamente.

**Nota:** Un panel con una estructura metálica interna, unida en uno o ambos lados a una cubierta o revestimiento metálico, presenta un problema especial de flujo de calor lateral que no cubre el *Método de Zona*.

### 1.5.3 Flujo de calor en serie a través de áreas desiguales.

Una construcción puede estar compuesta de dos o más capas (planas o de curvaturas pequeñas) de áreas desiguales, separadas por un espacio de aire y colocadas para que el calor fluya en serie a través de las capas. La construcción más común de este tipo es una combinación de techo y tejado donde el espacio del ático no es calentado ni ventilado. Se puede calcular un coeficiente combinado basado en el área más conveniente desde el aire interior al aire exterior mediante la ecuación:

$$R_T = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{n_2 U_2} + \frac{1}{n_3 U_3} + \dots + \frac{1}{n_p U_p} \quad (11) [10]$$

El coeficiente combinado  $U$  es el recíproco de  $R_T$ , es decir, como ya se mencionó  $U = 1 / R_T$ .

Donde,

$U$  = Coeficiente combinado para se usado con  $A_1$

$R_T$  = Resistencia total de todos los elementos en serie.

$U_1, U_2, \dots, U_p$  = Coeficiente de transmisión de  $A_1, A_2, \dots, A_p$  respectivamente.

$n_2, n_3, \dots, n_p$  = Relaciones de áreas  $A_2 / A_1, A_3 / A_1, \dots, A_p / A_1$  respectivamente.

El coeficiente global debe multiplicarse por el área  $A_1$  para determinar la pérdida de calor.

En el cálculo, se debe contabilizar la resistencia de los espacios de aire entre las capas asignándole la mitad de una resistencia del espacio de aire apropiada para cada una de las capas, en lugar de la conductancia de la superficie.

#### 1.5.4 Concepto de $U_o$

En la sección 4 de la norma 90-75 de la ASHRAE: *Conservación de la Energía en Diseños de Nuevos Edificios*, se establecen los requerimientos en términos de  $U_o$ , donde  $U_o$  es la transmitancia térmica combinada de las áreas respectivas de un montaje de una pared gruesa exterior, de un tejado/techo, o de un piso. Para una pared la ecuación de  $U_o$  es:

$$U_o = \frac{U_{pared} A_{pared} + U_{vent} A_{vent} + U_{puerta} A_{puerta}}{A_o} \quad (12) [10]$$

Donde

$U_o$  = La transmitancia térmica promedio del área de la pared gruesa, Btu/h\*ft<sup>2</sup> \*°F

$A_o$  = El área exterior de la pared gruesa, ft<sup>2</sup>

$U_{pared}$  = La transmitancia térmica de todos los elementos del área opaca de la pared, Btu/h\*ft<sup>2</sup> \*°F

$A_{pared}$  = Área opaca de la pared, ft<sup>2</sup>

$U_{vent}$  = La transmitancia térmica del área de la ventana, Btu/h\*ft<sup>2</sup> \*°F

$A_{vent}$  = Área de la ventana (incluyendo el bastidor o marco), ft<sup>2</sup>

$U_{puerta}$  = La transmitancia térmica de del área de la puerta, Btu/h\*ft<sup>2</sup> \*°F

$A_{puerta}$  = Área de la puerta, ft<sup>2</sup>

Nota: Donde se use más de un tipo de pared, ventana o puerta, el termino  $U \times A$  para ese caso, se desarrollará en sus sub-elementos como:

$$U_{pared_1}A_{pared_1} + U_{pared_2}A_{pared_2}, etc \quad (13) \quad [10]$$

## **2 MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICIÓN DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRASMISIÓN DE CALOR U**

### **2.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN [7]**

Para la conductividad, hay métodos en estado estable (por encima de 1200 °K) y métodos de pulsos (en particular sobre 1500 °K). Si el material bajo ensayo es un conductor, la muestra puede ser auto calentada mediante el paso de una corriente eléctrica.

La medición de la difusividad requiere de un registro exacto de la dependencia de la temperatura con respecto al tiempo que sigue una perturbación de temperatura transitoria o periódica en uno de los límites de la muestra. Para la medición de la difusividad se prefieren normalmente los métodos transitorios.

Como consecuencia de los rangos amplios de las propiedades térmicas no hay un método sencillo de medición que pueda usarse para medir cada propiedad, en particular la conductividad térmica. Los valores aceptables que se quieren obtener para las propiedades medidas, el tipo de material y el rango de valores de la propiedad sobre su rango de temperatura operacional ejercen una influencia particular sobre el método usado, sobre las dimensiones y conformación de la muestra de ensayo y los equipos.

Método de Medida	Breve descripción	Tipo de material	Rango de T en °C	Rango de propiedad en W/(m.K)
Técnica de las cuatro – sondas	La conductividad térmica se determina de la medición de la resistividad eléctrica; la corriente y el voltaje normalmente se miden con 4 sondas.	Métales y aleaciones metálicas.	20 a 1600	10 a 800
Método del flujo de calor guardado.	Similar en el principio al Método del medidor de flujo pero es usado para medir muestras más pequeñas de conductividad más altas usando diferentes materiales de calibración y un cilindro de guarda alrededor de la pila de ensayo.	Polímeros, rocas, cerámicos, algunos metales y aleaciones.	100 a 300	0.2 a 20
Placa caliente con guarda.	Se establece un flujo de calor lineal en estado estable en una gran muestra plana (Normalmente son dos piezas nominalmente idénticas) intercalada entre una placa central caliente controlada y protegida y placas frías que operan a temperaturas mas bajas de forma controlada. Esta técnica absoluta tiene alta precisión, especialmente a temperatura ambiente.	Materiales aislantes sólido, opaco, homogéneos y compuestos	-180 a 1000	0.0001 a 2
Equipos de caja caliente, ya sea con guarda o calibrada. (Resistencia térmica)	Usado para calcular el coeficiente global de transferencia de calor U. Una muestra grande se coloca entre una cámara caliente y una fría que operan a condiciones fijas de temperatura, humedad y flujo de aire.	Sistemas que contienen, aislamiento, madera, mampostería, vidrio y otros materiales de edificios.	-20 a 40	Rango de conductancia térmica de 0.2 a 5 (m <sup>2</sup> K)/W



Método de la cinta caliente	Muy similar en el principio al Método del alambre caliente pero usa como la fuente de energía una lamina de metal delgada y estrecha apretada directamente entre dos piezas de la muestra.	Vidrios, cerámicos, etc.	-50 a 500	0.1 a 5
Método del alambre caliente	Hay tres formas disponibles, un alambre resistivo único o uno cruzado o dos alambres paralelos con una pequeña distancia de separación. Es un método en estado cuasi – estable donde las propiedades térmicas se obtienen de la temperatura vs. la respuesta en el tiempo debido a un flujo de calor generado por el alambre embebido en la muestra. La curva se analiza de acuerdo con un modelo basado en una solución de la ecuación de calor dependiente en el tiempo bajo un conjunto particular de condiciones de contorno. En su principio es un método absoluto.	Materiales refractarios, muchas clases de sólidos incluyendo minerales, vidrios, gránulos de plásticos y, polvos, más fluidos y gases.	-40 a 1600	0.001 a 20
Método del destello de láser	La difusividad térmica se determina de una análisis del aumento de temperatura vs. La respuesta en el tiempo inducido por la absorción de energía de un pulso de láser.	Metales, polímeros, cerámicos.	-100 a 3000	0.1 a 1500

Técnica del haz modulado.	La difusividad térmica se determina de la modulación de temperatura inducida por la absorción del haz de luz modulado desde una lámpara de xenón u otra fuente.	Metales, polímeros, cerámicos.	300 a 2000	1 a 500
Métodos Fototérmicos	Una luz de intensidad modulada se dirige sobre la superficie de la muestra y se detecta la conducta en el tiempo de las ondas térmicas resultantes. La amplitud y el cambio de fase son evaluados como una función de la frecuencia modulada usando modelos apropiados para obtener la difusividad térmica o la conductividad térmica	Muestras pequeñas de la mayoría de los materiales sólidos.	-50 a 500	0.1 a 200.
Método de prueba de tubería. (Flujo radial)	Similar en su principio al método de placa caliente con guarda pero usa una muestra en forma de cilindro largo o tubular que envuelve un calentador central con calentadores de guarda en los extremos y emplea un flujo de calor radial para medir la conductividad térmica y la transferencia térmica.	Aislante como los silicatos de calcio, colchas o mantas de fibra mineral y refractaria, plásticos celulares, espumas de vidrio, placas microporosas y productos en polvo.	50 a 800	0.02 a 2, dependiendo de tipo de material y la temperatura

Tabla 2-1 Métodos comunes de medición de la conductividad térmica o de la difusividad térmica

En general, la conductividad térmica se mide por técnicas en estado estable y la difusividad térmica por medio de técnicas transitorias. Es posible usar algunos de estos últimos de forma modificada para medir también la conductividad térmica. Un método de medición es seleccionado dependiendo de los siguientes criterios:

- Una muestra con un tamaño y una forma posible.
- El rango de temperaturas, el cual es limitado para cada técnica individual.
- El rango de conductividad térmica, debido a que materiales de baja conductividad como los materiales aislantes o espumas, necesitan métodos diferentes a los materiales de alta conductividad como los metales.

En la tabla que se aparece a continuación se da una breve descripción de los métodos de medición usados más comúnmente. (Aparece un link que permite ir a la página Web en donde aparecen mas detalles de cada método). Posteriormente se explican detalladamente los métodos que por sus características y aplicabilidad podrían usarse para la presente investigación.

### **3 DISPOSITIVOS QUE MIDEN EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U**

Los dispositivos que se describen a continuación funcionan bajo el mismo principio, estas constan de dos cámaras una fría (donde circula aire frío) y otra caliente (donde circula aire caliente) y entre las dos cámaras se ubica la muestra a ensayar, ambos flujos de aire se hacen recircular por las caras superficiales que están en contacto con los mismos hasta que se alcanza el estado estable y en ese momento se hace la medición de los parámetros que se necesitan para calcular el coeficiente global de transferencia de calor U y la conductividad térmica.

#### **3.1 CAJA CALIENTE ROTABLE CON GUARDA, Universidad de Massachussets.[8]**

Este dispositivo tiene medidas de 4m x 3m. El máximo tamaño de muestra que se puede evaluar es de 2,4m x 2,4m, estas pruebas las hacen en tamaño real para obtener precisión en los datos que se están evaluando, este aparato fue diseñado en base a las recomendaciones que se dan en la norma ASTM C 1199, ISO 8990 e ISO 12567.

Consta de dos cámaras climáticas, una donde se simula calor y la otra condiciones de frío, la muestra esta colocada entre las dos cámaras y se espera un tiempo prudente para lograr las condiciones de equilibrio de las temperaturas en cada lado y así empezar a evaluar las variables que se desean medir y en nuestro caso en particular el coeficiente global de transferencia de calor.

A continuación paso a describir la forma de cómo están ubicados los componentes internos en cada una de las cámaras y la instrumentación.

### 3.1.1 Lado frío

Un deflector esta ubicado a 250 mm de la muestra. Un sistema de refrigeración opera externamente y continuamente esta generando aire frío y este circula por medio de ductos que están conectados en la parte de atrás de la cámara fría.

Este lado consta de 5 sopladores instalados en la parte trasera de la cámara fría, el aire es calentado por medio un banco de resistencias eléctricas y circula a por la muestra a través del espacio de aire que hay entre la muestra y el deflector. El flujo de aire es paralelo.

La temperatura del aire es controlada, controlando la temperatura que va entrando a la cámara y la temperatura deseada se ajusta variando las resistencias calentadoras, la velocidad del aire es controlada por medio de un potenciómetro interrumpiendo el circuito de arranque de los sopladores o ventiladores. Hay 5 anemómetros midiendo continuamente la velocidad del aire en el espacio de aire que hay entre la muestra y el deflector. Las velocidades típicas del aire que se miden están entre 1.3 y 6.7 m/s.

### 3.1.2 Lado caliente

La cámara de mediciones del lado caliente tiene dimensiones de  $2.3 \text{ m}^2$  por 0.4 m de profundidad. Las paredes de la cámara tienen 76 mm de espesor constituida por espuma de poliestireno extruido que tiene una resistencia térmica aproximada de  $2.6 \text{ m}^2 \times ^\circ K / W$  a  $24^\circ\text{C}$ .

Las paredes de la cámara de medición están reforzadas por marcos de aluminio y en los lados interior y exterior se conectan por varillas tratadas de fibra de vidrio.

El borde de la cámara de medición los cuales tienen contacto con la muestra es adelgazado a un espesor de 19mm y a 13mm por medio de un empaque cuadrado de neopreno que esta pegado al borde.

Este empaque es muy compresible y realmente sigue el contorno de la superficie de prueba y minimiza las fugas de la cámara de medición. Un deflector es montado en el interior de la cámara de medición a 150mm del borde del empaque.

Detrás de los deflectores hay instalados ocho ventiladores y cuatro resistencias eléctricas calentadoras.

Cuatro anemómetros miden continuamente la velocidad del aire en el espacio de aire que hay entre la muestra y el deflector. Las velocidades típicas del aire las cuales varían entre 0 y 0.45 m/s.

La instalación se muestra en la ilustración 3-1



**Ilustración 3-1 Caja Caliente rotable con guarda (UMASS)**

### 3.2 CAJA CALIENTE ROTABLE DEL LABORATORIO NACIONAL DE FÍSICA (NPL), INGLATERRA [9]

Este es el dispositivo mas moderno que existe en lo que a tecnología de medición del U, se refiere, fue construido por Sir Ray Williams y se basó en la norma ISO 8990 para ese propósito. De este equipo se conocen muy pocos detalles ya que por obvias razones su diseñador y constructor no revela por los D.R.A, de este equipo se conoce las dimensiones de la máquina 3m x 3m y el tamaño máximo de la muestra que se puede medir que 2400mm x 2400mm, pero sin embargo lo que nos llama bastante la atención es el innovador sistema de rotación el cual hemos escogido de base para hacer el nuestro.

La instalación se muestra en la ilustración 3-2

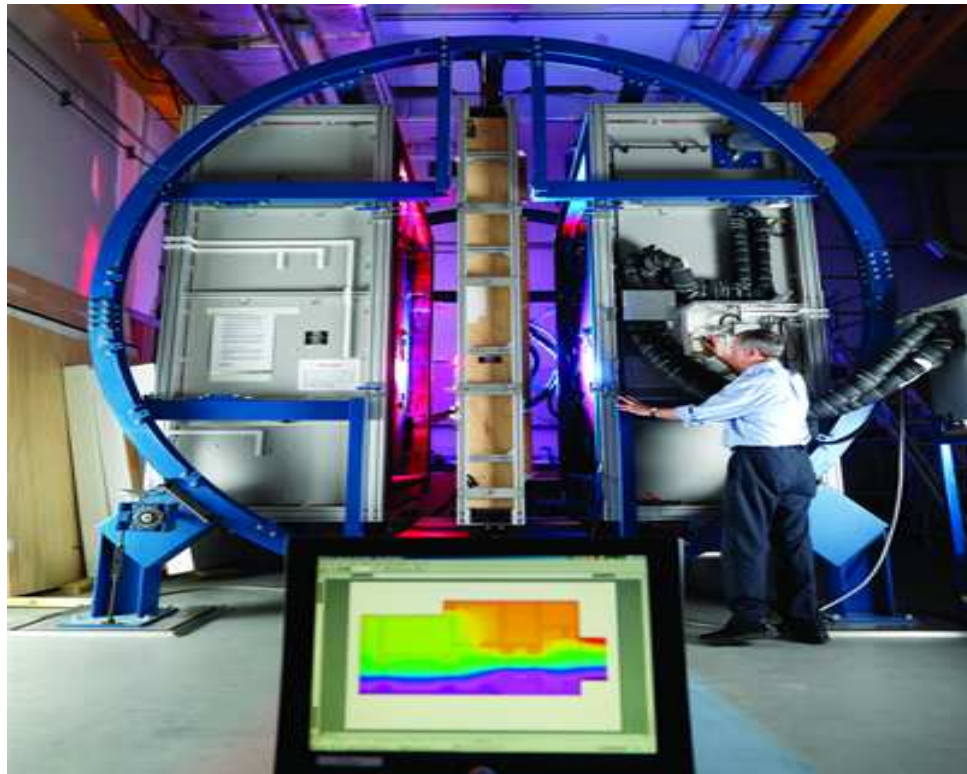


Ilustración 3-2 Caja Caliente Rotable (NPL)

### 3.3 HOT BOX ESTÁTICA DEL CENTRO DE ENERGÍA RENOVABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA (CEERE), ESTADOS UNIDOS, UMASS. [8]

Este modelo tiene la particularidad de medir flujo paralelo y perpendicular a la muestra, incrementa la trayectoria del flujo para una entrega uniforme del mismo, temperaturas internas dentro de los deflectores de 0,5 °C, temperaturas uniformes alrededor de ambos lados de la caja de medición.

Deshumidificación del aire en el lado que se está midiendo, sellado garantizado, es flexible y expandible. Ventiladores ubicados en el exterior proveen corrientes de aire. La instalación se muestra en la ilustración 3-3.



Ilustración 3-3 Hot Box Estática



De esta instalación se escogió como referencia para nuestra instalación el sistema interno de ductería para conducir el flujo de aire frío. También nos dan detalles de como direccionar el flujo en su recorrido hasta llegar a la muestra. Los detalles de la ductería que va en el interior de la caja se muestran en las ilustraciones 3-4, 3-5, 3-6 y 3-7.

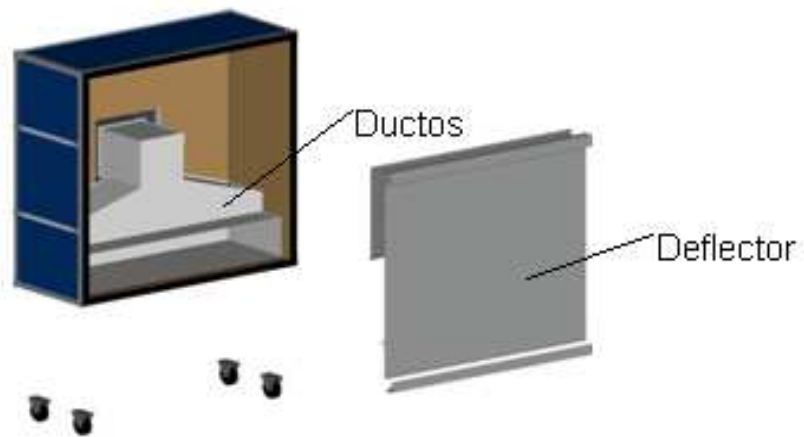
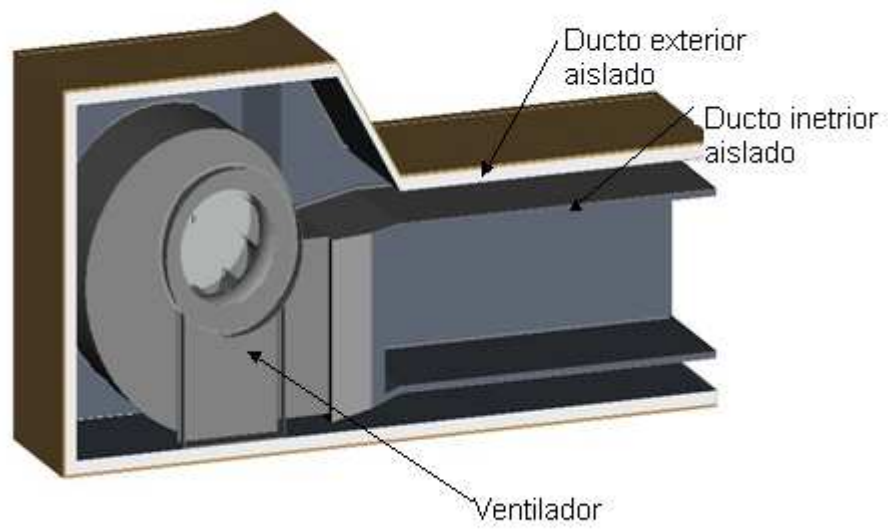
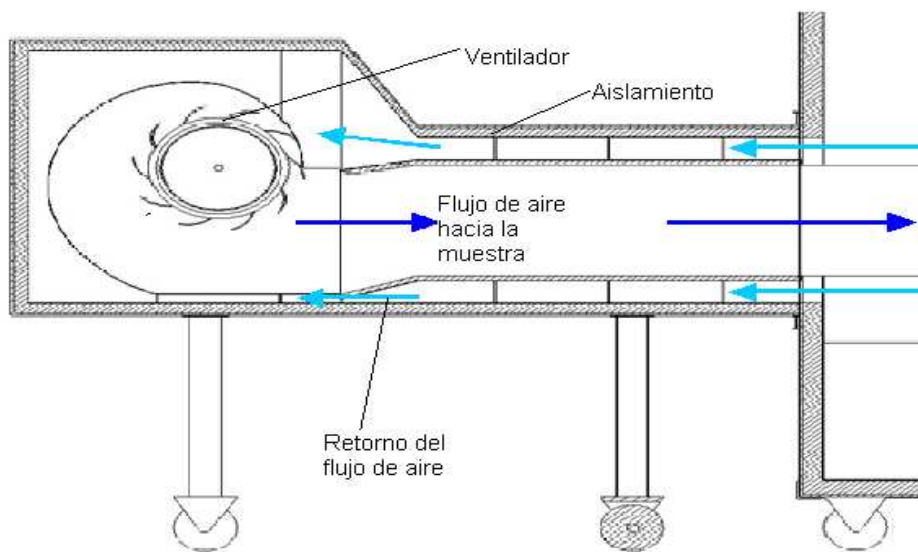


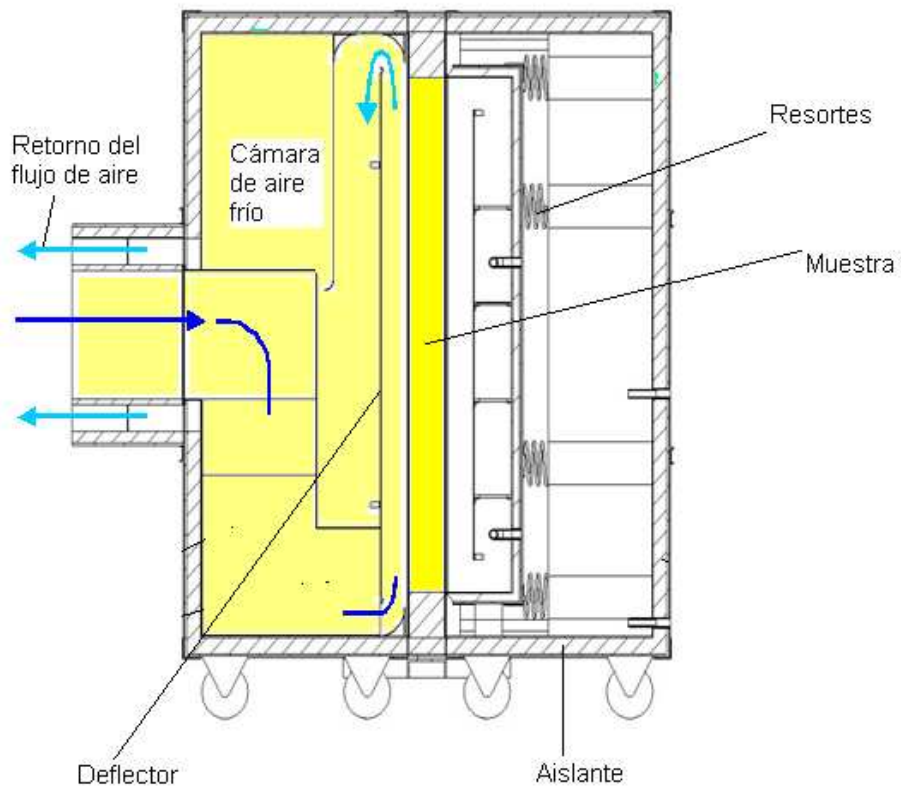
Ilustración 3-4 Ubicación del ducto en el interior de la caja



**Ilustración 3-5 Ductos Aislados con Ventilador Montado**



**Ilustración 3-6 Direccionamiento del flujo de aire**



**Ilustración 3-7 Direccionamiento del flujo de aire en el interior de la caja**

#### **4 AISLANTES TERMICOS QUE USAN EN COTECMAR**

Un aislante térmico es un material usado en la construcción y caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura.

Por su baja conductividad térmica y un bajo coeficiente de absorción de la radiación, el material más resistente al paso de calor es el aire y algunos otros gases. Sin embargo, el fenómeno de convección que se origina en las cámaras de aire aumenta sensiblemente su capacidad de transferencia térmica. Por esta razón se utilizan como aislamiento térmico materiales porosos o fibrosos, capaces de inmovilizar el aire confinado en el interior de celdillas más o menos estancas. Se suelen utilizar como aislantes térmicos: lana de roca, fibra de vidrio, vidrio expandido, poliestireno expandido, espuma de poliuretano, aglomerados de corcho, etc. En la mayoría de los casos el gas encerrado es el aire.

En COTECMAR utilizan para aislamiento térmico la fibra de vidrio y el poliuretano, y para aislamiento acústico lana de roca y fibra de vidrio. La finalidad del análisis de estas muestras es encontrar el espesor óptimo que ellos necesitan para minimizar sus costos. El ensayo consiste en evaluar los tres materiales a diferentes espesores que no sobrepasen las 3 pulgadas y después que se haga el análisis decirle a COTECMAR “Señores el espesor óptimo para su buque nodriza es:...pulgadas. En las ilustraciones 4-1,4-2 y 4-3 se muestran esos materiales aislantes con sus propiedades térmicas.



Conductividad térmica:  
 $0.026W / m^{\circ} K$   
Densidad: [11]  
 $40Kg / m^3$

**Ilustración 4-1 Lámina de poliuretano**



Conductividad térmica:  
 $0.056 - 0.065W / m^{\circ} K$   
Densidad: [1]  
 $38Kg / m^3$

**Ilustración 4-2 Muestra de fibra de vidrio**



Conductividad térmica:  
 $0.034 - 0.042 W / m^{\circ} K$   
Densidad: [12]  
 $140 - 160 Kg / m^3$

**Ilustración 4-3 Muestra de lana de roca**

## **5 CONDUCTIVIDAD TERMICA**

La conductividad térmica de un material se define como la capacidad para conducir el calor. Un valor elevado de conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor, y un valor bajo indica que es un mal conductor del calor, por esta razón llevan el nombre de materiales aislantes.

Las unidades de esta propiedad se dan en (W/m<sup>0</sup>K) Watts por metro grados Kelvin, para el sistema internacional y en (Btu/h x ft x °F) BTU(British Thermal Unit) hora por pie por grado Fahrenheit.

### **5.1 EXPERIENCIA CON EL CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN MATERIALES COMPUESTOS**

Dentro de los departamentos que se encuentran en COTECMAR, encontramos el de materiales compuestos, allí se desarrollan diferentes ensayos en búsqueda de nuevos materiales aislantes.

El caso que se presentó en COTECMAR fue que el departamento de calidad le paró la construcción de la PAFL (Patrulleras de Apoyo Fluvial Liviana) a materiales compuestos y al departamento de producción, porque iban a ensamblarla con un material compuesto nuevo del cual no se conocía la conductividad térmica.

COTECMAR planteo el problema a la Universidad Tecnológica de Bolivar por el convenio que hay con ellos y la misión era hallarle la conductividad térmica a esos materiales compuestos, para ellos poder terminar la embarcación.

Así que esa problemática se le planteó al grupo de investigación EOLITO, para que trabajara en esa parte de cálculo de la conductividad térmica.

Después de pasar por dificultades y diferentes obstáculos finalmente se entregó un informe a COTECMAR en el cual se encuentra la solución a su problemática. A continuación se muestra el informe:

#### **5.1.1 Informe de ensayo**

Se recibieron 33 muestras de tamaños diversos cuyo promedio esta en los 9,6 cm<sup>2</sup>, estas contienen un rótulo que las identifica, indicando

La sección a la que pertenecen en el buque, las cuales describo a continuación:

**FONDO CASCO H130 (4 Muestras)**

**FONDO CASCO H200 (4 Muestras)**

**MAMPARO H100 NORMAL (4 Muestras)**

**MAMPARO DOBLE (8 Muestras)**

**COSTADO CASCO VACIO (3 Muestras)**

**COSTADO CASCO MANUAL (6 Muestras)**

**FONDO CASCO H80 (4 Muestras).**

La instalación donde se realizaron los ensayos se basa en el principio de la placa caliente referenciado en la norma ASTM C177, la cual consta de una resistencia eléctrica y paredes aisladas con lana de vidrio dispuestas en forma de cubo para garantizar el flujo de calor unidimensional através de la muestra.



### 5.1.2 Parámetros a medir

Para esta parte es muy importante tener en cuenta la ecuación o ecuaciones que se van a necesitar para saber a con certeza que variables vamos a medir y cual obtener, es por eso que la ecuación escogida esta referenciada bajo la norma ASTM C1045, sección 6 (determinación de la conductividad térmica en relación al rango de temperatura), el porque de esto se debe simplemente a que existen ecuaciones que dependiendo de la diferencia de temperatura, (sea pequeña o grande) así escogeremos la que se adapte a nuestras mediciones. De la sección 6 de la norma ASTM C1045, resaltamos el numeral **6.2** que nos muestra la ecuación (3), referenciada esta a la sección 3 de la norma en mención numeral **3.3.4 conductividad térmica aparente**, cuyo valor se determina a partir de la expresión:

$$\lambda = Q \cdot L / A \cdot (T_s - T_h), \text{ donde}$$

$\lambda$ : Conductividad Térmica, (watts/mts\*°C).

L: Espesor de la muestra, (mts).

A: Área de la sección transversal de la muestra por donde pasa el flujo de calor, (mts<sup>2</sup>).

Q: Calor suministrado a la muestra, (watts).

T<sub>s</sub>: Temperatura en la superficie en contacto directo con la fuente de calor, (°C).

T<sub>h</sub>: Temperatura en la superficie exterior de la muestra, (°C).

Esta ecuación no nos sirve para el cálculo correcto de la conductividad térmica ya que esta ecuación se utiliza para diferencia de temperaturas pequeñas y el rango para esta no supera los 25 grados Kelvin más el 5%.

Entonces para resolver el conflicto hacemos referencia al numeral 6,3 de la norma ASTM C1045, donde nos dan una ecuación para calcular la conductividad térmica para grandes diferencias de temperaturas, esta es:

$$\lambda = 0,5 \cdot Q \cdot L / A \cdot (T_s - T_h).$$

En base a esta ecuación hicimos el cálculo de la conductividad térmica de las muestras de materiales compuestos tipo sándwich y resinas.

Determinada la ecuación los parámetros que se tuvieron en cuenta en la medición fueron: el calor suministrado  $Q$ , el área de la muestra  $A$ , el espesor de la muestra  $L$ , las temperaturas interior y exterior de la muestra  $T_s$  y  $T_h$ .

### 5.1.3 Dificultades encontradas

Al iniciar las pruebas no se tenía claro el calor que se le iba a suministrar a las muestras, por lo que se tomaron las muestras numeradas 2 y 5 pertenecientes a los grupos de FONDO CASCO H130 Y FONDO CASCO H200 respectivamente y se comenzaron a hacer los ensayos, en los cuales se sobrepasó la temperatura y las afectó severamente.

Las fallas detectadas en esta primera parte, fueron:

1. Pérdida de calor por los costados de la muestra.
2. La parte exterior de la muestra no se tenía cubierta lo cual no arrojaba pérdidas de calor hacia el ambiente, (así no garantizábamos que todo el calor suministrado atravesara la muestra).
3. La ubicación de las termocuplas no era la más adecuada para obtener datos confiables en la medición.

Superadas esas fallas y con el soporte de que la prueba se estaba haciendo bajo las condiciones de la norma ASTM C1045, empezamos a obtener mejores resultados ya que Calibramos la instalación en base a la conductividad térmica de un material conocido, el Acero al cual se le calculó su conductividad ( $45\text{watts/mts}^{\circ}\text{C}$ ) y en tablas es  $45,3\text{watts/mts}^{\circ}\text{C}$ , lo cual nos arrojó un 0,67% de error en la medición, hay que tener en cuenta que esta conductividad se calculó aplicando conductividad pura y eso implica que el acero como material conductor mantiene una diferencia de temperatura muy bajo, pero este paso nos sirvió para encontrar el punto de medición adecuado para materiales aislantes.

#### **5.1.4 Equipos utilizados en el ensayo**

5 PINZAS VOLTIAMPERIMETRICAS.

4 TERMOCUPLAS TIPO K.

INSTALACION AISLADA GENERADORA DE CALOR POR MEDIO DE UNA RESISTENCIA ELECTRICA.

MOLDE DESMONTABLE DE POLIURETANO EXPANDIDO.

TAPA DE POLIURETANO.

1 EXTRACTOR.

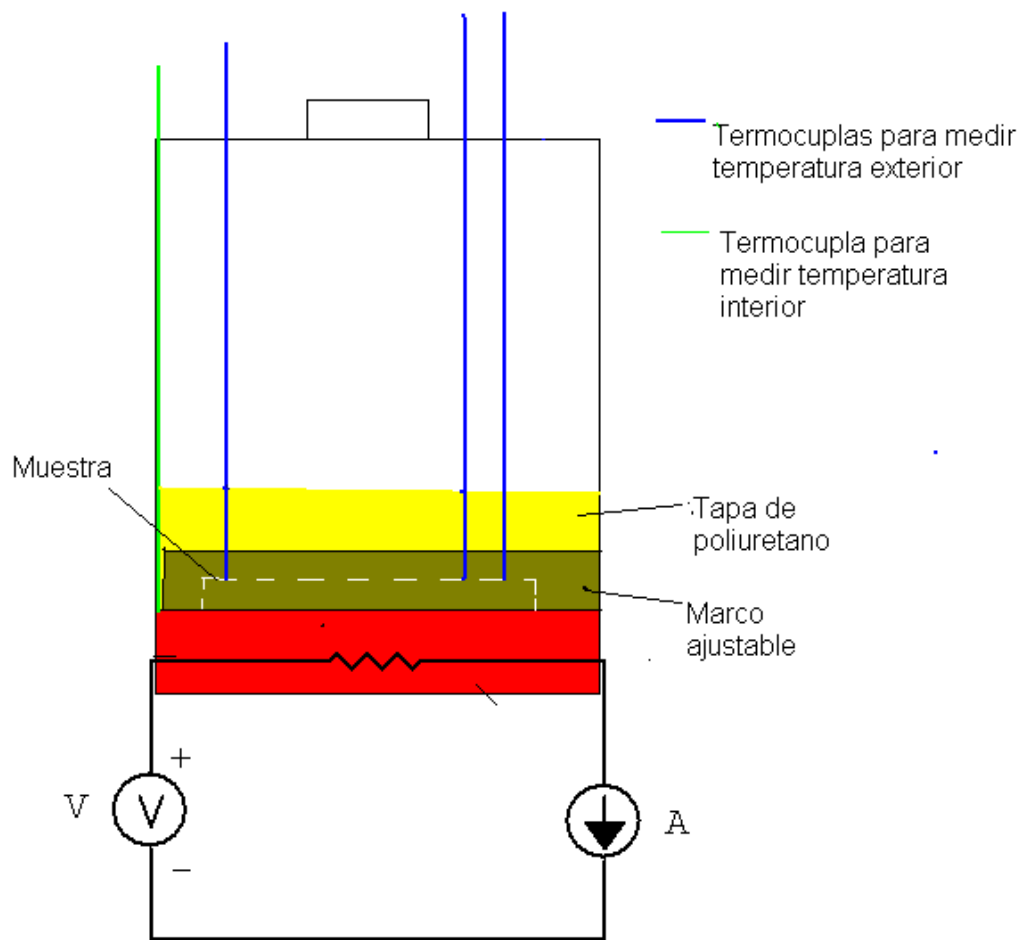
#### **5.1.5 Descripción del ensayo**

Se coloca la muestra en el fondo de la instalación y dependiendo de su área se aísla lateralmente con el molde de poliuretano expandido, esto para evitar las pérdidas por los costados de la misma.

La termocupla que mide la temperatura interior se introduce por un costado de la muestra y se ubica en la parte inferior, como la superficie de la muestra es lisa y esa misma es la que está en contacto con la superficie caliente o fuente generadora de calor entonces podemos tomar la temperatura del piso como la temperatura en esa cara de la muestra.

La tapa de poliuretano nos sirve para “tapar” la muestra y a la vez para introducir en diagonal las 3 termocuplas para obtener un promedio de la temperatura del lado exterior de la muestra y al final se cierra la instalación por completo para evitar las pérdidas de calor hacia el medio ambiente y el extractor para remover el calor generado por la resistencia eléctrica.

Un esquema de lo anteriormente descrito es el que se muestra a continuación:



**Ilustración 5-1 Esquemático del prototipo para medir conductividad térmica**

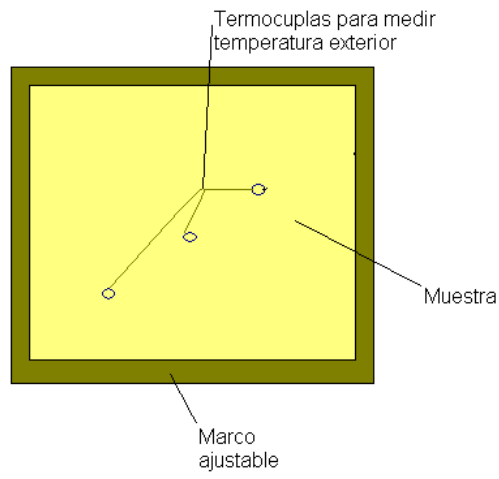


Ilustración 5-2 Muestra vista desde arriba



Ilustración 5-3 Prototipo para medir la conductividad térmica



Ilustración 5-4 Vista superior del prototipo

### 5.1.6 Resultados

Los valores de temperaturas, áreas, calor suministrado, espesor y conductividad térmica son mostrados en la siguiente tabla:

Nº	Muestra	L, Espesor (mts)	A, Área (mts2)	T1°C	T2°C	ΔT °C	Q(watts)	K(Watts/mts**C)
1	Fondo casco H130	0,016	0,009696	106	52	54	40	0,611172228
3	Fondo casco H130	0,018	0,00931	108	45	63	40	0,613779346
4	Fondo casco H130	0,015	0,009603	102	52	50	40	0,624804749
6	Fondo casco H200	0,017	0,009215	107	46	61	40	0,604858436
7	Fondo casco H200	0,017	0,0098	108	55	53	40	0,654601463
8	Fondo casco H200	0,016	0,009797	108	58	50	40	0,653261202
9	Mamparo H100 Normal	0,017	0,009696	108	48	60	40	0,584433443
10	Mamparo H100 Normal	0,019	0,009991	108	44	64	40	0,594284856
11	Mamparo H100 Normal	0,017	0,009405	106	44	62	40	0,583080379
12	Mamparo H100 Normal	0,017	0,00931	108	45	63	40	0,579680494
13	Mamparo doble	0,019	0,009215	110	42	68	40	0,606428138
14	Mamparo doble	0,018	0,0101	108	48	60	40	0,594059406
15	Mamparo doble (vacío)	0,019	0,009595	108	44	64	40	0,618811881
16	Mamparo doble (vacío)	0,019	0,010682	104	46	58	40	0,613342458
17	Mamparo doble	0,019	0,0104	108	47	61	40	0,598991173
18	Mamparo doble	0,019	0,010608	108	48	60	40	0,597033685
19	Mamparo doble	0,019	0,0109	108	48	60	40	0,581039755
20	Mamparo doble	0,019	0,010584	108	48	60	40	0,598387503
21	Costado casco (vacío)	0,0045	0,011128	110	66	44	40	0,183811516
22	Costado casco (vacío)	0,0056	0,0095	110	71	39	40	0,302294197
23	Costado casco (vacío)	0,005	0,0108712	108	63	45	40	0,204413701
24	Costado casco (manual)	0,00745	0,0106	110	65	45	40	0,312368973
25	Costado casco (manual)	0,007	0,008925	110	64	46	40	0,341005968
26	Costado casco (manual)	0,0077	0,009212	110	65	45	40	0,371496116
27	Costado casco (manual)	0,0075	0,0089905	110	66	44	40	0,379187289
28	Costado casco (manual)	0,0076	0,008955	110	64	46	40	0,368994732
29	Costado casco (manual)	0,007	0,006588	106	66	40	40	0,531268974
30	Fondo casco H80	0,012	0,009506	113	72	41	40	0,615785666
31	Fondo casco H80	0,012	0,010815	112	72	40	40	0,554785021
32	Fondo casco H80	0,012	0,011025	112	73	39	40	0,558171987
33	Fondo casco H80	0,012	0,011025	112	73	39	40	0,558171987

Tabla 5-1 Resultados de los ensayos

## 6 INSTALACION EXPERIMENTAL

Este consta de dos cámaras donde en una se simularan condiciones de calor y en la otra condiciones de frío, esos flujos se harán circular por la muestra de forma paralela y hasta obtener condiciones de estado estable, es decir hasta que se logre el equilibrio de temperatura en cada uno de los lados de cada cámara.(según norma ASTM 1045).

Para el propósito de llevar el flujo a cada una de las cámaras se debe disponer de ductos aislados para el lado frío, ventiladores para impulsar el flujo que se genere por una unidad de refrigeración hay sea del tipo de expansión directa o de absorción (hablando del aire frío) y una resistencia eléctrica para generar calor y luego impulsarlo por medio del ventilador utilizando como vía el ducto.

Las cámaras tienen que tener un aislante tal que la conductividad de este debe ser menor del que la muestra que se está evaluando,( norma ASTM 1363).

El sistema de rotación se da en base a la circunferencia que tiene en la parte exterior, los detalles de este sistema se entregaran cuando se entreguen los planos de construcción de la instalación.

Variables que se van a medir:

Temperatura superficial

Temperatura del aire.

Velocidad del aire.

Temperatura en los deflectores.

**El número de sensores por cara para el análisis de la muestra se calcula por la expresion:**

**$NS = 10 \cdot \sqrt{A}$ , donde A es el area frontal de la muestra, esto bajo norma ASTM C1363.**

Las ecuaciones que van a regir nuestra instalación son las de La ley de Fourier y la Ley de enfriamiento de Newton.



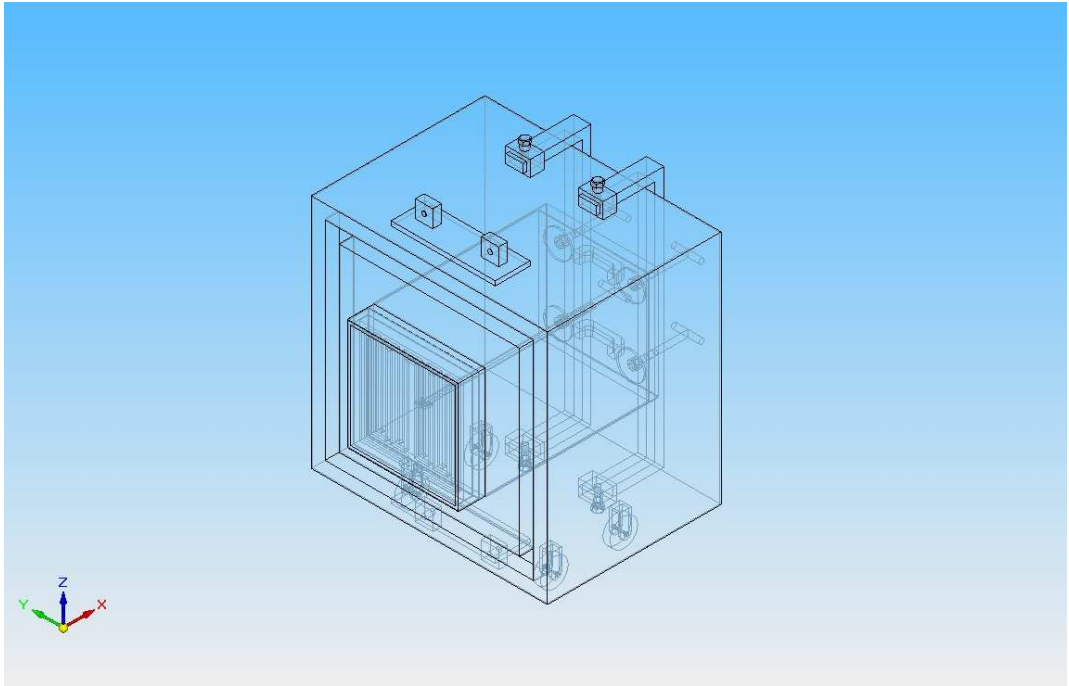
En esta instalacion se realizarán pruebas donde se podran calcular:  
El coeficiente global de transferencia de calor y la conductividad térmica.

Las normas en las que nos estamos basando para el diseño de la instalación experimental son:

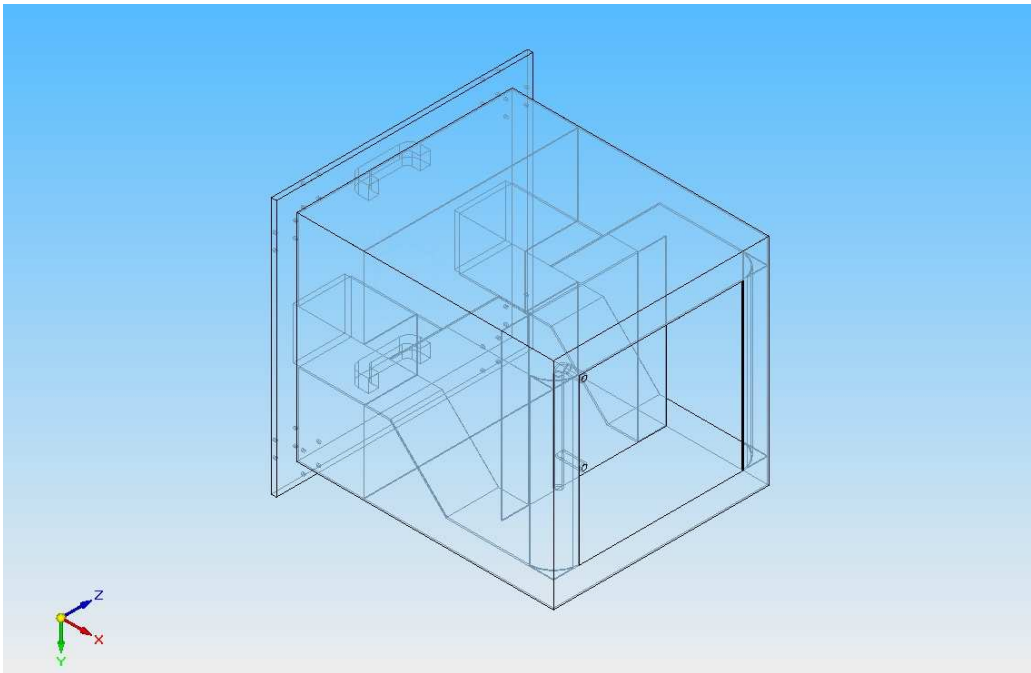
**ISO 8990, ASTM C1363, ASTM 1045.**

Las 2 primeras nos hablan de la realización de pruebas bajo el método de la caja caliente, y la otra nos dice como realizar las pruebas en condición de estado estable.

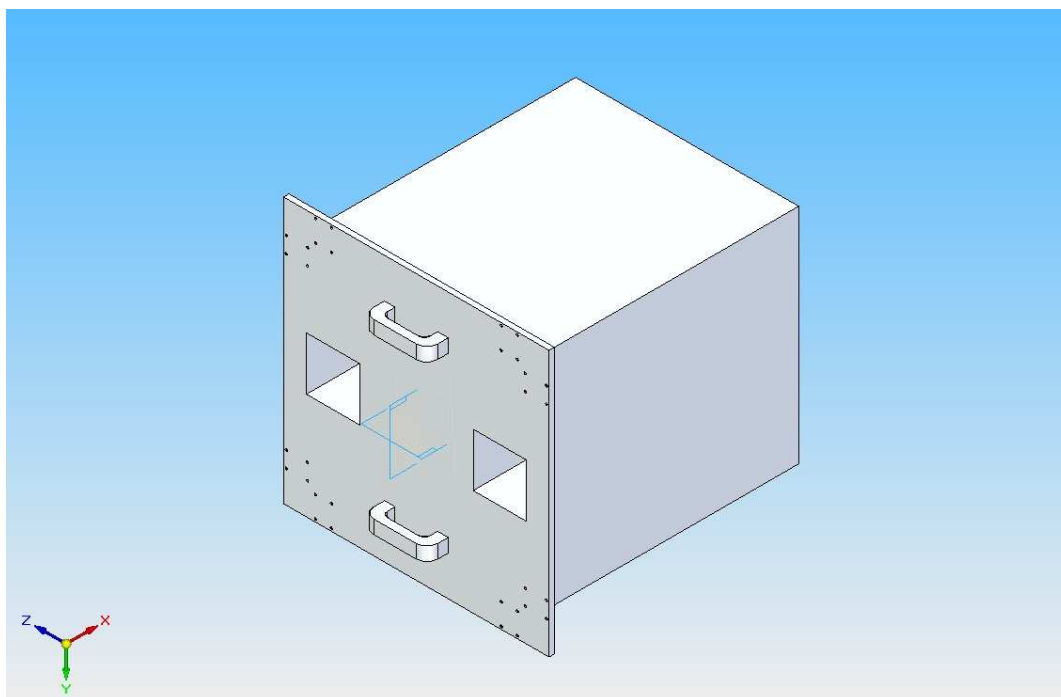
A continuación se muestran las partes principales de la instalación experimental, su despiece y ensamble.



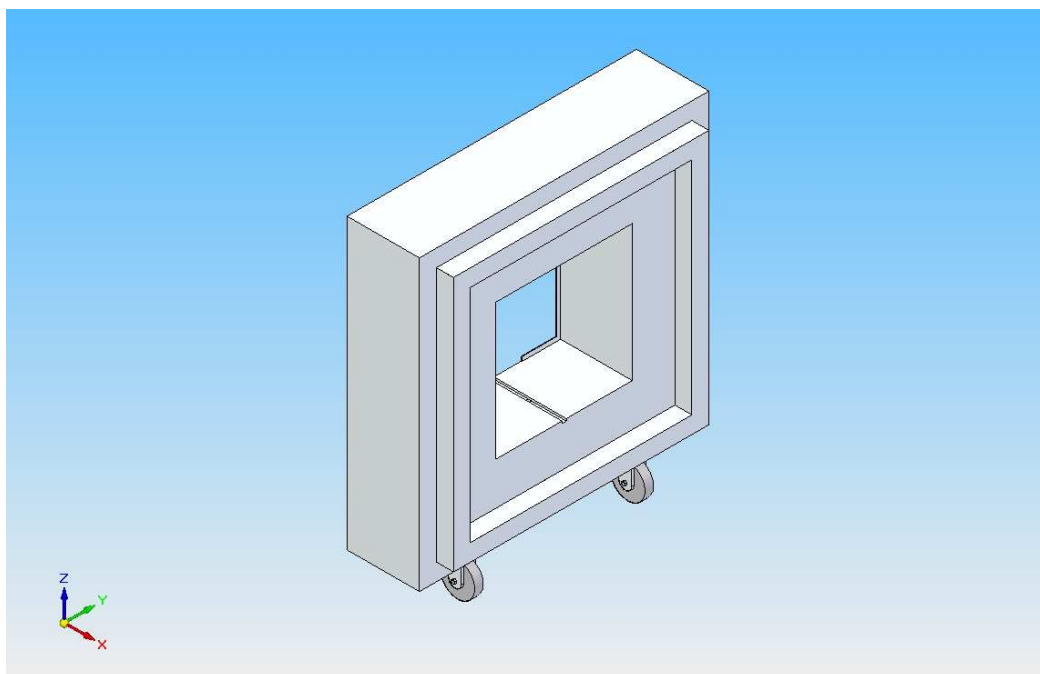
**Ilustración 6-1 Cámara caliente**



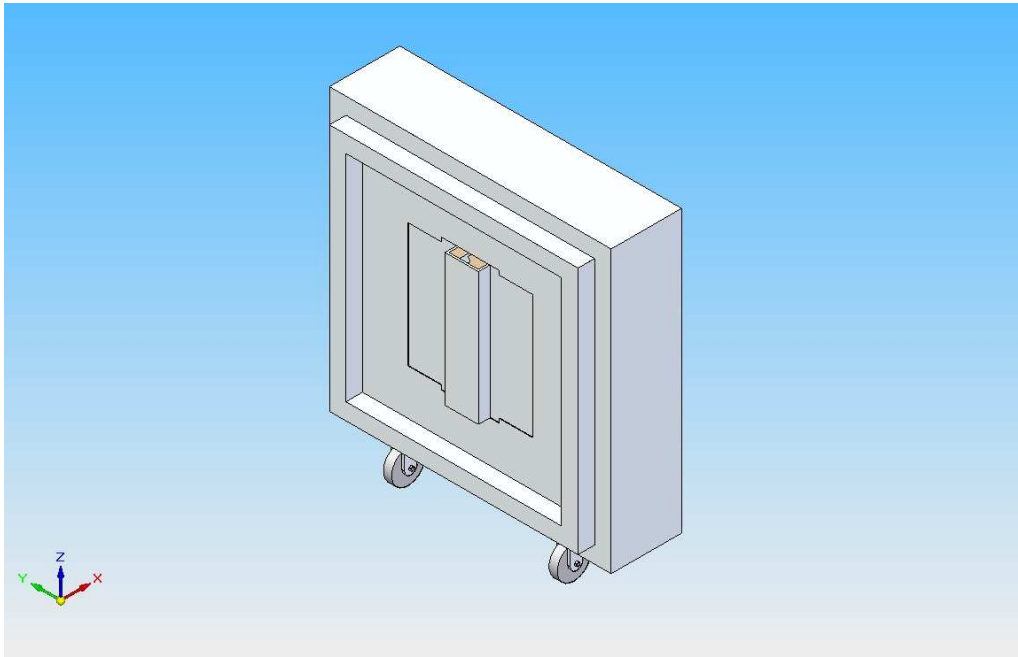
**Ilustración 6-2 Cámara fría**



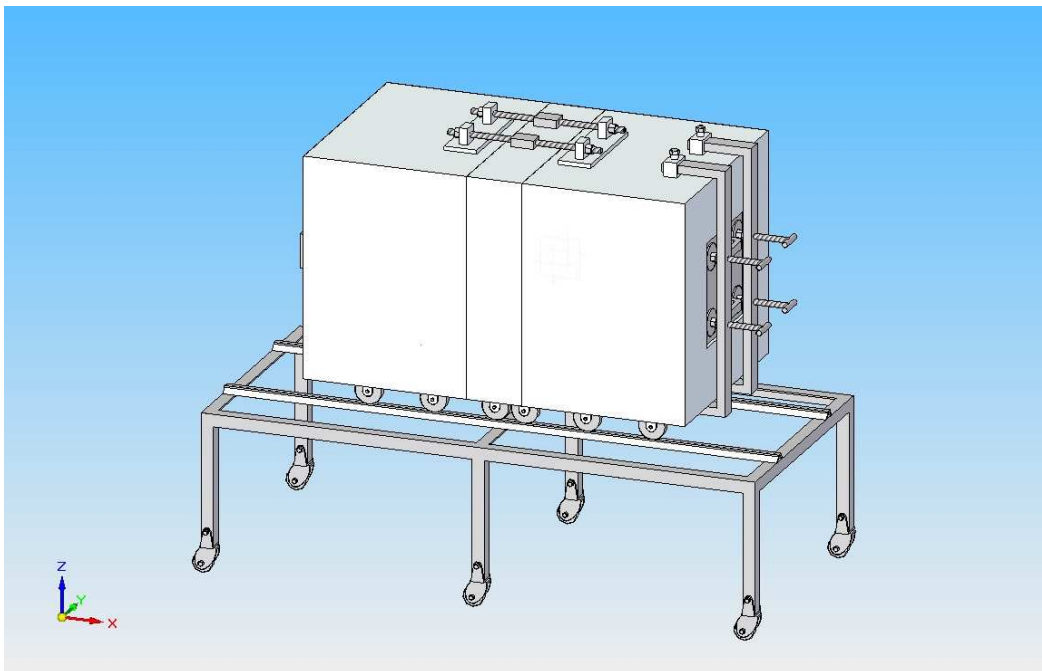
**Ilustración 6-3 Parte trasera de la cámara fría (suministro y retorno)**



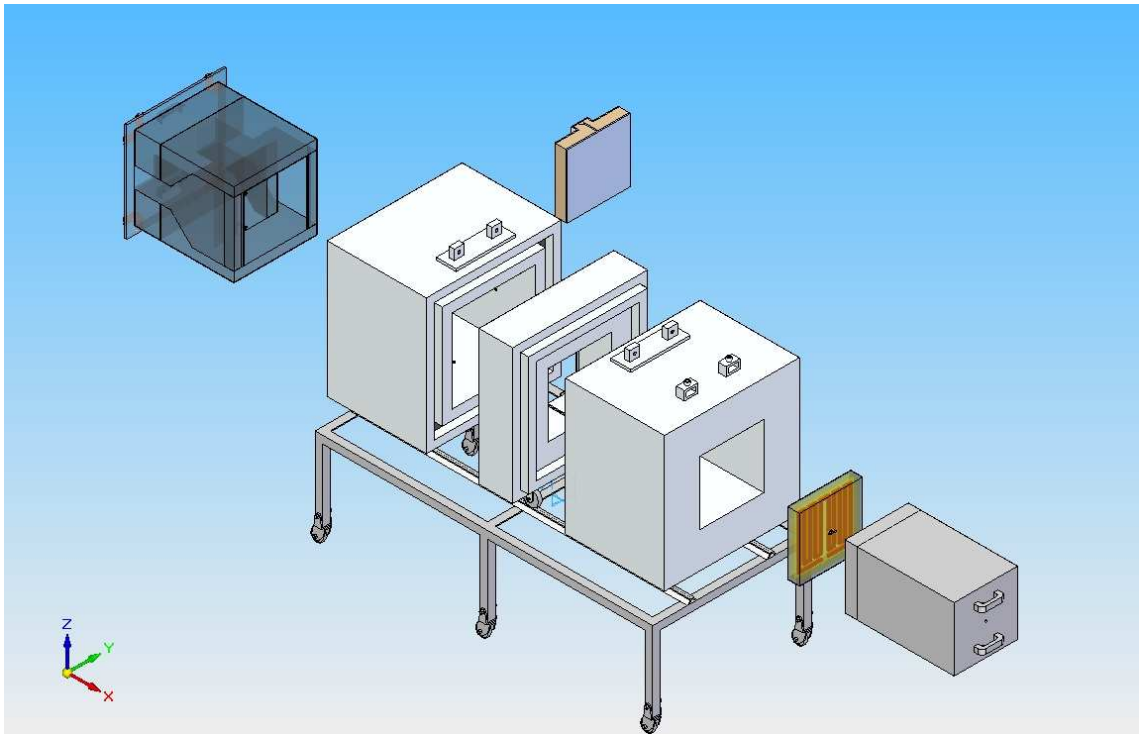
**Ilustración 6-4 Marco para colocar la muestra**



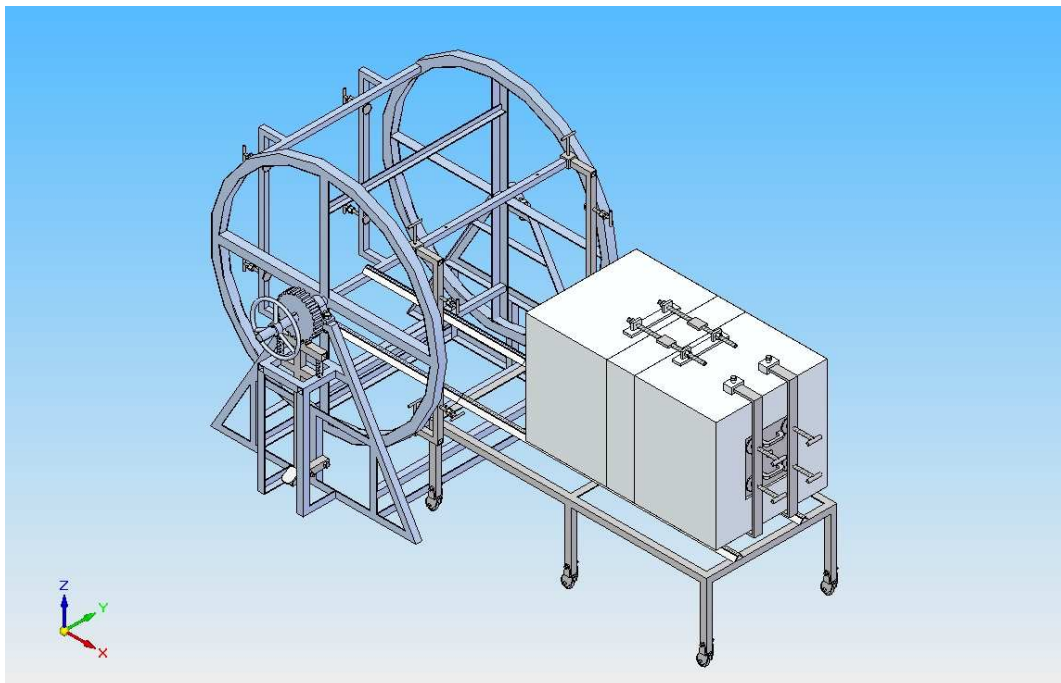
**Ilustración 6-5 Muestra alojada en el marco**



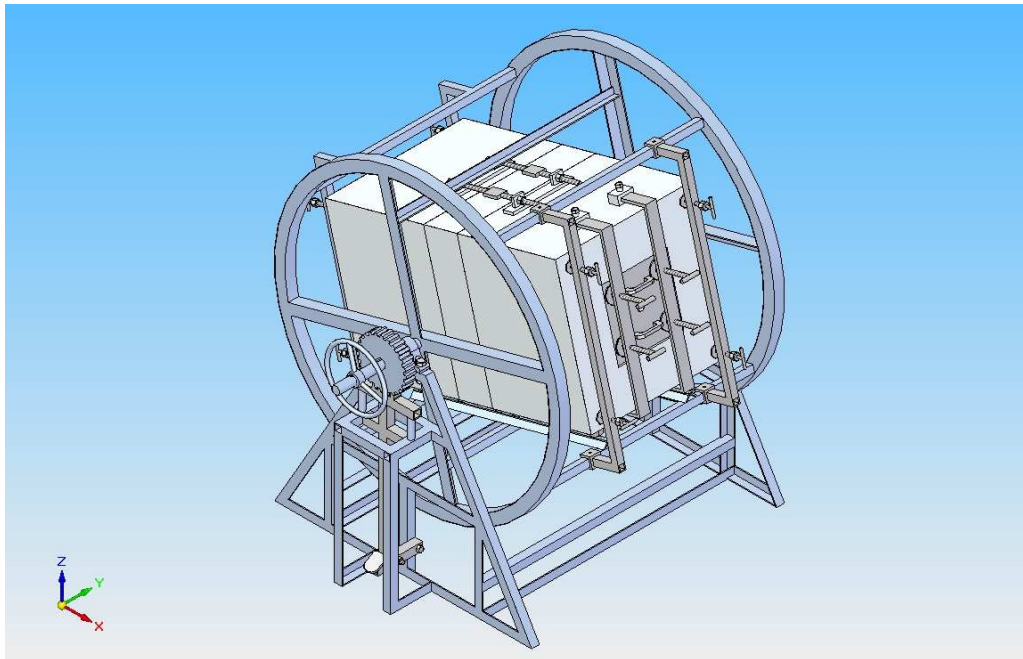
**Ilustración 6-6 Montaje de las cámaras caliente y fría incluida la muestra**



**Ilustración 6-7 Despiece del montaje de las cámaras**



**Ilustración 6-8 Ensamble de cámaras y sistema de rotación de la instalación experimental**



**Ilustración 6-9 Sistema de rotación en conjunto con la caja**

## 7 RESUMEN NORMA ISO 8990 [13]

Esta norma internacional nos explica los principios de diseño del equipo y las exigencias mínimas que se deben tener en cuenta para la instalación del laboratorio donde se determinarán las propiedades térmicas en estado estable para componentes de edificios y estructuras similares para uso industrial.

La norma también describe, el equipo, técnicas de medición y reporte de datos. Componentes especiales, tales como las ventanas, necesitan procedimientos adicionales los cuales no están incluidos en esta norma.

Cuando se hacen pruebas a muestras homogéneas basados en esta norma internacional, la experiencia muestra que generalmente se logra una exactitud entre  $\pm 5\%$ , para muestras no homogéneas la estimación de la exactitud es más compleja e implica un mecanismo de análisis para flujo de calor en muestras de esta particularidad.

### 7.1 REFERENCIAS DE LA NORMA

Esta norma contiene estipulaciones las cuales están referenciadas en otros textos, esto constituye la norma internacional.

En el momento de la publicación, esta edición fue validada. Esta norma fue cuidadosamente revisada y cuenta con el apoyo de la IEC y de ISO.

La revisión fue hecha bajo la norma ISO 7345: 1987, Aislamiento térmico- definiciones y cantidades físicas.

#### 7.1.1 Definiciones

Para la finalidad de esta norma internacional se aplican las siguientes definiciones:

**Temperatura Media Radiante,  $T_r$**

Apropiada para temperatura superficial en la muestra, con el fin de determinar la rata de flujo de calor radiante en la superficie de la muestra.

Temperatura Ambiente,  $T_n$  Apropriada para temperatura radiante, con el fin de determinar la rata de flujo de calor en la superficie de la muestra.

## 7.2 SIMBOLOS, RELACIONES Y UNIDADES.

$\Phi_1$ : Flujo de calor através de la muestra. (Watts)

$\Phi_2$ : Desequilibrio, Flujo de calor paralelo a la muestra. (W)

$\Phi_3$ : Flujo de calor através de las paredes de la caja de medición. (W)

$\Phi_4$ : Pérdidas laterales, flujo de calor lateral de la muestra. (W)

$\Phi_5$ : Pérdidas en la periferia, flujo de calor paralelo a la superficie de la muestra en los bordes de la misma. (W)

$\Phi_p$ : Potencia total de entrada. (W)

**A**: Area perpendicular al flujo de calor. (mts<sup>2</sup>)

**d**: Espesor de la muestra.(mts)

$T_{si}$ : Temperatura superficial interna. (°K)

$T_{se}$ : Temperatura superficial externa. (°K)

$T_n$ : Temperatura ambiente. (°K)

$\lambda$ : Conductividad térmica. (W/mts\*°K)

**R**: Resistencia térmica. (mts<sup>2</sup>\* °K)/W

$T_a$ : Temperatura del aire. (°K)

$R_u$ : 1/U

**U**: Coeficiente global de transferencia de calor=  $\Phi_1 / A * ( T_{Ni} - T_{Ne} )$ . W/ ( mts<sup>2</sup>\* °K)

$T_{Ni}$ : Temperatura ambiente interna. (°K)

$T_{Ne}$ : Temperatura ambiente externa. (°K)



### 7.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Ambos tipos de aparato, caja caliente con guarda y la caja caliente calibrada, se basan en el principio de reproducir condiciones convencionales de frontera de una muestra entre dos fluidos, por lo general es aire atmosférico, cada uno a temperatura uniforme.

La muestra se coloca entre dos cámaras “una fría y otra caliente” en donde ambas temperaturas son conocidas.

Las mediciones deben empezar a hacerse cuando en ambos lados de la muestra se llegue a la condición de estado estable (cuando tanto como en el lado caliente y frío la temperatura sea uniforme) en ese momento podemos medir las propiedades de transferencia térmica.

El intercambio de calor en la superficie de la muestra involucra los componentes convectivos y radiantes.

Los efectos de la transferencia de calor por convección y radiación se combinan en el concepto de “temperatura ambiente” y el coeficiente superficial de transferencia de calor.

El coeficiente global de transferencia de calor es definido por 2 temperaturas ambientes, y por tanto, una adecuada medición de temperatura es necesaria para que esto se determine. Esto es particularmente importante con las pruebas de control de baja resistencia térmica para que la superficie de los coeficientes de transferencia de calor forme una fracción significativa de la resistencia total. En el caso de las pruebas de control con una moderada a alta resistencia térmica, puede ser suficiente para registrar la temperatura del aire sólo durante una prueba, si se puede demostrar que la diferencia entre las temperaturas del aire y radiante en cualquier lado de la muestra es tan pequeña que se cumplen los requisitos de exactitud.

### 7.3.1 Caja caliente con guarda

En la caja caliente con guarda (ver la figura 1), el área de medición se encuentra en el interior de la caja con guarda (el denominado lado caliente) en el cual se controla la temperatura ambiente con el fin de minimizar el flujo de calor laterales de la muestra,  $\Phi_2$ , y el flujo de calor por las paredes,  $\Phi_3$ . Lo ideal sería que cuando se monta una muestra homogénea las mediciones de las temperaturas interior y exterior son uniformes y además cuando los coeficientes de transferencia de calor y las temperaturas del lado frío son uniformes, implicaría un balance de temperatura del aire entre los lados exterior e interior de la muestra y la zona o caja de medición,  $\Phi_2 = \Phi_3 = 0$ .

El flujo total de calor através de la muestra debe ser igual al calor de entrada que se le suministra en la zona de medición.

En la práctica, para cada equipo y para cada muestra sometida a la prueba habrá un límite en la detección del desequilibrio.

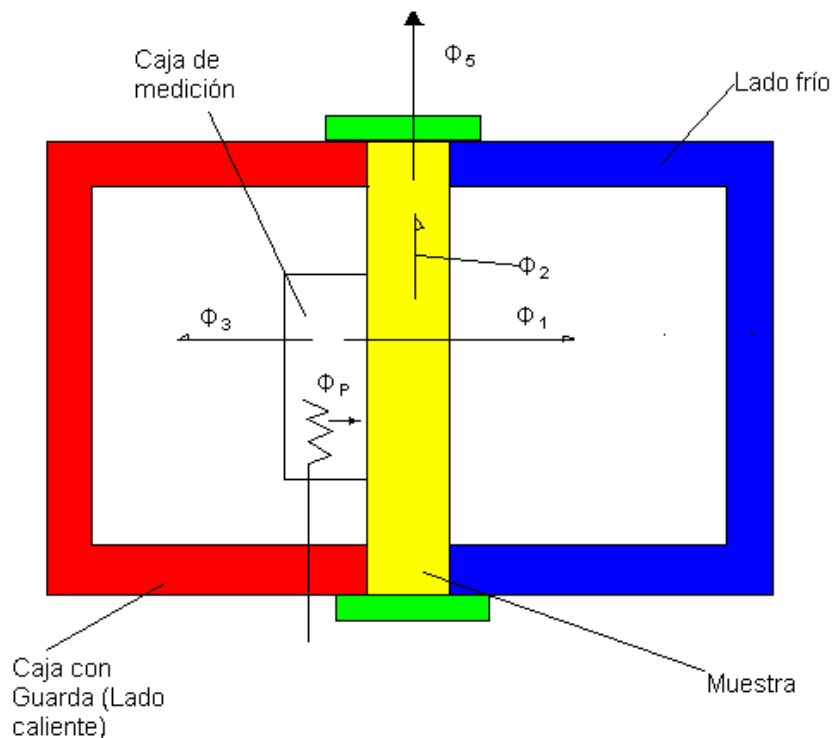


Ilustración 7-1 Caja Caliente con guarda

### 7.3.2 Caja caliente calibrada

La caja caliente calibrada (ver ilustración 6-2) es rodeada por un espacio de temperatura controlada, no necesariamente la temperatura del aire no es la misma que en el interior de la caja de medición.

La pérdida de calor através de las paredes de la caja,  $\Phi_3$ , se mantienen bajas debido a que están construidas por un material que tiene alta resistencia térmica.

La potencia total de entrada,  $\Phi_P$ , será corregida por las pérdidas de las paredes,  $\Phi_3$ , y por las pérdidas laterales,  $\Phi_4$ .

La corrección de las pérdidas laterales y paredes de la caja, son determinadas en las pruebas de calibración de la muestra conocida su resistencia térmica.

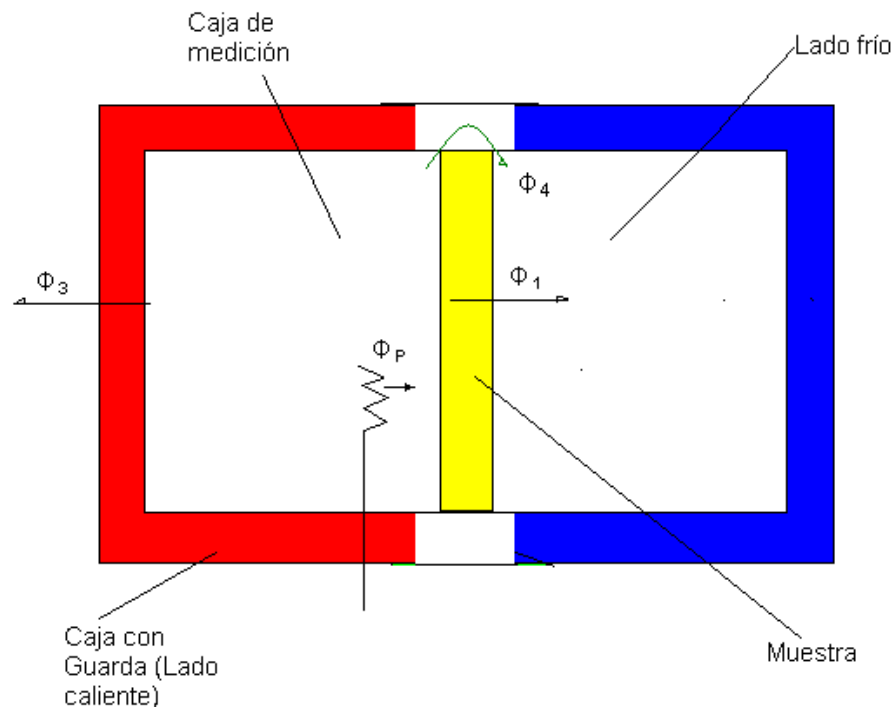


Ilustración 7-2 Caja caliente calibrada

## 7.4 LIMITACIONES Y FUENTES DE ERRORES

La operación del equipo, a una precisión deseada, es limitada debido a unos factores relacionados con el diseño del mismo, como son, la calibración, operación, propiedades de la muestra, espesor, resistencia térmica y homogeneidad.

### 7.4.1 Limitaciones en el desequilibrio de la resolución de la caja caliente

En la práctica, incluso con muestras homogéneas, el coeficiente de transferencia de calor en la superficie no es uniforme, especialmente cerca de los bordes de la caja de medición.

Como consecuencia de ello, ni la temperatura superficial y tampoco la Temperatura del aire son uniformes cerca de la periferia de la caja de medición, tanto en el exterior como en el interior de la caja de medición. Esto tiene dos consecuencias:

- a) Puede ser imposible reducir a cero al mismo tiempo, el flujo de calor lateral,  $\Phi_2$ , a través de la muestra, y el flujo de calor a través de las paredes de la caja de medición,  $\Phi_3$ .
- b) La temperatura no uniforme, cercana a la caja de medición, en la superficie de la muestra, y en el aire, respectivamente, define una mejor resolución al desequilibrio.

### **Mínima potencia de entrada**

La potencia total de entrada,  $\Phi_P$ , en la caja de medición, es la suma de los calentadores (resistencias eléctricas), ventiladores, transductores, etc.

Algunos de estos no pueden reducirse a cero, por lo tanto, se define un flujo de calor mínimo que pasa a través de la muestra.

El consumo de energía mínimo es también limitado por la incertidumbre de la potencia total de entrada en la caja de medición incluyendo  $\Phi_3$ .

Todos los factores mencionados anteriormente un límite inferior para la relación  $(T_{Si}-T_{Se})/R_U$ .

### **Potencia máxima de entrada**

La máxima potencia de entrada es limitada por la temperatura uniforme que es requerida en la superficie. Un gran flujo de calor implica un gran flujo de flujo de masa a través de la superficie de la muestra, si se mantiene un alto gradiente de temperatura constante; esto afectará la transferencia de calor desde la superficie.

En el caso de la caja caliente con guarda, se nota una disminución de la resistencia en la muestra, esto impone requisitos más estrictos sobre la transferencia de calor por convección y radiación en la medición.

## 7.5 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

El tamaño del aparato deberá ser proporcional al uso previsto, teniendo en cuenta los siguientes puntos:

La zona de medición será lo suficientemente grande como para proporcionar una zona representativa del ensayo. Para componentes modulares el área de medición de preferencia será exactamente igual a un integrante del módulo.

El desequilibrio del flujo de calor,  $\Phi_2$ , en la caja caliente con guarda se debe a la no-uniformidad de los coeficientes superficiales y a las temperaturas cercanas a la periferia del área de medición.

Una cantidad de calor entra a la muestra a través de la caja de medición (en la caja caliente con guarda).

La desviación del flujo de calor unidimensional, es causada por el espesor limitado del sello por donde este entra a la caja de medición.

Ambos bordes aislados y las condiciones de borde de frontera, afectan las pérdidas en la periferia,  $\Phi_5$ , (para la caja caliente con guarda), y pérdidas laterales,  $\Phi_4$ , (para la caja caliente calibrada).

Todos estos problemas se hacen más complejos por la no-homogeneidad de la muestra en cercanías del área de medición.

En general, el tamaño de la caja de medición determina el tamaño mínimo de otros elementos del equipo.

La profundidad de la caja no debe ser mayor que el estrictamente necesario para mantener las condiciones deseadas.

## **7.6 CAJA DE MEDICION**

### **7.6.1 Construcción de las paredes de la caja.**

El aislamiento de las paredes se escogerá teniendo en cuenta el rango de resistencia de la muestra y la diferencia de temperatura, a fin de que un error en la evaluación de las pérdidas en la caja de medición no afecte la determinación del flujo de calor a través de la muestra en mas que el 5%. Las paredes de la caja tienen que estar térmicamente uniformes para ayudar a lograr temperaturas uniformes en su interior y de esta forma obtener que el flujo de calor a través de las paredes se determine usando termocuplas u otro tipo de sensor de calor.

Además, se recalca que los puntos calientes, tales como, calentadores, ventiladores, etc., pueden afectar la temperatura uniforme en el interior de la caja, debido a su intercambio radiante con las paredes de la caja.

Las paredes de la caja pueden hacerse en paneles de un material aislante adecuado, o de tipo sándwich con núcleo celular plástico.

Las paredes de la caja deben estar herméticamente selladas para evitar cualquier transferencia de humedad que nos pueda ocasionar errores durante la prueba.

### **7.6.2 Suministro de calor y circulación de aire**

El suministro de calor y circulación de aire debe ser tal que las variaciones en la temperatura del flujo de aire paralelo a la muestra no deberá sobrepasar el 2% de la diferencia de temperaturas aire-aire del lado caliente al frío.

Todos los gradientes de temperatura a lo largo del flujo de aire no deben exceder los  $2^{\circ}\text{K/m}$ , medida fuera de la frontera sobre una capa de la muestra homogénea.

Las resistencias eléctricas como calentadores son las más utilizadas para este propósito, estas deben estar protegidas por aislante reflectivo, con el fin de minimizar la radiación hacia las paredes de la caja de medición y a la muestra.

Se recomienda que se coloque un deflector en la caja de medición, paralelo a la superficie de la muestra, cuando se usa convección forzada. El deflector se extenderá a todo lo ancho de la caja de medición y al final de cada extremo tendrá una pequeña luz para permitir la circulación del aire.

Cuando se cambia a la posición vertical, la distribución resultante de convección natural puede ser suficiente para garantizar la uniformidad de la temperatura superficial deseada. Cuando el movimiento del aire se debe a la convección natural, la distancia entre el deflector y la muestra no debe ser mayor que el espesor de la capa límite, o no debería usarse.

### 7.6.3 Caja con guarda

El propósito de esta caja con guarda es mantener la temperatura del aire y coeficientes superficiales alrededor de la caja de medición ese flujo de calor a través de las paredes,  $\Phi_3$ , y el flujo de calor en desequilibrio,  $\Phi_2$ , en la superficie de la muestra se minimizan al ser medidos en esa zona de guarda.

La relación entre el tamaño del área de medición, el tamaño de la zona de guarda y los bordes aislados, debe ser tal que cuando se prueba una muestra homogénea con espesor y resistencia térmica máxima, el error por el flujo de calor causado por las pérdidas en la periferia,  $\Phi_5$ , debe ser menor que el 0.5% del flujo de calor medido,  $\Phi_1$ . (Una forma de cuantificar ese error se puede encontrar en la norma ISO 8302).

Los requisitos relacionados con la emisividad tales como, blindaje de los calentadores y estabilidad de temperaturas, son en principio los mismos para la caja con guarda y la caja de medición.



#### 7.6.4 El marco de la muestra

En la caja caliente calibrada, el marco que rodea la muestra es un componente crítico debido a las pérdidas laterales, las cuáles deben ser mínimas para poder mantener la exactitud.

En la configuración típica de la caja caliente con guarda el marco de la muestra es omitido y el flujo lateral de calor es minimizado por los bordes aislados. Sin embargo, usando un marco en la muestra minimizará el flujo de calor lateral, según lo solicitado en la ilustración 7-2.

#### 7.6.5 Cámara del lado frío

El tamaño de la cámara fría es regido por el tamaño de la caja de medición para el caso de la caja caliente calibrada, o la caja del guarda, o en caso de la caja caliente con guarda; Los arreglos mas comunes están dispuestos en las ilustraciones 7-1, 7-2, 7-3 y 7-4.

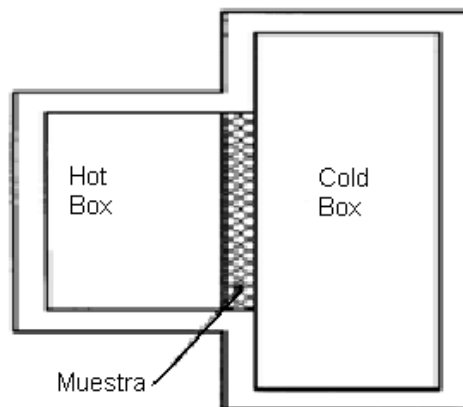
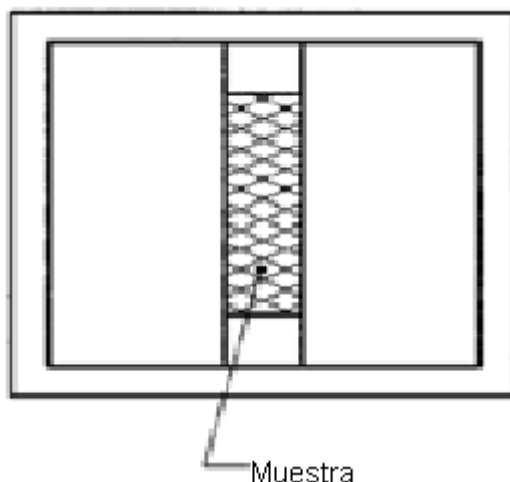


Ilustración 7-3 Vista Superior de la Caja Caliente con guarda



**Ilustración 7-4 Vista Superior de la Caja Caliente calibrada**

Las paredes de la cámara deberían estar construidas para reducir la carga del equipo de refrigeración y prevenir condensación de humedad. La superficie interior de la cámara tendrá una emitancia de conformidad con el intercambio de calor por radiación.

Para controlar la temperatura del lado frío, las resistencias eléctricas usadas como calentadores ubicados a la salida del evaporador son a menudo útiles. Un deflector también puede ser ventajoso para lograr distribución uniforme de aire. La dirección del flujo del aire por convección natural es sugerida.

Las velocidades de aire deben ser regulables para encontrar los coeficientes superficiales requeridos para la prueba y que deben ser medidos. Para simular las condiciones naturales para componentes de edificaciones, el rango puede ser entre 0, 1 m/s a 10 m/s.

#### **7.6.6 Medición de la temperatura**

Si es posible, los sensores para la medida de temperatura del aire y la temperatura superficial de la muestra deben estar igualmente espaciados sobre el área de la misma y el opuesto localizado uno al otro en el lado caliente y frío.

La temperatura superficial de la muestra será estudiada para calcular la temperatura media radiante.

El número de sensores para la temperatura de aire y la medida de temperatura superficial serán por lo menos dos por metro cuadrado y no menos de nueve, a menos que otra información en la distribución de temperatura esté disponible.

#### **Medición de la temperatura superficial en la muestra**

Estas medidas serán hechas con sensores seleccionados y colocados sobre la superficie de tal manera que estos no cambien la temperatura en el punto de medición.

Las termocuplas que se escojan deben tener un diámetro de alambre menor de 0,25 mm, con uniones y al menos 100 mm de alambre contiguo en contacto con la superficie, a lo largo del camino más isotérmico, usando cemento o cinta de emisividad cerca de eso de la superficie.

En caso de muestras no homogéneas, el número indicado de sensores no asegura temperaturas medias superficiales. Para muestras moderadamente no homogéneas, los sensores suplementarios serán aplicados para cada región de temperaturas diversas.

#### **Medición de la temperatura del aire**

Las temperaturas de aire deben ser medidas con un sistema teniendo un tiempo adecuado constante. Los sensores de temperatura de aire deben tener protección en contra de la radiación (Blindados), a menos que la diferencia entre los dos sensores (el blindado y el normal) sea muy pequeña que no afecte la exactitud de la medición. En la convección natural, los sensores de temperatura serán colocados en el exterior de la capa límite, siendo su espesor

unos centímetros más pequeños en la mayoría de los casos. En flujo turbulento, el espesor de la capa del límite puede exceder 0, 1 m.

En convección forzada, existirá flujo turbulento totalmente desarrollado entre la muestra y el deflector, y los sensores estarán ubicados para detectar la temperatura de la masa de aire, (la mezcla adiabática de temperaturas).

#### **7.6.7 Termocuplas**

Las termocuplas usadas para monitorear flujo de calor a través de las paredes de la caja dispondrán de uniones montadas de la misma forma como se describió para sensores de temperatura y con al menos un par de uniones por 0,25 m<sup>2</sup>. Se asume que la densidad de tasa de flujo de calor es uniforme sobre las paredes de la caja. La presencia de calentadores, ventiladores, etc. pueden afectar esta uniformidad a causa de sus cambios locales radiantes con las paredes de la caja y un alto número más de uniones se pueden requerir para obtener la exactitud deseada.

Los requisitos similares tienen aplicación para la termocupla usada en la caja caliente con guarda para monitorear flujo de calor de desequilibrio,  $\Phi_2$ , en la superficie de la muestra entre la caja de medición y área de guarda, excepto que al menos se requieran un par de uniones de 0,5 m por perímetro de área medida.

La mejor posición para los sensores de balanceo es un problema crítico. No pueden ser demasiados cerca de la nariz, como las temperaturas superficiales no son uniformes a lo largo de la periferia del área de medición como una consecuencia de la presencia de la nariz de la caja de medición. Ni pueden ser demasiados distantes de la nariz, como en el área de guarda, las temperaturas superficiales no son uniformes debido a las pérdidas laterales. Los problemas adicionales son creados por la no uniformidad de coeficientes superficiales de transferencia de calor. Se reconoce que la no homogeneidad podría tener un efecto severo en la confiabilidad de la lectura de esta termocupla.

#### **7.6.8 Temperatura superficial del equipo**

La temperatura superficial interna del equipo debe ser medida de la misma forma descrita para la temperatura superficial de la muestra.

#### **7.6.9 Control de la temperatura**

En la condición estable, los controladores conservarán cualquier fluctuación aleatoria de temperatura y la tendencia a largo plazo indica el 1 % de la diferencia de temperatura aire-aire sobre la muestra para por lo menos dos períodos de prueba consecutivos.

Este requisito se aplica ante todo para medir temperatura en la cámara. Además, el sistema de control para las temperaturas de la caja con guarda no introducirá errores adicionales a la tasa de flujo de calor de desequilibrio mayor que 0,5 % de  $\Phi_1$ .

#### **7.6.10 Instrumentación**

Las diferencias de temperatura serán medidas con una exactitud de  $\pm 1$  % de diferencia de temperatura aire-aire del lado caliente hacia el lado de frío. Se recomienda que el instrumento medidor no añada incertidumbres mayores que 0,05 K. La medida de temperatura absoluta estará hecha con una exactitud de  $\pm 5$  % de la diferencia de temperatura aire-aire.

El resultado de balancear las termocuplas, la potencia de los calentadores, los ventiladores, etc. será medido con tal exactitud que se adicionará el error en la medida del flujo de calor de la muestra,  $\Phi_1$ , debido a que la precisión de instrumentación será menor que el 1,5 %.

## **7.7 CALIBRACIÓN Y EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO**

### **7.7.1 Revisión inicial**

Después de terminar la instalación, debe hacerse una revisión inicial para asegurarse que todos los requerimientos de diseño se hayan hecho por completo.

Esto se hace conociendo de antemano los rangos de resistencia térmica de las muestras.

La revisión inicial debe satisfacer las condiciones de temperatura uniforme y estable, velocidades del aire y coeficientes superficiales de ambos lados (caliente y frío de la muestra), el efecto de la exactitud del desequilibrio en los bordes donde el ambiente es apropiado.

### **7.7.2 Mediciones complementarias**

Un flujo de calor através de una parte de la muestra o del equipo se puede determinar por medio de un flujómetro de calor. La conductividad térmica de los materiales de algunas partes del equipo se pueden medir con el sistema de placa caliente con guarda o métodos similares.

Los sistemas infrarrojos de termografía pueden usarse para localizar puentes térmicos y las fugas de aire en lo que se refiere a encontrar lugares adecuados para los puntos de medida de temperatura de la superficie. Después de la construcción del sistema de circulación de aire, se puede observar la trayectoria de la velocidad a través de la cortina de aire (la capa límite del flujo de aire) debe hacerse una verificación para asegurar que la cortina de aire que se forma sea uniforme.

### 7.7.3 Calibración

El desempeño del equipo debe verificarse usando muestras con resistencia térmica conocida. Tales muestras pueden estar hechas de paneles de fibra mineral de alta densidad o plásticos celulares envejecidos, las cuales han sido medidas en el sistema de placa caliente con guarda. Las juntas entre los paneles no formarán puentes térmicos. La muestra se verificará de ambos lados.

#### **Calibración de las paredes de la caja de medición.**

Las paredes de la caja de medición deben ser calibradas. Esto aplica para la caja caliente con guarda y la calibrada. El propósito de esta calibración es corregir la potencia de entrada para la caja de medición,  $\Phi_P$ , para el flujo de calor por las paredes de caja de medición,  $\Phi_3$ . Para la caja caliente con guarda, esta calibración se verá afectada por  $\Phi_2$ , y para la caja caliente calibrada por  $\Phi_4$ .

Haciendo pruebas en condiciones estables en una muestra homogénea, con diferentes gradientes de temperatura sobre las paredes de la caja de medición, se puede hacer una gráfica o una ecuación para  $\Phi_3$  como una función de la temperatura medida sobre las paredes de la caja de medición. Para las diferencias de temperatura de algunos grados, los cuáles deberían ser extremos durante una prueba normal, esta relación se asume como lineal.

### **Calibración de pérdidas laterales.**

Las pérdidas laterales de calor,  $\Phi_4$ , están dadas para una pieza del equipo, principalmente es una función del espesor de la muestra, de su resistencia térmica y de la construcción del marco. Para obtener la calibración de las pérdidas laterales de calor. Como la relación pérdidas laterales y espesor de la muestra es no lineal, el rango de espesores de la muestra calibrada cubre el rango de espesor pretendido para probar. Si la resistencia de la muestra por unidad de espesor difiere en grande, entonces el procedimiento de calibración - se repetirá hasta cubrir el rango de  $R/d$  deseado.

Alternativamente, los procedimientos de cálculo adecuado, por ejemplo los elementos finitos o las diferencias finitas pueden usarse para estimar las pérdidas laterales; Sin embargo, este procedimiento se verificará a manera de algunos experimentos de calibración.

Como la pérdida lateral también depende de la diferencia de temperatura entre lado caliente y frío, entre el equipo y el cuarto en el cual va a estar ubicado, las pruebas de calibración deben ser efectuadas cubriendo el rango de temperaturas en las cuales el aparato será usado.



## **7.8 INTRODUCCION A LA PRUEBA**

Es necesario que el operador esté familiarizado con las dos secciones anteriores. Dado que la finalidad de la prueba puede variar ampliamente, el procedimiento es intencionalmente amplio.

Para un modelo particular, debe decidirse si el método es aplicable o si otros métodos son más importantes, por ejemplo, medidor de flujo de calor de placa caliente con guarda, o los cálculos.

De la inspección y el análisis de la muestra, un rango de posibles valores de sus propiedades térmicas debería ser provisionalmente estimado. La precisión que se puede obtener también debe ser evaluada y debe estar relacionada con el objeto de la prueba.

### **7.8.1 Acondicionamiento de la muestra**

En el caso de muestras en las que el flujo de calor se ve afectado por la presencia de humedad, el acondicionamiento debe ser reportado. Cuando es significativa, la masa de la muestra antes y después de la prueba debe ser informada, o muestras del núcleo deberán ser tomadas antes y después de la prueba.

### **7.8.2 Selección y montaje de la muestra**

La muestra de análisis será seleccionada o construida de tal manera que sea representativa. En el caso de muestras no homogéneas, lo siguiente será considerado. Para la caja caliente con guarda, la decisión deberá ser tomada sobre la forma más exacta de detectar desequilibrio (aire-aire o aire-superficie).

Cuando las temperaturas de la superficie son muy uniformes cerca de la periferia del área de medición, la detección del desequilibrio de la superficie de la muestra y la evaluación de flujo de calor a través de la caja,  $\Phi_3$ , pueden ser la solución más precisa. Sin embargo, cuando no homogeneidades están presentes cerca de la periferia de la zona de medición, la solución de equilibrio aire-aire puede ser la única solución posible y el desequilibrio del flujo de calor,  $\Phi_2$ , es entonces una fuente desconocida de error.

En la caja caliente con guarda, siempre que sea posible, los puentes térmicos deben colocarse de forma simétrica a lo largo de la frontera entre el área de medición y el área de guarda, de modo que la mitad de la zona de puente térmico se encuentra en la caja de medición y la otra mitad está en la zona de guarda.

Si la muestra es modular, el cuadro de dimensiones de medición debe ser un adecuado múltiplo del módulo. El perímetro de la caja de medición debería coincidir con el módulo de líneas o una caída en el medio entre el módulo de líneas.

Si es imposible cumplir con estos requisitos, varias pruebas pueden tener que ser realizadas con diferentes posiciones del área de medición: los resultados serán considerados con mucho cuidado y, en su caso, complementados con mediciones y cálculos de temperatura y flujo de calor.

En la caja caliente calibrada, el efecto de los puentes térmicos en los bordes de la muestra sobre la transmisión de acompañamiento debe ser considerado. Puede ser necesario, tal como se menciona anteriormente, realizar exámenes complementarios con diferentes posiciones de la caja de medición, que en el caso de la caja caliente calibrada significa diferentes especímenes en representación de los diferentes sectores de las construcciones.

La muestra debe ser montada o sellada de tal manera que ni el aire ni la humedad puedan ingresar en la muestra desde los bordes o pasar del lado caliente hacia el lado frío o viceversa.

Los bordes de la muestra deberán estar aislados, por lo que  $\Phi_5$  se reduce a un nivel donde los requisitos de precisión se cumplen.

Se considerará si es necesario sellar el frente de la muestra para evitar las infiltraciones de aire en la muestra y si es necesario controlar el punto de rocío del aire en el lado caliente.

Si la superficie de la muestra es irregular, puede ser necesario suavizar con yeso, calafateo o cualquier otro material, la zona de contacto con el perímetro de sellado de la caja de medición, para asegurar un sello hermético entre la medición y la caja con guarda.

Si el tamaño de la muestra es menor que el tamaño previsto para el modelo de medición de la caja, el modelo está montado en un mástil, por ejemplo, un muro en el que la muestra está montada.

El flujo de calor en la región fronteriza entre máscara y espécimen no será unidireccional; este problema puede ser minimizado por la elección de la máscara y muestra de la misma resistencia térmica y espesor.

En algunos casos esto no es posible, por ejemplo, en las pruebas de ventana. En este caso, cuando la resistencia de la máscara es diferente de la del muro donde la ventana será montada, y las líneas de flujo en el marco de la ventana son diferentes de los de uso final, la exactitud será difícil de predecir.

Estos problemas exigen convenciones de prueba para el montaje de la muestra para permitir comparación e interpretación de los resultados. Estos están fuera del alcance de esta norma internacional.

### **7.8.3 Condiciones de prueba**

Las condiciones de ensayo se elegirán considerando la aplicación de uso final, teniendo en cuenta el efecto de las condiciones de prueba en la exactitud. Tanto la temperatura media de prueba como las diferencias de temperatura afectan a los resultados de las pruebas.

Temperaturas medias de 10°C a 20°C y una diferencia de al menos 20°C son comunes en aplicaciones de la construcción. La velocidad del aire en los lados caliente y frío se ajustará de acuerdo con el objetivo de este ensayo. Los controladores de temperatura se ajustarán de tal manera que o bien  $\Phi_2$  o  $\Phi_3$ , o ambos sean pequeños o cero. Ver texto sobre desequilibrio en ISO 8302.

#### 7.8.4 Períodos de medición

El tiempo requerido para alcanzar la estabilidad para las pruebas del estado de equilibrio depende de factores tales como la resistencia térmica y la capacidad térmica de la muestra, coeficientes de la superficie, la presencia de transferencia de masa y / o la redistribución de humedad dentro de la muestra, tipo y funcionamiento de los controladores automáticos del aparato. Debido a la variación de estos factores, es imposible para dar un criterio único para el estado de equilibrio.

Un ejemplo de un requisito para el estado de equilibrio es el siguientes: Las mediciones de la  $R$  ,  $U$  ,  $\Phi_p$  y  $T$  de dos períodos sucesivos de medición de al menos 3 h después de que se ha alcanzado un punto cerca de la estabilidad estarán dentro del 1% y los resultados no cambiarán unidireccionalmente. Para los especímenes con una alta resistencia térmica o de gran masa o ambos, este requisito mínimo puede ser insuficiente, y el período de prueba debe ser prorrogado.

#### 7.8.5 Muestras homogéneas

En el caso de especímenes que son homogéneos o menos del 20% no homogéneos, tal como se describe en 2.7.1, es posible calcular la resistencia térmica,  $R$ , basándose en las temperaturas de la superficie, el coeficiente global de transferencia de calor,  $U$ , y el coeficiente de transferencia de calor superficial,  $h$ , en base a la temperatura ambiente.

Normalmente, los valores convencionales de los códigos de la construcción se utilizan para obtener la resistencia térmica convencional de la superficie total desde la medida de  $R$ .

#### **7.8.6 Muestras no homogéneas**

Al someter a prueba los especímenes fuera de los citados límite de homogeneidad o especímenes con una geometría especial, sólo se calcula el coeficiente global de transferencia de calor,  $U$ . Las temperaturas ambiente  $T_{Ni}$  y  $T_{Ne}$  se utilizarán para ese cálculo.

#### **Evaluación de resultados**

Los resultados de las pruebas se compararán con la estimación provisional que se indica en el 3,1. En el caso de diferencias significativas, la muestra deberá ser cuidadosamente inspeccionada para localizar cualquier discrepancia de sus especificaciones, y entonces la estimación provisional se repetirá con los hallazgos de la inspección.

Si las diferencias inexplicables todavía existen entre las estimaciones provisionales y los datos medidos, las posibles alternativas de procedimientos de cálculo y prueba de errores serán investigados.

#### **7.8.7 Informe de la prueba**

El informe de la prueba debe incluir la siguiente información:

- a) Referencia a esta norma internacional y una declaración de cumplimiento en que se enumeran las desviaciones de esta norma internacional;
- b) identificación del laboratorio de ensayos con la dirección, la fecha de la prueba, y el patrocinador de la prueba, si procede;
- c) información sobre los equipos de ensayo, las dimensiones y emisión de superficies interiores;

- d) identificación y descripción de la muestra de análisis con la localización de sensores;
- e) procedimiento de acondicionamiento de muestra, masa antes y después del ensayo, el contenido de humedad y el procedimiento para determinarla;
- f) orientación de la muestra y dirección de la transferencia de calor;
- g) velocidad media y dirección del aire en el lado caliente y en el frío;
- h) potencia total neta de entrada y de transferencia de calor a través de la muestra.

El informe de ensayo para la determinación de la resistencia térmica, **R**, de conformidad con 3.6.1 incluirá, además, la información en los puntos i) a p)

NOTA 2 Los valores reportados en relación con los temas i) a m) son los valores medios de todas las lecturas o los períodos de medición después de los períodos transitorios iniciales.

- i) Temperaturas del aire en el lado caliente y en el frío
- j) Temperaturas de las superficies en el lado caliente y en el frío
- k) ponderada de las temperaturas de la superficie para lado caliente y lado frío;
- l) la resistencia térmica calculada y los coeficientes convencionales de transferencia de calor derivados de los códigos de construcción para el cálculo de la transmisión térmica;
- m) la precisión estimada;
- n) la duración de la prueba
- o) mediciones complementarias, por ejemplo, la humedad contenida de los materiales que forman parte de la muestra;
- p) otra información pertinente para la prueba, por ejemplo, alguna significativa o inexplicable divergencia entre los resultados de las

pruebas y estimaciones provisionales, de conformidad con 3,1, los resultados de la consiguiente inspección de la muestra y las posibles divergencias de interpretación.

El informe de la prueba para la determinación de la transmitancia térmica,  $U$ , de conformidad con 3.6.2, además de los elementos a) a h) debe incluir la información en los ítems q) w).

NOTA 3 Los valores reportados en relación con los temas q) a t) son los valores medios de todas las lecturas o los períodos de medición después de los períodos transitorios iniciales.

- q) Las temperaturas del aire en el lado caliente y lado frío
- r) la temperatura ambiental calculada para el lado caliente y lado frío;
- s) la transmitancia térmica calculada y el coeficiente de transferencia de calor de la superficie desde una muestra homogénea;
- t) la precisión estimada
- u) la duración de la prueba
- v) mediciones complementarias, por ejemplo, la conductividad térmica y el contenido de humedad de los materiales que forman parte de la muestra;
- w) otra información pertinente para la prueba, por ejemplo, alguna significativa o inexplicable divergencia entre los resultados de las pruebas y estimaciones provisionales, de conformidad con 3,1, los resultados de la consiguiente inspección de la muestra y las posibles divergencias de interpretación

## 8 TAMAÑO DE MUESTRAS Y ESPESORES DE AISLANTES

Las tablas que aparecen a continuación nos indican el tamaño de las muestras y especificaciones para montaje de espesores de aislante térmico (lana de roca, fibra de vidrio y poliuretano), con las configuraciones de los refuerzos en T y bulbo.

Estas tienen un comentario adicional y se trata del material adicional, eso simplemente guarda relación con la diferencia que hay entre la longitud del refuerzo y el espesor de aislante que se le aplique a la muestra, que en caso de llegar a existir, es con esa diferencia es la que nos basamos para aislar la parte descubierta del refuerzo.

La muestra para ser analizada en la instalación experimental debe tener unas dimensiones de 30cms x 30cms de sección transversal.

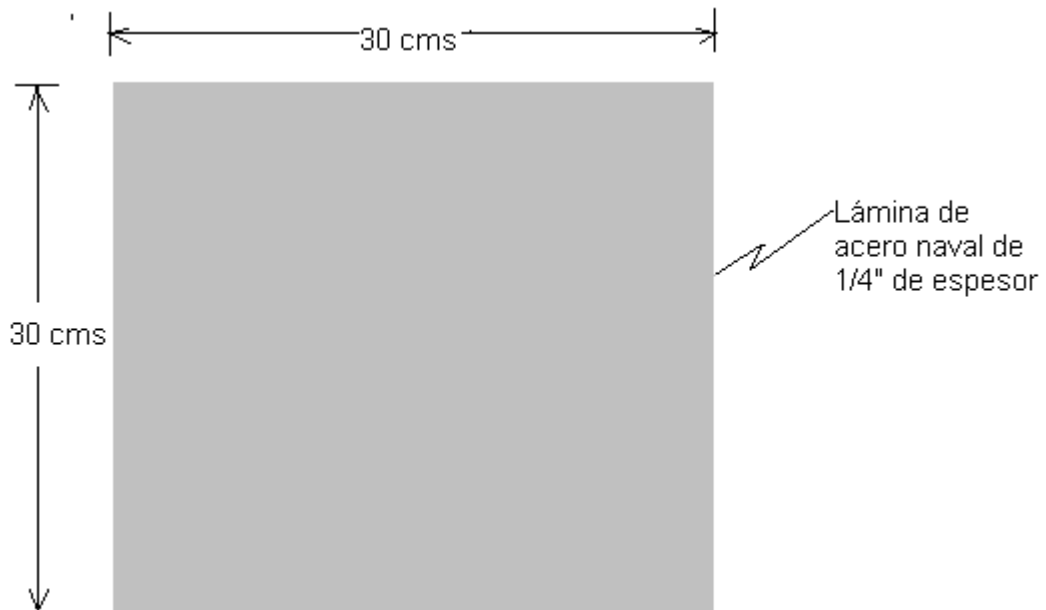
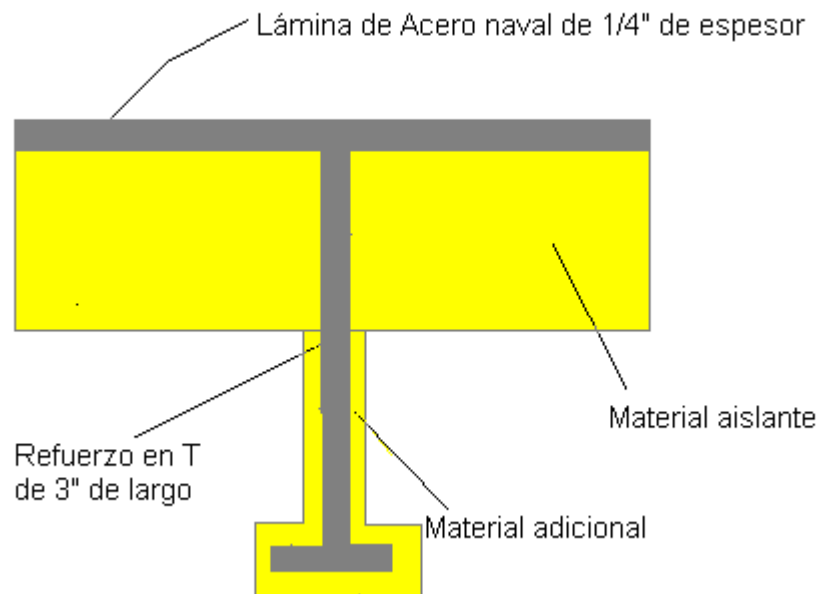


Ilustración 8-1 Area de la sección transversal de la muestra.



Muestra	Dimensiones	Tipo de refuerzo	Espesor del Aislante (pulg)	Adicional *(pulg)
Lana de roca	30cms x 30cms	En T (3" de largo)	1	2
Lana de roca	30cms x 30cms	En T (3" de largo)	2	1
Lana de roca	30cms x 30cms	En T (3" de largo)	3	0
Fibra de vidrio	30cms x 30cms	En T (3" de largo)	1	2
Fibra de vidrio	30cms x 30cms	En T (3" de largo)	2	1
Fibra de vidrio	30cms x 30cms	En T (3" de largo)	3	0
Poliuretano	30cms x 30cms	En T (3" de largo)	1	2
Poliuretano	30cms x 30cms	En T (3" de largo)	2	1
Poliuretano	30cms x 30cms	En T (3" de largo)	3	0

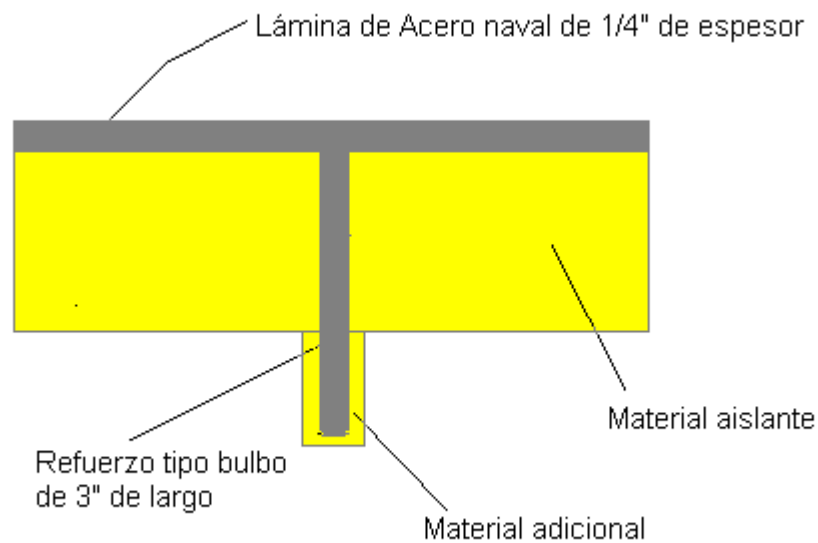
**Tabla 8-1 Materiales aislantes y sus respectivos espesores (refuerzo en T)**



**Ilustración 8-2 Refuerzo en T. Esta geometría corresponde a la instalación del aislante térmico en los buques tipo nodriza 7 y 8.**

Muestra	Dimensiones	Tipo de refuerzo (bulbo)	Espesor del Aislante (pulg)	Adicional *(pulg)
Lana de roca	30cms x 30cms	(3" de largo)	1	2
Lana de roca	30cms x 30cms	(3" de largo)	2	1
Lana de roca	30cms x 30cms	(3" de largo)	3	0
Fibra de vidrio	30cms x 30cms	(3" de largo)	1	2
Fibra de vidrio	30cms x 30cms	(3" de largo)	2	1
Fibra de vidrio	30cms x 30cms	(3" de largo)	3	0
Poliuretano	30cms x 30cms	(3" de largo)	1	2
Poliuretano	30cms x 30cms	(3" de largo)	2	1
Poliuretano	30cms x 30cms	(3" de largo)	3	0

**Tabla 8-2 Materiales aislantes y sus respectivos espesores (refuerzo tipo bulbo)**



**Ilustración 8-3 Refuerzo tipo bulbo. Esta geometría corresponde a la instalación del aislante térmico en los buques tipo nodriza 7 y 8.**

\*Ese material adicional se refiere al aislante con el que se debe cubrir la parte del refuerzo que queda al descubierto después de aplicar el espesor respectivo a la placa de acero naval de 1/4" de espesor, por ejemplo si a la placa se le aplica lana de roca de 1" de espesor, la parte del refuerzo que queda descubierta son 2".

## **9 DETALLES DE LA INSTRUMENTACIÓN DE LA INSTALACIÓN [14]**

### **9.1 INSTRUMENTACION**

Siguiendo la norma ASTM C1363 sección 6.10.3.2 la mejor localización para sensores de temperatura depende del tipo de convección de la cortina de aire (natural o forzado). En situaciones naturales de convección, se logra usualmente identificar la temperatura de aire fuera de la capa límite. Cuando se establece convección natural, los sensores de temperatura de aire estarán ubicados en un plano paralelo a la superficie de la muestra y lo suficientemente lejano fuera de ella que no afecte la temperatura superficial de la muestra.

Para velocidades mínimas requeridas para obtener temperaturas uniformes, la distancia mínima desde la superficie de la muestra es de 75 mm. A velocidades mayores de 1m/s se requiere una distancia mínima mayor.

El espesor de la capa límite aumenta bruscamente en la transición de flujo laminar a turbulento.

Con el flujo turbulento desarrollado totalmente, la capa límite ocupa todo el espacio entre el deflector y la muestra.

Esto debe detectar una temperatura cercana a la de la masa de corriente de aire.

### **9.2 TERMOCUPLAS**

Según la norma ASTM C1363 sección 6.10.1 los requerimientos que deben reunir las termocuplas son:

1. El diámetro del alambre no debe ser mayor de 0,25mm, (AWG 30).
2. La termocupla debe calibrarse y los límites especiales de errores están especificados en la tabla E 230 de la Norma ASTM C1363.

3. Las uniones de los alambres (sean soldadas o empalmadas) que constituyen la termocupla, no debe ser mayor a que 2 veces el diámetro del cable.
4. Cuando se coloque la termocupla se debe cubrir 100mm contados a partir de la punta de la misma con cinta adhesiva térmica especial.
5. Deben aislarse eléctricamente o protegidas de otra forma, de tal modo que se tenga en cuenta la ubicación de las termocuplas.

### **9.3 DEFLECTORES**

La norma ASTM C1363 sección 6.8.9.1 recomienda que el deflector a usar debe tener una resistencia térmica igual a  $1\text{m}^2\text{K} / \text{W}$ .

La norma ASTM C1363 sección 6.8.9.2 recomienda que se si usan deflectores ajustables el rango de valores de espacio muestra- deflector debe estar entre 140- 200mm.

### **9.4 NUMERO DE SENSORES**

Siguiendo la recomendación de la norma ASTM C 1363 sección 6.10.2 el número de sensores que se deben colocar esta alrededor de 2 por metro cuadrado del tamaño de la muestra pero no mas de 9, o sea que se pueden colocar entre 2 y 9 sensores por metro cuadrado del tamaño de la muestra.

La norma ASTM C 177 sección 6.8.2.5 nos da una fórmula para calcular y obtener el número de sensores (N) por cara de la muestra.

$$N = 10 \times \sqrt{A}, \text{ donde } A \text{ es el área de la muestra en } \text{m}^2.$$

### **9.5 CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL AIRE**

La norma ASTM C1363 en la sección 6.9.1 recomienda que para tener un buen control de la temperatura del aire, el valor de esta no debe variar  $\pm 1^\circ\text{K}$  del setpoint, esta tolerancia hay que mantenerla constante durante el período de medición en el momento donde la cortina de aire recorra la totalidad de la cara de la muestra.

Un método para suministrar aire caliente, es instalar en la entrada del ducto o en otra parte del sistema de ventilación de aire, un alambre desnudo o resistencias eléctricas, y monitorearlas usando un sensor localizado en la cortina de aire (espacio entre el deflector y la muestra), esto siguiendo la norma ASTM C1363 en la sección 6.9.2.

Para el suministro de aire frío según la norma ASTM C1363 sección 6.9.3, se puede instalar un sistema de refrigeración dentro de la cámara, o externo a ella, esto teniendo en cuenta el aislamiento de los ductos.

## **9.6 SELLADO**

Por recomendación de la norma ASTM C1363 sección 7.5 las juntas o espacios de aire que queden entre la muestra a ensayar y el marco, serán sellados con masilla, con cinta adhesiva térmica, u otra forma de sellado hermético esto con el fin de prevenir las pérdidas laterales de calor.

## **9.7 RANGO DE VELOCIDADES**

El rango de velocidades de flujo de aire a usar tanto en lado caliente como en frío según la norma ISO 8990 sección 2.6 es 0,1m/s y 10m/s.

## **9.8 RANGO DE VALORES DE TEMPERATURA**

Estos valores de temperatura se escogieron teniendo en cuenta las condiciones a las que se va a someter el buque y no necesitamos para eso una norma. Estos son:

**Lado frío:** 15 a 28°C

**Lado caliente:** 30 a 80°C

## 10 ORIENTACIONES DE LA MUESTRA [15]

Las posibles orientaciones de la muestra tampoco están normalizadas, pero para tener una guía de cómo podría ser, se tomaron unas orientaciones de flujo de aire que están especificadas en la ASHRAE HVAC 2001 Fundamentals, Table 3 Thermal Resistances of Plane Air Spaces (Chapter 25.4).

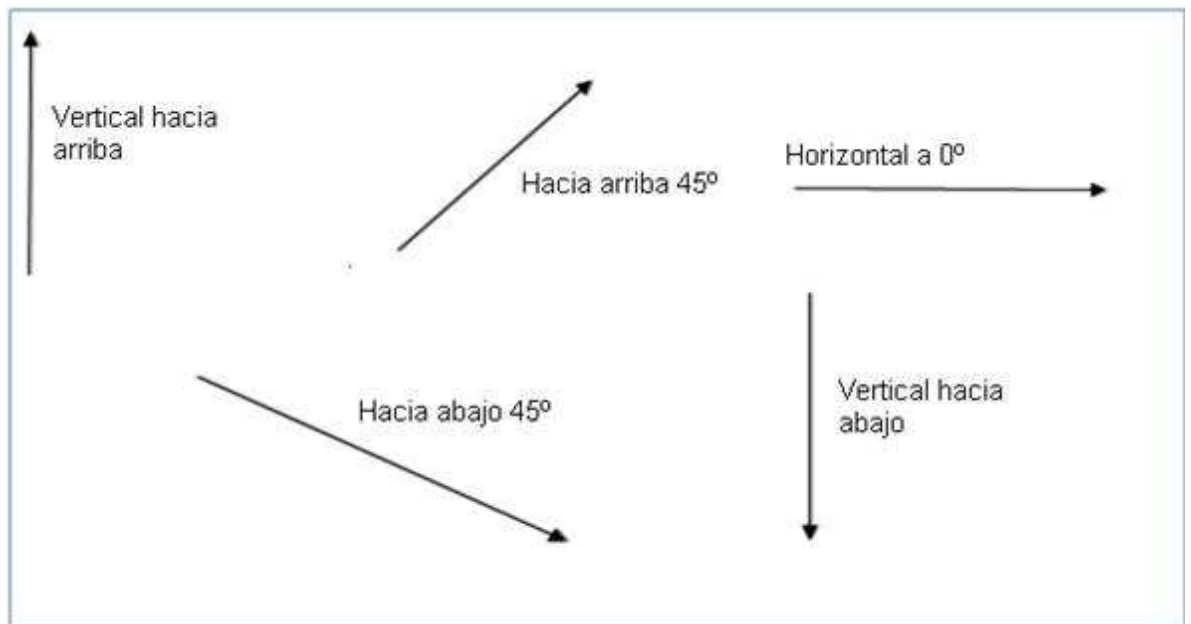


Ilustración 10-1 Orientaciones de la Muestra

## 11 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE LA CAJA

Los rieles de la parte inferior de la estructura soportan el peso de 100 kg de la caja armada que llevándolo a Newton nos da un valor de 1000, para el análisis se considera el riel como una viga simplemente apoyada en 3 puntos (A, B y C) con una carga distribuida de 500N/m ya que la longitud de la viga coincide con los apoyos en los extremos y es de 1m, lo que se busca es diseñar esa viga y así obtener el perfil en L que se necesita para la estructura de soporte de la caja.

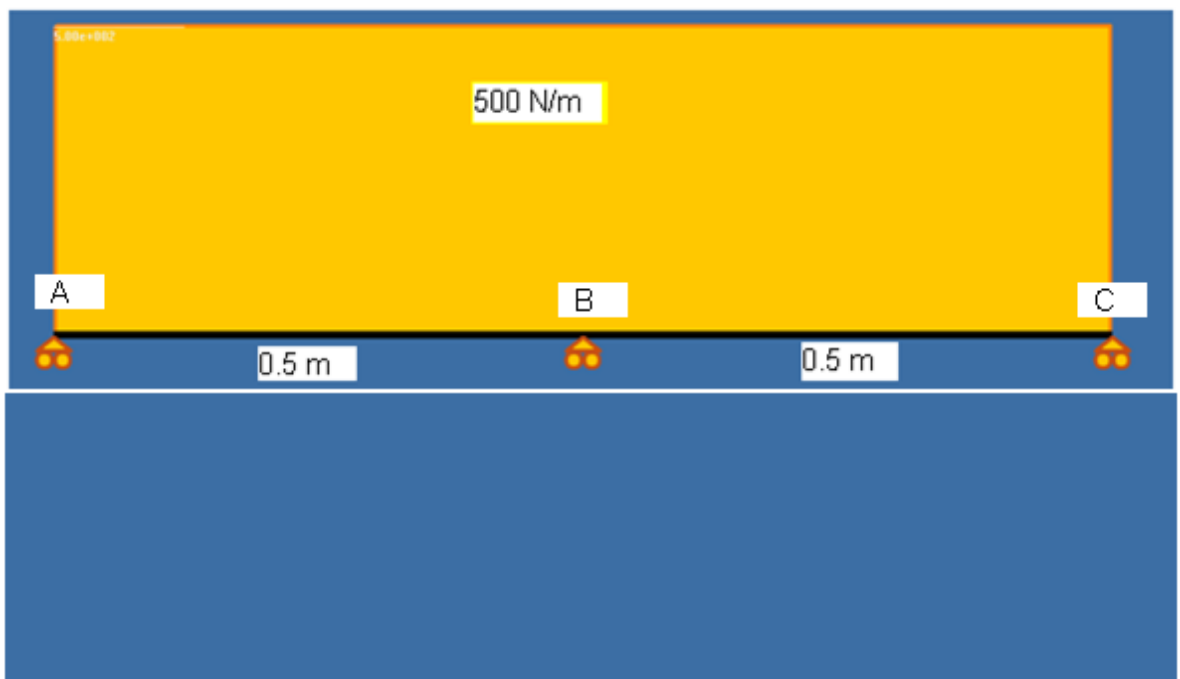


Ilustración 11-1 Esquema de la viga. [16]

Ecuación 1

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_1 + F_2 + F_3 = 500$$

Ecuación 2

$$\sum M_A = 0 \rightarrow 0.5F_2 + F_3 = 250$$

La tercera ecuación se deduce de las funciones de singularidad de diseño de vigas, esto es:

$$F_1 \langle x-0 \rangle + F_2 \langle x-0.5 \rangle - 0.5w \langle x-0 \rangle^2 = \frac{d^2 y}{dx^2} EI \quad [17]$$

$$0.5F_1 \langle x-0 \rangle^2 + 0.5F_2 \langle x-0.5 \rangle^2 - 0.1666w \langle x-0 \rangle^3 + C_1 = \frac{dy}{dx} EI$$

$$0.1666F_1 \langle x-0 \rangle^3 + 0.1666F_2 \langle x-0.5 \rangle^3 - 0.04166w \langle x-0 \rangle^4 + C_1 x + C_2 = yEI$$

Para calcular las constantes  $C_1$  y  $C_2$ , utilizamos las condiciones de frontera:

$X=0$  y  $Y=0$  resulta  $C_2=0$ .

$X=0.5$  y  $Y=0$  resulta  $C_1=2.6-0.04166F_1$ , reemplazando los valores de las constantes en la función nos queda:

$$0.1666F_1 \langle x-0 \rangle^3 + 0.1666F_2 \langle x-0.5 \rangle^3 - 0.04166w \langle x-0 \rangle^4 + 2.6x - 0.04166F_1 x = yEI$$

Para hallar la tercera ecuación evaluamos la otra condición de frontera:

$X=1$ ,  $Y=0$  con  $w=500$ , reemplazando obtenemos:

$$0.1666F_1 \langle 1-0 \rangle^3 + 0.1666F_2 \langle 1-0.5 \rangle^3 - 0.04166 \times 500 \langle 1-0 \rangle^4 + 2.6 \times 1 - 0.04166F_1 \times 1 = 0 \times EI$$

Resolviendo y simplificando nos queda:

$$3F_1 + 0.5F_2 = 437.6, \text{ Ecuación 3}$$

Resolviendo el sistema obtenemos los valores de las reacciones,  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$ .

$$F_1 = 93.8N, F_2 = 312.4N, F_3 = 93.8N$$

Con estos valores dibujamos los diagramas de cortante y momento flector, para hallar el valor del momento máximo y así poder buscar el perfil en L para la estructura.



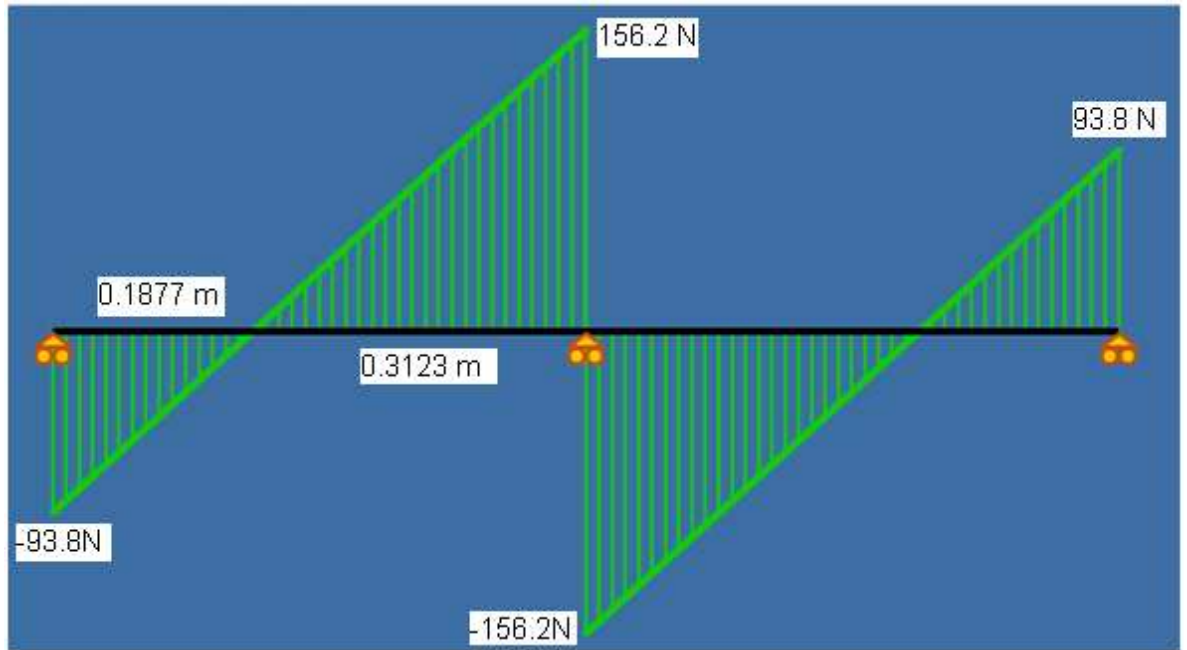


Ilustración 11-2 Diagrama de cortante. [16]

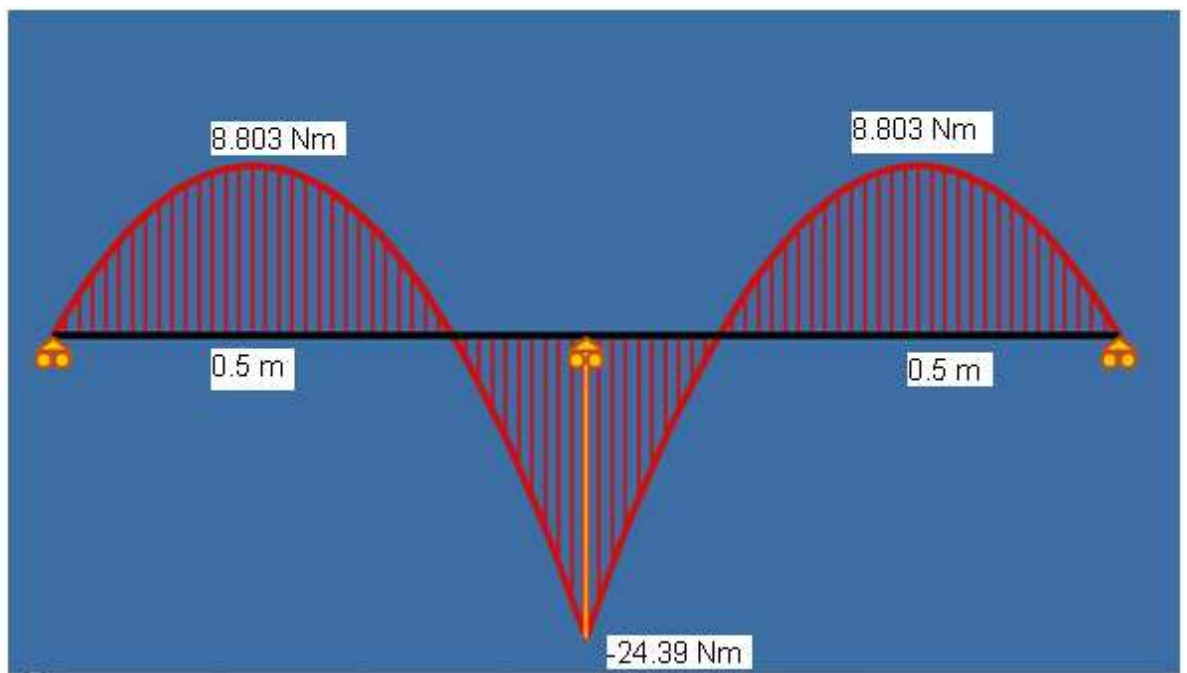


Ilustración 11-3 Diagrama de momento flector. [16]

El valor del momento máximo es  $|-24.39 Nm|$ , para calcular el perfil utilizamos la fórmula:

$$\sigma_{adm} = \frac{S_y}{n_d}, \text{ y } \sigma_{adm} = \frac{Mc}{I}. \quad [17]$$

$S_y$  : Esfuerzo de fluencia, Acero 1030 Laminado en caliente =260MPa.

$n_d$  : Factor de seguridad=2.

$$\sigma_{adm} = \frac{S_y}{n_d} = \frac{260MPa}{2} = 130 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{\frac{I}{c}} = \frac{M}{s} \text{ donde } s = \frac{M}{\sigma_{adm}} = \frac{24.39Nm}{130 \frac{N}{mm^2}} = \frac{24390Nmm}{130 \frac{N}{mm^2}} = 187.62mm^3 \quad [18]$$

Con  $s=187.62mm^3$ , vamos a la tabla de perfiles de Alfredo Steckerl y encontramos que el mas adecuado es el perfil de aleta angular de alas iguales **L1 ¼ x1 ¼ x 3/16**. [18]

Para el diseño de la otra viga tomamos las dos cargas de 93.8N calculadas en la anterior para cargarla, la asumimos también simplemente apoyada.

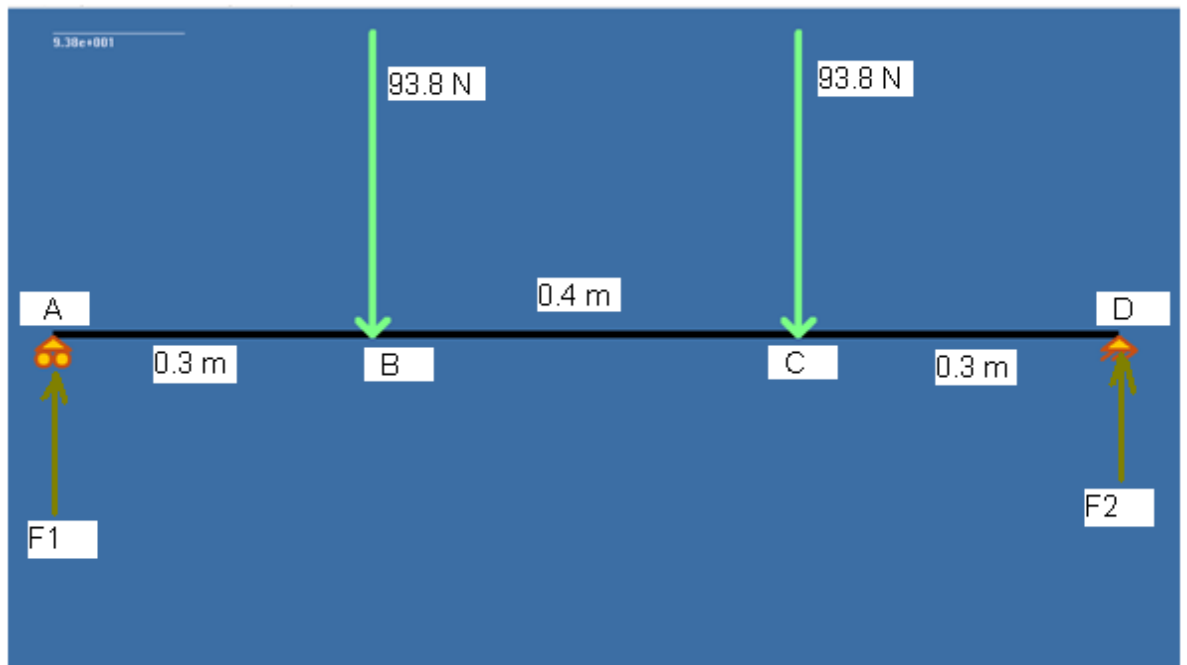


Ilustración 11-4 esquema viga 2 [16]

Por simetría las reacciones F1 y F2 son iguales y con un valor de 93.8 N.

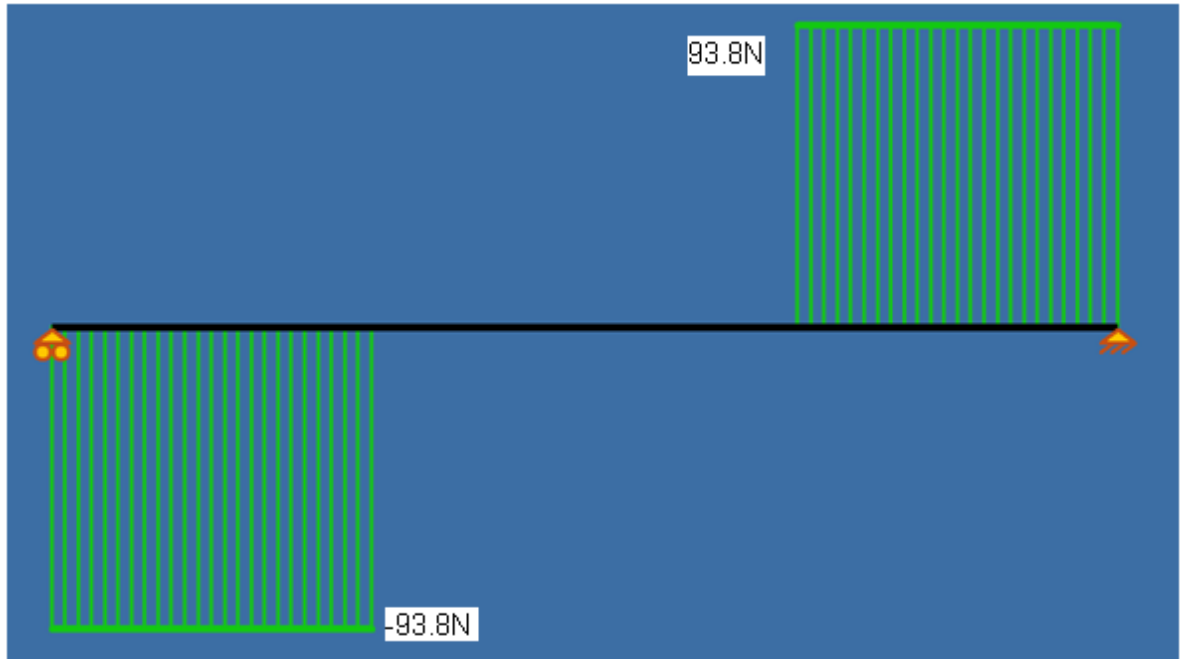


Ilustración 11-5 Diagrama de cortante viga 2. [16]

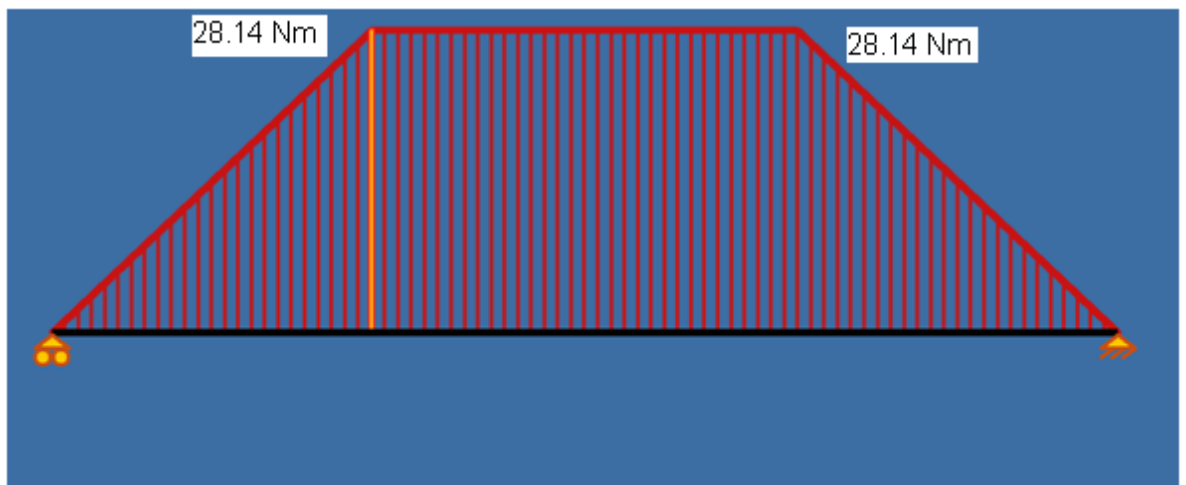


Ilustración 11-6 Diagrama de momento flector viga 2. [16]

$$\sigma_{adm} = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{\frac{I}{c}} = \frac{M}{s} \quad \text{donde} \quad s = \frac{M}{\sigma_{adm}} = \frac{28.14 Nm}{130 \frac{N}{mm^2}} = \frac{28140 Nmm}{130 \frac{N}{mm^2}} = 216.46 mm^3$$

Con  $s=216.46 mm^3$ , vamos a la tabla de perfiles de Alfredo Steckerl y encontramos que el mas adecuado es el perfil de aleta angular de alas iguales **L1 ¼ x1 ¼ x 3/16**.

## 11.1 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL EJE

Para este cálculo consideramos el eje como una viga empotrada de longitud 0.2 m con una reacción en el extremo que representa al rodamiento con un valor de 7500N.

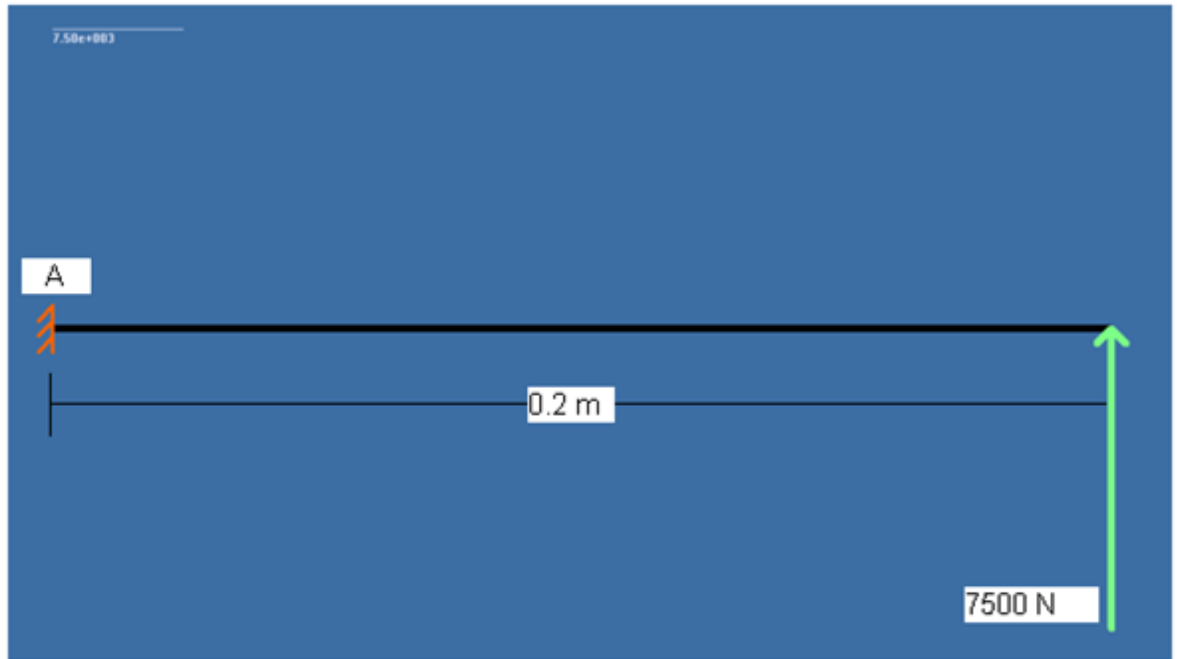


Ilustración 11-7 Esquema del eje. [16]

Calculando la reacción y el momento en A, tenemos:

$$R_A=7500 \text{ N}; M_A=300\text{Nm.}$$

Construimos los diagramas de cortante y momento flector

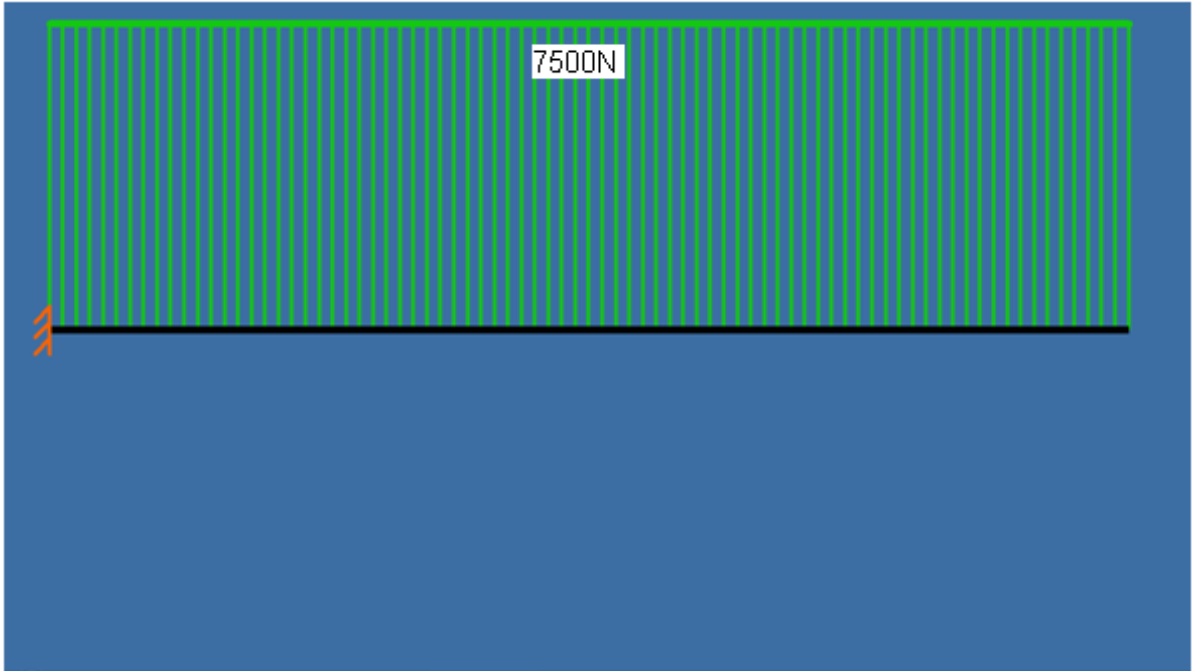


Ilustración 11-8 Diagrama de cortante del eje. [16]

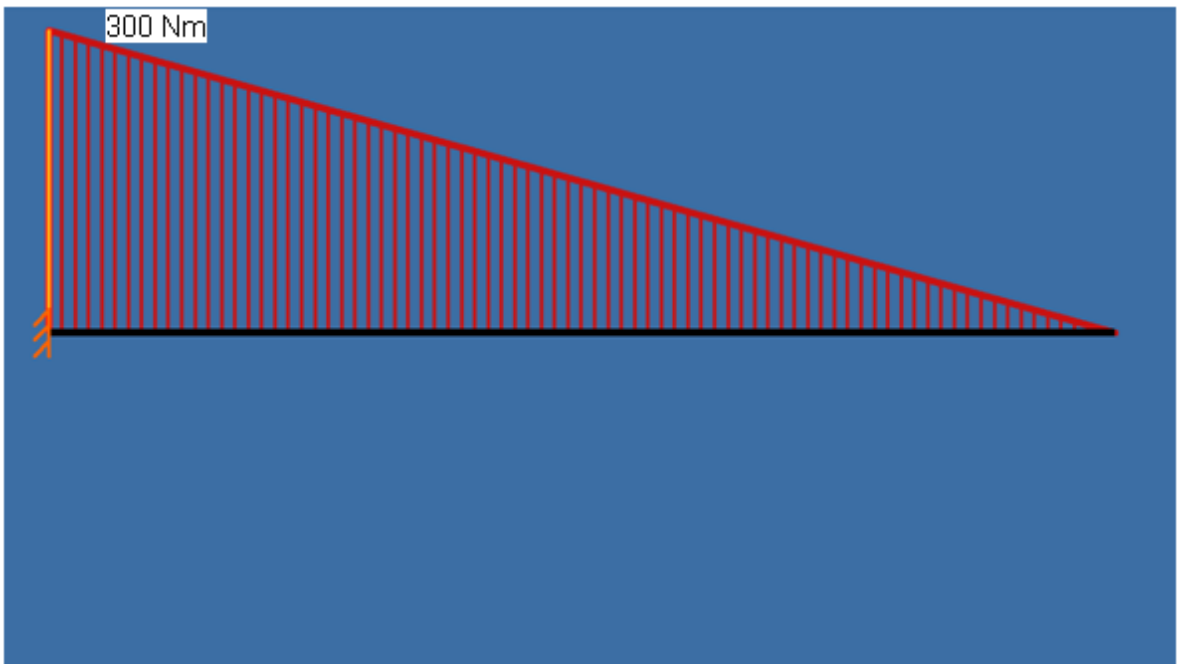


Ilustración 11-9 Diagrama de momento flector del eje. [16]

El valor del momento máximo es 300Nm

$$\sigma_{adm} = \frac{Mc}{I}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{S_y}{n_d} = \frac{310Mpa}{2} = 155Mpa$$

$$\frac{I}{c} = \frac{M}{\sigma_{adm}} = \frac{300000Nmm}{155 \frac{N}{mm^2}} = 1935.5mm^3$$

$$\frac{\pi \times d^4}{\frac{64}{d}} = \frac{\pi \times d^3}{32} = 1935.5mm^3; \quad d = \sqrt[3]{19714.63mm^3} = 27.014mm$$

El diámetro del eje dio un valor mínimo de 27mm, para asegurar el diseño lo llevamos a 1 1/2".

## 11.2 DISEÑO DE LOS ENGRANAJES [19]

Se asume que el piñón va a girar a 250 rpm, el diámetro del piñón es de 5", altura completa, perfil de envolvente 20°, relación de velocidad es 2.5 y el material de los dos engranajes es fundición gris ASTM 25.

Para servicio intermitente:

$$V_m = \frac{\pi \times D_p \times n_p}{12}, \text{ donde:}$$

$D_p$  : Diámetro del piñón.

$n_p$  : # de revoluciones del piñón.

$$V_m = \frac{\pi \times 5 \times 250}{12} = 327.25 fpm. \text{ Tallado comercial.}$$

Cálculo de la carga dinámica.

$$F_d = \frac{600 + V_m}{600} \times F_t, \text{ donde:}$$

$F_d$  : Carga dinámica.

$V_m$  : Velocidad en pies por minuto (fpm).

$F_t$ : Carga transmitida.

$$F_t = \frac{33000 \times hp}{V_m} = \frac{33000 \times 5}{327.25} = 504.2 Lbs.$$

$$F_d = \frac{600 + 327.25}{600} \times 504.2 Lbs = 780 Lbs.$$

Cálculo de la máxima fuerza que puede soportar el engranaje,  $F_s$ .

$$F_s = \frac{S \times b}{k_f \times P_d} \times Y, \text{ donde:}$$

$S$ : Esfuerzos de cálculo =  $0.4 \times S_u$ .

$b$ : Ancho de la cara del diente.

$Y$ : Factor de forma de Lewis.

$k_f$ : Coeficiente de reducción de resistencia.

$P_d$ : Paso diametral.

$$S = 0.4 \times S_u = 0.4 \times 25000 \text{ psi} = 10000 \text{ psi}.$$

$Y = 0.32$ , *asumiendo 20 dientes en el piñón*  $\longrightarrow$  Tabla AT 24, de Faires

$$k_f = 1.4$$

$$F_s = \frac{10000 \text{ psi} \times 10 \times 0.32}{1.4 P_d^2} = \frac{22857.143}{P_d^2}$$

Condición de resistencia.

$$F_s \geq F_d \Rightarrow \frac{22857.143}{P_d^2} \geq 780 Lbs \Rightarrow P_d = \sqrt{\frac{22857.143}{780}} = \frac{5.4}{\text{pulg}}, \text{ estandarizando,}$$

$$P_d = \frac{6}{\text{pulg}}, \text{ por definición } P_d = \frac{N_p}{D_p}, \text{ donde:}$$

$N_p$ : # de dientes del piñón.

$D_p$ : Diámetro del piñón.

$$N_p = P_d \times D_d = \frac{6}{\text{pulg}} \times 5 \text{ pulg} = 30 \text{dientes}, \text{ con 30 dientes entro a la tabla AT 24}$$

del libro de Faies y encuentro el nuevo factor de forma que corresponde a  $Y=0.358$ , recalculando el paso diametral nuevamente quedaría:

$$F_s = \frac{10000 \times 10 \times 0.358}{1.4 P_d^2} = 780 \text{Lbs} \Rightarrow P_d = \sqrt{\frac{35800}{1.4 \times 780}} = \frac{5.725}{\text{pulg}}, \text{ estandarizado es}$$

$$\frac{6}{\text{pulg}}$$

$$\frac{D_g}{D_p} = 2.5 \Rightarrow D_g = 2.5 \times D_p = 2.5 \times 5 \text{ pulg} = 12.5 \text{ pulg}, \text{ que corresponde al diámetro}$$

del engranaje.

$$\frac{N_g}{N_p} = 2.5 \Rightarrow N_g = 2.5 \times N_p = 2.5 \times 30 = 75 \text{dientes}, \text{ que es el número de dientes}$$

que lleva el engranaje.

$$b = \frac{10}{P_d} = \frac{10}{6} = 1.7 \text{ pulg}, 1 \frac{3}{4}'' , \text{ ancho de la cara del diente.}$$

En resumen se diseñan 1 par de engranajes con las siguientes características:

Diámetro del piñón: 5".

Diámetro del engranaje: 12.5".

Número de dientes del piñón: 30.

Número de dientes del engranaje: 75.

Ancho de la cara: 1  $\frac{3}{4}$ ".

Paso diametral: 6.



## 12 DISEÑO DEL DUCTO DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL

Para este diseño se tienen en cuenta factores como:

Máxima velocidad del rango del flujo de aire (fpm) que voy a manejar en el lado frío de la instalación experimental. (0.1-10 m/s), el máximo valor de velocidad es 10m/s que equivalen a 2000fpm aproximados.

Capacidad de la unidad de refrigeración en CFM, para nuestro caso en particular la máquina tiene una capacidad de 2 TR que equivalen aproximadamente a 800 CFM.

Entrando a la gráfica de fricción de aire con un flujo de 800 CFM y 2000fpm de velocidad obtenemos el diámetro del ducto que corresponde a 9", ver gráfica (la línea roja indica el recorrido de la gráfica para encontrar el valor del ducto).

La equivalencia para un ducto cuadrado o rectangular podemos obtenerla

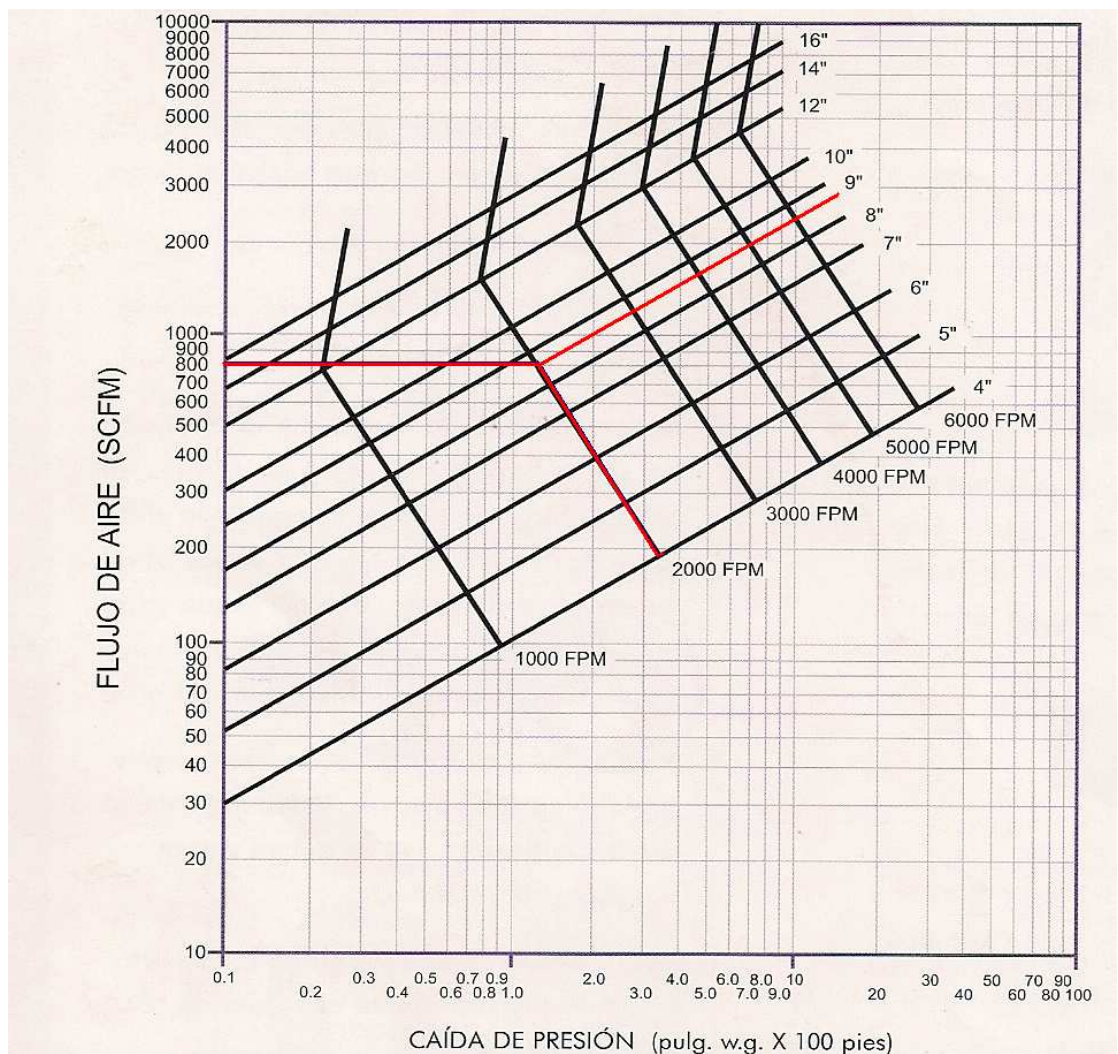
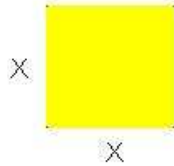


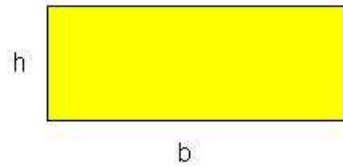
Ilustración 12-1 Gráfica de fricción [20]

calculando el área del ducto circular con el diámetro que acabamos de hallar y luego llevarla lo mas cuadrada posible.

$$A = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{\pi \times 9^2}{4} = 63.61 \text{ pulg}^2$$



Si el ducto es lo mas cuadrado entonces su dimensión es 8"x8", por que el área circular nos dió 63.6pulg<sup>2</sup> y el área del cuadrado es lado por lado, despejando nos dá X=8".



Si el ducto es rectangular entonces su dimensión es 10"x6", aproximando el área circular y conservando un poco las dimensiones del ducto cuadrado.

**Ilustración 12-2 Formas del ducto**

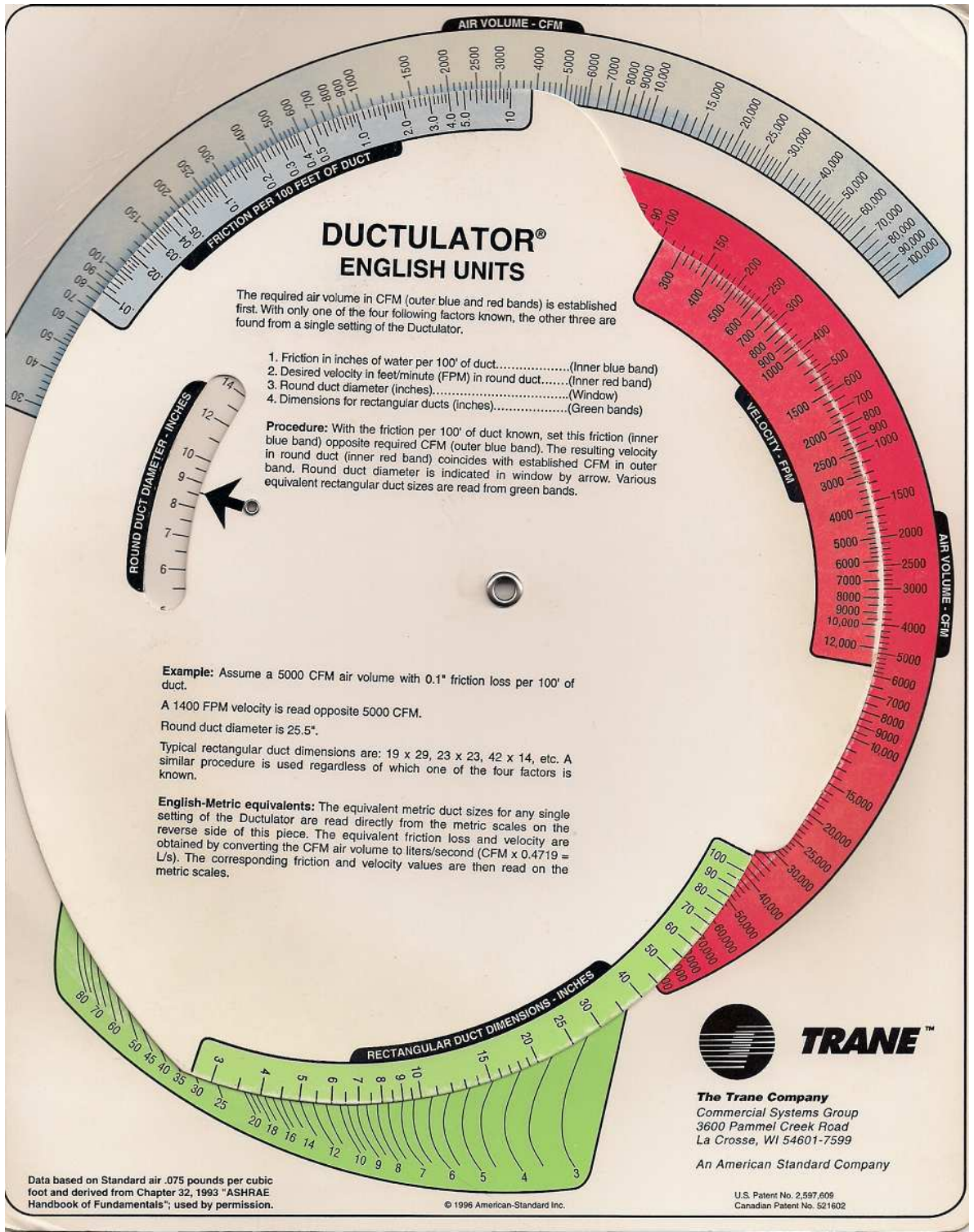


Ilustración 12-3 Ductulador. [21]

Si observamos la gráfica del ductulador, nos damos cuenta que al entrar con 800 CFM y 2000 fpm de velocidad, obtenemos un ducto circular de 9" de diámetro y su equivalente en ducto rectangular de 9"x7".

Nota: la imagen del ductulador esta configurada para los valores de diseño del ducto.

## **CONCLUSIONES**

El diseño de esta instalación experimental traerá beneficios económicos para COTECMAR porque se ahorrará el costo por disminución del espesor de láminas en fibra de vidrio, lana de roca y poliuretano. Esto influye en el costo de la máquina que suministrará aire frío al buque, también los ayuda con el problema que tienen de flotabilidad.

Para la comunidad estudiantil le será de mucha utilidad porque podrán analizar el fenómeno de manera práctica- experimental y ya no sería tan teórica. Motiva a la comunidad académica a participar en los grupos de investigación.

## RECOMENDACIONES

- Al momento de la construcción de la instalación experimental, estar muy pendiente a la Ingeniería de detalle ya que de la rigurosa aplicación de la misma nos garantiza en parte el éxito de las mediciones que se realicen.
- En esta instalación el coeficiente global de transferencia de calor  $U$ , se calcula de manera indirecta, porque del lado caliente hay una resistencia eléctrica y el coeficiente convectivo tenemos que asumirlo. Para obtener mas precisión en la medición hay que hacer una adaptación para unos ductos en el lado caliente y configurar la resistencia de tal forma que el calor que ella produzca sea impulsado a la cámara caliente por medio de unos ventiladores, de esta forma si tenemos convección de ambos lados de la instalación experimental.
- Cuando ya la instalación esté funcionando y se hagan las corridas experimentales, entregarle a COTECMAR un reporte con los valores de coeficiente global de transferencia de calor actualizado para cada uno de los materiales aislantes que ellos usan (Poliuretano, Fibra de vidrio y Lana de roca).
- Cuando se vaya a ensayar una muestra, antes de montarla tener cuidado con el estado de las superficies, hay que garantizar que estas se encuentren totalmente lisas para que el flujo de calor que la atraviesa sea lo mas uniforme posible. No es confiable una superficie con deformaciones o corrugada.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Yunus A. Çengel 2007. Transferencia de Calor y Masa. Tercera edición.
- [2] Conducción del calor, fuente:  
[http://nea.educastur.princast.es/repositorio/RECURSO\\_ZIP/1\\_1\\_jantoniozu\\_Tra\\_b\\_energ\\_cal\\_2ESO/Trab\\_energ\\_cal\\_2ESO/pagin/form\\_tram\\_calor\\_7.htm](http://nea.educastur.princast.es/repositorio/RECURSO_ZIP/1_1_jantoniozu_Tra_b_energ_cal_2ESO/Trab_energ_cal_2ESO/pagin/form_tram_calor_7.htm)
- [3] Conducción del calor, fuente:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n\\_de\\_calor](http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n_de_calor)
- [4] Convección, Dirección Meteorológica de Chile fuente:  
[http://www.tiempodelsur.cl/glosa\\_p.html](http://www.tiempodelsur.cl/glosa_p.html)
- [5] Radiación, fuente [http://astroverada.com/ /Main/T\\_blackbody.html](http://astroverada.com/ /Main/T_blackbody.html)
- [6] ASHRAE Fundamentals, 1977
- [7] Archivo que resume diferentes métodos de cálculo de U y de la difusividad térmica. Se encuentra en: <http://www.evitherm.org/default.asp?ID=308>
- [8] Development of a universal hotbox, se encuentra [http://www.google.com.ar/search?hl=es&rlz=1T4SKPB\\_esCO327CO327&q=hot+box%2B+umass&meta=](http://www.google.com.ar/search?hl=es&rlz=1T4SKPB_esCO327CO327&q=hot+box%2B+umass&meta=)
- [9] National Physical Laboratory, <http://www.npl.co.uk/publications/>.
- [10] **Incropera**, Frank P. y David P. DeWitt. Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Prentice Hall. 4ta ed. 1999.
- [11] Propiedades térmicas del poliuretano, sacado de:  
[http://www.mart.cl/mansol\\_fger90/Fichas\\_Empresas/ficha%20Orica%20MRT.pdf](http://www.mart.cl/mansol_fger90/Fichas_Empresas/ficha%20Orica%20MRT.pdf)
- [12] Propiedades térmicas de la lana de roca, se encuentra en:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante\\_t%C3%A9rmico](http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante_t%C3%A9rmico)
- [13] Norma ISO 8990
- [14] Norma ASTM C 1363
- [15] ASHRAE HVAC 2001, Fundamentals
- [16] Software xvigas bajado de:

<http://spanish.osstrans.net/software/xvigas.html>

[17] Beer P. Ferdinand and Jonhston Russell 2007, Mecánica de Materiales.

[18] Steckerl Alfredo, tabla de perfiles.

[19] Faires M. Virgil, Diseño de Elementos de Máquina.

[20] Owens Corning, Catálogo Ducto Flexible para Aire Acondicionado.

[21] Trane, Ductulador. Diseño de Ducto Rectangular y Circular.

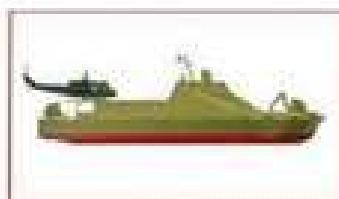
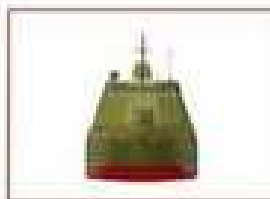




COTECMAR  
 CENTRO DE ESTUDIOS  
 DE INVESTIGACIONES  
 Y DESARROLLO  
 TECNOLÓGICO  
**COLOMBIA**

**CARACTERÍSTICAS GENERALES**

ESLORA TOTAL: ..... 31.26 m  
 ESLORA ENTRE PERAS: ..... 21.75 m  
 MANGA MOLDEADA: ..... 9.00 m  
 CALADO DE DISEÑO: ..... 1.00 m  
 PUNTA: ..... 3.10 m  
 DESPLAZAMIENTO: ..... 275.0 Ton  
 VELOCIDAD MAX: ..... 9 Nudos  
 PROPULSION: ..... 02 SCHOTTEL SPJ 82



[www.unifim.com](http://www.unifim.com) - Cotecmar