

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

"OPTIMIZACION DE ESPESORES PARA SISTEMAS DE
AISLAMIENTO TERMICO EN CENTRALES DE VAPOR"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de

INGENIERO MECANICO

presentada por

KLEBER GUAMAN ULLAURI

Guayaquil-Ecuador

1984

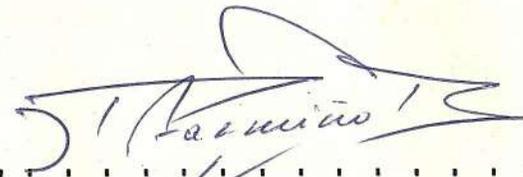
AGRADECIMIENTO

AL ING. MARCO PAZMIÑO B.,
DIRECTOR DE TESIS, POR SU
AYUDA Y COLABORACIÓN EN
LA REALIZACIÓN DE ESTE
TRABAJO.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Pazmiño Barreno', written in a cursive style.

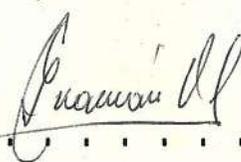
.....
ING. MARCO PAZMIÑO BARRENO

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTOS EN ESTA TESIS, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(REGLAMENTO DE EXÁMENES Y TÍTULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL).



.....
KLEBER GUAMAN ULLAURI

R E S U M E N

El desarrollo de la presente tesis está basado en un estudio de optimización de sistemas de aislamiento para superficies planas y cilíndricas, analizando su aplicación sobre tuberías, tanques, depósitos y equipos, que están destinados a conservar la energía del vapor generado por el caldero en una central térmica a vapor.

Como criterio de optimización se considera el hecho de que pudiendo existir diferentes formas de elegir el espesor de cualquier sistema de aislamiento, la decisión correcta debería estar basada en qué diseño ahorraría la mayor cantidad de dinero sobre un período específico.

En base a esta consideración se realizó un análisis térmico y económico de los sistemas de aislamiento, el mismo que incluye la determinación de pérdidas térmicas a través del espesor de aislamiento, costo de dichas pérdidas, y el costo del aislamiento.

El costo de las pérdidas térmicas se analizó en función del costo de energía para generación de vapor, mientras que el

VII

costo de aislamiento en función del costo incremental y el costo de instalación del mismo. Para la evaluación de costos totales se ha considerado el costo de ciclo de vida como criterio predominante.

Partiendo del criterio de optimización, la determinación de espesores óptimos de aislamiento se realizó usando el método de máximos y mínimos, obteniéndose espesores para los cuales el costo total de las pérdidas térmicas y el costo total de aislamiento son mínimos.

Como resultado de este análisis se presenta un método sencillo y práctico para la selección de espesores óptimos de aislamiento, el mismo que contempla la utilización de tablas y gráficos que se han construido tanto para los sistemas de aislamiento de superficies planas como cilíndricas.

Además, se realizó un análisis térmico experimental para tuberías aisladas y sin aislar con el propósito de evaluar pérdidas de calor, conductividades térmicas y resistencias térmicas de superficie exterior, para efectos de comparación entre diferentes tipos de materiales.

INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN.	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS.	XII
INDICE DE TABLAS	XV
INTRODUCCION.	20
I. AISLAMIENTO TERMICO	22
1.1 Generalidades.	22
1.1.1 Materiales Básicos.	24
1.1.2 Formas físicas de aislamiento	24
1.1.3 Estructura de los materiales aislantes.	26
1.2 Propiedades de los materiales aislantes	28
1.2.1 Propiedades térmicas.	29
1.2.2 Propiedades mecánicas	29
1.2.3 Propiedades relacionadas a la humedad	30
1.2.4 Otras Propiedades.	31
1.3 Factores que afectan a la conductividad térmica	36
1.3.1 Forma física y estructura	37
1.3.2 Condiciones del medio ambiente y	

	<u>Pág.</u>
aplicaciones.	38
1.4 Clasificación de los materiales aislantes según la temperatura.	40
1.4.1 Temperaturas comprendidas entre 10 ° y 149 °C.	41
1.4.2 Temperaturas comprendidas entre 149 ° y 315 °C	43
1.4.3 Temperaturas superiores a 315 °C	45
II. CONSIDERACIONES BASICAS DEL PROYECTO.	47
2.1 Sistemas de aislamiento en una central tér- mica de vapor.	47
2.2 Análisis de la transferencia de calor en los sistemas de aislamiento	65
2.2.1 Transferencia de calor en sistemas de aislamiento para superficies planas . .	75
2.2.2 Transferencia de calor en sistemas de aislamiento para superficies cilíndri- cas.	80
2.2.3 Resistencia térmica de superficie exterior.	86
2.3 Análisis económico para los sistemas de aislamiento.	89
2.3.1 Costo de la pérdida de energía	90
2.3.2 Costo de aislamiento.	92
2.3.3 Espesor de aislamiento.	93

	<u>Pág.</u>
2.4	Términos para la evaluación de costos. 98
2.4.1	Período de vida del aislamiento y de la instalación. 99
2.4.2	Razón de incremento, amortización y retorno sobre los costos 100
2.5	Procedimiento para evaluar los costos totales 102
III	COSTO DE ENERGIA PARA GENERAR VAPOR 104
3.1	Combustibles usados en centrales térmicas de vapor. 105
3.2	Eficiencia de conversión de los combus- tibles. 111
3.3	Costo de calor para generar vapor. 115
3.4	Costo promedio anual de calor 117
3.5	Costo capital anual de calor. 119
3.6	Costo total de calor. 122
IV	COSTO DE AISLAMIENTO. 123
4.1	Consideraciones generales. 123
4.2	Costo de aislamiento instalado 125
4.3	Determinación del costo incremental de aislamiento. 130
4.4	Estimación de precios por unidad de aisla- miento instalado 132
4.5	Procedimiento para estimar el costo de ais- lamiento instalado 135

	<u>Pág.</u>
4.6 Factores de complejidad para tubería.	137
V DETERMINACION DE ESPESORES OPTIMOS DE AISLAMIENTO	146
5.1 Consideraciones generales.	146
5.2 Espesores óptimos para aislamiento simple . .	152
5.2.1 Sistemas de aislamiento para superfi- cies planas.	153
5.2.2 Sistemas de aislamiento para superfi- cies cilíndricas (tubos).	155
5.3 Espesores óptimos para aislamiento compuesto.	176
5.3.1 Sistemas de aislamiento para su- perficie planas.	177
5.3.2 Sistemas de aislamiento para su- perficie cilíndricas (tubos)	180
5.4 Procedimiento para determinar los espesores óptimos de aislamiento.	183
VI PARTE EXPERIMENTAL.	190
6.1 Consideraciones generales	190
6.2 Descripción de las pruebas a realizarse . . .	197
6.3 Datos y mediciones obtenidas.	201
6.4 Cálculos y análisis de resultados	204
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	210
APENDICES.	217
BIBLIOGRAFIA	252

INDICE DE FIGURAS

<u>N.º</u>		<u>Pág.</u>
2.1	Aislamiento plástico de una brida.	51
2.2	Característica cobertura en chapa metálica desmontable para una brida.	51
2.3	Aislamiento de una brida tapada con un acolchado desmontable.	55
2.4	Caja en chapa metálica para una válvula	55
2.5	Aislamiento plástico de una válvula de paso	56
2.6	Aplicación de aislamiento rígido a una junta de expansión de fuelle.	56
2.7	Aislamiento plástico de conectadores y válvulas roscadas.	58
2.8	Aislamiento de codos de tubería (empleando ais- lamiento seccional)	58
2.9	Aislamiento de una tubería en los soportes colgantes.	59
2.10	Aislamiento plástico de un codo provisto de brida.	61
2.11	Aislamiento de una tubería en un soporte de asiento.	61

<u>N^o</u>	<u>Pág.</u>
2.12 Aislamiento de un tanque cilíndrico. Detalles característicos (con aislamiento flexible o rígido)	64
2.13 Coeficiente de radiación o factor de temperatura (h_r).	70
2.14 Coeficiente de convección en relación con la velocidad del viento para la convección forzada sobre las superficies cilíndricas.	74
2.15 Sistema de aislamiento simple para superficies planas.	76
2.16 Sistema de aislamiento compuesto para superficies planas.	76
2.17 Sistema de aislamiento simple para superficies cilíndricas	81
2.18 Sistema de aislamiento compuesto para superficies cilíndricas.	81
2.19 Espesor de aislamiento Vs Costo de Aislamiento. . .	97
4.1 Variación del costo de aislamiento instalado. . .	128
5.1 Curvas Básicas de espesor óptimo	151
5.2a Espesor óptimo, para superficies planas.	157
5.2b Espesor óptimo, Tubo 2.54 cm (1 pulg.).	158
5.2c Espesor óptimo, Tubo 3.81 cm. (1 ½ pulg.).	159
5.2d Espesor óptimo, Tubo 5.08 cm (2 pulg.).	160
5.2e Espesor óptimo, Tubo 6.35 cm (2 ½ pulg.).	161
5.2f Espesor óptimo, Tubo 7.62 cm (3 pulg.).	162

<u>N^o</u>	<u>Pág.</u>
5.2g Espesor óptimo, Tubo 10.16 cm (4 pulg.)	163
5.2h Espesor óptimo, Tubo 12.70 cm (5 pulg.)	164
5.2i Espesor óptimo, Tubo 15.24 cm (6 pulg.)	165
5.2j Espesor óptimo, Tubo 20.32 cm. (8 pulg.)	166
5.2k Espesor óptimo, Tubo 25.40 cm (10 pulg.)	167
5.2l Espesor óptimo, Tubo 30.48 cm (12 pulg.)	168
5.2m Espesor óptimo, Tubo 35.56 cm (14 pulg.)	169
5.2n Espesor óptimo, Tubo 40.64 cm (16 pulg.)	170
5.2o Espesor óptimo, Tubo 45.72 cm (18 pulg.)	171
5.2p Espesor óptimo, Tubo 50.80 cm (10 pulg.)	172
5.2q Espesor óptimo, Tubo 60.96 cm (24 pulg.)	173
5.2r Espesor óptimo, Tubo 76.20 cm (30 pulg.)	174
5.2s Espesor óptimo, Tubo 91.44 cm (36 pulg.)	175
5.3 Solución para costo mínimo de una capa de aislamiento nueva sobre la existente.	179
5.4 Manera de encontrar el valor de r_3	182
6.1 Equipo experimental	191
6.2 Transmisión de calor Vs resistencia de super- ficie (Superficies planas y cilíndricas).	209

INDICE DE TABLAS

<u>N-º</u>	<u>Pág.</u>
1.1 Propiedades de algunos materiales aislantes térmicos.	32- 35
2.1 Emisividades normales totales de varias superficies	71
3.1 Clasificación de los carbones.	106
3.2 Requerimientos detallados para petróleos combus- tibles.	109
4.1 Razón de precios de venta unitarios del material (Silicato de Calcio).	140
4.2 Razón de precios de venta unitarios del material (Lana mineral preformada)	141
4.3 Razón de precios de venta unitarios del material (Fibra de vidrio preformada).	142
4.4 Razón de precios de venta unitarios del material (Vidrio celular).	143
4.5 Productividad de un trabajador base	144
4.6 Factor de corrección según el material.	145
4.7 Factor de complejidad para tubería.	145
6.1 Datos Experimentales.	203
6.2 Resultados de las Pruebas	205
6.3 Valores promedio de los resultados de las pruebas	207

INDICE DE ABREVIATURAS

- A = Area, m^2
- B_1 = Factor para promediar el costo anual de calor
- B_2 = Factor para amortizar el costo inicial de la planta
- B_3 = Factor para amortizar el costo de aislamiento
- C_h = Costo de calor para generación de vapor, $\$/10 \text{ Kcal}$
- C_h = Costo promedio anual de calor, $\$/10^6 \text{ Kcal}$
- C_i = Costo de aislamiento instalado, $\$/m^2$, $\$/m\text{-lin}$
- C_k = Costo capital anual de calor, $\$/10^6 \text{ Kcal}$
- C_p = Costo total anual para sistemas de aislamiento de superficies cilíndricas (tubos), $\$/10^6 \text{ Kcal}$
- C_s = Costo total anual para sistemas de aislamiento de superficies planas, $\$/10^6 \text{ Kcal}$
- $^{\circ}\text{C}$ = Grados Centígrados
- E = Eficiencia de conversión del combustible
- F_c = Factor compuesto de mano de obra
- F_t = Factor según el tipo de material
- h_c = Coeficiente de convección, $\text{Kcal/h-m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$
- h_r = Coeficiente de radiación o factor de temperatura, $\text{Kcal/h-m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$
- h = Coeficiente de superficie exterior, $\text{Kcal/h-m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$
- HVH = Valor calorífico alto del combustible, Kcal/Kg

- i_1 = Razón anual de escalación de precios del combustible
 i_2 = Razón de amortización del capital invertido en la planta
 i_3 = Razón de retorno requerida sobre el último incremento de aislamiento.
 K, k = Conductividad térmica del material aislante, Kcal/cm/h-m-C., Kcal-cm/h-m-C.
 LP = Precio estimado de la mano de obra, \$/m-lin, \$/m²
 LR = Razón de mano de obra local, \$/h-hombre
 M = Costo total anual de calor, \$/10⁶Kcal
 MP = Precio del material aislante, \$/m-lin, \$/m²
 m_c = Costo incremental de aislamiento, \$/m-lin/cm, \$/m /cm
 m_p = Costo anual de la pérdida de calor en sistemas de aislamiento para superficies cilíndricas, \$/año-m-lin.
 m_s = Costo anual de la pérdida de calor en sistemas de aislamiento para superficies planas, \$/año-m²
 n_1 = Período sobre el cual el proyecto de aislamiento es amortizado, años.
 n_2 = Período sobre el cual la instalación es amortizada, años
 P = Precio unitario de aislamiento instalado, \$/m-lin, \$/m²
 PC = Factor de complejidad para tubería
 P_c = Precio del carbón, \$/Ton.
 P_g = Precio del gas, \$/10³m³

- P_o = Precio del petróleo, \$/gal
 PF = Capital invertido en la Planta \$ millones
 Q = Producción de calor promedio anual esperada, millones de 10^6 Kcal/año
 q = Flujo de calor a través de aislamiento, Kcal/h- m^2 , Kcal/h-m-lin.
 q_c = Flujo de calor por convección desde la superficie exterior del aislamiento, Kcal/h- m^2 , Kcal/h-m-lin.
 q_r = Flujo de calor por radiación desde la superficie exterior del aislamiento, Kcal/h- m^2 , Kcal/h-m-lin.
 R = Razón de precios de venta unitarios del material
 R_s = Resistencia térmica de superficie exterior, $m^2h^\circ C/Kcal$
 $R_{1,2}$ = Radio exterior del tubo y del aislamiento, m
 $r_{1,2}$ = Radio exterior del tubo y del aislamiento, cm.
 T_a = Temperatura ambiente, $^\circ C$
 T_p = Temperatura del proceso térmico, $^\circ C$
 T_{s1} = Temperatura de superficie exterior del sistema a ser aislado. $^\circ C$
 T_{s2} = Temperatura de superficie exterior del sistema de aislamiento aplicado, $^\circ C$
 U_s = Pérdida de calor por m^2 de superficie aislada, Kcal/ m^2h
 U_p = Pérdida de calor por m-lin de tubo aislado, Kcal/h-m-lin
 W, w = Espesor de aislamiento, m, cm
 W_f = Consumo de combustible, Kg/KWH

- W_o = Peso específico del petróleo, Kg/gal
- WP = Productividad de un trabajador, h-hom/m-lin, h-hom/m²
- Z_s = Factor usado en la determinación de espesores óptimos de aislamiento en superficies planas
- Z_p = Factor usado en la determinación de espesores óptimos de aislamiento en superficies cilíndricas (tubos)

I N T R O D U C C I O N

Históricamente los combustibles tradicionales usados como fuentes de energía, han sido el factor más predominante en el desarrollo industrial alcanzado actualmente; sin embargo, el uso de los mismos no ha sido controlado adecuadamente, lo cual se ha reflejado en un derroche de energía.

En este período de carencia de fuentes energéticas y constante elevación del costo de los combustibles, el aislamiento térmico es probablemente la solución más adecuada para la conservación de este costoso producto. Esto ha generalizado su uso y se lo ha dirigido a las áreas de protección de personal, control de temperaturas en procesos térmicos y la conservación de energía.

El uso de cantidades nominales de aislamiento determinadas mediante un análisis de costos iniciales como criterio primario para gastos de capital, no puede ser una razón mayormente aceptable en ésta era de elevado costo de energía ; consecuentemente el costo de ciclo de vida deberá ser el criterio predominante en el diseño de sistemas de aislamiento, especialmente en áreas de conservación de energía.

Esto nos permitirá diseñar sistemas adecuados y lograr un gran porcentaje de ahorro de energía en relación con los diseños anticuados, lo cual no es solamente un factor significativo en construcción de nuevas plantas, sino que a la vez nos proporciona la justificación financiera para reajustar las cantidades de aislamiento en instalaciones existentes.

En esta tesis se presenta un estudio sobre conservación de energía el mismo que está dirigido a la determinación adecuada de espesores de aislamiento mediante un análisis de optimización basado en costos de ciclo de vida mínimos; ya que hemos considerado que la conservación de energía a través del uso de espesores óptimos de aislamiento proporcionará grandes beneficios para la industria e igualmente beneficios potenciales para el país; además, un beneficio social de gran importancia es la reducción de la contaminación del medio ambiente ya que necesariamente decrecería el uso de combustibles.

CAPITULO I

AISLAMIENTO TERMICO

1.1 GENERALIDADES

Los aislantes térmicos son aquellos materiales o combinación de materiales que cuando son aplicados convenientemente retardan el flujo de calor manifestado por los modos de transferencia conductiva, convectiva y radiativa. Tales materiales pueden ser caracterizados por sus diferentes constituciones físicas, las mismas que presentan estructuras en forma de fibras, partículas, hojas o películas, bloque o monolito, celda abierta o cerrada, o alguna combinación de ellas.

Considerando la retardación de flujo de calor como una característica principal de los aislantes térmicos, éstos pueden servir para una o más de las siguientes funciones térmicas:

- 1.- Conservación de energía por reducción de la pérdida o ganancia de calor en tuberías, ductos, recipientes,

equipo y estructuras.

- 2.- Control de temperaturas de superficies de equipos y estructuras para protección de personal y confort.
- 3.- Facilitar el control de temperatura de un proceso químico, una pieza de equipo, o una estructura.
- 4.- Prevenir la condensación del vapor en superficies que tienen una temperatura inferior a la temperatura del punto de rocío de la atmósfera que los rodea.
- 5.- Reducir fluctuaciones de temperatura dentro de un recinto cuando el calentamiento o enfriamiento no son necesarios.

El aislamiento térmico es usado para controlar el flujo de calor en rangos de temperaturas que van desde cero absoluto a 1600 °C y superiores, siendo un factor importante las temperaturas del proceso para la selección del material aislante; aunque, según la aplicación de que se trate, cualquiera de las funciones térmicas mencionadas anteriormente pueden decidir la elección del aislante.

1.1.1 Materiales Básicos

Los aislamientos térmicos normalmente consisten de los siguientes materiales básicos y compuestos derivados de tales materiales:

1. Fibras minerales o materiales celulares tales como: vidrio, asbestos, lana mineral, silicato de calcio, perlita depositada, y productos de tipo cerámica.
2. Materiales de fibras orgánicas tales como: algodón, pelo animal, madera, fibras sintéticas o materiales celulares orgánicos tales como: corcho, corcho esumado, poliestireno y poliuretano.
3. Membranas reflectivas orgánicas metálicas o metalizadas.

1.1.2 Formas Físicas del Aislamiento

Las formas físicas del aislamiento térmico pueden definirse y describirse como a continuación se indica*:

* Ref.(2), Pág. 49-53

Secciones de tubo rígido.- Son trozos cilíndricos pre-fabricados cuya superficie interior se adapta al diámetro exterior de los tubos que se van a aislar; se proveen divididos o partidos en dos mitades a lo largo de toda su longitud para facilitar su montaje sobre la tubería. Los propios trozos pueden ir cubiertos de un material tal como la lona o la tela de cañamazo.

Placas rígidas.- Son placas rectangulares, redondeadas o planas, que pueden cubrirse con varios materiales, y constituye una de las formas conocidas por "revestimientos achaflanados".

Relleno suelto.- Son materiales aislantes que se envasan o vierten dentro de un recipiente rígido.

Trozos de tubo flexible y los acolchados.- Los materiales aislantes cubiertos por esta definición se suministran en una forma rectangular lo suficiente flexible para poderlos aplicar a superficies curvadas o irregulares. (Los trozos de tubo flexible son, en efecto, solo pequeños acolchados).

Banda Flexible.- Normalmente este material es de

naturaleza fibrosa, y se provee en una forma que permite su enrollado sobre una tubería al igual que una especie de vendaje.

Plásticos.- Son los materiales que pueden aplicarse en un estado plástico por mediación de una paleta, moldearse o proyectarse a pistola en la forma requerida. La característica del aislamiento plástico es que fragua o endurece en una forma rígida.

Lámina.- Los materiales tipo lámina son chapas finas, normalmente de aluminio, que pueden aplicarse en forma ondulada o arrugada.

1.1.3 Estructura de los materiales Aislantes

La estructura o la naturaleza de los materiales aislantes térmicos puede clasificarse en los siguientes cinco grupos*:

Granular.- Este grupo incluyen todos los tipos de materiales en polvo, además de aquellos de naturaleza puramente granular. Los gránulos pueden estar o no unidos entre sí con resina, pero quedan

* Ref. (2), Pág. 49-53

bolsas de aire ocluidas entre ellos. La traslación de aire a través de estos materiales es lenta a causa de la distribución desigual de los gránulos; por esta razón, la transmisión térmica por convección es lenta.

Fibrosa.- Entre este grupo de materiales, las películas de aire alrededor de las fibras individuales resisten la transmisión térmica por conducción, mientras que una elevada densidad de compresión reduce el número y el tamaño de los canales de aire libre entre las fibras, de esta forma se minimiza la transmisión térmica por convección. No debería incrementarse la densidad de compresión hasta tal grado que la disminución del flujo térmico por convección resulte más que neutralizado por el incremento del flujo por conducción a través de las fibras.

Celular.- En estas formas de estructuras hay encerradas células de aire o gas entre paredes interconectadas sólidas, a través de las cuales fluye el calor por conducción. Las células deben ser pequeñas, con la intención de que quede minimizado el flujo térmico por convección.

Reflectante.- Los materiales de estructura reflectante reflejan una elevada proporción de calor radiante, a consecuencia de su bajo poder de absorción.

Mixta.- Los materiales que componen este grupo pueden ser fabricados por una mezcla de dos o más materiales aislantes básicos de cualquiera de los cuatro grupos precedentes.

1.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES AISLANTES

Dependiente de los requerimientos de diseño, la selección de un aislamiento térmico particular puede girar alrededor de una característica secundaria antes que su propiedad primaria de baja conductividad térmica. Las características tales como resiliencia o rigidez, absorción de energía acústica, permeabilidad del vapor de agua, peligro al fuego y resistencia al fuego, facilidad de aplicación, costo aplicado, u otros parámetros pueden influenciar la selección entre algunos materiales que tienen aproximadamente iguales valores de rendimiento térmico.

1.2.1 Propiedades Térmicas

La habilidad de un material para retardar el flujo de calor es dado por su conductividad térmica o valor de conductancia (o, alta resistividad o valor de resistencia); por lo tanto, distinguirá al aislante térmico.

Otras propiedades térmicas que pueden ser importantes incluyen el calor específico, capacidad calorífica, difusividad térmica, el coeficiente de expansión térmica, y resistencia a la temperatura. La capacidad calorífica es tomada como el producto del calor específico y su densidad. La difusividad térmica llega a ser importante para aquellas aplicaciones donde la temperatura varía con el tiempo, ya que la razón de cambio de la temperatura dentro de un aislante es inversamente proporcional a su difusividad térmica para un espesor dado.

1.2.2 Propiedades Mecánicas

Algunos aislamientos tienen suficiente resistencia estructural para usos como materiales de so-

porte de carga. Ellos pueden en ocasiones sostener pisos que soportan cargas, forman porciones que se sostienen así mismo, o paneles estructurales rígidos. Para tales aplicaciones, una o más de las varias propiedades mecánicas de un aislamiento incluyen la resistencia a la compresión, tensión, corte, impacto, y flexión, como las más importantes. Estas propiedades mecánicas varían con la composición básica, densidad, tamaño de la celda, diámetro y orientación de la fibra, y la temperatura a la cual es medida.

1.2.3 Propiedades Relacionadas a la Humedad

La presencia de agua o hielo en el aislamiento dañaría o destruiría su valor aislante; puede causar el deterioro del aislamiento; y puede eventualmente causar daño estructural por pudrimiento, corrosión, o la acción de la expansión del agua congelada. En todo caso la humedad acumulada dentro del aislamiento depende de las temperaturas de operación y condiciones del medio ambiente, y de la efectividad de las barreras de vapor de agua.

La resistencia a la humedad depende del material básico del

que está hecho el aislamiento y del tipo de estructura física. La mayor parte de los aislamientos son higroscópicos y ganarían o perderán humedad en proporción a la humedad relativa del aire en contacto con el aislamiento. Los aislamientos fibrosos y granulares permiten la transmisión de vapor de agua al lado frío de la estructura; por lo tanto, una barrera de vapor podría ser usada en conjunción con estos materiales cuando la transmisión de humedad es un factor importante. Ciertos aislamientos que tienen una estructura celular cerrada son relativamente impermeables al agua y al vapor de agua.

En resumen, podemos decir que, la variedad de propiedades que expresan la influencia de humedad son las siguientes: absorción (capilaridad), adsorción (higroscopicidad), y la razón de transmisión de vapor de agua.

1.2.4 Otras propiedades

Algunas otras propiedades de los aislamientos térmicos que se consideran importantes son las relacionadas a la salubridad y seguridad de los

TABLA 1.1

PROPIEDADES DE ALGUNOS MATERIALES AISLANTES TERMICOS

Forma Física	Máxima temperatura admisible en el lado caliente (°C)	Composición o nombre corriente	Peso específico aproximado en la forma aplicada (Kg/m ³)	Intervalo de conductividad térmica a la temperatura media que se indica en °C. (Kcal-cm/m ² -h-°C)	Resistencia a			
					Inflamabilidad	Absorción	Deterioro mecánico	
R I G I D A	Placas y trozos de tubo	315-343	Magnecia 85% y amianto	192-216	5.00 - 5.20 a 38 6.40 - 6.80 a 205	B	M	R
		343	Papel de amianto ondulado inter-revestido con lámina de Al.	64	5.00 a 38 7.60 a 205	B	M	R
		427	Vidrio celular	128-160	6.80 a 150	B	E	B
		538	Amianto	136-192	3.80 - 4.50 a 38 6.30 - 7.10 a 260	B	M	B
	Placas	538	Vermiculita y cemento	464	14.3 a 93 18.7 a 315	B	B	B
		538-1010	Diatomita y Amianto	240-720	5.10-9.20 a 38 6.30-9.70 a 260 8.70-15.6 a 425	B	M	R/B-B
	Placas y trozos de tubo	675-925	Silicato de calcio y amianto	176	5.10 a 38 6.70 a 260	B	M	B

(E = Excelente; B = Bueno; M = Malo)

TABLA 1.1
(Continuación)*

Forma Física	Máxima Temperatura admisible en el lado caliente (°C)	Composición o nombre corriente	Peso Específico aproximado en la forma aplicada (Kg/m³)	Intervalo de conductividad térmica a la temperatura media que se indica en °C. (Kcal-cm/m²-h-°C)		Resistencia a			
						Inflamabilidad	Absorción	Deterioro mecánico	
R I G I D A	Placas	925	Vermiculita diatomita amianto	288-320	7.30 a 9.30	38 a 260	B	M	R/B-B
	Placas y trozos de tubo	204-260	Lana de vidrio (impregnada con resina)	68-160	3.00-3.20	38 a 149	B	M	R
		232	Lana mineral (no impregnada con resina)	40-160	3.20-3.50	38 a 93	B	M	R
		288	Lana de escorias (impregnada y no impregnada con resina)	160-256	3.10-3.80	38 a 149	B	M	M
		815	Lana de escorias	256-320	6.60	260	B	M	M
RELLENO SUELTO	104-271	Roca asfáltica	640	5.60-7.40	105 a 271	B	B	B	
	482-538	Lana de vidrio	48-144	3.00-3.10	38 a 149	B	M	M	

* Ref. (2)

TABLA 1.1
(Continuación)*

Forma Física	Máxima Temperatura admisible en el lado caliente (°C)	Composición o nombre corriente	Peso específico aproximado en la forma aplicada (Kg/m ³)	Intervalo de conductividad térmica a la temperatura media que se indica en °C (Kcal-cm/m ² -h- °C)	Resistencia a			
					Inflamabilidad	Absorción	Deterioro mecánico	
BANDA FLEXIBLE	Banda	260-538	Lana de vidrio	128-144	3.00-5.10 a 38	B	M	M
	Cuerda	343-510	Amianto		10.0-15.4 a 38 13.3-19.5 a 205	B	M	B
PLASTICA		329-343	Magnecia y amianto (85% Magnesia)	176-200	5.00-5.10 a 38	B	M	R/B
		454	Amianto (aplicado a pistola)	96-240	4.20 a 38 7.40 a 260	B	M	B
		538	Amianto	352	6.20 a 38 8.40 a 260	B	M	R
		538-1010	Diatomita y amianto	216-480	5.00-9.10 a 38	B	M	R/B
		815	Lana mineral y cemento	448	7.80 a 38 9.70 a 260	B	B	B
		982-1010	Vermiculita y cemento	256-913	8.80-12.0 a 38 10.4-15.1 a 205 16.1 a 427	B	B	B
	LAMINA		538	Lámina de aluminio	3-12	2.60-3.60 a 10 7.4 a 260	B	B

* Ref (2)

TABLA 1.1
(Continuación)*

Forma Física	Máxima temperatura admisible en el lado caliente (°C)	Composición o nombre corriente	Peso específico aproximado en la forma aplicada (Kg/m ³)	Intervalo de conductividad térmica a la temperatura media que se indica en °C (Kcal-cm/m ² -h-°C)		Resistencia a			
						Inflamabilidad	Absorción	Deterioro mecánico	
SUELTO	760	Lana mineral	80	2.60	a 0	B	M	M	
				3.20	a 38				
				4.20	a 149				
				5.30	a 232				
	650-815	Lana de escorias	160-192	3.10-3.30	a 38	B	M	M	
				5.50-6.60	a 260				
RELLENO	875	Perlita expandida	48	3.30	a 38	B	R	M	
				5.60	a 149				
				8.10	a 260				
	1050	Diatomita	320-560	6.80	a 38	B	M	M	
				8.80	a 205				
				11.8	a 427				
	1100	Vermiculita	48-152	4.70-6.10	a 38	B	M	M	
				6.90	a 260				
FLEXIBLE	Acolchados	400-538	Amianto	160-276	4.60-4.70	a 38	B	M	B
					6.60-7.60	a 205			
					3.00-3.60	a 38			
		482-538	Lana de vidrio	96-144	5.60-6.40	a 205	B	M	R
	Acolchados y trozos de tubo	538-595	Lana de escorias	160-192	3.10	a 38	B	M	R
					5.20-5.60	a 205			
BANDA		760	Lana mineral	112-144	3.10	a 38	B	M	R
					6.30	a 205			

* Ref. (2)

mismos. Tales propiedades incluyen las siguientes: incapacidad de soportar bichos o insectos; bajo nivel de peligro al fuego; bajo nivel de polvo o vapores molestosos; bajo nivel de partículas libres que pueden producir irritación de la cara, ojos, pulmones; resistencia al deterioro o putrefacción.

Además, existen otras propiedades que pueden ser de importancia, dependiendo de la aplicación particular. Estas propiedades son las siguientes: densidad, elasticidad, resistencia a la sedimentación, valor de salvamento, facilidad de manejo, uniformidad dimensional y estabilidad, resistencia a la acción química y cambio químico; facilidad en la fabricación, aplicación y acabado; tamaño y espesor obtenible, absorción del sonido, y permeabilidad del aire.

En la Tabla 1.1 se indican las principales propiedades de los materiales aislantes más comunes.

1.3 FACTORES QUE AFECTAN A LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica de los materiales aislantes va-

ría con su forma física y estructura, y con las condiciones del medio ambiente y aplicaciones para las cuales son requeridas. La forma física y estructura varían con el material básico y el proceso de manufactura; tales variaciones incluyen la densidad, tamaño de celda, diámetro y arreglo de las fibras o partículas, transparencia a la radiación térmica, y el tipo y presión del gas dentro del aislante. Con respecto a las condiciones del medio ambiente y aplicaciones, la conductividad térmica puede ser afectada por la temperatura, el contenido de humedad, la orientación del aislamiento, y la dirección del flujo de calor.

1.3.1 Forma Física y Estructura

La conductividad térmica de un aislamiento varía con la densidad del mismo. Un cambio de densidad debida a varios grados de compacticidad de aislamientos pulverizados afecta la conductividad térmica. Los cementos aislantes hechos de agregados livianos pueden fabricarse en un rango amplio de densidades.

Para aislamientos fibrosos, un valor mínimo de conductividad térmica se obtiene cuando las fi-

bras son espaciadas uniformemente y están perpendiculares a la dirección del flujo de calor. En general, un decrecimiento del diámetro de las fibras disminuye la conductividad térmica para una misma densidad.

Para aislamiento celular, una combinación específica del tamaño de la celda y la densidad producirá una conductividad térmica óptima.

La conductividad térmica aumenta lentamente con el tiempo a medida que penetra aire u otro gas dentro de las celdas, diluyendo el gas que está dentro del aislamiento. La razón de difusión del aire y el incremento subsecuente en la conductividad es dependiente de factores tales como temperatura del medio ambiente, geometría del aislamiento (espesores), y protección superficial.

La transparencia a la radiación de un aislamiento térmico llega a ser importante cuando las temperaturas y diferencias de temperatura aumenten.

1.3.2 Condiciones del medio ambiente y aplicaciones

La conductividad térmica de los materiales aislantes

tes generalmente aumenta con la temperatura; sin embargo, particularmente la razón de cambio en la conductividad térmica con la temperatura varía con el tipo de material y su densidad.

Aquellos materiales que permiten un gran porcentaje de transferencia de calor por radiación, tales como un material fibroso de baja densidad, muestran el mayor cambio en la conductividad térmica con el cambio de temperatura y cambio de emisividad de las superficies circundantes.

El efecto de la temperatura sobre la integridad estructural ordinariamente no es muy importante para la mayor parte de aislamiento en el campo de bajas temperaturas; sin embargo, hay más limitaciones definidas para materiales aislantes en el campo de altas temperaturas donde la descomposición, la excesiva contracción lineal, el reblandecimiento, o algunos otros efectos de temperatura, pondrían un límite máximo en la temperatura para la cual un material es apropiado.

Puesto que la conductividad del agua es mayor que la del aire, su presencia en sistemas de aisla -

miento tiene un marcado efecto destructivo sobre la eficiencia del aislamiento. Una seria condición de humedad aparece cuando la temperatura de una parte del aislamiento está por debajo del punto de rocío del aire circundante condensando el vapor de agua del aire en el aislamiento. El efecto de la humedad sobre la conductividad térmica del aislamiento no es demasiado serio mientras la humedad exista en la fase de vapor; sin embargo, la conductividad es grandemente incrementada por la presencia de humedad condensada. A bajas temperaturas la humedad puede condensarse ya que ésta tiende a emigrar hacia las superficies frías (presión de vapor baja).

Los factores relacionados a la instalación o cambios dimensionales que afectan a la conductividad térmica del aislamiento incluyen: vibración, temperaturas extremas, y varias fuerzas mecánicas.

1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES SEGÚN LA TEMPERATURA.

Es imposible separar los materiales aislantes térmicos en clases bien delimitadas, pero, un estudio basado en

los usos según la temperatura, nos permite agruparlos dentro de ciertos intervalos de temperatura. Así, los materiales usados para aislamiento de superficies calientes pueden ser clasificados en tres grupos cuyos rangos de temperatura son: de 10 ° a 149 °C, de 149 ° a 316 °C y superiores a 316 °C (6).

1.4.1 Temperaturas comprendidas entre 10 ° y 149 °C

El aislamiento de equipo industrial a temperaturas superiores a los 10 °C utiliza gran número de materiales y comprende muchas aplicaciones. El aislamiento de tanques, destiladores, estufas, tuberías, calentadores de agua y tuberías de agua caliente, equipo de vapor a baja presión y muchas otras aplicaciones, está comprendido entre 10 ° y 149 °C. Los materiales aislantes más usados son descritos a continuación.

La LANA MINERAL en forma de mantas, reforzadas con papel de asbesto, tela metálica, metal desplegado u otro material, se emplea en tanques, torres, estufas, secadores y otros aparatos calentados. Las tuberías calientes se aíslan con lana mineral en forma de secciones o mantas de

tamaño apropiado para enrollarlas sobre la tubería.

Las láminas y los bloques de PAPEL DE ASBESTO CORRUGADO, que por lo general se hacen con capas alternadas de papel corrugado y papel liso, se emplean mucho para calentadores de agua, estufas, y otros aparatos a temperaturas hasta 150 °C. En forma de secciones para aislamiento de tuberías, este material se usa para aislar las tuberías de agua caliente, las de vapor a baja presión y las de los procesos químicos dentro del límite de temperatura.

EL CARTON DE ASBESTO, compuesto de fibras de asbesto con un relleno y un aglomerante, se usa a menudo cuando está indicado un producto en forma de cartón. Su valor como aislante suele estar subordinado a su uso como material ignífugo de revestimiento.

Los CEMENTOS AISLAN TES, compuestos de partículas finas de asbesto, lana mineral, vermiculita o magnesia de 85% con aglomerantes apropiados, se usan cuando se requiere un aislamiento que puede

mãnejarse con facilidad, ya que, se suministran secos para mezclarlos con agua en el lugar de aplicaci3n. La conductividad t3rmica de un cemento aislante suele ser mayor que la de un producto preformado de composici3n semejante. Las propiedades f3sicas de los cementos aislantes var3an seg3n la t3cnica empleada para mezclarlos y aplicarlos.

El FIELTRO DE LANA se usa para aislar tuber3as de agua caliente y agua fr3a. Su l3mite de temperatura es de unos 93 °C.

El FIELTRO DE PELO se suministra en forma de mantas de aislamiento para tuber3as de agua caliente y otras aplicaciones a menos de 93 °C.

1.4.2 Temperaturas comprendidas entre 149 ° y 315 °C

La MAGNESIA de 85%, compuesta de 85% de carbonato b3sico de magnesio y 15% de fibra de asbesto, es el aislamiento m3s empleado para temperaturas hasta 315 °C. Se hace en bloques de diversos tama3os, en forma de secciones para tuber3as, de segmentos para tuber3as de gran di3metro y en formas

especiales. Se usa para aislar calderas, tuberías de vapor, destiladores y otras aplicaciones innumerables a temperaturas inferiores a 315 °C. Para aislar contra temperaturas superiores, se emplea la magnesia de 85% como capa exterior sobre capas de un aislamiento menos eficiente, pero que resiste temperaturas más altas. Con este aislamiento de varias capas se consigue una eficiencia mayor con menos costo.

Las MANTAS DE ASBESTO, que consisten en fibras de asbesto colocadas entre piezas de tela de asbesto, se usan cuando es necesario quitar y volver a poner el aislamiento. La temperatura límite de estas mantas depende del tipo y tela de asbesto empleada.

Las MANTAS DE LANA MINERAL, se hacen con escorias, rocas o vidrios o con mezclas de estos ingredientes fundidos, que por soplado, estirado u otros procedimientos de fabricación se convierten en fibras finas. El aislamiento para tuberías se comercializa en secciones preformadas o en forma de mantas apropiadas para envolver la tubería. Su uso está restringido a unos 540 °C.

El PAPEL DE ASBESTO doblado y en forma de bloques, láminas y aislamiento para tuberías, es un material laminar esponjoso que se usa en las aplicaciones de vapor a presiones moderadas. Su temperatura es de unos 370 °C. En virtud de su robusta construcción, es especialmente útil si conviene quitar de cuando en cuando el aislamiento para volverlo a aplicar o si hay mucha vibración. Su forma laminar proporciona un alto grado de eficiencia térmica.

El ASBESTO AFIELTRADO se suministra en forma de manta suave y flexible para envolver con ella tuberías o para su aplicación a superficies irregulares.

1.4.3 Temperaturas Superiores a 315 °C

La DIATOMITA, aglomerada con materiales apropiados y moldeada en forma de bloque y de aislamiento para tuberías, se usa a temperaturas comprendidas entre 315 ° y 1035 °C, en hornos, calderas de alta presión, tuberías de vapor de alta presión, hornos metalúrgicos, regeneradores, calcinadores, conductos de humo y chimeneas. Este aislamiento se emplea a menudo cubierto con una capa de mag-

nesia de 85%.

El SILICATO DE CALCIO, que es un aislamiento compuesto principalmente del producto de la reacción entre la cal y la sílice, suele mezclarse con fibra de asbesto. La sílice suele ser arena o diatimita molidas. En forma de bloques o de aislamiento para tuberías, este material se ofrece para usarlo a temperaturas hasta 650 °C en calderas de alta presión, hornos, tuberías de alta presión y otro equipo semejante que trabaje a temperaturas inferiores a la citada.

Las MANTAS DE ASBESTO, descritas anteriormente, se usan en turbinas, juntas de pestaña, casquetes de válvulas, etc., donde es necesaria la accesibilidad a las cabezas de los pernos. Según la tela de asbesto empleada para encerrar la fibra de asbesto, el límite de temperatura varía hasta unos 455 °C.

El ASBESTO AMOSITA con un aglomerante inorgánico, en forma de secciones para tuberías y de bloques, se usa como aislamiento de aplicación general a temperaturas hasta 650 °C.

CAPITULO II

CONSIDERACIONES BÁSICAS DEL PROYECTO

2.1 SISTEMAS DE AISLAMIENTO EN UNA CENTRAL TERMICA DE VAPOR

En una central térmica a vapor podemos observar algunos componentes de la misma que deben ser aislados adecuadamente para evitar pérdidas de energía a través de sus superficies exteriores, ya que una de las funciones principales de la central térmica a vapor es aprovechar la máxima cantidad de energía del vapor producido en el caldero, con el fin de obtener la máxima eficiencia de la planta. Entre los principales componentes que deben ser aislados encontramos toda la tubería utilizada para transportar el vapor generado; accesorios de tuberías, tales como válvulas, reductores, codos, tees, etc., recipientes o depósitos; depósitos de almacenaje, y equipos en general.

Las pérdidas térmicas de cada componente dependerán en parte de la forma de su superficie exterior, por lo tanto, podemos considerar básicamente tres tipos de

sistemas de aislamiento aplicables a tales componentes:

- 1.- Sistemas de aislamiento de superficies cilíndricas; utilizados principalmente para el aislamiento simple o compuesto de tuberías de hasta 90 cm. de diámetro.
- 2.- Sistemas de aislamiento de superficies planas; utilizados para el aislamiento de recipientes o depósitos.
- 3.- Sistemas de aislamiento de superficies irregulares; utilizados para el aislamiento de equipos y accesorios de tuberías tales como bridas, válvulas, codos, montajes, tees, etc.

Aislamiento de Tuberías

Los sistemas de aislamiento térmico de tuberías estarán basados en los materiales aislantes que se comercializan y su diseño dependerá de las propiedades del material y de la aplicación que se le dé al sistema. Los materiales más comunes usados para aislar tuberías presentan formas físicas de secciones o trozos rígidos, plástica y trozos y bandas flexibles.

específico para su manipulación y aplicación, por lo tanto, se debe seguir los procedimientos recomendados por los fabricantes. De manera general, para lograr un buen aislamiento es importante tomar en cuenta las siguientes precauciones.

- 1.- Evitar todas las separaciones innecesarias, ésto es importante en el caso de la aplicación del aislamiento en forma de trozos sobre una tubería fría. Los trozos de aislamiento deben estar bien unidos entre sí y en donde sea posible deben llenarse todos los espacios vacíos con aislamiento plástico o bien con una pasta preparada con recortes de aislamiento y agua.
- 2.- Interrumpir el aislamiento cerca de las bridas, válvulas, o cualquier accesorio de tubería, el aislamiento debe interrumpirse cerca de los accesorios que lleve la tubería y debe ser achaflanado para permitir la extracción de tornillos o facilitar el acceso a los mismos. Figs. 2.1 y 2.2.
- 3.- Prevenir la contracción y/o dilatación, aunque en el caso de aislamientos flexibles no influye la dilatación de la tubería; para aislantes rígidos y

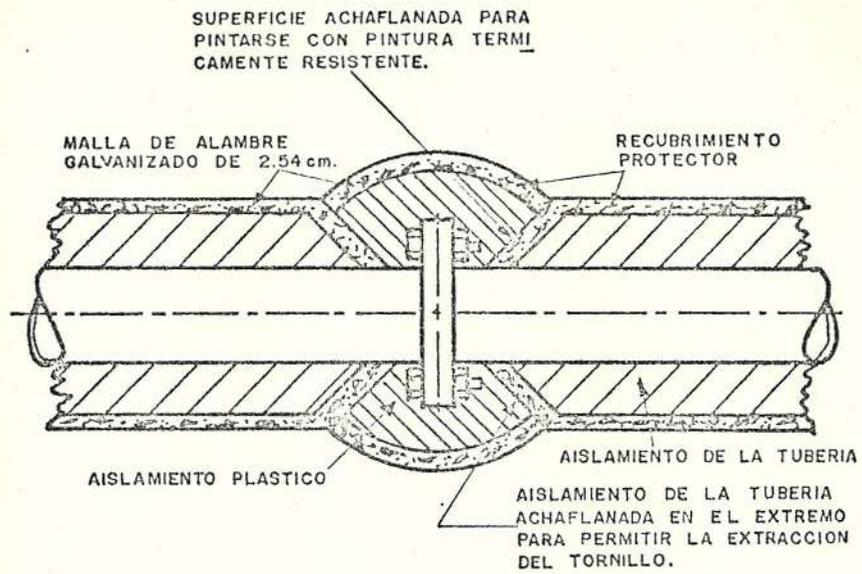


Fig. 2-1 AISLAMIENTO PLASTICO DE UNA BRIDA.
 Detalles característicos.

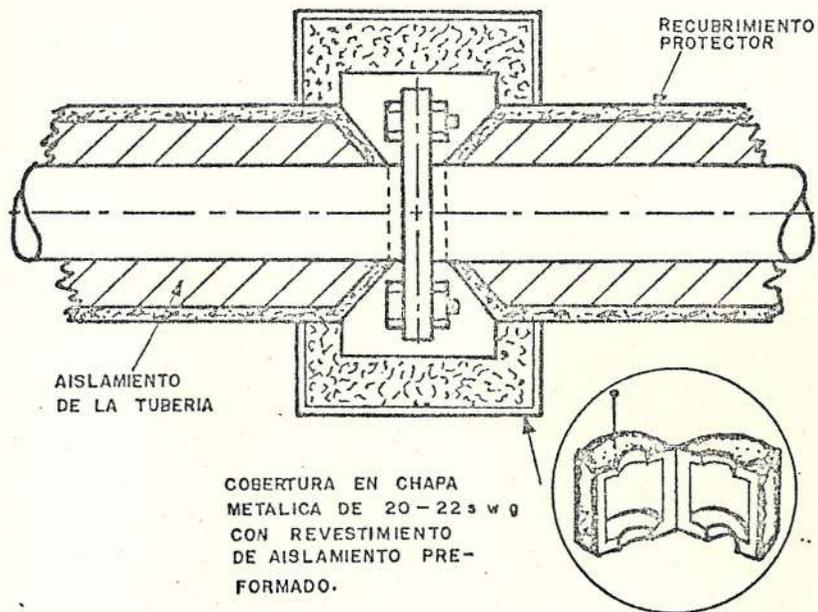


Fig. 2-2 CARACTERISTICA COBERTURA EN CHAPA METALICA DESMONTABLE PARA UNA BRIDA.

plásticos debe prevenirse tanto la dilatación como la contracción que se producirá al calentarse o enfriarse la tubería. Para prevenir este fenómeno debe dejarse un espacio de 0.63 cm. a intervalos de 365 cm. para temperaturas de funcionamiento de hasta 290 °C y a intervalos de 274 cm. para temperaturas de funcionamiento superiores a los 290 °C.

- 4.- Proteger el aislamiento terminado; es muy importante proteger los aislamientos terminados para así evitar el deterioro de los mismos, ya sea por la acción de los elementos atmosféricos o un efecto mecánico.

Aislamiento de bridas, válvulas y montajes sobre tuberías.

Bridas.- Las uniones de tuberías provistas de bridas, generalmente pueden aislarse con cajas o cavidades, con aislamiento plástico y, con un acolchado aislante.

- 1) Cajas para bridas.- Las cajas para bridas pueden conseguirse en forma de cubiertas o tapas moldeadas, las mismas que pueden hacerse con cualquier material aislante rígido, en tamaños adecuados para su adaptación a bridas estandar; se moldean partidas en dos mitades

y según el tamaño de la cubierta debe fijarse en su emplazamiento mediante una o dos bandas o ligaduras metálicas galvanizadas. Las coberturas metálicas se construyen de chapa metálica de calibre ligero (0.9 mm) partidas en dos mitades unidas mediante articulación y pasadores unión, y van revestidas con placas flexibles o rígidas. La Fig. 2.2 muestra una cobertura metálica clásica.

- 2) Aislamiento plástico para bridas.- El aislamiento plástico para bridas en forma parecida que para tuberías. El grosor del aislamiento sobre la brida debe ser igual que el de la tubería adyacente. El acabado protector debe extenderse de tal manera que forme un vierte-aguas en donde confluya con el aislamiento de la tubería. Ver Fig. 2.1.

No debe utilizarse aislamiento plástico en donde deben desconectarse las uniones con bastante frecuencia, ni tampoco debe utilizarse para cubrir las bridas cuando las tuberías van protegidas con trozos rígidos o con aislamiento flexible.

- 3) Acolchados aislantes para bridas.- Se fabrican acolchados aislantes en el tamaño adecuado para su adap-

tación a las uniones provistas de bridas. Deben acomodarse correctamente sobre la unión o junta para impedir cualquier movimiento de aire, y debe tenerse un cuidado especial para asegurarse de esto el reemplazar la cubierta después de la remoción o desmontaje. Véase la Fig. 2.3.

Válvulas y Montajes. - Las válvulas y montajes pueden aislarse con cubiertas revestidas de chapa metálica o con aislamiento plástico, o bien con acolchados flexibles.

Las cubiertas o cajas de chapa metálica se fabrican generalmente con material de 0.9 mm. Se construyen partidas en dos mitades articuladas para cobijar la válvula, y se revisten con material aislante flexible o rígido. En la Fig. 2.4 se muestra un típica caja en chapa metálica para una válvula.

Cuando se utiliza aislamiento plástico, debe aplicarse con paleta y de forma que quede separado de las piezas desmontables. Su grosor debe ser equivalente al de las tuberías adyacentes. En la Fig. 2.5 se indican los detalles clásicos del aislamiento plástico de una válvula de paso.

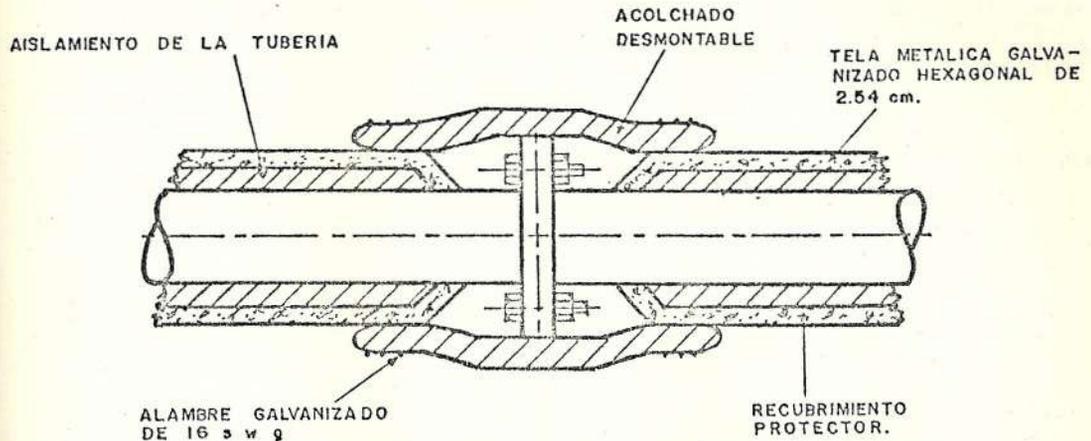


Fig. 2-3

AISLAMIENTO DE UNA BRIDA TAPADA CON UN ACOLCHADO DESMONTABLE.

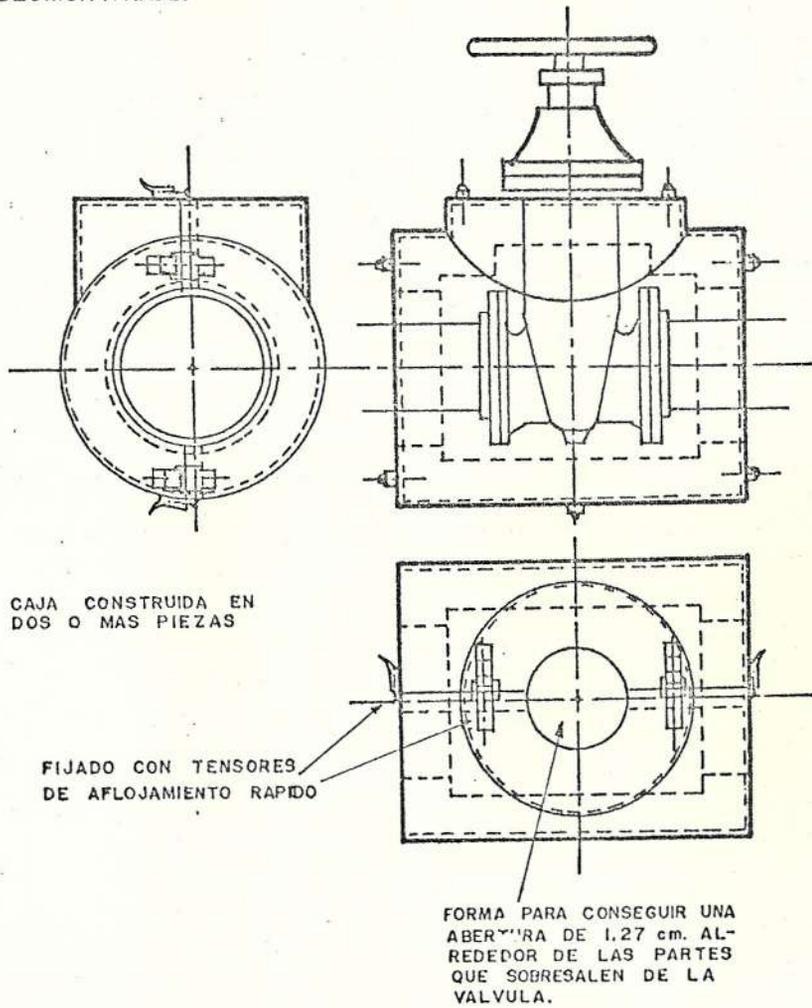


Fig. 2-4

CAJA EN CHAPA METALICA PARA UNA VALVULA.

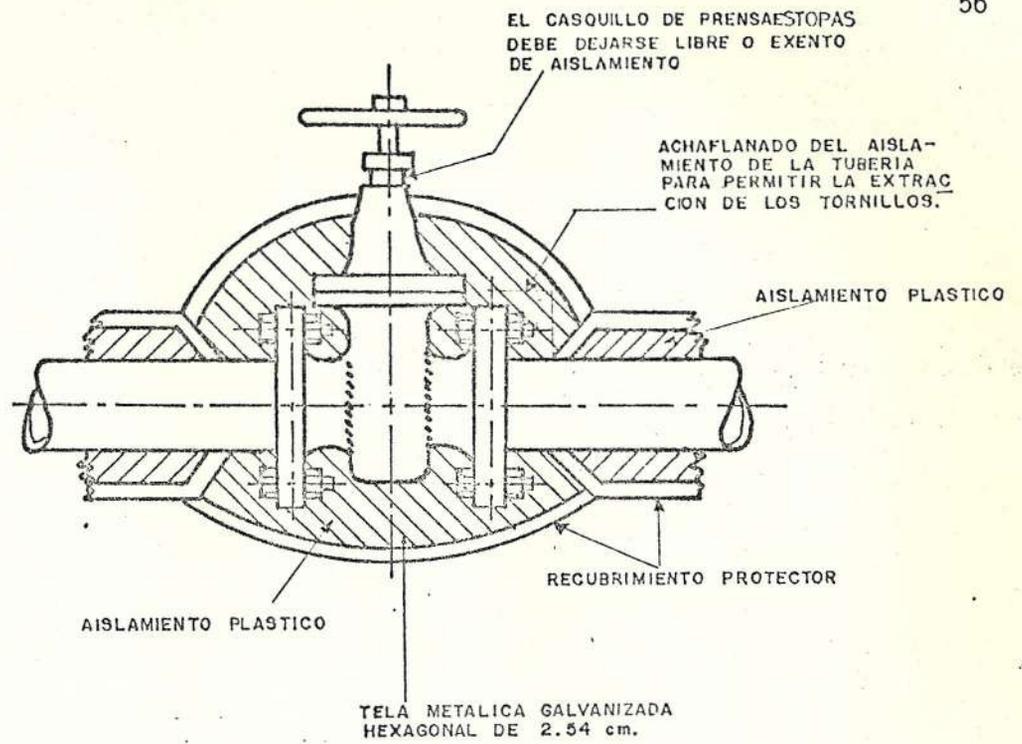


Fig. 2 - 5 AISLAMIENTO PLASTICO DE UNA VALVULA DE PASO.

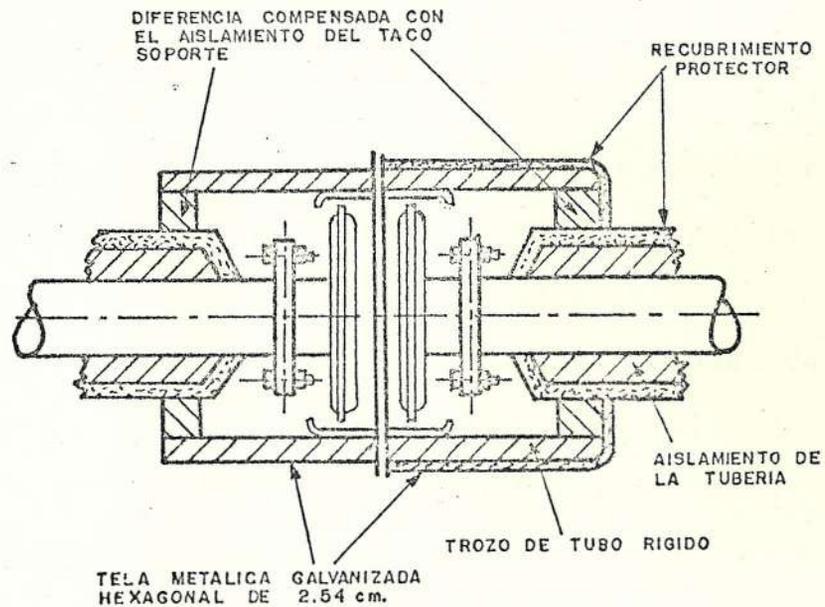


Fig. 2 - 6 APLICACION DE AISLAMIENTO RIGIDO A UNA JUNTA DE EXPANSION DE FUELLE.

Los acolchados flexibles deben colocarse con el mismo cuidado que cuando se trata de uniones provistas de brida.

También se utilizan materiales rígidos para el aislamiento de válvulas y montajes. La Fig. 2.6 indica la forma en que puede hacerse ésto. Los trozos de aislamiento rígido deben cortarse en la forma requerida para su adaptación y los huecos o espacios resultantes deben ser rellenados con aislamiento plástico, o con pasta preparada de recortes del aislamiento y agua.

La Fig. 2.7 indica otro método clásico para el aislamiento de válvulas y montajes.

Tubos Acodados y en T..- Generalmente estas partes deben aislarse con el mismo material que se utiliza para el resto de la tubería; aunque existen en el mercado trozos rígidos (moldeados). Si no se dispone de trozos moldeados para los codos, pueden cortarse segmentos de trozos rectos y preparar codos biselados para que se adapten al radio de curvatura de la tubería. Todos los

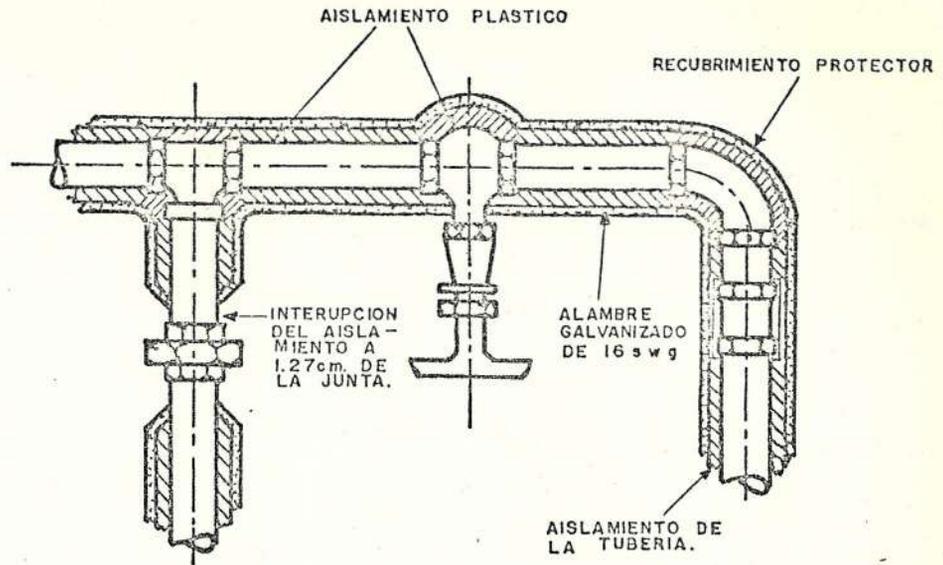


Fig. 2 - 7 AISLAMIENTO PLASTICO DE CONECTADORES Y VALVULAS ROSCADAS

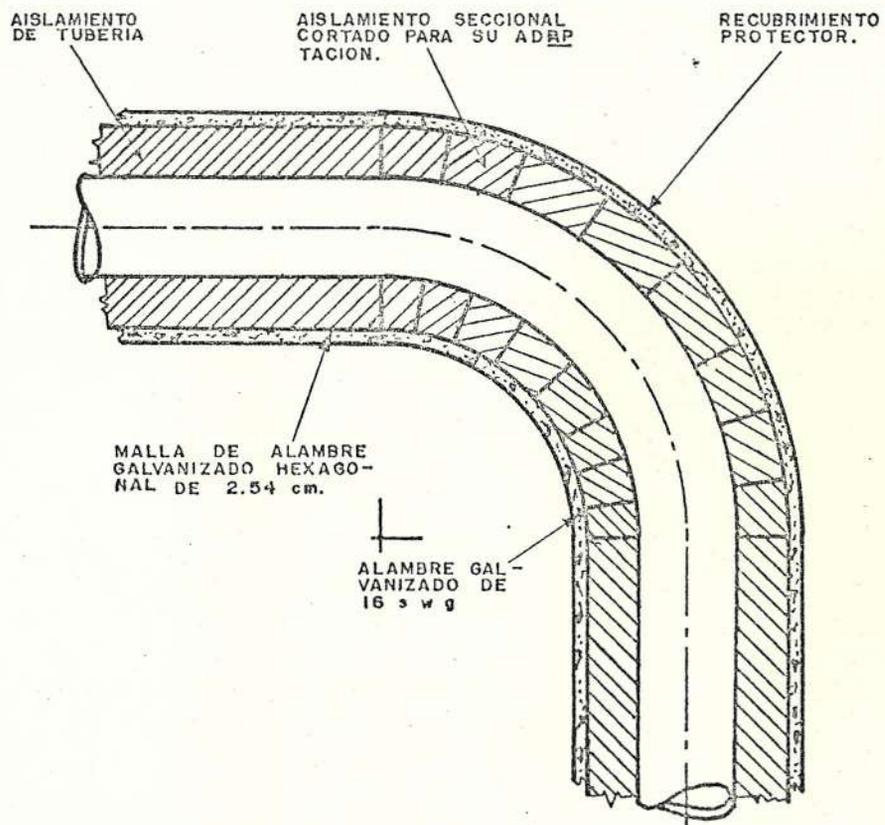


Fig. 2 - 8 AISLAMIENTO DE CODOS DE TUBERIA (empleando aislamiento seccional)

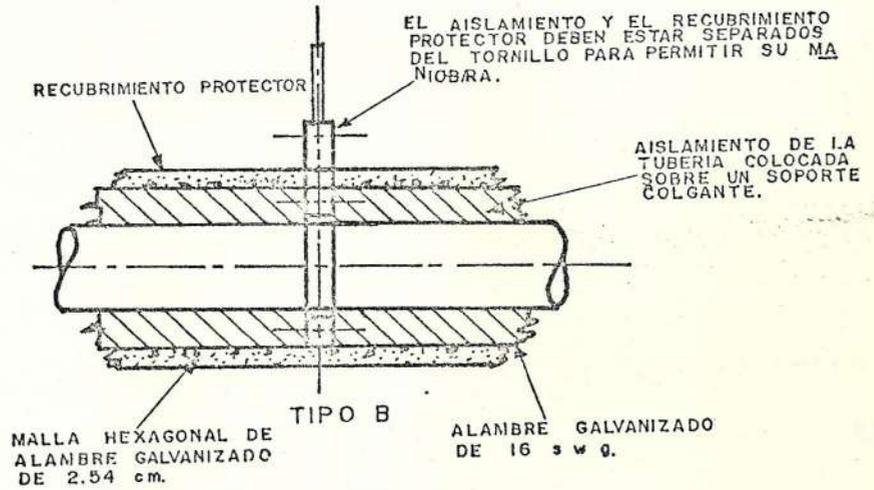
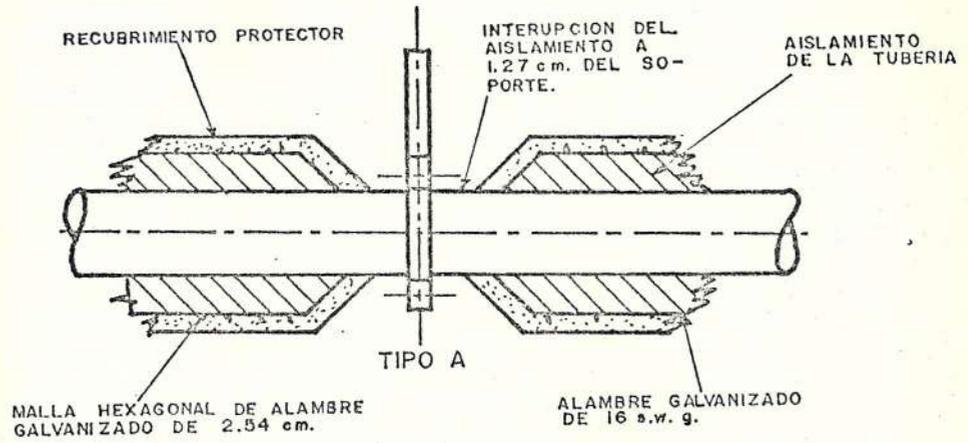


Fig. 2-9. AISLAMIENTO DE UNA TUBERIA EN LOS SOPORTES COLGANTES (distintos montajes).

espacios o huecos deben llenarse con aislamiento plástico. (Véase la Fig. 2.8).

También puede utilizarse aislamiento flexible o plástico. El aislamiento plástico puede aplicarse siguiendo el contorno del codo de la tubería en la misma forma que para una tubería recta. (Véase la Fig. 2.10).

En tuberías de pequeño diámetro es conveniente la banda flexible para el enrollado de codos y (T), en especial si el recubrimiento protector es de chapa metálica. Sin embargo, debe existir un espacio suficiente entre éstas y los tramos de tubería adyacentes para que pueda efectuarse el enrollado en una forma efectiva.

En las tuberías de grandes diámetros pueden utilizarse trozos flexibles para el aislamiento de codos y (T).

Soportes de tubería.- Los soportes de tubería deben aislarse siempre que ello sea factible. Se instalan normalmente durante el montaje del tramo de la tubería y se deben aislar con la tubería. (Véase las Figs. 2.9b y 2.11).

El recubrimiento impermeable del aislamiento del sopor-

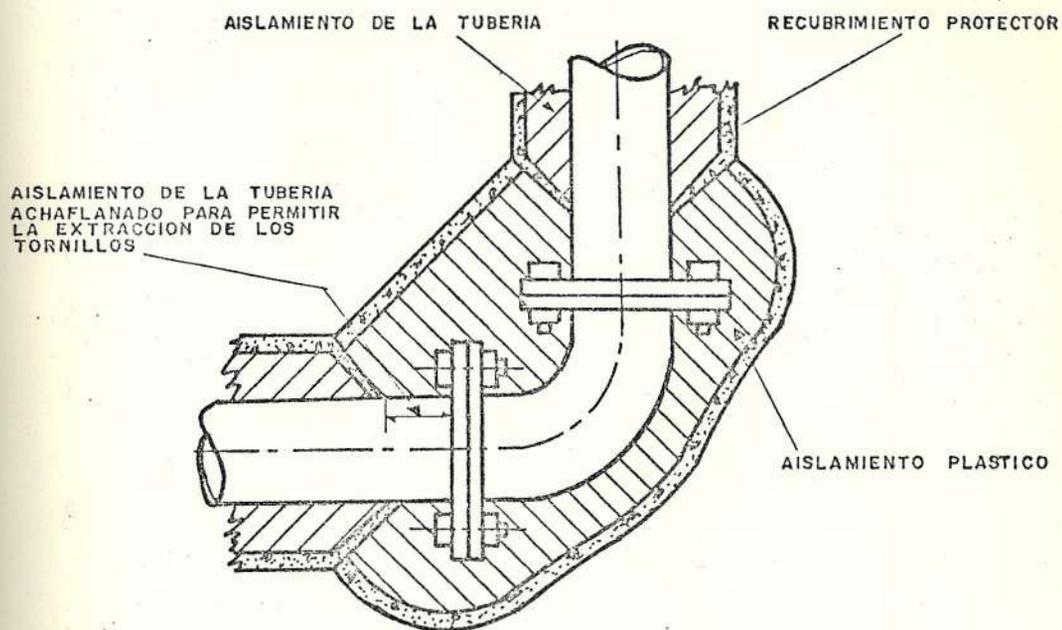


Fig. 2 - 10 AISLAMIENTO PLASTICO DE UN CODO PROVISTO DE BRIDA

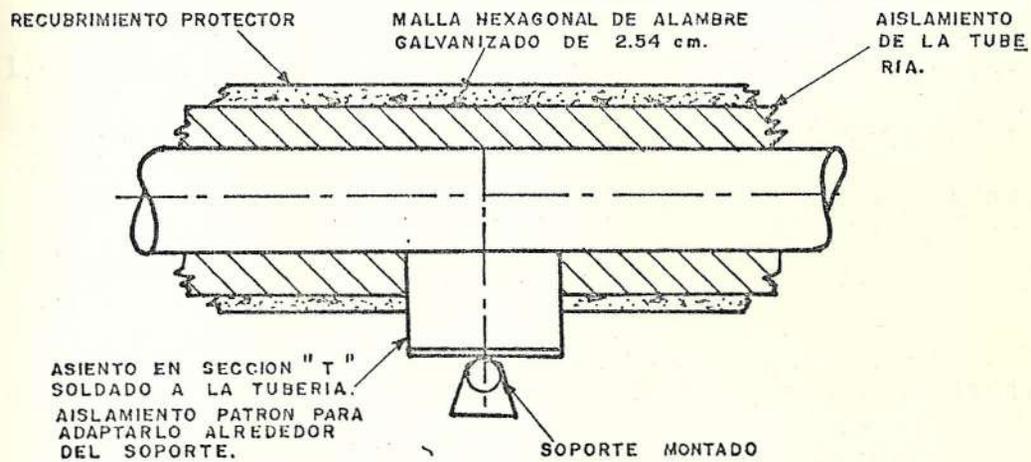


Fig. 2 - 11 AISLAMIENTO DE UNA TUBERIA EN UN SOPORTE DE ASIENTO.

te debe disponerse de forma que evite la entrada de agua hacia el soporte.

En las tuberías de bajas temperaturas, los soportes deben disponerse tal como se indica en la Fig. 2.9a para, de esta forma, lograr economías en el método de soporte y aislamiento.

Aislamiento de recipientes o depósitos

Para aislar recipientes o depósitos primeramente deben tomarse ciertas precauciones que se observan durante el aislamiento, tales precauciones pueden resumirse como a continuación se indica:

- 1) Inspección de las Superficies.- Antes de la aplicación del aislante debe examinarse todas las superficies para asegurarse que estén exentas de suciedad, cascarilla de laminación, grasa, etc.
- 2) Adaptación de tuberías de drenaje.- Los agujeros indicadores o de ventilación en los aros de refuerzo, deben ir adaptados a una pequeña tubería de drenaje que sobresalga claramente de la superficie del aislamiento, para evitar la saturación del aislamiento a

consecuencia del derrame de cualquier fluido.

- 3) Fijación del soporte adecuado de todo el aislamiento.-
Todo el aislamiento sobre los lados verticales de los depósitos y de las tuberías grandes necesita soporte. La Fig. 2.12 muestra detalles característicos de soportes utilizados para aislamiento flexible o rígido.
- 4) Prevención de la dilatación.- Si se precisan espacios de dilatación horizontal, deben disponerse las anillas soporte de forma que permitan dejar una apertura en el aislamiento para que admita la dilatación.

La aplicación de los materiales aislantes más comunes utilizados para aislar recipientes o depósitos está relacionada con la forma física que presenta cada uno de ellos.

Los materiales rígidos pueden, normalmente, adquirirse en placas de 90 cm. por 15 cm. o en paneles desde 60 cm. hasta 1.8 m. por 105 cm. de ancho para depósitos de hasta 2 m. de diámetro; se fabrican revestimientos achaflanados y radiales con los materiales aislantes más rígidos, cuyos grosores oscilan desde 1.25 cm. hasta 12 cm. normalmente, en

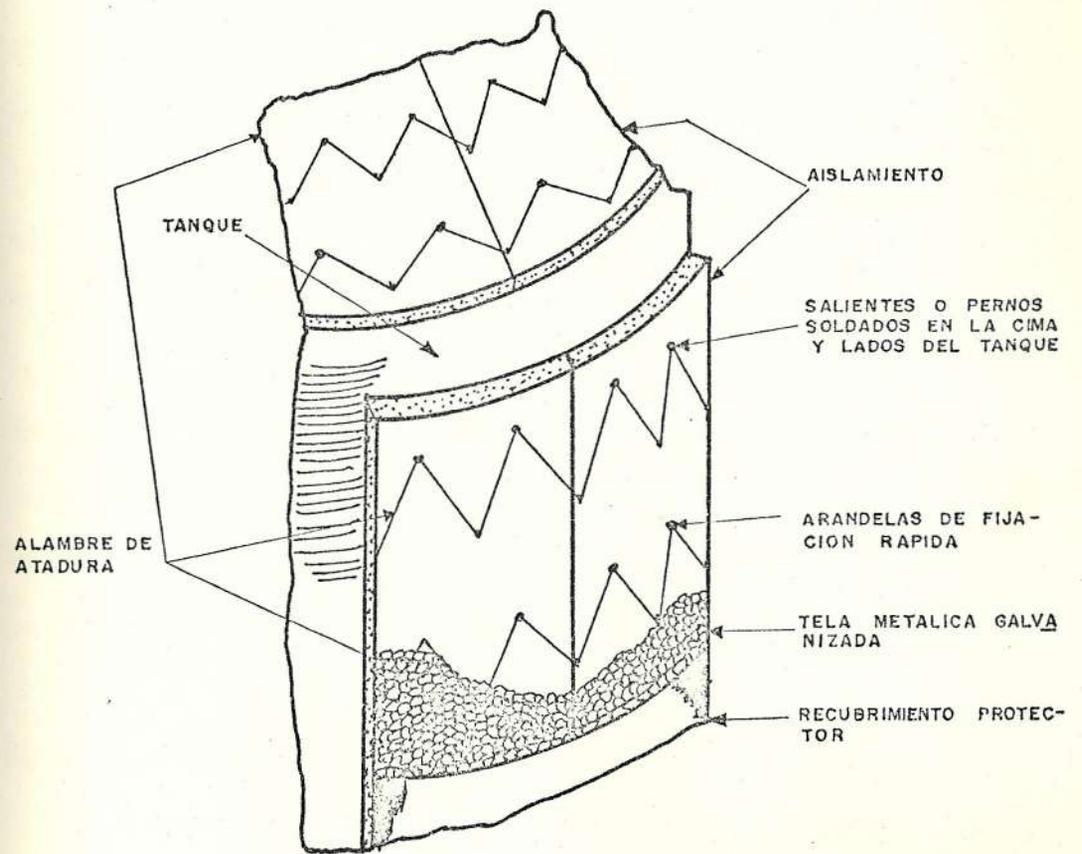


Fig. 2 - 12 AISLAMIENTO DE UN TANQUE CILINDRICO.
 DETALLES CARACTERISTICOS (con aislamientos flexible o rigido).

incrementos escalonados de 1.25 cm.

La utilización de aislamiento plástico requiere calor para su secado, con una temperatura superficial del depósito que no sobrepase los 150 °C. Esto puede limitar su uso a los depósitos más pequeños, pero en cualquier caso debe aplicarse siguiendo las recomendaciones de los fabricantes de materiales aislantes.

La aplicación de amianto rociado resulta idealmente idóneo para el aislamiento de grandes tanques de almacenamiento o de otras instalaciones en que estén implicadas zonas superficiales grandes. Puede aplicarse con una pistola pulverizadora. El proceso implica la aplicación de asbestos preparados de forma especial que se descarga por la boquilla principal de la pistola, y es interseptada por un chorro de agua que se descarga simultáneamente. Ambos se mezclan antes de incidir sobre la superficie que se está tratando y se adhiere a ella tenazmente.

2.2 ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO.

Normalmente, en cualquier sistema que se lleve a cabo

un proceso térmico, los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) se manifiestan en forma combinada; así, el calor usualmente es transferido en pasos a través de un número de diferentes secciones conectadas en serie y la transferencia la efectúan dos mecanismos en paralelo. Por ejemplo, en los sistemas de aislamiento térmico para superficies calentadas por un fluido como el vapor de agua, el calor es transferido primeramente por convección desde el fluido caliente a la pared interior del recipiente que lo contiene; luego se transmite por conducción a través del espesor de pared del recipiente y a través del espesor de aislamiento; finalmente, es transferido desde la superficie exterior del aislamiento hacia el medio ambiente por convección y radiación. Sin embargo, para facilitar el análisis de la transferencia de calor, se puede considerar que la resistencia térmica interior y la resistencia térmica del recipiente son despreciables ya que su valor es mínimo, siendo solamente de importancia la resistencia térmica del aislante y la de superficie exterior del aislamiento.

En general, para cualquier sistema de aislamiento, la ecuación básica para la transmisión térmica es:

$$q = q_c + q_r \quad (2.1)$$

la misma que puede ser expresada en palabras como a continuación se indica:

"La transmisión térmica a través del aislamiento es igual a la pérdida de calor por convección más la pérdida de calor por radiación desde la superficie exterior del aislamiento"

Para desarrollar los métodos de cálculo del flujo térmico a través de cada una de las diferentes secciones de un sistema de aislamiento, se harán las siguientes consideraciones:

- La temperatura de la superficie a ser aislada se tomará igual a la temperatura del proceso térmico al que está sometida ($T_{s1} = T_p$)
- El flujo de calor a través del aislamiento es constante. Esto requiere que el proceso sea estable y que el flujo de calor sea solamente en una dirección, ésto es, perpendicular a la superficie de aislamiento.
- La conductividad térmica del material aislante es constante. No se consideran las variaciones de la conductividad con la temperatura; será tomada a una

temperatura $(T_p + T_a)/2$.

1.- Flujo térmico a través del aislamiento.- El contacto físico directo entre el material aislante y la superficie a ser aislada, implica que, el calor sea transmitido por conducción desde la superficie caliente al aislante y además a través del mismo también se transmitirá por conducción. Por lo tanto, el flujo de calor a través del aislamiento tanto para superficies planas como para superficies cilíndricas puede ser determinado a partir de la relación básica para la transferencia de calor por conducción.

$$q_x = -k A \frac{dt}{dx}$$

la misma que al ser resuelta da las siguientes ecuaciones:

Para superficies planas:

$$q = \frac{k}{w} (T_{s1} - T_{s2}), \text{ Kcal/h.m}^2 \quad (2.2)$$

Para superficies cilíndricas:

$$q = \frac{2\pi k (T_{S1} - T_{S2})}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \text{ Kcal/h-m-lin} \quad (2.3)$$

2.- Flujo térmico por radiación.- Este flujo puede calcularse mediante la ecuación de Stefan-Boltzmann*

$$q_r = \sigma \epsilon A (T_{S2}^4 - T_a^4) \quad (2.4)$$

donde $\sigma = 4.88 \times 10^{-8}$ es la constante de Boltzmann en Kcal/m²h. °K⁴, que para tuberías puede expresarse de la forma

$$q_r = h_r \epsilon (T_{S2} - T_a) \pi D_2, \text{ Kcal/h.m.lin} \quad (2.5)$$

El valor de h_r (coeficiente de radiación o factor de temperatura) viene dado por

$$h_r = \frac{4.8 \times 10^{-8}}{T_{S2} - T_a} [(T_{S2} + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (2.6)$$

Los valores de h_r y de ϵ pueden obtenerse de la Fig. 2.13 y de la Tabla 2.1 respectivamente.

3.- Flujo térmico por convección.- El flujo térmico por convección puede ser natural y forzado. Para aisla -

* Ref. (2), Pág. 23

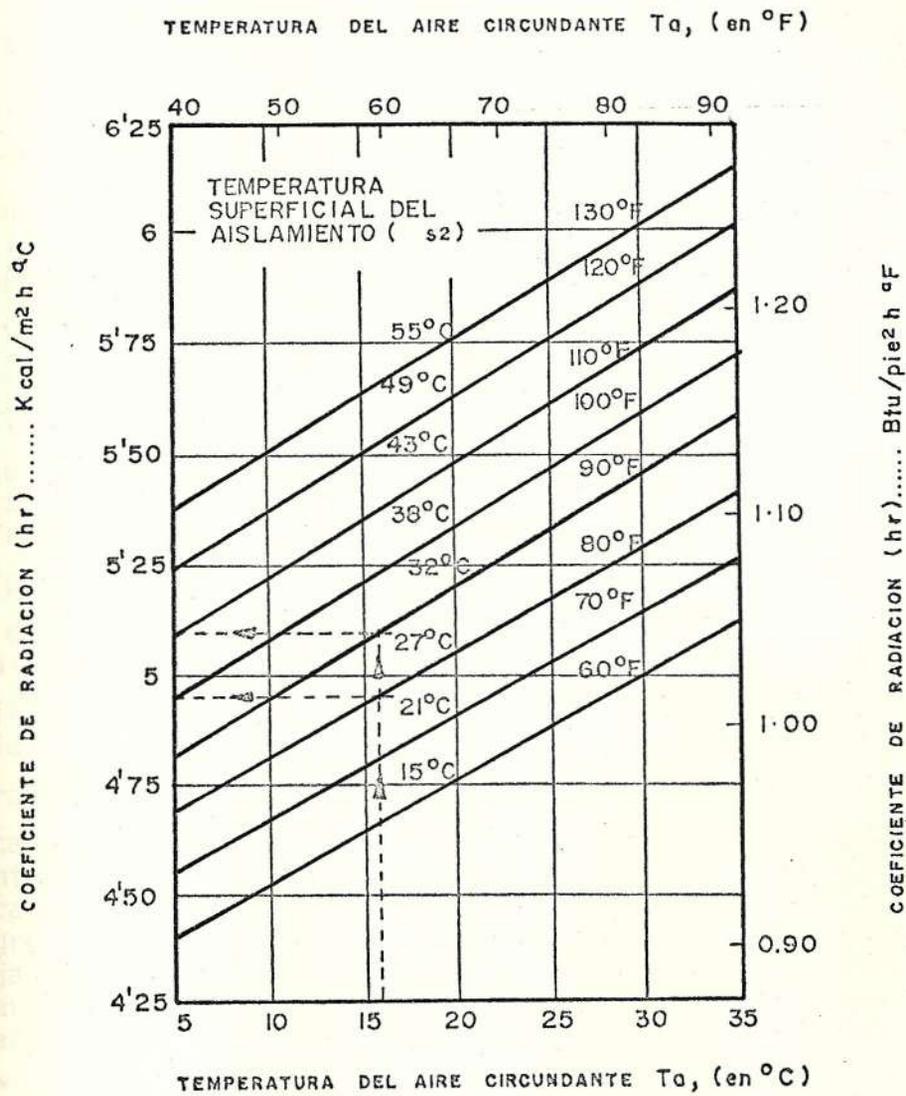


Fig. 2 - 13 COEFICIENTE DE RADIACION O FACTOR DE TEMPERATURA (hr).

TABLA 2.1

EMISIVIDADES NORMALES TOTALES DE VARIAS SUPERFICIES

M a t e r i a l	Temperatura del cuerpo radiante en °C (S = radiación solar)	Emisividad
Aluminio*		
Oxidado	40-260-540	0.11-0.12-0.18
Pulido	40-260-540-1370-S	0.04-0.05-0.08-0.19-0.3
Chapa laminada	100	0.087
Papel de asbesto*	40-370	0.93-0.945
Placa de latón mate*	50-350	0.22
Ladrillo**		
Rojo	40-S	0.93-0.7
De Sílice	40-540-1370	0.9-0.75-0.84
Refractario	40-540=1370	0.9-0.70-0.75
Cromo pulido	40-1100	0.08-0.36
Chapa de hierro galvanizada*		
Brillante	28	0.23
Oxidada	24	0.28
Pinturas**		
Laca aluminizada	40-260	0.65-0.65
Pinturas lechosas	40-260-540-1340-S	0.95-0.88-0.70-0.42-0.35
Laca negra	40-260	0.96-0.98
Negro de humo	40-260-1340-S	0.96-0.97-0.97
Roja	40-S	0.96-0.74
Amarilla	40-540-S	0.95-0.50-0.30
Blanca (ZnO)	40-540-S	0.95-0.91-0.18
Acero*		
Inoxidable 301	230-950	0.57-0.55
Pulido	40-540-S	0.07-0.14-0.45
Chapa laminada	21	0.66
Basto	40-370	0.94-0.97
Oxidado	40-540	0.79-0.79

* Ref. (4)

** Ref. (7)

mientos interiores debe presuponerse la convección natural, y para las condiciones exteriores la convección forzada. Luego, tratando primero la convección natural y a continuación la convección forzada, pueden obtenerse los flujos térmicos tal como a continuación se indica*:

- a) Convección Natural para superficies planas y verticales.

El flujo térmico para las superficies cilíndricas y las superficies planas viene expresado por

$$q_{CN} = 1.52 (T_{S_2} - T_a)^{1.25} \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.7)$$

Para las superficies planas horizontales, el flujo térmico puede tomarse como se indica a continuación:

Superficie caliente orientada hacia arriba

$$q_{CN} = 2.15 (T_{S_2} - T_a)^{1.25} \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.8)$$

Superficie caliente orientada hacia abajo

$$q_{CN} = 1.13 (T_{S_2} - T_a)^{1.25} \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.9)$$

* Ref.(2), Págs. 26, 27 y 28

El flujo térmico para una superficie cilíndrica horizontal viene dado por la ecuación siguiente

$$q_{CN} = 3.52 \cdot D_2^{0.75} (T_{S_2} - T_a)^{1.25} \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}} \quad (2.10)$$

- b) Convección forzada (tanto para las superficies verticales como para las horizontales)

Para las superficies planas y cilíndricas, la transmisión térmica en las condiciones de la convección forzada es como se indica a continuación:

- 1) Superficie cilíndrica (con viento en ángulo recto con respecto al eje del cilindro o tramo de tubería, $V = 3\text{m/s}$)

$$q_{CF} = 24.3 D_2^{0.6} (T_{S_2} - T_a) \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}} \quad (2.11)$$

El valor de q_{CF} también puede calcularse según la ecuación

$$q_{CF} = \pi D_2 h_c (T_{S_2} - T_a), \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}} \quad (2.12)$$

Los valores de h_c pueden obtenerse de la Fig. 2.14, $V \neq 3\text{m/s}$

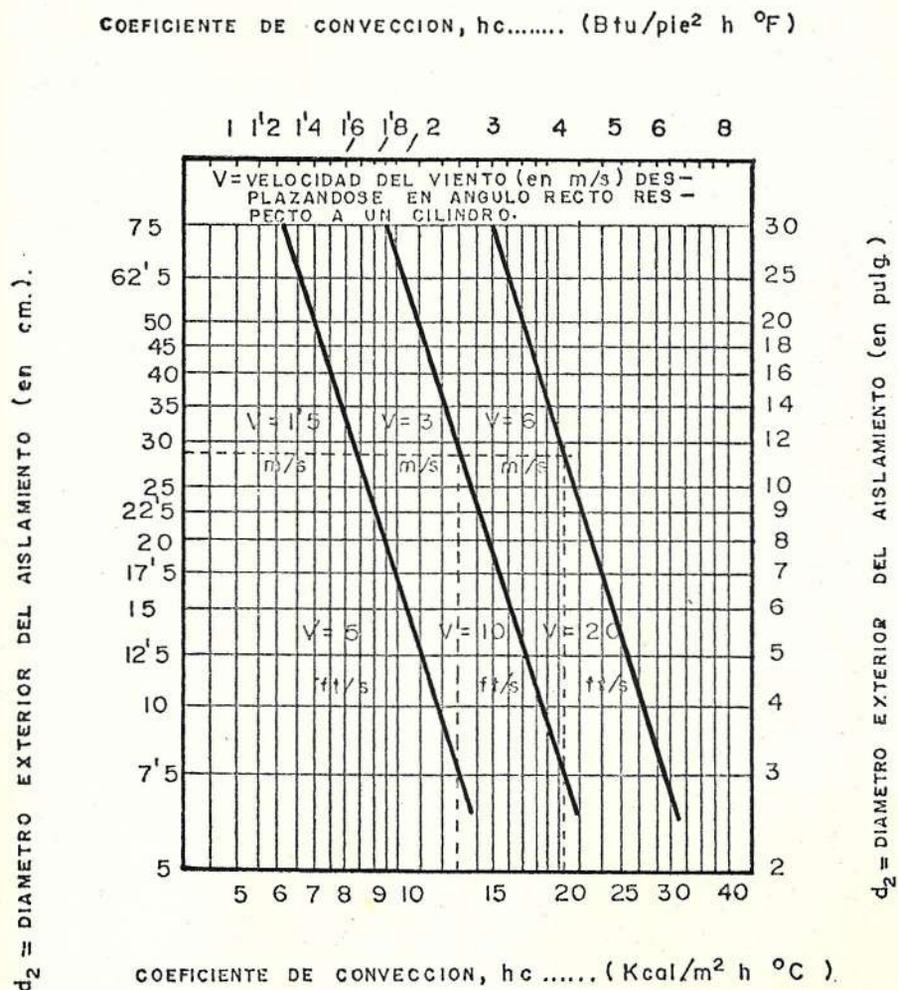


Fig. 2 - 14 . COEFICIENTE DE CONVECCION EN RELACION CON LA VELOCIDAD DEL VIENTO PARA LA CONVECCION FORZADA SOBRE LAS SUPERFICIES CILINDRICAS.

- 2) Superficie plana (con viento paralelo a la superficie)

$$q_{CF} = \frac{11.5}{W^{0.2}} (T_{s_2} - T_a) \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.13)$$

donde W = dimensión (en metros) en la dirección de flujo de aire.

Estas fórmulas proporcionan una exactitud de 10%

- 3) Superficie cilíndrica (con viento en la dirección del tramo de la tubería).

Para el cálculo puede utilizarse la ecuación 2.13.

2.2.1 Transferencia de Calor en Sistemas de Aislamiento para Superficies Planas.

La Fig. 2.15 muestra un sistema de aislamiento simple para superficies planas (un solo tipo de material aislante). En condiciones de estado estable, la rapidez del flujo de calor a través de cada una de las secciones del sistema será la misma y estará dada por:

Para el espesor de aislamiento

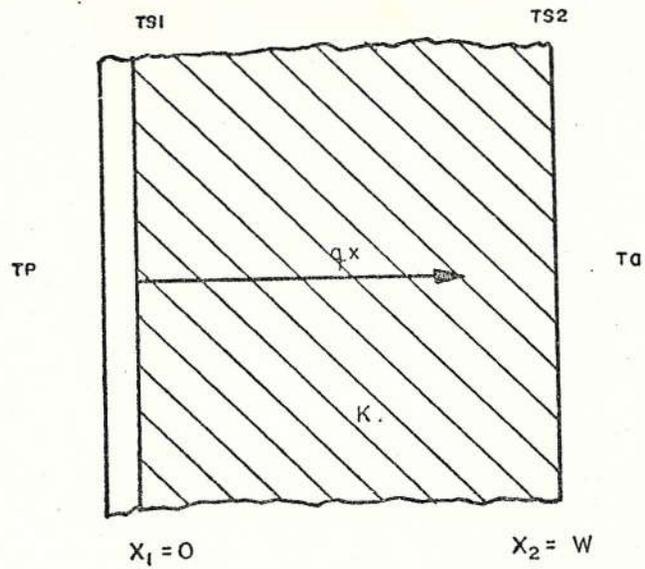


Fig. 2-15 SISTEMA DE AISLAMIENTO SIMPLE PARA SUPERFICIES PLANAS

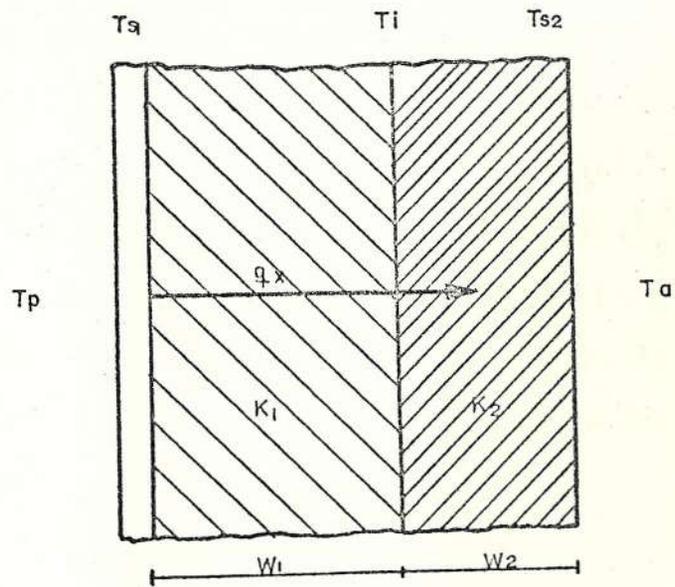


Fig. 2-16 SISTEMA DE AISLAMIENTO COMPUESTO PARA SUPERFICIES PLANAS

$$q = q_k = \frac{KA}{W} (T_p - T_{s2}) \frac{\text{Kcal}}{h}$$

Para la superficie exterior del aislamiento

$$q = q_r + q_c$$

$$q = hrA(T_{s2} - T_a) + hc(T_{s2} - T_a)$$

$$q = (hr + hc)A(T_{s2} - T_a)$$

$$q = hA(T_{s2} - T_a) \frac{\text{Kcal}}{h} \quad (2.16)$$

En la práctica, frecuentemente son conocidas únicamente las temperaturas del proceso y del ambiente. Las temperaturas intermedias pueden eliminarse sumando los términos de las diferencias de temperaturas y haciendo una transposición. Por lo tanto, la expresión resultante para la rapidez del flujo de calor a través del sistema de aislamiento simple se convierte entonces en:

$$q = \frac{(T_p - T_a)}{\frac{1}{\frac{KA}{W}} + \frac{1}{hA}} \frac{\text{Kcal}}{h}$$

Considerando la rapidez del flujo de calor por unidad de área exterior, y haciendo $R_s = 1/h$ te-

nemos

$$\frac{q}{A} = \frac{(T_p - T_a)}{\frac{W}{K} + R_s} \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.17)$$

Finalmente, podemos cambiar las unidades de K y W a una escala en centímetros

$$\begin{array}{ll} K, \text{ Kcal.m/m}^2\text{h}^\circ\text{C} & k, \text{ Kcal.cm/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \\ W, \text{ m} & w, \text{ cm} \end{array}$$

de modo que

$$U_s = \frac{\Delta T_t}{\frac{w}{k} + R_s} \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.18)$$

La Ec. 2.18 determinará la pérdida de calor de 1 m² de superficie de aislamiento simple cuyo espesor es w (cm.)

La Fig. 2.16 muestra un sistema de aislamiento compuesto para superficies planas (dos o más tipos de materiales aislantes). Este caso será tratado igualmente que el caso de aislamiento simple.

La rapidez del flujo de calor a través de las di-

ferentes secciones del sistema será la misma y está dada por:

Para el espesor de aislamiento interior

$$q = q_{k_1} = \frac{K_1 A}{W_1} (T_p - T_{s_2}) \frac{\text{Kcal}}{h} \quad (2.19)$$

Para el espesor del aislamiento exterior

$$q = q_{k_2} = \frac{K_2 A}{W_2} (T_p - T_{s_2}) \frac{\text{Kcal}}{h} \quad (2.20)$$

Para la superficie exterior del aislamiento

$$q = hA (T_{s_2} - T_a) \frac{\text{Kcal}}{h} \quad (2.21)$$

Eliminando las temperaturas intermedias, la rapidez del flujo de calor a través del sistema de aislamiento compuesto estará dada por

$$q = \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{\frac{K_1 A}{W_1}} + \frac{1}{\frac{K_2 A}{W_2}} + \frac{1}{hA}} \frac{\text{Kcal}}{h}$$

Considerando la rapidez del flujo de calor por unidad de área exterior, y haciendo $R_s = 1/h$ tenemos:

$$\frac{q}{A} = \frac{T_p - T_a}{\frac{W_1}{K_1} + \frac{W_2}{K_2} + R_s} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.22)$$

Cambiando las unidades de K y W a una escala en centímetros nos queda

$$U_s = \frac{\Delta T_t}{\frac{W_1}{k_1} + \frac{W_2}{k_2} + R_s} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.23)$$

La Ec. 2.23 determinará la pérdida de calor de 1 m² de aislamiento compuesto cuyo espesor es w₁ = w₂ (cm).

2.2.2 Transferencia de Calor en sistemas de aislamiento para superficies cilíndricas.

El análisis de la transferencia de calor para los sistemas de aislamiento de superficies cilíndricas que nos interesa, está relacionado principalmente con las tuberías para transporte de vapor y con los recipientes cilíndricos cuyos radios de curvatura no son demasiados grandes. Las tuberías de vapor, generalmente son aisladas para evitar pérdidas de calor con el fin de aprovechar la mayor cantidad de energía del vapor.

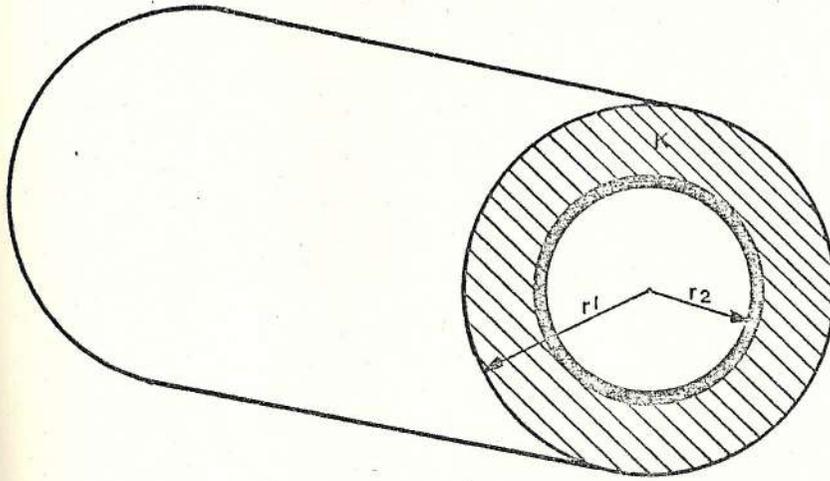


Fig. 2 - 17 SISTEMA DE AISLAMIENTO SIMPLE PARA SUPERFICIES CILINDRICAS (tubos).

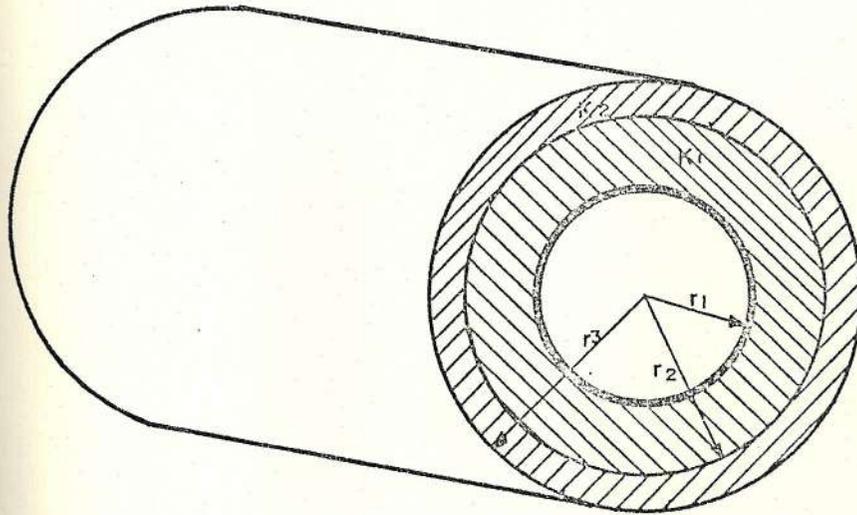


Fig. 2 - 18 SISTEMA DE AISLAMIENTO COMPUESTO PARA SUPERFICIES CILINDRICAS (tubos).

Para el caso de aislamiento simple consideramos un tubo aislado con una sola capa de material aislante, como se muestra en la Fig. 2.17. Si restringimos nuestro análisis al caso de conductividad térmica constante, y además, el flujo de calor a través del aislante es considerado solamente en dirección radial, tenemos que, la rapidez del flujo de calor a través de cada una de las secciones del sistema será la misma, y estará dada por:

Para el espesor de aislamiento

$$q = q_k = \frac{2\pi KL (T_p - T_{s2})}{\lambda n \frac{R_2}{R_1}} \quad \frac{\text{Kcal}}{h} \quad (2.24)$$

Para la superficie exterior ($A_2 = 2\pi R_2 L$)

$$q = q_r + q_c$$

$$q = hA (T_{s2} - T_a)$$

$$q = 2\pi R_2 L \cdot h (T_{s2} - T_a) \quad \frac{\text{Kcal}}{h} \quad (2.25)$$

Eliminando las temperaturas intermedias, la rapidez del flujo de calor se convierte en:

$$q = \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{\frac{2\pi KL}{\ln \frac{R_2}{R_1}} + \frac{1}{2\pi R_2 L h}}} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Considerando el área exterior del aislamiento $A_2 = 2\pi R_2 L$ y haciendo $R_s = 1/h$ nos queda

$$\frac{q}{A_2} = \frac{T_p - T_a}{\frac{R_2}{K} \ln \frac{R_2}{R_1} + R_s} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2}$$

Reordenando

$$\frac{q}{A_2} = \frac{K(T_p - T_a)}{R_2 \ln \frac{R_2}{R_1} + KR_s} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.26)$$

En este punto es conveniente cambiar las unidades de K , R_1 , y R_2 a una escala en centímetros

K , $\text{Kcal.m/m}^2.\text{h.}^\circ\text{C}$ k , $\text{Kcal.cm/m}^2.\text{h.}^\circ\text{C}$

R_1 , m. r_1 , cm.

R_2 , m. r_2 , cm.

de modo que

$$\frac{q}{A_2} = \frac{k \Delta T_t}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + kR_s} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \quad (2.27)$$

Finalmente, para el caso de tuberías, es necesario encontrar la rapidez del flujo de calor por metro lineal de tubería aislada; luego, haciendo ésta transformación tenemos:

$$\frac{q}{A_2} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2} \right) \times \frac{2\pi R_2 L}{100 L} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{m.lin}} \right) = \frac{6.28 \cdot 10^{-2} \cdot r_2 \cdot k \cdot \Delta T_t}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + kR_s}, \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.lin}}$$

Reordenando

$$U_p = \frac{6.28 \times 10^{-2} \cdot r_2 \cdot k \Delta T_t}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + kR_s}, \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.lin}} \quad (2.28)$$

La Ec. 2.28 representa la pérdida de calor de 1 metro lineal de tubería con una envoltura de aislamiento simple sobre la misma, y cuyo espesor es $w = r_2 - r_1$ (cm.)

Para el caso de aislamiento compuesto, consideramos una tubería aislada con dos capas de materiales aislantes diferentes, como se muestra en la Fig. 2.18. Tomando en cuenta las restricciones hechas para los aislamientos simples, tenemos que, la rapidez del flujo de calor a través de cada una de las diferentes secciones del sistema serán iguales, y estarán dadas por:

Para el espesor de aislamiento interior

$$q = q_k = \frac{2\pi K_1 L (T_p - T_j)}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad \frac{\text{Kcal}}{h} \quad (2.29)$$

Para el espesor de aislamiento exterior

$$q = q_k = \frac{2\pi K_2 L (T_j - T_{S2})}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad \frac{\text{Kcal}}{h} \quad (2.30)$$

Para la superficie exterior ($A_3 = 2\pi R_3 L$)

$$q = q_r + q_c$$

$$q = hA (T_{S2} - T_a)$$

$$q = 2\pi R_3 L h (T_{S2} - T_a), \quad \frac{\text{Kcal}}{h} \quad (2.31)$$

Eliminando las temperaturas intermedias, la rapidez del flujo de calor se convierte en

$$q = \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{\frac{2\pi K_1 L}{\ln \frac{R_2}{R_1}} + \frac{1}{\frac{2\pi K_2 L}{\ln \frac{R_3}{R_2}} + \frac{1}{2\pi R_3 L h}}}, \quad \frac{\text{Kcal}}{h}$$

Considerando el área exterior del aislamiento $A_3 = 2\pi R_3 L$ y haciendo $R_s = 1/h$ nos queda

$$\frac{q}{A_3} = \frac{T_p - T_a}{\frac{R_3}{K_1} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3}{K_2} \ln \frac{R_3}{R_2} + R_s}, \quad \frac{\text{Kcal}}{h \cdot m^2}$$

Reordenando:

$$\frac{q}{A_3} = \frac{K_1 K_2 (T_p - T_a)}{R_3 K_2 \ln \frac{R_2}{R_1} + R_3 K_1 \ln \frac{R_3}{R_2} + K_1 K_2 R_s} \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \quad (2.32)$$

Cambiando las unidades de K , R_1 , R_2 a una escala en centímetros tenemos:

$$\frac{q}{A_3} = \frac{k_1 k_2 \Delta T_t}{r_3 k_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + r_3 k_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + k_1 k_2 R_s} \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \quad (2.33)$$

Finalmente, resolviendo para flujo de calor por metro lineal de tubería aislada nos queda

$$U_p = \frac{6.28 \cdot 10^{-2} \cdot r_3 k_1 k_2 \Delta T_t}{r_3 k_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + r_3 k_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + k_1 k_2 R_s} \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{Lin}} \quad (2.34)$$

La Ec. 2.34 representa la pérdida de calor de 1 metro lineal de tubería con una envoltura de aislamiento compuesto sobre la misma y cuyo espesor es $w = r_3 - r_1$ (cm.)

2.2.3 Resistencia térmica de superficie exterior

La resistencia térmica de la superficie exterior del aislamiento (R_s), básicamente depende de cuan-

ta cantidad de calor es disipado al medio ambiente mediante los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación; por lo tanto, se puede decir que R_s es la resistencia al flujo térmico por convección y radiación desde la superficie exterior del aislamiento.

La transferencia de calor por radiación es controlada por el carácter de las superficies (emisividad) y por la diferencia de temperaturas entre la superficie y el aire circundante. La transferencia de calor por convección es controlada por la rugosidad de la superficie, por el movimiento de aire, y por la diferencia de temperaturas entre la superficie y el aire circundante. Los métodos para la determinación del flujo térmico por radiación y convección desde la superficie exterior del aislamiento, fueron desarrollados anteriormente.

Luego, partiendo de las ecuaciones básicas para la transferencia de calor por convección y radiación

$$q_c = hcA (T_{s_2} - T_a)$$

$$q_r = hrA (T_{s_2} - T_a)$$

podemos determinar el valor de R_s , calculando primeramente los coeficientes individuales de transferencia de calor h_c y h_r a partir de las ecuaciones

$$h_c = \frac{q_c}{A(T_{s2} - T_a)} \quad (2.35)$$

$$h_r = \frac{q_r}{A(T_{s2} - T_a)}$$

en donde los valores de q_r y q_c pueden ser determinados usando las Ecs. desde la 2-4 hasta la 2.13 dependiendo de las condiciones específicas del caso que se esté tratando.

La suma de los coeficientes h_r y h_c será el coeficiente total de transferencia de calor de la superficie exterior del aislamiento

$$h = h_r + h_c \quad (2.37)$$

consecuentemente, la resistencia térmica de la superficie exterior del aislamiento será

$$R_s = \frac{1}{h} \quad (2.38)$$

2.3 ANÁLISIS ECONÓMICO PARA LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

En la determinación del diseño más económico para un sistema de aislamiento, se puede evaluar, para un costo mínimo dos o más materiales aislantes para un rendimiento térmico dado; o, se puede seleccionar un espesor de aislamiento óptimo para un tipo de aislamiento específico. En cualquiera de los casos, la decisión estará basada en qué diseño ahorraría la mayor cantidad de dinero sobre un período específico.

La función primaria del aislamiento es reducir las pérdidas de energía de una superficie operando a una temperatura diferente a la del ambiente; por lo que con el uso económico de aislamiento se logrará:

- 1.- Reducir los gastos de operación de la planta
- 2.- Mejorar la eficiencia del sistema
- 3.- Incrementar la capacidad de producción del sistema o reducir el costo capital requerido.

En todo caso, para cualquier espesor dado, hay dos costos asociados con el tipo de aislamiento seleccionado:

- 1.- Un costo para el aislamiento
- 2.- Un costo para la pérdida de energía a través de es-

te espesor de aislamiento.

El costo total para un período dado será la suma del costo de aislamiento más el costo de la pérdida de energía. Por lo tanto, el espesor económico óptimo es aquel que provee la mejor solución del costo efectivo para aislamiento y es determinado cuando los costos totales son mínimos.

La solución para el espesor óptimo estará dada en función de los costos de pérdida de energía e inversión de aislamiento, por lo que, ambos costos deberán ser comparados en términos similares. Para nuestro análisis usaremos un método que hace la estimación del costo de aislamiento y compara éste con el costo promedio anual esperado de pérdida de energía.

2.3.1 Costo de la pérdida de energía

La razón de energía transferida a través del aislamiento, el costo o valor fijado para esa energía, y las horas de operación por año determinan el costo de la pérdida de energía por año. La razón de energía transferida es función de los siguientes parámetros:

- 1.- Diferencia de temperatura a través del aislamiento.
- 2.- Conductividad térmica del aislamiento.
- 3.- Espesor del aislamiento
- 4.- Resistencia térmica de la superficie externa del aislamiento.

El método utilizado para cálculos del valor de energía en centrales de vapor es sumando los costos de producción de energía.

El costo total de energía producida incluye los siguientes costos:

- 1.- Costo de combustible
- 2.- Costo capital de equipos
- 3.- Gastos de operación y mantenimiento

Los costos de combustible tienen gran influencia sobre el valor de energía, por lo tanto la eficiencia con la cual esos combustibles son quemados o convertidos en procesos caloríficos afecta el valor asignado a la energía en un proceso. En las centrales de vapor la eficiencia de conversión de energía del caldero puede ser considerada.

Para la evaluación del costo de energía será usado el costo promedio de los combustibles sobre la vida del aislamiento en lugar de los costos actuales, ya que los costos de combustible probablemente sufrirán cambios con el tiempo.

El costo capital de equipos de la planta es también asignado al costo de energía. Este costo es estimado por año considerando el período de depreciación de la planta, el promedio anual de producción de energía y el costo de moneda*. Además los gastos de mantenimiento y operación son incluidos ya que contribuyen a aumentar el costo de la energía.

2.3.2 Costo de Aislamiento

El costo de aislamiento es uno de los parámetros que intervienen en la determinación del espesor óptimo de aislamiento y será considerado como la suma del costo de inversión anual de aislamiento más el gasto anual de mantenimiento del aislamien-

* El costo de la moneda, o razón de descuento, es el costo de financiación de la inversión.

to. Para ésto, el costo inicial del sistema de aislamiento es prorrateado sobre el período de vida seleccionado del proyecto, usando el costo de moneda apropiado o razón de retorno requerida sobre el último incremento de aislamiento aplicado.

El período sobre el cual el costo de inversión de aislamiento es considerado es un factor importante en la selección del espesor económico óptimo. Si el período escogido para este costo es corto, el costo de aislamiento anual sería alto, el espesor económico sería pequeño, y el sistema d aislamiento no proveería el costo total mínimo en la vida de servicio del aislamiento. Luego, es conveniente usar la vida de servicio del material como período de vida del proyecto de aislamiento si los períodos de pago del mismo no se hacen de otra manera.

2.3.3 Espesor de Aislamiento

El espesor de aislamiento económico óptimo será determinado mediante un método que considera el aumento de costo producido por la incrementación

de espesor de aislamiento, éste es el método del costo incremental o marginal.

El método del costo incremental provee una solución simplificada y directa para el espesor de aislamiento de costo mínimo. En este método, el espesor óptimo es determinado para ser el punto donde el último sucre invertido en aislamiento resulte en exactamente \$.1 en ahorros del costo de energía, en base a un descuento del flujo de dinero.

El costo incremental es un término aplicado al cambio de el costo instalado entre dos espesores de aislamiento sucesivos. A un espesor W dado, el costo para adicionar el espesor de aislamiento, ΔW , está dado como:

$$m_c = \frac{\Delta C}{\Delta W}$$

Donde: m_c = Costo incremental de aislamiento
(\$./cm).

ΔC = Diferencia en costo de aislamiento
instalado para espesor W' y W'' (\$)

ΔW = Espesor adicional de aislamiento,
 $W' - W''$ (cm.)

La inversión requerida de dinero para incrementar el espesor de aislamiento de W' a W'' es por lo tanto determinado como m_c .

Al espesor W , la reducción en el costo de pérdida de energía obtenido por la adición del espesor de aislamiento W , está dado como:

$$m_s = \frac{\Delta S}{\Delta W}$$

Donde: m_s = Ahorro incremental en el costo de pérdida de energía (\$./cm).

ΔS = Diferencia en el costo de pérdida de energía entre los espesores W' y W'' (\$.)

El ahorro de dinero en energía obtenido por incrementación del espesor de aislamiento de W' y W'' es por lo tanto determinado como m_s , el cual siempre tiene un valor negativo porque la adición de aislamiento reduce el costo de pérdida de energía.

El costo total anual es igual a la suma del costo de pérdida de energía y el costo de aislamiento, por lo tanto el cambio en los costos totales cuando un aislamiento adicional es añadido será igual a la suma de m_s y m_c .

Cuando el costo total es mínimo, el cambio en el costo total es igual a cero y m_s igual a m_c . Cuando esta condición es encontrada, adicionar más aislamiento no es beneficioso ya que el costo incremental para el aislamiento adicional, m_c , llega a ser mayor que el valor de la energía ahorrada, m_s , para ese aislamiento adicional.

La Fig. 2.19 muestra curvas típicas de costo de aislamiento para espesores de capa simple, doble, y triple; además muestra la curva de pérdida de energía, y las curvas de costo total para espesores de capa simple, doble y triple, las mismas que son generadas por adición de las curvas del costo de aislamiento y la curva del costo de pérdida de energía.

El método del costo incremental es demostrado en la Fig. 2.19 por comparación del cambio en el costo de aislamiento (ΔC) con los ahorros en costo de pérdida de energía (ΔS) resultante de la adición de un espesor de aislamiento (ΔW)*. Al

Ref. (5), pág. 6

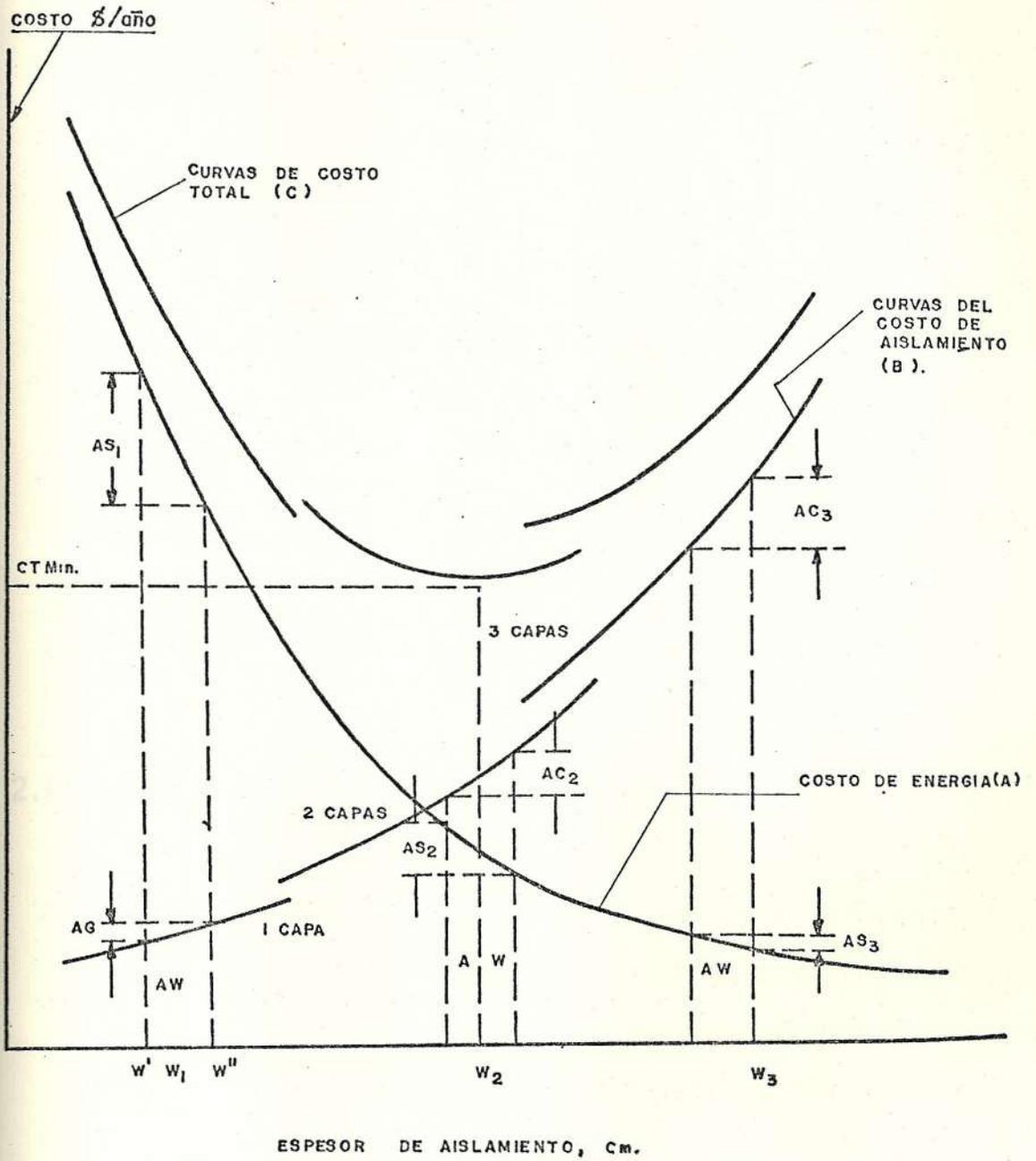


Fig. 2 - 19. ESPESOR DE AISLAMIENTO Vs. COSTO DE AISLAMIENTO.

espesor W_1 , la adición de ΔW causa un gran ahorro en pérdida de energía (ΔS_1) a un pequeño incremento en el costo de aislamiento (ΔC_1). Al espesor de W_3 , la adición de ΔW es bastante costosa (ΔC_3) y ahorra solamente una pequeña cantidad en costo de energía (ΔS_3). El espesor óptimo está en el rango de capa doble, W_2 , ya que el cambio en el costo de aislamiento (ΔC_2) es igual al cambio en el costo de pérdida de energía (ΔS_2) para el espesor de aislamiento adicional (ΔW); consecuentemente, el costo incremental de aislamiento será igual al ahorro incremental en el costo de pérdida de energía y el costo total es mínimo.

2.4 TÉRMINOS PARA LA EVALUACIÓN DE COSTOS

Los costos iniciales que intervienen en un proyecto de aislamiento serán evaluados de acuerdo a criterios del costo del ciclo de vida con el fin de obtener un valor real de los mismos para un período de tiempo determinado. Los términos involucrados para este análisis son los siguientes:

- 1.- Período de vida del aislamiento y de la instalación.
- 2.- Razón de incremento, amortización y retorno.

2.4.1 Período de Vida del Aislamiento y de la Instalación.

Generalmente el aislamiento está en servicio productivo hasta que el material se degrade al punto de que su reposición sea requerida; en este tipo de situación, la selección del período de vida del aislamiento debe ser la vida completa de servicio del material (usualmente 15 ó 20 años).

Una segunda circunstancia es aquella en la que el aislamiento debe pagarse por si mismo en ahorros de energía en un período menor que su vida material potencial; en este caso, la selección del período de vida del aislamiento (n_1) puede ser el período asignado de depreciación del proyecto o el periodo de pago deseado.

El período de vida del aislamiento puede ser considerado además como el período sobre el cual el costo de combustible es promediado, ya que el método de cálculo del espesor óptimo minimiza el costo total de energía y de aislamiento sobre la vida del proyecto.

El período de vida de la instalación (n_2) es el período sobre el cual el costo inicial de la planta es anualizado, con el propósito de asignar un costo capital al costo de energía. El período para el cual la planta estaría en operación puede ser seleccionado para el valor de n_2 , aunque para propósito de contabilidad el período de depreciación de la planta puede ser justificado. Un período de pago corto no es un valor apropiado para n_2 ya que estaría creando artificialmente un valor alto de energía que resulta en un sobregasto para el aislamiento.

2.4.2 Razón de Incremento, Amortización y Retorno sobre los Costos.

La razón de incremento anual del costo de combustible, i_2 , será usada para evaluar el costo promedio anual del combustible sobre la vida del aislamiento. Esto es necesario ya que se considera que el combustible incrementaría su precio por lo menos a través de períodos medios y cortos; por lo tanto la energía que sería ahorrada con aislamiento en el futuro será más valorable que la ahorrada actualmente, justificándose la inversión de aislamiento adicional. El término i_1 no puede ser

valorado fácilmente, por lo que ésto obliga a escoger arbitrariamente un valor tal como la razón de inflación esperada.

La razón de amortización de la planta, i_2 , es aquella razón a la cual el costo inicial de la planta es anualizado sobre el período de vida de la misma. El valor seleccionado para i_2 sería el costo real de financiamiento, ésto es, la razón de intereses sobre los fondos de los préstamos usados para construir la planta.

La razón de retorno anual sobre el último incremento de aislamiento en el espesor óptimo recomendado, i_3 , es el porcentaje que retornaría anualmente el último incremento de aislamiento de la inversión inicial requerida para este incremento. Un valor de i_3 alto nos daría un espesor económico delgado; sin embargo, algunas veces el aislamiento no es requerido para cumplir con un retorno alto en criterio de inversión, por lo que el valor de i_3 sería una razón baja, tal como el costo del préstamo recibido o razón de interés bancario.

2.5 PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LOS COSTOS TOTALES

El análisis de costos en un proyecto de aislamiento considera el costo total de las pérdidas térmicas y el costo total de aislamiento conjuntamente para resolverse para un espesor de aislamiento de costo mínimo. Estos costos serán evaluados a partir de criterios del costo de ciclo de vida aplicados al costo de calor y al costo de aislamiento.

El costo de las pérdidas térmicas es el producto del flujo de calor a través del aislamiento y el valor de ese calor, por lo que estarán dadas como flujo de calor por unidad de aislamiento que puede ser un metro lineal de tubo o un metro cuadrado de superficie plana. El flujo de calor a través de l aislamiento es considerado constante sobre la vida de la planta, y su costo será tomado del precio, valor calorífico y eficiencia de conversión de los combustibles usados como fuente de calor.

Para obtener una consistencia unitaria, el costo de calor será promediado sobre el período de vida del aislamiento, para ésto, el costo de calor será multiplicado por un factor B_1 para obtener el costo promedio anual de calor.

$$B_1 = \frac{(1 + i_1)^{n_1 - 1}}{i_1^{n_1}}$$

Además, se asigna un costo capital al costo de calor, para lo cual se usa el principio de pago uniforme sobre los gastos de capital de la planta; aquí, un factor B_2 será multiplicado por el costo de calor para obtener el costo capital anual de calor.

$$B_2 = \frac{i_2(1 + i_2)^{n_2}}{(1 + i_2)^{n_2 - 1}}$$

Para el costo de aislamiento se considerará el costo de material, costo de mano de obra para la instalación del material y costos de mantenimiento. Para tener consistencia unitaria con el costo de calor, el costo de aislamiento será reducido a un costo promedio anual puesto que es una suma total inicial, para ésto un factor B_3 será provisto, el mismo que nos dará el pago anual igual que retornaría justamente el capital e intereses al final de la vida del aislamiento.

$$B_3 = \frac{i_3(1 + i_3)^{n_1}}{(1 + i_3)^{n_1 - 1}}$$

CAPITULO III

COSTO DE ENERGIA PARA GENERAR VAPOR

El costo de energía para generación de vapor está determinado principalmente por el precio de los combustibles utilizados como fuente de calor; sin embargo, también es influenciado por la eficiencia con la cual los combustibles son convertidos en calor, y por el valor calorífico de los mismos. Además, si consideramos la evaluación del costo de energía sobre un período de tiempo determinado, éste será influenciado por el incremento del precio en el combustible y por el costo de capital que involucra la instalación o unidad generadora de vapor.

Así , bajo estas condiciones, el costo de energía para generación de vapor será considerado un factor determinante en la selección de espesores para sistemas de aislamiento térmico en centrales de vapor, ya que nos permitirá hacer una comparación entre el costo del aislamiento y el costo de la pérdida de energía a través del espesor de aislamiento del sistema aislado.

Para la determinación de espesores de aislamiento de cualquier sistema que se utilice para conservar la energía del vapor producido por una unidad generadora de vapor, el costo de energía será combinado con el costo de aislamiento del sistema para poder obtener un costo total mínimo el cual produciría el espesor de aislamiento óptimo.

3.1 COMBUSTIBLES USADOS EN CENTRALES TÉRMICAS DE VAPOR

En general, los combustibles usados como fuente de calor en cualquier proceso pueden ser de tres tipos: Sólidos, Líquidos y Gaseosos. Estos combustibles se componen principalmente de carbono e hidrógeno, y en mayor o menor cantidad de oxígeno; los combustibles sólidos además contienen sustancias minerales (cenizas), agua, y en ocasiones nitrógeno y azufre. La proporción de dichos componentes se indica por el tanto por ciento en peso, en el caso de combustibles sólidos, y por el tanto por ciento en volumen, para combustibles gaseosos.

Dentro de esta clasificación general, los combustibles más comunes usados en centrales de vapor son el carbón, el petróleo, y el gas natural, los mismos que serán analizados brevemente a continuación.

CLASIFICACION DE LOS CARBONES (3)

(P = Pulverulento, V = Vitrificado, A = Aglutinado)

C L A S E	Composición del "Carbón Puro"			Humedad a Boca Mina (%)	Peso Específico (Kg/dm ³)	Coque		Potencias Caloríficas		
	C (%)	H (%)	O (%)			Rendimiento (%)	Calidad	Teórica (Kcal/Kg)	Superior (Kcal/Kg)	Inferior (Kcal/Kg)
Turba	60	5	35	45	1.15	35	P	5700	3800	3500
Lignito Fosforoso	65	5	30	40	1.15	40	P	6000	2500	2200
	70	5	25	30	1.15	45	P	6200		
Lignito Común	72	5	23	20	1.15	48	P	6400	3600	3300
	74	5	21	10	1.15	50	P ó V	6800		
	76	5	19	8	1.15	53	P ó V	7100		
Hulla de llama larga	78	5	17	6	1.20	55	P ó V	7400	5500	5200
	80	5	15	4	1.25	60	V	7600		
Hulla de gas	82	5	13	3	1.25	63	A	7800	6600	6300
	84	5	11	2	1.25	65		8000		
Hulla para Coque	86	5	9	2	1.30	70	A	8300	7500	7200
	88	5	7	1	1.30	75		8500		
Hulla seca	90	5	5	1	1.35	78	A	8800	7750	7550
	92	4	4	1	1.35	80	V	8700		
Antracita	94	3	3	0.5	1.40	90	P	8500	8000	7800
	96	2	2	0.5	1.40	95		8400		
	95	1	1	0.5	1.40	98		8200		
Grafito	100				2.30	100	P	8100	8100	8000

Carbón

En nuestro medio el carbón es un combustible que no tiene uso, sin embargo, en algunos otros países es considerado como una notable fuente de energía ya que integra la mayor parte del consumo total de combustibles en la industria.

El carbón es un combustible fósil y por lo tanto constituye el resultado de una evolución geológica que, empezando en la madera y pasando por la turba, prosigue en los lignitos fibrosos y común para llegar a la hulla y antracita y concluir en el carbono puro (grafito). Una clasificación de estos carbones basada en sus propiedades físicas, valor calorífico y en base a la materia mineral libre, es mostrada en la Tabla 3.1.

Petróleo

El petróleo es la principal fuente de energía en nuestro país y por lo tanto constituye uno de los combustibles más usados a nivel industrial y doméstico.

El petróleo es una mezcla de muchos compuestos orgánicos, principalmente carbono, hidrógeno y oxígeno. Sin

tomar en cuenta la fuente de petróleo crudo, su composición es regularmente uniforme dentro de límites cercanos. Valores aproximados de los componentes del petróleo son*:

C = 83 - 87 %	O + N = 0 - 7 %
H = 11 - 16 %	S = 0 - 4 %

El petróleo crudo es raras veces usado como tal. Un proceso de refinamiento produce gasolina, kerosene, gas-oil, y un petróleo residual, alquitrán, o coke de petróleo; éstos pueden ser procesados nuevamente para producir un gran número de productos encontrados en el mercado.

Entre los petróleos combustibles, los más pesados son los petróleos residuales, y los más livianos el gas-oil y los destilados ligeramente más pesados; a más de estos dos tipos de petróleos combustibles, hay otros tipo intermedio que se obtienen frecuentemente mezclando los mencionados anteriormente.

Debido a la gran variedad de combustibles derivados del petróleo, su uso dentro del área doméstica e industrial

* Ref. (9), Pág. 20

Tabla 3.2

REQUERIMIENTOS DETALLADOS PARA PETROLEOS COMBUSTIBLES*

GRADO DE COMBUSTIBLE	Punto de Destello °F	Punto de Vaciado °F	Agua y sedimento por Vol. (%)	Residuo de carbón en 10% de Resid. (%)	Porcentaje de ceniza por peso. (%)	Temperat. de Destilación			Viscosidad Saybolt (sec)				Viscosidad Cinemática (Centistokes)			
						10%	90%	Punto final	Universal a 100 °F		Furol a 122 °F		a 100 °F		a 122 °F	
						MAX	MAX	MAX	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
1: Petróleo destilado destinado para quemadores vaporizantes tipo P OT y otros quemadores que requieren este grado. Gravedad API 35 (MIN)	100 o legal	0		0.15		4.20		6.25					2.2	1.4		
2: Un petróleo destinado para fines generales de calentamiento doméstico para uso en quemadores que no requieren el N-º 1. Gravedad API 26 (MIN).	100 o legal	20	0.10	0.35			675		40				(4.3)			
4: Un petróleo para instalaciones quemadoras no equipadas con adecuaciones de precalentamiento.	130 o legal	20	0.50		0.10				125	45			(26.4)	5.8		
5: Un petróleo tipo residual para instalaciones quemadoras equipadas con adecuaciones de precalentamiento	130 o legal		1.00		0.10				150	40			321	(81)		
6: Un petróleo para uso en quemadores equipados con precalentadores permitiendo una alta viscosidad del combustible	150		2.00								300	45	(638)		(92)	

* Ref. (9), Pág. 22

ha sido estandarizado bajo normas internacionales estipuladas entre refinadores, distribuidores, consumidores y fabricantes de quemadores. Estas especificaciones cubren cinco grados de combustibles (Nº 1-2-4-5 y 6), las mismas que se indican en la Tabla 3.2.

Gas Natural

El gas natural es una mezcla de algunos gases tales como el metano y el etano que son los constituyentes principales. Su análisis se lo realiza sobre una base volumétrica.

El valor calorífico del gas natural varía desde alrededor de 6000 a 9000 Kcal/m³, en condiciones normales, usualmente a presión atmosférica y 32 °C. La determinación de valores caloríficos de cualquier gas puede ser calculada sumando el producto de cada volumen de componentes (como decimal) y su valor calorífico volumétrico individual.

Los valores caloríficos individuales de algunos gases por metro cúbico a cero grados y 760 mm. de Hg son*:

* Ref. (8), Pág. 86

	<u>Bajo</u>	<u>Alto</u>
CO.	3050	3050
H ₂	2580	3070
CH ₄	8530	9500
C ₂ H ₂	13500	13950
C ₂ H ₄	14050	15000

El gas natural tiene algunas ventajas sobre los mejores combustibles puesto que éste es limpio y fácil de quemar. Si solamente gas natural es quemado; las instalaciones para almacenamiento de combustible; tolvas de ceniza, fosos de ceniza y equipo para manipulación de ceniza serían innecesarios; los sopladores de hollín pueden ser omitidos y los colectores de polvo no son necesarios; el control del calor para el caldero es más simple; las superficies de calentamiento pueden ser arregladas para transferencia de calor óptima, entre otras ventajas.

3.2 EFICIENCIA DE CONVERSION DE LOS COMBUSTIBLES

Como sabemos, cualquier proceso de transformación de energía, va acompañado de mayor o menor pérdida de energía útil. La relación de la cantidad de energía aprovechada útilmente en cualquier proceso, respecto a la cantidad de energía invertida en el mismo, es el rendimiento del proceso que se analiza.

Así, el rendimiento de un generador de vapor es la relación de la cantidad de calor que contiene el vapor generado por la unidad, descontando la cantidad de calor que llega a ella con el agua de alimentación, respecto de la cantidad de calor liberado por el combustible quemado. Para una central térmica a vapor, este rendimiento total global del generador de vapor puede ser considerado como la eficiencia con la cual el combustible utilizado como fuente de calor es convertido en calor, siendo uno de los parámetros que influyen en el costo de energía para generación de vapor.

El combustible suministrado al hogar de un generador de vapor cuando es quemado completamente libera su valor calorífico, evaporando el agua de alimentación bombeada a la unidad. Todo el valor calorífico no es aprovechado para este propósito útil, ya que existen algunas pérdidas debidas a la combustión incompleta, los gases de escape saliendo a altas temperaturas, y al calor radiante y convectivo desde el lado exterior de la unidad. Un balance de energía muestra la distribución del valor calorífico del combustible para la formación de vapor y para las pérdidas existentes.

Los valores individuales usualmente mostrados para el

balance de energía son los siguientes*:

- Energía útil, Q_1
- Pérdidas de energía debido a la humedad mecánica en el combustible, Q_2
- Pérdidas de energía debido a la humedad del hidrógeno en el combustible, Q_3
- Pérdidas de energía debido a la humedad del aire, Q_4
- Pérdidas de energía debido al calor sensible de los gases de escape, Q_5
- Pérdidas de energía debido a la combustión incompleta, Q_6
- Pérdidas de energía debido al carbono en desecho, Q_7
- Pérdidas de energía debido a la superficie de transferencia de calor y pérdidas no estimadas, Q_8

Los valores anteriores para el balance de calor están dados en Kcal/Kg de combustible o como porcentaje de valor calorífico alto; además, cada cálculo de balance de calor deberá hacerse para una carga dada o vapor de salida. Un rango promedio de valores del balance de calor expresado en porcentaje es:

* Ref. (9), Pág. 49

$$\begin{array}{lll}
 Q_1 = 50 - 90 & Q_5 = 6 - 30 & Q_7 = 0 - 2 \\
 Q_{2-3-4} = 3 - 5 & Q_6 = 0 - 50 & Q_8 = 2 - 9
 \end{array}$$

Por lo tanto, la eficiencia de conversión del combustible que para nuestro estudio es tomada como la eficiencia del generador de vapor, estará dada por:

$$E = \frac{Q_1}{HHV} \quad (3.1)$$

$$\text{siendo, } Q_1 = W_s(h_{g2} - h_{f1}) + W_r(h_{g4} - h_{g3}) + W_B(h_{f2} - h_{f1}) \quad (3.2)$$

donde: E = Eficiencia de conversión del combustible

Q_1 = Calor útil, Kcal/Kg

h_{g2} = Entalpía del vapor de salida, Kcal/Kg

h_{f2} = Entalpía del agua a la presión del caldero, Kcal/Kg.

h_{f1} = Entalpía del agua de alimentación, Kcal/Kg.

h_{g4} = Entalpía del vapor recalentado saliendo del caldero, Kcal/Kg.

h_{g3} = Entalpía del vapor recalentado dentro del caldero, Kcal/Kg.

W_s = kilogramos de vapor de agua de alimentación por kilogramos de combustible.

W_r = kilogramos de vapor recalentado por kilogramos de combustible

W_B = kilogramos de agua purgada por kilogramos de combustible.

HHV = Valor calorífico alto del combustible, Kcal/Kg.

La eficiencia de un generador de vapor es principalmente una función del diseño de la misma; además, depende de la carga y manera de operación. La buena operación del generador de vapor consiste en: 1) Controlar y limitar el exceso de aire; 2) Minimizar los combustibles en los desechos; 3) Minimizar los combustibles en los gases de escape; y 4) mantener limpias las superficies de transferencia de calor.

3.3 COSTO DE CALOR PARA GENERAR VAPOR

El costo de calor producido en un proceso de generación de vapor, es la relación entre el precio del combustible usado como fuente de calor y la cantidad de calor aprovechable de dicho combustible. Este calor es considerado sobre una base de un millón de kilocalorías por lo que será expresado en ($\$/10^6$ Kcal.).

Para instalaciones, en las cuales se usan el carbón, el petróleo, o el gas natural como combustibles, el costo

de calor para generar vapor será encontrado por cualquiera de las tres formas siguientes*:

- 1.- La producción de calor se la hace usando petróleos combustibles como fuente de energía.

$$c_h = \frac{P_o 10^6}{W_o \times E \times HHV} \quad (3.3)$$

- 2.- La producción de calor se la hace usando carbón como fuente de energía.

$$c_h = \frac{P_c \times 10^3}{E * HHV} \quad (3.4)$$

- 3.- La producción de calor se la hace usando gas como fuente de energía.

$$c_h = \frac{P_g 10^3}{E * HHV} \quad (3.5)$$

En las ecuaciones anteriores, los términos son los siguientes:

c_h = Costo de calor para generar vapor, $\$/10^6$ Kcal.

P_o = Precio del petróleo combustible, $\$/gal$.

W_o = Peso específico del petróleo combustible, Kg/gal.

* Ref. (5), Pág. 156

P_c = Precio del carbón, \$/Ton.

P_g = Precio de 1000 m³ de gas, \$/1000 m³

E = Eficiencia de conversión del combustible

HHV = Valor calorífico alto del combustible, para el petróleo y el carbón en Kcal/Kg., y para el gas en Kcal/m³.

3.4 COSTO PROMEDIO ANUAL DE CALOR

El costo promedio anual de calor es simplemente el costo de calor actual promediado con relación a los incrementos de este costo en años futuros. Estos incrementos se deben principalmente al incremento de precios en los combustibles utilizados, por lo tanto al evaluar el costo de calor durante el período sobre el cual el proyecto de aislamiento es considerado, éste se verá afectado por el incremento del precio de los combustibles, debiendo considerarse un factor multiplicador (B) para obtener un costo promedio anual de calor.

Si consideramos que el incremento en el precio de los combustibles se producirá a una razón promedio constante cada año, el costo de calor tendrá un valor promedio sobre un espacio dado de años. La suma de los valores de calor que son capitalizados a una razón constante será entonces:

$$\Sigma c_h = c_h \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right]$$

Esto representa la cantidad de calor total; luego, si el costo de calor es capitalizado cada año durante un período de tiempo dado (n_1) y a una razón de incremento en el precio del combustible (i_1), la suma de cada costo de calor anual será determinada en esta forma. Ahora, el costo promedio por año será simplemente la suma de todos los costos de calor anual dividida para el número de años. Esto es:

$$\frac{\Sigma c_h}{n} = c_h \left[\frac{(1+i_1)^{n_1} - 1}{i_1 n_1} \right]$$

Tomando $C_h = \Sigma c_h/n$, y $B_1 = [(1+i_1)^{n_1} - 1]/i_1 n_1$ tenemos

$$C_h = B_1 c_h, \text{ \$/}10^6 \text{ Kcal.} \quad (3.6)$$

B_1 , entonces es el factor multiplicador para el costo de calor que se espera subirá a una razón promedio constante para dar el costo promedio anual sobre el período de tiempo que está siendo considerado.

Además, para la producción de vapor en plantas de poder que utilizan carbón, petróleo, o gas como fuente de energía, podemos considerar que el costo de calor para

generar vapor consiste principalmente del costo de combustible y secundariamente de los costos de operación y mantenimiento; por lo tanto, el costo promedio anual de calor debe considerar estos costos secundarios. Los costos de operación y mantenimiento de una planta representan un porcentaje determinado de los costos de combustible y tienen la tendencia a subir en cierta medida con el aumento del costo del combustible. El 10% del costo del combustible se puede considerar como un porcentaje aceptable para los costos de operación y mantenimiento involucrados en la producción de vapor para una planta de poder*. En consecuencia, si consideramos que los costos de mantenimiento y operación de la unidad generadora de vapor es el 10% del costo del combustible utilizado, el costo promedio anual de calor será:

$$C_h = 1.1 B_1 c_h \quad (3.7)$$

3.5 COSTO CAPITAL ANUAL DE CALOR

En general, el costo de capital lo podemos definir como la tasa de rendimiento que un capital invertido debe ganar de tal manera que su valor real permanezca invariable. Así, el costo capital anual de calor es el costo del capital invertido que se debe pagar anualmente por

las kilocalorías producidas en un año.

Por lo tanto, si el combustible (petróleo, carbón o gas) es quemado en un generador de vapor para producir calor utilizable en una central de vapor, el costo de calor debe llevar una porción de la inversión de capital en dicha planta.

La razón de producción de los KWH anuales esperada en la central de vapor, debe ser transformada a millones de 10^6 Kcal/año, luego dividida en cargas de capital anual para dar el capital ($\$/10^6$ Kcal) que debe ser adicionado a los costos de combustible.

Ahora, es conocido que cualquier inversión de capital involucra el uso del capital que debe ser restaurado y el costo de interés sobre el capital no restaurado; por lo que, si la inversión de capital con los pagos de interés son restaurados en incrementos anuales iguales, podemos encontrar estos incrementos por amortización del capital invertido. Esto nos permitirá encontrar la carga anual para el capital invertido que debe ser llevada por las Kilocalorías producidas.

Luego, el costo capital anual del calor en una central térmica a vapor será:

$$C_k = \frac{B_2 \text{ PF}}{Q} \quad (3.8)$$

donde: C_k = Costo capital anual del calor, $\$/10^6$ Kcal.

B_2 = Factor de amortización anual para el capital invertido.

PF = Capital invertido en la central de vapor (caldero, tubería, condensador, etc.), millones de sucres.

Q = Producción de energía promedio anual esperada, millones de 10^6 Kcal/año.

La producción de energía promedio anual esperada en la central térmica generalmente está dada en función del consumo de combustible, valor calorífico del combustible, eficiencia de conversión del combustible, y de los Kilowatios-hora que se espera sean generados por la central térmica.

$$Q^* = \left(w_f \frac{\text{Kg de c}}{\text{KWH}} \right) \left(\text{HHV} \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg de c}} \right) (E) \left(\frac{\text{KWH}}{\text{año}} \right) 10^{-6},$$

millones de 10^6 Kcal.

* El valor de Q también se puede determinar a partir del flujo de vapor generado, su entalpía y las horas de operación anuales.

3.6 COSTO TOTAL DE CALOR

El costo total de calor producido para generar vapor en una central térmica, es el término que evaluará el costo real de las pérdidas térmicas a través del espesor de aislamiento para cualquier sistema que requiera ser aislado.

Este costo, entonces, debe considerar el costo promedio anual de calor, los costos de operación y mantenimiento de la planta, y el costo capital anual de calor.

Luego, en una central térmica a vapor, el costo total de las pérdidas de energía o costo total del calor perdido a través de un sistema de aislamiento será:

$$M = 1.1 B_1 C_h + \frac{PF \cdot B_2}{Q}$$

CAPITULO IV

COSTO DE AISLAMIENTO

4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En la determinación de espesores de aislamiento, el costo de aislamiento es considerado como una de las variables más sensibles; por lo tanto, para realizar un análisis aceptable de este costo es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1.- Se debe conocer el precio para varios aislamientos instalados con espesores para diámetros de tubos específicos y superficies de equipos. El factor de costo incremental, m_c , definido más adelante provee esta necesidad.
- 2.- Reducir la inversión de aislamiento en un gasto anual incluyendo gastos de mantenimiento.
- 3.- Corregir el precio de aislamiento instalado incluyendo el costo incrementado del aislamiento de vál-

vulas, codos , tees, y otros accesorios. Los factores de complejidad para tubería serán provistos para hacer esta corrección.

Básicamente, el propósito de este análisis es evaluar los costos incrementales de aislamiento basándonos en los precios unitarios instalados. Por lo tanto, ya que no existe una forma conocida de representar exactamente el cambio en precios instalados versus espesor de aislamiento con una formulación matemática, debe necesariamente conocerse los precios instalados para al menos dos espesores de capas simple, doble y triple para cada diámetro de tubo.

El precio unitario instalado depende de una gran cantidad de variables. El costo de mano de obra, costo de materiales y productividad del obrero son los factores primarios que determinan el nivel de precios unitarios instalados. Sin embargo, otros factores tales como: 1) Condiciones de trabajo, 2) Accesibilidad de tubería y equipo, 3) Complejidad de Trabajo, 4) Costos de sobretiempo y eficiencia del trabajador, tienen una influencia importante en fijar el nivel de precio final de cada unidad instalada.

Los precios unitarios instalados son una estimación promedio de los costos de aislamiento de tubos, y los mismos no incluyen el costo efectivo del aislamiento de válvulas, rebordes, y otros accesorios de tubos; ésto determina que el espesor de aislamiento de una sección de tubería debe además estar basado en los costos de aislamiento de tales accesorios. Por lo tanto, puesto que es impráctico evaluar el costo efectivo de aislamiento de accesorios para cada una de las secciones específicas de tubería en una planta, se considerará un factor de complejidad de tubería.

4.2 COSTO DE AISLAMIENTO INSTALADO

El costo de aislamiento instalado es determinado por la simple suma de las porciones variable y fija de un proyecto de aislamiento. La porción variable es una función del aislamiento, por consiguiente, se mantiene una consistencia unitaria con el costo de la pérdida de calor que ha utilizado el espesor de aislamiento como su variable independiente.

El costo puede ser expresado como

$$c_i = m_c w + d \quad (4.1)$$

donde: c_i = Costo de aislamiento instalado, $\$/m^2$, S/./
m-lin.

m_c = Variación del costo de aislamiento instalado, $\$/m^2/cm$.

w = espesor de aislamiento, cm.

d = costo de instalación fijo (invariable),
 $\$/m^2$

La ecuación (4.1) tiene la apariencia de una línea recta, pero m_c no puede ser constante, ya que el costo c_i está influenciado por una gran cantidad de variables, cuya clase y variedad determinan la imposibilidad de establecer un modelo simple consistentemente exacto para su determinación. Algunos de los elementos del costo que entran en este factor de aislamiento instalado son:

- Costo de mano de obra y productividad
- Costos de transportación
- Complejidad del sistema-número de válvulas, codos y accesorios en el sistema.
- Accesibilidad de la instalación
- Cantidad de trabajo, grande o pequeño
- Clase de aislamiento
- Forma de aislamiento
- Márgenes de Ganancia

- Margen de gastos generales
- Tiempo Suplementario
- Localización geográfica del trabajo
- Consideraciones Estacionales

Puesto que existen muchas variables, y no se puede predecir aquellas a ser encontradas en proyectos específicos, debemos disponer de un modelo general que sea bastante exacto para poder proveer las soluciones del costo mínimo de aislamiento.

El análisis del costo de aislamiento instalado presentado en este estudio considera que, la variación del costo de aislamiento instalado es constante entre dos espesores diferentes dentro de los rangos de capa simple, doble, y triple. Una representación gráfica de este hecho es mostrada en la Fig. 4.1. Luego, m_c , puede ser seleccionado tomando dos presupuestos separados de aislamiento instalado dentro de cada rango de espesores; así, el valor de m_c estará dado por la pendiente de la recta que determina la variación del costo de aislamiento instalado versus espesores de aislamiento para los rangos de capas simples, doble, y triple; además, el factor de complejidad de tubería, PC , debe ser considerado para explicar los accesorios del sistema. Para es-

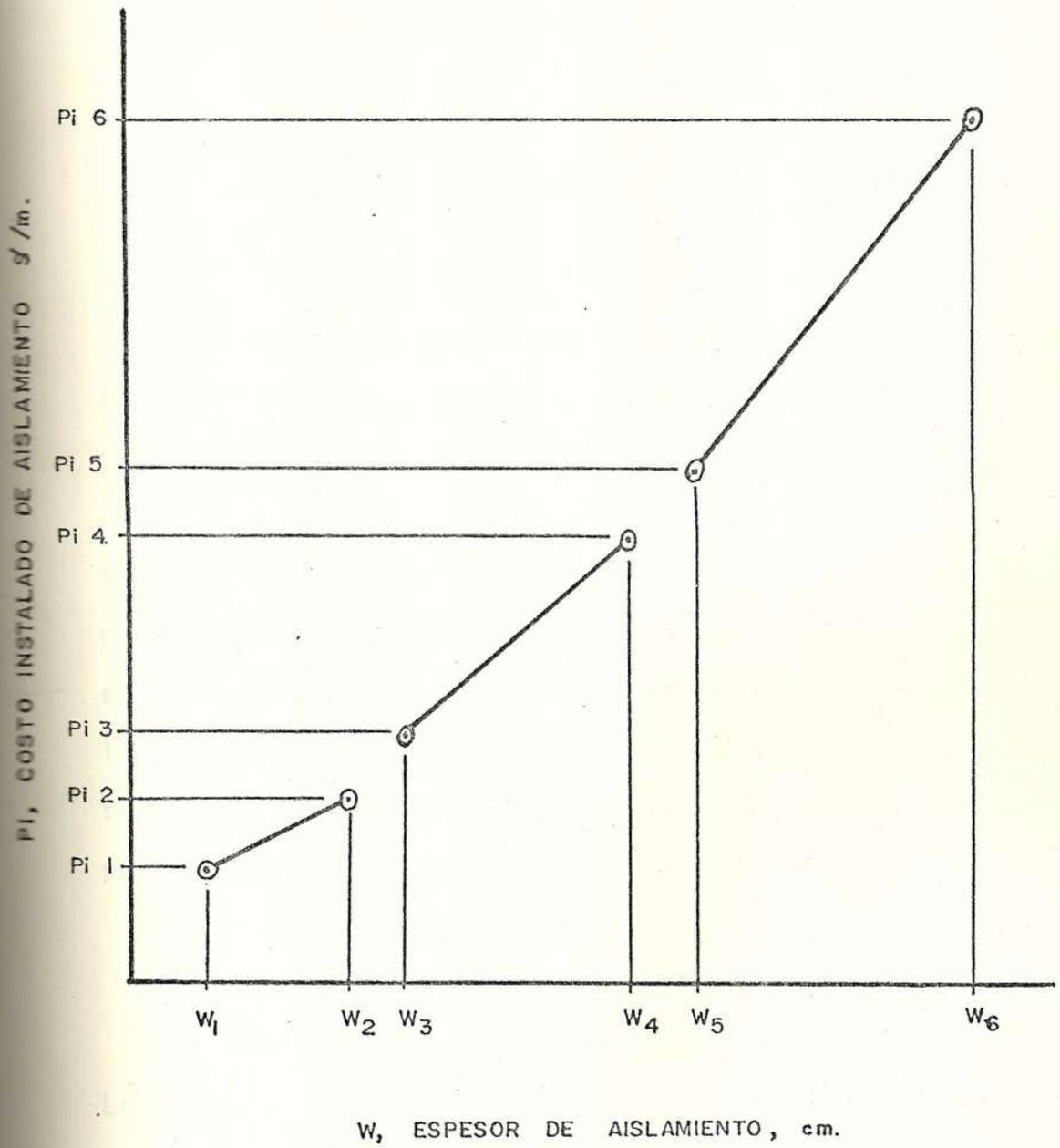


Fig. 4 - 1 VARIACION DEL COSTO DE AISLAMIENTO INSTALADO.

pesores dentro de los rangos de capa simple, doble o triple, tenemos:

$$m_{C_1} = PC \frac{P_{i_2} - P_{i_1}}{W_2 - W_1}$$

$$m_{C_2} = PC \frac{P_{i_4} - P_{i_3}}{W_4 - W_3}$$

$$m_{C_3} = PC \frac{P_{i_6} - P_{i_5}}{W_6 - W_5}$$

Teniendo determinados los valores de m_{C_1} , m_{C_2} , y m_{C_3} , la ecuación (4.1) puede ser usada con un alto grado de confiabilidad ya que el valor de m_C puede ser dividido en segmentos lo suficientemente pequeños para conservar su exactitud dentro del rango para el cual es determinado. El término de costo fijo, d , no es evaluado ya que solamente los costos variables son necesarios en la solución para los espesores óptimos de aislamiento. El factor de complejidad para tubería, PC , es multiplicado para completar el término m_C . Luego,

$$m_C = PC \frac{\Delta P}{\Delta W} \quad (4.2)$$

Los costos de mantenimiento que el aislamiento ocasiona, será tomado como el 10% de la amplitud del costo inicial

sobre el período de vida del aislamiento*. Así, el costo de aislamiento instalado incluyendo mantenimiento será:

$$c_i = 1.1 (m_c w + d) \quad (4.3)$$

Finalmente, tomando en cuenta que la inversión inicial de aislamiento debe ser reducida a un gasto anual, el costo anual de aislamiento instalado será:

$$C_i = 1.1B_3 \cdot (m_c w + d)$$

4.3 DETERMINACION DEL COSTO INCREMENTAL DE AISLAMIENTO

El costo incremental de aislamiento es determinado directamente del costo unitario de aislamiento instalado, y representa el incremento promedio de suces en el precio de 2.54 cm. (1 pulg) de aislamiento. Los costos de aislamiento instalado se incrementan substancialmente cuando el aislamiento es aplicado en capas, por lo tanto, el costo incremental de aislamiento debe ser determinado para cada capa de aislamiento aplicado.

El costo incremental de aislamiento para espesores de capas simples, doble o triple puede ser determinado para

* Ref. (5), Pág. 173

cada diámetro de tubo o superficie plana, siguiendo el siguiente procedimiento.

- 1.- Seleccionar el diámetro de tubo aplicable.
- 2.- Obtener el precio instalado (P_1) para un espesor en el límite más bajo del rango de espesores de capa simple (w_1). Anotar los valores de w_1 y P_1 en la hoja de trabajo N° 1.
- 3.- Obtener el precio instalado (P_2) para una espesor en el límite superior del rango de espesores de capa simple (w_2). Anotar los valores de w_2 y P_2 en la hoja de trabajo N° 1.
- 4.- Seleccionar el factor de complejidad de tubería apropiado (PC), Tabla. 4.7.
- 5.- Calcular el costo incremental de aislamiento de capa simple, m_{c1} , mediante

$$m_{c1} = \frac{P_2 - P_1}{w_1 - w_2} \text{ PC}$$

- 6.- Repetir los pasos (2) a (5) para aplicaciones de aislamiento en los rangos de capas doble y triple.

En los pasos (2) y (3) se deberá consultar a empresas contratistas para instalación de aislamiento, o alguna empresa que distribuya materiales aislantes. En el paso

(Nº 1) HOJA DE TRABAJO PARA DETERMINACIÓN DEL COSTO INCREMENTAL DE AISLAMIENTO

Aplicación:
Especificaciones
Aislamiento:
Cobertura:
Acabado:

W Espesor de aislamiento, cm
P Precio de aislamiento instalado
Tubería \$/m-lin
Superf. PLana- \$/m²
m_c Costo incremental de aislamiento
Tubería \$/m-lin/cm
Superf. plana, \$/m²/cm

Diámetro del tubo Pu1 (cm.)	CAPA SIMPLE					CAPA DOBLE					CAPA TRIPLE				
	W ₁	P ₁	W ₂	P ₂	m _{c1}	W ₁	P ₁	W ₂	P ₂	m _{c2}	W ₁	P ₁	W ₂	P ₂	m _{c3}
1 (2.54)															
1 ½ (3.81)															
2 (5.08)															
2 ½ (6.35)															
3 (7.62)															
4 (10.16)															
5 (12.70)															
6 (15.24)															
8 (20.32)															
10 (25.40)															
12 (30.48)															
14 (35.56)															
16 (40.64)															
18 (45.72)															
20 (50.80)															
24 (60.96)															
30 (76.20)															
36 (91.44)															
Superficie Plana															

Nota: W₁ = espesor para extremo inferior del rango de la capa; W₂ = espesor para extremo superior del rango de la capa

P₁ = precio instalado para W₁ ; P₂ = precio instalado para W₂

(4) el factor de complejidad de tubería (PC) es explicado más adelante.

4.4 ESTIMACION DE PRECIOS POR UNIDAD DE AISLAMIENTO INSTALADO

Hay dos elementos de costos básicos que determinan los precios de aislamiento instalado.

- 1.- Precios de los materiales
- 2.- Mano de obra para la instalación del material

Precio de los Materiales

Los precios de los materiales aislantes están directamente relacionados al volumen y costo de aislamiento, cobertura, aseguramiento, acabado, y material de soporte estructural requerido para cumplir las especificaciones. También están incluidos los costos para almacenaje, transporte, y manipulación de los materiales.

Estos costos pueden ocasionar una variación de los precios de los materiales aislantes, por lo tanto, es conveniente usar la razón de precios del material ya que ésta no cambia apreciablemente de contratista a contratista.

La razón de precios del material puede ser determinada para distintos espesores de aislamiento tanto para placas, como para superficies cilíndricas, y generalmente los factores para tubería están basados en el precio del material para 5.08 cm (2 pulg) de aislamiento sobre tubo de 5.08 cm. (2 pulg.) de diámetro, mientras que los factores para superficies planas están basados en el precio del material para 5.08 cm (2 pulg) de aislamiento sobre superficie plana.

Costo de la Mano de Obra

El costo de mano de obra para la instalación del aislamiento varía considerablemente y está influenciado por:

- 1.- Razón de mano de obra local, \$/h-hom.
- 2.- Productividad del trabajador, h-hom/m-lin o m² de aislamiento.
- 3.- Costos de manutención de personal para el trabajo.

La razón de mano de obra local tiene un efecto significativo en la determinación del nivel de precios de la mano de obra para varios espesores de aislamiento y diámetro de tubos. La razón de mano de obra está determinada por factores tales como la disponibilidad de mano

de obra local, ya sea que se emplee o no mano de obra calificada, y si son involucradas horas suplementarias de trabajo. La razón de mano de obra incluye el salario base de mano de obra, beneficios marginales, gastos por viajes y puede además incluir elementos de costo de manutención de personal.

La productividad del trabajador (horas hombre requeridas para aislar un segmento de tubo o superficie plana) es el elemento más variable que incluye el precio unitario de mano de obra. Las horas hombre requeridas para aislar una superficie aumentan con los diámetros grandes de tubos, inaccesibilidad de tubería y equipo y complejidad de trabajo. Otros factores conocidos que tienen influencia en la productividad del trabajador son:

- Tipo de material utilizado
- Condiciones de trabajo
- Productividad local del trabajador
- Pérdida de eficiencia del trabajador por sobretiempo

El costo de manutención de personal para el trabajo es el tercer elemento que fija los costos unitarios de mano de obra. Este costo aumenta con la magnitud del trabajo, y aunque cada contratista lo puede tratar en forma dife-

rente algunos de los factores mayormente incluidos son:

- Costos de preparación
- Costos de limpieza y desarme
- Costos de supervisión
- Gastos generales

4.5 PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR EL COSTO DE AISLAMIENTO INSTALADO.

Para estimar el costo de aislamiento instalado sobre la superficie de un tubo o una placa plana se puede seguir el procedimiento descrito a continuación. Usar hoja de trabajo N^o 2.

1.- Seleccionar la especificación del aislamiento y de la cubierta.

2.- Obtener de un contratista local de aislamientos:

Precios del material aislante y cubierta para

5.08 cm. sobre tubo de 5.08 cm. $P = \underline{\hspace{2cm}} \text{ \$/m-lin}$

5.08 cm. sobre superficie plana $P = \underline{\hspace{2cm}} \text{ \$/m}^2$

Razón de mano de obra local, LR

Costo total por hora que el contratista cobraría por la instalación.

LR = $\underline{\hspace{2cm}} \text{ \$/h-hom}$

- 3.- Seleccionar la razón de precios apropiada para la especificación dada. Tablas 4.1 a 4.4.

$$R = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 4.- Para cada diámetro de tubo y espesor de aislamiento, multiplicar el precio del material para 5.08 cm. sobre tubo de 5.08 cm. por el factor R apropiado obtenido de las tablas de razón de precios del material

$$MP = \underline{\hspace{2cm}} \text{ \$/m-lin}$$

- 5.- Cuando se requiere estimar el precio de materiales para aislar superficies planas, multiplicar el factor R apropiado obtenido de las tablas de razón de precios del material por el precio del material para 5.08 cm. sobre superficie plana.

$$MP = \underline{\hspace{2cm}} \text{ \$/m}^2$$

- 6.- Calcular el factor compuesto de mano de obra (F_c) para tubería.

Factor según tipo de material (F_t). Tabla 4.6

$$F_t = \underline{\hspace{2cm}}$$

Razón de mano de obra local (LR). Del paso 2

$$LR = \underline{\hspace{2cm}} \text{ \$/h-hom}$$

$$F_c = \frac{1.2 (F_t) (LR)}{100}$$

$$F_c = \underline{\hspace{2cm}}$$

Se ha asumido un factor de 1.2 como factor de mantenimiento de personal.

- 7.- Para cada diámetro de tubo y espesor de aislamiento, calcular los precios de mano de obra (LP), multiplicando F_c por el factor apropiado de productividad del trabajador (WP), Tabla 4.5.

$$LP = F_c \text{ WP}$$

$$LP = \text{_____} \text{ \$/m-lin}$$

- 8.- Repetir los pasos (6) y (7) para estimar los precios de mano de obra para aislamiento de superficies planas.

$$LP = \text{_____} \text{ \$/m}^2$$

- 9.- Sumar los precios estimados del material y mano de obra para encontrar el precio unitario estimado del aislamiento instalado.

$$P = MP + LP$$

$$P = \text{_____} \text{ \$/m-Lin ó m}^2$$

- 10.- Anotar los valores de P en la hoja de trabajo N° 1 para determinación del costo incremental.

4.6 FACTORES DE COMPLEJIDAD PARA TUBERIA

Generalmente cualquier sistema de tuberías contiene diferentes accesorios tales como válvulas, codos, tees reductores, y otros; los mismos que establecen un mayor

(Nº 2) HOJA DE TRABAJO PARA ESTIMACIÓN DEL COSTO UNITARIO DE AISLAMIENTO

Diámetro de la Tubería Pulg (cm.)	Precios del Material y de la Mano de Obra* MP y LP											
	Capa Simple				Capa Doble				Capa Triple			
	2 pul (5.08 cm)		4 pul (10.16cm)		5 pul (12.70 cm)		7 pul (17.78cm)		8 pul (20.32cm)		10 pul (25.40cm)	
	MP	LP	MP	LP	MP	LP	MP	LP	MP	LP	MP	LP
1 (2.54)												
1½ (3.81)												
2 (5.08)												
2½ (6.35)												
3 (7.62)												
4 (10.16)												
5 (12.70)												
6 (15.24)												
8 (20.32)												
10 (25.40)												
12 (30.48)												
14 (35.56)												
16 (40.64)												
18 (45.72)												
20 (50.80)												
24 (60.96)												
30 (76.20)												
36 (91.44)												
Superficie Plana												

* Precios: Tubería = \$/m-lin; Superfi. Plana = \$/m²

grado de complejidad en la determinación de espesores de aislamiento con relación a una tubería sin accesorios, lo cual será expresado como el factor de complejidad de tubería.

Si se considera una sección de tubería conteniendo algunos accesorios, la influencia de éstos en el espesor de aislamiento de la sección será analizado en función de su área de pérdida de calor, estableciéndose una relación equivalente entre los accesorios y un metro lineal de tubo. Así, si una tubería tiene integrados algunos accesorios, éstos serán considerados como una longitud equivalente de tubo recto.

Los accesorios de tubos generalmente tienen una gran área de superficie a través de la cual el calor puede ser transferido y comparado con un metro lineal de tubo; por lo tanto, los accesorios tendrán una "pérdida de calor equivalente", igualmente expresada en longitudes rectas de tubo. Usualmente el costo equivalente para aislar un accesorio es mayor que el costo para aislar una longitud recta de tubo y puede ser expresada en términos de "metro lineal equivalente".

Puesto que el espesor de aislamiento para un tubo es

función del costo de aislamiento por unidad de área de pérdida de calor, ésta relación debe también ser verdadera para una sección de tubería que incluya accesorios. Conociendo esta relación, puede ser derivado un factor para corregir los precios unitarios de aislamiento incluyendo el efecto de los accesorios. Con este factor el espesor de aislamiento para una sección de tubería puede ser estimado basándonos en los precios unitarios de aislamiento para tubos. Los factores de complejidad de tuberías listados en la tabla 4.7 nos permitirán ajustar el costo de aislamiento instalado explicando los accesorios.

Tabla II.1
 RAZÓN DE PRECIOS DE VENTA UNITARIOS DEL MATERIAL
 (SILICATO DE CALCIO)*

DIAMETRO DE LA TUBERIA Pulg.(cm.)	ESPESOR DE AISLAMIENTO, PULG (CM.)															
	CAPA SIMPLE						CAPA DOBLE					CAPA TRIPLE				
	1 (2.54)	1 1/2 (3.81)	2 (5.08)	2 1/2 (6.35)	3 (7.62)	4 (10.16)	3 (7.62)	4 (10.16)	5 (12.70)	6 (15.24)	6 (15.24)	7 (17.78)	8 (20.32)	9 (22.86)	10 (25.40)	
1 (2.54)	0.47	0.59	0.85	1.00	1.25	2.10	1.46	2.14	2.90	3.62						
1 1/2 (3.81)	0.49	0.64	0.90	1.08	1.34	2.20	1.51	2.28	3.10	3.85						
2 (5.08)	0.54	0.70	1.0*	1.15	1.44	2.25	1.56	2.35	3.20	4.00						
2 1/2 (6.35)	0.60	0.78	1.09	1.26	1.55	2.55	1.64	2.45	3.30	4.20						
3 (7.62)	0.67	0.86	1.18	1.37	1.71	2.75	1.74	2.60	3.50	4.35						
4 (10.16)	0.75	0.96	1.31	1.60	1.90	2.90	1.93	2.88	3.80	4.85	5.10	6.25	7.40	8.60	9.70	
5 (12.70)	0.83	1.05	1.46	1.73	2.10	3.10	2.15	3.20	4.20	5.30	5.50	6.70	8.00	9.20	10.40	
6 (15.24)	0.92	1.15	1.66	1.90	2.30	3.30	2.39	3.45	4.50	5.62	5.80	7.20	8.50	9.90	11.20	
8 (20.32)		1.35	1.95	2.40	2.83	3.80	2.89	4.00	5.20	6.80	6.70	8.20	9.70	11.20	12.60	
10 (25.40)		1.70	2.35	2.85	3.30	4.35	3.23	4.60	6.00	7.40	7.70	9.50	11.20	12.00	14.60	
12 (30.48)		2.10	2.62	3.15	3.67	4.80	3.41	5.20	6.70	8.40	8.50	10.40	12.30	14.20	16.10	
14 (35.56)		2.43	2.96	3.50	4.05	5.25	3.74	5.55	7.30	9.10	9.20	11.20	13.20	15.20	17.20	
16 (40.64)		2.80	3.20	3.90	4.55	5.90	4.35	6.20	8.00	9.90	9.70	12.00	14.20	16.50	18.70	
18 (45.72)		3.15	3.60	4.25	5.00	6.20	4.65	6.60	8.60	10.70	10.50	12.90	15.30	17.70	20.00	
20 (50.80)		3.50	3.90	4.60	5.35	6.80	4.72	7.20	9.40	11.75	11.50	14.00	16.60	19.00	21.50	
24 (60.96)		4.00	4.40	5.20	6.00	7.75	5.70	8.30	10.80	13.40	13.20	16.20	19.20	22.00	24.50	
30 (76.20)			5.70	6.75	8.00	10.00	7.95	10.50	13.20	16.00	15.50	18.30	21.10	24.00	26.80	
36 (91.44)			6.70	8.00	9.60	12.40	9.90	13.00	16.00	19.00	18.00	21.50	24.60	28.00	31.50	
Superficie Plana	0.70	0.84	1.0*	1.17	1.35	1.70	1.37	1.75	2.10	2.50	2.55	2.95	3.35	3.75	4.15	

* Ref. (5), Pág. 44

RAZÓN DE PRECIOS DE VENTA UNITARIOS DEL MATERIAL
(LANA MINERAL DEFORMADA)

Diámetro de la Tubería Pulg. (cm)	ESPESOR DE AISLAMIENTO, PULG (CM.)														
	CAPA SIMPLE						CAPA DOBLE					CAPA TRIPLE			
	1 (2.54)	1 1/2 (3.81)	2 (5.08)	2 1/2 (6.35)	3 (7.62)	4 (10.16)	3 (7.62)	4 (10.16)	5 (12.70)	6 (15.24)	6 (15.24)	7 (17.78)	8 (20.32)	9 (22.86)	10 (25.40)
1 (2.54)	0.42	0.59	0.85	1.07	1.33	2.96	1.48	2.05	2.81	3.67					
1 1/2 (3.81)	0.44	0.67	0.94	1.16	1.45	2.04	1.59	2.15	2.96	3.83					
2 (5.08)	0.50	0.72	1.0*	1.22	1.55	2.11	1.67	2.24	3.11	3.67					
2 1/2 (6.35)	0.55	0.79	1.06	1.36	1.69	2.20	1.78	2.36	3.31	4.24					
3 (7.62)	0.61	0.86	1.15	1.49	1.89	2.33	1.90	2.51	3.52	4.48					
4 (10.16)	0.77	1.01	1.29	1.71	2.22	2.71	2.15	2.79	3.95	4.71	4.87	5.60	6.38	7.15	7.92
5 (12.70)	0.89	1.14	1.44	1.92	2.46	3.05	2.34	3.08	4.29	5.01	5.03	5.81	6.60	7.40	8.20
6 (15.24)	1.02	1.24	1.56	2.08	2.76	3.23	2.77	3.33	4.61	5.37	5.41	6.21	7.02	7.80	8.57
8 (20.32)	1.25	1.39	1.81	2.31	3.07	3.69	3.01	3.79	5.19	6.06	6.30	7.23	8.11	8.99	9.86
10 (25.40)		1.63	2.13	2.72	3.48	4.26	3.45	4.42	5.77	6.89	7.10	8.20	9.32	10.42	11.54
12 (30.48)		1.80	2.43	3.09	3.83	4.69	3.91	4.97	6.32	7.76	7.43	9.30	10.72	12.11	13.51
14 (35.56)		2.13	2.66	3.37	4.17	5.21	4.18	5.40	6.85	8.40	9.52	10.01	11.52	13.05	14.55
16 (40.64)		2.33	2.91	3.60	4.55	5.42	4.56	5.86	7.38	9.10	9.10	10.79	12.46	14.15	15.89
18 (45.72)		2.54	3.14	3.95	4.92	5.98	4.96	6.26	7.97	9.58	9.62	11.35	13.08	14.78	16.52
20 (50.80)		2.86	3.51	4.32	5.43	6.35	5.52	6.71	8.55	10.16	10.22	12.00	13.77	15.62	17.42
24 (60.96)		3.36	3.97	4.96	6.22	6.90	6.35	7.38	9.38	11.12	11.14	12.91	14.73	16.60	18.40
30 (76.20)		4.13	4.72	5.77	7.31	7.63	7.62	8.48	10.65	12.72	12.75	14.68	16.75	18.74	21.70
36 (91.44)		4.71	5.28	6.26	7.81	8.53	9.22	9.27	11.46	13.65	13.70	15.87	18.25	20.54	23.94
Superficie Plana	0.70	0.86	1.0*	1.16	1.13	1.80	1.36	1.72	1.94	2.25	2.35	2.67	2.96	3.24	3.52

* Ref. (5), Pág. 45

RAZON DE PRECIOS DE VENTA UNITARIOS DEL MATERIAL

(FIBRA DE VIDRIO PREFORMADO)*

DIAMETRO DE LA TUBERIA Pug. (cm)	ESPESOR DE AISLAMIENTO, PULG (CM)															
	CAPA SIMPLE						CAPA DOBLE				CAPA TRIPLE					
	1 (2.54)	1 1/2 (3.81)	2 (5.08)	2 1/2 (6.35)	3 (7.62)	4 (10.16)	3 (7.62)	4 (10.16)	5 (12.70)	6 (15.24)	6 (15.24)	7 (17.78)	8 (20.32)	9 (22.86)	10 (25.40)	
1 (2.54)	0.37	0.59	0.86	1.01	1.16	2.11	1.38	2.14	2.80	3.65						
1 1/2 (3.81)	0.43	0.66	0.94	1.08	1.24	2.20	1.43	2.25	3.00	3.75						
2 (5.08)	0.47	0.72	1.0*	1.17	1.34	2.26	1.50	2.31	3.10	3.90						
2 1/2 (6.35)	0.52	0.78	1.06	1.27	1.48	2.34	1.66	2.48	3.27	4.10						
3 (7.62)	0.57	0.83	1.15	1.40	1.64	2.45	1.77	2.59	3.40	4.25						
4 (10.16)	0.71	0.94	1.32	1.60	1.90	2.66	1.90	2.85	3.75	4.65	4.85	6.20	7.55	8.90	10.3	
5 (12.70)	0.80	1.04	1.48	1.80	2.14	3.01	2.15	3.10	4.05	5.00	5.25	6.68	8.10	9.53	10.9	
6 (15.24)	0.88	1.10	1.54	1.94	2.28	3.25	2.30	3.30	4.36	5.35	5.60	7.10	8.60	10.10	11.6	
8 (20.32)	1.18	1.40	1.88	2.30	2.74	3.51	2.75	3.90	5.00	6.15	6.40	8.13	9.85	11.60	13.3	
10 (25.40)		1.58	2.13	2.72	3.20	4.26	3.15	4.35	5.60	6.80	6.88	8.68	10.50	12.30	14.0	
12 (30.48)		1.88	2.50	3.03	3.55	4.61	3.50	4.90	6.25	7.60	7.65	9.70	11.70	13.70	15.8	
14 (35.56)		2.10	2.75	3.34	3.93	5.21	4.00	5.40	6.85	8.30	8.35	10.50	12.70	14.90	17.0	
16 (40.64)		2.34	3.00	3.70	4.35	5.53	4.35	5.95	7.50	9.10	9.10	11.50	13.90	16.30	18.7	
18 (45.72)		2.58	3.32	4.04	4.78	6.18	4.75	6.45	8.20	9.90	9.90	12.50	15.00	17.60	20.0	
20 (50.80)		2.83	3.64	4.38	5.10	6.62	5.15	6.95	8.75	10.60	10.28	13.00	15.80	18.60	21.4	
24 (60.96)		3.35	4.10	4.82	5.62	7.17	5.85	7.90	9.98	12.00	12.00	15.00	18.00	21.00	24.0	
30 (76.20)		4.00	4.76	5.70	6.50	7.80	6.80	8.96	11.13	13.30	13.30	16.60	19.80	23.00	26.0	
36 (91.44)		4.60	5.30	6.20	7.00	8.64	7.30	9.63	11.96	14.30	14.30	17.80	21.30	24.80	28.0	
Superficie Plana	0.73	0.86	1.0*	1.18	1.37	1.83	1.39	1.54	1.94	2.19	2.23	2.55	2.84	3.12	3.39	

* Ref.(5) Pag. 46

RAZÓN DE PRECIOS DE VENTA UNITARIOS DEL MATERIAL
(VIDRIO CELULAR)*

DIAMETRO DE LA TUBERIA Pulg (cm)	ESPESOR DE AISLAMIENTO, PULG (CM.)														
	CAPA SIMPLE						CAPA DOBLE				CAPA TRIPLE				
	1 (2.54)	1 1/2 (3.81)	2 (5.08)	2 1/2 (6.35)	3 (7.62)	4 (10.16)	3 (7.62)	4 (10.16)	5 (12.70)	6 (15.24)	6 (15.24)	7 (17.78)	8 (20.32)	9 (22.86)	10 (25.40)
1 (2.54)	0.35	0.57	0.85	1.05	1.25	2.15	1.40	2.30	3.10	3.95					
1 1/2 (3.81)	0.40	0.64	0.93	1.14	1.35	2.25	1.50	2.40	3.25	4.15					9.2
2 (5.08)	0.46	0.70	1.0*	1.22	1.45	2.35	1.60	2.50	3.40	4.27					
2 1/2 (6.35)	0.52	0.78	1.08	1.31	1.54	2.45	1.70	2.60	3.60	4.50					
3 (7.62)	0.59	0.85	1.15	1.39	1.63	2.58	1.80	2.80	3.80	4.80					
4 (10.16)	0.70	0.95	1.32	1.60	1.90	2.92	1.90	2.98	4.07	5.15	5.20	6.20	7.20	8.20	9.20
5 (12.70)	0.77	1.05	1.50	1.85	2.20	3.20	2.10	3.23	4.36	5.50	5.50	6.60	7.70	8.80	9.90
6 (15.24)	0.91	1.18	1.58	2.06	2.46	3.40	2.30	3.50	4.70	5.90	6.00	7.30	8.50	9.80	11.00
8 (20.32)		1.42	1.94	2.39	2.84	3.80	2.50	3.90	5.30	6.75	6.90	8.30	9.60	11.00	12.30
10 (25.40)		1.70	2.25	2.76	3.20	4.20	2.90	4.40	6.00	7.50	7.75	9.20	10.60	12.00	13.40
12 (30.48)		2.00	2.60	3.10	3.60	4.60	3.30	5.00	6.70	8.40	8.60	10.20	11.80	13.40	15.00
14 (35.56)		2.32	2.85	3.48	4.04	5.20	3.80	5.60	7.50	9.30	9.30	11.10	12.90	14.70	16.50
16 (40.64)		2.50	3.15	3.75	4.34	5.60	4.30	6.30	8.20	10.20	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00
18 (45.72)		2.65	3.40	4.20	4.80	6.20	4.90	6.90	9.00	11.00	10.80	13.00	15.20	17.40	19.60
20 (50.80)		2.90	3.65	4.45	5.30	6.90	5.40	7.50	9.70	11.80	11.70	14.10	16.50	18.90	21.30
24 (60.96)		3.36	4.20	5.15	6.10	8.00	6.30	8.60	10.90	13.80	14.00	16.80	19.60	22.40	25.00
30 (76.20)		3.90	4.90	6.00	7.10	9.30	7.70	10.30	12.90	15.50	17.00	20.00	23.00	26.00	29.00
36 (91.44)		4.60	5.70	7.00	8.20	10.50	9.20	12.00	14.70	17.50	20.00	24.00	28.00	32.00	36.00
Superficie Plana	0.68	0.84	1.0*	1.16	1.32	1.64	1.36	1.68	2.04	2.36	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60

* Ref. (5), Pág. 47

TABLA 4.9

PRODUCTIVIDAD DE UN TRABAJADOR BASE*
 (Tubería-h-hom/m-lin; Superf. Planas-h-homb/m²)

DIAMETRO DE LA TUBERIA Pulg. (cm)	ESPESOR DE AISLAMIENTO, PULG (CM.)															
	CAPA SIMPLE						CAPA DOBLE					CAPA TRIPLE				
	1 (2.54)	1 1/2 (3.31)	2 (5.08)	2 1/2 (6.35)	3 (7.62)	4 (10.16)	3 (7.62)	4 (10.16)	5 (12.70)	6 (15.24)	6 (15.24)	7 (17.78)	8 (20.32)	9 (22.86)	10 (25.40)	
1 (2.54)	0.37	0.40	0.44	0.48	0.51	0.58	0.69	0.84	0.98	1.13						
1 1/2 (3.81)	0.38	0.42	0.46	0.49	0.53	0.61	0.71	0.85	1.00	1.15						
2 (5.08)	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56	0.64	0.75	0.90	1.06	1.21						
2 1/2 (6.35)	0.42	0.47	0.51	0.55	0.59	0.68	0.79	0.92	1.08	1.28						
3 (7.62)	0.45	0.49	0.54	0.58	0.63	0.72	0.82	0.98	1.16	1.34						
4 (10.16)	0.48	0.53	0.58	0.63	0.68	0.79	0.87	1.05	1.23	1.41	1.64	1.87	2.07	2.30	2.53	
5 (12.70)	0.51	0.57	0.62	0.68	0.74	0.86	0.95	1.13	1.31	1.49	1.77	2.00	2.23	2.46	2.70	
6 (15.24)	0.56	0.62	0.68	0.74	0.81	0.93	1.05	1.23	1.43	1.59	1.90	2.13	2.39	2.62	2.85	
8 (20.32)		0.69	0.75	0.82	0.89	1.02	1.17	1.36	1.55	1.74	2.16	2.39	2.66	2.92	3.12	
10 (25.40)		0.75	0.83	0.90	0.97	1.12	1.27	1.49	1.71	1.93	2.43	2.66	2.92	3.15	3.38	
12 (30.48)		0.82	0.90	0.98	1.06	1.21	1.41	1.64	1.87	2.10	2.69	2.92	3.18	3.41	3.64	
14 (35.56)		0.91	0.99	1.07	1.15	1.33	1.62	1.87	2.12	2.36	2.95	3.21	3.48	3.74	4.00	
16 (40.64)		1.01	1.11	1.20	1.29	1.48	1.84	2.10	2.36	2.62	3.21	3.48	3.77	4.03	4.30	
18 (45.72)		1.12	1.22	1.32	1.41	1.61	1.95	2.23	2.51	2.79	3.54	3.84	4.13	4.43	4.72	
20 (50.80)		1.26	1.37	1.47	1.57	1.77	2.07	2.39	2.72	3.05	3.94	4.26	4.59	4.92	5.25	
24 (60.96)		1.41	1.54	1.66	1.78	2.03	2.36	2.79	3.21	3.61	4.59	5.02	5.48	5.90	6.33	
30 (76.20)		1.97	2.13	2.30	2.46	2.79	3.12	3.61	4.10	4.59	5.41	6.07	6.72	7.38	8.04	
36 (91.44)		2.30	2.56	2.82	3.08	3.61	3.87	4.43	5.02	5.58	6.23	6.95	7.68	8.40	9.12	
Superficie Plana		1.40	1.49	1.57	1.66	1.74	2.20	2.37	2.53	2.69	3.12	3.26	3.40	3.55	3.69	

* Ref. (5), Pág. 49

TABLA 4.6

FACTOR DE CORRECCIÓN SEGÚN EL MATERIAL*

TIPO DE MATERIAL AISLANTE	FACTOR DE CORRECCIÓN, F_T	
	TUBERÍA	SUPERFICIE PLANA
Silicato de Calcio	1.00	1.00
Fibra de vidrio preformada	0.85	0.90
Lana mineral preformada	0.90	0.95
Vidrio celular	1.15	1.10

* Ref. (5), Pág. 48

TABLA 4.7

FACTOR DE COMPLEJIDAD PARA TUBERÍA (PC)*

DIAMETRO DEL TUBO (Pulg.) (cm.)		COMPLEJIDAD DE LA TUBERÍA		
		COMPLEJA	PROMEDIO	SIMPLE
0.5 - 1.5	1.27 - 3.81	1.60	1.30	1.20
2 - 3	5.08 - 7.62	1.35	1.20	1.15
3 - 6	7.62 - 15.24	1.25	1.15	1.10
8 - 12	20.32 - 32.48	1.28	1.15	1.12
14 y mayor	35.56 y mayor	1.30	1.20	1.15

*Ref (5), Pág. 38

CAPITULO V

DETERMINACION DE ESPESORES OPTIMOS DE AISLAMIENTO

5.1 CONSIDERACIONES GENERALES

El grosor que se requiere de aislamiento para cualquier aplicación específica depende las características del material aislante y de la finalidad del sistema a aislar.

Los costos involucrados en el aislamiento de cualquier equipo, tubos, ductos, tanques, depósitos, etc., deben ser de consideración cuidadosa para garantizar la magnitud de el tipo y cantidad de aislamiento a ser usado. Los costos que deben considerarse son:

- 1.- El costo de la pérdida térmica del sistema durante su período de uso.
- 2.- El costo del sistema de aislamiento durante el mismo período.

En instalaciones grandes, la aplicación de aislamiento térmico involucra grandes inversiones de capital; por lo tanto, debe conseguirse el mínimo costo total, lo cual se logra aplicando un espesor adecuado que se conoce como el "espesor económico". Este espesor está definido como el valor anual mínimo de la suma del costo de aislamiento más el costo de pérdida de calor, o en términos más generales, como el espesor de un aislamiento dado que ahorraría el mayor costo de energía a la vez que se pagará por si mismo dentro de un periodo asignado de tiempo.

Esto es fácilmente deducible ya que, cuanto mayor sea la cantidad de aislamiento aplicado, mayor será el costo del propio aislamiento, pero más reducida resultará la cantidad de pérdida térmica. Por lo tanto, para un determinado sistema existirá algún "espesor óptimo de aislamiento" por encima del cual el costo de cualquier incremento posterior no resultará justificable por el calor adicional ahorrado. Este espesor óptimo es conocido comunmente como el espesor económico.

La suma de los costos de aislamiento y de calor puede representarse gráficamente como se indica en la Fig. 5.1 y debe comprenderse que el espesor óptimo obtenido está referido únicamente al sistema que se esté consi-

derando. Los costos asociados con el espesor óptimo para otros sistemas pueden resultar bien diferentes; es por esta razón, que deben deducirse y compararse los costos a nivel del espesor óptimo para los sistemas distintos. Además, puesto que las variaciones en el costo de aislamiento y en la conductividad térmica influyen en el costo total, en la práctica, no deben seleccionarse los materiales sólo sobre la base del costo total, ya que pueden resultar más importantes otras consideraciones tales como: 1) la necesidad de controlar la temperatura del sistema para un valor especificado, 2) protección de personal, 3) la estructura y forma física del material aislante, o 4) las propiedades del material aislante.

En la Fig. 5.1 podemos observar que a bajos valores de espesores, el costo anual amortizado de aislamiento es bajo, pero el costo anual de energía calorífica es alto. Los espesores adicionales añadidos al costo de aislamiento, sólo reducen la pérdida de energía calorífica y, por lo tanto, su costo. A un mismo valor de espesor de aislamiento, la suma del costo de aislamiento y el costo de pérdida de calor será un mínimo, como está indicado por la curva C, la cual es obtenida por adición de la curva A y la curva B en la Fig. 5.1. Más allá del

mínimo la curva C aumenta ya que el costo de aislamiento incrementado no es mayormente compensado por la reducción del costo de pérdida de calor. En la curva C, la cantidad de ahorros en el costo total decrece por cada incremento de 1.27 cm. (1/2 pulgada) de aislamiento adicionado; por lo tanto, aunque la curva C puede volverse hacia arriba justo después de que un incremento de aislamiento es aplicado, es práctica recomendable ir al incremento próximo teniendo cuidado de los aumentos futuros en los costos de combustible.

Valor económico de las pérdidas de calor:

El valor económico anual de las pérdidas de calor en un sistema de aislamiento es la cantidad de calor perdido por hora desde la superficie exterior del aislamiento por las horas anuales de operación y los sucesos por unidad de calor. Esto es:

Para aislamientos sobre superficies planas

$$m_s = U_s \cdot y \cdot M \cdot 10^6 \quad \$/\text{año} \cdot \text{m}^2 \quad (5.4.a)$$

U_s , está dado por las ecuaciones (2.18) y (2.23)

y, son las horas de operación anual, hr/año

M, es el costo promedio de suministrar las Kcals perdidas ($\$/10^6$ Kcal) durante el período económico que está siendo considerado. Se determina por la ecuación (3.10)

Para aislamiento sobre superficies cilíndricas

$$m_p = U_p \cdot y \cdot M \cdot 10^6 \quad \$/\text{año} \cdot \text{m} \cdot \text{lin} \quad (5.4.b)$$

U_p está dado por las ecuaciones (2.28) y (2.34)

Esto representa el costo anual de la pérdida de calor en el sistema dado. Este costo sería adicionado al costo anual del sistema de aislamiento, de modo que el costo anual mínimo puede ser determinado con el espesor de aislamiento como la variable simple.

Costo de aislamiento:

El costo anual del sistema de aislamiento fue analizado en el Capítulo IV y está caracterizado por:

$$C_i = 1.1 m_c B_3 w + 1.1 B_3 d \quad (5.5)$$

Costo Total:

El costo total anual de la pérdida de calor y aislamien-

to aplicado es la suma de los dos costos determinados por las ecuaciones (5.4) y (5.5).

$$C_s = m_s + c_i \quad (5.6.a)$$

$$C_p = m_p + c_i \quad (5.6.b)$$

Estas ecuaciones pueden ser ilustradas por la Fig. 5.1

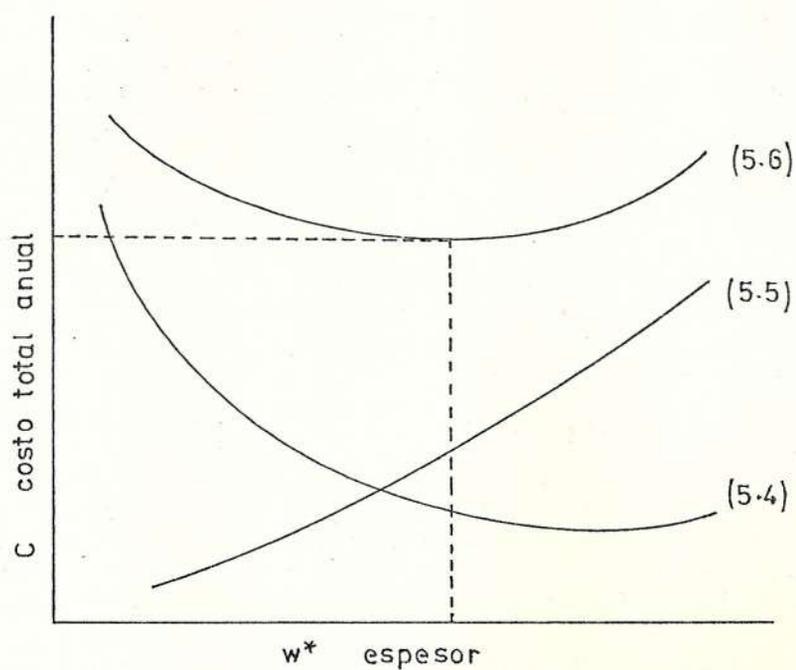


Fig. 5.1.- Curvas Básicas de Espesor Optimo

* w para tuberías es tomado a un r_1 fijo.

El punto mínimo de la Ec. 5.6 puede ser determinado tomando el diferencial dc/dw e igualando a cero, este punto definirá el espesor más económico o espesor óptimo de aislamiento.

5.2 ESPESORES OPTIMOS PARA AISLAMIENTO SIMPLE

En este tipo de sistemas, el análisis de la transferencia de calor se hizo bajo las siguientes asunciones, las mismas que deberán ser tomadas en cuenta para la determinación de espesores óptimos de aislamiento.

1. k es la conductividad térmica a la temperatura media a través del aislamiento. Esto es, k deberá ser tomada a la temperatura $(T_p + T_a)/2$.
2. ΔT_t es la diferencia de temperaturas entre el proceso desarrollado en el sistema a ser aislado T_p , y la temperatura del aire ambiente, T_a .
3. No se considera la caída de temperatura a lo largo de una tubería.

5.2.1 Sistemas de Aislamiento para Superficies Planas

La pérdida de calor por unidad de área exterior está dada por la ecuación

$$U_s = \frac{k \Delta T_t}{w + kR_s} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2}$$

El costo anual de la pérdida de calor según la Ec. 5.4a será entonces:

$$m_s = \frac{k \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M \cdot 10^6}{w + kR_s} \quad \frac{\text{S/.}}{\text{año m}^2}$$

haciendo

$$D_s = k \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M \cdot 10^6 \quad (5.7)$$

entonces

$$m_s = \frac{D_s}{w + kR_s} \quad \frac{\text{S/.}}{\text{año.m}^2} \quad (5.8)$$

El costo anual de aislamiento instalado para un sistema de aislamiento simple para superficies planas es:

$$c_i = 1.1m_c B_3 w + 1.1B_3 d \quad (5.9)$$

Luego, el costo total anual de la pérdida de calor y del aislamiento instalado será:

$$C_S = \frac{D_S}{w + kR_S} + 1.1m_C \cdot B_3 w + 1.1B_3 d \quad (5.10)$$

Diferenciando con respecto a (w), e igualando a cero para identificar el punto mínimo de la curva tenemos:

$$\frac{dC_S}{dw} = 0 = \frac{-D_S}{(w + kR_S)^2} + 1.1m_C \cdot B_3$$

haciendo

$$Z_S = \frac{D_S}{1.1m_C B_3} \quad (5.11)$$

nos queda

$$(w + kR_S)^2 = Z_S \quad (5.12)$$

Ahora, la Ec. 5.12 puede ser graficada haciendo variar w para distintos valores de kR_S , Fig. 5.2a. Así, cuando Z_S haya sido determinado de la Ec. 5.11 y R_S haya sido seleccionado, el espesor de costo mínimo puede ser escogido de la curva correspondiente.

5.2.2 Sistemas de Aislamiento para Superficies Cilíndricas (Tubos).

La pérdida de calor por metro lineal de tubo aislado está dada por la ecuación

$$U_p = \frac{6.28 \cdot 10^{-2} \cdot k \cdot \Delta T_t \cdot r}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + kR_s} \quad \frac{\text{S/}}{\text{h.m.lin}}$$

El costo anual de la pérdida de calor según la Ec. 5.4b será entonces:

$$m_p = \frac{6.28 \cdot 10^{-2} \cdot k \cdot \Delta T_t \cdot r \cdot y \cdot M \cdot 10^{-6}}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + kR_s} \quad \frac{\text{S/}}{\text{año.m.lin}}$$

haciendo

$$D_p = 6.28 \cdot 10^{-8} \cdot k \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M \quad (5.13)$$

entonces

$$m_p = \frac{D_p \cdot r_2}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + kR_s} \quad \frac{\text{S/}}{\text{año.m.lin}} \quad (5.14)$$

El costo anual de aislamiento instalado para un sistema de aislamiento simple para superficies cilíndricas es:

$$c_i = 1.1m_c \cdot B_3 \cdot (r_2 - r_1) + 1.1 \cdot B_3 \cdot d \quad (5.15)$$

Luego, el costo total anual de la pérdida de calor y del aislamiento instalado será:

$$c_p = \frac{D_p \cdot r}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + kR_s} + 1.1 \cdot m_c \cdot B_3 (r_2 - r_1) + 1.1 \cdot B_3 \cdot d \quad (5.16)$$

Diferenciando con respecto a (r_2) , e igualando a cero para identificar el punto mínimo de la curva tenemos:

$$\frac{dc_p}{dr_2} = 0 = \frac{Dr (kR_s - r_2)}{(r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + kR_s)^2} + 1.1 m_c \cdot B_3$$

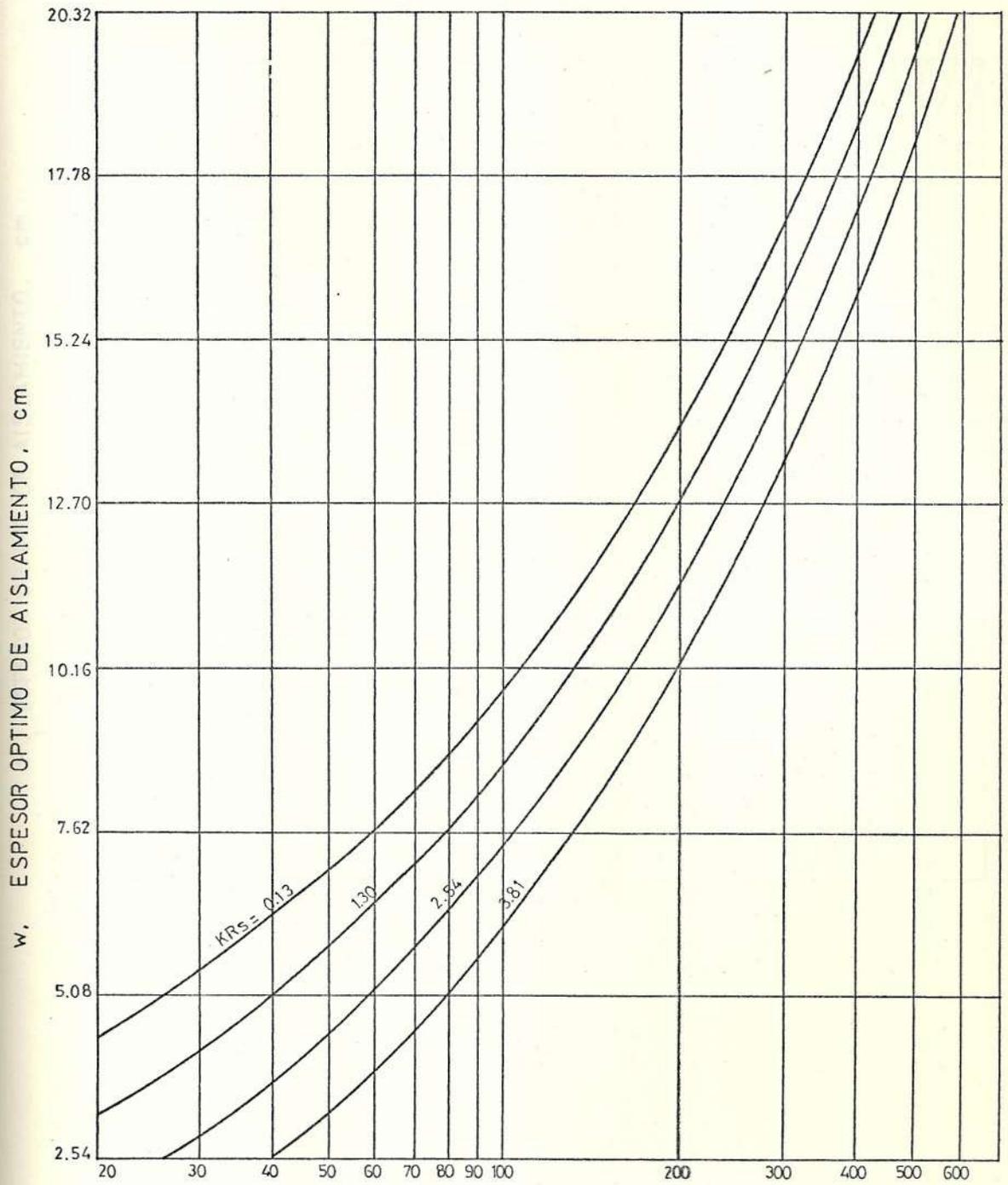
haciendo

$$Z_p = \frac{Dp}{1.1 m_c \cdot B_3} \quad (5.17)$$

nos queda

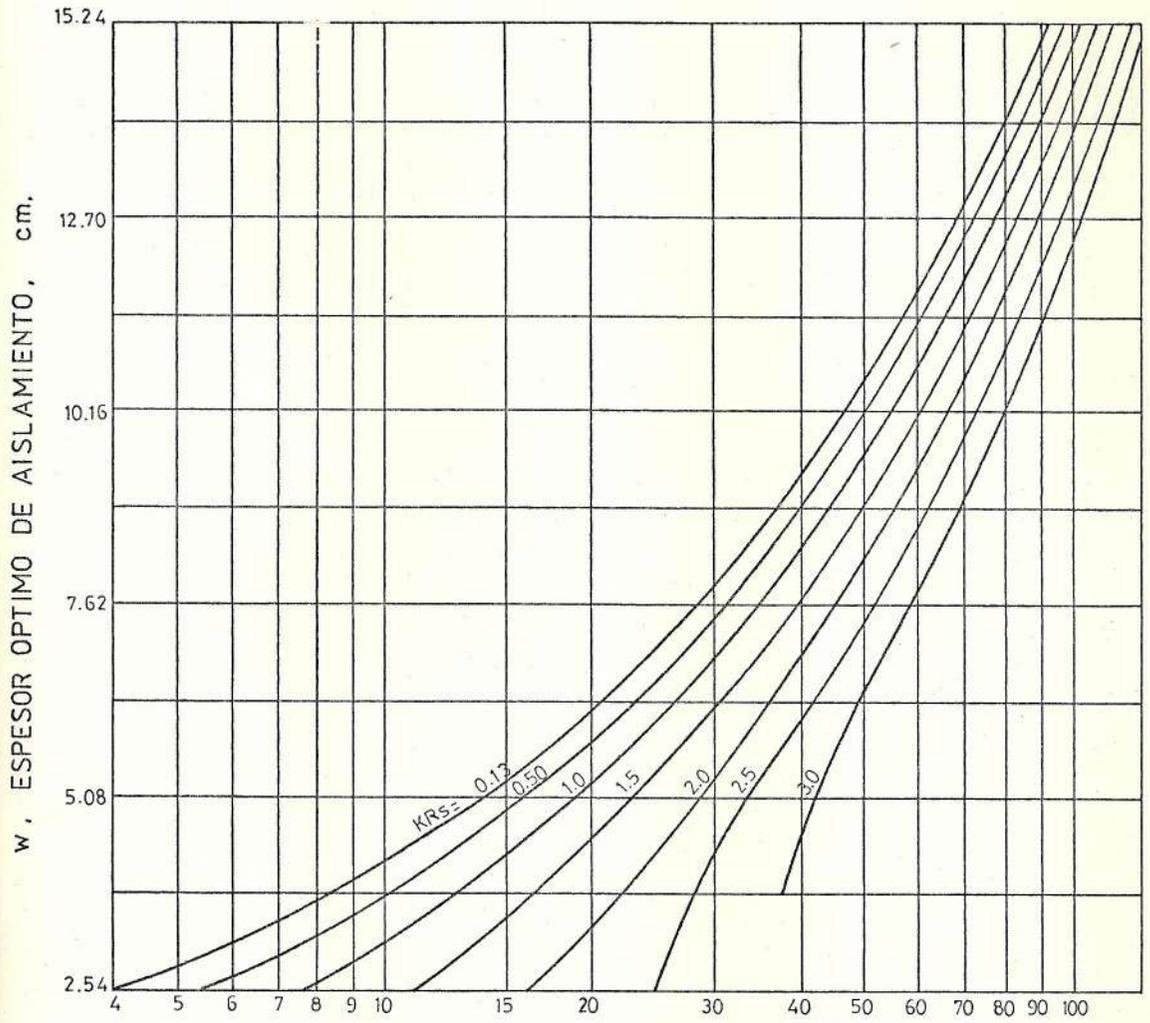
$$\frac{(r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + kR_s)^2}{r_2 - kR_s} = Z_p \quad (5.18)$$

La Ec. 5.18 puede ahora ser graficada para cada uno de los diámetros de tubos (r_1) , haciendo variar r_2 para distintos valores de kR_s , Figs.5.2.



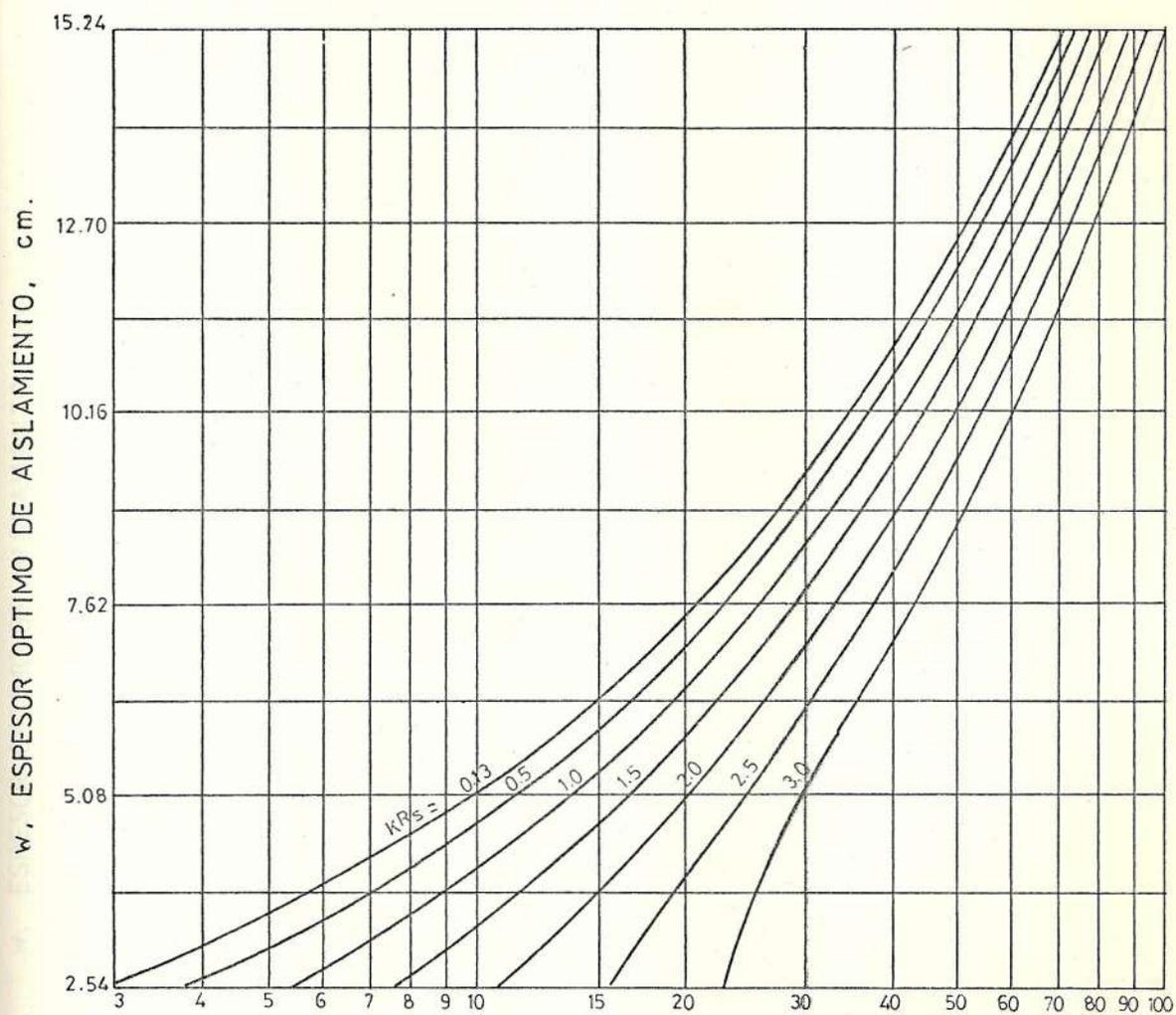
$$Z_s = \frac{D_s}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2a ESPESOR OPTIMO PARA SUPERFICIES PLANAS (cm)



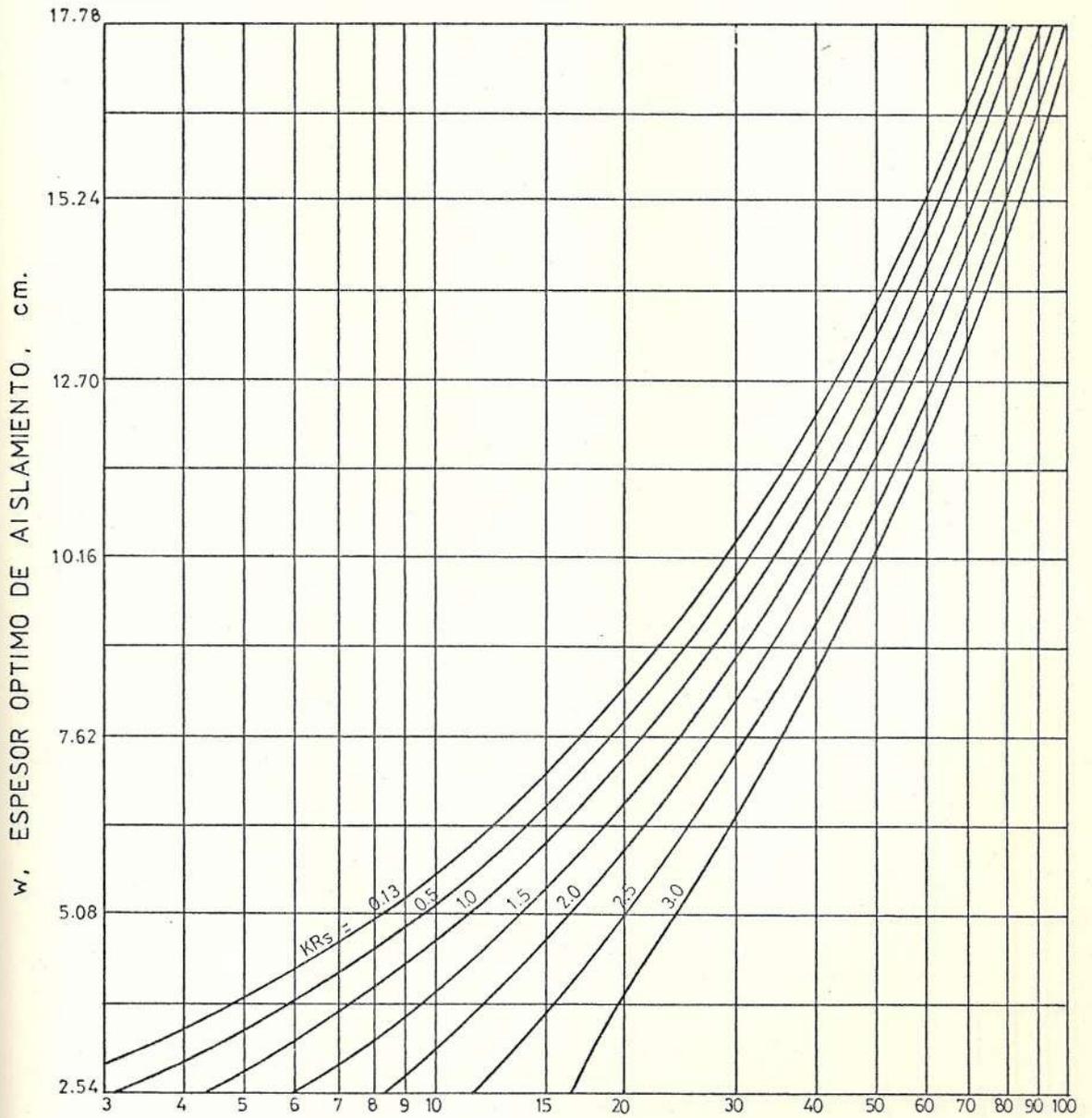
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2b ESPESOR OPTIMO, TUBO 2.54 cm. (1 pul.)



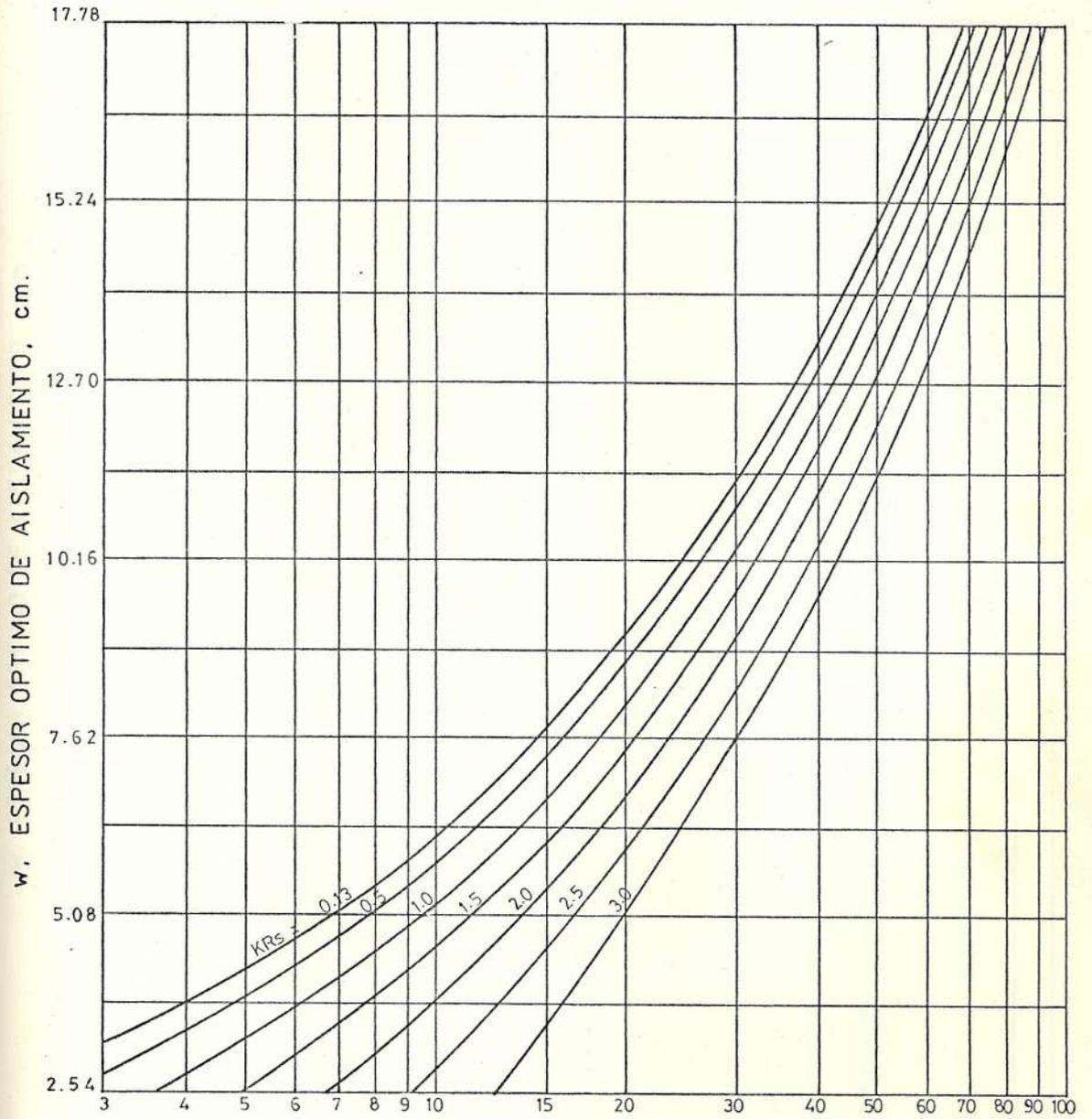
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1m_c B_3}$$

fig. 5-2c ESPESOR OPTIMO, TUBO 3.81 cm. (1 1/2 pul.)



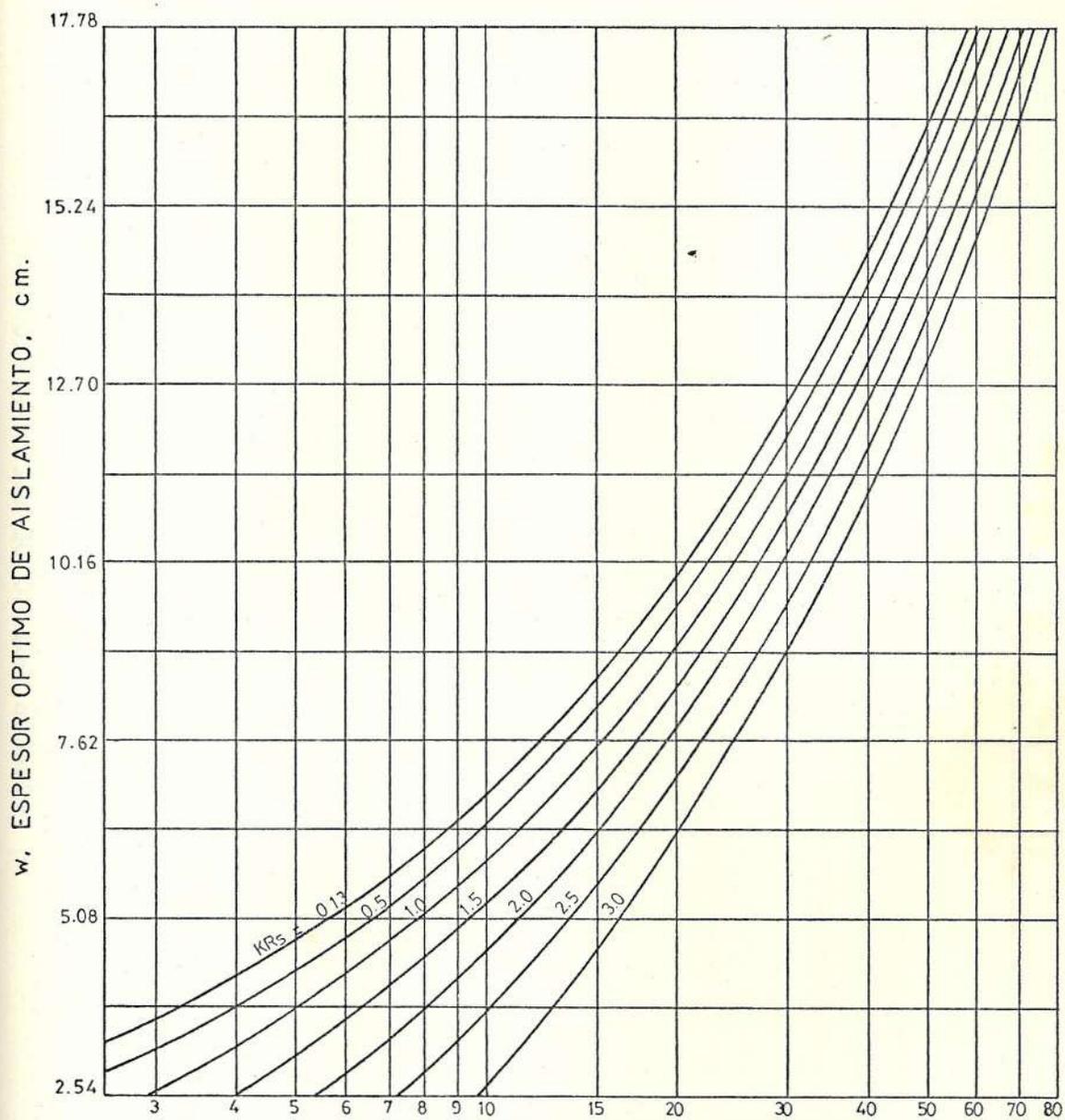
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2d ESPESOR OPTIMO, TUBO 5.08 cm. (2 pul.)



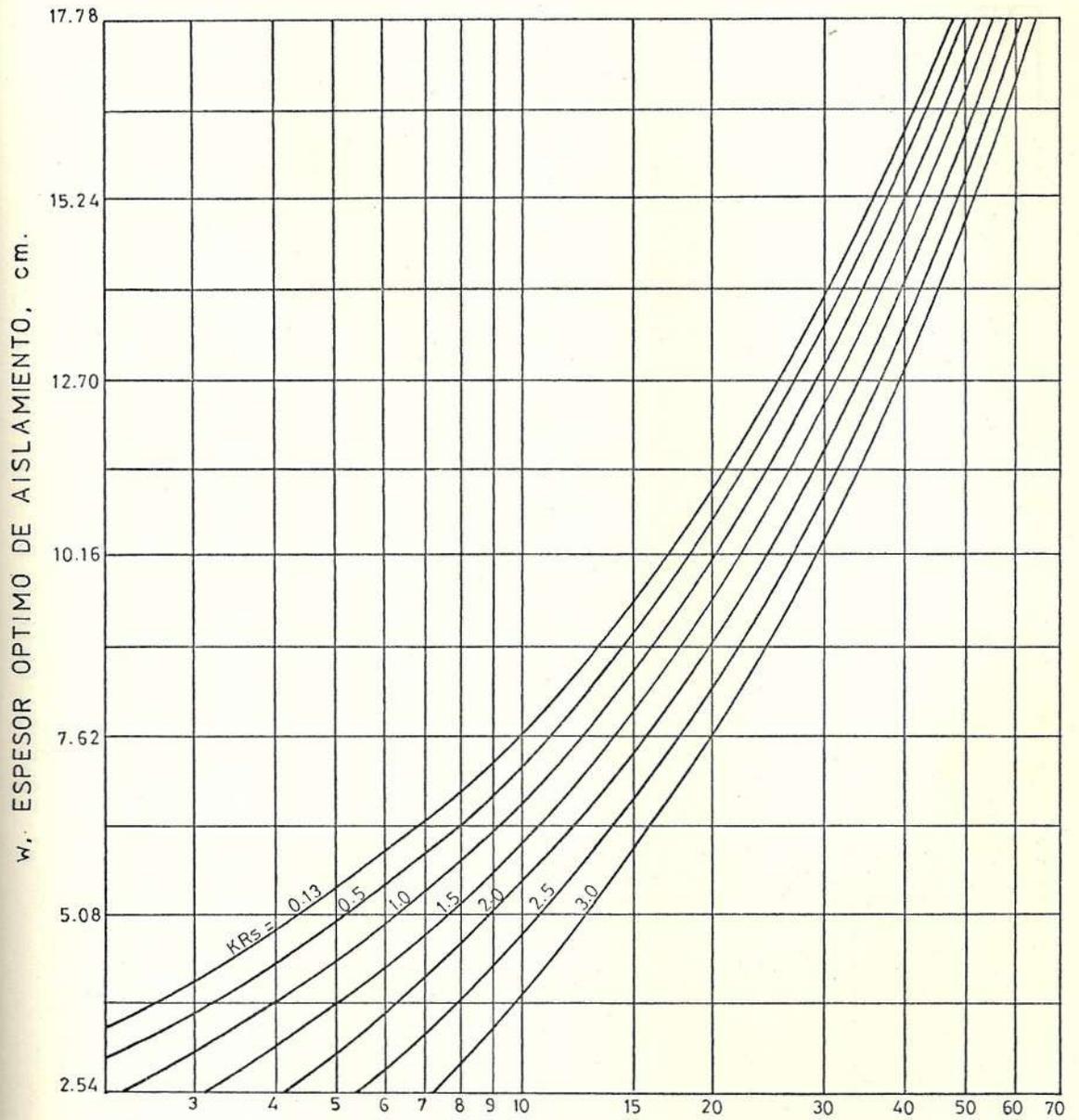
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2e ESPESOR OPTIMO, TUBO 6.35 cm. (2 1/2 pul.)



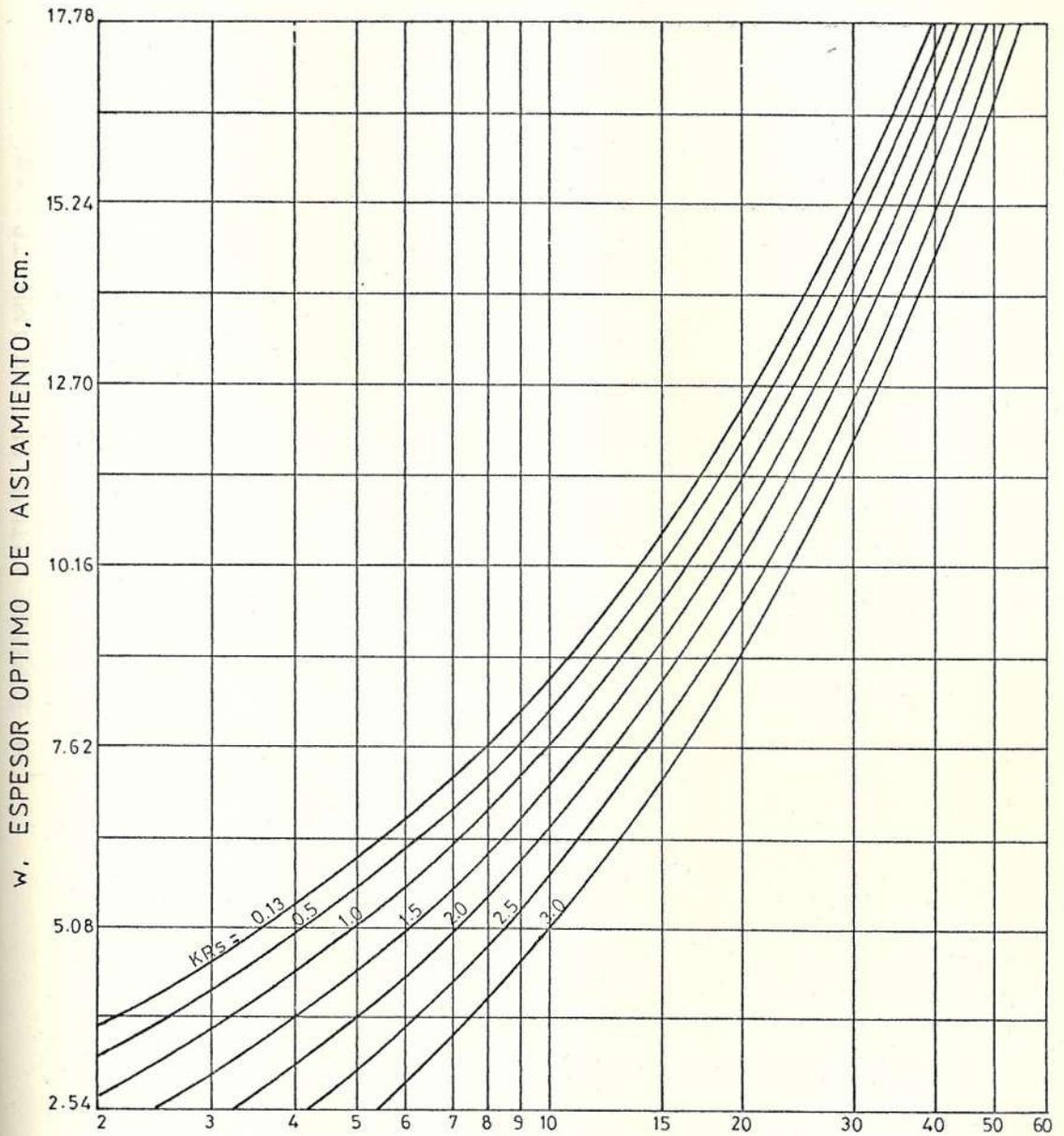
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2f ESPESOR OPTIMO, TUBO 7.62 cm. (3 pul.)



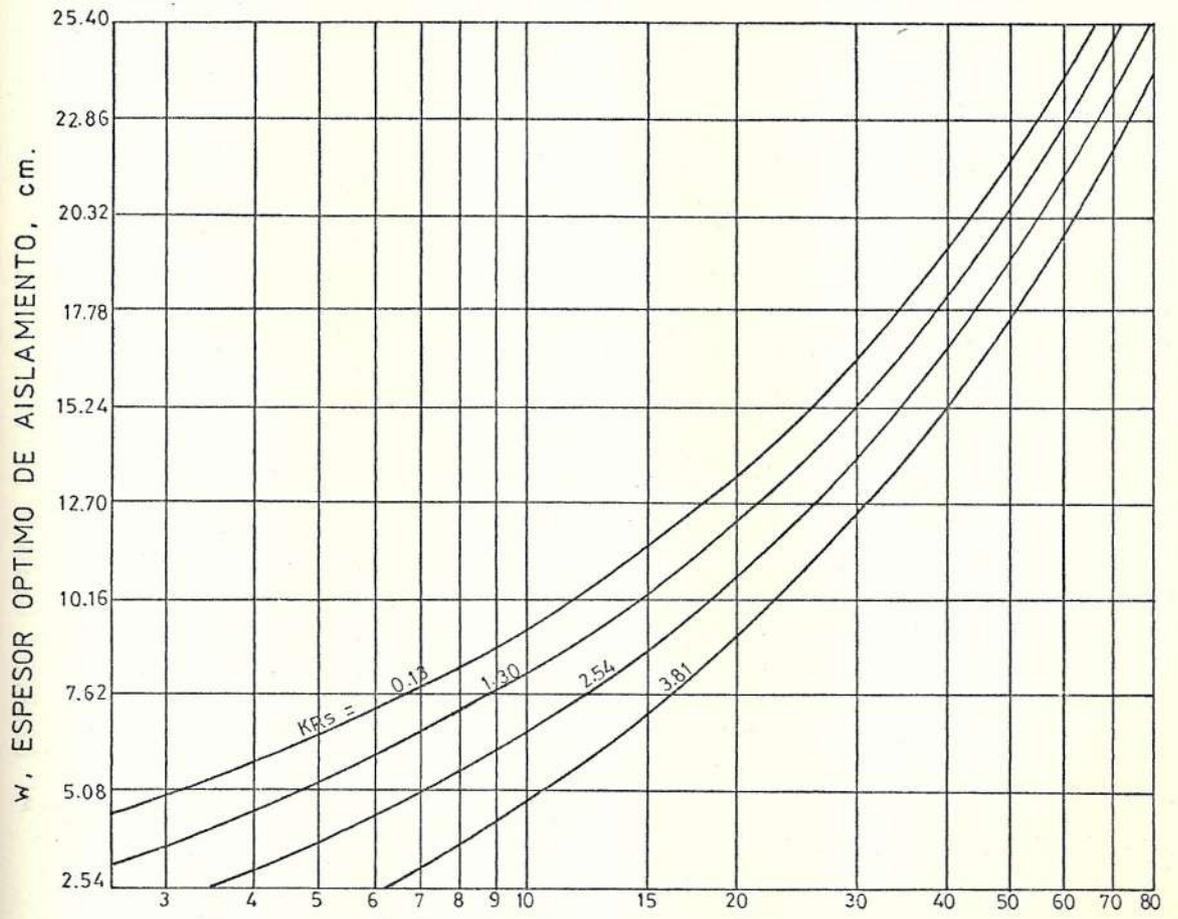
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2g ESPESOR OPTIMO, TUBO 10.16 cm. (4 pul.)



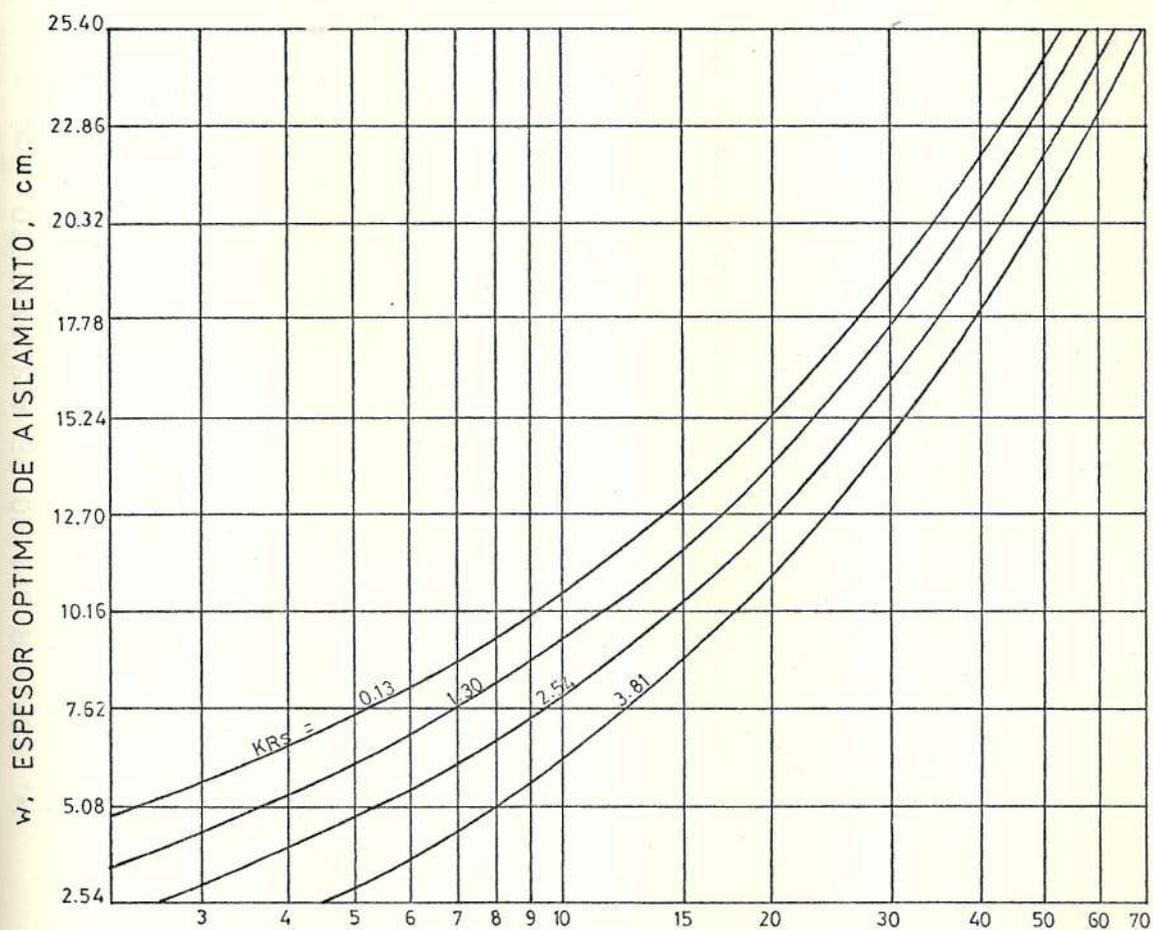
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2h ESPESOR OPTIMO, TUBO 12.70 cm. (5 pul.)



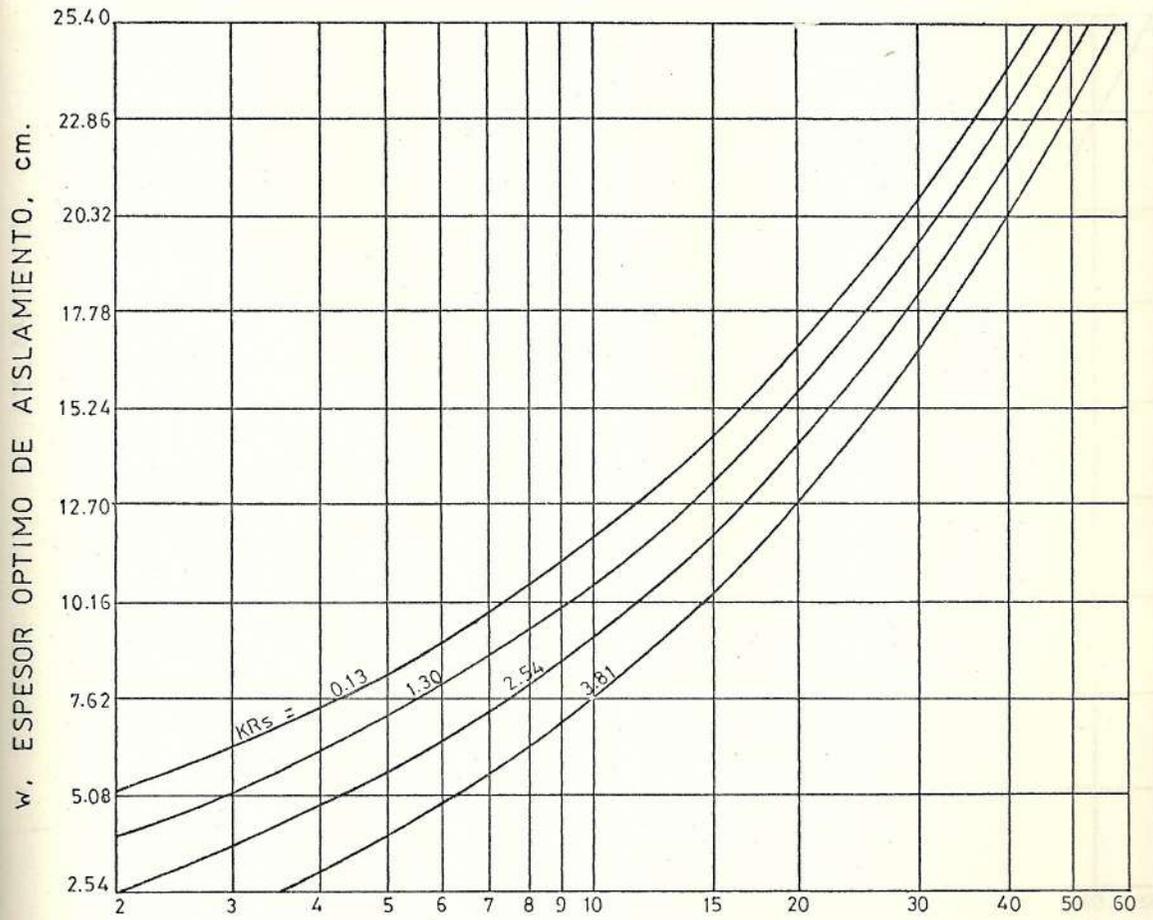
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig 5-2i ESPEJOR OPTIMO, TUBO 15.24 cm (6 pul.)



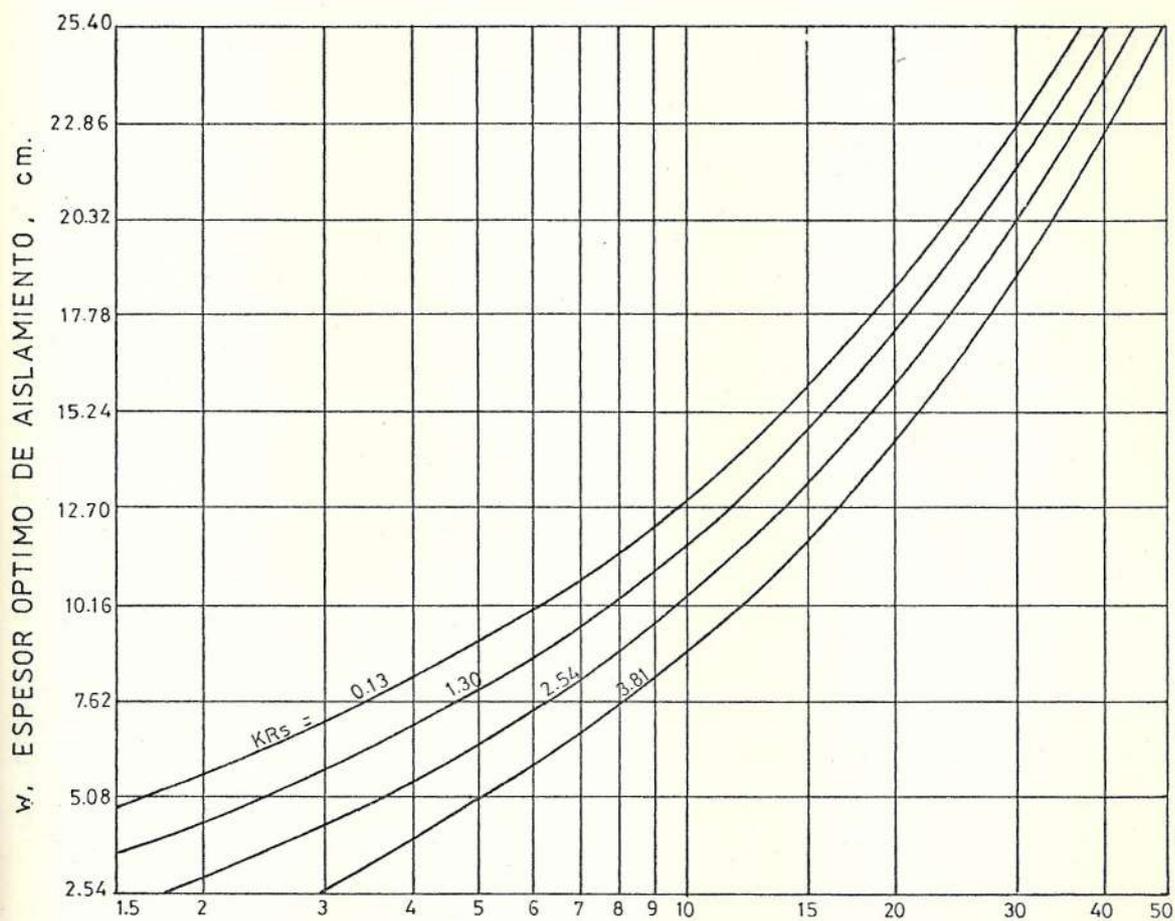
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2j ESPESOR OPTIMO, TUBO 20.32 cm. (8 pul.)



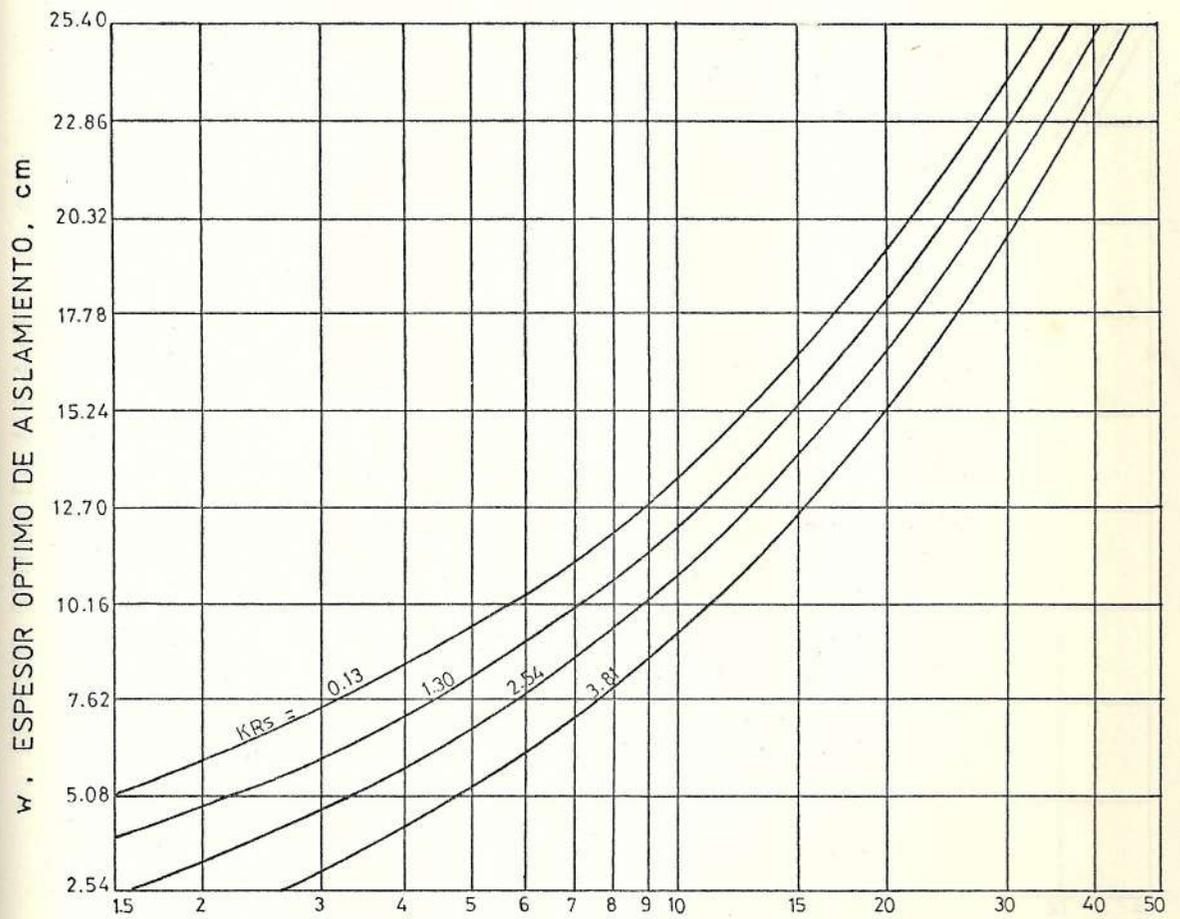
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig 5-2k ESPESOR OPTMO, TUBO 25.40 cm. (10 pul.)



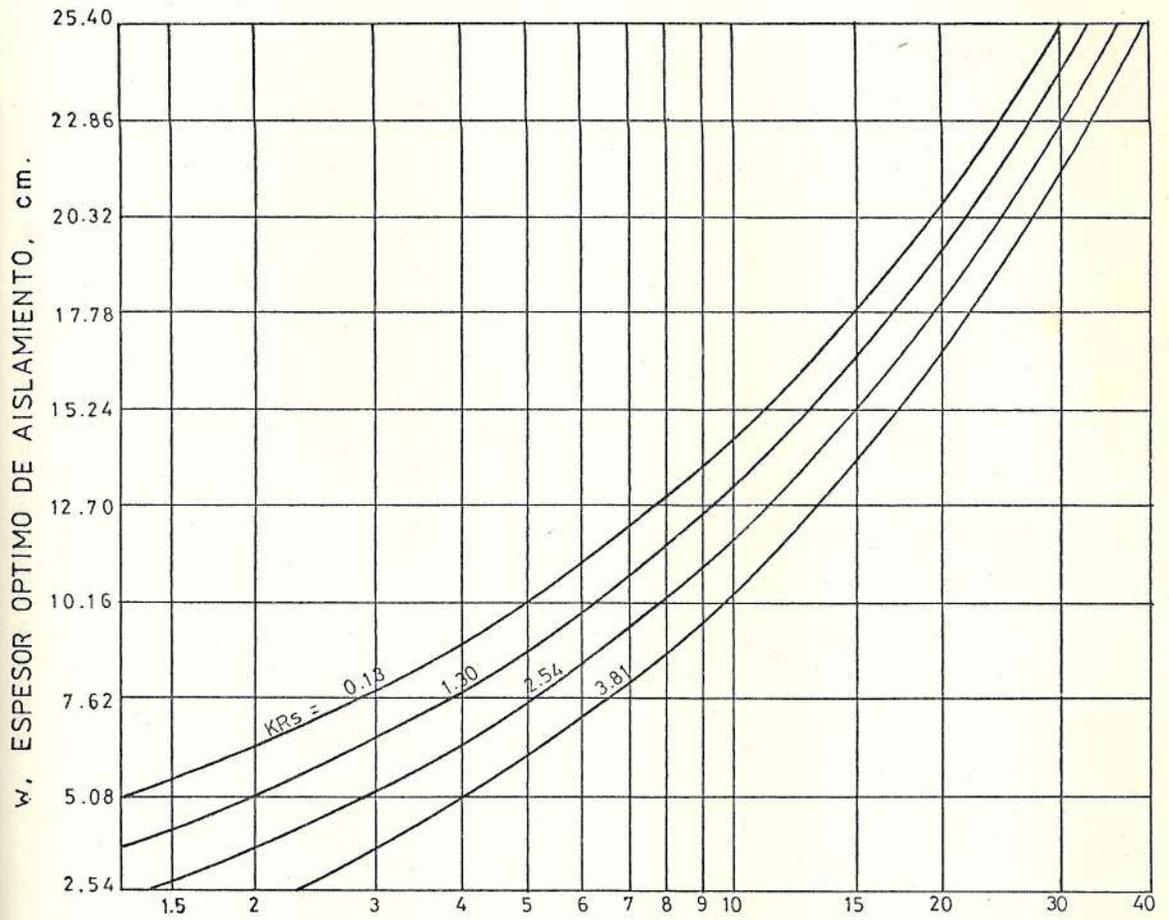
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-21 ESPEJOR OPTIMO, TUBO 30.48 cm. (12 pul.)



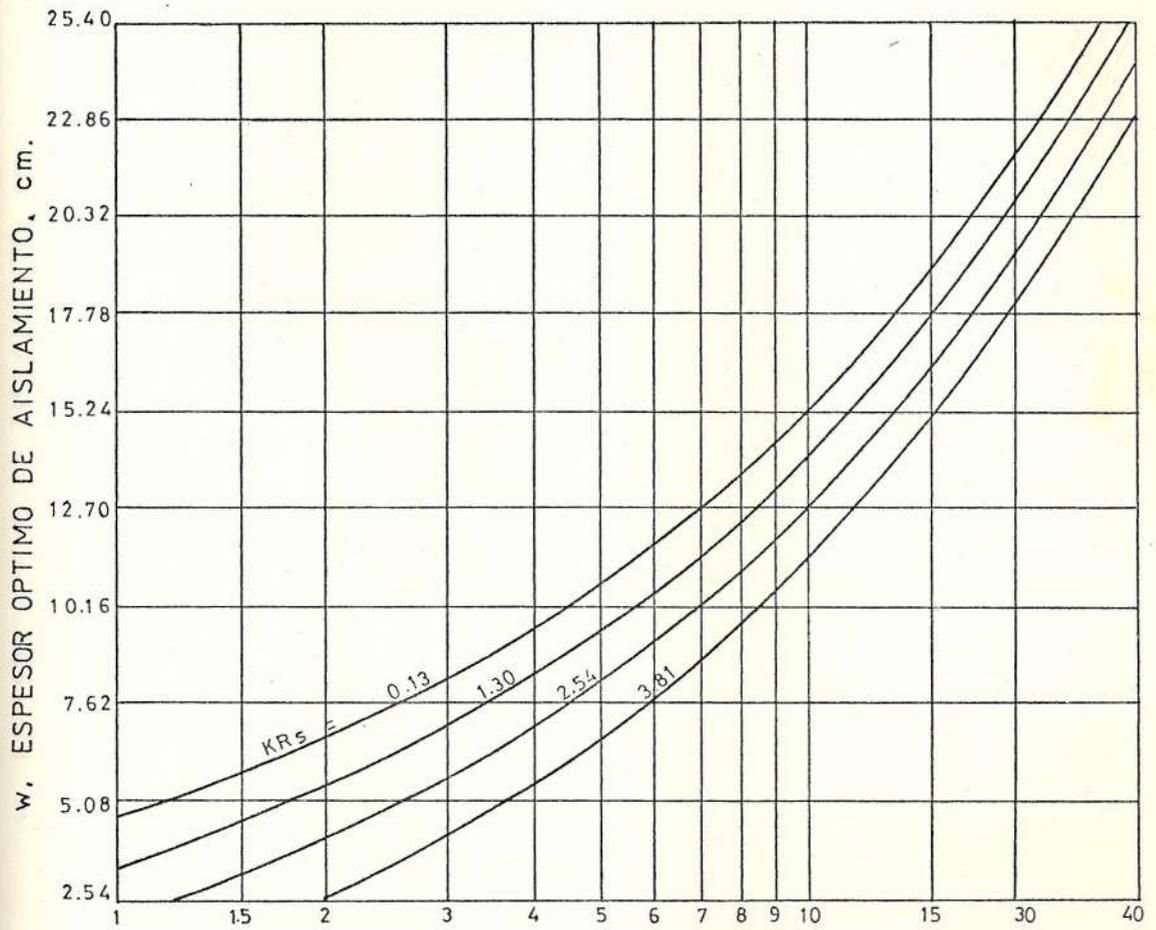
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2m ESPESOR OPTIMO, TUBO 35.56 cm. (14 pul.)



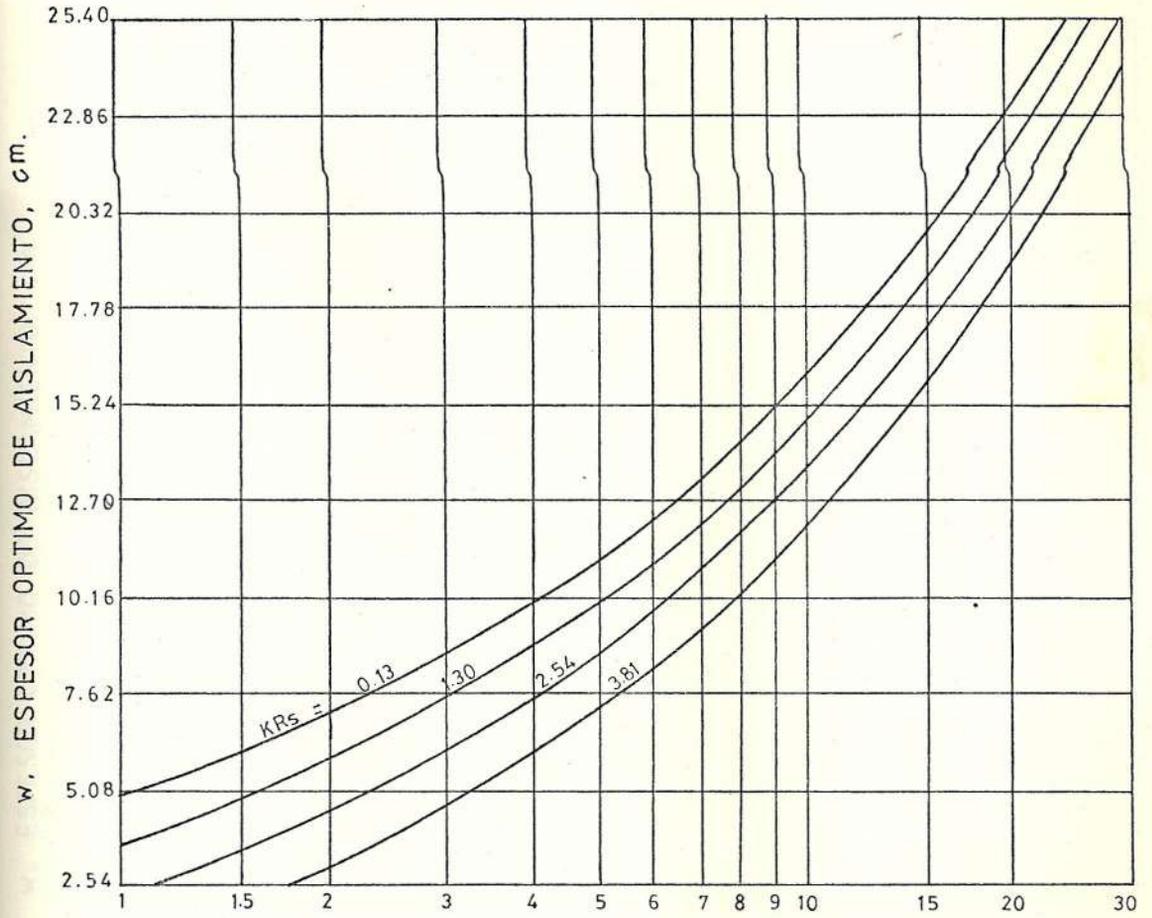
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2n ESPEJOR OPTIMO, TUBO 40.64 cm. (16 pul.)



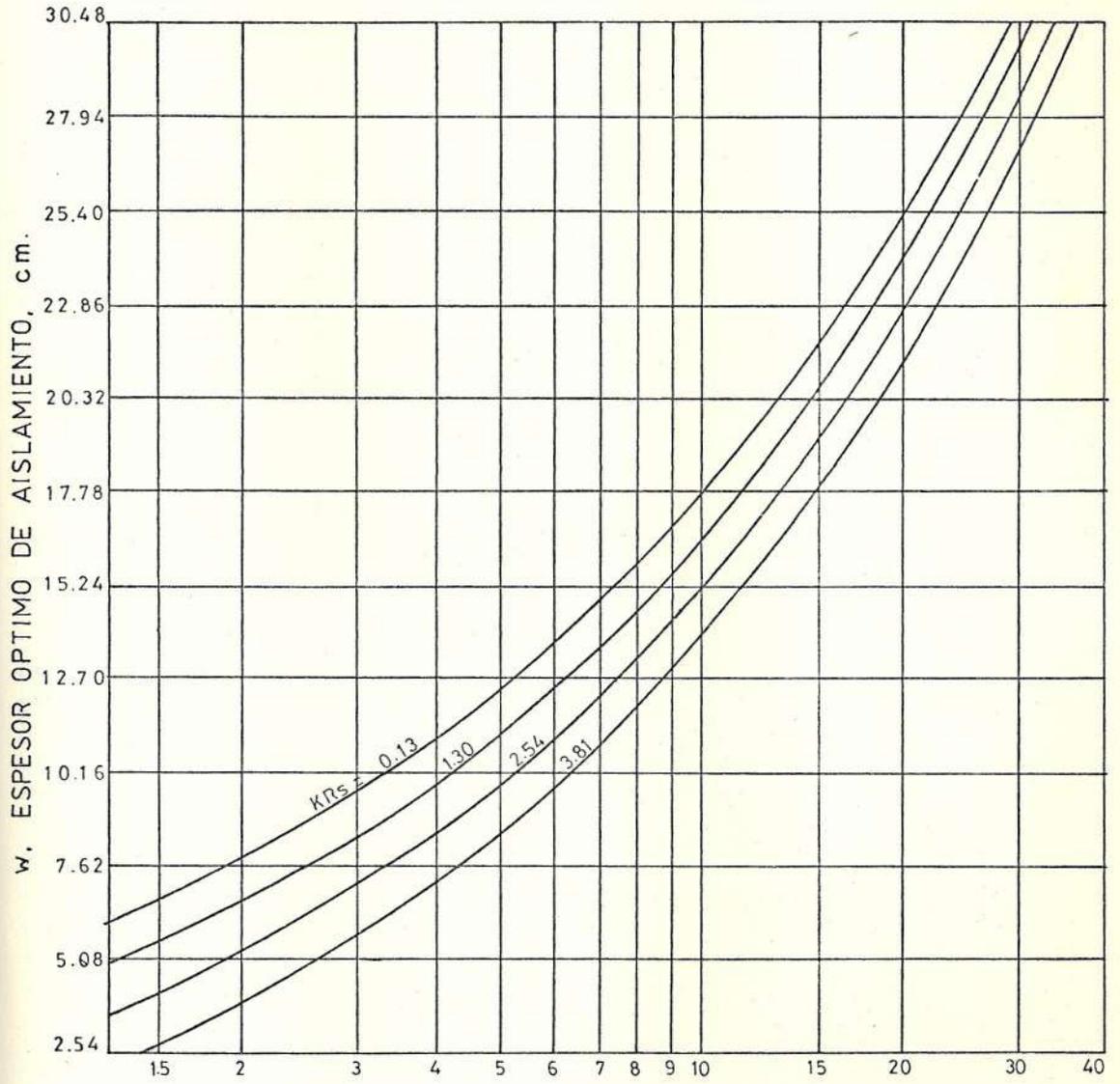
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2o ESPESOR OPTIMO, TUBO 45.72 cm. (18 pul.)



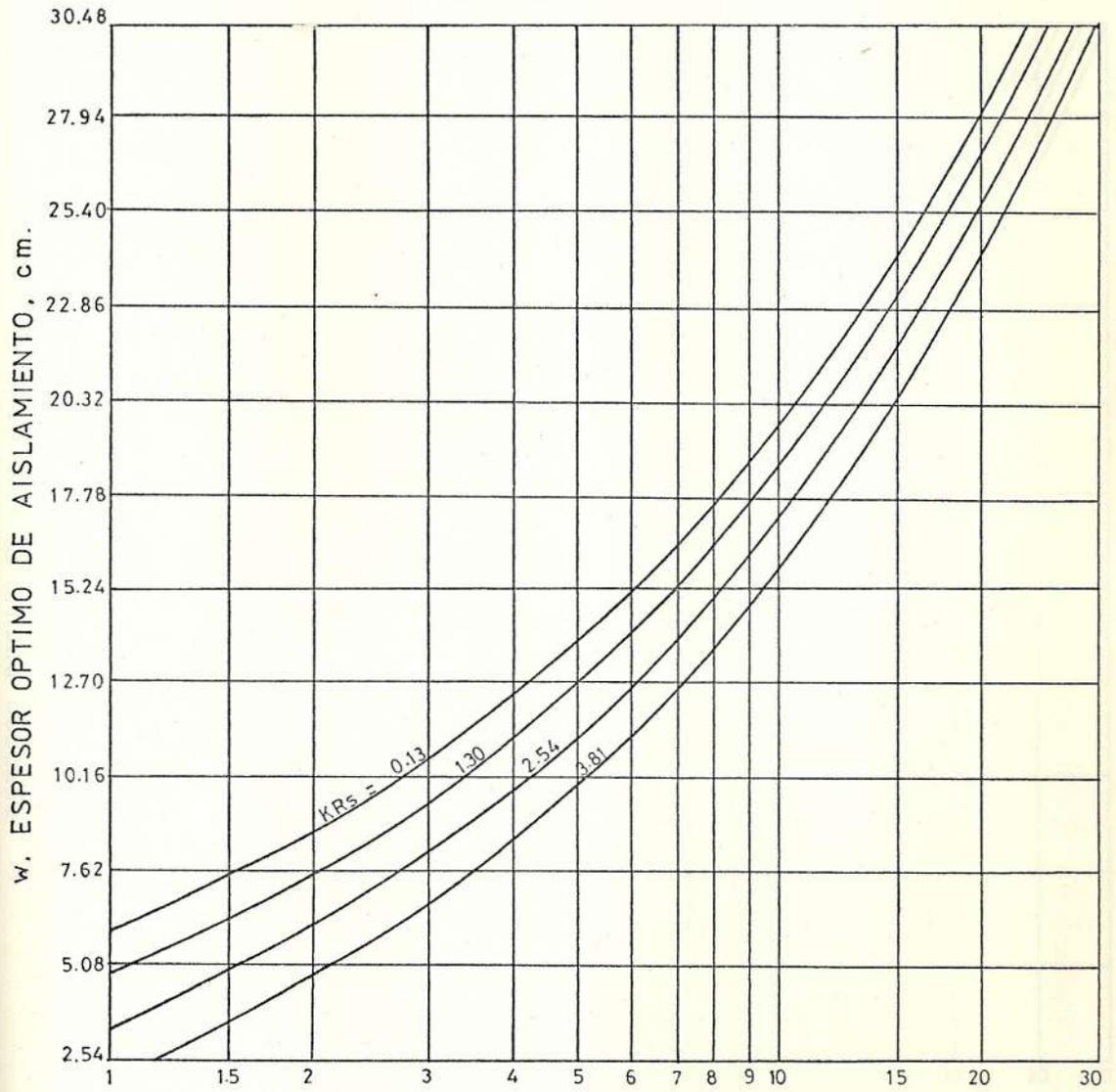
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2p ESPESOR OPTIMO, TUBO 50.80 cm. (20 pul.)



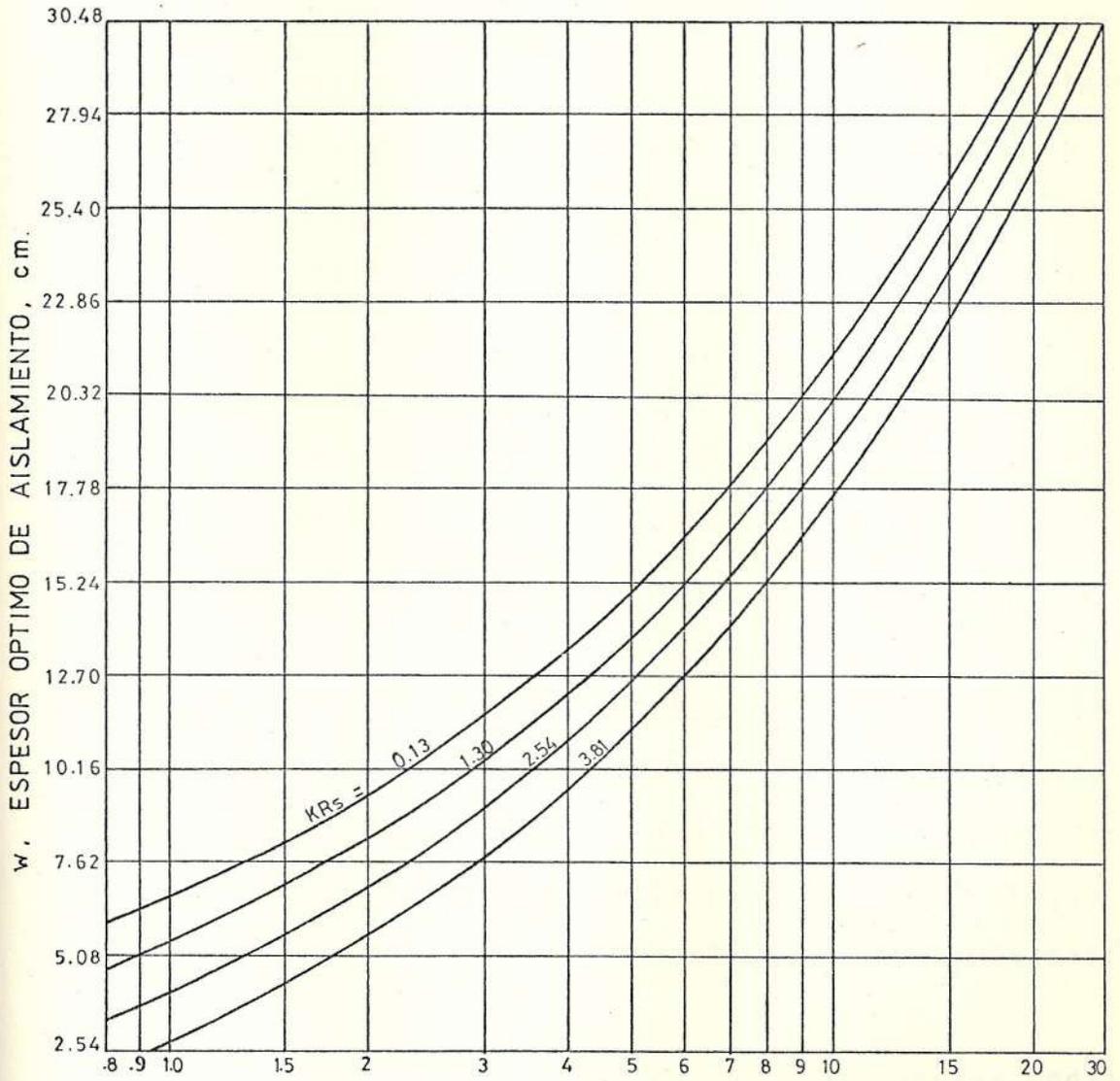
$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2q ESPESOR OPTIMO, TUBO 60.96 cm. (24 pul.)



$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2r ESPESOR OPTIMO, TUBO 76.20 cm. (30 pul.)



$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2s ESPESOR OPTIMO, TUBO 91.44 cm. (36 pul.)

(b hasta s), ésta será la solución para espesores de aislamiento de costo anual mínimo. Así, nosotros podemos determinar Z_p de la Ec. 5.17, anotamos la curva para el tamaño de tubo en cuestión, y leemos el espesor más económico para cualquier valor de $k.R_s$.

En los dos casos de sistemas de aislamiento simple, la evaluación de Z y kR_s , puede sin embargo, ser influenciada por otros criterios, los cuales afectarían la solución.

5.3 ESPESORES OPTIMOS PARA AISLAMIENTO COMPUESTO

Para este tipo de sistemas de aislamiento, las asunciones que se deben tomar en cuenta para la determinación de espesores óptimos de aislamiento son las siguientes:

- 1.- k_1 y k_2 son seleccionadas de las temperaturas medias, las que son encontradas asumiendo que las capas de aislamiento dividen igualmente el régimen de temperaturas T_p a T_a . Esta simplificación pocas veces será correcta, pero el rigor de encontrar los verdaderos valores de k para resolver el problema iterativamente no es necesario para el espesor de aisla -

miento de costo mínimo escogido. Sin embargo, si la solución para la temperatura de superficie exterior fuese requerida, entonces un esfuerzo adicional sería necesario y apropiado. (Los valores verdaderos de k no están disponibles en cualquier fuente, pero valores que son útiles pueden ser obtenidos de curvas de diseño y datos).

2.- La caída de temperatura a lo largo de una tubería se considera despreciable.

5.3.1 Sistemas de Aislamiento para Superficies Planas

La pérdida de calor por unidad de área exterior está dada por la ecuación

$$U_s = \frac{k_1 k_2 \Delta T_t}{k_2 w_1 + k_1 w_2 + k_1 k_2 R_s} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

El costo anual de la pérdida de calor según la Ec. 5.4a será entonces:

$$m_s = \frac{k_1 k_2 \Delta T_t \cdot y \cdot M \cdot 10^{-6}}{k_2 w_1 + k_1 w_2 + k_1 k_2 R_s} \quad \frac{\text{S/}}{\text{año} \cdot \text{m}^2}$$

haciendo

$$D_s = k_1 k_2 \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M \cdot 10^{-6} \quad (5.19)$$

entonces

$$m_s = \frac{D_s}{k_2 w_1 + k_1 w_2 + k_1 k_2 R_s} \quad \frac{\$/\text{año} \cdot \text{m}^2}{\text{año} \cdot \text{m}^2} \quad (5.20)$$

El costo anual de aislamiento instalado para un sistema de aislamiento compuesto para superficies planas es:

$$c_i = 1.1 m_C B_3 (w_1 + w_2) + 1.1 B_3 d \quad (5.21)$$

Luego, el costo total anual de la pérdida de calor y del aislamiento instalado será:

$$c_s = \frac{D_s}{k_2 w_1 + k_1 w_2 + k_1 k_2 R_s} + 1.1 m_C B_3 (w_1 + w_2) + 1.1 B_3 d \quad (5.22)$$

Diferenciando con respecto a (w_2) e igualando a cero para identificar el punto mínimo de la curva tenemos:

$$\frac{dc_s}{dw_2} = 0 = \frac{-k_1 \cdot D_s}{(k_2 w_1 + k_1 w_2 + k_1 k_2 R_s)} + 1.1 m_C B_3$$

haciendo

$$Z_s = \frac{D_s}{1.1 m_C B_3} \quad (5.23)$$

donde: m_c es el costo incremental del aislamiento instalado para la capa exterior.

nos queda

$$\frac{1}{k_1} (k_2 w_1 + k_1 w_2 + k_1 k_2 R_S)^2 = Z_S \quad (5.24)$$

D_S y Z_S deben ser calculados a partir de las Ecs. 5.19 y 5.23 respectivamente y debe considerarse m_c para la capa adicional de aislamiento. Ahora, podemos resolver

$$\frac{1}{k_1} (k_2 w_1 + k_1 w_2 + k_1 k_2 R_S)^2$$

para varios valores de w_2 hasta que encontremos un w_2 que dé este valor a igual Z_S .

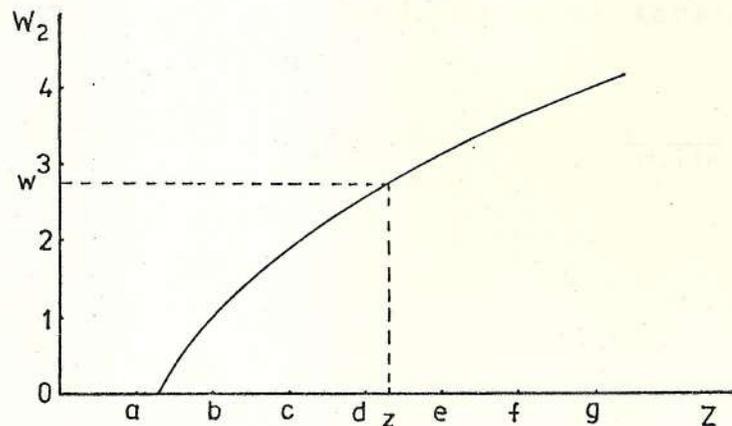


Fig. 5.3.- Solución para Costo mínimo de una Capa de aislamiento nueva sobre la existente.

La solución anterior no es perfecta, pero es bastante exacta para la solución del espesor económico. Usando un valor promedio de k y resolviendo el problema como en la sección 5.4, se puede también obtener resultados adecuadamente exactos con relativa facilidad.

5.3.2 Sistemas de Aislamiento para Superficies Cilíndricas (Tubos).

La pérdida de calor por metro lineal de tubo aislado con dos capas de aislamiento de conductividades térmicas diferentes está dada por la ecuación

$$U_p = \frac{6.28 \cdot 10^{-2} \cdot k_1 k_2 \cdot \Delta T_t \cdot r_3}{k_2 r_3 \ln \frac{r_2}{r_1} + k_1 r_3 \ln \frac{r_3}{r_2} + k_1 k_2 R_s} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.lin}}$$

El costo anual de la pérdida de calor será:

$$m_p = \frac{6.28 \cdot 10^{-2} \cdot k_1 k_2 \cdot \Delta T \cdot r_3 \cdot y \cdot M \cdot 10^{-6}}{k_2 r_3 \ln \frac{r_2}{r_1} + k_1 r_3 \ln \frac{r_3}{r_2} + k_1 k_2 R_s} \quad \frac{\text{S/}}{\text{año.m.lin}}$$

Haciendo

$$D_p = 6.28 \cdot 10^{-8} \cdot k_1 k_2 \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M \quad (5.25)$$

entonces

$$m_p = \frac{D_p \cdot r_3}{k_2 r_3 \ln \frac{r_2}{r_1} + k_1 r_3 \ln \frac{r_3}{r_2} + k_1 k_2 R_s} \frac{S/}{\text{año.m.lin}} \quad (5.26)$$

El costo de aislamiento instalado será:

$$c_i = 1.1 m_c B_3 (r_3 - r_1) + 1.1 \cdot B_3 \cdot d \quad (5.27)$$

Luego, el costo total anual de la pérdida de calor y del aislamiento instalado será entonces:

$$C_p = \frac{D_p \cdot r_3}{k_2 r_3 \ln \frac{r_2}{r_1} + k_1 r_3 \ln \frac{r_3}{r_2} + k_1 k_2 R_s} + 1.1 m_c B_3 (r_3 - r_1) + 1.1 B_3 d \quad (5.28)$$

Derivando con respecto a r_3), e igualando a cero para identificar el punto mínimo de la curva tenemos:

$$\frac{dC_p}{dr_3} = 0 = \frac{D (k_1 k_2 R - k_1 r_3)}{(k_2 r_3 \ln \frac{r_2}{r_1} + k_1 r_3 \ln \frac{r_3}{r_2} + k_1 k_2 R_s)} + 1.1 m_c B_3$$

haciendo

$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c \cdot B_3} \quad (5.29)$$

nos queda

$$\frac{(k_2 r_3 \ln \frac{r_2}{r_1} + k_1 r_3 \ln \frac{r_3}{r_2} + k_1 k_2 R_s)^2}{k_1 r_3 - k_1 k_2 R_s} = Z_p \quad (5.30)$$

Esta ecuación es la que define más cercanamente el espesor económico de la capa exterior dadas las asunciones del valor de k mencionadas anteriormente. Para encontrar r_3 usando esta excepción, se debe encontrar primeramente Z_p a partir de la Ec. 5.29. Entonces seleccionamos una serie de incrementos de 2.54 cm. (1 pulg.) de r_3 , partiendo del valor de r_2 y calculando una serie de valores para el lado izquierdo de la Ec. 5.30. Graficamos r_3 versus Z_p .

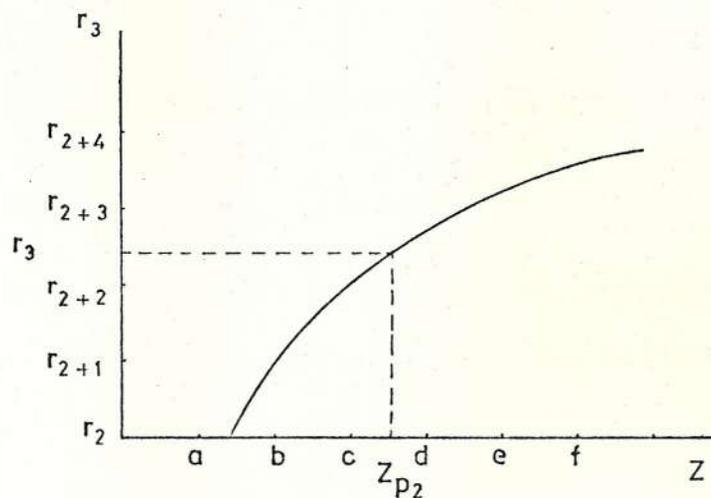


Fig. 5.4.- Manera de encontrar el valor de r_3

Cuando los valores del lado izquierdo de la Ec. 5.30 intercepten el valor de Z_p determinado a partir de la Ec. 5.29, el valor de r_3 que daría el valor de Z_p tiene que ser determinado. Entonces restamos r_2 de r_3 para encontrar el espesor económico de la capa exterior.

El uso de la Ec. 5.30 puede ser evitado simplemente proveyendo un valor promedio de k y resolviendo como si los materiales en las dos capas fuesen uniformes. Esto conduce a un alto grado de inexactitud, pero para resolver problemas simples se encuentra que un espesor de aislamiento así seleccionado está usualmente dentro de 1.3 cm. (1/2 pulg.) de un valor más preciso.

5.4 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS ESPESORES OPTIMOS DE AISLAMIENTO.

En esta sección será presentado el procedimiento para la determinación del espesor económico óptimo de un sistema de aislamiento. La solución es válida para sistemas de aislamiento para superficies planas y cilíndricas.

ESPESOR OPTIMO DE AISLAMIENTO

- 1.- Calcular la temperatura media del aislamiento

$$T_m = \frac{T_p + T_a}{2}$$

$$T_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 2.- Anotar la conductividad térmica del aislamiento usando curvas o tablas disponibles

$$k = \underline{\hspace{2cm}} \frac{\text{Kcal-cm}}{\text{h-m}^2\text{-}^\circ\text{C}}$$

- 3.- Calcular la diferencia total de temperatura

$$\Delta T_t = T_p - T_a$$

$$\Delta T_t = \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 4.- Anotar las horas de operación anuales

$$y = \underline{\hspace{2cm}} \text{ h}$$

- 5.- Encontrar D_s para superficies planas o D_p para tubos

$$D_s = k \cdot T_t \cdot y \cdot M \cdot 10^{-6}$$

$$D_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$D_p = 6.28 \times 10^{-8} \cdot k \Delta T_t \cdot y \cdot M$$

$$D_p = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 6.- Determinar B_3 usando la razón de retorno sobre el costo de aislamiento i_3 , y el período de vida

$$i_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

del aislamiento n_1

$$n_1 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$B_3 = \frac{i_3(1+i_3)^{n_1}}{(1+i_3)^{n_1} - 1}$$

$$B_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 7.- Anotar el costo incremental del aislamiento para capa simple, doble, o triple.

$$m_{c1} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$m_{c2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$m_{c3} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 8.- Encontrar Z_s para superficies planas o Z_p para tubos

$$Z_s = \frac{D_s}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$Z_p = \frac{D_p}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_p = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 9.- Calcular $k.R_s$ (0.14 es un valor típico para R_s)

$$kR_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 10.- Use la Fig. 5.2 apropiada para determinar el espesor óptimo

$$w_1 = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 11.- Si el espesor económico óptimo encontrado en el paso 10 está dentro del rango de capa simple (correspondiente al costo incremental de capa simple m_{c1} , usado en el paso 7), el espesor es correcto. Si el espesor está más

allá del rango de capa simple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa doble m_{c2} .

$$w_2 = \text{_____ cm.}$$

12.- Si el espesor económico óptimo, usando el costo incremental de capa doble, está en el rango de capa triple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa triple m_{c3} .

$$w_3 = \text{_____ cm.}$$

ESPESOR OPTIMO DE AISLAMIENTO (COMPUESTO)

1.- Anotar la temperatura del proceso $T_p = \underline{\hspace{2cm}}$ °C

2.- Anotar la temperatura ambiente $T_a = \underline{\hspace{2cm}}$ °C

3.- Calcular la temperatura media
para el aislamiento existente

$$T_{m1} = \frac{3 T_p + T_a}{4}$$

$T_{m1} = \underline{\hspace{2cm}}$ °C

4.- Encontrar la conductividad térmica para T_{m1} usando curvas o tablas disponibles

$k_1 = \underline{\hspace{2cm}}$

5.- Calcular la temperatura media para la nueva capa de aislamiento

$$T_{m2} = \frac{T_p + 3 T_a}{4}$$

$T_{m2} = \underline{\hspace{2cm}}$ °C

6.- Encontrar la conductividad térmica para T_{m2} usando curvas o tablas disponibles

$k_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

7.- Calcular la conductividad térmica media

$$k_m = \frac{k_1 + k_2}{2}$$

$k_m = \underline{\hspace{2cm}}$

- 8.- Calcular la diferencia de temperatura total

$$\Delta T_t = T_p - T_a$$

$$\Delta T_t = \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 9.- Encontrar el costo de calor según Capítulo III.

$$M = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 10.- Encontrar el costo incremental de aislamiento según Cap. IV. Use diámetro de tubo cercano en diámetro exterior al del aislamiento existente.

$$m_c = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 11.- Anotar las horas de operación anuales

$$Y = \underline{\hspace{2cm}} \text{ h/año}$$

- 12.- Encontrar D_s para superficies planas, o D_p para tubos

$$D_s = k_1 k_2 \Delta T_t \cdot Y \cdot M \cdot 10^{-6}$$

$$D_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$D_p = 6.28 \times 10^{-8} \cdot k_1 k_2 \Delta T_t \cdot Y \cdot M$$

$$D_p = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 13.- Determine B_3 usando la razón de retorno del costo de aislamiento y el período de vida del mismo

$$i_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$n_1 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$B_3 = \frac{i_3(1 + i_3)^{n_1}}{(1 + i_3)^{n_1} - 1}$$

$$B_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 14.- Encontrar Z_s para superficies planas, o Z_p para tubos

$$Z_s = \frac{D_s}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$Z_p = \frac{D_p}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_p = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 15.- Calcular $k_m R_s$ (un valor de 0.14 para R_s es típico)

$$k_m R_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 16.- Use la Fig. 5.2 apropiada para la determinación del espesor óptimo. Usar el diámetro del tubo, no el diámetro del aislamiento existente.

$$w = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm.}$$

- 17.- Restar el espesor de aislamiento existente de w para encontrar el espesor de la capa exterior

$$w_t = w - (r_2 - r_1)$$

$$w_t = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm.}$$

CAPITULO VI

PARTE EXPERIMENTAL

6.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En esta parte de la tesis nos referimos a las pruebas experimentales realizadas y que están relacionadas con la determinación de espesores óptimos de aislamiento. Tales pruebas se han llevado a cabo con el fin de analizar las pérdidas de calor a través de tuberías aisladas y sin aislar, determinar el efecto aislante de algunos tipos de materiales aislantes térmicos que se distribuyen comercialmente y determinar la resistencia térmica de superficie exterior para condiciones ambientales de recintos interiores.

Las pruebas experimentales mencionadas anteriormente, se realizaron en el Laboratorio de Conversión de Energía de la ESP Q., y el equipo utilizado para el efecto será el banco de tubos para pruebas de pérdidas de calor a través de tuberías, el mismo que se encuentra adjunto a la planta de poder del Laboratorio.

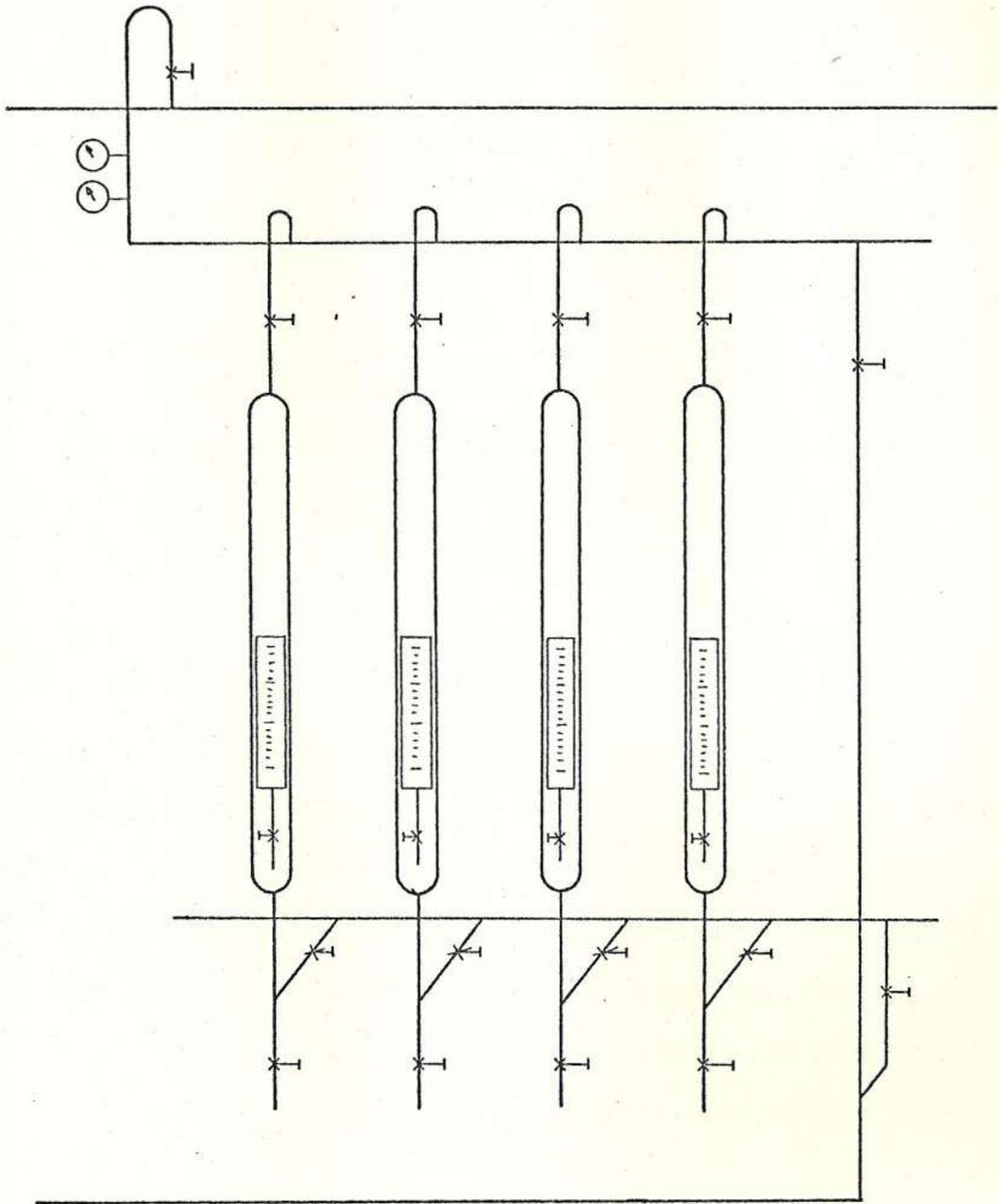


fig. 6-1 EQUIPO EXPERIMENTAL

Equipo Utilizado

La Fig. 6.1 muestra un esquema gráfico del equipo usado para realizar las pruebas experimentales. El equipo consta de 4 tubos dispuestos en posición vertical y paralelos entre sí, cada tubo es de hierro negro y miden 64 mm. de diámetro interior, 76 mm. de diámetro exterior y 914 mm. de longitud. Además, cada tubo tiene acoplado un indicador de nivel, el mismo que nos indicará la cantidad de vapor que se ha condensado, lo cual determina la cantidad de calor disipado a través de los tubos hacia el medio ambiente.

De los cuatro tubos, el primero está aislado con una capa de 38 mm. de asbesto corrugado (con láminas de aluminio) y tela de lienzo como recubrimiento protector; el segundo tubo está aislado con una capa de 5mm. de asbesto Woven sin recubrimiento protector; el tercer y cuarto tubo están sin aislar, aunque el cuarto tiene una capa muy fina de cromo, estos dos últimos tubos nos dan la opción de probar otros materiales aislantes por lo que serán utilizados para tal efecto.

Los cuatro tubos tienen adaptadas termocuplas de tal manera que miden las temperaturas de la superficie exterior del tubo de la superficie exterior del aislamiento.

En la parte superior del equipo, los tubos están conectados a un distribuidor de vapor, el mismo que permitirá un llenado de vapor uniforme y lento con el fin de que los tubos no se sometan a los efectos del cambio brusco de temperatura al iniciarse las pruebas.

En la parte inferior del equipo, los tubos están conectados a un colector de condensado, el mismo que permite la recolección del vapor que se ha condensado por efectos de la pérdida de calor a través de los tubos, y además nos ayuda a igualar los niveles de condensado en la escala indicadora de nivel de cada tubo, lo cual es indispensable para tomar las lecturas correspondientes.

La alimentación de vapor al equipo se la hace desde la línea de vapor que alimenta la turbina de la planta de poder, por lo que las pruebas pueden realizarse con vapor saturado o vapor recalentado, lo cual será determinado por los medidores de presión y temperatura existentes en la toma de vapor del equipo.

Análisis Teórico

Las pérdidas de calor a través de tuberías se realizan parcialmente por convección pero principalmente prevalecen las

pérdidas de calor por radiación; dichas pérdidas son mayores aún cuando el vapor está fluyendo a lo largo de la tubería que cuando está estancado, como en el caso del equipo experimental.

Además, la presencia de humedad en el vapor y su condensación en las superficies facilita la transferencia de calor de la tubería, por lo que cuando el vapor está supercalentado habrá una reducción de temperatura sin que se deposite humedad en la tubería, lo que producirá una disminución de las pérdidas de calor.

En general, bajo cualquier condición en la que se realice el proceso de transferencia de calor, la cantidad de pérdida de calor a través de una tubería dependerá de:

- a.- La diferencia de temperatura entre el flujo de vapor y el aire fuera de la tubería.
- b.- La velocidad de vapor dentro de la tubería.
- c.- El grado de humedad del vapor: por ejemplo, si se trata de vapor saturado o supercalentado.
- d.- El estado en que se encuentra el aire rodeando la tube -

ría: por ejemplo si está relativamente estancado como en un cuarto, o en movimiento como si estuviese abierto a la atmósfera.

Para un tubo circular con una capa de aislamiento, la ecuación que rige la transferencia de calor es:

$$q = k A \frac{dT}{dr}$$

la misma que al ser desarrollada nos queda

$$q = \frac{2 k \pi L (T_{S1} - T_{S2})}{\ln r_2/r_1}, \quad \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

Similarmente, para un tubo circular con dos capas de aislamiento tenemos:

$$q = \frac{2 \pi k \cdot L (T_{S1} - T_{S2})}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_3}{r_2}}, \quad \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

Con relación al equipo experimental tenemos que la cantidad de condensado recogida nos indicará la razón de transferencia de calor. Por lo tanto, asumiendo que el condensado no está subenfriado, y que las pérdidas de calor a través de las válvulas son despreciables, la razón de transferencia de calor puede ser calculada por:

$$q = M_c X \cdot h_{fg}, \quad \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

donde: q = es el flujo de calor, kcal/h

M = es la masa de condensado por hora en cada tubo, Kg/h

X = es la calidad del vapor, decimal

h_{fg} = es el calor latente a la presión absoluta del vapor, kcal/Kg.

Como la medición de condensado está dada en centímetros cúbicos, la ecuación anterior puede escribirse como:

$$q = \frac{\text{cc}}{10^6 v_f} \cdot \frac{60}{t} \cdot X \cdot h_{fg}, \quad \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

donde: cc = centímetros cúbicos de condensado colectado

v_f = Volúmen específico del agua a la presión absoluta del vapor, m^3/Kg

La conductividad térmica de los materiales aislantes probados estará dada por:

$$k = \frac{q \ln r_2/r_1}{2 L (T_{s1} - T_{s2})}, \quad \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}}$$

La resistencia térmica de superficie exterior se la ha definido como la resistencia al flujo de calor por con-

vección y radiación desde la superficie exterior del aislamiento. Este término, como se dedujo en el Capítulo 2, puede ser determinado por la ecuación

$$R_s = \frac{1}{h} = \frac{A(T_s - T_a)}{q_c + q_r}, \text{ m-h- } ^\circ\text{C/kcal}$$

Donde, para el equipo experimental

$$q_c = 1.52 (T_{s2} - T_a)^{1.25} A_2, \text{ kcal/h}$$

$$q_r = fr \cdot \epsilon (T_{s2} - T_a) A_2, \text{ kcal/h}$$

Resolviendo

$$R_s = \frac{1}{1.52(T_{s2} - T_a)^{0.25} + fr\epsilon}, \text{ m-h- } ^\circ\text{C/kcal}$$

6.2 DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS A REALIZARSE

Tanto las pruebas de pérdidas de calor a través de tuberías como las pruebas de resistencia térmica de superficie exterior, se realizaron independientemente del funcionamiento de la planta, tomando el vapor generado en el caldero desde la línea de alimentación a la turbina. La preparación del equipo experimental se la hizo siguiendo el procedimiento que se describe a conti -

nuación:

Procedimiento

Primeramente nos aseguramos que las válvulas de drenaje en cada uno de los tubos de prueba y la válvula de escape del cabezal de distribución (superior) del vapor estén cerradas; además, las válvulas de entrada y salida de los tubos de prueba y las válvulas de escape del cabezal de recolección (inferior) del vapor estén abiertas.

Abrimos la válvula principal de vapor que permite el paso de éste a través de cada tubo de prueba hacia el cabezal de recolección y a través de éste hacia la línea de salida.

Dejamos pasar el vapor lentamente a través de la unidad por un período corto con el fin de calentar el equipo antes de iniciar las pruebas y evitar el cambio brusco de temperatura.

Cerramos las válvulas de escape de cada tubo de prueba y dejamos que el vapor se condense hasta cuando se observe un nivel en el indicador de nivel de los tubos. Como las pérdidas de calor en cada tubo serán diferentes, los niveles de condensado serán también diferentes

y, el último nivel en aparecer será el del tubo de menor pérdida de calor; por lo tanto, tomamos como referencia este último nivel e igualamos los niveles de los demás tubos, usando para ello las válvulas de escape de los mismos.

Finalmente, cerramos todas las válvulas de escape al cabezal de recolección y empezamos a tomar mediciones periódicas de los parámetros requeridos para cada prueba.

6.2.1 Pérdidas de Calor en Tuberías

Este tipo de pruebas consisten en hacer un análisis experimental de las pérdidas de calor a través de tuberías aisladas y sin aislar, con el fin de realizar una comprobación de las ecuaciones teóricas descritas en el Capítulo 2 y que intervienen en el desarrollo del método para la determinación de espesores óptimos de aislamiento, presentado en esta tesis.

Además, se podrá hacer una evaluación del efecto aislante de algunos materiales usados como aislantes térmicos en tuberías de vapor, para realizar una comparación de los mismos en función de sus rendimientos térmicos.

La experimentación se hará primeramente con los tubos de prueba tal como conforman el equipo experimental; luego se utilizará las tuberías C y D como alternativas para probar otros tipos de materiales aislantes.

Para la evaluación de estas pruebas se tomarán mediciones periódicas de temperaturas de superficies de los tubos, presión y temperatura del vapor de suministro, lectura inicial y final de nivel de vapor condensado, presión barométrica y temperatura del aire dentro del laboratorio.

6.2.2 Resistencia Térmica de Superficie Exterior

Este grupo de pruebas se realizarán para determinar la resistencia al flujo de calor que presentan algunos materiales que se utilizan como recubrimientos protectores de los aislamientos. El objetivo de ésto es obtener algunos valores, los mismos que nos permitan observar la influencia de la resistencia térmica de superficie exterior en el método para la determinación de los espesores óptimos de aislamiento.

Para tal efecto, primeramente se realizarán las pruebas considerando solamente la tubería A con recubrimiento protector, mientras que las demás tuberías estarán sin ningún tipo de recubrimiento. La tubería C y D serán utilizadas para probar otros materiales.

Igualmente que en el caso de las pruebas sobre pérdidas de calor en tuberías, para estas pruebas se tomarán mediciones periódicas de temperaturas de superficie exterior del aislamiento, temperatura de la superficie del recubrimiento protector, temperatura de la superficie exterior de los tubos, presión y temperatura del vapor de suministro, lecturas inicial y final del nivel de condensado y tiempo de almacenaje de condensado.

Además, las mediciones hechas en el banco de tubos, se tomarán mediciones de presión barométrica y temperatura del aire dentro del laboratorio.

6.3 DATOS Y MEDICIONES OBTENIDAS

Los datos relacionados al equipo experimental son los que se indican a continuación:

TUB OS

Material. Hierro negro
 Radio interior. 3.2 cm.
 Radio exterior. 3.8 cm.
 Longitud. 0.914 cm.

AISLAMIENTOS

Espesores de los aislamientos

Tubería A. 3.8 cm.
 Tubería B. 0.5 cm.
 Tubería C. 2.5 cm.
 Tubería D. S/A

Tipos de aislamientos

Tubería A. Asbesto corrugado
 Tubería B. Asbesto Woven
 Tubería C. Lana de vidrio
 Tubería D. S/A

Tipos de recubrimientos protectores

Tubería A. Tela pintada (blanco), $\epsilon = 0.9$
 Tubería B. S/R, $\epsilon = 0.95$
 Tubería C. Papel aluminio, $\epsilon = 0.5$
 Tubería D. S/R, $\epsilon = 0.3$

TABLA 0.1
DATOS EXPERIMENTALES

PRUEBA	1				2				3				4			
Temp. del vapor	154 °C				153 °C				151 °C				147 °C			
Presión del vapor	8.84 bar				8.5 bar				9.16 bar				9.1 bar			
Calidad del vapor	0.85				0.85				0.85				0.85			
Pres.Barométrica	760 mmHg															
Temp. Ambiente	30 °C															
MEDICIONES EN LAS TUBERIAS DE PRUEBAS	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Lectura inicial de condensado (cc)	14	7	0	21	133	448	161	336	7	28	0	0	196	434	140	329
Lectura final de condensado (cc)	105	357	126	273	210	679	252	490	161	371	105	273	343	812	252	574
Tiempo de almace- naje de condensado (min)	21	21	21	21	15	15	15	15	20	20	20	20	20	20	20	20
Temp. de superficie del tubo (°C)	173	168	182	167	170	165	181	170	173	170	182	167	174	169	182	168
Temp. de superficie del aislamiento (°C)	62	102	60		59	100	63		61	103	60		63	104	59	
Temp. de superficie del recubrimiento (°C)	57		54		54		56		57		55		58		54	

Las mediciones tomadas del equipo experimental con respecto a las pruebas realizadas están anotadas en la Tabla 6.1.

6.4 CALCULOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Como se dedujo del análisis teórico, los cálculos para la evaluación de las pruebas experimentales se realizarán usando las siguientes ecuaciones:

Pérdida de calor por unidad de longitud

$$q = \frac{cc}{10^6 v_f} \cdot \frac{60}{t} \cdot X \cdot hfq, \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

Conductividad térmica del aislamiento

$$k = \frac{q \cdot n \cdot r_2 / r_1}{2\pi L (T_{S1} - T_{S2})}, \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m. } ^\circ\text{C}}$$

Resistencia térmica de superficie exterior

$$R_s = \frac{1}{1.52 (T_{S2} - T_a)^{0.25} + fr \cdot \epsilon}, \frac{\text{m}^2 \cdot \text{h. } ^\circ\text{C}}{\text{kcal}}$$

Los resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados con las ecuaciones anteriores están tabulados en la Tabla 6.2.

TABLA 6.2
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

PRUEBA N° 1 Presión absoluta del vapor: 10.05 Kg/cm ² Vol. especif. liq. sat. a la pres. abs.: $1.162 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ Calor latente a la Pres. absol.: 481.54 Kcal/Kg				
CANTIDAD	TUBERÍA A	TUBERÍA B	TUBERÍA C	TUBERÍA D
q, Kcal/h k, Kcal-cm/h-m ² - °C R _s , h-m ² - °C/Kcal	94.5 10.276 0.111	363.4 11.852 0.086	130.8 9.617 0.156	261.7 0.121
PRUEBA N° 2 Presión absoluta del vapor: 9.70 Kg/cm ² Vol. especif. liq. sat. a la Pres. abs.: $1.1243 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Kg}$ Calor latente a la Pres.absol.: 482.87 Kcal/Kg				
CANTIDAD	TUBERÍA A	TUBERÍA B	TUBERÍA C	TUBERÍA D
q, Kcal/h k, Kcal-cm/h-m ² - °C R _s , h-m ² -°C/kcal	112.4 12.226 0.106	337.3 11.170 0.086	132.9 10.039 0.154	224.9 0.120
PRUEBA N° 3 Presión absoluta del vapor: 10.4 Kg/cm ² Vol. especif. liq. sat. a la pres. abs.: $1.1284 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Kg}$ Calor latente a la Pres.Absol.: 480.4 Kcal/Kg				
CANTIDAD	TUBERÍA A	TUBERÍA B	TUBERÍA C	TUBERÍA D
q, Kcal/h k, Kcal-cm/h-m ² - °C R _s , h-m ² - °C/Kcal	167.2 18.018 0.111	372.4 11.964 0.085	114.0 8.329 0.155	296.4 0.121
PRUEBA N° 4 Presión absoluta del vapor: 10.3 Kg/cm ² Vol. especif. liq. sat. a la Pres.abs.: $1.1279 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Kg}$ Calor latente a la Pres. abs.: 480.6 Kcal/Kg				
CANTIDAD	TUBERÍA A	TUBERÍA B	TUBERÍA C	TUBERÍA D
q, Kcal/h k, Kcal-cm/h-m ² - °C R _s , h-m ² - °C/Kcal	159.7 17.368 0.110	410.7 13.601 0.085	121.7 8.819 0.156	266.2 0.120

Comparando los resultados obtenidos se puede observar que a pesar de que las condiciones del proceso de transferencia de calor a través de las tuberías son similares en todas las pruebas, existen variaciones en los resultados de una con respecto a otra; estas variaciones se deben a la imprecisión de los datos tomados con relación a presiones de vapor, temperaturas superficiales y principalmente el nivel de condensado, los mismos que son producto de los errores de apreciación causados por fluctuaciones de medidas en los instrumentos.

Bajo estas condiciones, los resultados tendrán cierta limitación con respecto a la exactitud de los parámetros calculados; sin embargo, para efecto de realizar un análisis térmico comparativo de los diferentes materiales aislantes usados en las tuberías, el promedio de todos los valores obtenidos en cada prueba nos dará una apreciación aceptable. Los valores así obtenidos están tabulados en la Tabla 6.3.

De acuerdo a estos resultados, cada una de las tuberías tiene un comportamiento diferente. Así, comparando los valores de q de la tubería sin aislar (D) con los valores de q de las tuberías aisladas (A,B,C), podemos darnos cuenta del efecto aislante de los materiales usados.

VALORES PROMEDIOS DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

PRESIÓN ABSOLUTA DEL VAPOR: 10.1 Kg/cm ² VOL. ESPECIFICO DEL LIQ. SAT. A LA PRES. ABS. DEL VAPOR: $1.1267 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ CALOR LATENTE DEL LIQ. SAT. A LA PRES. ABS. DEL VAPOR: 481.36 Kcal/Kg				
CANTIDAD	TUBERÍA A	TUBERÍA B	TUBERÍA C	TUBERÍA D
FLUJO DE CALOR Q, Kcal/h	134	371	125	262
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA K, Kcal-cm/h-m ² -°C	14.50	12.15	9.20	--
RESISTENCIA TÉRMICA R _s , h-m ² -°C/Kcal	0.1097	0.0856	0.1555	0.1205

Entre los materiales A y C, existe menos pérdida de calor por parte del material C, ya que sus propiedades aislantes son mejores; sin embargo, si comparamos estos aislamientos con el aislamiento B, vemos que a pesar de que el material B tiene un valor de conductividad térmica intermedio entre los materiales A y C, la pérdida de calor es mucho mayor que en ambos casos. Esta diferencia se debe a que el espesor de aislamiento B es mucho más pequeño que el espesor de los aislamientos A y C. Consecuentemente el radio exterior será menor, y como el flujo de calor en una superficie cilíndrica es inversamente proporcional al valor de $(\ln r_2/r_1)$, la pérdida de calor en la tubería B será mayor.

De los materiales probados, la lana de vidrio nos proporciona un mayor efecto aislante, ya que la pérdida de calor total en la tubería C es menor que en el resto de tuberías; aunque comparando las pérdidas de calor por unidad de área exterior, la tubería A nos dé el menor valor. Este efecto aislante está determinado por su conductividad térmica ($9.2 \text{ Kcal-cm/h-m}^2\text{-}^\circ\text{C}$) con respecto al asbesto corrugado ($14.50 \text{ Kcal-cm/h-m}^2\text{-}^\circ\text{C}$) y al asbesto Woven ($12.15 \text{ Kcal-cm/h-m}^2\text{-}^\circ\text{C}$).

Los valores de resistencia térmica de superficie exte-

rior son diferentes en cada tubería, puesto que están influenciados por factores tales como temperaturas del proceso de transferencia de calor, emitancia de radiación de la superficie, conductividad térmica del material aislante, y el espesor de aislamiento, los mismos que son diferentes para cada tubería. La tubería A nos proporciona el valor de mínima pérdida térmica por unidad de superficie exterior, por lo que su valor de resistencia térmica ($R_s = 0.1097 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Kcal}$) podría seleccionarse como el valor apropiado para la determinación de espesores óptimos de aislamiento.

La ASHRAE encuentra valores de R_s que varían de 0.1561 a 0.0872, los mismos que están representados en la Fig. 6.2. De acuerdo a esta referencia, un valor de R_s de 0.142 corresponde a un valor de mínima pérdida térmica.

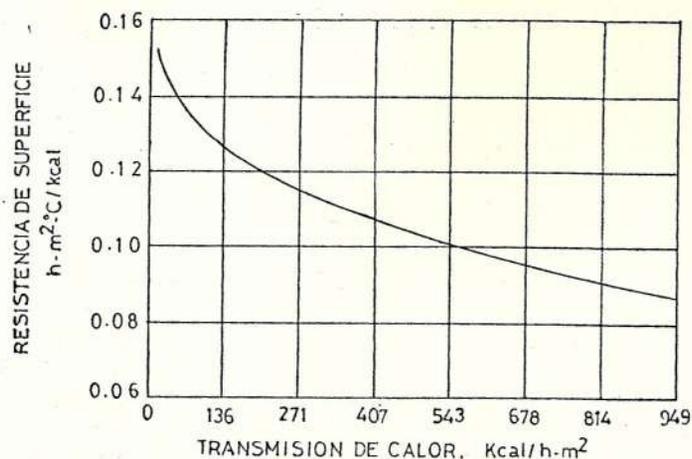


fig 6-2 Transmisión de calor vs Resistencia de superficie para superficies planas y cilíndricas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En relación al estudio desarrollado en esta tesis y de acuerdo a un análisis general del mismo, presentamos a continuación las siguientes conclusiones:

- 1.- Considerando la utilización del aislamiento térmico como un medio eficaz para la retardación del flujo de calor, podemos concluir que normalmente la determinación de espesores de aislamiento para cualquier aplicación está influenciada por uno o más de los siguientes factores:
 - a.- La pérdida térmica máxima permisible, que generalmente determina el espesor correspondiente a condiciones de pérdidas térmicas especificadas.
 - b.- El espesor económico, determina el espesor que nos asegura el costo más bajo del aislamiento y la menor pérdida térmica resultante.
 - c.- El espesor que se requiere para la protección y seguridad de personal, determina el espesor de acuerdo a límites máximos de temperatura de la superficie

exterior del aislamiento.

- 2.- Si consideramos el hecho de que en una central térmica a vapor, los sistemas sometidos a un proceso térmico están sujetos a elevadas pérdidas de energía, y que por lo tanto se tendrán que utilizar grandes cantidades de aislamiento para aprovechar al máximo la energía interna del vapor generado para producir electricidad, podemos concluir que la determinación de espesores para los sistemas de aislamiento que serán usados debe tomar en consideración criterios de tipo económico de tal forma que se obtenga un bajo costo de aislamiento y una mínima pérdida térmica. Esto además contribuye a la disminución del costo de producción de electricidad.

- 3.- El espesor adecuado para sistemas de aislamiento usados en centrales a vapor será el espesor que nos dé un valor anual mínimo de la suma del costo de pérdida térmica más el costo de aislamiento; o en términos más generales, el espesor de un aislamiento dado que ahorraría el mayor costo de energía mientras se paga por sí mismo dentro de un período de tiempo asignado; éste es el espesor económico, o espesor óptimo económico del

aislamiento.

4.- El espesor óptimo económico de un sistema de aislamiento puede ser determinado por diferentes métodos, los mismos que nos proporcionan resultados que son iguales a efectos prácticos. Los métodos más comunes son los siguientes:

a.- El método de amortización progresiva implica la determinación del período de amortización para cada incremento en el espesor de aislamiento (1.3 cm.), siendo el espesor económico aquel para el cual el valor del período de amortización se aproxima más exactamente al período estipulado.

b.- El método de costo mínimo implica el cálculo del costo total de aislamiento y el de la pérdida térmica para cada incremento en el espesor de aislamiento (1.3 cm.), el espesor económico será aquél para el cual este costo total es un mínimo.

c.- El método del costo marginal o incremental provee una solución simplificada y directa, el espesor económico será aquél para el cual el último suceso invertido en aislamiento resulta en exactamente un

sucre en ahorro del costo de energía en base a un descuento del flujo de dinero.

5.- Cuando se comparan varios materiales técnicamente adecuados, es evidente que el seleccionado debería ser aquel cuyo costo total sea el más pequeño; sin embargo, en aplicaciones particulares donde solo el espesor de aislamiento es importante, un costo total más elevado podría determinar el espesor óptimo más adecuado. Así, considerando variaciones del costo total con respecto al espesor de aislamiento podemos concluir que:

- a.- Un costo más pequeño del material aislante, o un período de amortización más largo tiende a incrementar el espesor óptimo cuando permanece constante el valor térmico, pero implica un costo total más pequeño.
- b.- Los costos más elevados del combustible (es decir los valores térmicos más elevados) también tienden a incrementar el espesor óptimo, e implica un costo total más elevado.
- c.- Un costo de aislamiento más elevado, o un período de amortización más corto, tiende a disminuir el

espesor óptimo cuando permanece constante el valor térmico, pero implica un costo total más elevado.

6.- La selección y aplicación del material aislante también influye en la determinación del espesor óptimo económico, por lo tanto, concluimos que:

a.- El verdadero espesor óptimo de aislamiento puede resultar muy influenciado por la selección del material aislante, de tal forma que, el material para el que resulta el espesor óptimo más pequeño no necesariamente es el más barato.

b.- El verdadero espesor óptimo de aislamiento puede también estar influenciado por la aplicación del aislamiento en capas múltiples; pues el costo incremental de aislamiento puede resultar diferente para los rangos de espesores de capas simple, doble o triple. Consecuentemente el espesor óptimo debe estar dentro del rango de espesores del costo incremental que se seleccione.

Finalmente, como complemento al estudio realizado, hemos considerado de gran importancia hacer las siguientes recomendaciones para los usuarios de esta tesis.

- 1.- La optimización de sistemas de aislamiento es un criterio que debe considerarse no solamente en centrales a vapor sino que debe generalizarse a sistemas industriales que requieran aislación térmica. Esto es importante debido a que la aplicación de espesores adecuados de aislamiento térmico para tales sistemas nos permite obtener considerables ahorros de energía y consecuentemente una utilización correcta de la cantidad necesaria de aislamiento.

- 2.- La determinación de espesores óptimos de aislamiento puede realizarse usando diferentes métodos; sin embargo la mayoría de ellos involucran un procedimiento estimativo, teniendo que realizarse cálculos para incrementos sucesivos del espesor de aislamiento (generalmente 1.3 cm.) dentro del rango del espesor óptimo hasta encontrar dicho valor. Esto representa un trabajo tedioso por lo que recomendamos el uso del método de costo incremental resuelto en esta tesis, ya que además de proporcionar una solución directa y fácil de obtener, ha sido desarrollado en función de costos de ciclo de vida, lo cual nos permite hacer una evaluación más acertada del costo de energía y de aislamiento.

- 3.- Generalmente, el sistema a ser aislado puede determinar

el tipo de aislamiento y la protección a ser adoptada; sin embargo, a menudo se dispone de sistemas diferentes de aislamiento, de los cuales es factible efectuar una selección. Por lo tanto, al margen de la obtención de un espesor óptimo de aislamiento, recomendamos seguir la guía presentada en el Apéndice B para la selección de los materiales aislantes y recubrimientos protectores con objeto de que la selección se realice sobre el fundamento de una base racional.

APENDICE A

DETERMINACION DE ESPESORES OPTIMOS DE AISLAMIENTO

Para una mejor comprensión de la forma como se encuentran los espesores óptimos de aislamiento, a continuación se presentarán algunos ejemplos de aislamiento de tuberías de vapor, cuyos espesores óptimos serán encontrados usando el método desarrollado en esta tesis.

1) Tubería de Vapor de Alta Temperatura

En una central a vapor, la instalación de la línea de alta presión va desde el generador de vapor hasta el turbo generador; esta tubería se ha previsto tendrá una longitud de 305 m., y un diámetro nominal de 40.64 cm. La temperatura del vapor será de 556 °C. La línea estará expuesta al medio ambiente exterior cuya temperatura promedio es de 30 °C.

La central tendrá una capacidad de salida continua neta de 565 MW. La generación eléctrica total por año esperada es 2772 millones de KWH, y la línea estará en funcionamiento 8500 horas por año.

La inversión capital total esperada para la central (caldero, tuberías, condensador, etc.) es \$.55 millones. El costo del combustible en el primer año será de \$ 18/ton, el cual tiene un valor calorífico de 6930 Kcal/Kg. La planta tendrá un período de depreciación de 30 años; sin embargo, el aislamiento se espera tenga una vida útil de servicio en el medio ambiente exterior de solamente 15 años. La eficiencia del caldero es de 92% y requiere 2545 Kcal's de combustible para producir cada KWH de electricidad.

La razón de retorno sobre la inversión requerida por la compañía financiadora es 15%. Los bonos emitidos por la compañía para financiar la planta pagan un dividendo de 9%, con costos de lanzamiento y administrativos sumando otro 1% a este costo sobre los 30 años de vida. El costo del combustible se espera aumente a una razón promedio anual de 7%.

El aislamiento a ser usado sobre la tubería que se va a aislar será silicato de calcio con una cubierta de aluminio. Los precios promedio estimados por unidad de este aislamiento sobre un tubo de 40.64 cm. en el tiempo de instalación del mismo son los indicados en la hoja de trabajo para estimación del costo unitario de aislamiento.

(Nº 2) HOJA DE TRABAJO PARA ESTIMACIÓN DEL COSTO UNITARIO DE AISLAMIENTO

Diámetro de la Tubería Pulg (cm.)	Precios del Material y de la Mano de Obra* MP y LP											
	Capa Simple				Capa Doble				Capa Triple			
	2 pul (5.08 cm)		4 pul (10.16 cm)		5 pul (12.70 cm)		7 pul (17.78 cm)		8 pul (20.32 cm)		10 pul (25.40 cm)	
	MP	LP	MP	LP	MP	LP	MP	LP	MP	LP	MP	LP
1 (2.54)												
1½ (3.81)												
2 (5.08)												
2½ (6.35)												
3 (7.62)												
4 (10.16)												
5 (12.70)												
6 (15.24)												
8 (20.32)												
10 (25.40)												
12 (30.48)												
14 (35.56)												
16 (40.64)	36.5	2.4	53.5	3.2	84.5	5.2	112.1	7.6				
18 (45.72)												
20 (50.80)												
24 (60.96)												
30 (76.20)												
36 (91.44)												
Superficie Plana												

* Precios: Tubería = \$/m-lin; Superfi. Plana = \$/m²

COSTO DE CALOR

Factor multiplicador para promediar el costo de calor, B_1

- Período de vida del aislamiento

$$n_1 = \frac{15 \text{ años}}{\quad}$$

- Razón de incremento del precio del combustible

$$i_1 = \frac{0.07}{\quad}$$

$$B_1 = \frac{(1 + i_1)^{n_1} - 1}{i_1 n_1}$$

$$B_1 = \frac{1.67}{\quad}$$

Costo de calor para el primer año, c_h

- Valor Calorífico del combustible

$$HHV = \frac{6930 \text{ kcal/kg}}{\quad}$$

- Eficiencia de conversión del combustible

$$E = \frac{0.92}{\quad}$$

- Precio actual del combustible

$$P_0 = \frac{\$.18 / \text{Ton}}{\quad}$$

$$c_h = \frac{P_0 \times 10^6}{Ec \times HHV}; \quad c_h = \frac{P_c \times 10^3}{Ec \times HHV}; \quad c_h = \frac{P_g \times 10^3}{Ec \times HHV}$$

$$c_h = \frac{\$.31/10^6 \text{ kcal}}{\quad}$$

Costo promedio anual de calor (incluyendo 10% de costos de operación y mantenimiento), c_h

- Costo de calor para el primer año

$$c_h = \frac{\$.31/10^6 \text{ kcal}}{\quad}$$

- Factor multiplicador B_1

$$B_1 = \frac{1.67}{\quad}$$

$$C_h = 1.1 \times B_1 \times c_h$$

$$C_h = \underline{\$ 5.19/10^6 \text{ kcal}}$$

Factor de amortización para la planta, B_2

- Período de vida de la planta
- Razón de amortización de la planta

$$n_2 = \underline{30 \text{ años}}$$

$$i_2 = \underline{0.10}$$

$$B_2 = \frac{i_2(1+i_2)^{n_2}}{(1+i_2)^{n_2} - 1}$$

$$B_2 = \underline{0.106}$$

Costo de capital anual de calor, C_k

- Producción de calor promedio anual esperada
- Inversión capital total para la planta
- Factor de amortización de la planta

$$Q = \underline{6.21 \times 10^6, 10^6 \text{ kcal}}$$

$$PF = \underline{\$ 55 \times 10^6}$$

$$B_2 = \underline{0.106}$$

$$C_k = \frac{PF \times B_2}{Q}$$

$$C_k = \underline{\$ 0.94/10^6 \text{ kcal}}$$

Costo Total de Calor, M

- Costo promedio anual de calor
- Costo capital anual de calor

$$C_h = \underline{\$ 5.19/10^6 \text{ kcal}}$$

$$C_k = \underline{\$ 0.94/10^6 \text{ kcal}}$$

$$M = C_h + C_k$$

$$M = \underline{\$ 6.13/10^6 \text{ kcal}}$$

(Nº 1) HOJA DE TRABAJO PARA DETERMINACIÓN DEL COSTO INCREMENTAL DE AISLAMIENTO

Aplicación: Tubería de Vapor
 Especificaciones
 Aislamiento: Silicato de Calcio
 Cobertura: Chapa metálica
 Acabado: Pintura de aluminio

W Espesor de aislamiento, cm
 P Precio de aislamiento instalado
 Tubería \$/m-lin
 Superf. Plana- \$/m²
 m_c Costo incremental de aislamiento
 Tubería \$/m-lin/cm
 Superf. plana, \$/m²/cm

Diámetro del tubo Pul (cm.)	CAPA SIMPLE					CAPA DOBLE					CAPA TRIPLE				
	W ₁	P ₁	W ₂	P ₂	m _{c1}	W ₁	P ₁	W ₂	P ₂	m _{c2}	W ₁	P ₁	W ₂	P ₂	m _{c3}
1 (2.54)															
1 ½ (3.81)															
2 (5.08)															
2 ½ (6.35)															
3 (7.62)															
4 (10.16)															
5 (12.70)															
6 (15.24)															
8 (20.32)															
10 (25.40)															
12 (30.48)															
14 (35.56)															
16 (40.64)	5.08	38.9	10.16	56.7	3.51	12.70	89.7	17.78	119.7	5.90					
18 (45.72)															
20 (50.80)															
24 (60.96)															
30 (76.20)															
36 (91.44)															
Superficie Plana															

Nota: W₁ = espesor para extremo inferior del rango de la capa; W₂ = espesor para extremo superior del rango de la capa

P₁ = precio instalado para W₁ ; P₂ = precio instalado para W₂

ESPESOR OPTIMO DE AISLAMIENTO

- 1.- Calcular la temperatura media del aislamiento

$$T_m = \frac{T_p + T_a}{2}$$

$$T_m = \underline{293} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 2.- Anotar la conductividad térmica del aislamiento usando curvas o tablas disponibles

$$k = \frac{7.64}{\text{h-m}^2\text{-}^\circ\text{C}} \text{ Kcal-cm}$$

- 3.- Calcular la diferencia total de temperatura

$$\Delta T_t = T_p - T_a$$

$$\Delta T_t = \underline{526} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 4.- Anotar las horas de operación anuales

$$y = \underline{8500} \text{ h}$$

- 5.- Encontrar D_s para superficies planas o D_p para tubos

$$D_s = k \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M \cdot 10^{-6}$$

$$D_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$D_p = 6.28 \times 10^{-8} \cdot k \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M$$

$$D_p = \underline{13.14}$$

- 6.- Determinar B_3 usando la razón de retorno sobre el costo de aislamiento i_3 , y el período de vida

$$i_3 = \underline{0.15}$$

del aislamiento n_1

$$B_3 = \frac{i_3(1+i_3)^{n_1}}{(1+i_3)^{n_1} - 1}$$

$$n_1 = \underline{15 \text{ años}}$$

$$B_3 = \underline{0.17}$$

7.- Anotar el costo incremental del aislamiento para capa simple, doble, o triple.

$$m_{c1} = \underline{\$ 3.51/\text{m-lin}}$$

$$m_{c2} = \underline{\$ 5.90/\text{m-lin}}$$

$$m_{c3} = \underline{\hspace{2cm}}$$

8.- Encontrar Z_s para superficies planas o Z_p para tubos

$$Z_s = \frac{D_s}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$Z_p = \frac{D_p}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_p = \underline{20.2 \quad 11.9}$$

9.- Calcular $k.R_s$ (0.14 es un valor típico para R_s)

$$kR_s = \underline{1.07}$$

10.- Use la Fig. 5.2 apropiada para determinar el espesor óptimo

$$w_1 = \underline{19.7 \text{ cm.}}$$

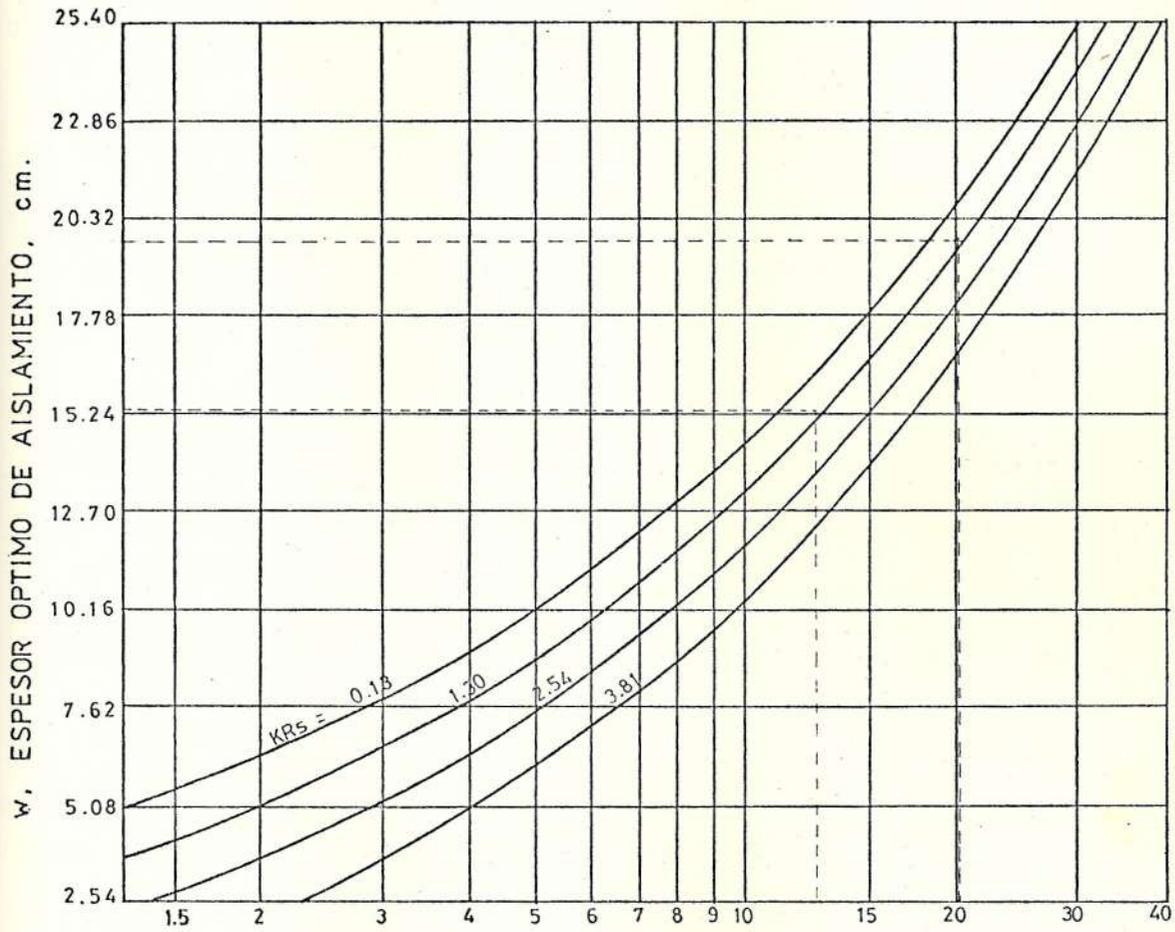
11.- Si el espesor económico óptimo encontrado en el paso 10 está dentro del rango de capa simple (correspondiente al costo incremental de capa simple m_{c1} , usado en el paso 7), el espesor es correcto. Si el espesor está más

allá del rango de capa simple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa doble m_{c2} .

$$w_2 = \underline{15.24} \text{ cm.}$$

12.- Si el espesor económico óptimo, usando el costo incremental de capa doble, está en el rango de capa triple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa triple m_{c3} .

$$w_3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm.}$$



$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2n ESPESOR OPTIMO, TUBO 40.64 cm. (16 pul.)

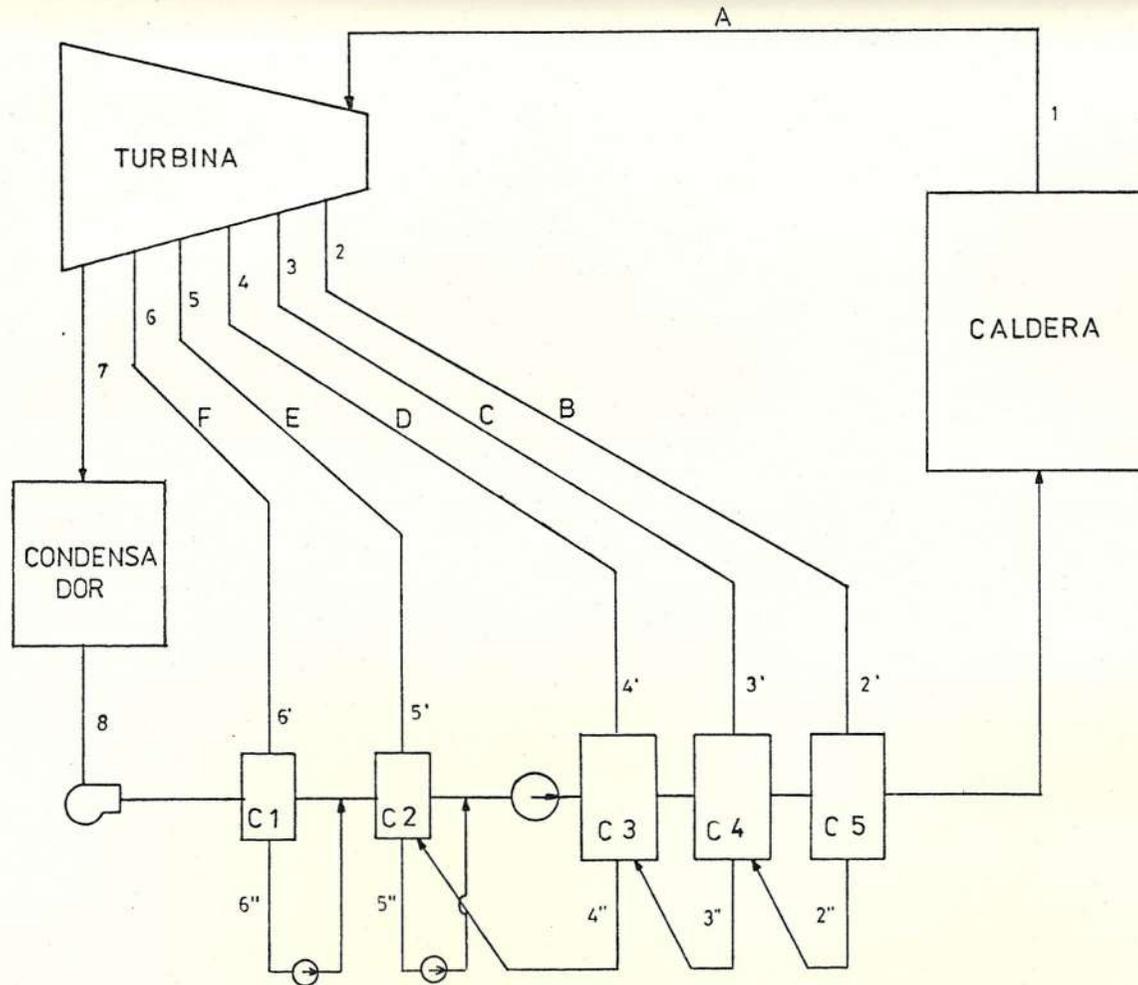
2) Proyecto de Aislamiento para las Líneas Principales de Vapor en una Central Térmica de 73 MW.

En una central térmica a vapor se desea aislar las líneas de vapor mostradas en el esquema adjunto, las mismas que operarán bajo las condiciones indicadas en dicho esquema y a una temperatura ambiente de 30 °C.

La planta tendrá una capacidad de salida neta de 73 MW (factor de planta 56%). El vapor promedio de salida generado es 282000 Kg/h a una presión de 9.5 Kg/cm², con el caldero operando a una eficiencia de 85% y funcionando 8400 h/año.

La inversión capital total para la planta es \$ 280 millones con un costo de moneda para la empresa de 7% y un período de depreciación de 20 años. El combustible a usarse es petróleo N° 2 que cuesta actualmente \$ 11 galón y tiene un poder calorífico de 10900 Kcal/Kg. El precio del combustible se espera que se incremente a una razón anual de 6%.

El tipo de aislamiento a ser usado es Silicato de Calcio, el mismo que será financiado bajo un costo de moneda sobre la inversión capital del aislamiento de 8%. El aislamiento será protegido con una cubierta de aluminio, y se estima que tendrá una vida potencial útil de 15 años.



condiciones de operacion

- 1 88.9 Atm
510°C
816 Kcal/Kg
- 2 22.3 Atm
338°C
742 Kcal/Kg
- 3 18.8 Atm
277°C
713 Kcal/Kg
- 4 6.8 Atm
196°C
678 Kcal/Kg
- 5 2.05 Atm
134°C
635 Kcal/Kg
- 6 0.62 Atm
114°C
595 Kcal/Kg

TUBERIA	DIAMETRO cm
A	20.32
B,C,D	15.24
E,F	10.16

ESQUEMA DE UNA CENTRAL TERMICA A VAPOR DE 73 MW

Los costos instalados promedio para el aislamiento obtenidos de un contratista local son los indicados en la hoja de trabajo para estimación del costo unitario de aislamiento.

(Nº 2) HOJA DE TRABAJO PARA ESTIMACIÓN DEL COSTO UNITARIO DE AISLAMIENTO

Diámetro de la Tubería Pulg (cm.)	Precios del Material y de la Mano de Obra* MP y LP											
	Capa Simple				Capa Doble				Capa Triple			
	2 pul (5.08 cm)		4 pul (10.16 cm)		5 pul (12.7 cm)		7 pul (17.78 cm)		8 pul (20.32 cm)		10 pul (25.40 cm)	
	MP	LP	MP	LP	MP	LP	MP	LP	MP	LP	MP	LP
1 (2.54)												
1½ (3.81)												
2 (5.08)												
2½ (6.35)												
3 (7.62)												
4 (10.16)	602.6	43.5	1334	59	1748	92.3	2875	140	3404	155	4462	189.4
5 (12.70)												
6 (15.24)	762.9	50.7	1519	70.11	2070	107	3312	160	3910	180	5152	214
8 (20.32)	897	56.0	1748	76.3	2392	116	3772	180	4461	200	5796	234
10 (25.40)												
12 (30.48)												
14 (35.56)												
16 (40.64)												
18 (45.72)												
20 (50.80)												
24 (60.96)												
30 (76.20)												
36 (91.44)												
Superficie Plana												

* Precios: Tubería = \$/m-lin; Superfi. Plana = \$/m²

COSTO DE CALOR

Factor multiplicador para promediar el costo de calor, B_1

- Período de vida del aislamiento
- Razón de incremento del precio del combustible

$$n_1 = \underline{15 \text{ años}}$$

$$i_1 = \underline{0.06}$$

$$B_1 = \frac{(1 + i_1)^{n_1} - 1}{i_1 n_1}$$

$$B_1 = \underline{1.55}$$

Costo de calor para el primer año, c_h

- Valor Calorífico del combustible
- Eficiencia de conversión del combustible
- Precio actual del combustible

$$\text{HHV} = \underline{10900 \text{ kcal/kg}}$$

$$E = \underline{0.85}$$

$$P_0 = \underline{\$ 11/\text{gal}}$$

$$c_h = \frac{P_0 \times 10^6}{E c \times \text{HHV}}; \quad c_h = \frac{P_c \times 10^3}{E c \times \text{HHV}}; \quad c_h = \frac{P_g \times 10^3}{E c \times \text{HHV}}$$

$$c_h = \underline{\$ 362/10^6 \text{ kcal}}$$

Costo promedio anual de calor (incluyendo 10% de costos de operación y mantenimiento), c_h

- Costo de calor para el primer año
- Factor multiplicador B_1

$$c_h = \underline{\$ 362/10^6 \text{ kcal}}$$

$$B_1 = \underline{1.55}$$

$$C_h = 1.1 \times B_1 \times c_h$$

$$C_h = \underline{\$ 617 / 10^6 \text{ kcal}}$$

Factor de amortización para la planta, B_2

- Período de vida de la planta
- Razón de amortización de la planta

$$n_2 = \underline{20 \text{ años}}$$

$$i_2 = \underline{0.07}$$

$$B_2 = \frac{i_2(1 + i_2)^{n_2}}{(1 + i_2)^{n_2} - 1}$$

$$B_2 = \underline{0.094}$$

Costo de capital anual de calor, C_k

- Producción de calor promedio anual esperada
- Inversión capital total para la planta
- Factor de amortización de la planta

$$Q = \underline{1.92 \times 10^6, 10^6 \text{ kcal}}$$

$$PF = \underline{\$ 280 \times 10^6}$$

$$B_2 = \underline{0.094}$$

$$C_k = \frac{PF \times B_2}{Q}$$

$$C_k = \underline{\$ 13.71 / 10^6 \text{ kcal}}$$

Costo Total de Calor, M

- Costo promedio anual de calor
- Costo capital anual de calor

$$C_h = \underline{\$ 617 / 10^6 \text{ kcal}}$$

$$C_k = \underline{\$ 13.71 / 10^6 \text{ kcal}}$$

$$M = C_h + C_k$$

$$M = \underline{\$ 631 / 10^6 \text{ kcal}}$$

(Nº 1) HOJA DE TRABAJO PARA DETERMINACIÓN DEL COSTO INCREMENTAL DE AISLAMIENTO

Aplicación: Tubería de Vapor
 Especificaciones
 Aislamiento: Silicato de Calcio
 Cobertura: Chapa metálica
 Acabado: Pintura de aluminio

W Espesor de aislamiento, cm
 P Precio de aislamiento instalado
 Tubería \$/m-lin
 Superf. PLana- \$/m²
 m_c Costo incremental de aislamiento
 Tubería \$/m-lin/cm
 Superf. plana, \$/m²/cm

Diámetro del tubo Pul (cm.)	CAPA SIMPLE					CAPA DOBLE					CAPA TRIPLE				
	W ₁	P ₁	W ₂	P ₂	m _{c1}	W ₁	P ₁	W ₂	P ₂	m _{c2}	W ₁	P ₁	W ₂	P ₂	m _{c3}
1 (2.54)															
1 ½ (3.81)															
2 (5.08)															
2 ½ (6.35)															
3 (7.62)															
4 (10.16)	5.08	646.1	10.16	1393	147	12.70	1340.3	17.78	3015	231.2	20.32	3559	25.40	4651.4	215
5 (12.70)															
6 (15.24)	5.08	813.6	10.16	1589	152.6	12.70	2177	17.78	3472	254.9	20.32	4090	25.40	5366	251.3
8 (20.32)	5.08	953	10.16	1824	171.5	12.70	2508	17.78	3952	284	20.32	4661	25.40	6030	269
10 (25.40)															
12 (30.48)															
14 (35.56)															
16 (40.64)															
18 (45.72)															
20 (50.80)															
24 (60.96)															
30 (76.20)															
36 (91.44)															
Superficie Plana															

Nota: W₁ = espesor para extremo inferior del rango de la capa; W₂ = espesor para extremo superior del rango de la capa

P₁ = precio instalado para W₁ ; P₂ = precio instalado para W₂

ESPESOR OPTIMO DE AISLAMIENTO (TUBERIA A)

- 1.- Calcular la temperatura media del aislamiento

$$T_m = \frac{T_p + T_a}{2}$$

$$T_m = \underline{270} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 2.- Anotar la conductividad térmica del aislamiento usando curvas o tablas disponibles

$$k = \frac{7.26}{\text{h-m}^2\text{-}^\circ\text{C}} \text{ Kcal-cm}$$

- 3.- Calcular la diferencia total de temperatura

$$\Delta T_t = T_p - T_a$$

$$\Delta T_t = \underline{480} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 4.- Anotar las horas de operación anuales

$$y = \underline{8400} \text{ h}$$

- 5.- Encontrar D_s para superficies planas o D_p para tubos

$$D_s = k \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M \cdot 10^{-6}$$

$$D_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$D_p = 6.28 \times 10^{-8} \cdot k \Delta T_t \cdot y \cdot M$$

$$D_p = \underline{1160}$$

- 6.- Determinar B_3 usando la razón de retorno sobre el costo de aislamiento i_3 , y el período de vida

$$i_3 = \underline{0.08}$$

del aislamiento n_1

$$n_1 = \frac{15 \text{ años}}{\quad}$$

$$B_3 = \frac{i_3(1+i_3)^{n_1}}{(1+i_3)^{n_1} - 1}$$

$$B_3 = \frac{0.117}{\quad}$$

7.- Anotar el costo incremental del aislamiento para capa simple, doble, o triple.

$$m_{c1} = \frac{\$ 171/\text{m-lin}}{\quad}$$

$$m_{c2} = \frac{\$ 284/\text{m-lin}}{\quad}$$

$$m_{c3} = \frac{\quad}{\quad}$$

8.- Encontrar Z_s para superficies planas o Z_p para tubos

$$Z_s = \frac{D_s}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_s = \frac{\quad}{\quad}$$

$$Z_p = \frac{D_p}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_p = \frac{53 \quad 32}{\quad}$$

9.- Calcular $k.R_s$ (0.14 es un valor típico para R_s)

$$kR_s = \frac{1.06}{\quad}$$

10.- Use la Fig. 5.2 apropiada para determinar el espesor óptimo

$$w_1 = \frac{25.40 \text{ cm}}{\quad}$$

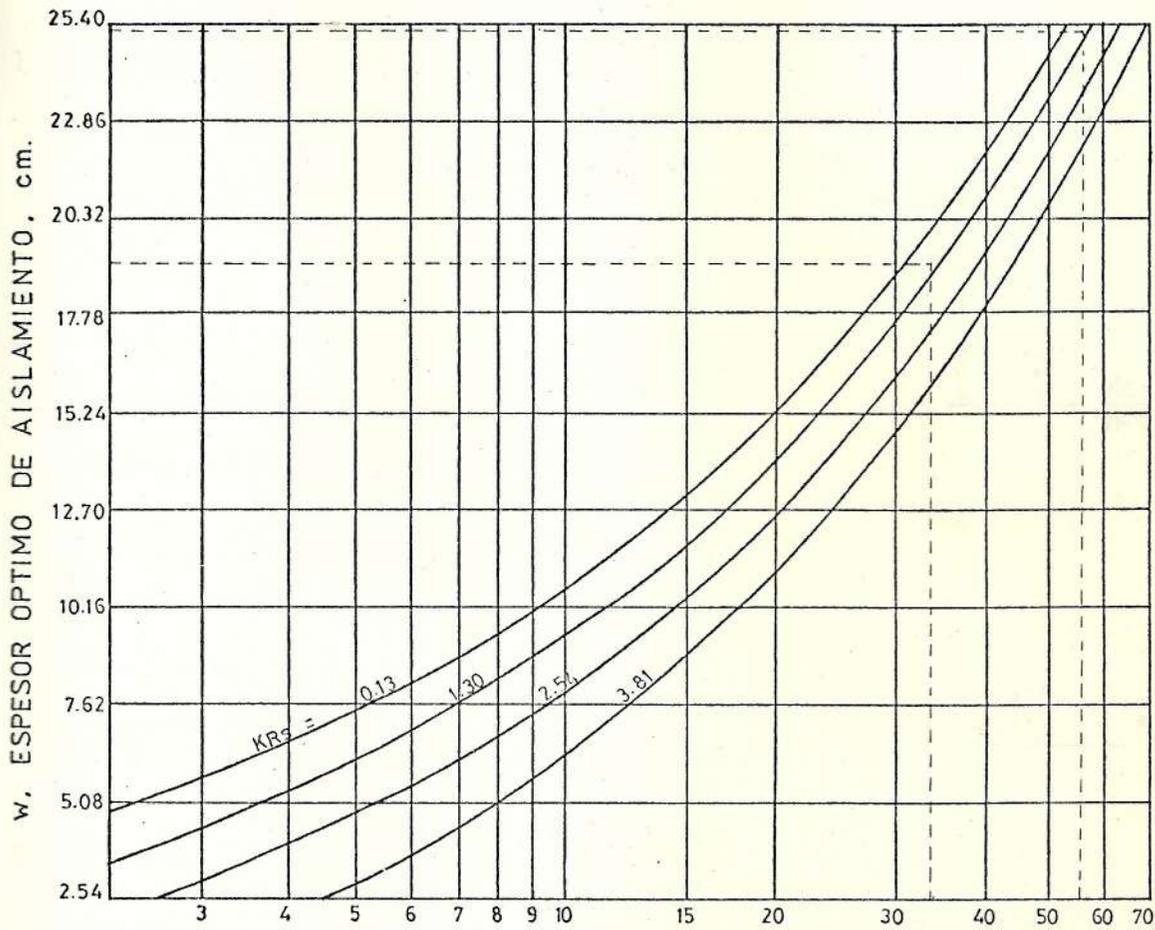
11.- Si el espesor económico óptimo encontrado en el paso 10 está dentro del rango de capa simple (correspondiente al costo incremental de capa simple m_{c1} , usado en el paso 7), el espesor es correcto. Si el espesor está más

allá del rango de capa simple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa doble m_{c2} .

$$w_2 = \frac{19.05}{\quad} \text{ cm.}$$

12.- Si el espesor económico óptimo, usando el costo incremental de capa doble, está en el rango de capa triple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa triple m_{c3} .

$$w_3 = \frac{\quad}{\quad} \text{ cm.}$$



$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2j ESPESOR OPTIMO, TUBO 20.32 cm. (8 pul.)

ESPESOR OPTIMO DE AISLAMIENTO (TUBERIAS B.C.D)

- 1.- Calcular la temperatura media del aislamiento

$$T_m = \frac{T_p + T_a}{2}$$

$$T_m = \frac{\begin{array}{l} B \quad 184 \\ C \quad 154 \\ D \quad 113 \end{array}}{\quad} \quad ^\circ C$$

- 2.- Anotar la conductividad térmica del aislamiento usando curvas o tablas disponibles

$$k = \frac{\begin{array}{l} B \quad 5.26 \\ C \quad 4.76 \\ D \quad 4.13 \end{array}}{\quad} \quad \frac{\text{Kcal-cm}}{\text{h-m}^2-\text{}^\circ C}$$

- 3.- Calcular la diferencia total de temperatura

$$\Delta T_t = T_p - T_a$$

$$\Delta T_t = \frac{\begin{array}{l} B \quad 308 \\ C \quad 247 \\ D \quad 166 \end{array}}{\quad} \quad ^\circ C$$

- 4.- Anotar las horas de operación anuales

$$y = \underline{8400} \quad h$$

- 5.- Encontrar D_s para superficies planas o D_p para tubos

$$D_s = k \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M \cdot 10^{-6}$$

$$D_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$D_p = 6.28 \times 10^{-8} \cdot k \Delta T_t \cdot y \cdot M$$

$$D_p = \frac{\begin{array}{l} B \quad 539 \\ C \quad 391 \\ D \quad 228 \end{array}}{\quad}$$

- 6.- Determinar B_3 usando la razón de retorno sobre el costo de aislamiento i_3 , y el período de vida

$$i_3 = \underline{0.08}$$

del aislamiento n_1

$$B_3 = \frac{i_3(1+i_3)^{n_1}}{(1+i_3)^{n_1} - 1}$$

$$n_1 = \frac{15 \text{ años}}{\quad}$$

$$B_3 = \frac{0.117}{\quad}$$

7.- Anotar el costo incremental del aislamiento para capa simple, doble, o triple.

$$m_{c1} = \frac{\$ 153/\text{m.lin}}{\quad}$$

$$m_{c2} = \frac{\$ 255/\text{m.lin}}{\quad}$$

$$m_{c3} = \frac{\quad}{\quad}$$

8.- Encontrar Z_s para superficies planas o Z_p para tubos

$$Z_s = \frac{D_s}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_s = \frac{\quad}{\quad}$$

$$Z_p = \frac{D_p}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_p = \frac{\begin{array}{l} B \ 27 \ 16 \\ C \ 20 \ 12 \\ D \ 13 \ 8 \end{array}}{\quad}$$

9.- Calcular $k.R_s$ (0.14 es un valor típico para R_s)

$$kR_s = \frac{\begin{array}{l} B \ 0.73 \\ C \ 0.58 \\ D \ 0.60 \end{array}}{\quad}$$

10.- Use la Fig. 5.2 apropiada para determinar el espesor óptimo

$$w_1 = \frac{\begin{array}{l} B \ 15.24 \\ C \ 12.70 \\ D \ 10.16 \end{array}}{\quad} \text{ c.m.}$$

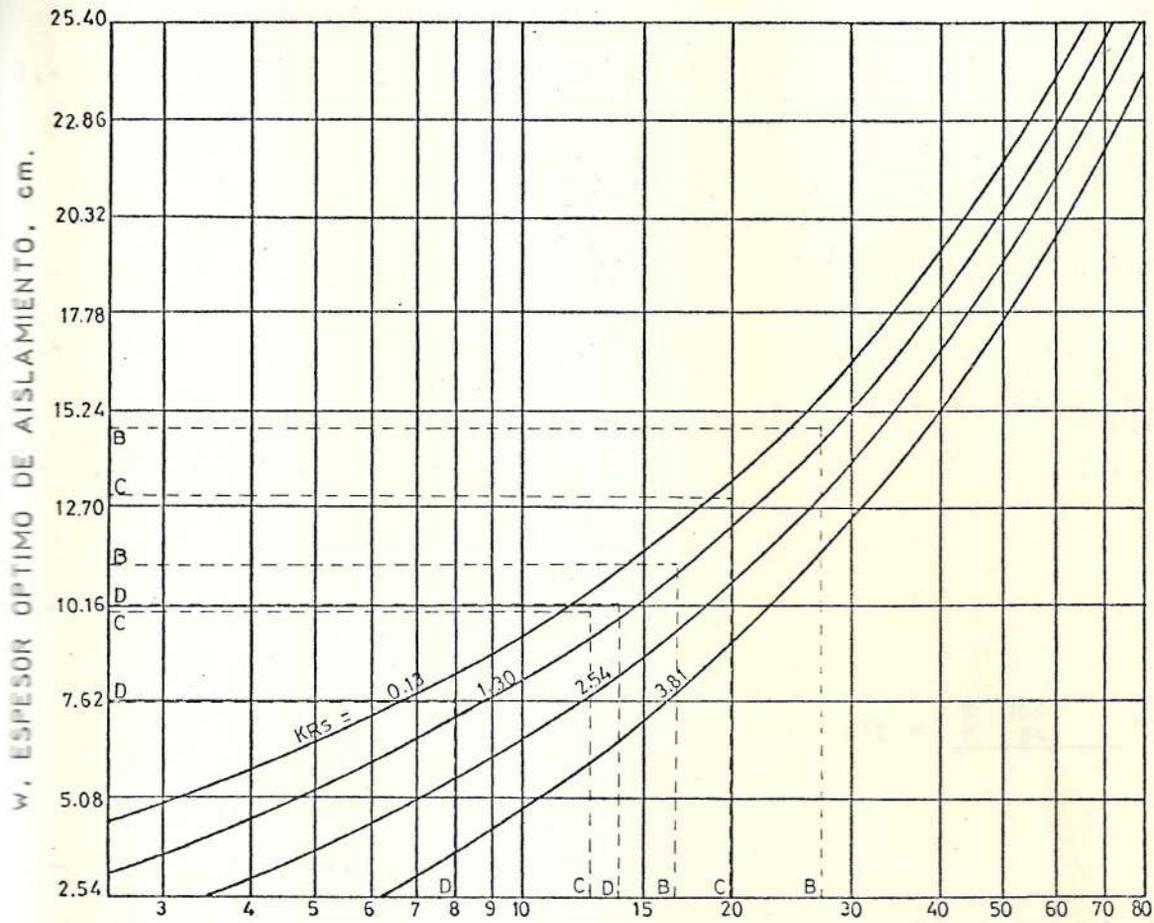
11.- Si el espesor económico óptimo encontrado en el paso 10 está dentro del rango de capa simple (correspondiente al costo incremental de capa simple m_{c1} , usado en el paso 7), el espesor es correcto. Si el espesor está más

allá del rango de capa simple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa doble m_{c2} .

$$w_2 = \frac{\begin{array}{l} B \quad 11.43 \\ C \quad 10.16 \\ D \quad 7.67 \end{array}}{\quad} \text{ cm.}$$

12.- Si el espesor económico óptimo, usando el costo incremental de capa doble, está en el rango de capa triple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa triple m_{c3} .

$$w_3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm.}$$



$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig 5-2i ESPESOR OPTIMO, TUBO 15.24 cm (6 pul.)

ESPESOR OPTIMO DE AISLAMIENTO (TUBERIAS E.F)

- 1.- Calcular la temperatura media del aislamiento

$$T_m = \frac{T_p + T_a}{2}$$

$$T_m = \frac{E \ 82}{F \ 72} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 2.- Anotar la conductividad térmica del aislamiento usando curvas o tablas disponibles

$$k = \frac{E \ 3.76}{F \ 3.63} \frac{\text{Kcal-cm}}{\text{h-m}^2\text{-}^\circ\text{C}}$$

- 3.- Calcular la diferencia total de temperatura

$$\Delta T_t = T_p - T_a$$

$$\Delta T_t = \frac{E \ 104}{F \ 84} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 4.- Anotar las horas de operación anuales

$$y = \underline{8400} \text{ h}$$

- 5.- Encontrar D_s para superficies planas o D_p para tubos

$$D_s = k \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M \cdot 10^{-6}$$

$$D_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$D_p = 6.28 \times 10^{-8} \cdot k \cdot \Delta T_t \cdot y \cdot M$$

$$D_p = \frac{E \ 130}{F \ 102}$$

- 6.- Determinar B_3 usando la razón de retorno sobre el costo de aislamiento i_3 , y el período de vida

$$i_3 = \underline{0.08}$$

del aislamiento n_1

$$B_3 = \frac{i_3(1+i_3)^{n_1}}{(1+i_3)^{n_1} - 1}$$

$$n_1 = \frac{15 \text{ años}}{\quad}$$

$$B_3 = \frac{0.117}{\quad}$$

7.- Anotar el costo incremental del aislamiento para capa simple, doble, o triple.

$$m_{c1} = \frac{\$ 141/m\text{-lin}}{\quad}$$

$$m_{c2} = \frac{\$ 231/m\text{-lin}}{\quad}$$

$$m_{c3} = \frac{\quad}{\quad}$$

8.- Encontrar Z_s para superficies planas o Z_p para tubos

$$Z_s = \frac{D_s}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_s = \frac{\quad}{\quad}$$

$$Z_p = \frac{D_p}{1.1m_c B_3}$$

$$Z_p = \frac{\begin{matrix} E & 7.2 & 4.4 \\ F & 5.6 & 3.4 \end{matrix}}{\quad}$$

9.- Calcular $k.R_s$ (0.14 es un valor típico para R_s)

$$kR_s = \frac{\begin{matrix} E & 0.53 \\ F & 0.51 \end{matrix}}{\quad}$$

10.- Use la Fig. 5.2 apropiada para determinar el espesor óptimo

$$w_1 = \frac{\begin{matrix} E & 6.35 \\ F & 5.08 \end{matrix} \text{ cm}}{\quad}$$

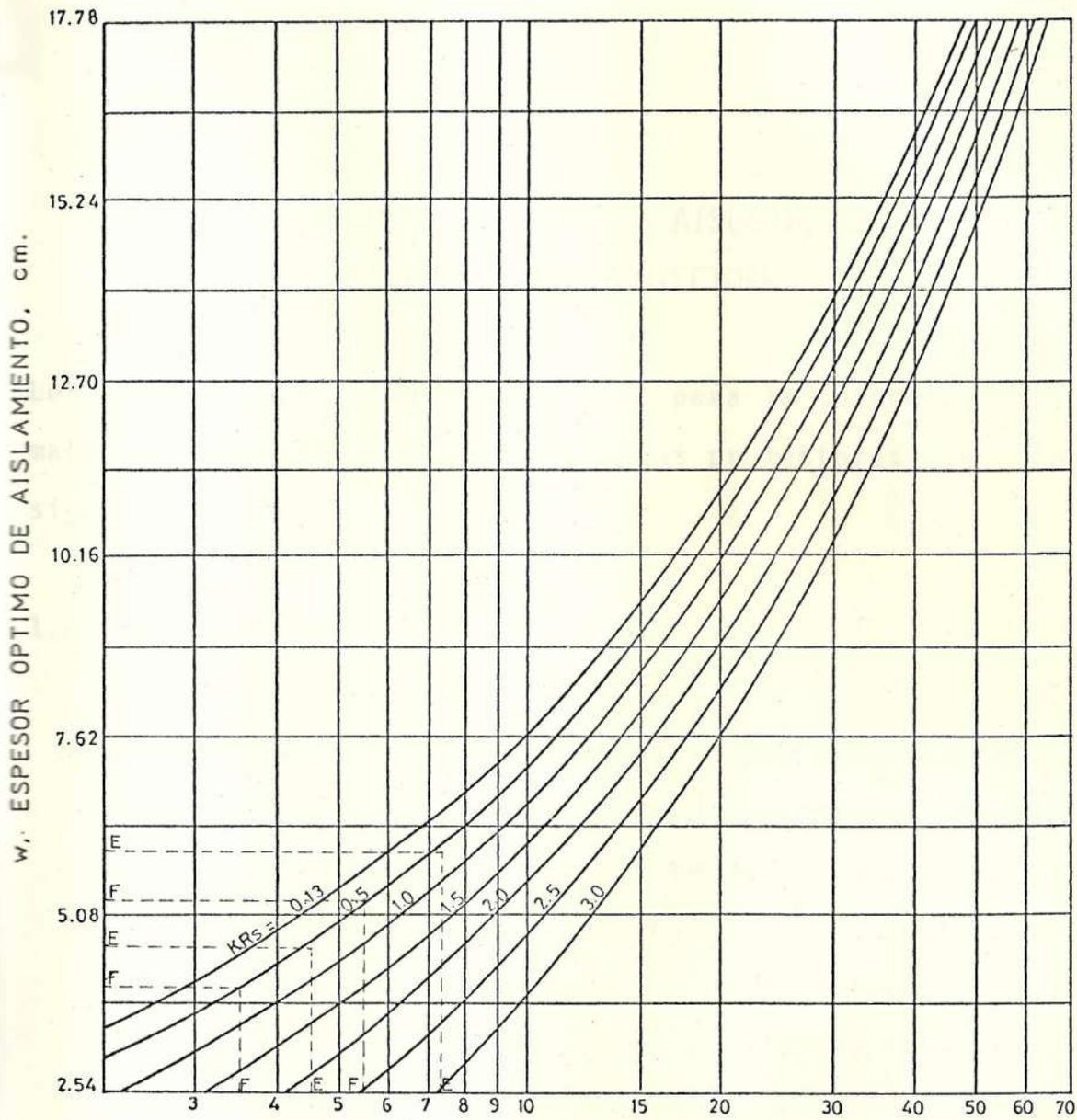
11.- Si el espesor económico óptimo encontrado en el paso 10 está dentro del rango de capa simple (correspondiente al costo incremental de capa simple m_{c1} , usado en el paso 7), el espesor es correcto. Si el espesor está más

allá del rango de capa simple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa doble m_{c2} .

$$w_2 = \frac{E \quad 5.08}{F \quad 3.81} \text{ cm.}$$

12.- Si el espesor económico óptimo, usando el costo incremental de capa doble, está en el rango de capa triple, repetir el procedimiento desde el paso 7, usando el costo incremental de capa triple m_{c3} .

$$w_3 = \text{_____ cm.}$$



$$Z_p = \frac{D_p}{1.1 m_c B_3}$$

fig. 5-2g ESPEJOR OPTIMO, TUBO 10.16 cm. (4 pul.)

APENDICE B

SELECCION DE MATERIALES AISLANTES Y RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

Los factores que deben considerarse para la selección de los materiales aislantes y recubrimientos protectores son los siguientes:

1.- Selección de la forma física

La Tabla B.1 agrupa los materiales aislantes basándose en su forma física y en la idoneidad general para los servicios indicados, por lo que puede ser utilizada para hacer la selección de la forma física del material. La naturaleza exacta del material puede determinarse mediante la consideración de los siguientes factores:

- a.- Temperatura en el lado caliente.- No se debe usar ningún material a una temperatura superior de la máxima de funcionamiento seguro.

- b.- Conductividad Térmica.- Debido a variaciones de la

- conductividad térmica de los materiales aislantes con la temperatura, las comparaciones de materiales, a efectos de conductividad, deben efectuarse a una misma temperatura. Luego, permaneciendo invariables otros factores, debe seleccionarse el material con la conductividad térmica más baja.
- c.- Resistencia al deterioro mecánico.- En general los materiales más aislantes son los mecánicamente más débiles, por lo que debe utilizarse con alguna protección (o soporte).
- d.- Resistencia a la absorción.- Muchos materiales absorben humedad incrementando su conductividad térmica y consecuentemente puede sufrir una eventual desintegración, por lo que deben usarse protecciones impermeables si el aislamiento queda expuesto a un ambiente que contenga humedad, o esté situado a la intemperie.
- e.- Inflamibilidad.- Generalmente los materiales aislantes no son inflamables, sin embargo, algunos de los recubrimientos protectores que puedan usarse resultan inflamables.

- f.- Eliminación y reutilización de los materiales aislantes.- La mayoría de los materiales aislantes pueden quitarse con facilidad, pero a menudo la eliminación de sus recubrimientos protectores resulta más difícil excepto en el caso de la chapa metálica.
- g.- El costo.- El costo de los materiales aislantes es un factor muy importante y debe considerarse cuando se estimen las economías que pueden conseguirse mediante el aislamiento adecuado.
- h.- Riesgos contra la salud.- Algunos materiales aislantes son nocivos para la salud, por lo tanto deben considerarse los posibles riesgos de salud producidos por inhalación de polvo, contacto con la piel, y contaminación.

2.- Selección del acabado y de los recubrimientos protectores.

La Tabla. B.2 enumera todas las formas de protección aconsejables para los sistemas individuales de aislamiento.

3.- Selección del espesor de aislamiento

El espesor de aislamiento dependerá de los siguientes factores:

- a.- Pérdida térmica máxima permisible
- b.- Espesor económico
- c.- Protección de personal

FORMA FÍSICA E IDONEIDAD EN GENERAL DE LOS MATERIALES AISLANTES

1	2	3	4	5
Necesario para Forma física	Tuberías	Depósitos	Bridas, válvulas, aberturas	Formas irregulares
Rígida	Se recomienda para el uso en general	No se recomienda cuando es probable que se produzcan excesivas tensiones de dilatación térmica.	Aconsejable	No se recomienda
Relleno suelto	No se recomienda	No se recomienda	No se recomienda	Se recomienda si puede encerrarse la forma en una caja
Flexible	Solamente se recomienda cuando va a utilizarse envoltura metálica	Se recomienda para el uso general	Se recomienda especialmente cuando se requiere un acceso frecuente	Puede utilizarse pero resulta menos satisfactorio que el aislamiento plástico o el relleno suelto
Banda flexible	Solamente se recomienda para las instalaciones muy pequeñas y para los trabajos temporales	No se recomienda	No se recomienda	No se recomienda
Plástico	Solamente se recomienda para los pequeños sistemas complejos.	Se recomienda en forma pulverizada para los grandes depósitos	Se recomienda para las válv. pequeñas cuando van a utilizarse mater. rígidos p. el resto del sistema	Se recomienda cuando resulta difícil el cercamiento; se aconseja la forma pulverizable a pistola p. canalizac. rectangul.
Lámina	No se recomienda	Puede usarse en el caso que se requiera una gran ligereza	No se recomienda	No se recomienda

TABLA B.2

MATERIALES AISLANTES Y RECUBRIMIENTOS PROTECTORES QUE SE RECOMIENDAN
(I = IMPERMEABLE; P.M. = PROTECCIÓN CONTRA EL DETERIORO MECÁNICO)

1	2	3	4	5	6	7
U s o	I y P.M.	I y P.M.	PM.solamente	I y P.M.	I. solamente	I. solamente
Recubri- Forma Físi- ca del ais- lamiento	Chapa Metálica	Asbesto Cemento	Composición aislante de endurecimen- to duro	Compuesto asfáltico o bitumi- noso.	Cinta impreg- nada con PVC y lámina de poli-isobutileno	Cartón Alquitranado
Rígido	Muy buena. Normalmen- te resulta cara	Muy bueno sobre tela metálica	Bastante satis- factorio encima de tela metáli- ca. Necesita ser impermeable en exteriores	Bueno en- cima de tela me- tálica	Bueno	Bastante satis- factorio cuando se fija en tela metálica
Relleno suelto	Recomenda- ble	No se aconseja	No se aconseja	No se re- comienda	No se reco- mienda	No se reco- mienda
Flexible	Muy bueno	Puede utilizarse encima de metal foraminado en las condic. at- mósfer. corrosivas	No se reco- mienda	No se re- comienda	No se reco- mienda	No se reco- mienda
Plástico	Muy bueno. Normalmen- te resulta cara	Muy bueno encima de tela metálica	Bastante satis- factorio encima de tela metáli- ca. Necesita ser impermeable en exteriores.	Bueno en- cima de tela me- tálica	Bueno	Bastante satis- factorio cuando se fija en tela metálica
Lámina	Muy bueno	No se recomienda	No se recomien- da.	No se re- comienda	No se re- comienda	No se recomien- da.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- ASHRAE, Handbook of Fundamentales 1972, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- 2.- E.E.U.A. Engineering Equipment Users Association, Aislamiento Térmico de Tuberías y Depósitos, Editorial Labor S.A.
- 3.- Ernitz Anatolio, Manual de Aislación Térmica, Editorial Alsina, Pág. 10.
- 4.- Faires Moring Virgil, Termodinámica, Unión Tipográfica, Editorial Hispano-Americana, Pág. 769.
- 5.- Federal Energy Administration, Washington D.C. 20461, Economic Thickness for Industrial Insulation, Office of Industrial Programas Energy Conservation Now.
- 6.- Kirk Raymond E., Enciclopedia de Tecnología Química, Tomo I, Unión Tipográfica Hispano-Americana, Pág. 601.

- 7.- Kreith Frank, Principios de Transferencia de Calor, Herrero Hermanos Sucesores S.A., Pág. 229-230.
- 8.- Mariño P. Rafael, Producción y Transmisión Industrial de Calor, Editorial Dossat S.A., Pág. 86.
- 9.- Skrotzki Bernhardt G.A., Vopat William A., Power Station Engineering and Economy, McGraw-Hill Book Company INC.