

**APROXIMACION AL ESTUDIO DEL RIESGO
DEL BLEVE Y SUS EFECTOS EN LOS
GENERADORES MARINOS DE VAPOR Y LOS
TANQUES DE CARGA DE LOS BUQUES LNG-
LPG. APLICACION COMPARATIVA DE LAS
NORMAS QUE LO REGULAN Y PREVIENEN.**

Autor: German de Melo Rodriguez
Director: Emilio Eguia López

Barcelona, mayo de 1994

4.- Metodología.

4.1.- Medios utilizados.

4.1.1.- Programa de cálculo.

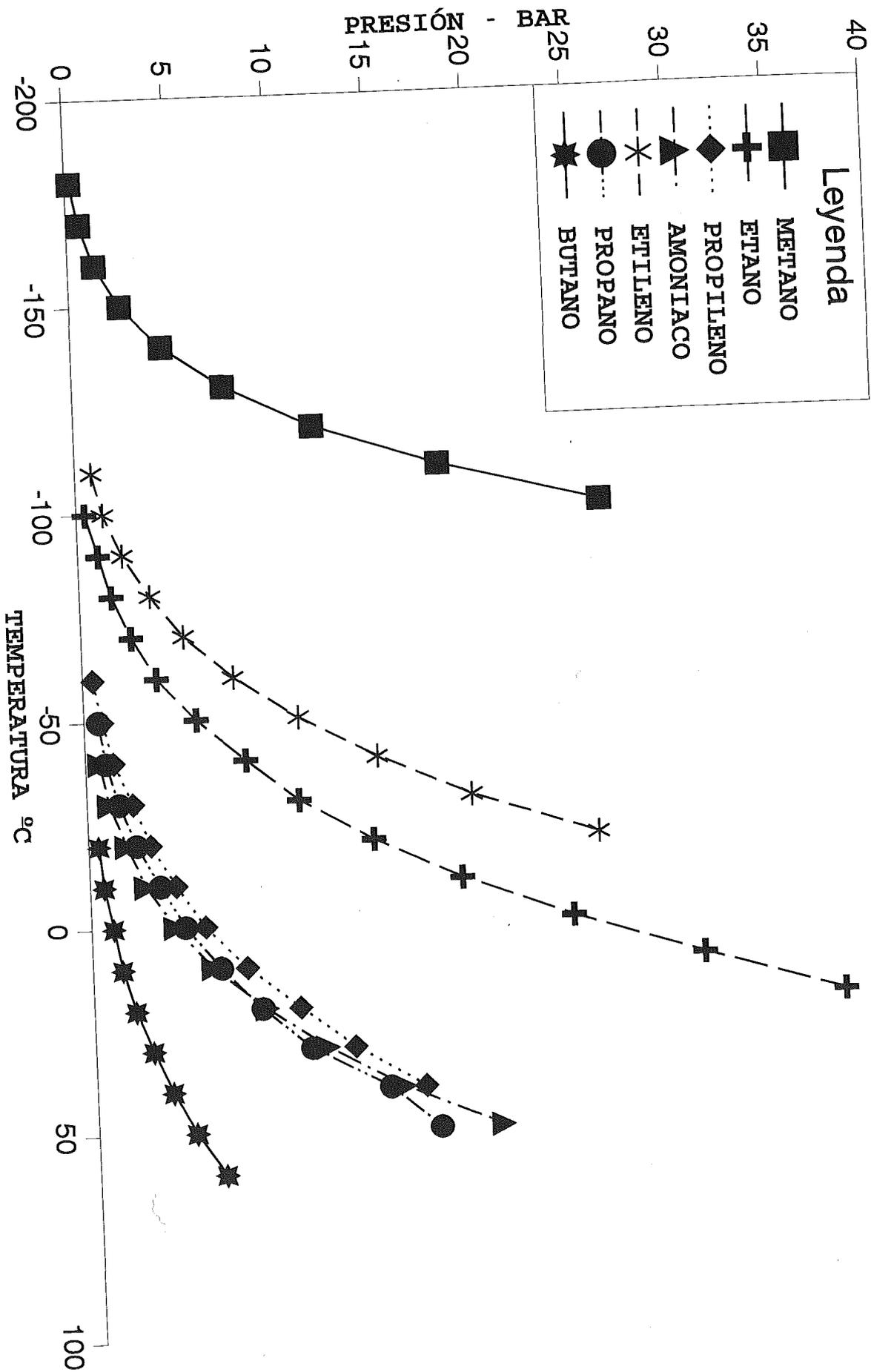
Con el objeto de realizar los cálculos con mayor rapidez, se ha realizado un programa de cálculo a través de una macro sacada de la hoja de cálculo QPRO 1.0, y que consta de 33 ecuaciones y dos gráficas, la estructura de la misma, se puede ver en el anexo 5.

4.1.2.- Buque tipo de transporte de gases licuados.

El transporte marítimo de gases licuados LPG-LNG, es relativamente joven, y debido a los inconvenientes que este presenta como consecuencia de las bajas temperaturas de estos gases a la presión atmosférica o a presiones relativamente moderadas figura 32. El primer intento se remonta a principio de los años treinta en el que se transforma un buque de carga general en buque LPG modificando su estructura interna e incorporándole recipientes a presión sin aislamiento dentro de sus bodegas, con lo que se transportaba el producto a la temperatura ambiente y a la presión de vapor correspondiente a ésta. Posteriormente se fueron utilizando en la construcción de los buques LPG-LNG, nuevos materiales capaces de trabajar a muy bajas temperaturas -hasta $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ - sin que su resistencia mecánica disminuya por debajo del límite elástico requerido, además de materiales aislantes que permiten transportar estos gases licuados a la presión atmosférica y bajas temperaturas o a presiones y temperaturas moderadas.

En la actualidad el transporte marítimo de gases licuados, se realiza con tres tipos de buques; el tipo presurizado en el que la temperatura de transporte es la ambiente y por lo tanto la presión de vapor la correspondiente a esta temperatura sin superarse la presión de 18 Kg/cm^2 , debido al excesivo escantillonado que adquirirían los recipientes.

FIGURA 32



El segundo tipo de buque es el denominado semipresurizado, siendo la presión máxima que se alcanza la de 9 Kg/cm², con lo que la temperatura del producto a transportar es relativamente moderadamente baja, lo que le obliga a utilizar aislamiento térmico en los recipientes, no obstante con este tipo de recipiente el escantillonado del mismo disminuye en gran medida.

Finalmente, el tercer tipo de buque es el denominado refrigerado, el cual transporta el producto a una presión ligeramente superior a la atmosférica o como máximo hasta 0,7 Kg/cm². Con este tipo de buques, el aislamiento térmico lo puede llevar tanto en el interior como en el exterior del recipiente, en el primer caso el producto a transportar no esté en contacto con la estructura del tanque que lo soporta y por lo tanto los materiales que se utilizan para éste tipo de buque sean los de uso corriente en la construcción naval.

Visto los tres tipos de buques para el transporte de gases licuados, se concluye que el tipo presurizado figura 36 (a) a (d) no lleva aislamiento térmico, el semipresurizado o semirrefrigerado si dispone de éste al igual que el completamente refrigerado, el cual lo puede llevar colocado tanto en el interior como en el exterior del recipiente figuras 33 y 34.

De acuerdo con la Organización Marítima Intergubernamental y todas las Sociedades de Clasificación, los recipientes o

TANQUE INDEPENDIENTE

AISLAMIENTO EN EL EXTERIOR
DEL TANQUE

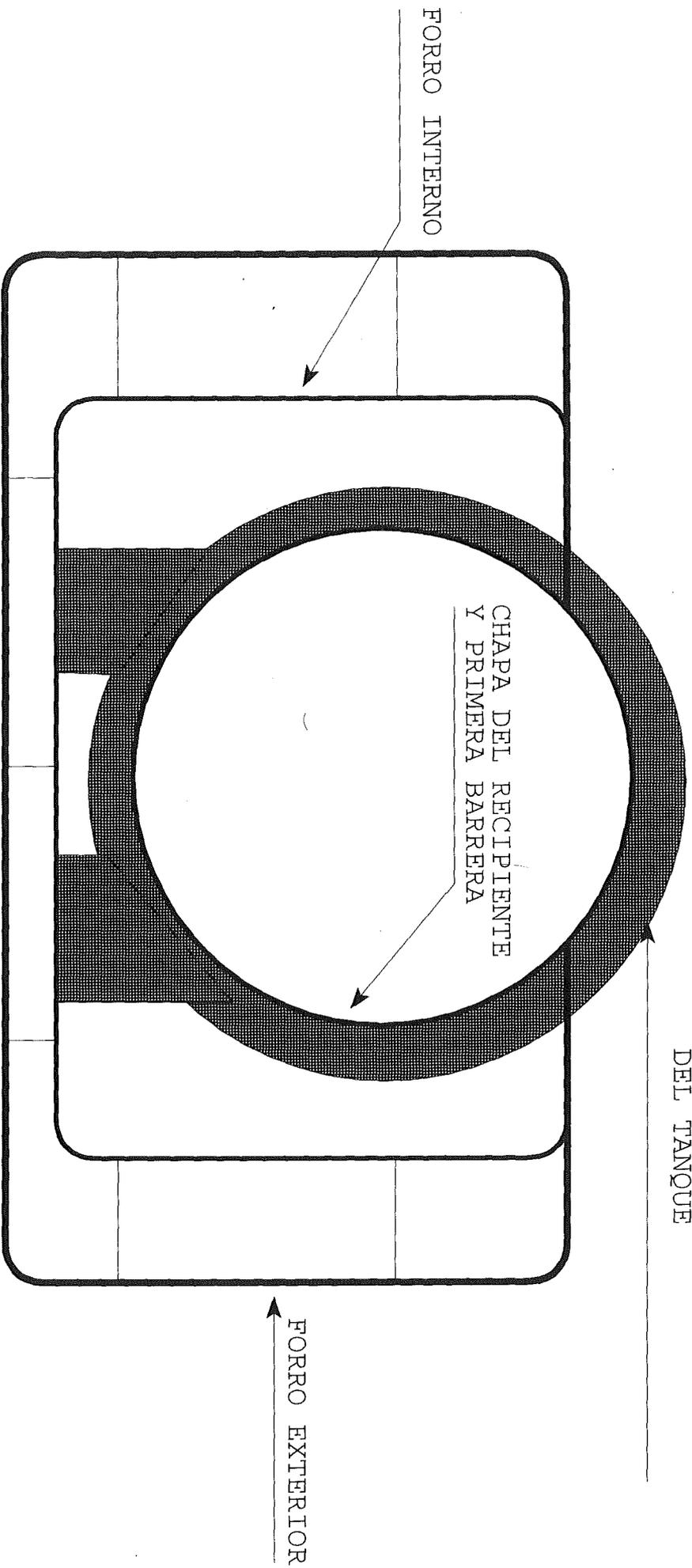


FIGURA 34

TANQUE TIPO MEMBRANA

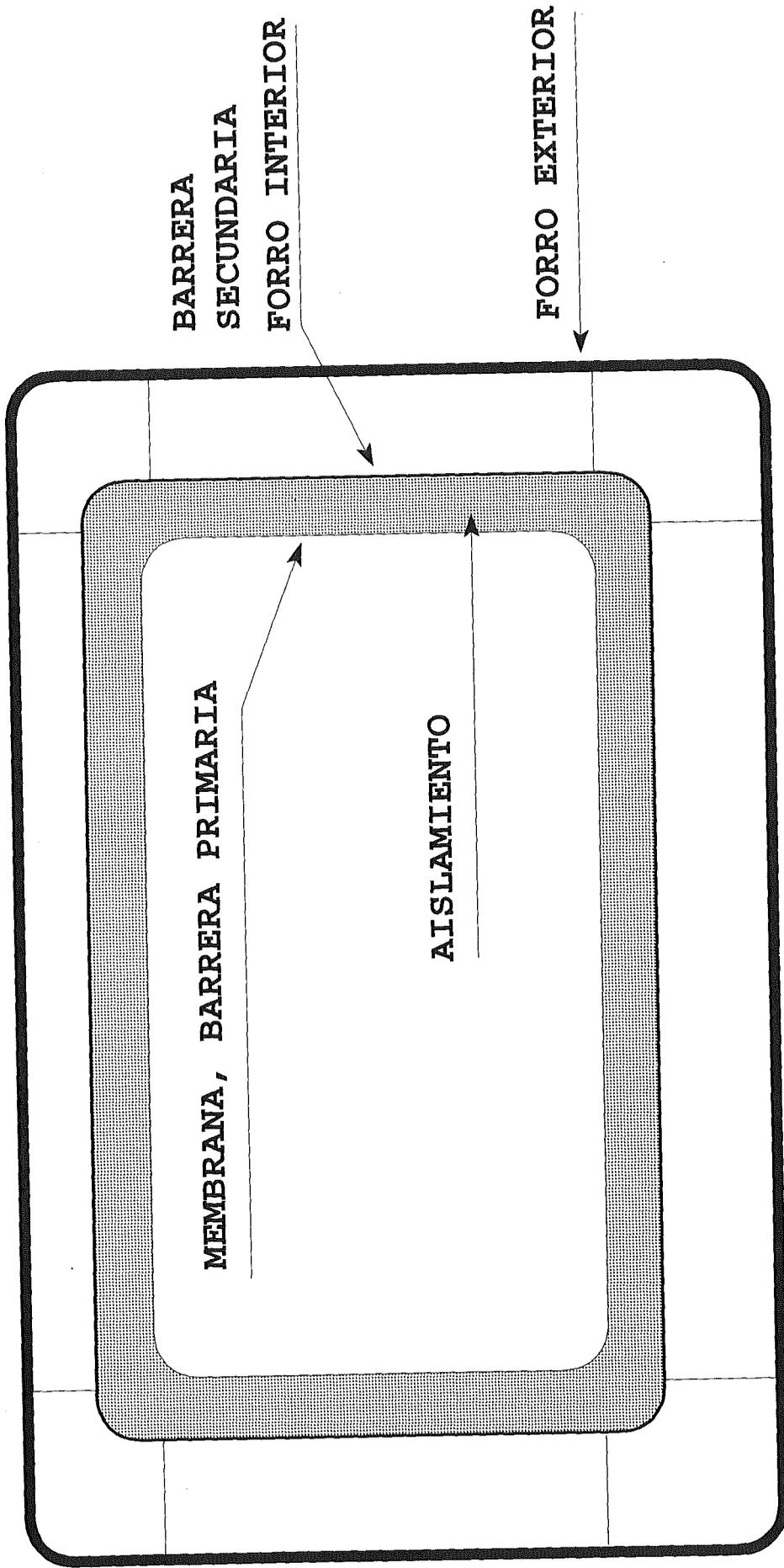


FIGURA 33

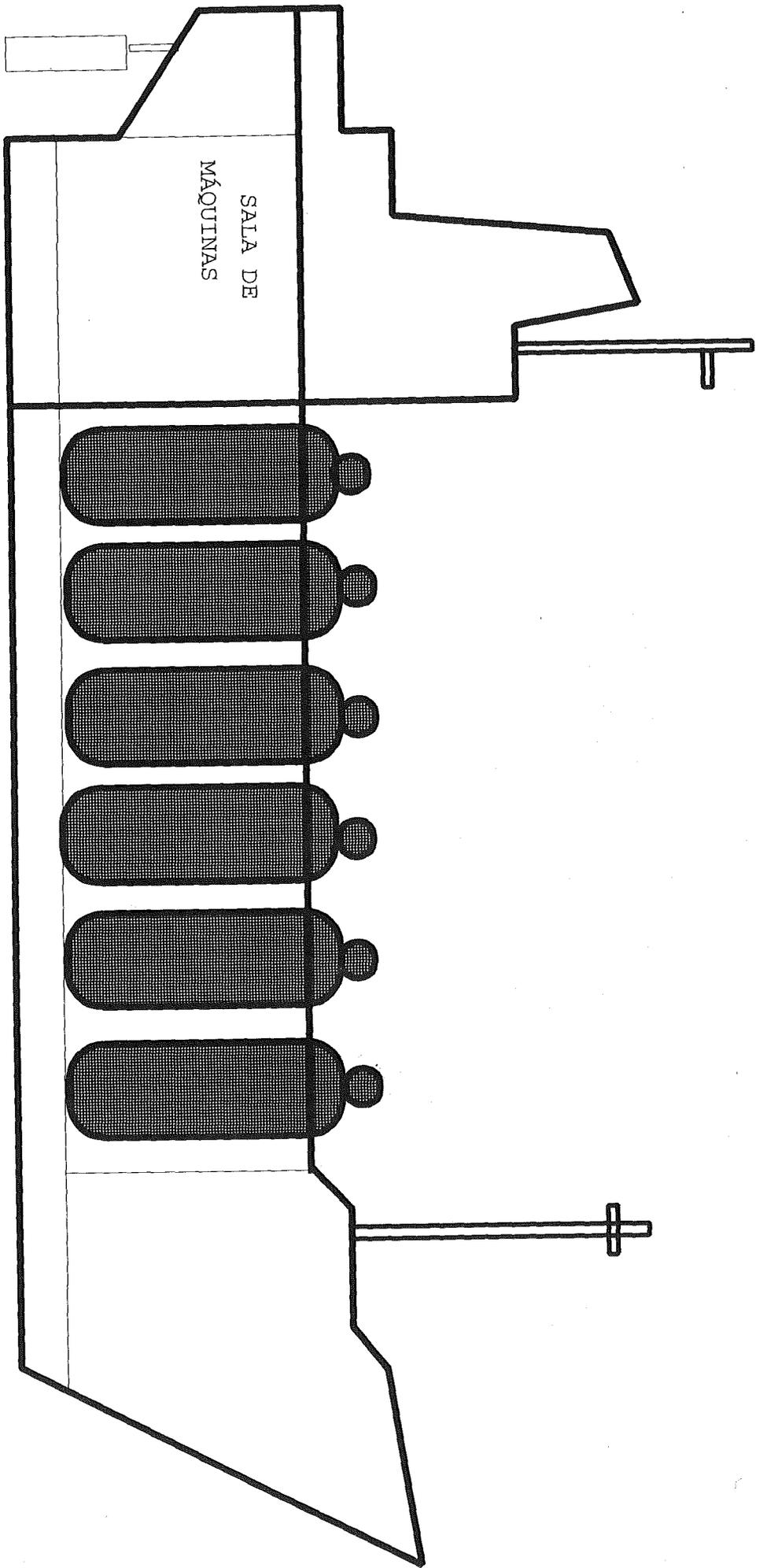


FIGURA 36 (a.)

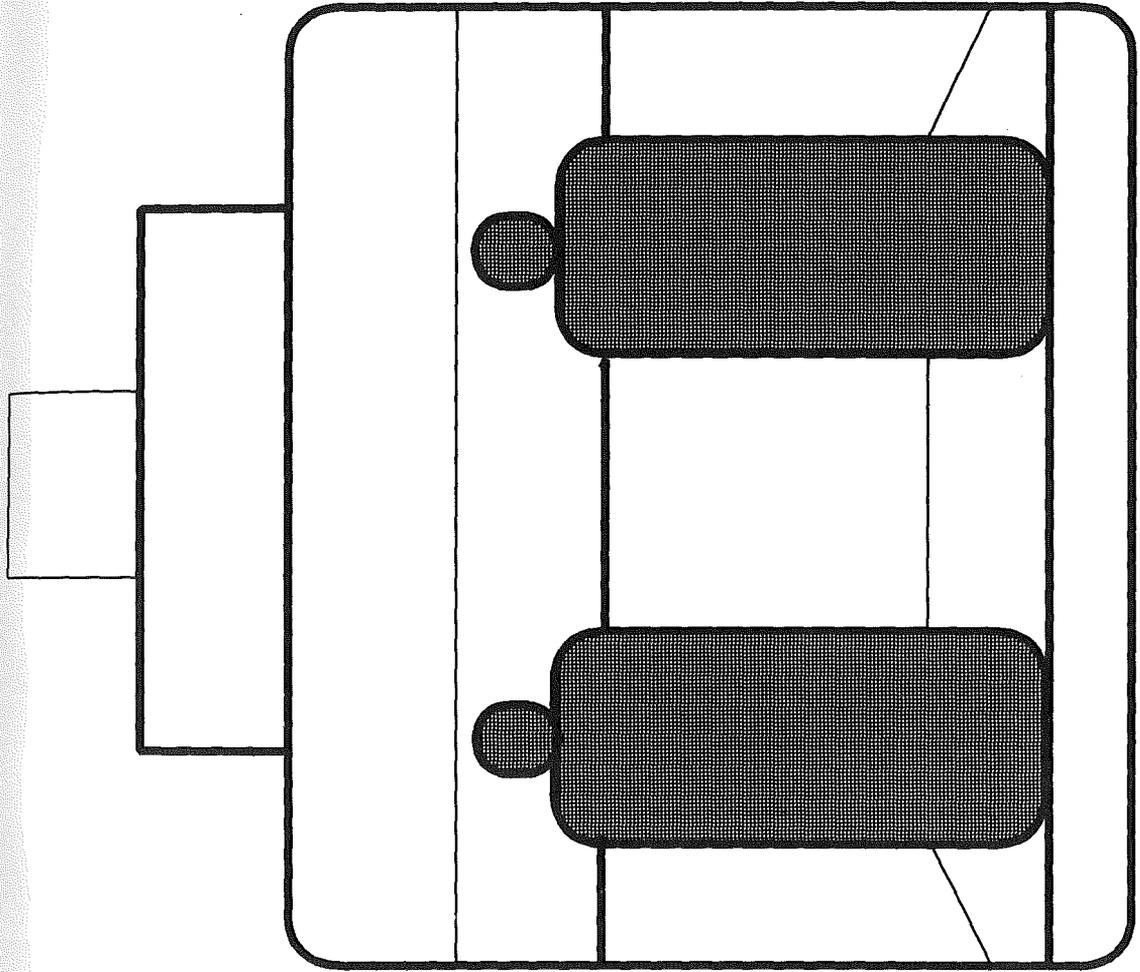


FIGURA 36 (b)

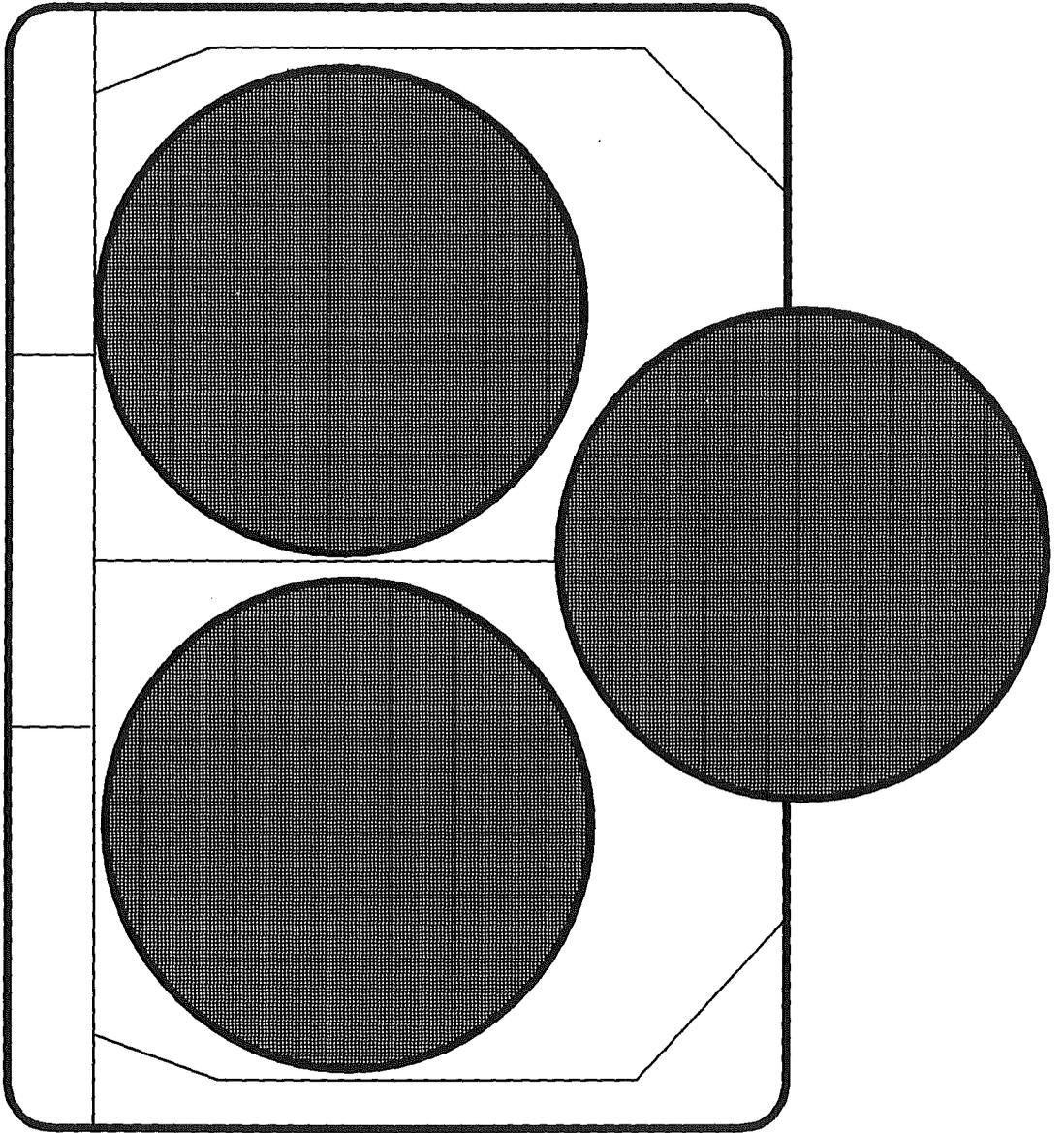


FIGURA 36 (d)

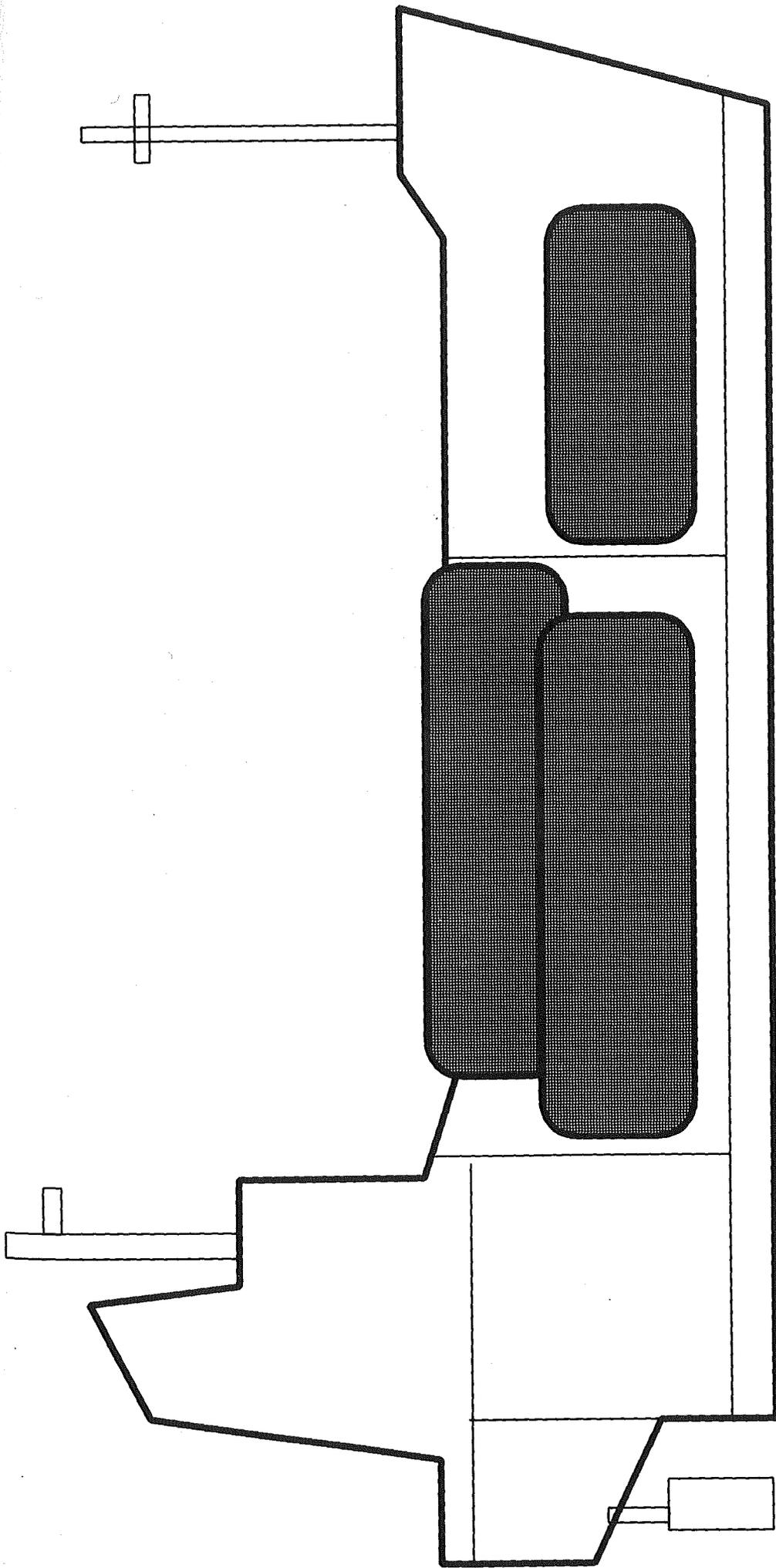


FIGURA 36 (c)

tanques para el transporte de gases licuados se clasifican como sigue:

Tanques estructurales

a) Los tanques estructurales son parte estructural del casco del buque y están sometidos del mismo modo que la estructura adyacente del buque al esfuerzo impuesto por las cargas que actúan sobre ésta.

b) La "presión de vapor de proyecto", P_0 , no excederá en general de $0,25 \text{ Kg/cm}_2$. No obstante, si se aumentan como proceda los escantillones del casco, podrá aumentarse el valor de P_0 , pero conservándolo siempre inferior a $0,7 \text{ Kg/cm}^2$.

c) Los tanques estructurales podrán utilizarse para el transporte de productos, a condición de que en ninguna parte de la estructura del casco la temperatura descienda nunca por debajo de $-10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tanques de membrana

a) Los tanques de membranas son tanques sin sustentación propia formados por una delgada capa (la membrana) a la que a través del aislamiento, da soporte la estructura adyacente del casco. La membrana ha sido concebida de forma que las dilataciones y contracciones térmicas y de otra índole queden

compensadas sin que esto le imponga un esfuerzo excesivo.

b) En general la presión de vapor del proyecto, (P_0), no excederá de $0,25 \text{ Kg/cm}^2$, no obstante, si se aumenta como proceda los escantillones del casco y, en los casos pertinentes, se preste la debida atención a la resistencia del aislamiento de soporte, podría aumentarse el valor de P_0 , pero conservándolo siempre inferior a $0,7 \text{ Kg/cm}^2$.

c) La definición de los tanques de membrana no excluye proyecto como aquellos en que se utilicen membranas no metálicas o en que las membranas vayan incluidas o incorporadas en el aislamiento.

Tanques de semimembrana

a) Los tanques de semimembrana, que son tanques sin sustentación propia cuando contienen carga, están formados por una capa a algunas de cuyas partes les da soporte, a través de su aislamiento, la estructura adyacente del casco; sus partes redondeadas, por las que se unen las citadas partes con soporte, han sido proyectadas de modo que acepten las dilataciones y las contracciones térmicas y de otra índole.

b) En general la presión de vapor de proyecto, P_0 , no

excederá de $0,25 \text{ Kg/cm}^2$. No obstante, si se aumentan como proceda los escantillones del casco y, en los casos pertinentes, se presta la debida atención a la resistencia del aislamiento de soporte, podrá aumentarse el valor de P_0 , pero conservándolo siempre inferior a $0,7 \text{ Kg/cm}^2$.

Tanques independientes

El otro tipo de tanque utilizado es el llamado independiente, definiéndosele como sigue:

Los tanques independientes son autosustentables: no forman parte del casco del buque ni son esenciales en cuanto a la resistencia del casco. Hay tres clases de tanques independientes a saber:

a) Tanques independientes tipo A, proyectados principalmente con arreglo a normas reconocidas de métodos clásicos de análisis estructural del buque. Cuando estos tanques estén constituidos principalmente por superficies planas (tanques de gravedad) la presión del proyecto, P_0 , deberá ser inferior a $0,7 \text{ Kg/cm}^2$.

b) Tanques independientes del tipo B, proyectados con ayuda de modelos de prueba y avanzados instrumentos y métodos analíticos para determinar los esfuerzos, el límite de fatiga y las características de propagación de grietas. Cuando estos tanques estén constituidos principalmente por superficies planas (tanques de gravedad), la presión de vapor de proyecto, P_0 , deberá ser inferior a $0,7 \text{ Kg/cm}^2$.

c) Tanques independientes del tipo C, (también llamados recipientes a presión), ajustados a los anterior correspondiente a los recipientes de presión y cuya presión de vapor de vapor de proyecto no es inferior a:

$$P_o = A C (\rho)^{\frac{3}{2}} K_p / cm^2 \quad (40)$$

donde:

$$A = 0,0185 \left(\frac{\sigma_m}{\Delta \sigma_a} \right)^2 \quad (41)$$

en que:

σ_m = esfuerzo primario de proyecto de la membrana.

σ_a = esfuerzo dinámico de la membrana (amplitud doble al nivel de probabilidad $Q = 10^{-8}$).

5,5 Kg/mm² para acero ferrítico/martensítico.

2,5 Kg/mm² para aleación de aluminio (50830)

C = dimensiones características del tanque, considerándose como tal el mayor de los valores siguientes:

h; 0'75 b; o bien 0'45 l

en que:

h = altura del tanque (m)

b = anchura del tanque (m)

l = longitud del tanque (m)

ρ = densidad relativa de la carga ($\rho = 1$ para agua dulce) a la temperatura del proyecto.

Vistas las particularidades principales de los tanques que transportan gases licuados, los tipos de buques que se van a utilizar van a ser los correspondientes a las tres categorías en que se han clasificado (presurizado, semirrefrigerado y refrigerado), y con la capacidad de carga correspondiente a cada uno de ellos, además de los distintos productos que pueden transportar.

4.1.3.- Caldera tipo marina.

En el capítulo 2 se indica, que el fenómeno BLEVE no es exclusivo de los gases licuados, sino que afectan a todos los líquidos que se encuentren en principio sobrecalentado, por lo que todo fluido que se esté almacenado a una presión distinta de la atmosférica y por tanto a una temperatura también superior, también puede ser susceptible de producir un BLEVE, siempre y cuando reúna las condiciones necesarias ya indicadas.

Por lo anterior, las calderas o generadores de vapor instaladas en los buques para producir vapor que se utiliza como agente evolutivo en la máquina de propulsión principal -turbina- o para los distintos servicios auxiliares del buque, también en caso de incendio y posterior rotura del colector de la caldera, o como consecuencia de la rotura de un tubo de agua o vapor, o de una grieta en el colector por las diversas razones que más adelante se indican, puede provocar las condiciones necesarias para producir un BLEVE.

Las calderas o generadores marinos de vapor que se van a tratar van a ser en primer lugar una caldera marina moderna de alta presión con tubos de agua y un colector de vapor y otro de agua, la cual ha sido diseñada y construida de acuerdo con las normas de las Sociedades de Clasificación. La otra caldera que se va a considerar, es una caldera auxiliar del tipo cilíndrica

escocesa de llamas en retorno de media presión, la cual también ha sido diseñada y construida de acuerdo con las normas de la Sociedades de Clasificación.

En primer lugar se describe los datos y características principales de la caldera de alta presión y tubos de agua:

DATOS DE LA CALDERA

-Tipo de caldera: Caldera de dos colectores y tubos de agua de circulación natural.

-Combustible: Bunker "C".

-Presión de proyecto: 75 Kg/cm².

-Presión de prueba hidrostática: 112,5 Kg/cm².

-Presión de salida del recalentador: 62 Kg/cm².

-Presión de tarado de las válvulas de seguridad:

Colector (caja alta)	75,0 Kg/cm ² .
" (caja baja)	74,7 Kg/cm ² .
Salida del recalentador	65,0 Kg/cm ² .

Temperatura: Aire a la entrada del ventilador

de tiro forzado. 38 °C

Agua de alimentación en la entrada

del economizador. 212 °C

-Superficie de calefacción: Pared de tubos de

agua (media periferia). 153 m²

Pantallas de tubos. 63 m²

Paredes divisorias.	36 m ²
Economizador.	460 m ²
Primera fase del recalentador.	284 m ²
Segunda fase del recalentador.	60 m ²
Pre calentador de aire.	2,12 m ²
-Volumen del hogar:	66 m ³
-Capacidad de quemadores: (por quemador).	1.850 Kg/h
-Peso: De la caldera vacía incluido el economizador.	110.000 Kg
Accesorios de la caldera.	15.500 Kg
Tubería montada.	2.500 Kg
Agua en la caldera a nivel de vaporización.	10.000 Kg
Pre calentador de aire.	46.300 Kg

CARACTERISTICAS ESTIMADAS EN CONDICIONES NORMALES

-Vaporización en condiciones normales	51.000 Kg/h
-Vaporización en condiciones de máxima potencia.	75.000 Kg/h
-Temperatura del vapor a la salida del recalentador.	515 °C
-Temperatura del aire a la entrada del pre calentador.	38 °C
-Temperatura del aire a la salida del pre calentador.	310 °C

-Relación de exceso de aire.	1,1
-Rendimiento.	90 %
-Temperatura salida de los gases.	124 °C
-Consumo de combustible en condiciones normales.	3.350 Kg/h
-Consumo de combustible en condiciones de máxima potencia.	4.950 Kg/h
-Calor suministrado en condiciones normales.	523.000 Kcal/m ³ h
-Calor suministrado en condiciones de máx. potencia.	700.000 Kcal/m ³ h
-Características del desrecalentador interno de vapor auxiliar.	
*Máximo flujo de vapor.	20.000 Kg/h
*Temperatura de vapor a la entrada.	515 °C
*Temperatura de vapor a la salida.	435 °C
*Presión de vapor a la entrada.	62 Kg/cm ²
*Caída de presión entre la brida de entrada y salida.	6 Kg/cm ²

MATERIALES Y DIMENSIONES DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS DE PRESION

-Colector principal o de vapor:	
*Diámetro de la virola.	1.500 mm
*Espesor de la virola.	64 mm

*Longitud de la virola.	5.200 mm
*Espesor del fondo de popa.	50 mm
*Espesor del fondo de proa.	50 mm
*Espesor de la placa de tubos.	64 mm
-Colector de agua:	
*Diámetro de la virola.	800 mm
*Espesor de la virola.	30 mm
*Espesor de la placa de tubos.	60 mm
*Espesor del fondo de popa.	30 mm
*Espesor del fondo de proa.	30 mm
-Colector del recalentador:	
*Diámetro exterior.	310 mm
*Espesor.	30 mm
-Cabezal de las paredes de agua:	
*Diámetro.	273 mm
*Espesor.	31 mm
-Cabezal de las paredes divisorias:	
*Diámetro.	273 mm
*Espesor.	31 mm
-Cabezales de los economizadores:	
*Diámetro.	260 mm
*Espesor.	30 mm
-Tubos de recalentado:	
*Diámetro.	50,8 mm
*Espesor.	3,5 mm
-Tubos de aletas (hogar):	

*Diámetro.	63,5 mm
*Espesor.	4.0 mm
-Tubos de subida de las paredes:	
*Diámetro.	139,8 mm
*Espesor.	7,5 mm
-Tubos de alimentación de las paredes:	
*Diámetro.	139,8 mm
*Espesor.	7,5 mm
-Tubos de bajada:	
*Diámetro.	165,2 mm
*Espesor.	10,0 mm
-Tubos del economizador:	
*Diámetro.	38,1 mm
*Espesor.	4,0 mm

El material utilizado para los colectores son planchas de acero al carbono o carbono-manganeso soldadas circunferencial y longitudinalmente, con un límite elástico comprendido entre 340 y 520 N/mm².

Los tubos de agua y vapor son también de acero al carbono o al carbono-manganeso, sin soldadura y con un límite elástico comprendido entre 340 y 520 N/mm².

Los tubos del recalentador son sin soldadura y de acero aleado, y el límite elástico está comprendido entre 400 y 500

N/mm².

DESCRIPCION GENERAL DE LA CALDERA

La caldera es una caldera marina de dos colectores figura 36, recubierta interiormente en su totalidad por paredes de membrana de tubos de agua. Todos los elementos de presión en ésta caldera son soldados, por lo tanto no hay elementos mandrinados. La caldera está construida con las paredes y el cielo del hogar completamente recubiertas por paredes de agua, pantallas de tubos, recalentadores de convección externa, desrecalentadores internos y economizador de superficie aumentada, y está diseñada para quemar el petróleo con tiro forzado. Está dotada de equipos auxiliares que incluyen sopladores de hollín, indicador de humos, indicador remoto de nivel de agua, equipos de control de combustión, regulador de agua de alimentación, equipos para control de temperatura, válvulas y otros accesorios.

Paredes de agua del hogar

Las paredes del hogar están totalmente enfriadas por paredes de tubos de agua tipo membrana figura 37, por esto el refractario se coloca en el cono del quemador, protegiendo los colectores de agua y alrededor de los agujeros de hombre. Los quemadores que están dispuestos en el cielo del hogar queman petróleo bajo condiciones de tiro forzado. Los tubos son de 63,5 mm de diámetro

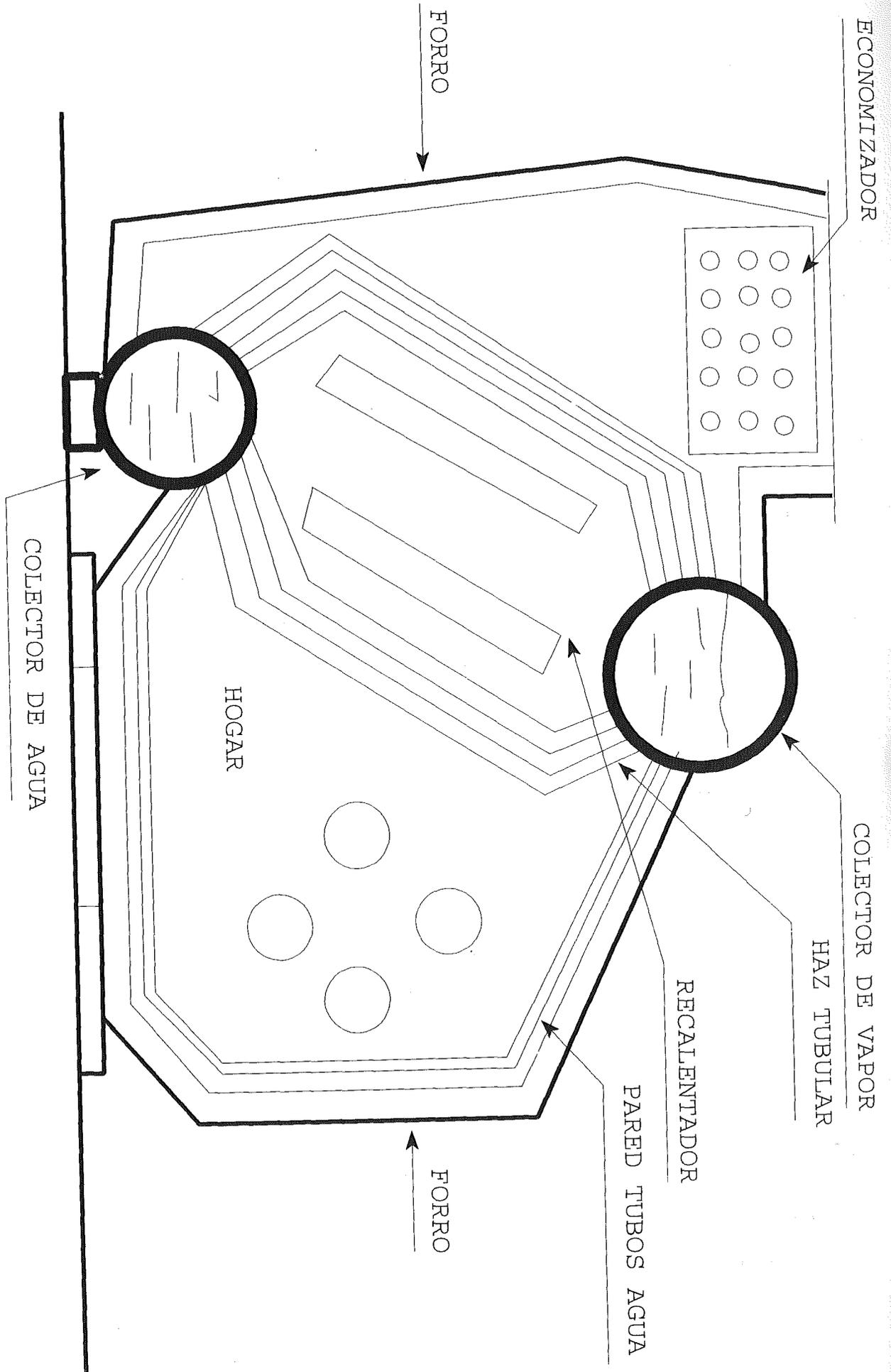
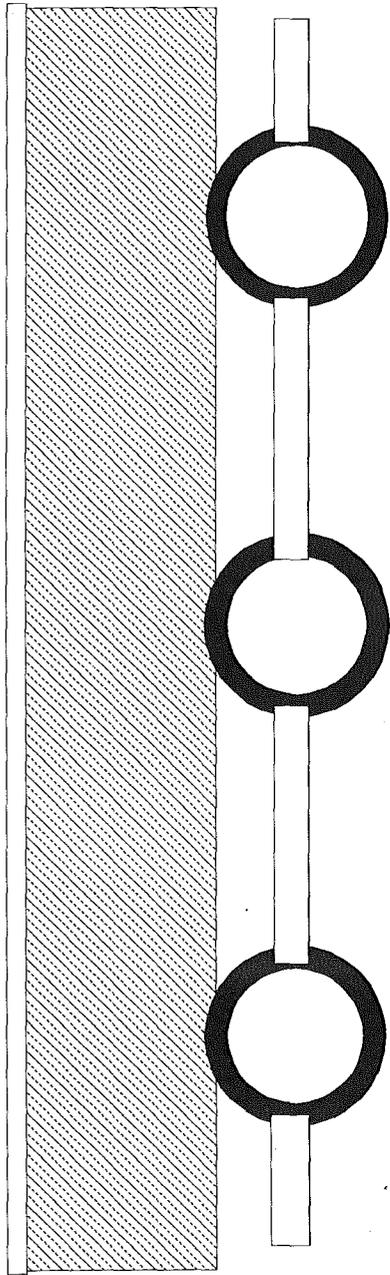


FIGURA 35

MEMBRANA DE TUBOS SOLDADOS



PARED DE TUBOS

FIGURA 37

exterior con aletas cortas. Las uniones de los tubos al colector y alimentadores son soldadas.

Pantallas de tubos

Los tubos de pantalla tienen 63,5 mm de diámetro exterior. Son lisos y van colocados a tresbolillo a la salida del hogar. Todos los tubos de la pantalla están soldados a los colectores.

Paredes de tubos divisorias

Los tubos de las paredes divisorias son de 50,8 mm de diámetro exterior de aletas cortas, de acero sin costura. Los tubos se sueldan en paralelo, los bordes de las aletas unos con otros formando un panel estanco a los gases. Los tubos de las paredes divisorias están soldados en sus conexiones con el colector de agua y cabezal.

Tubos descendentes de alimentación y ascendentes

Los tubos de descenso no son de calefacción directa y están dispuestos en los extremos de frente y fondo de los colectores soldados a éstos. Los tubos de descenso está, dispuestos para estabilizar la circulación de agua de forma que se establecen dos circuitos individuales y de circulación, uno para las paredes de agua del hogar y otro para las paredes de agua de la caja donde

la absorción de calor es distinta. Los alimentadores de las paredes de agua y tubos de ascenso están soldados a los colectores ó a los cabezales de las paredes.

Forro

El forro es de acero corrugado está dispuesto para cubrir el aislante.

Hay dispuestas prensas para mantener la estanqueidad de los gases en todas partes donde accesorios, tubos, elementos de los sopladores de hollín, etc. pasan a través del forro.

La envuelta de aire colocada en la parte superior de la caldera, en la zona del hogar, forma un conducto de aire aislado con distribución de aire uniforme a cada quemador.

Refractario y aislante

Los refractarios expuestos al hogar son mínimos y colocados sólo en los conos de los quemadores y en las esquinas de la obra o para la protección de los colectores de agua.

Los guarnecidos de refractario ó aislantes, son materiales adecuados para ser expuestos a la máxima temperatura y suficiente espesor.

El material refractario utilizado es ladrillo refractario del tipo PCE-33, cemento de asbesto y fibra de vidrio.

Los datos del proyecto y características principales de la caldera auxiliar que se va a considerar son los siguientes:

DATOS DE LA CALDERA

- Tipo de caldera: Caldera cilíndrica escocesa fumitubular de llamas en retorno, de circulación natural, y de vapor saturado.
- Combustible: Bunker "C".
- Presión de proyecto: 21,0 Kg/cm².
- Presión de prueba hidrostática: 31,5 Kg/cm².
- Presión de tarado de la válvula de seguridad: 21,0 Kg/cm².
- Temperatura del aire a la entrada del ventilador de tiro forzado. 38 °C
- Temperatura del agua de alimentación. 110 °C
- Superficie de calefacción:
 - *4 hornos corrugados. 60 m²
 - *264 tubos de fuego diámetro interior 89 mm. 166 m²
 - *Caja de fuegos. 20 m²
- Volumen del hogar (incluida caja de fuegos): 12,7 m³
- Peso del agua en la caldera a nivel de vaporización. 22.000 Kg

CARACTERISTICAS ESTIMADAS EN CONDICIONES NORMALES

-Vaporización en condiciones normales	7.000 Kg/h
-Vaporización en condiciones de máxima potencia.	9.500 Kg/h
-Relación de exceso de aire.	1,15 -
Temperatura de salida de los gases.	175 °C
-Rendimiento.	80 %

MATERIALES Y DIMENSIONES DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS DE PRESION

-Virola:	
*Diámetro.	4,2 m
*Espesor.	25,0 mm
*Espesor del fondo.	27,0 mm
*Espesor de la placa de tubos.	27,0 mm
*Longitud.	3,5 m
-Tubos:	
*Diámetro exterior.	89,0 mm
*Espesor.	4,47 mm
-Hornos:	
*Diámetro.	0,8 m

El material utilizado para la virola son planchas de acero al carbono y al carbono-manganeso, con un límite elástico de entre 320 a 520 N/mm².

Los tubos utilizados son sin soldadura y de acero al

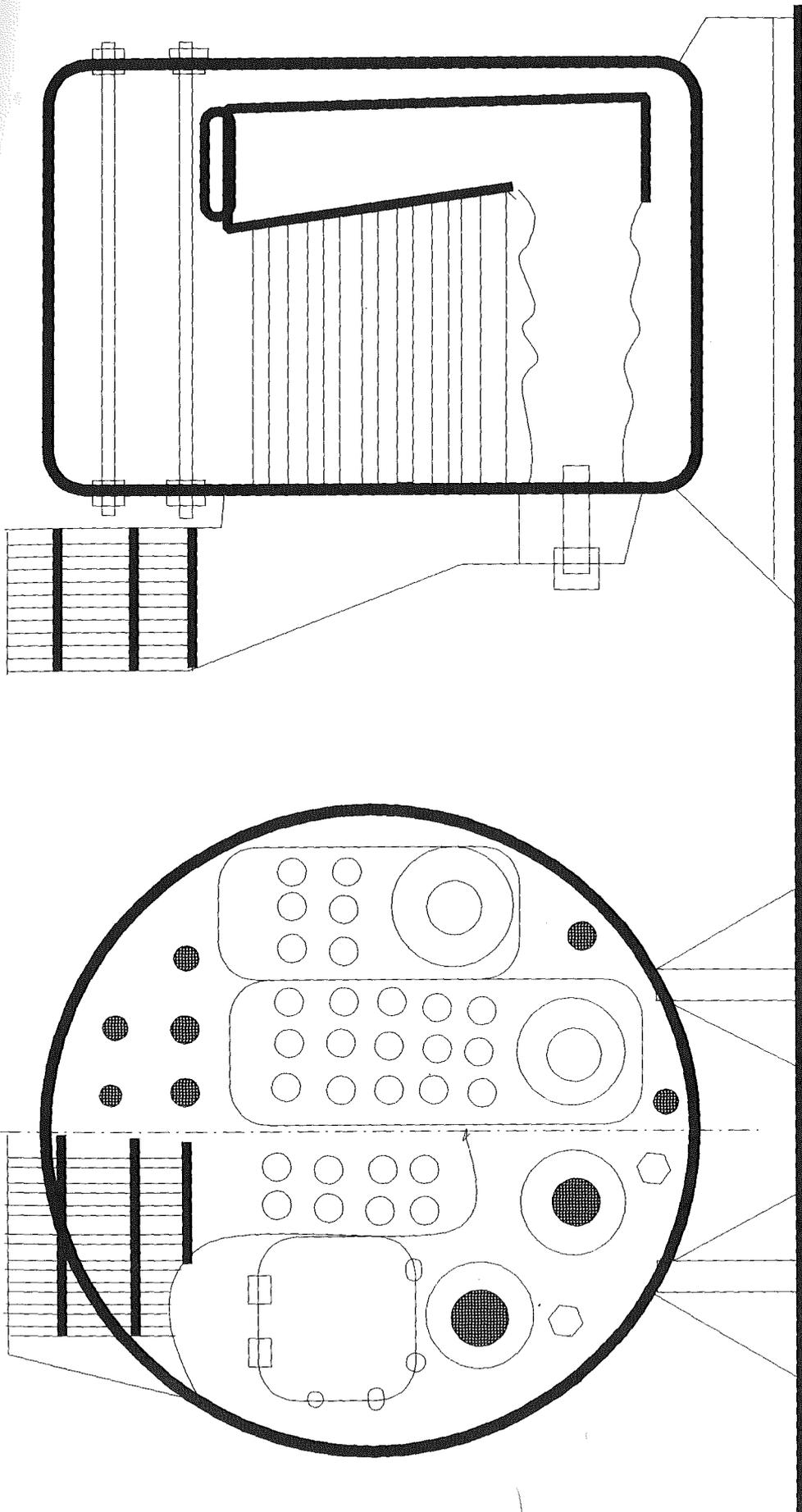
carbono o aleado, con un límite elástico de entre 340 y 520 N/mm².

DESCRIPCION GENERAL DE LA CALDERA

La caldera que se trata es una caldera auxiliar figura 38, de uso generalizado en buques mercantes, que necesitan el vapor para calentar la carga que transportan, y para uso de la diversa maquinaria auxiliar. Los gases de la combustión pasan a través de los tubos que componen el haz tubular cediendo su calor al agua de la caldera en su camino hacia la atmósfera exterior. El vapor que produce es saturado húmedo con un título muy próximo a la unidad. El combustible a utilizar es líquido, pero también puede ser sólido. Este tipo de caldera está dotada con equipos de control automático para su funcionamiento.

AI SLAMI ENTO

La virola y los fondos van aislados por medio de mantas de lana de roca enmalladas y cubierta por una fina placa de aluminio como barrera de vapor.



CALDERA CILÍNDRICA

FIGURA 38

4.1.4.- Reglas del Lloyd's Register of Shipping para la construcción de calderas de vapor.

Las normas utilizadas para la construcción de buques en lo que se refiere al casco y a la maquinaria que va montada a bordo, se denominan Reglas de las Sociedades de Clasificación.

Las Reglas que se usan en el caso que tratamos para la construcción de calderas y sus elementos de protección, son las de la Sociedad de Clasificación Lloyd's Register of Shipping, en la parte 5, denominada Maquinaria Auxiliar y Principal, en el capítulo 10, correspondiente a recipientes de presión y plantas de vapor, y la parte 2 de materiales a utilizar.

La parte 5 se utilizará para el estudio de los elementos constructivos y de protecciones de seguridad de las calderas de vapor, comprobando el funcionamiento y comportamiento de estos últimos en condiciones normales de funcionamiento, así como, en aquellos casos especiales de funcionamiento, anexo 6.

4.1.5.- Código IMO para la construcción y el equipo de buques que transportan gases licuados.

El código IMO para la construcción y el equipo de buques que transportan gases licuados fue creado en el año 1979 por la Organización Marítima Intergubernamental, con la colaboración y asesoramiento de las Sociedades de Clasificación, las cuales aportaron todos sus conocimientos en lo que se refiere a la construcción de buques que transportan gases licuados.

Esta normativa conjunta de IMO y las Sociedades de Clasificación se estudia y analizan los capítulos II, IV, VI, VII, VIII, XI, XV, los cuales se adjuntan en el anexo 7, y en el capítulo 2 de esta Tesis, comprobando la efectividad de las medidas utilizadas para la construcción y equipamiento de éste tipo de buques, en condiciones de plena carga del buque y ante cualquier condición adversa durante la navegación, como varada, colisión, incendio, etc.

4.2.- Plan de cálculo.

4.2.1.- Riesgos de colisión de un buque de transporte de gases licuados, y determinación de los daños en la estructura del mismo.

En la actualidad con los medios de ayuda a la navegación que existen a bordo de los buques mercantes, así como la normativa vigente -Collision Regulation- que regula la navegación tanto en zonas de mar libre como en estrechos, puertos, etc., se reducen las posibilidades de colisión entre dos buques, no obstante a lo anterior, según las estadísticas de accidentes de buques tanques-químicos-gaseros, de IMO correspondientes al período 1974-88, tabla 3, indican que los accidentes debidos a colisión entre dos buques van desde un 0,13 % en el año 1982, a un 0,72 % en el año 1987, y un total del período de un 0,35 %. Lo cual nos expresa, que aún con una buena regulación del tráfico marítimo, es probable y posible la colisión entre dos buques, aunque ésta posibilidad es, como se verá más adelante bastante remota.

En éste apartado, se determina a través del cálculo de probabilidades las posibilidades de colisión entre dos buques, en la rada del puerto Harbour, y para ello se procede de la siguiente manera:

-Establecimiento de las medidas principales de seguridad:

1° Reglamento anticolidión.

2° Reglamento de tráfico marítimo en la rada del puerto

Harbour.

3° Todo buque de eslora mayor a 50 m debe de navegar en la ruta fijada.

4° La velocidad del buque no debe de ser superior a 10 nudos.

5° Los buques de eslora igual o mayor a 200 m, se les darán instrucciones especiales para advertir el peligro.

6° En caso de que la visibilidad sea inferior a 1 milla náutica, los buques que transporten gases licuados no se les permitirá su entrada o salida.

7° Los buques que transporten gases licuados entrarán y saldrán con remolcadores.

El tráfico marítimo medio diario en el puerto Harbour se muestra en la tabla 4, -basado en el período del año 1993-

Tabla 4

Tipo de buque	<500 trb	>500 trb	>200 m eslora	Pesqueros	Total
N° de buques que entran y salen	10	7	1	30	57

El número de accidentes por colisión en la rada del puerto Harbour en el mismo período anterior, entre buques de más de 500 TRB, se muestra en la siguiente tabla 5:

Tabla 5

Tipo de accidente	Colisión	Total
Año 1990	2	2
Año 1991	3	3
Año 1992	3	3
Año 1993	4	4

Por lo que la media anual de colisión entre buques de más de 500 TRB, es de 3 buques/año.

La colisión, la vamos a considerar entre un buque LNG-LPG y un petrolero, siendo el buque golpeado el LNG-LPG, el cual sufrirá rotura de sus tanques, siempre que:

- 1.- El buque colisionante golpee partes vulnerables del buque LNG-LPG.
- 2.- El buque colisionante tenga una velocidad específica.
- 3.- El buque colisionante tenga un desplazamiento específico.

En la figura 39, se relaciona la velocidad y el desplazamiento del buque colisionante para que éste produzca rotura en los tanques del buque LNG-LPG. Siendo el área A la

región próxima a los mamparos principales que separan cada tanque, llegando a ser hasta un 8 % de la eslora del buque. Las áreas B,C y D -el área D es la más peligrosa- comprenden aproximadamente el 15, 23 y 23 %, respectivamente de la eslora del buque. Siendo el 69 % de la eslora del buque vulnerable a la liberación de LNG-LPG, como consecuencia de una colisión. La zona A corresponde a los mamparos transversales en la zona de carga, la B, a los mamparos longitudinales en la zona de carga, la C, a la estructura del doble fondo en la zona de carga, la D, al costado del buque en la zona de carga, y la E, a la cubierta del buque.

Para determinar la probabilidad de riesgo de colisión se procede como sigue:

P (LNG-LPG liberado en la rada del puerto Harbour como consecuencia de una colisión) =

P (buques LNG-LPG envueltos en la colisión)
x P (buque LNG-LPG cargado colisiona)
x P (buque LNG-LPG es el buque golpeado en la colisión)
x P (la colisión se produce por el costado)
x P (buque colisionante > x tm de desplazamiento a la
velocidad > y nudos en la colisión)
x P (penetración en la colisión)

Antes de resolver el problema, es necesario realizar las siguientes asunciones:

- La media diaria de buques de más de 500 TRB, navegan en toda la rada y el puerto Harbour.
- La densidad del tráfico, se considera constante durante las veinticuatro horas del día.
- Todos los buques navegan a la velocidad de 10 nudos. Lo que implica que en el caso de que ocurra una colisión la velocidad del buque colisionante era de 10 nudos. Siendo lo anterior bastante conservativo, pues se deduce que el buque antes de colisionar maniobró reduciendo máquinas.
- El número de buques que entran y salen en la rada y puerto Harbour son los dados en la tabla 4. También se asume que la media de buques mayores de 500 TRB. que pueden estar envuelto en colisión por año, vienen dados por la tabla 5, y que representa la frecuencia de colisión en los años siguientes. El resultado de ésta asunción es que la relación (número de buques mayores de 500 TRB / número de buques mayores de 500 TRB. que navegan por la rada y puerto Harbour) será constante.
- Se asume que todos los buques de más de 500 TRB., tienen la misma posibilidad de entrar en colisión que cualquier otro buque.
- Todas las colisiones son en el costado del buque colisionado.

Con respecto a los buques LNG-LPG, se hacen las siguientes asunciones:

- Si un buque LNG-LPG, está envuelto en una colisión, éste es el buque colisionado.
- Si el buque está llegando se considera en condiciones de carga

CURVAS VELOCIDAD VS. DESPLAZAMIENTO
 SE ASUME EL IMPACTO EN ÁNGULO RECTO

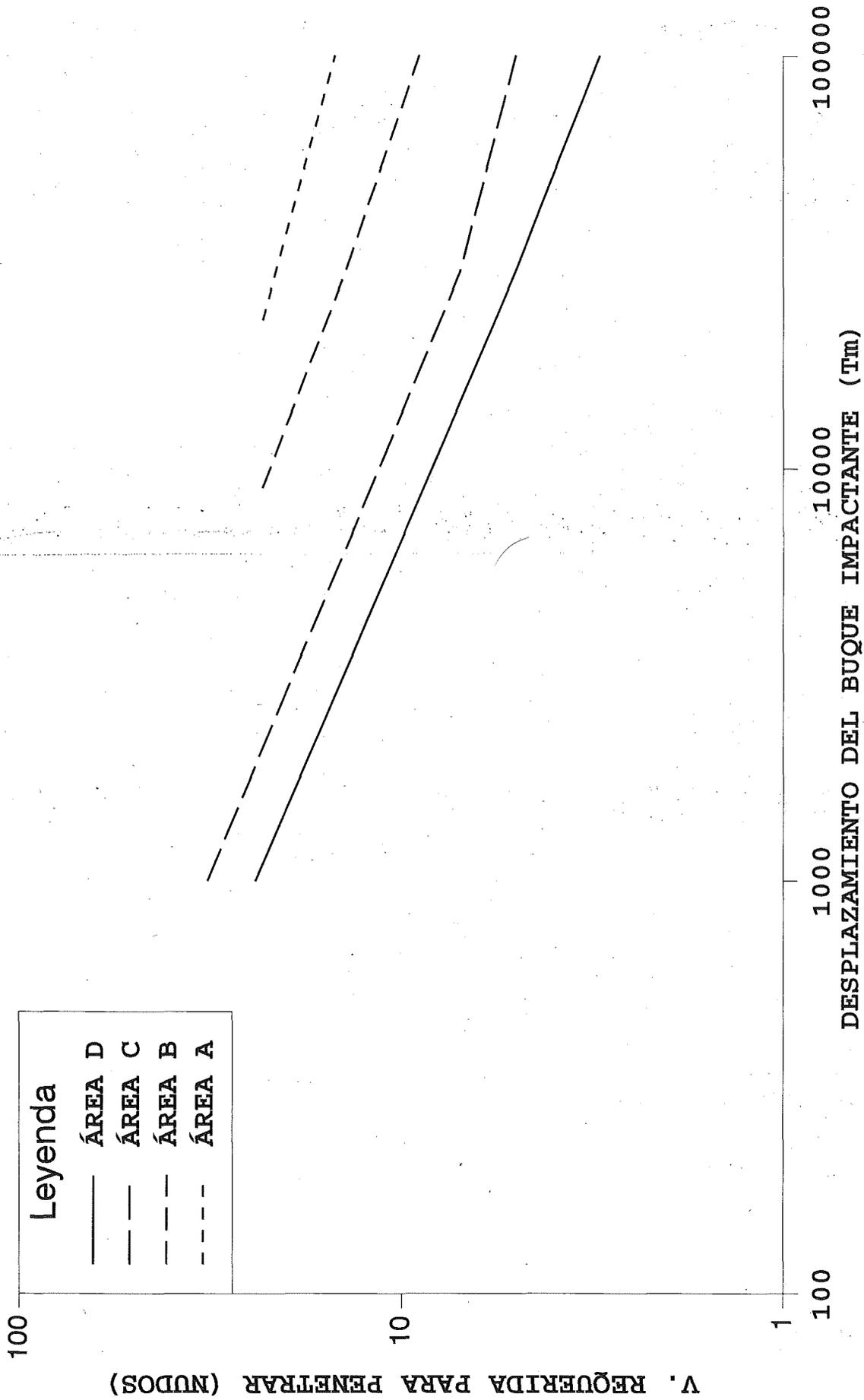


FIGURA 39

y si está partiendo en condiciones de lastre.

- En caso de colisión el buque LNG-LPG, liberará carga al exterior, siempre y cuando éste sea penetrado.

Una vez asumidas las anteriores consideraciones, procedemos a el cálculo:

1.- P (LNG-LPG buques envueltos en la colisión):

Número de buques de más de 500 TRB., que navegan por la rada y el puerto Harbour por año = $8 \times 365 = 2920$ buques navegando por año.

Número de buques > 500 TRB. envueltos en colisión en la rada y puerto Harbour por año = 3 buques envueltos en colisión por año.

Haciendo uso de la asunción de que el tráfico que estamos tratando es el de la rada y el puerto Harbour, se obtiene,
P (LNG-LPG buques envueltos en la colisión) = $3 / 2.920 = 1,02 \times 10^{-3}$

2.- P (buque LNG-LPG cargados que colisionan):

Teniendo en cuenta que los buques cargados son sólo aquellos que llegan,

P (buque LNG-LPG cargados que colisionan) = 0,5

3.- P (buque LNG-LPG es el buque golpeado en la colisión):

Asumiendo que cuando un buque LNG-LPG entra en colisión, éste es el colisionado.

P (buque LNG-LPG es el buque golpeado en la colisión) = 1

4.- P (la colisión es por el costado):

P (la colisión es por el costado) = 1

5.- P (buque colisionante > x tm de desplazamiento a la velocidad > y nudos en la colisión:

teniendo en cuenta que la velocidad del buque colisionante es de 10 nudos. De acuerdo a la figura 39, el desplazamiento del buque colisionante causará penetración dependiendo de la zona donde el buque LNG-LPG es golpeado.

Tabla 6

Desplazamiento del buque colisionante.	Area del buque LNG-LPG que debe ser golpeada para producir penetración.
> 6.000 TRB.	D
> 15.000 TRB.	C ó D
60.000-100.000 TRB.	B, C ó D

Es necesario encontrar la probabilidad de que un buque con

un desplazamiento de 50.000 Tm colisionando con un buque de desplazamiento mayor 6.000 TRB., asumiendo que la colisión se haya producido. Lo que comprobaremos con la tabla 7 de las colisiones producidas en la rada y puerto Harbour.

De acuerdo con la tabla 7, P (buque colisionante mayor de 6.000 TRB colisiona con buque de hasta 50.000 TRB = 0.16.

En éste caso se observa que no existe ninguna relación entre las toneladas de desplazamiento y las de arqueo bruto, es decir, que un buque de 6.000 toneladas de desplazamiento, puede provocar la misma avería que uno de 3.000 toneladas de registro bruto.

6.- P (penetración en la colisión)

Esta posibilidad varía con el desplazamiento del buque colisionante y el punto o zona de colisión del buque LNG-LPG.

Tabla 7

buque A	3000- 20000 TRB	20000- 50000 TRB	Total	P(buque A colisiona con buque B)
Buque B	-	-	-	-
5-20 TRB	0	0	0	0
20-100 TRB	0	0	0	0
100-500 TRB	3	0	3	0.5
500-3000 TRB	1	1	2	0.33
3000-20000 TRB	0	1	1	0.16
20000-50000 TRB	0	0	0	0
Total	4	2	6	1.00

P (penetración en la colisión) = P (penetración en el área golpeada = x_1) x P (área golpeada = x_1 en la colisión)

Donde el subíndice 1 indica el área A, B, C y D del buque LNG-LPG.

La evaluación de éstas dos posibilidades, se muestran en la tabla 8.

Tabla 8

Area del buque LNG-LPG que debe ser golpeada para penetrarlo	Desplazamiento del buque colisionante.	P (penetración en el área golpeada = x_1)
Sin penetración	< 6000 TRB	0
D	6000-15000 TRB	1
C ó D	15000-60000 TRB	1
B, C ó D	60000-100000 TRB	1

Suponiendo uniforme distribución de los puntos de impactos a lo largo de toda la eslora del buque golpeado, se tiene

Tabla 9

Area del buque LNG-LPG colisionado	P (área golpeada = x_1 en la colisión).
A	0,08
B	0,15
C	0,23
D	0,23
Otras	0,31

En forma tabular, se obtiene la probabilidad de penetración del buque LNG-LPG, asumiendo que la colisión ha sucedido:

Tabla 10

P (penetración en la colisión.	Desplazamiento del buque colisionante.	Area del buque LNG-LPG que debe ser golpeada para su penetración.
0	< 6000 TRB	Sin penetración
0,23	6000-15000 TRB	D
(0,23+0,23) = 0,46	15000-60000 TRB	C ó D
(0,46+0,15) = 0,61	60000-100000 TRB	B, C ó D

Finalmente, la probabilidad de que un buque LNG-LPG libere gas debido a una colisión, en la rada y el puerto Harbour, se puede evaluar para distintos desplazamientos del buque colisionante, como se ve en la tabla 11.

Lo que quiere decir que la posibilidad de derrame por viaje es de $6,6 \times 10^{-6}$.

Suponiendo que al puerto Harbour llegasen 100 buques LNG-LPG, cargados cada año, tendríamos que la posibilidad de derrame por colisión es $6,6 \times 10^{-6} \times 100 = 6,6 \times 10^{-4}$.

Es decir, una colisión cada 1.515 años.

Tabla 11

<p>P (gas liberado debido a una colisión en la rada y puerto Harbour.</p>	<p>Desplazamiento del buque colisionante en TRB.</p>
<p>$(1,02 \times 10^{-3}) \times (0,5) \times (1) \times (1) \times (0,01) \times (0) = 0$ $(1,02 \times 10^{-3}) \times (0,5) \times (1) \times (1) \times (0,01) \times (0,23) = 1,17 \times 10^{-6}$ $(1,02 \times 10^{-3}) \times (0,5) \times (1) \times (1) \times (0,01) \times (0,46) = 2,35 \times 10^{-6}$ $(1,02 \times 10^{-3}) \times (0,5) \times (1) \times (1) \times (0,01) \times (0,61) = 3,11 \times 10^{-6}$</p>	<p>< 6000 6000-15000 15000-60000 60000-100000</p>
<p>P (gas liberado debido a la colisión en la rada y puerto harbour) = $6,6 \times 10^{-6}$</p>	<p>Suma total sobre todos los desplazamientos de todos los buques colisionantes.</p>

No obstante a la escasa posibilidad de colisión de un buque LNG-LPG, esta no es imposible, y por tanto podemos partir de la hipótesis de que esta se produce con un buque cargado de

combustible líquido, y el buque se incendia como consecuencia del gas derramado por el tanque penetrado, y por el combustible líquido -crudo ó refinado-, que el buque colisionante transporta y que también derrama y entra en combustión, rodeando las llamas al buque LNG-LPG.

4.2.2.- Incendio en las inmediaciones de un buque y efecto del fuego sobre el casco del buque y el aislamiento del tanque.

Una vez que se ha producido la colisión y posterior incendio del buque, se ha considerado la siguiente cadena de eventos que probablemente se producirán como consecuencia del incendio, los cuales son distintos para el caso de tanques de membrana y el de tanques independientes.

En primer lugar el fuego actuará sobre el forro del casco exterior e interior, figura 40, pudiéndose alcanzar en éstos hasta una temperatura de hasta unos 1200 °C.

Dependiendo de la magnitud del incendio éste puede producir la rotura del buque, como consecuencia del calentamiento y consiguiente debilitamiento de su estructura al variar sus características mecánicas con el incremento de la temperatura. A su vez el aislamiento del tanque -membrana- está en contacto directo con el casco del forro interior, que como se ha indicado se encuentra a unos 1000 °C de temperatura aproximadamente y por tanto éste se verá afectado por ésta alta temperatura. A temperaturas por encima de los 150 °C, el poliuretano comienza a perder sus características térmicas y mecánicas, y por encima de los 300 °C de temperatura, se descompone.

FLUJO DE GASES Y LLAMAS EN EL
COSTADO DEL BUQUE.

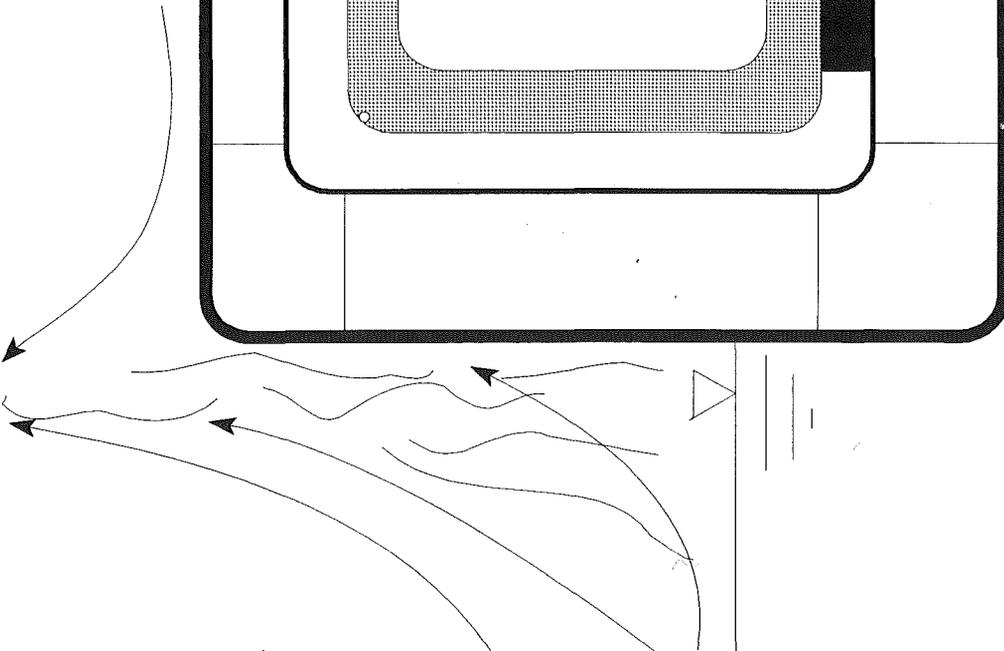


FIGURA 40

Para el caso de tanque de membrana, se considera la siguiente cadena de eventos:

1° Calentamiento rápido del casco del forro interior, con el aislamiento todavía intacto. A partir de éste calentamiento, comienza el deterioro del aislamiento.

2° El forro interior alcanza niveles de temperaturas, a partir de las cuales la resistencia del casco del buque comienza a reducirse, pudiéndose alcanzar valores que provoquen la rotura del casco del buque. -la temperatura máxima que produzca la rotura del casco, se puede alcanzar en un corto espacio de tiempo-.

3° Si el colapso de la estructura del casco del forro interno se produce como consecuencia de alcanzar una alta temperatura, el aislamiento y las barreras del tanque, no soportarán los esfuerzos a que la carga los somete, y romperá librando a la misma hacia los espacios adyacentes. -bodega, tanques de lastre, etc.-. También se ha producido un calentamiento de la carga y un aumento de la presión en el interior del mismo que ha ofrecido un esfuerzo sobre el propio aislamiento y sus barreras que ha ayudado a el colapso de rotura del recipiente de carga.

4° Una vez liberada la carga a los tanques adyacentes, varios eventos pueden suceder a partir de éste momento, es decir: el

casco exterior puede también colapsar por las mismas circunstancias que el casco interior y la carga puede ser liberada al mar, pudiéndose a su vez inflamarse o explotar, o

5° El gas hirviendo, sobre el casco exterior, puede prevenir del enfriamiento de éste que pueda producir la rotura por fragilidad del mismo durante el incendio. Por lo que la carga podría mantenerse en el interior del casco exterior, durante el incendio sin que se produzca el incendio o explosión de la misma.

No obstante, una vez que el incendio remita, el gas enfriará el casco exterior, provocando su rotura y su posterior liberación al mar.

Otra posibilidad o alternativa en la cadena de sucesos puede ser la siguiente:

1° El casco interior se calienta sin fallar. Cuando la temperatura supere los 300 °C, el aislamiento comenzará a deteriorarse. las propiedades de adhesión entre el casco interior y el aislamiento desaparecerán.

2° Por encima de los 300 °c, el aislamiento se descompondrá térmicamente, con la consiguiente liberación de gas. Esto ocurrirá primeramente en el lado caliente del casco interno.

3° La presión hidrostática de la carga, puede mantener el aislamiento apretado contra el casco interno caliente, con lo que aceleraría la descomposición térmica del mismo.

4° A partir de ello, varios eventos pueden suceder, un aumento de la presión como consecuencia de los gases/líquidos liberados. Si no se produce una evacuación adecuada de estos gases, el incremento de la presión puede producir el desgarramiento eventual del aislamiento y/o de la primera y segunda barrera, o

5° Con más o menos aislamiento descompuesto térmicamente, el soporte de la primera y segunda barrera está muy disminuido, y éstas pueden colapsar en cualquier momento, o

6° Las barreras no fallan, permaneciendo soportadas por el casco interno caliente durante el incendio.

7° El casco interno, estará ahora expuesto a la temperatura de la carga por un lado y por el otro al foco caliente del fuego. La temperatura del casco interno, sin embargo, probablemente se reducirá por debajo de los 400 °C. Capas de vapor se producirán si el líquido se pone en contacto directo con el casco interno. Si la barrera no falla, los productos de la descomposición del aislamiento, pueden prevenir el enfriamiento del casco interior.

8° Si el casco interior o las barreras primaria y secundaria no

han fallado todavía, la carga permanecerá contenida durante el fuego.

9° Una vez apagado el fuego, y en el caso de que el buque permanezca a flote todavía, la temperatura del casco interno caerá a menos de 100 °C y probablemente se aproximará a la temperatura normal del LNG-LPG.

10° Es probable que el casco interno, habiendo estado expuesto a éstas dos temperaturas extremas y a tensiones y esfuerzos durante el fuego y a la temperatura LNG-LPG y a altas tensiones de tracción después del fuego, éste fallará.

11° El LNG-LPG será liberado en el espacio entre el casco interior y el exterior y por lo tanto se producirán los eventos desde el N° 4 al 6 de la primera posibilidad.

Se considera ahora un segundo caso, en el que después de una colisión con posterior incendio en las inmediaciones del buque, y teniendo éste tanques de carga del tipo independiente con aislamiento externo.

En éste caso el casco interior puede alcanzar temperaturas de más de 1200 °C. Al ser el aislamiento externo, éste estará expuesto a las altas temperaturas y calor radiante desde el casco interno. En una primera posibilidad, los siguientes sucesos se

pueden producir:

1° El aislamiento se calentará y al alcanzar la temperatura de 200- 300 °C comenzará a deteriorarse y descomponerse.

2° Transcurrido un tiempo determinado el aislamiento estará totalmente consumido -tanto por combustión como por descomposición térmica-, con lo que el tanque quedaría expuesto al calor radiante del casco interno.

3° Las paredes del tanque que se ha mantenido su temperatura hasta ahora, comenzarán a calentarse. Sin embargo, el calor desde el casco interno no es lo suficientemente alto para producir una capa de vaporización a la ya fría superficie de la pared del tanque, y la máxima temperatura de la pared estará ligeramente por encima de la temperatura del LNG-LPG. Esto producirá en el interior del tanque un incremento de la presión, que puede llegar a producir la rotura del mismo si se alcanzan valores superiores al límite elástico del material.

4° El LNG-LPG permanecerá en el interior del tanque con toda posibilidad en el interior del tanque durante el incendio.

5° El fallo del tanque se puede producir como consecuencia de someter a los soportes del mismo al calor de radiación produciendo en ellos un debilitamiento de la estructura y su

posterior ruina.

6° Si el fallo del tanque se produce, el LNG-LPG será liberado y por tanto el subsiguiente fallo de los cascos interno y externo.

Otra posibilidad, y sus eventos, puede ser la siguiente:

1° El aislamiento se calienta y comienza a deteriorarse y descomponerse a partir de entre 200 y 300 °C.

2° Los productos de la descomposición, tales como carbón o sólidos o componentes viscosos -dependiendo del material de aislamiento-, pueden cubrir el área total expuesta. Estos materiales no se quemarán y funcionarán como aislamiento.

3° Los productos de la descomposición reducen el valor al cual el foam es calentado, dificultando que se propague la avería del aislamiento sin el contacto directo de la llama desde una fuente externa.

4° Las barreras de vapor, actuarán como superficies reflectantes la cuales reducirán la temperatura del aislamiento debido a la radiación.

5° Si pequeñas cantidades de aislamiento -10 mm de espesor- permanecen en la superficie del tanque o en los soportes, si el carbón u otros productos descompuestos cubren éstas superficies,

ninguna elevación peligrosa de la temperatura se producirá sobre las paredes del tanque y soportes.

6° El tanque no fallará probablemente ni antes ni después del incendio.

En el caso de tanque independiente del tipo C (recipientes a presión), los cuales si no son refrigerados no llevan aislamiento, la cadena de eventos puede ser la siguiente:

1° El calentamiento del casco exterior calentará a las botellas, y estas al gas en su interior aumentando la temperatura y su presión.

2° Como consecuencia de el aumento de la presión, la válvula de seguridad abrirá y comenzará a evacuar gas hasta bajar la presión.

3° Si el incendio persiste y la válvula de seguridad continua evacuando gas, la parte del recipiente que no tenga líquido comenzará a aumentar su temperatura y, a disminuir la resistencia mecánica de la misma hasta su rotura.

4° Una vez rota la botella, el gas restante en su interior a la presión que se había alcanzado, comunicará con la atmósfera, produciendose una explosión de vapor.

Se han considerado todos los eventos y averías finales posibles en las estructuras y tanques de los buques LNG-LPG, como consecuencia de la colisión y posterior incendio, a través del programa de cálculo se simularán todas éstas posibilidades y se comprobará si el fenómeno de BLEVE se puede producir en éste tipo de buques en las condiciones mencionadas, y con las diversas cargas -gases licuados- que se transportan por vía marítima generalmente.

4.2.3.- Cálculo del aumento de la temperatura de los cascos del buque y del calor cedido a la carga.

Antes de comenzar el cálculo del aumento de temperatura de los cascos y los tanques del buque, es necesario hablar del comportamiento y resistencia al fuego de los materiales que componen la estructura del casco y tanque y del aislamiento del tanque.

La resistencia al fuego de un material, se define como el tiempo durante el cual un elemento se mantiene cumpliendo las funciones para las cuales se proyectó, - tiempo en el que conserva sus propiedades estructurales -, cuando éste es sometido a la acción del fuego.

En el acero utilizado en construcción de los cascos de los buques llamado del tipo naval, comienza a perder sus características mecánicas en el momento que éste alcanza los 400°C de temperatura, a partir de la cual, si éste es muy extenso comienza a producirse la ruina de la estructura metálica.

Como se sabe, las características mecánicas de los aceros varían con la temperatura. Es por lo que se ha de establecer la forma en que se produce esta variación, al objeto de conocer el límite de la resistencia de la estructura.

Las variaciones de las características mecánicas -límite elástico, módulo de Young, etc.-con la temperatura, se pueden conocer a través de las ecuaciones (Alejandro Rodríguez de Torre, Tesis Doctoral), siguientes:

Para el límite elástico

si $T < 600^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma} = 1 + \frac{\theta}{900 \operatorname{Ln} \frac{\theta}{1750}} \quad (42)$$

si $600^{\circ}\text{C} < T < 1000^{\circ}\text{C}$

y para todo el rango de temperaturas

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma} = 1 + 3 \cdot 10^{-4} \theta - 3,5 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 2,2 \cdot 10^{-9} \theta^3 \quad (43)$$

para el módulo de Young:

$$\frac{E_{\theta}}{E} = 1 + \frac{\theta}{2000 \operatorname{Ln} \frac{\theta}{1100}} \quad (44)$$

existen otros modelos matemáticos para determinar la variación de las características mecánicas con la temperatura, pero para el tema en estudio, éstas son de suficiente utilidad como comprobación de la pérdida de resistencia y sus consecuencias.

El incendio desarrollado alrededor del costado del buque debido a la combustión de combustibles líquidos (hidrocarburos), es generalmente intenso, y la combustión nos es completa, siendo las llamas son del tipo luminoso, las cuales pueden alcanzar hasta los 1200 °C (N.H. Afgan, J.M. Beer, 1974). En éste supuesto, se considera que las llamas forman un plano paralelo al costado del buque, y que a sus vez, éstos son infinitos figura 40. Las llamas del combustible que arde sobre el costado del buque a una temperatura aproximada de 1.200 °C, calienta por radiación el forro exterior del mismo en función de la ecuación siguiente:

$$q_{I_1} = \epsilon \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot S_{ce} \cdot t (T_{LLa}^4 - T_{ce}^4) \quad (45)$$

Este calor se invierte en aumentar la temperatura del casco exterior del buque, de acuerdo con la siguiente igualdad:

$$q_{I_1} = \epsilon_1 \cdot \epsilon \cdot \sigma (T_{LLa}^4 - T_{ce}^4) S_{ce} \cdot t = C_{ce} \cdot \rho_{ce} \cdot V_{ce} (T_{f_{ce}} - T_{i_{ce}}) \quad (46)$$

y despejando T_{fce} , se calcula la temperatura que el casco adquiere en el tiempo t deseado.

$$T_{fce} = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon \cdot \sigma (T_{LLa}^4 - T_{ce}^4) S_{ce} \cdot t}{C_{ce} \cdot \rho_{ce} \cdot V_{ce}} + T_{ice} \quad (47)$$

cuya gráfica corresponde a la figura 41.

Los buques que transportan LNG-LPG, están contruidos de acuerdo con la Organización Marítima Internacional, con doble casco, figura 40, y por tanto el calor del casco exterior, se transmitirá por radiación al casco interno, de acuerdo con la ecuación:

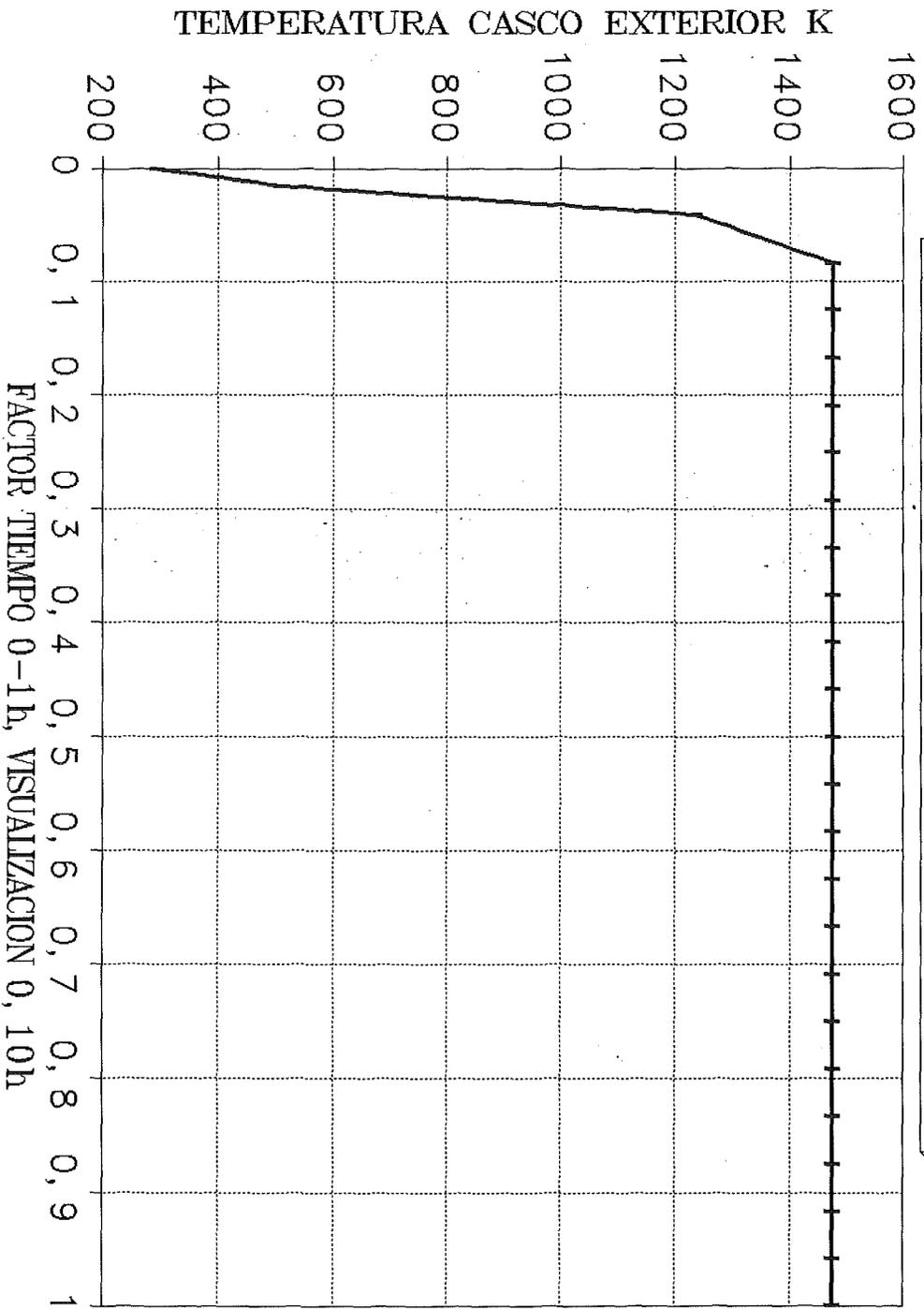
$$Q_{r_2} = \frac{\sigma \cdot S_{ce} \cdot t}{R} (T_{ce}^4 - T_{ci}^4) \quad (48)$$

donde R es igual a:

$$R = \left(\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 \cdot S_{ce}} + \frac{1}{S_{ce} \cdot F_{1-2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 \cdot S_{ci}} \right) S_{ci} \quad (49)$$

GRAFICA TEMPERATURA CASCO EXTERIOR

FIGURA 41



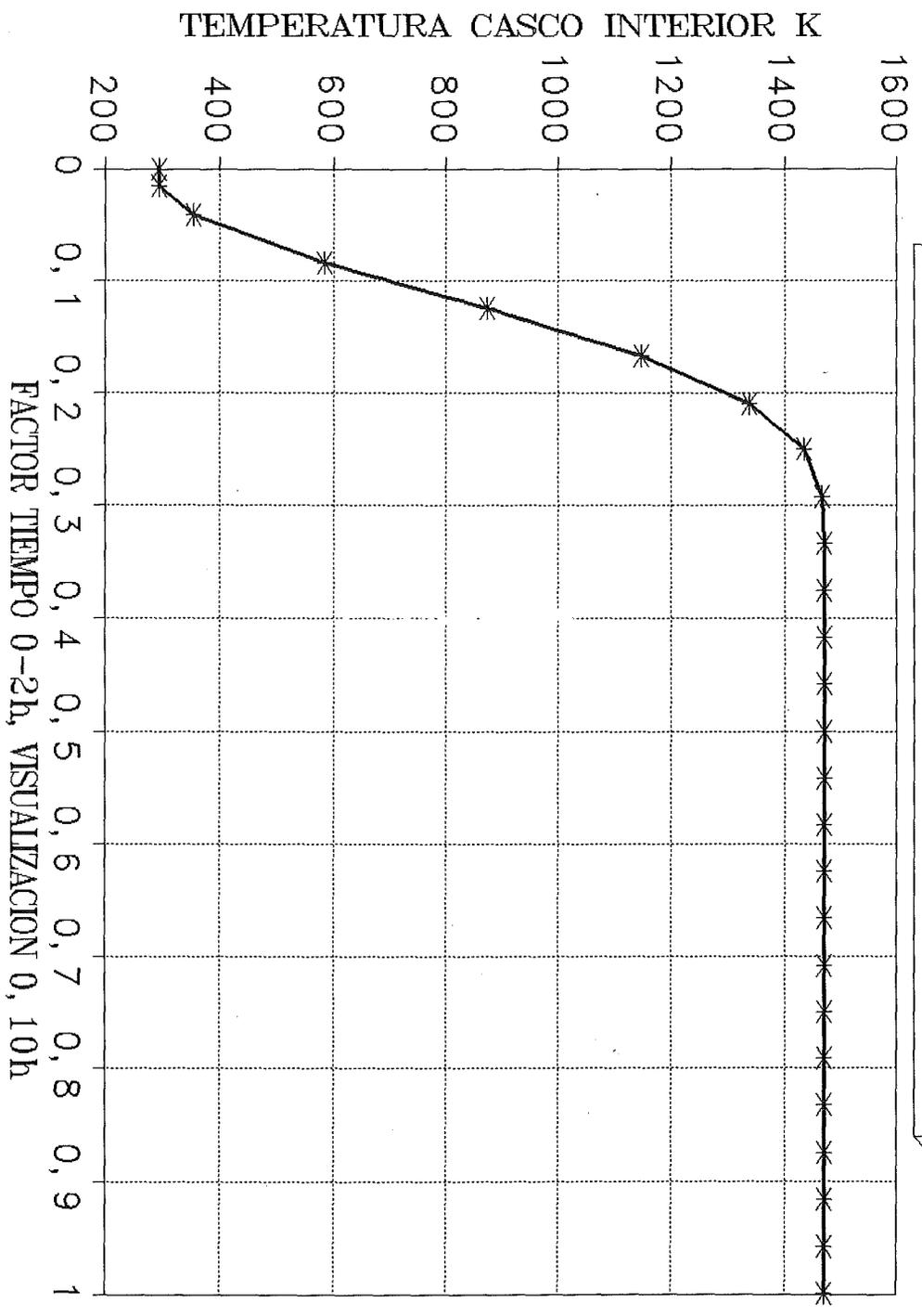
El calor q_{r2} que se transmite por radiación desde el casco exterior al el interior, se invierte, en el caso de buques de gases licuados con tanques del tipo membrana, en aumentar la temperatura de la chapa del casco exterior y del aislamiento del tanque en un principio, el cual es un período de transmisión de calor a régimen transitorio, a partir del cual se tendrá un régimen permanente de transmisión de calor, en el que el calor que se transmite a la carga por conducción es igual al que se transmite por radiación desde el casco externo al interno q_{r2} , siendo éste último durante el régimen transitorio de transmisión de calor igual a:

$$q_{r2} = \frac{\sigma \cdot S_{ce} \cdot t}{R} (T_{ce}^A - T_{ci}^A) = C_{ci} \cdot \rho_{ci} \cdot V_{ci} (T_{f_{ci}} - T_{i_{ci}}) + S_a \cdot t \frac{T_{i_{ci}} - T_l}{\sum \frac{e}{\lambda}} \quad (50)$$

de la que despejando la temperatura $T_{f_{ci}}$, figura 42, que el casco interno adquiere en el tiempo t , se tiene:

$$T_{f_{ci}} = \frac{\frac{\sigma \cdot S_{ce} \cdot t}{R} (T_{ce}^A - T_{ci}^A) - S_a \cdot t \frac{T_{i_{ci}} - T_l}{\sum \frac{e}{\lambda}}}{C_{ci} \cdot \rho_{ci} \cdot V_{ci}} + T_{i_{ci}} \quad (51)$$

GRAFICA TEMPERATURA CASCO INTERIOR
FIGURA 42



La temperatura del casco interno estará afectada por la resistencia radiactiva R , que a su vez depende de la relación entre la superficie del casco externo S_{ce} y del casco interno S_{ci} , además de por el factor de forma F_{1-2} , como se ve en la figura 43. Por lo que el valor de R disminuirá al aumentar la superficie del casco externo, y aumentará al disminuir ésta.

Cuando el casco externo al poco de iniciarse el incendio adquiere la temperatura máxima posible, se puede, en función de ésta y de la del casco interno determinar la cantidad de calor por m^2 y hora, que se transmite desde el casco exterior al interior, de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$q = \frac{\sigma}{R} (T_{ce}^4 - T_{ci}^4) \quad (52)$$

Si el calor q de la ecuación 52 se lleva al eje de ordenada y las distintas temperaturas que puede tener el casco interno al de abscisas, para una temperatura fija del casco exterior, se obtiene la gráfica de la figura 44, a los distintos valores de la resistencia radiactiva R .

En el caso que se considera de buques que transportan gases licuados en **tanques del tipo membrana**, el contacto entre el aislamiento (poliuretano), y el casco interno, permite que el aislamiento al alcanzar la temperatura de 200°C , se deteriore

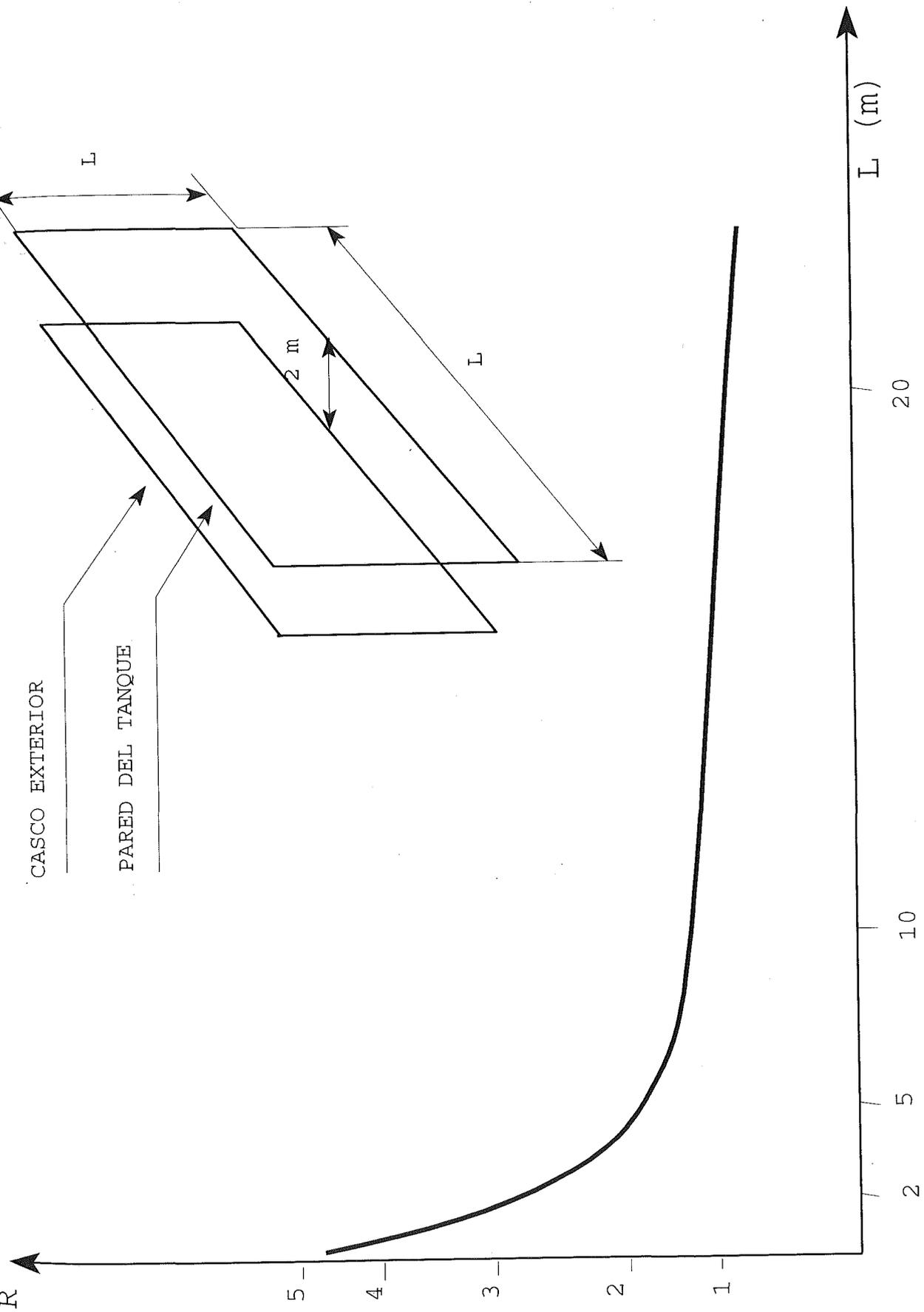


FIGURA 43

RESISTENCIA RADIATIVA ENTRE EL CASCO INTERIOR Y EL EXTERIOR

progresivamente perdiendo sus propiedades aislante iniciales, para adquirir generalmente una conductancia K más elevada, por lo que permitirá un mayor paso de calor a través del mismo, y que se puede calcular para los distintos valores de conductancia K, mediante la ecuación siguiente:

$$q = K (T_{ci} - T_l) \quad (53)$$

El calor q de la ecuación 52, a los distintos valores de la conductancia K que adquiere el aislamiento, se representan en la gráfica de la figura 44.

Los valores de la conductancia K, representados en las figura 44, corresponden a los estados siguientes de aislamiento:

K = 0,1, aislamiento en buen estado.

K = 10, aislamiento real de 20 mm de espesor.

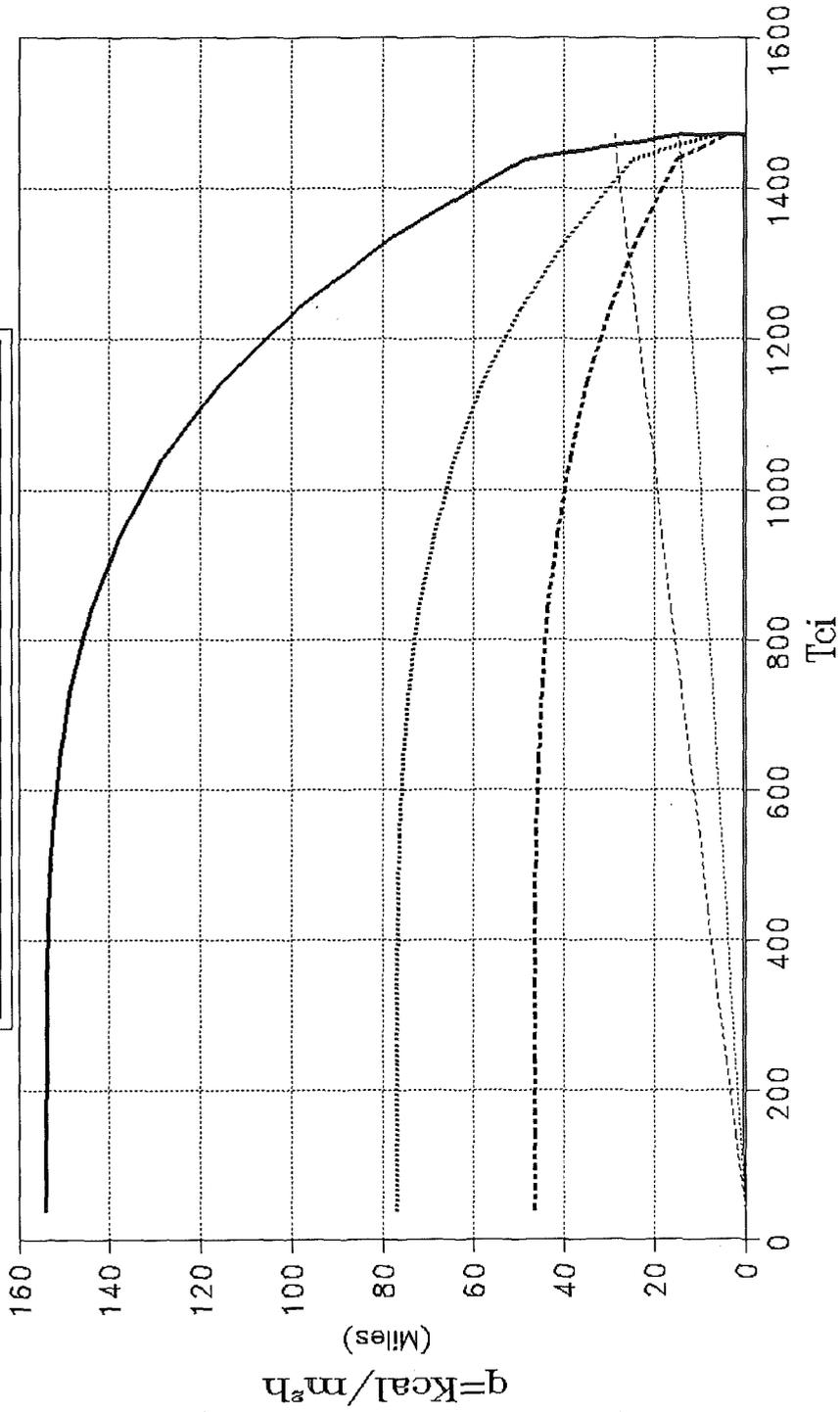
K = 20, aislamiento real de 10 mm de espesor.

K = 1500, tanque sin aislamiento.

El calor comunicado a la carga del tanque (gas licuado), a través del casco del casco interior y del aislamiento por conducción, es el siguiente:

$$Q_R = Q_T + Q_p$$

CALCULO DE q SEGUN R Y K
 FIGURA 44



$R=1,5$ (solid line) $R=3$ (dotted line) $R=5$ (dashed line)
 $K=0,1$ (dash-dot line) $K=10$ (dash-dot-dot line) $K=20$ (long-dashed line)

donde

Q_T = Calor recibido por la carga durante el régimen transitorio.

Q_p = Calor recibido por la carga durante el régimen permanente.

El calor recibido durante el régimen transitorio se divide en dos fases, como indica la siguiente igualdad:

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

Q_1 es el calor recibido por la carga en el tiempo (t) que transcurre desde que se inicia el incendio, hasta que el casco interno adquiere la máxima temperatura posible, éste calor Q_1 , viene dado por la siguiente ecuación:

$$Q_1 = S_a \cdot t \frac{T_{ici} - T_1}{\sum \frac{e_1}{\lambda_1}} \quad (54)$$

Q_2 , es el calor que se transmite a la carga durante el tiempo (t) que transcurre desde que el casco ha adquirido la máxima temperatura, y el aislamiento adherido al casco interno comienza a deteriorarse, hasta que la temperatura de éste último se estabiliza, éste calor Q_2 , viene dado por la siguiente ecuación:

$$Q_2 = S_a \cdot t \frac{T_{mci} - T_1}{\sum \frac{e_2}{\lambda_2}} \quad (55)$$

El tiempo máximo de deterioro o quemado total del aislamiento de poliuretano, se determina a través de los ensayos al fuego realizados con poliuretano por el Det Norske Veritas, 1975, figura 45 y 46.

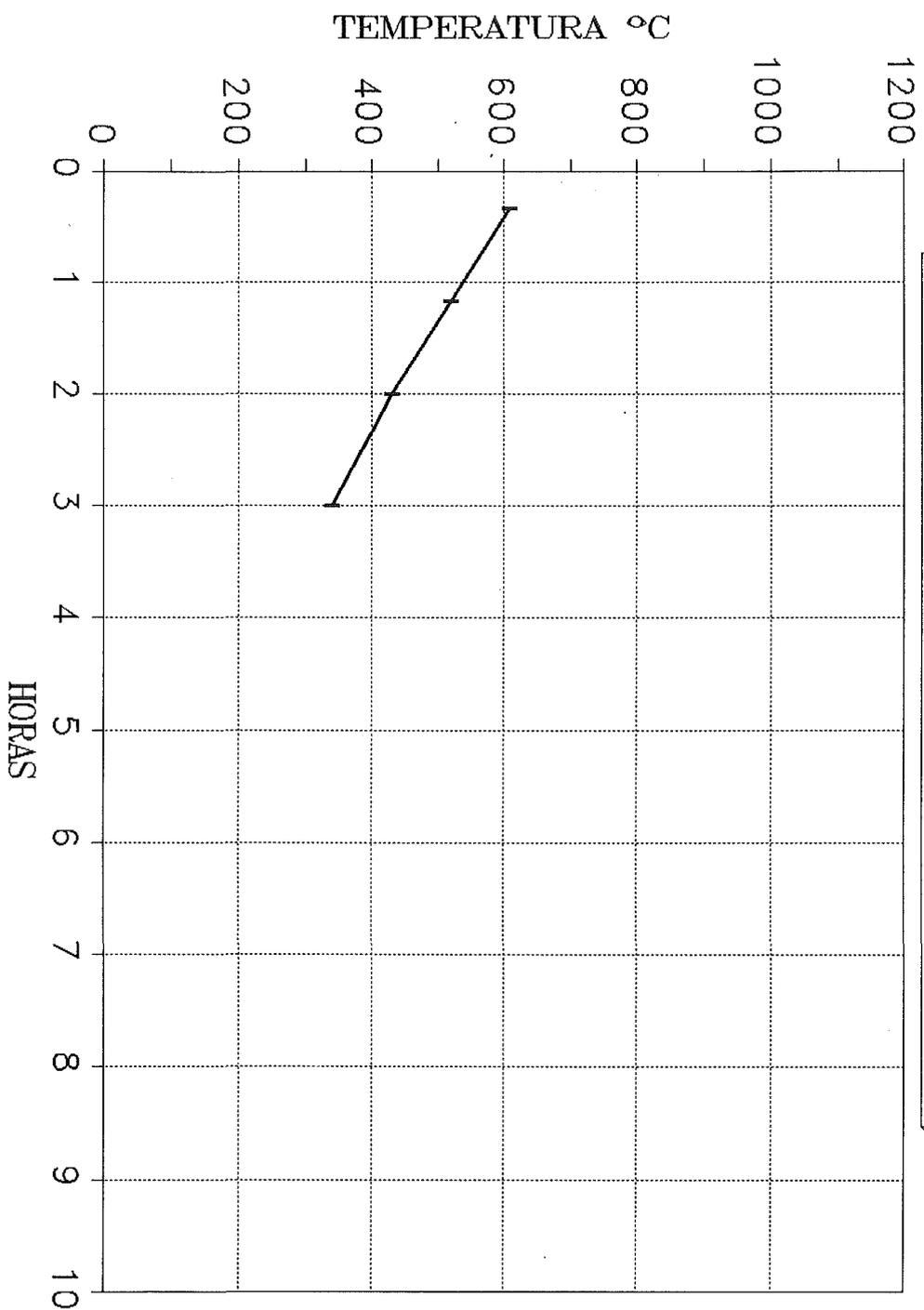
El calor Q_p , comunicado a la carga en régimen permanente, se obtiene por medio de las ecuaciones (52) y (53), las cuales se representan en la gráfica de la figura 44, para las distintas temperaturas que el casco interno puede adquirir y para los distintos estados de funcionamiento/deterioro del aislamiento.

Una vez que se conoce la cantidad total de calor que se le comunica a la carga, se calcula el efecto de éste sobre la temperatura/presión de la misma.

Si se considera un incendio alrededor de un buque para el transporte de gases licuados del tipo de tanques independientes (aislamiento externo), el calor transmitido al casco interno, aislamiento y carga sufre una pequeña variación con respecto al tanque del tipo membrana (aislamiento interno).

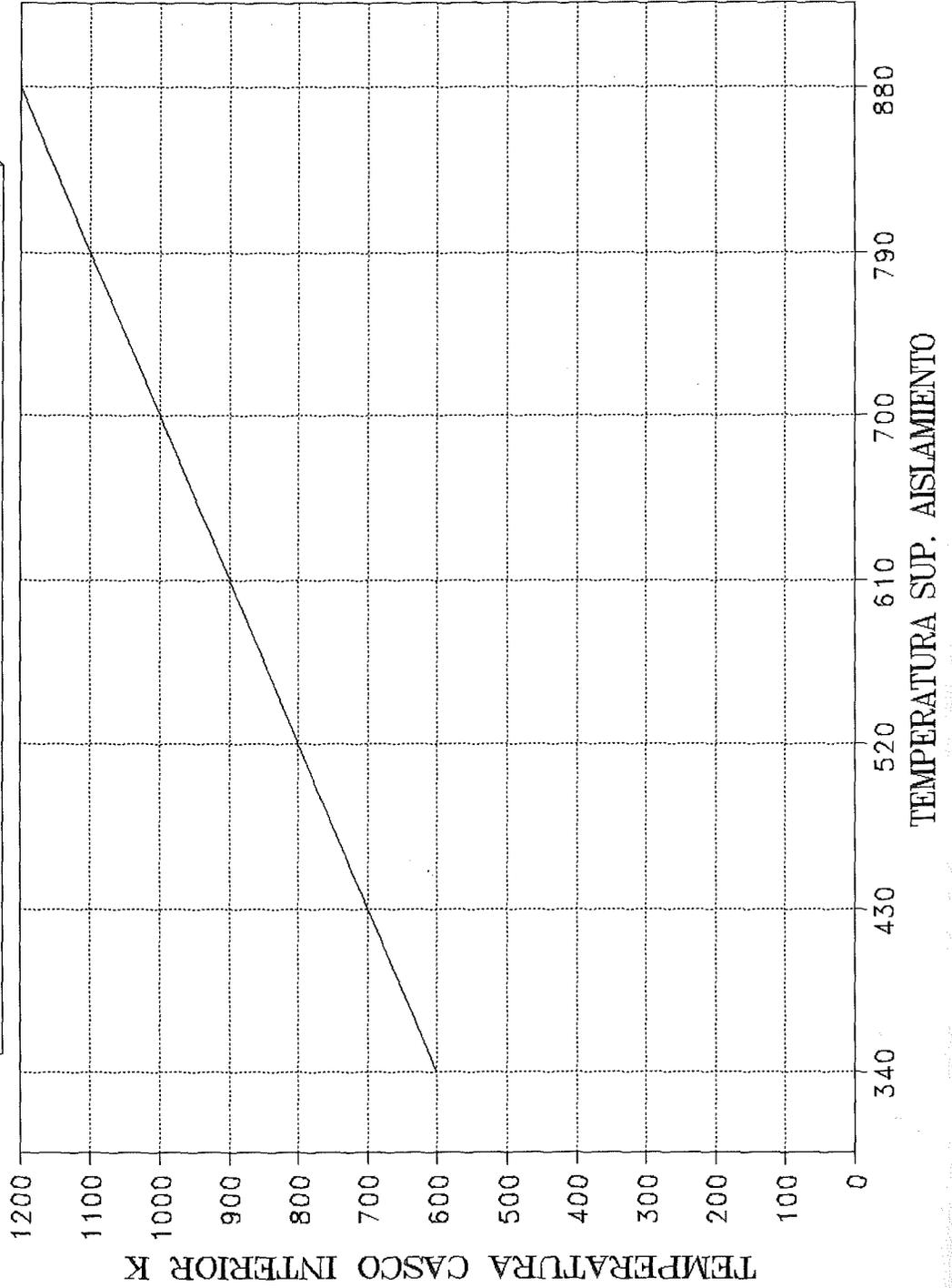
TIEMPO DE QUEMADO DEL POLIURETANO

FIGURA 45



RADIACION CASCO INTERIOR/AISLAMIENTO

FIGURA 46



El calor se transmite por radiación desde las llamas al casco externo según:

$$Q_{I_1} = \sigma \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon (T_{LLa}^4 - T_{ce}^4) \cdot S_{ce} \cdot t \quad (56)$$

Calor éste que se invierte en aumentar la temperatura de la chapa del casco externo del buque de acuerdo con

$$Q_{I_1} = \sigma \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon (T_{LLa}^4 - T_{ce}^4) S_{ce} \cdot t = C_{ce} \cdot \rho_{ce} \cdot V_{ce} (T_{f_{ce}} - T_{i_{ce}})$$

La temperatura $T_{f_{ce}}$ que adquiere el casco exterior viene dado por la ecuación siguiente:

$$T_{f_{ce}} = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon \cdot \sigma (T_{LLa}^4 - T_{ce}^4) S_{ce} \cdot t}{C_{ce} \cdot \rho_{ce} \cdot V_{ce}} + T_{i_{ce}} \quad (58)$$

Desde el casco exterior del buque, el calor se transmite por radiación al casco interior, calor éste que será igual a:

$$q_{r_2} = \frac{\sigma \cdot S_{ci} \cdot t}{R} (T_{ce}^4 - T_{ci}^4) \quad (59)$$

Calor éste último que se invierte en aumentar la temperatura del casco interno según:

$$q_{r_2} = \frac{\sigma \cdot S_{ci} \cdot t}{R} (T_{ce}^4 - T_{ci}^4) = C_{ci} \cdot \rho_{ci} \cdot V_{ci} (T_{f_{ci}} - T_{i_{ci}})$$

despejando $T_{f_{ci}}$, de la ecuación (57), se obtiene la temperatura que adquiere el casco interno

$$T_{f_{ci}} = \frac{\frac{\sigma \cdot S_{ci} \cdot t}{R} (T_{ce}^4 - T_{ci}^4)}{C_{ci} \cdot \rho_{ci} \cdot V_{ci}} + T_{i_{ci}} \quad (61)$$

La resistencia radiactiva (R) en el caso que se considera, es la misma a la de los buques con tanques del tipo de membrana.

En los buques con tanques del tipo independiente, el aislamiento del tanque, está adherido a éste por su parte externa, y separado del forro del casco interno, transmitiéndose el calor desde el forro del casco interno al aislamiento del

tanque independiente por radiación, el cual viene expresado por la siguiente ecuación:

$$q_{r3} = \frac{\sigma \cdot S_a \cdot t}{R} (T_{ci}^4 - T_a^4) \quad (62)$$

El calor q_{r3} , que se transmite desde el casco interno, se invierte al principio en calentar el aislamiento, y a partir de los 200 °C, comienza a quemarlo, variando a su vez todas las características del mismo, así como su espesor. Durante éste período de tiempo el calor se transmite a la carga en régimen transitorio, de acuerdo con la ecuación:

$$q_T = S_a \cdot t \frac{T_a - T_l}{\sum \frac{e_a}{\lambda_a}} \quad (63)$$

como consecuencia de la temperatura a que está sometido el aislamiento, éste entrará en combustión, y como consecuencia el espesor y el coeficiente de conductividad térmica variaran -en uno u otro sentido-, hasta que se estabilizan y permanecen constantes. La temperatura de la superficie del aislamiento se determina a través de los ensayos realizados por el (DNV, 1975) con poliuretano, la cual se realizó utilizando un modelo basado

en los buques de transporte de gases licuados con tanques del tipo independientes, y cuyos resultados se reflejan en la gráfica de la figura 45.

El tiempo de "quemado" hasta que la temperatura en la superficie del aislamiento es constante, se determina de la misma forma que para los tanques del tipo membrana, con la salvedad de que en éste último, el "quemado" del aislamiento se ve favorecido por la columna hidrostática del gas licuado contenido en el tanque.

Estabilizada la temperatura del aislamiento, el calor que se transmite por radiación en régimen permanente desde el casco interno al aislamiento, es igual al que se transmite a través del "nuevo aislamiento" por conducción, y por convección a la carga en el interior del tanque, y que viene dado en el caso de radiación para los distintos valores de (R) por

$$q_{r_p} = \frac{\sigma \cdot S_a \cdot t}{R} (T_{ci}^4 - T_a^4) \quad (64)$$

y por conducción para los distintos valores de conductancia (k), por

$$q_c = S_a \cdot K \cdot t (T_a - T_l) \quad (65)$$

Para los distintos valores de temperatura T_a de la superficie del aislamiento, se puede obtener por medio de la gráfica de la figura 47, los valores de q_{rp} , y de q_c , por unidad de tiempo y superficie.

El calor total en el tiempo (t) que se transmite a la carga en el interior del tanque, viene dado por

$$Q_T = q_T + q_c$$

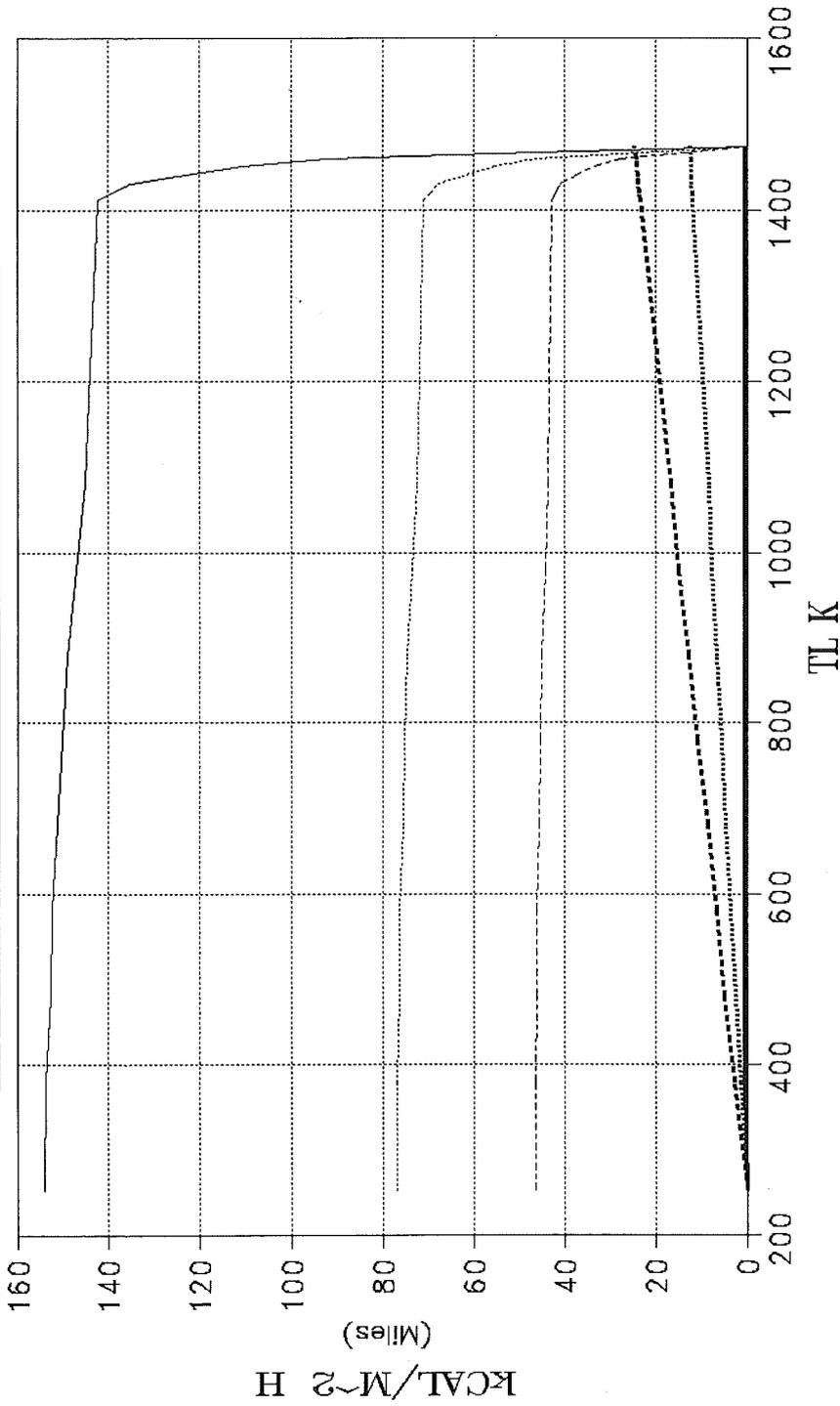
Los tanques del tipo independiente al ser un recipiente a presión aislado externamente, si por la acción del fuego se le comunica calor a través de la cubierta, a la cámara de vapor del tanque, éste se invertirá en secar y recalentar al mismo, y también en aumentar la temperatura de la chapa del tanque en esa zona, éste calor viene dado por

$$q_{c-v} = S_c \cdot \alpha \cdot t (T_p - T_v) + \rho_{ac} \cdot V_{ac} \cdot C_{ac} (T_f - T_i) \quad (66)$$

Para calcular la temperatura que la chapa del tanque adquiere en la zona de vapor, despejamos de la ecuación (63), T_f ,

CALOR QUE PASA AL GAS LICUADO

FIGURA 47



- VALOR DE R1
- - - VALOR DE R2
- VALOR DE R3
- · - · VALOR DE K1
- - - - VALOR DE K2
- · - · VALOR DE K3

y se tiene

$$T_f = \frac{q_{c-v} - S_c \cdot t \cdot \alpha (T_p - T_v)}{\rho_{ac} \cdot V_{ac} C_{ac}} + T_i \quad (67)$$

donde α es igual a

$$\alpha = \frac{C (G_r \cdot P_r)^{0,25} \lambda}{h} \quad (68)$$

y

$$G_r = \frac{\beta \cdot \rho^2 \cdot h^3 \cdot \Delta T \cdot g}{\mu^2} \quad (69)$$

y

$$P_r = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \quad (70)$$

4.2.4.- Volumen máximo a transportar.

El máximo volumen de carga, de acuerdo al capítulo XV del código para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel será:

$$V_L = 0,98 \cdot V_T \frac{\rho_R}{\rho_L} \quad (71)$$

donde

V_L = Volumen máximo al cual se podrá llenar el tanque.

V_T = Volumen del tanque.

ρ_R = Densidad de la carga a la temperatura de referencia.

ρ_L = Densidad de la carga a la temperatura y a la presión correspondiente a la operación de cargar.

Una vez conocido el volumen máximo cargado y la presión de transporte del producto, se determina la masa de vapor y de líquido que se está transportando

$$V_{TOTAL} = v_{l_1} (m_T - m_{v_1}) - v_{v_1} \cdot m_{v_1} \quad (72)$$

la masa de vapor transportada es:

$$m_{V_1} = \frac{V_T - V_{L_1} \cdot m_T}{V_{V_1} - V_{L_1}} \quad (73)$$

La masa de líquido transportada es igual a la diferencia entre la masa total m_T , y la masa de vapor m_v .

4.2.5.- Cálculo del aumento de la presión del tanque como consecuencia del calor comunicado a la carga.

El calor que se transmite a través del aislamiento al líquido/gas transportado se invierte en aumentar la energía interna y la presión hasta que se alcanza la presión de tarado de las válvulas de seguridad, y éstas abren, así por el primer principio de la termodinámica y considerando un proceso a volumen constante hasta que las válvulas de seguridad abren, se tiene:

$$Q_{R_{1-2}} = \Delta u + p \cdot dv \quad (74)$$

Con lo que el calor necesario para que la masa de líquido/vapor aumente de presión y las válvulas de seguridad abran será:

$$Q_{1-2} = m_T [(h_2 - p_2 \cdot v_2) - (h_1 - p_1 \cdot v_1)] \quad (75)$$

Para p_1 = presión de transporte, tenemos que:

Estado 1

$$h_{x_1} = h_{l_1} + x_1 (h_{v_1} - h_{l_1}) \quad (76)$$

$$x_1 = \frac{m_{v_1}}{M_T} \quad (77)$$

$$v_{x_1} = v_{l_1} + x_1 (v_{v_1} - v_{l_1}) \quad (78)$$

Para p_2 = presión de tarado de las válvulas de seguridad (distinta para cada producto y de +/- 10 % para presiones entre 0-1,5 Kg/cm², +/- 6 % para 1,5-3 Kg/cm² y de +/- 3% para $p > 3$ Kg/cm²), tenemos que:

Estado 2

$$v_{x_2} = v_{l_2} + x_2 (v_{v_2} - v_{l_2}) \quad (79)$$

$$x_2 = \frac{v_2 - v_{l_2}}{v_{v_2} - v_{l_2}} \quad (80)$$

$$h_{x_2} = h_{l_2} + x_2 (h_{v_2} - h_{l_2}) \quad (81)$$

al estar el tanque cerrado herméticamente $v_1 = v_2$.

El calor comunicando al gas licuado transportado para que

las válvulas de seguridad abran, viene dado por la siguiente igualdad:

$$Q_R = Q_{R1-2}$$

La cantidad de calor disipado por las válvulas de seguridad una vez que éstas abren viene expresado en función del tiempo (t) por

$$Q_{RV} = r \cdot M_e \cdot \Delta t \quad (82)$$

Siendo,

Q_{RV} = Calor evacuado.

r = calor latente de vaporización.

Siendo

$$M_E = \frac{G}{V_e} \quad (83)$$

$$G = F \cdot D \cdot S_T^{0,82} \quad (84)$$

$$D = \frac{177}{r \cdot C} \sqrt{\frac{Z \cdot T}{M}} \quad (85)$$

Donde

M_e = Masa de gas evacuado.

G = Caudal máximo que evacuan las válvulas de seguridad.

S_T = Area de la superficie exterior del tanque.

F = Factor de exposición al fuego de los distintos tipos de tanque de carga.

r = Calor latente de la sustancia que se evaporan en las condiciones correspondientes a la presión de alivio.

C = Constante basada en la relación de calores específicos, tabla V, Código IMO.

Z = Factor de compresibilidad del gas en las condiciones correspondientes a la presión de alivio.

M = Peso molecular del producto.

Una vez que las válvulas de seguridad han abierto, el calor que se le sigue comunicando al gas licuado, lo podemos expresar por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{extra}} = Q_R - r \cdot m_e$$

El calor recibido por el gas licuado (Q_R), se invierte en

vaporizar la masa m_e de vapor que se escapa por las válvulas de seguridad, y el resto, que es el calor extra (Q_{extra}), calienta al gas licuado aumentando su entalpía, y la presión en el interior del tanque.

Si $Q_R = r \cdot m_e$, el calor suministrado al gas licuado, se utiliza sólo y exclusivamente en vaporizar la cantidad máxima (m_e) de vapor, que las válvulas de seguridad pueden evacuar en la unidad de tiempo, por lo que la temperatura del gas licuado permanecerá constante y por lo tanto la presión del tanque.

Si $Q_R > r \cdot m_e$, el calor suministrado al gas licuado, se utiliza en vaporizar la masa (m_e) que es evacuada por las válvulas de seguridad, y el resto en aumentar la temperatura del gas licuado y por tanto su presión.

Ante la posibilidad de recibir el gas licuado una gran cantidad de calor -como consecuencia del incendio- en un espacio de tiempo que puede ser considerado corto, lo importante, es calcular la presión máxima que se alcanza en el tanque durante el incendio, y por tanto la posibilidad de que si se produce la rotura del mismo, con la consiguiente caída súbita de presión, y la posibilidad de producirse un BLEVE.

Para calcular la presión del tanque se procede de la forma siguiente: se calcula la cantidad de calor necesaria para

producir la cantidad de vapor que se evacua por las válvulas de seguridad, el cual viene dado por

$$Q_{vs} = m_e \cdot r \cdot x$$

el calor que se utiliza para aumentar la temperatura del gas licuado y por tanto su presión, se determina por el método de iteración, de forma que se calcula la cantidad de calor que se necesita para aumentar la presión del gas licuado desde P_2 , hasta la presión P_3 , y sumadas éstas dos cantidades de calor y comparadas con el calor extra (Q_{extra}), al igualarse se tendrá la presión P_3 buscada del tanque. Lo anterior se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_{extra} = [(h_3 - h_1) (m_2 - m_3)] + m_e \cdot r \cdot x$$

La entalpía h_3 , de la presión P_3 , que haga cumplir la ecuación (185), da la presión máxima en el tanque, en el tiempo considerado.

4.2.6.- Cálculo del diámetro de la bola de fuego.

En el caso del transporte marítimo de gases licuados, y ante la posibilidad de la producción del fenómeno BLEVE y, durante el mismo, cuando el tanque es roto por el efecto del fuego y la presión a la que está sometido, se producirá la despresurización del tanque, y al estar el líquido sobrecalentado, y por efecto de la inercia térmica la temperatura del líquido permanecerá constante, produciéndose una vaporización espontánea y a la vez brutal, que saldrá al exterior en forma bifásica líquido/vapor, con un incremento de volumen en la vaporización de 250 veces en el caso de propano, además de la expansión del vapor existente, lo que provocará una onda de presión (explosión), que lanzará trozos de la estructura al exterior.

Si como se ha indicado anteriormente el fenómeno BLEVE, se produce en un recipiente que contiene un combustible, la masa de líquido y vapor que sale al exterior en el momento de la explosión, se incendiará dando una bola de fuego de forma hemiesférica que se extenderá inicialmente a ras de tierra.

En el caso de grandes masas de combustible, no todo él se incendiará, pues la falta de oxígeno para que se forme la mezcla estequiométrica, hace que parte de éste sea lanzado sin que se incendie. Otra parte del combustible se desplazará con los fragmentos de tanque que salen despedidos, disminuyendo la

cantidad de combustible que alimenta esta bola de fuego afectando a sus dimensiones y la radiación que esta produce.

La bola de fuego que se forma solamente puede quemar por su superficie externa que es donde se dan las condiciones esteoquímicas para ello, y teniendo en su parte interna gran cantidad de combustible que al no poder mezclarse con el aire, se encuentra fuera de los límites de inflamabilidad.

Seguidamente la turbulencia del incendio provoca la entrada de aire dentro de la masa de combustible, y simultáneamente, la radiación de la combustión va calentando el conjunto, lo que hace que la masa en ignición aumente el tamaño de la bola de fuego (se han propuesto valores del orden de 1 m/s para la velocidad de crecimiento del diámetro -Lihou y Maund, 1982-), y a su vez adquiriendo una forma más o menos esférica, que va ascendiendo, dejando una cola de diámetro variable parecido a el hongo de una explosión nuclear. Por tanto las dimensiones de la bola de fuego así formada pueden ser extraordinariamente grande, y su duración de algunos minutos, en los cuales desprende una gran radiación de calor.

Según (Casal,1989), la acción de la combinación BLEVE/bola de fuego, se puede sintetizar en los cuatro siguientes efectos:

- Radiación térmica.
- Fragmentos lanzados por la explosión.

- Onda de choque.
- Eventual lluvia de combustible en los alrededores.

Las características y los efectos de la bola de fuego que vamos a estudiar van a ser el diámetro, la altura, el tiempo y la radiación térmica.

El diámetro máximo de la bola de fuego, ha sido tratado por varios autores, y en general casi todo ellos han optado por una expresión bastante simple como es la siguiente:

$$D = a m^b$$

donde D es el diámetro (m), m es la masa de combustible de la bola de fuego (Kg), y a y b son dos constantes empíricas y que se encuentran en la tabla 12, con cada uno de sus autores.

Tabla 12

constantes	a	b
Marshall	5,5	
High (1968)	3,86	0,32
Fay y Lewis (1977)	6,21	0,33
Hasegawa y Sato (1978)	5,25	
Campbell (1980)	3,97	0,33
TNO (1984)	6,48	0,325
Whazan (1988)	5,33	0,33
Clay et al.	5,8	0,33

Algunas de estas expresiones han sido obtenidas mediante experimentos a pequeña escala y otras del estudio estadístico de varias ecuaciones.

Existen otros modelos matemáticos para determinar el diámetro de la bola de fuego y que se basa en el volumen inicial de vapor en la bola de fuego, y no en la masa de combustible. esta expresión propuesta por Fay y Lewis (1977), es como sigue:

$$D = 7,71 V^{0,33}$$

donde V es el volumen inicial de vapor en la bola de fuego, en m^3 . Estos mismos autores dan también otra expresión en función del tiempo:

$$D = 0,806 n^{1,12} V^{1/3}$$

donde n es un tiempo adimensional que se calcula de la forma siguiente:

$$n = g^{1/2} t V^{-1/6}$$

siendo g la aceleración de la gravedad en (m/s^2) y t el tiempo real en (s) de la ignición.

4.2.7.- Cálculo del tiempo de duración de la bola de fuego.

El tiempo de duración de la bola de fuego es importante para determinar la radiación recibida por las personas y los equipos. El modelo matemático utilizado por los distintos autores que lo han tratado es simple como el utilizado para el diámetro, y también es de forma exponencial

$$t = c m^f$$

donde t es el tiempo en (s), m la masa de combustible de la bola de fuego, y c y f son dos constantes propuestas por los distintos autores, y que se encuentran en la tabla 13.

Tabla 13

constantes	c	f
High (1968)	0,299	0,32
TNO (1984)	0,852	0,26
Whazan (1988)	1,089	0,327
Nazario (1988)	0,45	0,33
Clay et al. (1988)		
m < 37.000 Kg	0,45	0,33
m > 37.000 Kg	2,60	0,167

Fay y Lewis (1977), también propusieron otra expresión para calcular el tiempo en función del volumen de vapor inicial en la bola de fuego:

$$t = 2,8 V^{1/3}$$

4.2.8.- Cálculo de la altura de la bola de fuego.

Para determinar la altura en (m) de la bola de fuego, existen menos modelos matemáticos que para el diámetro y el tiempo. Fay y Lewis, calculan la altura de la cola de fuego hasta el centro de la esfera, en función del volumen inicial del vapor en (m³)

$$H = 12,7 V^{0,33}$$

siendo H la altura máxima en (m).

o

$$H = 1,97 n^{0,86} V^{0,33}$$

siendo H la altura media.

4.2.9.- Radiación térmica.

4.2.9.1.- Poder emisor de la superficie de la llama.

Durante el corto período de tiempo que dura la bola de fuego, ésta emite una intensa radiación que representa en términos porcentuales el 30 % aproximadamente de la energía desarrollada por la combustión.

El peligro más importante que representa la bola de fuego es la radiación, y los efectos térmicos de ésta depende de lo siguiente:

- La intensidad del flujo térmico.
- Duración.
- Naturaleza del receptor.

La radiación de la superficie de la bola de fuego, está condicionada por las variables atmosféricas -densidad del vapor en condiciones ambientales, transmisividad atmosférica, estimación del calor de transferencia, etc.- por lo que el problema de calcular esta radiación es bastante complejo , debido a las variables aleatorias que intervienen.

Citaremos alguna de estas formulas:

fórmula empírica de Batstone y Tomi:

$$E = 0,3 \cdot S \cdot V \cdot P_c \cdot D$$

E = Flujo de radiación (Kw/m²) en la superficie de las llamas.

S = Superficie circundante en llamas (m²).

V = Velocidad de combustión (mm/s) ; de 5 a 10, un valor razonable es 8.

P_c = Poder calorífico del combustible (Kj/Kg).

D = Densidad del combustible (Kg/m³).

Otros valores del poder emisor de la superficie de la bola de fuego son los siguientes: Hasegawa y Sato (1978) recomiendan E = 110 - 130 kW/m², TNO (1985) E = 200 kW/m², revisando otras fuentes bibliográficas nos dan valores como los que siguen: 150 - 250 kW/m², 150 - 300 kW/m², 250 - 300 kW/m² y 350 kW/m². También existen ecuaciones tan simples, conservadora y sobredimensionada como la siguiente:

$$E = 120 m^{0,143}$$

En general se puede decir que el valor más aceptado del poder emisor de la superficie de la llama, es el de 200 kW/m².

Al objeto de determinar la influencia de la radiación determinadas distancias, se pueden aplicar las ecuaciones siguientes:

$$R = \frac{E \cdot r^2}{l^2} \quad (87)$$

donde

R = radiación (kW/m²) a una distancia l (m) del centro de la bola de fuego.

r = radio de la bola de fuego en (m).

La ecuación anterior está comprobada para bolas de fuego de LPG con diámetros entre 500 y 600 metros.

Otras fórmulas expresadas por Nazario, son las siguientes:

$$E = \frac{4,86 \cdot H \cdot m^{0,667}}{l^2} \quad (88)$$

H = calor de combustión en (J/Kg).

para una presión de rotura menor que la de abertura de la válvula de seguridad.

$$E = \frac{6,48 \cdot H \cdot m^{0,667}}{l^2} \quad (89)$$

para una presión de rotura superior a la de operación de la

válvula de seguridad.

Los efectos de la radiación sobre el ser humano, se manifiesta en quemaduras en la piel, dependiendo su gravedad de la extensión de la misma. El límite soportable de radiación en el hombre va desde 4 a 5 kW/m².

La distancia mínima de seguridad para que el hombre se proteja de la radiación, viene dada por las siguientes fórmulas:

$$l = 65 m^{0,333}$$

Para masas superiores a 10.000 Kg y menores a 50.000 Kg se pueden aplicar

$$l_1 = 3,4 m^{0,416}$$

$$l_2 = 2,4 m^{0,416}$$

siendo,

l_1 = la distancia al centro de la bola de fuego para que un hombre reciba quemaduras de 1^{er} grado.

l_2 = la distancia al centro de la bola de fuego para que un hombre reciba quemaduras de 3^{er} grado.

$$l = 65 m^{0,333}$$

4.2.10.- Incendio en las cámaras de máquinas y/o de calderas.

Para el caso en estudio se están considerando dos calderas, una principal de tubos de agua y otra auxiliar fumitubular, éstas van instaladas en los buques en los espacios denominados cámara de máquinas y cámara de calderas, en la cual se encuentran todos los equipos y maquinaria necesarios para la propulsión y funcionamiento del buque.

Las calderas o generadores de vapor son de por sí equipos que al trabajar con presiones y temperaturas elevadas, además de con combustibles líquidos y gaseosos, llevan implícitos un riesgo latente de incendio.

Este riesgo latente de incendio se ve incrementado, al estar las calderas rodeadas de tanques de combustible y de lubricantes, que caso de producirse accidentalmente la rotura de las conducciones de éstos fluidos y esparcirse como consecuencia de la presión a la que se encontraban, por toda la cámara de máquinas, y al entrar en contacto con las fuentes de ignición existentes en las cámaras de máquinas (conductos calientes de gases de escape, chispas de contactos eléctricos, operaciones de soldaduras, etc.) en un ambiente rico de oxígeno, éste entra en rápida combustión produciéndose un incendio en el que su magnitud dependerá de la cantidad de combustible derramado, de las partes

combustibles que el incendio inicial haya alcanzado y de la rapidez con que éste es detectado y sofocado con los medios de abordo.

En la tabla 3, se tienen las estadísticas de IMO correspondientes a los incendios y explosiones producidos en las salas de máquinas de buques petroleros, quimiqueros y de gases licuados -flota mundial-, los cuales llevan todos en su instalación calderas o generadores de vapor -no significando esto que éstas sean el origen del incendio- , desde el año 1974 al 1988 incluido, en la que se observa que en el período que va desde el año 1974 al 1982 la media de incendios en sala de máquinas es de 11, para un número total de 3306 buques, en el período restante hasta 1988, esta media se ve reducida a 5 incendios, para una flota reducida de 2770 unidades.

Las estadísticas anteriores también se pueden hacer para el mismo período, pero ordenados por tipo de buque y tamaño del mismo en toneladas de registro bruto, en las que se harían las mismas consideraciones que en la tabla 3.

Todas las zonas del buque que impliquen un riesgo de incendio, están dotadas - por cumplimiento del Convenio Internacional Sobre la Vida Humana en el Mar -, de los equipos necesarios para sofocar cualquier tipo de incendio que se pueda

producir, no obstante y en función a las estadísticas anteriores se puede comprobar que aun con estas medidas se pueden producir el incendio en las cámaras de máquinas por causas muy diversas.

Ya que el incendio en las cámaras de máquinas se puede producir y que puede ser total o parcial en la misma (dependiendo de la magnitud de éste), se considera el caso de un incendio total en la cámara de máquinas, el cual envuelve a la caldera o generador de vapor, y se estudia las posibilidades de un BLEVE, como consecuencia de éste.

Considerando un incendio en una cámara de máquinas o en una de calderas (donde se encuentre el generador de vapor), debido a que éste es un espacio reducido, las llamas del incendio cubrirán completamente el generador de vapor, por lo que la transmisión de calor desde las llamas al generador de vapor estará dominada fundamentalmente por la radiación que pasará a la envolvente y a través de ésta al agua y vapor contenido en el generador, éste calor viene dado por la siguiente ecuación:

$$q_{rc} = \frac{\sigma \cdot S_c \cdot t}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} (T_{LLa}^A - T_{ch}^A) \quad (90)$$

éste calor se invierte en aumentar la temperatura de la chapa del forro, de acuerdo con

$$Q_{rc} = \frac{\sigma \cdot S_c \cdot t}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} (T_{LLa}^4 - T_{ch}^4) = C_{ech} \cdot \rho_{ch} \cdot V_{ch} (T_{fch} - T_{ich})$$

y la temperatura máxima que puede alcanzar la chapa del forro viene dado por

$$T_{fch} = \frac{\frac{\sigma \cdot S_c \cdot t}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} (T_{LLa}^4 - T_{ch}^4)}{C_{ech} \cdot \rho_{ch} \cdot V_{ch}} + T_{ich} \quad (92)$$

Este calor pasa por conducción a través del aislamiento de la caldera de acuerdo con

$$Q_{cf} = S_f \cdot t \frac{T_{ch} - T_T}{\sum \frac{e_f}{\lambda_f}} \quad (93)$$

Considerando un régimen permanente de transmisión de calor, éste se transmite por conducción a través del aislamiento, y en la cámara de vapor del colector de la caldera, se invierte en aumentar la temperatura de la chapa del colector y en

sobrecalentar el vapor allí contenido. lo anterior se puede expresar por medio de

$$S_{f_c} \cdot t \frac{T_{f_{ch}} - T_{ch_c}}{\sum \frac{e_{f_c}}{\lambda_{f_c}}} = \rho_c \cdot V_c \cdot C_c (T_{f_c} - T_{i_c}) + \alpha_1 \cdot S_c \cdot t \cdot \Delta T \quad (94)$$

El calor que se transmite al vapor sobrecalentandolo, es de gran importancia, para conocer de una forma aproximada el aumento de la temperatura de la chapa del colector de vapor, y determinar la pérdida de resistencia de éste, por lo que ésta temperatura se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$T_{f_c} = \frac{S_{f_c} \cdot t \frac{T_{f_{ch}} - T_{ch}}{\sum \frac{e_{f_c}}{\lambda_{f_c}}} - \alpha_1 \cdot S_c \cdot t \cdot \Delta T}{\rho_c \cdot V_c \cdot C_c} + T_{i_c} \quad (95)$$

El calor total recibido Q_{TR} por el agua de la caldera, en el caso de calderas de tubos de agua, es igual a

$$Q_{TR} = Q_{cf} + Q_i$$

El calor transmitido por conducción a través del aislamiento

q_{cef} , viene dado por la ecuación (93), y el calor Q_i , es el calor que por radiación pasa al agua en el hogar de la caldera, como consecuencia de la parada instantánea por el fuego, y viene dado por

$$Q_i = \frac{S_e \cdot \sigma (T_r^4 - T_p^4)}{\frac{1}{F_{1-2}} + \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) + \frac{S_e}{S_r} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \quad (96)$$

En el caso de calderas cilíndricas, el calor total recibido por el agua viene dado por

$$Q_R = S_c \cdot t \frac{T_{f_{ch}} - T_T}{\sum \frac{e_f}{\lambda_f}} \quad (97)$$

El calor que recibe el agua (al no existir consumo de vapor como consecuencia del blackout producido por el incendio), se invierte en aumentar su entalpía, debido a ello se produce un aumento de presión, desde la de trabajo hasta la de tarado de las válvulas de seguridad, en que comienza a evacuarse el vapor producido a través de ellas, a partir de la apertura de las válvulas de seguridad, si se sigue comunicando calor al agua, se tiene que

$$Q_{TR} = Q_v + Q_{ev}$$

donde

$$Q_v = h_{12} - h_{11}$$

y

$$Q_{ev} = h_{v2} - h_{v1}$$

Si $Q_{TR} < Q_{ev} + Q_v$, el calor comunicado al agua no es suficiente para aumentar la presión y abrir las válvulas de seguridad.

Si $Q_{TR} = Q_{ev} + Q_v$, el calor suministrado se invierte en aumentar la presión de la caldera hasta la presión de timbre de las válvulas de seguridad, y en producir el vapor que va a ser evacuado a través de ella, manteniéndose la presión de la caldera constante en la presión de timbre.

Si $Q_{TR} > Q_{ev} + Q_v$, el calor suministrado a través del forro, se invierte en producir el vapor que es evacuado por las válvulas de seguridad y, en caso de estar esta última mal diseñada y, ser de pequeño caudal en seguir calentando el agua aumentándole la temperatura y por tanto la presión.

Considerando el último caso, para calcular la presión máxima que se alcanza, se procede por el método de iteración calculando el calor necesario para alcanzar la presión P_2 , y lo igualamos con la siguiente ecuación

$$Q_R = [(h_2 - h_1)] + m_v \cdot r \cdot x \quad (98)$$

El valor del segundo miembro que iguale al primero, corresponderá a la presión P_2 , de la caldera por encima de la presión de timbre.

Conocida la presión máxima que se alcanza en la caldera y la temperatura máxima en la chapa de la cámara de vapor en el colector de vapor, es posible determinar la reducción de la resistencia del mismo de la forma siguiente: para determinar la reducción del límite elástico en función de la temperatura, se tiene

$$\sigma_\theta = (1 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot \theta - 3,5 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 2,2 \cdot 10^{-9} \theta^3) \sigma \quad (99)$$

En el momento en que el nuevo límite elástico sea igual a la carga de proyecto, tendremos la temperatura crítica del material, a partir de la cual se producirá la ruina del colector.

4.2.11.- Casuística de accidentes en las calderas marinas.

4.2.11.1.- Corrosión en calderas: lado agua.

La corrosión de los metales y accesorios que componen la caldera, se origina por la acción química de las sustancias y gases disueltos en el agua.

Las sustancias y gases disueltos en el agua con mayor efecto corrosivo son los siguientes:

-Anhídrido carbónico (CO_2): El anhídrido carbónico disuelto en el agua de calderas, es producido en su mayor parte en el interior de esta. El calor hace que los carbonatos y los bicarbonatos se descompongan dando anhídrido carbónico. La actividad corrosiva del anhídrido carbónico es fundamentalmente en el circuito de vapor saturado y en los conductos de retorno del condensado. La reacción entre el anhídrido carbónico y el hierro da lugar a la formación de bicarbonato ferroso más hidrógeno.

La corrosión que da el anhídrido carbónico es del tipo de cráter o picadura, o una combinación de ambas de picadura y corrosión general.

-Oxígeno (O_2): El oxígeno disuelto en el agua es fundamentalmente procedente del aire. El oxígeno reacciona con todos los metales con los que a su paso entre en contacto.

Al entrar en contacto el acero de la caldera con el agua, después de un pequeño período de funcionamiento, se forma en todas las superficies interiores de la caldera una capa protectora contra la corrosión de óxido de hierro magnético de color negro.

Cuando el agua de calderas es portador de oxígeno, éste reacciona con el óxido de hierro magnético, dando óxido de hierro rojo -óxido férrico-, el cual no es protector, y se produce la corrosión.

-Cloruro sódico (Na O H): El agua de las calderas marinas puede ser contaminada por el agua del mar que posee una elevada concentración de cloruro sódico, que en superficies calientes es altamente corrosivo.

La corrosión interna de las calderas por medio de las sustancias y gases antes mencionados y por otras de menor importancia provoca los siguientes defectos:

1° Disminución del espesor de los tubos como resultado de una corrosión general en una zona determinada del tubo, a lo largo de un período de tiempo, con las siguientes consecuencias:

- a) Al disminuir el espesor del tubo disminuye consiguientemente la resistencia mecánica del mismo, alcanzando mayores temperaturas y aumentando

las posibilidades de rotura del mismo.

- b) Como consecuencia del sobrecalentamiento al que se le somete, éste puede estirarse deformándose y con posterior explosión.

2° Corrosión crateriforme o "pitting". Este tipo de corrosión como su nombre indica se produce en pequeñas zonas con formas de cráteres, y que puede acabar a través de la picadura formando un agujero en el tubo. Los efectos de éste tipo de corrosión son los siguientes:

- a) Es una corrosión de mayor velocidad que la corrosión general.
- b) Cuando la zona afectada es muy grande y próxima, puede producir los mismos efectos que la corrosión general.

En conclusión se puede decir que el efecto de la corrosión de los tubos de las calderas por el lado agua, es una reducción de generalizada del espesor del tubo, produciendo su debilitamiento y calentamiento, ante la acción del fuego y de la presión del líquido, que provocarán una deformación plástica del material

4.2.11.2.- Corrosión en calderas: lado tubo.

La corrosión en la cámara de combustión se debe esencialmente al contacto de las llamas con las superficies metálicas, pero normalmente la corrosión por el lado fuego no es la causa principal de los fallos, que se originan muchas veces debido a la pérdida de propiedades mecánicas por efecto de la temperatura.

Las condiciones existentes en la cámara de combustión imponen una elevada temperatura de servicio a los componentes metálicos, favoreciendo los procesos de oxidación al aumentar la velocidad de difusión en las capas de productos de corrosión. Estos efectos son contrarrestados normalmente por la menor temperatura del agua en el interior de los tubos, pero cuando esta refrigeración es ineficaz pueden tener lugar los fenómenos de corrosión catastrófica.

Las impurezas como el azufre y el vanadio del combustible utilizado en las calderas, dan lugar a la formación de anhídrido sulfuroso SO_2 , que combinado con el agua nos dará ácido sulfúrico en la parte de baja temperatura o zona alta de la caldera -provocando corrosión en ésta zona-incrustaciones de sólidos muy compactos y de estructura muy compleja a base de vanadil/sulfatos/vanadatos en las zonas de alta temperatura, que dificultan la transmisión del calor.

También los hollines adheridos a la superficie de los tubos, como consecuencia de una combustión defectuosa, aíslan a la pared del tubo, causando una disminución de la transmisión de calor.

Otro elemento más que produce erosión en las paredes de los tubos son las partículas sólidas que chocan contra ellas.

4.2.11.3.- Incrustaciones y fangos.

Se ha mencionado anteriormente, que el agua que se utiliza en las calderas marinas, llevan en suspensión sustancias químicas y sólidos, los cuales con la temperatura del agua reaccionan entre ellos dando sales, que posteriormente se incrustarán sobre las paredes de los tubos, o precipitarán con los sólidos disueltos dando los llamados fangos.

Una vez formados ambos los efectos de las incrustaciones y de los fangos son los mismos:

- 1) se comportan como aislantes térmicos, y dificultan el paso de calor desde los gases de la combustión al agua, produciendo una disminución del rendimiento.
 - a) Como consecuencia de este efecto aislante, los depósitos minerales impiden que el agua de la caldera refrigeren los tubos. El metal se sobrecalienta y debilitan produciéndose una deformación plástica con rotura final.
 - c) Cuando se forman grandes cantidades de incrustaciones y fangos , los depósitos disminuyen en gran medida el flujo de agua, taponando el tubo. Con la consiguiente destrucción del mismo por sobrecalentamiento. .
- 2° Los depósitos también pueden producir corrosión en el metal.

4.2.11.4.- Grietas por corrosión en los colectores.

En los colectores de vapor, se pueden producir procesos de corrosión por picaduras, que a menudo, toman la forma de líneas con apariencia de grietas, y que se suelen producir durante el proceso de la limpieza ácida. Las picaduras alineadas, en ocasiones pueden dar lugar a fisuras que como consecuencia de la corrosión tensión ó corrosión fatiga, pasan a ser grietas de tamaño considerable.

También la zona de la unión soldada entre los tubos y el calderín se producen agrietamientos por fatiga que pueden provocar la rotura del colector al igual que las anteriores.

4.2.12.- Cálculo de la energía en TNT desarrollada por una explosión de vapor.

Una expresión para estimar la energía liberada por un gas licuado contenido en un recipiente a presión, que rompa repentinamente cayendo la presión del mismo de forma instantánea hasta la presión atmosférica es

$$m_{TNT} = \frac{0,024 \cdot P \cdot V}{k - 1} \left[1 - \left(\frac{1}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (100)$$

donde m_{TNT} son los kilogramos de TNT equivalente, P (kg/cm^2) es la presión en el interior del recipiente, k la relación de los calores específicos, y para éste caso se estima el peso de vapor licuado que se evaporaría de forma instantánea, y se calcular el volumen de vapor correspondiente a éste peso a la presión del recipiente, y se suma a éste volumen ficticio el volumen de la cámara de vapor, esto último viene dado por la expresión

$$V = V_v + V_L \left(\frac{\bar{L} \cdot \rho_L}{\rho_v} \right) \quad (101)$$

donde V_v , es el volumen de la cámara de vapor, y V_L es el volumen

del líquido en el recipiente (ambos en m^3), ρ_l es la densidad del líquido, y ρ_v es la densidad del vapor saturado, a la presión y temperatura del recipiente, en el momento de la ruptura, f es la fracción flashing que debido a la rápida liberación del líquido almacenado a temperatura superior a la que le corresponde a supresión de vapor a la presión atmosférica se produce una vaporización adiabática de una fracción del líquido. Una expresión que permite el cálculo de la fracción flashing a temperaturas entre la presión de vapor y la temperatura crítica es la siguiente:

$$f = 1 - e^{-2,63 \left(\frac{C}{L}\right) (T_c - T_b) \left(1 - \left[\frac{T_c - T_0}{T_c - T_b}\right]^{0,38}\right)} \quad (102)$$

donde T_c es la temperatura crítica, 0,38 es el calor latente del exponente de Watson, y 2,63 es un coeficiente de integración y es la inversa de $1 - (0,38 + 0,24)$, C es el calor específico medio del líquido en el intervalo de temperatura desde T_0 a T_b , L el calor latente de vaporización en el mismo intervalo, T_0 es la temperatura inicial y T_b la de saturación.

CAPÍTULO IV

NOMENCLATURA

Símbolos:

- A: Coeficiente de la ecuación (40).
- b: Anchura del tanque, m.
- C: Calor específico, kJ/kg K.
- D: Diámetro, m.
- E: Módulo de Young, kg/mm².
- E: Flujo de radiación, kW/m².
- e: Espesor, m.
- F₁₋₂: Factor de forma.
- F: Factor de exposición al fuego.
- g: Aceleración de la gravedad, m/s².
- G: Caudal, m³/s.
- G_r: Número de Grashof.
- H: Altura de la bola de fuego, m.
- h: Altura del tanque, m.
- h: Entalpía, kJ/kg.
- K: Conductancia.
- l: Longitud del tanque, m.
- m: Masa, kg.
- M: Peso molecular, kg/mol.
- P: Presión, Pa.
- P_c: Poder calorífico, kJ/kg.
- P_r: Número de Prandtl.
- q: Calor, kJ.
- S: Superficie, m².
- r: Calor latente, kJ/kg.
- R: Resistencia radiactiva.
- T: Temperatura, K.
- t: Tiempo, s.
- u: Energía interna, kJ/kg.
- v: Volumen específico, m³/kg.
- V: Volumen, m³.
- x: Título del vapor.
- Z: Factor de compresibilidad.

Caracteres griegos:

- α : Coeficiente de transmisión superficial del calor, W/m² K.
- Δ : Incremento.
- ϵ : Emisividad de los cuerpos grises.
- θ : Temperatura, °C.
- ρ : Densidad relativa de la carga.
- ρ : Peso específico, kg/m³.

τ : Límite elástico de la chapa, kg/mm².
 μ : Viscosidad cinemática, kg/s m.
 λ : Conductividad térmica, W/K m.
 σ_m : Esfuerzo primario de la membrana, kg/mm².
 σ_a : Esfuerzo dinámico de la membrana, "
 σ : Constante de Boltzmann, 4,91 kcal/h m² K⁴.

Subíndices:

a: Aislante.
c: Caldera.
ce: Casco exterior.
ch: Chapa.
ci: Casco interior.
f: Final.
i: Inicial.
l: Líquido.
LLa: Llama.
 θ : Temperatura de la chapa, °C.
p: Pared.
P: Permanente.
T: Transitorio.
TNT: Trinítrotolueno.
r: Radiación.
V: Vapor.