

T
660.284
F634
C.3

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TANQUES DE
ALMACENAMIENTO PARA UNA INDUSTRIA DE
PROCESO QUIMICO



TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO EN MECANICA



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
GUAYAQUIL - ECUADOR



BIBLIOTECA



BIBLIOTECA

A MIS PADRES



BIBLIOTECA



BIBLIOTECA

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis corresponden exclusivamente al autor.

(Art. Sexto del reglamento de Exámenes y Titulos Profesionales de la Escuela Superior Politécnica del Litoral)

Jorge Rosendo Flores Herrera



BIBLIOTECA



BIBLIOTECA

El patrimonio intelectual de la tesis
de grado pertenece a la Escuela Super
rior. Politécnica del Litoral.

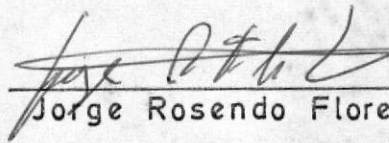


BIBLIOTECA



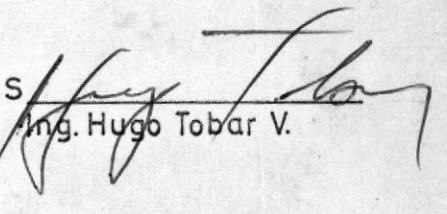
BIBLIOTECA

AUTOR



Jorge Rosendo Flores Herrera

DIRECTOR DE TESIS



Ing. Hugo Tobar V.

PROFESOR

PROFESOR



BIBLIOTECA

INDICE

INTRODUCCION

I LOCALIZACION Y TRANSPORTE

II CONSOLIDACION DEL TERRENO

III PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

IV INTRODUCCION A SISTEMAS CRIOGENICOS

V DISEÑO

VI COSTO

APENDICE

PLANOS

BIBLIOGRAFIA



BIBLIOTECA

INTRODUCCION

En toda industria de proceso químico, plantas de licuefacción de gases, una vez que el producto ha llegado a la etapa final de la elaboración es necesario almacenarlo en naves de presión diseñadas de acuerdo a las condiciones de trabajo del fluido para hacerlas más seguras y confiables.

Una de las variables más importantes que debe considerarse en el diseño de esta clase de sistemas es la temperatura de almacenamiento del fluido que va desde los -260°F (200°R) temperatura de ebullición del metano en una atmósfera de presión hasta los -452°F (8°R) temperatura de ebullición del helio en una atmósfera de presión, pues las propiedades de los materiales de ingeniería cambian de manera significativa cuando son expuestos a las bajas temperaturas. Una de estas propiedades son las transiciones dúctiles-frágiles de los aceros al carbono, que es importante en la selección del material y que no se puede inferir de las mediciones hechas en temperatura ambiente.

Otra consideración igualmente importante es la calidad del aislamiento, el cual debe ser de baja conductibilidad térmica para impedir que el fluido regrese a la condición gaseosa. Este requerimiento ha traído consigo un intenso estudio del aislamiento tanto desde el punto de vista teórico como práctico, pudiendo decirse que ha sido un triunfo de la Tecnología sobre la Termodinámica.

Desde que James Dewar en el año de 1.892 inventó y perfeccionó la botella evacuada que hoy lleva su nombre, el almacenamiento de fluidos criogénicos ha experimentado un enorme progreso como resultado del



uso de estos fluídos en muchas áreas.

Las naves de presión para almacenamiento de gases licuados van desde las pequeñas con capacidades de menos de un galón hasta las enormes que al macenan trescientos mil barriles.

El presente trabajo trata sobre el diseño, de una nave de presión para almacenamiento de gases licuados con una capacidad nominal de 28.000 ga lones, horizontal, cilíndrica y con cabezales esféricos, la cual por medio de técnicas de optimización se ha encontrado que es la configuración más eficiente y además son agradables a la vista.

Siguiendo estos pasos se puede aplicar este procedimiento de diseño y construcción a naves de presión con otras capacidades que demuestren ser - las recomendables en un caso particular.

Estas naves de presión encontrarán aplicación en las plantas de licue facció n de gases y en los sitios donde estos fluídos sean usados tales como las acerías, fábricas de abonos nitrogenados, refinerías de petróleo, cen-- trales eléctricas y otras industrias que se están instalando ya en el Ecuador.



I.- LOCALIZACION Y TRANSPORTE

Los avances tecnológicos en las distintas áreas donde los gases licuados son usados, han puesto a disposición del ingeniero de sistemas criogénicos numerosas técnicas para el aislamiento y transporte de los mismos, pero, la misma naturaleza de los flúidos en lo que se refiere a sus propiedades termodinámicas tales como sus bajos puntos de ebullición y calores latentes de evaporación, han hecho que estos productos sean almacenados lo más cerca posible tanto de los sitios de producción como los de consumo, para así poder entregar el flúido sin muchas pérdidas por evaporación, debiéndose observar las regulaciones que sobre esta materia dicten los organismos gubernamentales.

Además, la rápida extensión del uso y aplicación de estos sistemas en la vida diaria, está haciendo que su distribución se desarrolle y alcance ca racterísticas similares a la de los combustibles que actualmente son distribuídos por estaciones de servicio.

A.- TRANSPORTE DE GASES LICUADOS.-

Durante esta última década, el consumo de gases licuados ha sido acelerado por el aumento de las necesidades de estos flúidos en distintas aplicaciones, lo cual ha traído consigo un análisis minucioso de los métodos de transporte que a continuación se detallan.

1.- Transporte por camión.-

Es la forma más común de entregar los gases licuados y se lo hace en naves de presión adecuadamente diseñadas, colocadas sobre remolques llevados por camiones.



2.- Transporte por tren.-

Es igualmente simple, y se lo hace en naves de presión semejantes a las usadas para transportar por camiones, con la diferencia de que éstas van colocadas sobre vagones.

3.- Transporte por barcazas.-

Es análogo a los anteriores en lo que se refiere al sistema de almacenamiento del producto, sólo que en un viaje puede transportar una mayor cantidad que por los métodos anteriores y aún puede servir de almacenamiento temporal en estos fluídos sin incurrir en muchas pérdidas por evaporación.

4.- Transporte por buques.-

Este sistema se desarrolló debido a la necesidad de transportar metano líquido, desde los sitios de producción a los de consumo, en razón de las grandes distancias existentes entre ellos. Ejemplo de estos sistemas es el que existe entre Argel y Londres, desde donde el fluído es entregado en estado líquido y transportado por los buques "Methane Princess" o "Methane Progress" en tanques diseñados de acuerdo a la estructura y tamaño del buque.

5.- Transporte por tuberías.-

En esta clase de transporte no se ha desarrollado todavía un sistema óptimo para transferir el fluído en estado líquido sobre grandes distancias, pero sí se lo puede hacer en líneas de poca longitud empleando altas razones de flujo para así poder disminuir el tiempo de transferencia y por lo tanto las pérdidas por evaporación.

B.- CONCLUSION.-

Por todas estas consideraciones debe concluirse que los fluídos criogé



nicos deben almacenarse en sitios cercanos al productor y al consumidor y -
próximo a las vías de comunicación.

Por esta razón los economistas e ingenieros deben estar ampliamente fa
miliarizados con los medios competitivos de distribución para así desarrollar
un sistema óptimo de transporte y de localización.

En el Apéndice se mostrará la localización de estos sistemas aplicados
a la ciudad de Guayaquil.

II.- CONSOLIDACION DEL TERRENO

En el diseño de naves de presión horizontales, cilíndricas y con cabezas esféricas para resistir presiones internas, debe considerarse el diseño de la fundación, que se define como el miembro que provee apoyo para la estructura y sus cargas e incluye el suelo de la corteza terrestre o cualquier parte especial de la estructura que sirve para transmitir las cargas al suelo.

A.- REQUERIMIENTOS DE UNA FUNDACION.-

Al igual que otras partes de la estructura una fundación debe llenar ciertos requerimientos, que están basados en las necesidades de la estructura soportada debido a que la fundación y la superestructura forman una parte integral. Estos requerimientos son: La estructura de la fundación deberá ser apropiadamente localizada para evitar cualquier influencia objeccionable que pueda afectar su desempeño.

La fundación no deberá asentarse o deflexionarse de una forma tal que acorte la vida útil de la misma.

La fundación deberá ser estable y libre de fallas.

B.- DISEÑO DE LA FUNDACION .-

El diseño de la fundación consiste en determinar el tamaño, forma y detalles estructurales que están de acuerdo con los requerimientos anteriores, aunque también debe tomarse en cuenta el tiempo requerido en construirla, el espacio disponible y los materiales.

De acuerdo a estas consideraciones, el sistema deberá ser soportado por una base de concreto reforzada, debiendo excavar el suelo bajo la base has



ta una profundidad tal que la tierra removida soporte la estructura del sistema sin excesiva diferencia de asentamiento, y el relleno deberá ser chequeado y cuidadosamente compactado para obtener una consolidación apropiada.

III.- PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

Los peligros asociados con los sistemas de almacenamiento de gases licuados deben ser comprendidos para así poder evitarlos. Tales peligros pueden ser convenientemente arreglados en cuatro categorías, cada una de las cuales es tratada y controlada con una tecnología especial:

Peligro debido a inflamabilidad.

Peligro debido a gases a alta presión.

Peligro debido a materiales de construcción.

Peligro debido a fallas personales.

A.- PELIGRO DEBIDO A INFLAMABILIDAD.-

Tres condiciones deben llenarse simultáneamente para producir una combustión, en cualquier parte del sistema debe haber un combustible, un oxidante y un medio de ignición. Este fenómeno y un conocimiento de las propiedades físico-químicas del fluido proveerá al ingeniero de las herramientas técnicas necesarias para establecer precauciones de seguridad.

Es obvio que cuando un combustible es manejado, la contaminación con los oxidantes debe ser evitada para mantener todos los puntos del sistema en concentraciones arriba del límite superior de la inflamabilidad, similarmente cuando un oxidante es manejado los combustibles contaminantes deben ser evitados para que el sistema no sea rico en combustión de una forma que corresponda al límite inferior de inflamabilidad.

Todas estas consideraciones deben ser dirigidas hacia el personal que maneja estos sistemas para que evite la mezcla de combustibles con oxidantes.



Las operaciones de purgado deben ser cuidadosamente diseñadas y programadas para que sean completamente efectivas.

La ventilación, tanto para condiciones normales como anormales; rupturas de líneas como descarga de gases a través de dispositivos de seguridad deben ser cuidadosamente chequeadas.

La limpieza e inspección del equipo deberá hacerse periódicamente.

B.- PELIGRO DEBIDO A GASES A ALTA PRESION.-

Los gases a alta presión son potencialmente peligrosos en razón de la gran energía almacenada y pueden ser obtenidos por compresión, por bombeo de gases licuados a alta presión por la consiguiente evaporación y por el almacenamiento de fluidos criogénicos con la consiguiente evaporación.

Muchos materiales que son procesados como fluidos criogénicos no pueden existir como líquidos en temperatura ambiente, por lo tanto el almacenamiento de tales líquidos mientras están en bajas temperaturas seguido por calentamiento a temperatura ambiente genera altas presiones que son peligrosas si éstas van más allá de la presión de diseño de las naves de presión y líneas de transferencia. Por lo tanto debe ejercerse un cuidado especial en la transferencia de gases licuados para evitar el atrapamiento del líquido en las líneas y en el caso de que no se pueda evitar colocar dispositivos de seguridad.

C.- PELIGRO DEBIDO A MATERIALES DE CONSTRUCCION .-

La ductilidad de materiales de construcción es de especial importancia cuando bajas temperaturas son alcanzadas, ya que algunos materiales llegan a ser frágiles y por lo tanto se hace necesario que el Ingeniero diseñador de

esta clase de sistemas conozca las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de los materiales para desarrollar sistemas de almacenamientos eficientes y seguros.

D.- PELIGRO DEBIDO A FALLAS PERSONALES.-

Los accidentes durante un proceso pueden crear condiciones de peligro al personal que se encuentra operando cerca del área afectada, por lo tanto es responsabilidad de los ingenieros aislar las áreas del equipo y proteger las áreas en las que el personal opera. Deberá procurarse diseñar caminos de fácil movimiento para cuando se presente un peligro descongestionar de personal el área afectada en la forma más rápida.

Deberá usarse la ropa apropiada a las condiciones de trabajo y su uso deberá ser comprendido y requerido.

E.- CODIGOS.-

Deberán seguirse las regulaciones que sobre esta materia dicten los organismos gubernamentales, pero no existiendo éstos, podrán seguirse aquellos que en otros países han resultado eficientes. Tales como:

Código ASME para el diseño de naves de presión.

Código NFPA para la protección contra el fuego.

Normas USASI para la selección de materiales.

Los códigos anteriormente nombrados son ampliamente aceptados en los Estados Unidos, tanto entre manufacturadores como aquellos que emplean naves de presión, por los amplios márgenes de seguridad y protección que ofrecen.



IV.- INTRODUCCION A SISTEMAS CRIOGENICOS

La Ingeniería Criogénica está concernida con el estudio de las bajas - temperaturas e involucra el diseño y desarrollo de sistemas y componentes que producen, mantienen y utilizan bajas temperaturas.

El Buró Nacional de Normas en Boulder, Colorado considera que la Ingeniería Criogénica abarca temperaturas tan bajas como -240°F .

Otra división igualmente aceptable es asignar a la Ingeniería Criogénica la región de temperaturas alcanzadas por la licuefacción de los gases cuyas temperaturas críticas están bajo las temperaturas terrestres. A continuación se mostrará la posición y rango de las temperaturas de ebullición de los gases criogénicos comparándola con la de los refrigerantes comunes.

Refrigerante 11	$74,7^{\circ}\text{F}$
Refrigerante 21	$48,0^{\circ}\text{F}$
Refrigerante 12	$-21,6^{\circ}\text{F}$
Amoníaco	$-28,0^{\circ}\text{F}$
Dióxido de carbono	$-109,3^{\circ}\text{F}$
Refrigerante 13	$-114,5^{\circ}\text{F}$
Metano	$-260,0^{\circ}\text{F}$
Xenón	$-261,0^{\circ}\text{F}$
Oxígeno	$-297,0^{\circ}\text{F}$
Argón	$-303,0^{\circ}\text{F}$
Nitrógeno	$-321,0^{\circ}\text{F}$
Neón	$-411,0^{\circ}\text{F}$
Hidrógeno	$-434,0^{\circ}\text{F}$



A.- DESARROLLO HISTORICO .-

El estudio de las bajas temperaturas comenzó en el siglo XIX con los trabajos del físico británico Michael Faraday, sobre la licuefacción de gases, Faraday sin embargo no tuvo éxito en licuar los "gases permanentes" tales como el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, los cuales fueron licuados más tarde por Cailletet y Pictet en 1.877, Wroblewski y Olzewsky en 1.884 y por James Dewar en 1.895.

En Europa por el año de 1.899 el francés George Claude desarrolló una máquina de expansión. En Alemania Carl Von Linde desarrolló el proceso de licuefacción de doble columna.

A comienzos del siglo XX Heike Kamerling A Onnes estableció un laboratorio de Física en la Universidad de Leiden, en donde después de grandes esfuerzos logró licuar el helio, si actualmente se empleara el método de Onnes para obtener un litro de gas licuado, costaría alrededor de \$65.000.00 (Sesenta y cinco mil dólares) el litro.

Unos años más tarde mientras experimentaba con un alambre de mercurio que se encontraba sumergido en un baño de helio líquido, observó que la resistencia del alambre descendió repentinamente a cero, este descubrimiento -- abrió un campo enteramente nuevo en el proceso de la conducción eléctrica y se le dió el nombre de Superconductividad.

En 1.926 el Dr. Robert H. Goddar consiguió el primer ascenso de un cohete impulsado por fluidos criogénicos.

En este mismo año Giauque desarrolló un ciclo de refrigeración usando

la desmagnetización adiabática y fué en el año de 1.933 en que este principio fué demostrado experimentalmente llegando a obtener temperaturas tan bajas como $0,01^{\circ}\text{K}$.

La Segunda Guerra Mundial y los avances tecnológicos que ella trae consigo involucra a la criogénica y es así que bajo la dirección del Dr. Walter Dornberger la bomba V-2 es exitosamente probada en Peenemunde.

Después de la Segunda Guerra Mundial el avance más espectacular en este campo fué el desarrollo de un equipo para licuar helio en forma segura y económica por el Dr. Samuel Collins, profesor de Ingeniería Mecánica en el Instituto Tecnológico de Massachusetts.

En Estados Unidos se crean los Laboratorios de Ingeniería Criogénica, adscritos al Buró Nacional de Normas, los cuales proveerán datos sobre las propiedades de los materiales en bajas temperaturas y producirá hidrógeno líquido para la Comisión de Energía Atómica.

A partir de 1.957, los lanzamientos de los cohetes que ponen en órbita los satélites artificiales Sputnik y Explorer, nos hablan a las claras del uso de fluidos criogénicos en esta área.

El progreso actual de este campo se debe exclusivamente:

- 1) Métodos económicos para la producción de gases licuados;
- 2) Materiales y accesorios adecuados para la construcción de sistemas criogénicos;
- 3) Aislamiento apropiado; y
- 4) Ingeniosos métodos de almacenamiento y transporte de cantidades comerciales de estos líquidos.

B.- CAMPO DE APLICACION.-

La Ingeniería Criogénica ha traído consigo una industria importante que involucra a cientos de fabricantes de sistemas de energía y es así como cada mes sale del Laboratorio de investigación y desarrollo un producto a la división de ventas de la compañía. Y alrededor del mundo innumerables científicos están investigando técnicas nuevas que prometen dejar el laboratorio y ser de gran utilidad comercial en un futuro no lejano.

1.- Sistemas de propulsión.-

Los grandes lanzamientos de cohetes de los países que van a la vanguardia de la tecnología espacial se ha conseguido por el uso de oxígeno líquido como oxidante y aún en sistemas de propulsión nuclear se empleará el hidrógeno como propelante debido al alto impulso específico que comunica al cohete.

2.- Estudios de Física de alta energía.-

Las cámaras de burbuja de hidrógeno usan este elemento en estado líquido para la detección y estudio de partículas de alta energía producida por los aceleradores.

3.- Aplicaciones de energía nuclear.-

El hielo pesado es usado como moderador de neutrones a la temperatura de 36°R en razón de que a esta temperatura disminuye la velocidad de los neutrones. Además las temperaturas criogénicas son usadas para estudiar el efecto de bombardeo de neutrones sobre estructuras metálicas en razón de que estos efectos se conservan y por lo tanto facilitan el estudio y el análisis.

4.- Electrónica.-

El rápido desarrollo del MASER y el LASER en distintos campos de la

Electrónica se debe exclusivamente al uso de las bajas temperaturas. Además, las bajas temperaturas reducen el ruido en amplificadores de bajo nivel ya que éste depende de la temperatura de operación del sistema.

Un nuevo elemento básico en computadores de alta velocidad es un mecanismo superconductor llamado criotron, el cual puede ser usado como elemento lógico, rectificador, memoria y comparación.

5.- Diseño mecánico.-

Empleando el efecto Meissner que está asociado con la superconductividad se han desarrollado asientos de fricción nula, debido a que las partes usan un campo magnético como lubricante en vez de aceite o aire.

6.- Cámaras de simulación espacial.-

Con el objeto de obtener un vacío igual al que existe en el espacio exterior se han empleado técnicas criogénicas para conseguirlo.

7.- Aplicaciones biológicas.-

Las técnicas de las bajas temperaturas se han puesto a la disposición del personal médico para la preservación de sangre, plasma y cultivos. Además, se la ha empleado en cirugía para la cura de la enfermedad de Parkinson.

8.- Manejo de alimentos.-

En esta aplicación el nitrógeno líquido está usándose en las industrias de alimentos para preservarlos durante su transporte ya que siendo este gas un material inerte les conserva el sabor y aroma.

9.- Procesos de manufactura.-

Las acerías usan el oxígeno en el proceso de hogar abierto y en un proceso que sirve para remover los defectos del acero antes del rolado. Se esti

ma que el consumo de oxígeno para el año de 1.970 por cada tonelada producida será de 1.500 pies cúbicos. Además, el oxígeno es usado en los procesos de soldadura y corte de metales.

Las plantas de abono usan el nitrógeno líquido para producir amoníaco.

10.- Transporte de gases licuados.-

El transporte de gas natural licuado ha llegado a ser una realidad comercial, pues actualmente alrededor de 200 tanqueros refrigerados lo están transportando alrededor del mundo.



V.- PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE INGENIERIA

Es importante que en el diseño de un sistema el ingeniero conozca ampliamente el comportamiento de los materiales en el rango de temperatura en que van a trabajar los componentes del mismo, ya que las propiedades de los materiales cambian de manera significativa bajo la influencia del frío, así como también del intenso calor.

Estos efectos que aparecen en las bajas temperaturas y que no se pueden inferir de mediciones hechas en temperatura ambiente son: El descenso de los calores específicos, la superconductividad y las transiciones dúctiles-frágiles de los aceros al carbono.

A.- PROPIEDADES MECANICAS.-

1.- Esfuerzo de Fluencia y Esfuerzo de Ruptura.-

Para muchos materiales hay un punto en la curva esfuerzo-deformación en que la deformación empieza a crecer muy rápidamente sin el correspondiente incremento en esfuerzo, este punto se llama esfuerzo de fluencia. Sin embargo existen materiales en los que no hay un cambio repentino de pendiente en el diagrama esfuerzo-deformación por lo que se especifica que el esfuerzo de fluencia es el esfuerzo requerido para deformar el material el 0,2%.

El esfuerzo de ruptura de un material es el máximo esfuerzo que se alcanza en el diagrama esfuerzo-deformación.

La variación del esfuerzo de fluencia y de ruptura con la temperatura se muestra en el Apéndice.

Muchos materiales de ingeniería son aleaciones con átomos de diferen-

te tamaño de aquellos que conforman el material básico, por ejemplo: carbón se añade al hierro para producir acero. Si los átomos del elemento secundario de la aleación son más pequeños que los del material básico, éstos tienden a aglomerarse alrededor de las dislocaciones del metal. La presencia de los átomos pequeños alrededor de las dislocaciones tienden a bloquearlas haciendo por lo tanto muy difícil el movimiento de las mismas.

Desde un punto de vista microscópico la fluencia toma lugar cuando un esfuerzo muy grande mueve las dislocaciones de su atmósfera, y a medida que la temperatura disminuye, los átomos del material vibran menos a causa del de crecimiento en agitación térmica, lo que hace que sea necesario aplicar un esfuerzo más alto para que la fluencia tome lugar.

2.- Resistencia a la Fatiga.-

Existen diferentes maneras de expresar la resistencia de un material a esfuerzos que varían con el tiempo, pero la prueba de fatiga más común es aquella en que el material de prueba es sometido a cargas de flexión reversibles. Y se define como el esfuerzo en que ocurre la falla después de un número determinado de ciclos. Pero algunos materiales tienen la propiedad de que la falla por fatiga no ocurre si el esfuerzo es mantenido bajo un valor de terminado, llamado límite de endurancia. La variación del límite de endurancia con las bajas temperaturas se muestra en el Apéndice.

3.- Resistencia al Impacto.-

Las pruebas de Charpy e Izod miden la resistencia de un material a las cargas de impacto, e indican la energía absorbida por un material cuando es fracturado por una carga repentinamente aplicada. La variación de la resistencia al impacto con las bajas-temperaturas se muestra en el Apéndice.



El comportamiento al impacto de un material está determinado por su estructura cristalina. Los metales que tienen estructura cúbica centrada son frágiles en bajas temperaturas mientras que los que tienen estructura cúbica de caras centradas retienen su resistencia al impacto al disminuir la temperatura.

La mayoría de los plásticos y derivados del caucho son frágiles en bajas temperaturas. Dos notables excepciones son el Teflón y Kel-F que retienen sus propiedades útiles sobre un amplio rango de temperatura con la ventaja de que son químicamente inertes.

4.- Ductibilidad y Dureza .-

La resistencia de la mayoría de los sólidos aumenta a medida que éstos son expuestos a las bajas temperaturas sean éstos metálicos o no, la resistencia puede ser cinco veces más grande en temperaturas criogénicas que en temperatura ambiente. Pero la resistencia es sólo una de las propiedades que hacen un material aceptable, la ductibilidad, esto es, la habilidad de no llegar a ser frágil es extremadamente importante y también está relacionada con la estructura cristalina de igual manera que la resistencia al impacto.

La ductibilidad se mide por el porcentaje de alargamiento o el porcentaje de reducción en el área transversal que aparece en el material en la rotura. La línea divisoria normal entre ductibilidad y fragilidad es el alargamiento del 5%. Un material que tenga menos del 5% de alargamiento se llama frágil, mientras que otro que tenga más se le llama dúctil. En el Apéndice se muestra la variación del porcentaje de alargamiento con las bajas temperaturas.

Generalmente, cuando ha de seleccionarse un material para resistir el

desgaste, la erosión o la deformación plástica, la propiedad más importante es la dureza que se mide por la resistencia a la penetración local o al rayado. Entre las pruebas de dureza más comunes tenemos la prueba de dureza Brinell, Rockwell y Vickers.

En general, la dureza de un material es directamente proporcional al es fuerzo de ruptura del material; por lo tanto la dureza aumentará al disminuir la temperatura.

5.- Módulos Elásticos.-

Las constantes elásticas más usadas en Ingeniería son: Módulo de Young, la razón de cambio del esfuerzo con respecto a la deformación en la región elástica cuando la temperatura se mantiene constante, Módulo de Corte, La razón de cambio del esfuerzo cortante con respecto a la deformación cortante en la región elástica cuando la temperatura se mantiene constante y Módulo de Elasticidad Volumétrico, la razón de cambio de la presión con respecto a la deformación volumétrica en la región elástica cuando la temperatura se mantiene constante. Si el material es isotrópico, estas tres constantes elásticas están relacionadas por medio de la razón de Poisson, mediante las siguientes expresiones:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \qquad B = \frac{E}{3(1-2\mu)}$$

A medida que la temperatura disminuye las fuerzas atómicas e intermoleculares tienden a aumentar debido al decrecimiento de las vibraciones atómicas y moleculares, por esta razón es de esperarse que las constantes elásticas aumenten con la disminución de la temperatura. La variación del Mó



dulo de Young con las bajas temperaturas se muestra en el Apéndice.

B.- PROPIEDADES TERMICAS.-

1.- Conductividad Térmica.-

La conductividad Térmica de un material se define como el régimen de transferencia de calor por unidad de área dividido para el gradiente de temperatura que produce la transferencia de calor. La variación de la conductividad térmica con las bajas temperaturas se muestra en el Apéndice.

Para comprender la variación de la conductividad térmica con las bajas temperaturas deben conocerse los diferentes modos en que la energía es transportada a través de los materiales: Movimiento electrónico como en conductores metálicos; Movimiento fonón como en todos los sólidos y Movimiento molecular como en sólidos orgánicos y gases.

De la Teoría Cinética de los Gases se obtiene una expresión teórica que relaciona la conductividad térmica con otras propiedades del material mediante la expresión:

$$K = \frac{1}{3} \rho c_v \bar{v} \lambda = c_v \mu$$

Esta ecuación puede aplicarse no sólo a la conducción térmica en gases sino también a la transferencia de calor por movimiento electrónico y movimiento fonón.

El calor específico electrónico es directamente proporcional a la temperatura absoluta y el esparcimiento molecular es inversamente proporcional a la temperatura. La densidad y la velocidad molecular media son funciones débiles de la temperatura, por esta razón es de esperarse que la conductividad térmica

cá sea constante como lo predice la ecuación anterior.

Pero, a medida que la temperatura disminuye, la contribución fonón al transporte de energía es sumamente significativo y en estas condiciones la conductividad térmica es proporcional a T^{-2} . Como en el cero absoluto de temperatura el calor específico es nulo, de la ecuación anterior se desprende que la conductividad térmica también tiende a cero.

2.- Calor específico.-

El calor específico de una sustancia se define como la energía requerida para cambiar la temperatura de una sustancia un grado, mientras la presión se mantiene constante (C_p) o mientras el volúmen se mantiene constante (C_v). Para sólidos y líquidos en bajas presiones la diferencia entre los dos calores específicos es pequeña, mientras que para los gases existe una considerable diferencia.

El calor específico es una propiedad física que puede ser predecida exactamente por medio de modelos matemáticos usando Mecánica Estadística y Teoría Cuántica. Para sólidos el modelo de Debye da una representación satisfactoria de la variación del calor específico con la temperatura. En este modelo Debye asume que el sólido puede ser tratado como un medio continuo excepto que el número de ondas vibracionales representando la energía interna debe ser limitado al número de grados de libertad vibracional del átomo. La expresión del calor específico según la Teoría de Debye es:

$$C_v = 9R \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x dx}{(e^x - 1)^2} = 3R \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 D \left(\frac{T}{\theta_D} \right)$$

En el Apéndice se muestra la variación del calor específico en función de la Teoría de Debye.

3.- Coeficiente de Expansión Térmico.-

El coeficiente de expansión térmico volumétrico se define como el cambio fraccional en volumen por unidad de cambio de temperatura mientras la presión sobre el material se mantiene constante. El coeficiente de expansión térmico lineal se define como el cambio fraccional en longitud por unidad de cambio de temperatura mientras el esfuerzo sobre el material se mantiene constante.

La variación del coeficiente de expansión térmico con la temperatura puede explicarse mediante la consideración de las fuerzas intermoleculares de un material. A medida que la molécula adquiere energía, la posición media relativa a otras moléculas es más grande y por lo tanto el material se expande.

En vista que el calor específico, el módulo de elasticidad volumétrico y el coeficiente de expansión térmico están asociados con la energía intermolecular, es de esperarse que exista una relación entre ellos. La relación que expresa esta interdependencia es la constante de Gruneisen

$$\beta = \frac{G C_V \rho}{B} \quad G = - \frac{V}{\Theta_D} \frac{d\Theta_D}{dV}$$

que es independiente de la temperatura y está relacionada con la temperatura característica de Debye.

4.- Emisividad.-

La emisividad de un material se define como la razón de la energía emitida por un material a la energía que emitiría un radiador perfecto a la misma temperatura absoluta. La emisividad monocromática es la emisividad para una longi

tud de onda particular de radiación emitida.

Se ha encontrado aplicando la Teoría Electromagnética y la Teoría Cuántica que la emisividad para materiales que son conductores es directamente proporcional a la temperatura absoluta.

C.- PROPIEDADES ELECTRICAS Y MAGNETICAS .-

1.- Conductividad Eléctrica.-

La conductividad eléctrica de un material se define como la corriente eléctrica por unidad de área transversal dividido por la gradiente de voltaje en la dirección del flujo de la corriente. La resistividad es la recíproca de la conductividad eléctrica.

La variación de la resistividad con las bajas temperaturas se muestra en el Apéndice.

Cuando un campo eléctrico externo es aplicado a un conductor eléctrico, los electrones libres del mismo tienden a moverse en la dirección del campo aplicado. Este movimiento es retardado por los iones positivos del metal y por las impurezas presentes en el material. Disminuyendo la temperatura del conductor disminuye la energía vibracional de los iones, que hace disminuir la interferencia con el movimiento electrónico; por lo tanto la conductividad eléctrica aumenta al bajar la temperatura.

2.- Superconductividad .-

Una de las propiedades que aparecen en ciertos elementos en muy bajas temperaturas es la superconductividad, que es la simultánea desaparición de la resistencia eléctrica y la aparición de un perfecto diamagnetismo.

En ausencia de un campo magnético muchos elementos, aleaciones y com

puestos son superconductores en una temperatura bien definida, llamada Temperatura de Transición. La superconductividad se puede destruir aumentando el campo magnético alrededor del material. El campo magnético que se requiere para destruir la superconductividad se llama campo de entrada. En el Apéndice se muestra un gráfico de la variación del campo magnético de entrada con la temperatura.

C.- PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS CRIOGENICOS .-

1.- Nitrógeno.-

El nitrógeno líquido es un fluido claro, sin color parecido al agua, a una atmósfera de presión el nitrógeno líquido hierve a $139,2^{\circ}\text{R}$ y se congela a $113,8^{\circ}\text{R}$ y tiene una densidad de $50,6 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$ en comparación con el agua - que tiene una densidad de $62,3 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$.

El nitrógeno con un número atómico de 14 tiene dos isotopos estables con números de masa de 14 y 15, cuya abundancia relativa está en la razón 10.000:38

Es el primer componente del aire en el que se encuentra al 78,08% por peso o 75,45% por volumen razón por la cual las plantas de licuefacción lo producen comercialmente de la destilación del aire líquido.

2.- Oxígeno.-

Es el segundo componente del aire en el que se encuentra al 23,2% por peso o al 21% por volumen. A una atmósfera de presión se licua a $162,7^{\circ}\text{R}$ y se solidifica a $95,2^{\circ}\text{R}$.

El oxígeno con un número atómico de 16 tiene tres isotopos estables con números de masa de 16, 17 y 18 cuya abundancia relativa es de 10.000:4:20 - respectivamente.



Este elemento en estado líquido tiene una coloración azul, la cual es probablemente causada por la presencia del oxígeno polimérico O_4 .

Es además un fluido altamente paramagnético, propiedad que es aplicada en instrumentos que sirven para detectar trazas de oxígeno en otros gases y en ambientes artificiales.

Siendo extremadamente reactivo su procesamiento, almacenamiento y transferencia debe hacerse con extrema seguridad.

3.- Argón.-

Es un fluido inodoro e incoloro con propiedades similares a las del nitrógeno líquido.

A una atmósfera de presión se licua a $157,4^{\circ}R$ y se solidifica a $151,3^{\circ}R$. Este elemento posee tres isotopos estables con números de masa de 36, 38 y 40 cuya abundancia relativa es de 338:63:100.000 respectivamente. Es el tercer componente del aire en el que se encuentra al 1.25% por peso o al 0,934% por volumen y se lo produce comercialmente en una planta de destilación de aire con sólo añadir algunas placas de extracción a la columna de separación.

4.- Neón

Este gas fue obtenido por Ramsay y Travers en el fraccionamiento del aire líquido en el que se encuentra a razón de 1 a 80.000 partes de aire.

Es un líquido inodoro e incoloro, a una atmósfera de presión se licua a $59,3^{\circ}R$ y se solidifica a $44,6^{\circ}R$ poseyendo en estas condiciones un alto calor latente de evaporación por unidad de volumen, propiedad que lo ubica como un refrigerante excepcional pues es 40 veces más efectivo que el helio y $3\frac{1}{2}$ veces más efectivo que el hidrógeno y a diferencia de este último elemento es

inerte y seguro y su temperatura puede ser precisamente controlada con solo variar la presión.

5.- Kriptón.-

Este gas atmosférico fue descubierto por Ramsay y Travers en 1.898 encontrándose presente a razón de 1 a 2'000.000 partes de aire.

Es un líquido inodoro e incoloro, a una atmósfera de presión se licua a -216°R y se solidifica a $209,1^{\circ}\text{R}$ siendo aproximadamente cuatro veces más pesado que el neón.

6.- Xenón.-

Este elemento se encuentra en el aire a razón de 1 a 170'000.000 partes de aire y es aproximadamente dos veces más pesado que el kriptón. Es un fluido inodoro e incoloro, a una atmósfera de presión se licua a 297°R y se solidifica a $290,6^{\circ}\text{R}$.

7.- Helio.-

Este elemento que ha sido reconocido como uno de los componentes de la atmósfera solar, previo a su aislamiento en el laboratorio fue descubierto mediante observaciones espectroscópicas. Pero recientemente ha sido identificado como un componente del aire en el que se encuentra a la razón de 1 a 200.000 partes de aire.

Es importante destacar que siendo el helio un gas atmosférico es el único de los gases hasta aquí considerados que no se extrae de la destilación del aire, sino que se obtiene por separación a bajas temperaturas del gas natural, en el que se encuentra en concentraciones tan altas como el 8% por volumen.

Es un fluido inodoro e incoloro, a una atmósfera de presión se licua a --

7,9°R, en estas condiciones no posee punto de solidificación. Se presenta en dos formas isotópicas, el He₄ que es el fluido normal y el He₃ de naturaleza radiactiva.

El helio líquido se presenta en dos fases llamadas Helio I y Helio II, siendo el Helio I la fase normal y el Helio II la fase superfluida.

La curva de transición separando las dos fases se llama línea lambda. El Helio II tiene una conductividad térmica aparente del orden de los 500.000 $\frac{\text{BTU}}{\text{HR PIE}^\circ \text{F}}$ varias veces más alta que la del cobre en temperatura ambiente.

Posee además la asombrosa propiedad de la superfluidez, pues bajo ciertas condiciones fluye sin fricción y más aún vence a la gravedad.

Otro fenómeno que se presenta en esta fase es el segundo sonido que a diferencia del sonido ordinario consiste de ondas u oscilaciones de temperatura más bien que ondas u oscilaciones de presión.

8.- Hidrógeno.-

El hidrógeno con un peso atómico de 1,008 existe en tres formas isotópicas, el hidrógeno de masa atómica uno, el deuterio de masa atómica dos, y el tritio de naturaleza radiactiva de masa atómica tres.

La razón de abundancia de los dos primeros es de 6.400:1.

El hidrógeno líquido es un fluido inodoro e incoloro, a una atmósfera de presión se licua a 37°R y se solidifica a 25,5°R. Es el más liviano de todos los líquidos siendo su densidad aproximadamente 1/4 de la del agua.

Una importante propiedad de este fluido es que existe en dos formas moleculares llamadas orto-hidrógeno y para-hidrógeno. La distinción entre estas dos formas es la rotación relativa de las partículas que conforman la molécula.



9.- Gas Natural.-

El gas natural no es estrictamente un fluido de interés criogénico sino que a diferencia de los otros gases técnicas criogénicas se han empleado en almacenarlo y transportarlo.

El gas natural existe naturalmente en las cercanías de las formaciones geológicas petrolíferas.

El primer constituyente de este gas es el metano que se encuentra en concentraciones que van del 60% al 95% por volumen, lo siguen en orden decreciente de sus porcentajes el etano, propano, butano, hidrocarburos de elevado peso molecular, anhídrido carbónico, helio y nitrógeno.

Es un fluido inodoro e incoloro, a una atmósfera de presión se licua a -200°R y se solidifica a 161°R dependiendo estas temperaturas de la cantidad de las impurezas dominantes.

VI.- DISEÑO.-

En toda Industria de Proceso Químico - Plantas de Licuación de gases- una vez que el producto ha llegado a la etapa final de elaboración es necesario almacenarlo en naves de presión diseñadas de acuerdo a las más altas normas, debido a las propiedades termodinámicas del fluido almacenado en lo que se refiere a sus bajos puntos de ebullición y bajos calores latentes de evaporación.

El diseño de esta clase de sistema ha progresado rápidamente debido a las múltiples aplicaciones que los fluidos criogénicos han encontrado en la industria.

La construcción básica de este tipo de nave de presión consiste en la nave de presión interior que almacena el fluido criogénico rodeada por la nave de presión exterior.

El espacio entre las dos naves de presión se llena con aislamiento y el gas que permanece en este espacio es evacuado a un alto vacío.

El sistema de suspensión por medio de la cual la nave de presión exterior soporta a la nave de presión interior. Las líneas de transferencia y las válvulas de control y regulación.

El panel de control donde están colocados los instrumentos que sensan las diversas variables existentes en el sistema y los dispositivos de seguridad pertinentes para obtener una protección eficaz del mismo.

Las consideraciones iniciales previas al diseño de esta clase de sistemas es la de seleccionar la nave de presión de acuerdo al servicio, capacidad, tamaño y configuración de la misma.

El presente trabajo trata sobre el diseño de una nave de presión estacionaria para almacenar gas natural licuado a 260°F, con una capacidad nominal de 28.000 galones horizontal cilíndrica y con cabezales esféricos.

Mediante técnicas experimentales se ha encontrado que durante una operación de llenado normal, el fluido comienza a escapar por la purga atmosférica cuando el líquido alcanza el 90% del volumen de la nave de presión interior, por esta razón estos sistemas no son diseñados para ser completamente llenados sino que debe dejarse el 10% restante como espacio de vapor, consideración que aumenta la capacidad de la nave de presión a 30.800 galones.

1.- SELECCION DE LOS MATERIALES.-

Los materiales que pueden usarse en la construcción de naves de presión metálicas que operan en las temperaturas del LNG son:

Aleación de aluminio	SB-209	(5083-0)
Aleación de acero 9% níquel	SA-353-B	
Acero inoxidable	SA-240	(304)



Se usará acero inoxidable SA-240 (304) por cuanto este acero puede soldarse fácilmente mediante técnicas empleadas con los aceros al carbono a diferencia de las aleaciones de aluminio que requieren técnicas especiales, además no es necesario someter a las partes soldadas a liberación de esfuerzo como sucede con la aleación de acero 9% níquel.

Otra consideración igualmente importante es que posee una baja conductividad térmica y muestra excelente resistencia al impacto en bajas temperaturas.

La composición metalúrgica del acero inoxidable SA-240 (304) es la siguiente

guiente:

Carbón	0.080 %
Manganeso	2.500 %
Fósforo	0.035 %
Azufre	0.030 %
Silicio	0.850 %
Níquel	8.000 %
Cromo	18.000 %
Aluminio	—
Titanio	—
Molibdeno	—
Cadmio	—

2.- DETERMINACION DEL ESPESOR. -

La nave de presión interior debe soportar la presión de diseño interna las fuerzas de flexión actuando sobre ella como viga y el peso del fluido de la misma.

De acuerdo a esto el espesor se determinará empleando la presión del diseño interna mientras que las fuerzas de flexión y el peso del fluido serán llevadas por los anillos de rigidez.

La nave de presión interior tendrá una presión de diseño interna de 100 lb/pulg^2 , y el diámetro de la misma será de 10 pies.

El espesor se determinará de acuerdo al código "ASME" Sección VIII mediante las relaciones:

Porción cilíndrica:

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6 P} \quad \text{donde} \quad P < 1,25 SE,$$

Porción esférica:

$$t = \frac{PR}{2 SE - 0,2 P} \quad \text{donde} \quad P < 0,665 SE$$

debido a que será totalmente sometida a una inspección radiográfica la eficiencia de las uniones soldadas es del 100%.

Debe poseer este material un esfuerzo de ruptura mínimo de 15.000 - Lb/pulg² un esfuerzo de fluencia mínimo de 30.000 Lb/pulg² y el esfuerzo de diseño es de 18.750 Lb/pulg² entre -20°F a 100°F.

Porción cilíndrica:

$$115 < 1,25 \times 18.750 \times 1$$

$$115 < 23437,5$$

Luego la relación es aplicable

$$t = \frac{115 \times 60}{18.750 \times 1 - 0,6 \times 115} = 0,369''$$

hay que añadirle el 12,5% de tolerancia 0,046''

$$t_c = 0,369'' + 0,046'' = 0,415''$$

$$t_c = 7/16''$$

por lo tanto se emplearán planchas de 7/16''

Porción esférica:

$$115 < 0,665 \times 18.750 \times 1$$

$$115 < 12.468,75$$

Luego la relación es aplicable.



$$t_E = \frac{115 \times 60}{2 \times 18.750 - 0,2 \times 115} = 0,184''$$

hay que añadirle el 12,5 % de tolerancia 0,023''

$$t_E = 0,184'' + 0,023'' = 0,207'' \quad t_E = 1/4''$$

Por lo tanto se usará un cabezal esférico de 1/4''

3.- DETERMINACION DE LOS ANILLOS DE RIGIDEZ -

El diseño de los anillos de rigidez se basa en el hecho de que ellos deben soportar el peso del fluido dentro de la nave de presión interior mediante las relaciones

$$\frac{2 \pi M}{WR} = 0,5 \cos \beta + \beta \sin \beta - (\pi - \theta) \sin \theta + \cos \beta + \cos \theta$$

$$\sin \beta^2$$

Para $0 \leq \phi \leq \theta$

En este caso el ángulo de apoyo $\theta = 80^\circ$

Se usarán 4 anillos de rigidez espaciados 13' para soportar el peso del fluido y de la nave de presión interior.

Previo al diseño de los anillos de rigidez determinaremos la longitud de la nave de presión interior en su porción cilíndrica mediante la relación.

$$V_T = V_c + V_E$$

$$V_T = 30.800 \text{ Gal} = 4117,6 \text{ pie}^3$$

$$V_c = \frac{\pi D^2}{4} L$$

$$V_c = \frac{\pi \times 10^2}{4} \cdot L = 78,3 L \text{ Pie}^3$$

$$V_E = \frac{\pi D^3}{6}$$

$$V_E = \frac{\pi \times 10^3}{6} = 523,5 \text{ Pie}^3$$

$$4117,6 = 78,5L + 523,5$$

$$L = 45.7 \text{ Pie}$$

con este dato se calcula el peso del fluido almacenado dentro de la nave de presión interior.

$$W_F = \gamma_F V_F \quad \gamma_F = 3,52 \text{ Lb/Gal.}$$

$$W_F = 3,52 \times 28000 = 98.560 \text{ Lb.}$$

y el peso de la nave de presión interior

$$W_N = \gamma_S \pi (D + t_c) t_c L + \gamma_S \pi (D + t_E)^2 t_E$$

$$\gamma_S = 0,286 \text{ Lb/pulg}^3$$

$$W_N = 0,286 \times \pi (120 + 0,4375) 0,4375 \times 543,4 + 0,286 \times \pi (120 + 0,25)^2 0,25$$

$$W_N = 29.250 \text{ Lb.}$$

$$W_T = W_F + W_N$$

$$W_T = 98.560 + 29.250 = 127.810 \text{ Lb.}$$

$$W_T = 130.000 \text{ Lb}$$

Como se colocarán 4 anillos de rigidez la carga soportada por cada anillo es:

$$W = \frac{130.000}{4} = 32.500 \text{ Lb}$$

Mediante el gráfico mostrado en el Apéndice, se encuentra que para el ángulo de apoyo de 80° el momento de flexión máximo ocurre en $\theta = 68,5^\circ$

$$\frac{-2 \pi M}{WR} = 0,5 \cos 68,5^\circ + 1,1952 \sin 68,5^\circ - (\pi - 1,3963) \sin 80^\circ + \cos 80 + \cos 68,5^\circ \sin^2 80$$



$$\frac{2 \pi M}{WR} = 0,1098$$

$$M = \frac{0,1098 WR}{2 \pi}$$

$$M = \frac{0,1098 \times 32.500 \times 60}{2 \pi} = 34.095 \text{ Lb-Pulg.}$$

$$S = \frac{M}{Z} \quad Z = \frac{M}{S}$$

$$Z = \frac{34.095}{18.750} = 1,87 \text{ Pulg}^3$$

Se escogerá la forma estructural 4 x 4 WF que tiene las siguientes características:

$$W = 13 \text{ Lb/Pie}$$

$$A = 3,82 \text{ Pulg}^2$$

$$I_x = 10,4 \text{ Pulg}^4$$

$$Z = 5,2 \text{ Pulg}^3$$

$$H = 4,0 \text{ Pulg.}$$

Estos anillos de rigidez se colocaran dentro de la nave de presión interior por lo tanto el radio medio es:

$$R = 60 - 2 = 58 \text{ Pulg}$$

y el momento de flexión producido es:

$$M = \frac{0,1098 \times 22.500 \times 58}{2 \pi} = 32.958 \text{ Lb-Pulg}$$

4.- DISEÑO DEL REGISTRO DE INSPECCION.-

Con el objeto de inspeccionar, limpiar, reparar o modificar la nave de presión deben instalarse registros de inspección que deben cumplir las siguien

tes regulaciones.

Para naves de presión con un diámetro sobre 60" el diámetro del registro de inspección será 1/3 del diámetro de la nave de presión, pero sin exceder las 40".

Para la nave de presión interior se empleará un registro de inspección de 20" cuyo espesor es:

$$t = \frac{P.R.}{S.E - 0,6 P}$$

$$t = \frac{115 \times 20}{18.750 \times 1 - 0,6 \times 115} = 0,125"$$

12,5 % de tolerancia 0,015"

$$t = 0,125 + 0,015 \quad t = 0,140" \quad t = 3/16"$$

el siguiente paso es calcular si el área del refuerzo asumido es aceptable.

Filete de soldadura interior:

$$t_w = 0,7 t \text{ min}$$

$$t_w = 0,7 \times 0,375 = 0,263"$$

$$t_w = 0,7 \times \text{tamaño de la soldadura}$$

$$t_w = 0,7 \frac{(21,125 - 20,375)}{2} = 0,263"$$

Filete de soldadura exterior:

$$\text{Garganta} = 1/2 t \text{ min}$$

$$\text{Garganta} = 0,5 \times 0,375 = 0,1875"$$

$$\text{Garganta} = 0,7 \times \text{tamaño de la soldadura}$$

$$\text{Garganta} = 0,7 \times 0,3125 = 0,219"$$

Los tamaños de soldadura son satisfactorios.

Area de refuerzo requerida:

$$A = d \cdot t_r$$

$$A = 20 \times 0,4375 = 8,75 \text{ pulg}^2$$

Area de refuerzo disponible:

$$A_1 = (E_1 t - t_r) d$$

$$A_1 = (E_1 t - t_r) (t_n + t) / 2$$

$$A_1 = (1 \times 0,4375 - 0,321) 20 = 2,320 \text{ pulg}^2$$

$$A_1 = (1 \times 0,4375 - 0,321) (0,1875 + 0,4375) / 2 = 0,036 \text{ pulg}^2$$

$$A_2 = (t_n - t_{rn}) 5 t$$

$$A_2 = (t_n - t_{rn}) (2,5 t_n + t_e) / 2$$

$$A_2 = (0,1875 - 0,125) 5 \times 0,4375 = 0,232 \text{ pulg}^2$$

$$A_2 = (0,1875 - 0,125) (2,5 \times 0,1875 + 0,375) / 2 = 0,105 \text{ pulg}^2$$

$$A_4 = 2 \times 0,1875 (0,3125^2 + 0,375^2) = 0,084 \text{ pulg}^2$$

Area provista por:

$$A_1 + A_2 + A_4 = 2,320 + 0,232 + 0,084 = 2,636 \text{ pulg}^2$$

$$A_5 = (D_p - d - 2 t_n) t_e$$

$$A_5 = (40 - 20 - 2 \times 0,1875) 0,375 = 7,259 \text{ pulg}^2$$

Area total disponible:

$$A_1 + A_2 + A_4 + A_5 = 9,895 \text{ pulg}^2$$

Carga llevada por las partes soldadas:

$$W = (A - A_1) S$$



$$W = (8,75 - 2.32) 18.750 = 120.000 \text{ lbs.}$$

Esfuerzos unitarios:

$$\text{Soldadura de filete en corte} = 0,49 \times 18750 = 9200 \text{ lb/pulg}^2$$

donde, 0,49 es un factor para juntas de filete.

$$\text{Soldadura de ranura en tensión} = 0,74 \times 18.750 = 13.900 \text{ lbs/pulg}^2$$

donde 0,74 es un factor para juntas de ranura

$$\text{Pared de la tubera en corte} = 0.70 \times 18.750 = 13.125 \text{ lbs/pulg}^2$$

donde 0,70 es un factor para la junta de la tubera.

Resistencia de las conexiones. =

Soldadura de filete interior en corte

$$A \quad \frac{\pi}{2} \times 20,25 \times 0,375 \times 9200 = 107.000 \text{ Lb.}$$

Soldadura de la pared de la tubera en corte:

$$B \quad \frac{\pi}{2} \times 20,1875 \times 0,1875 \times 13.125 = 78.600 \text{ Lb.}$$

Soldadura de ranura en tensión:

$$C \quad \frac{\pi}{2} \times 20,25 \times 0,4375 \times 13.900 = 194.000 \text{ Lb.}$$

Soldadura de filete exterior en corte:

$$D \quad \frac{\pi}{2} \times 40 \times 0,3125 \times 9200 = 180.010 \text{ Lb.}$$

Posibles puntos de falla:

$$B + D$$

$$78.600 + 180.010 = 258.610 \text{ Lb}$$

$$A + C$$

$$107.000 + 194.000 = 301.000 \text{ Lb}$$

$$C + D$$

$$194.000 + 180.010 = 374.010 \text{ Lb.}$$

Todos son más resistentes que la resistencia requerida de 120.000 lb/pulg².

El siguiente paso es el de determinar el espesor de la tapa, la cual debe tener un empaque que debe ser resistente a la acción del gas natural y debe tener un punto de fusión sobre los 1.500°F, se empleará empaque de aluminio plano.

El espesor de la plancha se calculará mediante la relación

$$t = d \sqrt{\frac{CP}{S}} \quad C = 0,162$$

$$t = 24 \sqrt{\frac{0,162 \times 115}{18.750}} = 0,756''$$

$$t = 7/8''$$

El siguiente paso será determinar el tamaño de los pernos para las condiciones de operación, de acuerdo a la fórmula

$$Wm_1 = H + H_p = 0,785 G^2 P + (2b \times 3,14 GmP)$$

$$Wm_1 = 0,785 \times 21^2 \times 115 + (2 \times 0,353 \times 3,14 \times 21 \times 4 \times 115)$$

$$Wm_1 = 39.980 + 214.000 = 253.980 \text{ Lb.}$$

$$Wm_2 = 3,14 b G y$$

$$Wm_2 = 3,14 \times 0,353 \times 21 \times 8800 = 205.000 \text{ Lb.}$$

$$b = \frac{b_o}{2} \quad \text{cuando } b_o = 1/4'' \quad \text{Factor del empaque}$$

$$b_o = \frac{N}{2} \quad N = 1'' \quad b_o = 1/2'' \quad m = 4$$

$$b = \frac{1/2}{2} = 0,353'' \quad \text{Esfuerzo de sello mínimo.}$$

$$y = 8800$$

$$Am_1 = \frac{Wm_1}{Sb}$$

Escogemos el valor más alto.

$$Am_2 = \frac{Wm_2}{Sa}$$

$$Am_1 = \frac{253.980}{18.750} = 13,51 \text{ pulg}^2$$

$$Am_2 = \frac{205.000}{18.750} = 10,82 \text{ pulg}^2$$

Se seleccionan diversos tamaños de pernos rosca standard .

Diámetro del Perno	Número de Hilos	Area
1/2"	13	0,126
5/8"	11	0,202
3/4"	10	0,302
7/8"	9	0,419
1"	8	0,551

Para 1/2" $n = \frac{13,510}{0,126}$ 108

Para 5/8" $n = \frac{13,510}{0,202}$ 67

Para 3/4" $n = \frac{13,510}{0,302}$ 45

Para 7/8" $n = \frac{13,510}{0,419}$ 33



$$\text{Para } 1'' \quad n = \frac{13,510}{0,551} = 25$$

Se seleccionan para múltiplos de 4

$$1/2'' \quad n = 108$$

$$5/8'' \quad n = 68$$

$$3/4'' \quad n = 48$$

$$7/8'' \quad n = 36$$

$$1'' \quad n = 28$$

Luego se calcula el espaciamiento de los pernos.

$$\text{Espaciamiento en diámetro} = \frac{\pi (21 + d)}{Nd}$$

$$\text{Para } 1/2'' \quad E = \frac{\pi (21 + 0,5)}{108 \times 0,5} = 1,25$$

$$\text{Para } 5/8'' \quad E = \frac{\pi (21 + 0,625)}{67 \times 0,625} = 1,62$$

$$\text{Para } 3/4'' \quad E = \frac{\pi (21 + 0,75)}{45 \times 0,75} = 2,02$$

$$\text{Para } 7/8'' \quad E = \frac{\pi (21 + 0,875)}{45 \times 0,875} = 2,38$$

$$\text{Para } 1'' \quad E = \frac{\pi (21 + 1)}{45 \times 1} = 2,76$$

Las tuercas tendrán la siguiente medida:

$$\text{Para } 1/2'' \quad 3/4''$$

$$\text{Para } 5/8'' \quad 15/16''$$

$$\text{Para } 3/4'' \quad 1 1/8''$$



Para 7/8" 1 5/16"

Para 1" 1 1/2"

Se emplearán pernos de 3/4", por lo tanto el número de los mismos es 48.

B.- DISEÑO DE LA NAVE DE PRESIÓN EXTERIOR.-

La nave de presión exterior sirve para almacenar el aislamiento y conservar el vacío necesario para mejorar la calidad del aislamiento y al mismo tiempo para soportar la nave de presión interior. Las fórmulas para determinar el espesor de la porción cilíndrica y esférica son distintas a las empleadas en el diseño de la nave de presión interior, las que de usarse, darían un espesor sumamente pequeño, haciendo que ésta falle por inestabilidad elástica.

Previo a la determinación del espesor es importante calcular la presión crítica.

$$P_c = 5 p_a$$

$$p_a = 15 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$P_c = 5 \times 15 = 75 \text{ lbs/pulg}^2$$

Para la porción cilíndrica la presión crítica viene dada por la expresión

$$P_c = \frac{2,42 E (t/D_o)^{5/2}}{(1 - \nu^2)^{3/4} \left[L/D_o - 0,45 (t/D_o)^{1/2} \right]}$$

Suprimiendo el término

$$0,45 (t/D_o)^{1/2}$$

$$t/D_o = \left[\frac{P_c (1 - \nu^2)^{3/4} (L/D_o)}{2,42 E} \right]^{2/5}$$

$$t/D_o = \left[\frac{75 (1 - 0,3^2)^{3/4} \left(\frac{9,75}{12} \right)^{2/5}}{2,42 \times 29 \times 10^6} \right]^{2/5} = 0,00368$$

$$t = 0,00368 D_o = 0,00368 \times 144 = 0,530''$$

$$t = 5/8''$$

$$D_o = 12'$$

Luego habrá que comprobar si este espesor calculado produce una presión crítica más alta con la fórmula completa

$$p_c = \frac{2,42 \times 29 \times 10^6 \left(\frac{0,625}{144} \right)^{5/2}}{(1 - 0,3^2)^{3/4} \frac{9,75}{12} - 0,45 \left(\frac{0,625}{144} \right)^{1/2}} = 127 \text{ lb/pulg}^2$$

Que es más alta que la presión crítica de diseño por lo tanto, el espesor de 5/8" es correcto y el material emplearse será acero inoxidable, lo mismo que se usará en la porción esférica.

Para determinar el espesor de la porción esférica, se empleará la expresión:

$$p_c = \frac{0,50 E (t_E / R_o)^2}{3 (1 - \nu^2)^{1/2}}$$

$$t_E / R_o = \left[\frac{3 (1 - \nu^2)^{1/2} p_c}{0,5 E} \right]^{1/2}$$

$$t_E / R_o = \left[\frac{3 (1 - 0,3^2)^{1/2} 75}{0,5 \times 20 \times 10^6} \right]^{1/2} = 0,00294$$



$$t_E = 0,00294 R_o = 0,00294 \times 72 = 0,212$$

$$t_E = 1/4''$$

Por lo tanto, se empleará un cabezal esférico de 1/4" de acero inoxidable.

1.- DETERMINACION DE LOS ANILLOS DE RIGIDEZ.

Los anillos de rigidez son usados para soportar el peso de la nave de presión interior y su contenido y para mantener la forma circular de la misma.

Para naves de presión de poca longitud se emplearán dos anillos de rigidez, mientras que para naves de presión de mayor longitud, se emplearán dos anillos de rigidez para soportar el peso de la nave de presión interior y anillos de rigidez intermedio para mantener la forma circular.

Los anillos de rigidez se calcularán de acuerdo a la fórmula.

$$I_1 = \frac{p_c D_o^3 L}{24 E}$$

$$I_1 = \frac{75 (144)^3 117}{24 \times 29 \times 10^6} = 37,6 \text{ pulg}^4$$

De acuerdo a esto, se selecciona la forma estructural.

6 x 6 WFM que tiene las siguientes características:

$$W = 20 \text{ lbs/pie}$$

$$A = 5,88 \text{ pulg}^2$$

$$I_x = 38,8 \text{ pulg}^4$$

$$Z = 12,9 \text{ pulg}^3$$

$$H = 6 \text{ pulg.}$$

Los anillos de soporte principal se calculan considerando que ellos deben de soportar no sólo la presión interna, sino también, el peso de la nave

de presión interior, para lo cual se calculará el momento por medio de:

$$\frac{2 \pi M}{WR} = (\theta_2 \operatorname{sen} \theta_2 - \theta_1 \operatorname{sen} \theta_1) + (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \cos \phi (\operatorname{sen}^2 \theta_2 - \operatorname{sen}^2 \theta_1) - (\operatorname{sen} \theta_2 - \operatorname{sen} \theta_1)$$

Para $0 \leq \phi \leq \theta_1$,

$$\frac{2 \pi M}{WR} = (\theta_2 \operatorname{sen} \theta_2 - \theta_1 \operatorname{sen} \theta_1) + (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \cos \phi (\operatorname{sen}^2 \theta_2 - \operatorname{sen}^2 \theta_1) - (\operatorname{sen} \theta_2 - \operatorname{sen} \theta_1)$$

Para $\theta_1 \leq \phi \leq \theta_2$

$$\frac{2 \pi M}{WR} = (\theta_2 \operatorname{sen} \theta_2 - \theta_1 \operatorname{sen} \theta_1) + (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \cos \phi (\operatorname{sen}^2 \theta_2 - \operatorname{sen}^2 \theta_1)$$

Para $\theta_2 \leq \phi \leq \pi$

De acuerdo al gráfico dado en el apéndice, se encuentra que el máximo momento para $\theta = 70$ y $\theta = 110$ ocurre cuando $\phi = 90^\circ$. Por lo tanto:

$$\frac{2 \pi M}{WR} = 1,9199 \operatorname{sen} 110^\circ - 1,2217 \operatorname{sen} 70^\circ - \cos 110^\circ - \cos 70^\circ + 0 - (\operatorname{sen} 110 - \operatorname{sen} 70)$$

$$\frac{2 \pi M}{WR} = 0,1615$$

$$W = \frac{130.000}{2} = 65.000 \text{ Lb.}$$



Puesto que se usarán dos anillos de rigidez.

$$M = \frac{0,1615 WR}{2 \pi}$$

$$M = \frac{0,1615 \times 65.000 \times 72}{2 \pi} = 120.000 \text{ lbs} \cdot \text{pulg.}$$

Se asumirá que la forma estructural 8 x 8 WF es la correcta.

$$Z = \frac{120.000}{18.750} = 25,6 \text{ pulg}^4$$

$$\omega = 40 \text{ lb/pie}$$

$$H = 8,25 \text{ pulg.}$$

$$A = 11,76 \text{ pulg}^2$$

$$Z = 35,5 \text{ pulg}^3$$

$$I = 146,3 \text{ pulg}^4$$

$$M = \frac{0,1615 \times 65.000 \times 67,875}{2 \pi} = 113.200 \text{ lb} \cdot \text{pulg.}$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad Z = \frac{M}{\sigma} =$$

$$Z = \frac{113.200}{18.750} = 6,04 \text{ pulg}^3$$

$$Z = \frac{I}{C} \quad I = Z \cdot C$$

$$I = 6,04 \times 4,125 = 29,4 \text{ pulg}^4$$

Por lo tanto, el momento de inercia requerido:

$$I = I_1 + I_2$$

$$I = 37,6 + 24,9 = 62,5 \text{ pulg}^4$$

Por lo tanto la forma estructural 8 x 8 WF es aceptable.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, las formas estructurales 8 x 8 WF, será usada como anillo de rigidez principal, mientras que la forma 6 x 6 WF será usada como anillo de rigidez intermedio, estando separada la distancia de 9,75', todas éstas de acero inoxidable.

2.- DISEÑO DEL REGISTRO DE INSPECCION.

El registro de inspección sobre la nave de presión exterior seguirá los mismos pasos de diseño en lo que al refuerzo se refiere, lo único que habrá que calcular es el espesor de la tapa para asegurarnos de que no falle por inestabilidad elástica.

El espesor se calcular por medio de

$$p_c = \frac{4 S t_p^2}{3 R_L^2}$$

$$t_p = \sqrt{\frac{p_c 3 R_L^2}{4 S}}$$

$$t_p = \sqrt{\frac{75 \times 3 \times 132}{4 \times 18.750}} = 0,626''$$

$$t_p = 3/4''$$

Además se podrá emplear el mismo diámetro de pernos y el empaque de aluminio.

C.- DISEÑO DE LAS LINEAS DE TRANSFERENCIA.

El siguiente paso es diseñar las líneas de transferencia del sistema, las

cuales introducen una fuente de calor adicional a la nave de presión, por esta razón este sistema debe diseñarse apropiadamente para disminuir las pérdidas de calor.

La forma de calor predominante es la de conducción, razón por la cual deben emplearse líneas de gran longitud y el material del cual van a construirse, debe ser de baja conductividad térmica.;

Otro factor que debe ser tomado en cuenta, es la contracción térmica, el cual podrá ser tomado por la forma de la línea o juntas de expansión.

Se emplearán tres líneas, una de llenado de 2 1/2", una de transferencia de 2" y la línea de purga atmosférica de 1 1/2".

El espesor de las líneas se determinará por la relación:

$$t = \frac{P D}{2 S + 2y P} + C$$

y = 04 para materiales austeníticos bajo 900°F. Se empleará acero inoxidable S A - 240 (304), por lo tanto el esfuerzo de diseño es: S = 18.750 lbs/pulg² y es además un material de baja conductividad térmica.

La línea de llenado de 2 1/2" se conectará a la parte superior de la nave de presión interior, cuyo diámetro exterior es 2,875"

$$t = \frac{115 \times 2,875}{2 \times 18,750 + 2 \times 0,4 \times 115} = 0,0088"$$

Se empleará una tubería "Schedule" 40 que tiene un espesor de pared de 0,203".

La línea de drenaje de 2" se conectará a la parte inferior de la nave de presión interior, cuyo diámetro exterior es 2,375".

$$t = \frac{115 \times 2,375}{2 \times 18.750 + 2 \times 0,4 \times 115} = 0,0072''$$

Se empleará una tubería "Schedule" 40 que tiene un espesor de pared de 0,154"

La línea de purga atmosférica de 1 1/2" se conectará a la parte superior de la nave de presión interior, cuyo diámetro exterior es de 1,900"

$$t = \frac{115 \times 1,900}{2 \times 18.750 + 2 \times 0,4 \times 115} = 0,0058''$$

Se empleará una tubería "Schedule" 40 que tiene un espesor de pared de 0,145"

El diámetro interior de cada tubería es:

$$ID = OD - 2t$$

$$\text{Para } 2 \frac{1}{2}'' \quad ID = 2,875 - 2 \times 0,203 = 2,469$$

$$\text{Para } 2'' \quad ID = 2,375 - 2 \times 0,155 = 2,067''$$

$$\text{Para } 1 \frac{1}{2}'' \quad ID = 1,900 - 2 \times 0,145 = 1,610''$$

Hay que determinar su peso por unidad de longitud

$$W = 0,85 \pi (OD^2 - ID^2)$$

$$\text{Para } 2 \frac{1}{2}'' \quad W = 0,85 \pi (2,875^2 - 2,469^2) = 5,80 \text{ lb/pie}$$

$$\text{Para } 2'' \quad W = 0,85 \pi (2,375^2 - 2,067^2) = 3,70 \text{ lb/pie}$$

$$\text{Para } 1 \frac{1}{2}'' \quad W = 0,85 \pi (1,900^2 - 1,610^2) = 2,80 \text{ lb/pie}$$

La longitud de las líneas dentro de la nave de presión exterior, será para la de llenado de 15', para la de drenaje de 12' y para la de purga atmosférica 6' de longitud.

La contracción térmica del acero inoxidable entre la temperatura ambiente de 80°F y la temperatura de licuefacción del gas natural -260°F se determi-

ará de las propiedades de este material.

$T, ^\circ R$	$t_f (T)$	k_f	$K_f e_f(T)$	$k_f e_f(T)$	t
540	0	8,67	0	0,0000	
500	35×10^{-5}	8,38	$2,93 \times 10^{-3}$	0,0586	
450	79×10^{-5}	8,09	$6,39 \times 10^{-3}$	0,2330	
400	121×10^{-5}	7,80	$9,43 \times 10^{-3}$	0,3955	
350	160×10^{-5}	7,40	$11,83 \times 10^{-3}$	0,5315	
300	198×10^{-5}	6,99	$13,83 \times 10^{-3}$	0,6415	
250	232×10^{-5}	6,35	$15,04 \times 10^{-3}$	0,7140	
200	263×10^{-5}	5,72	$13,80 \times 10^{-3}$	0,7443	

$$\int_{200^\circ R}^{540^\circ R} e_f(T) K_f dT = 3,3184 \text{ Btu/hr - pie}$$



La integral de la conductividad térmica para el acero inoxidable

$$\int_{200^\circ R}^{540^\circ R} k_f dT = 2625 \text{ Btu/hr - pie}$$

Por lo tanto, la contracción térmica será:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\int_{T_c}^{T_h} e_f(T) k_f dT}{\int_{T_c}^{T_h} k_f dT}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{3,3184}{2625} = 1,27 \times 10^{-3}$$

La contracción térmica para cada línea será:

$$L = 1,27 \times 10^{-3} L$$

Para 2 1/2"

$$L = 1,27 \times 10^{-3} \times 180 = 0,228"$$

Para 2"

$$L = 1,27 \times 10^{-3} \times 144 = 0,183"$$

Para 1 1/2"

$$L = 1,27 \times 10^{-3} \times 72 = 0,091"$$

Esta contracción térmica será tomada por las juntas de expansión que se colocarán en cada línea, las cuales se seleccionarán de una forma tal que puedan tomar la contracción lineal y fuerzas de carácter axial como son el peso de la línea y el peso del fluido dentro de la misma.

Las conexiones de la tubería con la nave de presión interior, deberán ir reforzadas apropiadamente, lo mismo que sus salidas en la nave de presión exterior.

D.- SOLDADURA DE LOS COMPONENTES -

La mayoría de los equipos usados en bajas temperaturas se unen por medio de soldadura, y estas uniones son: soldadura de tope con penetración completa.

Estas partes soldadas deben ser virtualmente libres de defectos, los que de existir, causarían zonas de concentración de esfuerzos.

De acuerdo a las especificaciones para unir aceros inoxidables 18% CR y 8% N₁ SA - 240 340 se emplearán electrodos. E-308-15 (SA-298) de 1/8" de diámetro. Se aplicará un voltaje entre 20 y 27 voltios y un amperaje entre 100 a 130 amperios, ya que todas las partes tienen menos de 3/4".

Para esta clase de aceros el precalentamiento no es requerido y libera-

ción de esfuerzos no es necesario.

Los aceros inoxidable austeníticos pueden soldarse fácilmente con cualquier técnica de soldadura, ya sea de fusión o resistencia que son comúnmente empleadas con los aceros al carbono, además los aceros inoxidable retienen sus propiedades en bajas temperaturas bajo una variada condición de soldabilidad.

Los aceros inoxidable austeníticos tienen las propiedades físicas y mecánicas algo diferente a los aceros al carbono, por lo tanto, el procedimiento de soldadura será variado en lo que se refiere a la resistencia eléctrica de los aceros inoxidable austeníticos es seis veces más grande que la de los aceros al carbono.

El punto de fusión de los aceros inoxidable es 200°F más bajo que los aceros al carbono.

La conductividad térmica de los aceros inoxidable es aproximadamente 50% más baja que la de los aceros al carbono.

Estos factores antes mencionados inciden sobre los requerimientos de corriente para unir estas partes que debe ser más bajas que la de los aceros al carbono, en razón de que la expansión térmica del acero inoxidable es aproximadamente 50% más alta que los aceros al carbono, con la ventaja que los aceros inoxidable son más dúctiles y pueden tomar cualquier contracción, sin embargo esta última consideración debe ser tomada en cuenta para evitar cualquier esfuerzo objeccionable sobre las partes soldadas.

E.- SELECCION DE LA BOMBA DE TRANSFERENCIA .-

Para este sistema podrá usarse una bomba centrífuga la que posee una al

ta razón volumétrica de descarga y un cabezal bajo pero es importante indicar los problemas asociados con este tipo de bomba como son la cavitación, los rodamientos y el sello de la bomba.

La bomba será horizontal y conectada al tanque por medio de una manguera flexible para evitar cualquier esfuerzo objeccionable que pueda afectar el desempeño de la misma. Los materiales de construcción y otros accesorios deberán ser compatibles con el LNG.

El cabezal de descarga es de 100' suficiente para vencer la caída de presión en la línea de llenado.

F.- SELECCION DE LAS VALVULAS.

Las válvulas para aplicaciones criogénicas presentan innumerables problemas de diseño por cuanto estas no deben permitir la fuga de calor en la línea y al mismo tiempo deberán ofrecer mínima resistencia al flujo, servicio confiable en la temperatura y presión de operación del sistema, baja capacidad térmica, economía y simpleza de construcción.

De acuerdo a las consideraciones anteriores se usarán válvulas de vástago extendido que son diseñadas y construidas en esta forma para disminuir las pérdidas de calor entre el cuerpo de la válvula y su mecanismo de operación y prevenir el congelamiento del empaque.

En la temperatura del LNG, los materiales de construcción de las válvulas serán acero inoxidable 18% cromo y 8% níquel que es un material de baja conductividad térmica y no presenta fragilidad en la temperatura a la que está sometida, y teflón como material de empaque. La presión de diseño será de 300 LB/pulg² en la temperatura de operación de -260 F.

G. - SISTEMA DE SUSPENSION. -

Uno de los factores críticos en el diseño de una nave de presión para almacenar fluidos criogénicos es el sistema de suspensión en razón de que un sistema de suspensión pobremente diseñado afecta el desempeño del aislamiento.

Entre los diversos tipos de sistema de suspensión, se escogió el de barras en tensión.

Estos miembros de apoyo deberán ser construidos con materiales de baja conductividad térmica y deberán ser diseñados lo más largo posible para así de esta manera disminuir la transferencia de calor por conducción entre el extremo frío y caliente.

Además, el criterio a seguirse para seleccionar el material es usando la razón resistencia-conductividad.

De la tabla se observa que los plásticos son los que tienen una razón resistencia-conductividad elevada pero dado que el peso que tienen que soportar no puede ser llevado por los plásticos deberán usarse materiales metálicos entre los cuales sobresale el acero inoxidable 18% cromo, 8% níquel.

La longitud de los miembros de apoyo será de 4' de longitud que está más allá de los 3' mínimos que se exige. Las barras tienen un esfuerzo de

fluencia $S_y=91.000 \text{ lb/plg}^2$ y la conductividad térmica es $K_t=7,72 \text{ Btu/hr pie-F}$. Una nave de presión para almacenar fluidos presenta la siguiente distribución de cargas:

VACIA	1/2 g ARRIBA	3g ABAJO
LLENA	1/2 g ARRIBA	1 1/2 g ABAJO

Se calcula para cada una de estas condiciones y se escoge la que da el mayor peso.

$$\text{VACIO} \quad \frac{1}{2} \times 29.250 = 14.625 \text{ lb}$$

$$3 \times 29.250 = 87.850 \text{ lb}$$

$$\text{LLENA} \quad \frac{1}{2} \times 130.000 = 65.000 \text{ lb}$$

$$\frac{3}{2} \times 130.000 = 195.000 \text{ lb}$$

En este caso 195.000 lb es la carga de diseño como van a existir cuatro barras esta carga se reparte en:

$$F = \frac{195.000}{4} = 48.750 \text{ lb}$$

$$S = S_y/n \quad S = \frac{91.000}{5} = 18.200 \text{ lb/pulg}^2$$

$$S = F/A \quad A = F/S = \frac{48.750}{18.200} = 2,68 \text{ pulg}^2$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad D^2 = \frac{4A}{\pi} \quad D = \sqrt{\frac{4 \times 2,68}{3,14}} = 1,85''$$

Hay que añadir el 12,5% para corrosión, 0,227"

$$D = 1,850 + 0,227 = 2,077''$$

$$D = 2 - 1/4''$$

La contracción térmica producida deberá ser ajustada antes de proceder el montaje ya que si los extremos estuvieran completamente fijos producirían un esfuerzo sumamente alto.

$$\begin{aligned}\frac{\Delta L}{L} &= 1,27 \times 10^{-3} \\ \Delta L &= 1,27 \times 10^{-3} L \\ \Delta L &= 1,27 \times 10^{-3} \times 48 = 0,061''\end{aligned}$$



H. - SISTEMA DE VACIO. -

La calidad de los aislamientos usados en este sistema mejora notablemente si este se encuentra a un alto vacío.

En este sistema la presión de evacuación es de 10^{-3} torr y se conseguirá mediante una línea de 2" provista de 14 filtros de diseño especial para evitar que las partículas del aislamiento entren al sistema.

Se usará para evacuar el sistema una bomba rotatoria de dos estados ya que poseen un rango más amplio de aplicación y su proceso operacional lo hace haciendo girar un cilindro excéntrico alrededor del cuerpo de la bomba. El gas entra al espacio entre los dos cilindros donde es comprimida a una alta presión y es descargado a través de una válvula cheque que previene el regreso del aire. Este pistón está sellado dentro de la envuelta por una película de aceite.

De acuerdo al gráfico mostrado en el apéndice se seleccionará la bomba KC-15 que tiene una velocidad máxima de bombeo de $15 \text{ pie}^3/\text{MIN}$ y en la condición del sistema $9 \text{ pie}^3/\text{Min}$, su velocidad es de 300 RPM y la potencia del motor es de $3/4$ HP.

Las válvulas usadas en sistemas de vacío deben seguir las más altas normas de diseño para prevenir la ruptura del alto vacío y al mismo tiempo poseer alta conductancia y ausencia de desprendimiento de gas de la superficie o del interior de los componentes de la válvula.

El sistema siguiente empleará válvulas en ángulo selladas con anillo "o" La válvula a usarse tiene alta conductancia que es esencial en esta clase de sistema para que la presencia de la válvula en la línea de evacuación no disminuya seriamente la velocidad de bombeo.

El desprendimiento de gas puede reducirse seleccionando apropiadamente el material de la válvula y el sello, Por lo tanto como material de la válvula se empleara acero inoxidable 18% cromo y 8% níquel, el cual tiene una razón de desprendimiento de gas de $1,7 \times 10^{-6}$ torr-pie³/seg-pie² y como material de sello se empleará kel-F que tiene una razón de desprendimiento de $1,3 \times 10^{-6}$ torr-pie³/seg-pie², además este material muestra gran resistencia al impacto en bajas temperaturas y excelente resistencia al choque termico

I.- AISLAMIENTO.-

La mayoría de los procesos criogénicos requieren un aislamiento térmico perfecto para impedir que los gases regresen a la condición gaseosa debido a sus bajos calores latentes de evaporación y a la gran diferencia de temperatura existente entre sus puntos de ebullición y el medio ambiente. Estos requerimientos han traído consigo un intenso estudio del aislamiento tanto desde el punto de vista teórico como práctico, pudiendo decirse que ha sido un triunfo de la tecnología sobre la termodinámica.

Existen diversos tipos de aislamiento que pueden usarse en sistemas de almacenamiento de gases licuados, pero la selección de un aislamiento para

un uso específico depende de diversos factores tales como la conductividad térmica, porosidad, evacuable, inflamabilidad, economía, conveniencia, peso y resistencia.

De acuerdo a estas condiciones el espacio de 12" comprendido entre las naves de presión interior y exterior. Se llenará, con perlita expandida 80 Mesh, que evacuada a un vacío del orden de 10^{-3} torr tiene una conductividad térmica aparente de 10^{-3} BTU/hr-pie F.

Este bajo coeficiente de conductividad térmica junto con su baja densidad y su bajo costo hacen a la perlita expandida más económica que cualquier otro material aislante disponible.

En el apéndice se muestran las variaciones de la conductividad térmica de la perlita expandida con relación a la presión, tamaño de la partícula, y densidad.

J. - PERDIDAS DE CALOR. -

El régimen de transferencia de calor a través de la perlita expandida se determina por medio de la ecuación de Fourier para transferencia de calor por conducción usando la conductividad térmica del aislamiento mediante:

$$Q = K A_m \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Donde $A_m = \frac{A_2 - A_1}{\ln A_2/A_1}$ Para cilindros concéntricos

y $A_m = \sqrt{A_1 A_2}$ Para esferas concéntricas

Parte cilíndrica

$$A = \pi DL$$

$$A_1 = \pi \times 10 \times 46 = 1445 \text{ pie}^2$$

$$A_2 = \pi \times 12 \times 46 = 1735 \text{ pie}^2$$

$$A_m = \frac{1735 - 1445}{1} = 1591 \text{ pie}^2$$

$$T_h = 80^\circ\text{F}$$

$$\ln \frac{1735}{1445}$$

$$T_c = -260 \text{ F}$$

$$Q = 10^{-3} \times 1591 \frac{80 - (-260)}{1} = 542 \text{ Btu/hr.}$$

Parte esférica

$$A = \pi D^2$$

$$A_1 = \pi (10)^2 = 314 \text{ pie}^2$$

$$A_2 = \pi (12)^2 = 452 \text{ pie}^2$$

$$A_m = \sqrt{314 \times 452} = 377 \text{ pie}^2$$

$$Q = 10^{-3} \times 377 \frac{80 - (-260)}{1} = 128 \text{ Btu/hr}$$

$$Q_r = 542 + 128 = 670 \text{ Btu/hr}$$

Hay que calcular las pérdidas de calor a través de las tuberías.

Para línea de llenado $A_x = 15'$ El área es

$$A = \frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (2,875^2 - 2,469^2) = 1,7 \text{ pulg}^2$$

$$Q = 7,72 \times \frac{1,7}{144} \times \frac{80 - (-260)}{15} = 2,06 \text{ Btu/hr}$$

Para línea de drenaje $A_x = 12'$ El área es

$$A = \frac{\pi}{4} (2,375^2 - 2,067^2) = 1,09 \text{ pulg}^2$$

$$Q = 7,72 \times \frac{1,09}{144} \times \frac{80 - (-260)}{12} = 1,66 \text{ Btu/hr}$$

Para línea de purga atmosférica $x = 6$ el área es:

$$A = \frac{\pi}{4} (1,900^2 - 1,610^2) = 0,824 \text{ pulg}^2$$

$$Q = 7,72 \times \frac{0,824}{144} \times \frac{80 - (-260)}{6} = 2,51 \text{ Btu/hr}$$

$$Q_f = 2,06 + 1,66 + 2,51 = 6,23 \text{ Btu/hr.}$$

También hay que calcular la pérdida de calor a través de las barras de suspensión.

$$Q = 7,72 \times \frac{2,68}{144} \times \frac{80 - (-260)}{4} = 18,1 \text{ Btu/hr.}$$

$$Q_f = 4 \times 18,1 = 72,4 \text{ Btu/hr.}$$

El calor total se obtiene sumando los calores parciales

$$Q_f = 670 + 6,23 + 72,4 = 748,65 \text{ Btu/hr.}$$

El siguiente paso es determinar el porcentaje de evaporación por día:

$$+ W = \frac{Q_f \times 24}{L}$$

$$W = \frac{748,65 \times 24}{220} = 81,6 \text{ lbs.}$$

$$E = \frac{W \times 100}{W_T}$$

La razón de evaporación es por lo tanto:

$$E = \frac{81,6 \times 100}{98.560} = 0,083 \%$$

Por lo tanto concluimos que está bien diseñada.



K. - INSTRUMENTOS. -

Después que las bajas temperaturas han sido alcanzadas mediciones apropiadas deberán hacerse en estas temperaturas para sensar las diversas variables existentes en el sistema, esto incluye medición de presión, temperatura, flujo y nivel.

Estos instrumentos sirven además para controlar y asegurar la confiabilidad del sistema, ya que si una variable particular va más allá del rango de control, una acción correctiva deberá actuar automáticamente y si es necesario hará actuar una alarma.

Por lo tanto, suficientes instrumentos deberán proveerse para operar y controlar el sistema y proteger el equipo en caso falla.

1. - MEDICION DE LA PRESION. -

La medición de la presión en temperaturas criogénicas difiere poco de la medición de presión ordinaria en razón de que los instrumentos que la sensan se encuentran en temperatura ambiente. En este sistema se usará un manómetro Bourdon, el cual consiste de un tubo hueco con sección transversal ovalada doblado en un arco circular, la presión a medirse se aplica en el interior del tubo, tendiendo esta a redondear la sección transversal la que a su vez endereza el tubo, la magnitud de esta deformación puede usarse como una indicación de la presión aplicada. El movimiento del extremo libre del tubo Bourdon es multiplicado a través de una articulación y engranaje a un puntero cuyo movimiento sobre una escala nos indica la presión.

La escala del manómetro estará graduada entre 0-60 lb/pulg², la selección del material del tubo Bourdon deberá hacerse en base del número de ciclos de operación, formabilidad y la clase de material que ejerce la presión

en el interior del tubo, por lo tanto se usará acero inoxidable 316L el cual muestra excelentes propiedades mecánicas en la temperatura de operación del sistema.

2.- Medición de la temperatura.-

La medición de la temperatura esta basada en diferentes efectos térmicos tales como: la expansión de un líquido, la resistencia eléctrica, la presión de un un gas perfecto, la fuerza electromotriz termoeléctrica entre dos metales distintos, la presión de equilibrio de un gas en su punto de ebullición, la susceptibilidad magnética de una sal paramagnética y muchas otras propiedades que dependen de las temperaturas.

Las temperaturas de operación del sistema son de -260 F a 80 F, por lo tanto, se usará un termómetro en cuyo rango de aplicación estén incluidas estas temperaturas.

Un termómetro que cumple este requerimiento es el termómetro de resistencia de platino cuyo rango de aplicación es de -300 F a 1.800 F.

Este termómetro es de bajo costo, fácil de construir y operar, además la propiedad usada para medir la temperatura (resistencia) varía linealmente con la temperatura, la variación de la resistencia del platino con la temperatura se muestran en el apéndice.

En este instrumento para evitar las deformaciones térmicas y mecánicas que alterán la resistencia eléctrica del material sensor, el alambre de platino de $0,1$ mm de diámetro se enrolla en forma helicoidal y nuevamente se vuelve a enrollar alrededor de un soporte de mica, luego que el elemento es encerrado en un tubo de platino lleno con gas helio a 40 mm de Hg se lo sella con una tapa de vidrio a travez del cual salen los terminales.

cuyo rango de frecuencia es 0 - 750 cps.

El número total de pulsos será totalizado por un contador electrónico

fluido máximo es de 5 lb/pulg².

a 300 gal/min. La caída de presión para este medidor en condiciones de

La presión de diseño es de 300 lb/pulg², el flujo varía de 20 gal/min

apoyos se construyen de Stellite.

para el cuerpo y brida del medidor, acero inoxidable 430 para el rotor, los

tura de operación del sistema, por lo tanto se empleará acero inoxidable 304L

Los materiales de construcción deberán ser compatibles con la tempera-

el medidor.

mente es directamente proporcional al volumen del líquido pasando por

sante y la frecuencia captada por una bobina de único montada exterior-

centro del flujo y el ángulo de las paletas del rotor genera un voltaje pul-

A medida que el fluido fluye a través del medidor un rotor colocado en el

fluido tipo turbina, cuyo proceso operacional es el siguiente:

De acuerdo a estas consideraciones este sistema usará un medidor de

confiable y compatible con las temperaturas del LNG.

sistema debe considerarse la instalación de un medidor de flujo altamente

predicir midiendo la presión, temperatura y flujo por lo tanto para este

macendado en una nave de presión, las condiciones en el sistema pedrán

Cuando un fluido criogénico es bombeado a través de un sistema o al-

3.- Medición del flujo.-

para indicar la temperatura sobre una escala graduada de -300 f a 100 F.

Indicador deberá proveerle conjuntamente con este un puente Wheatstone

Puesto que el termómetro de resistencia de platino no es un instrumento



4.- Medición del nivel .-

Otra de las variables que debe controlarse en este sistema es el nivel del fluido, para evitar que la nave de presión sea llenada mas alla del espacio de vapor y al mismo tiempo indique la cantidad existente de fluido dentro del sistema.

Este instrumento mide la diferencia de presión existente entre la presión del gas en la parte superior y la presión del líquido en la parte inferior.

Para evitar las oscilaciones de presión a la que va a estar sometido este instrumento deberá instalarse en las líneas amortiguadores de pulsaciones.

La escala estará graduada en porcentaje del volumen de la nave de presión de 0 - 100 %.

5.- Medición del Vacío.-

El vacío del espacio anular será sentido por un medidor de vacío de termopar , cuyo proceso operacional está basado en el principio de que el régimen de transferencia de calor por conducción libre molecular es directamente proporcional a la presión absoluta del gas.

Consiste de un tubo de vidrio en cuyo interior se encuentra un filamento y un termopar conectados al sistema de vacío. El filamento es calentado exteriormente y la temperatura del mismo es medida por el termopar. La salida del termopar nos indica la presión de vacío existente en el sistema la escala estará graduada desde 10^{-1} torr a 10^{-6} torr.

6.- Instrumentos de seguridad.-

Con el objeto de proteger el sistema de cualquier sobrepresión existente en el mismo se colocaran en la nave de presión interior valvulas de seguridad mientras que en la nave de presión exterior se usaran discos de ruptura. Las valvulas de seguridad de la nave de presión interior son valvulas de ali-

vio accionadas por un resorte y su capacidad se determina de acuerdo a la razón de evaporación si el vacío se perdiera.

Por lo tanto se determinara la razón de transferencia de calor usando la conductividad termica de la Perlita expandida en estas condiciones.

$$k = 18 \times 10^{-3} \text{ Btu/hr-pie F}$$

$$T_h = 80 \text{ F}$$

$$T_c = -260 \text{ F}$$

Parte Cilindrica

$$Q = 18 \times 10^{-3} \times 1591 \frac{80 - (-260)}{1} = 9737 \text{ Btu/hr}$$

Parte Esferica

$$Q = 18 \times 10^{-3} \times 337 \frac{80 - (-260)}{1} = 2307 \text{ Btu/hr}$$

Calor Total

$$Q = 9737 + 2307 = 12.044 \text{ Btu/hr}$$

Luego se calcula el flujo a travez de la valvula de seguridad mediante la relación.

$$W = 3,09 \frac{Q}{L} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad \begin{array}{l} L = 220 \text{ Btu/lb.} \\ M = 16,04 \text{ lb.} \\ T = 260 + 460 = 200 \text{ }^\circ\text{R} \end{array}$$

$$W = 3,09 \times \frac{12.044}{220} \sqrt{\frac{200}{16,4}} = 597 \text{ lb/hr}$$

Con este flujo se determina el area de la valvula requerida de acuerdo a la fórmula :

$$A = \frac{W}{15.8 P K_g K_t K_c}$$

$$K_g = \frac{1}{\sqrt{G}} = K_g = \frac{1}{\sqrt{1,45}} = 0.830$$

$$G = 1,45$$

$$P = 40 \text{ lb/pulg.}^2$$

$$K_t = \frac{\sqrt{520}}{\sqrt{T}} = K_t = \frac{\sqrt{520}}{\sqrt{200}} = 1.612$$

$$P = 50 \text{ lb/pulg.}^2$$

$$K_c = \frac{C}{315}$$

El valor de "C" se determina del curva en el Apendice

$$C = 347$$

Por lo tanto

$$Kc = \frac{347}{315} = 1.102$$

De donde

$$A = \frac{597}{1,58 \times 40 \times 0,830 \times 1,612 \times 1,102} = 0.641 \text{ pulg}^2$$

$$A = \frac{597}{1,58 \times 50 \times 0,830 \times 1,612 \times 1,102} = 0.512 \text{ pulg}^2$$

De acuerdo a las especificaciones se escogeran las siguientes valvulas de seguridad:

Valvula de Seguridad de 1-1/2" x 3" asentada a una presión de 40 lb/pulg² actuada automaticamente mediante un interruptor electrico o un mecanismo sensible a la presión.

Valvula de Seguridad de 1-1/2" x 3" asentada a una presión de 50 lb/pulg².

Los materiales de construcción de las valvulas seran acero inoxidable 304 mientras que los empaques de las valvulas seran acero inoxidable 316. Estos materiales mantienen una apreciable resistencia al impacto en bajas temperaturas.

El disco de ruptura colocado en la nave de presión exterior con el proposito de liberar la presión del espacio anular cuando este sube a un nivel determinado, estara asentado a una presión de 15 lb/pulg². La unica desventaja de este instrumento de seguridad es que debe cambiarse una vez que cumple su función y será del tipo diafragma.

K.- CONTROL DE CALIDAD.-

Los materiales y procesos de fabricación de naves de presión usadas para almacenar fluidos en bajas temperaturas deberá pasar las pruebas exigidas por el Código bajo el cual fue diseñada.

1.- Materiales de Construcción

Los materiales en esta clase de construcción deberán tener la longitud y el espesor indicado y se examinarán completamente para detectar cualquier defecto que haya sobre la superficie de las mismas, además deberá cumplir las especificaciones metalúrgicas típicas para esta clase de material.

2.- Procesos de Fabricación

El proceso de fabricación que debe someterse a los más altos requerimientos es el de soldadura, pues de esta manera se podrán obtener altas eficiencias de soldabilidad que son necesarias para obtener espesores más bajos.

Se someterán las partes soldadas a una inspección radiográfica total que se trata de una prueba no-destructiva que sirve para detectar y evaluar cualquier defecto y predecir la resistencia y confiabilidad de las partes.

Además estará sometida a la prueba del espectrografo de helio para detectar cualquier fuga en las naves de presión ya que se encuentra sometida a un alto vacío.



VII. COSTO

La mayoría de las naves de presión utilizadas para almacenar fluidos criogénicos es de acero inoxidable 304 teniendo un costo de \$ 2.00 a \$ 3.50 la libra dependiendo del peso y de la facilidad de construcción.

En razón de que la nave de presión que se ha considerado en el presente diseño es de construcción estándar y es la configuración más óptima en lo que a capacidad se refiere su costo disminuirá notablemente.

Otro de los factores que aumenta considerablemente el costo del sistema es la presión de diseño interna como se ve en la tabla mostrada en el Apéndice.

Puesto que a más altas presiones mayor es el espesor del material y por ende mayor es el peso de la nave de presión. El costo de estas naves de presión está basado en el uso de la Perlita expandida como material aislante, en un espacio altamente evacuado.

El costo alcanza este nivel en razón de que estas naves de presión son fabricadas de acuerdo a las más altas normas de diseño y sometidas a las más rigurosas pruebas de inspección.

De la tabla adjunta se desprende que el costo de la nave de presión es de \$ 112,000.

Se ha planteado el costo en esta forma dado que en el Ecuador no existen materiales, equipos e instrumentos necesarios para la construcción y lo que es más importante se carece de la mano de obra especializada. Por lo tanto y que sirva de conclusión del presente trabajo que lo aquí expuesto sirva de guía para pedir una nave de presión mas no para construirla.

APENDICE



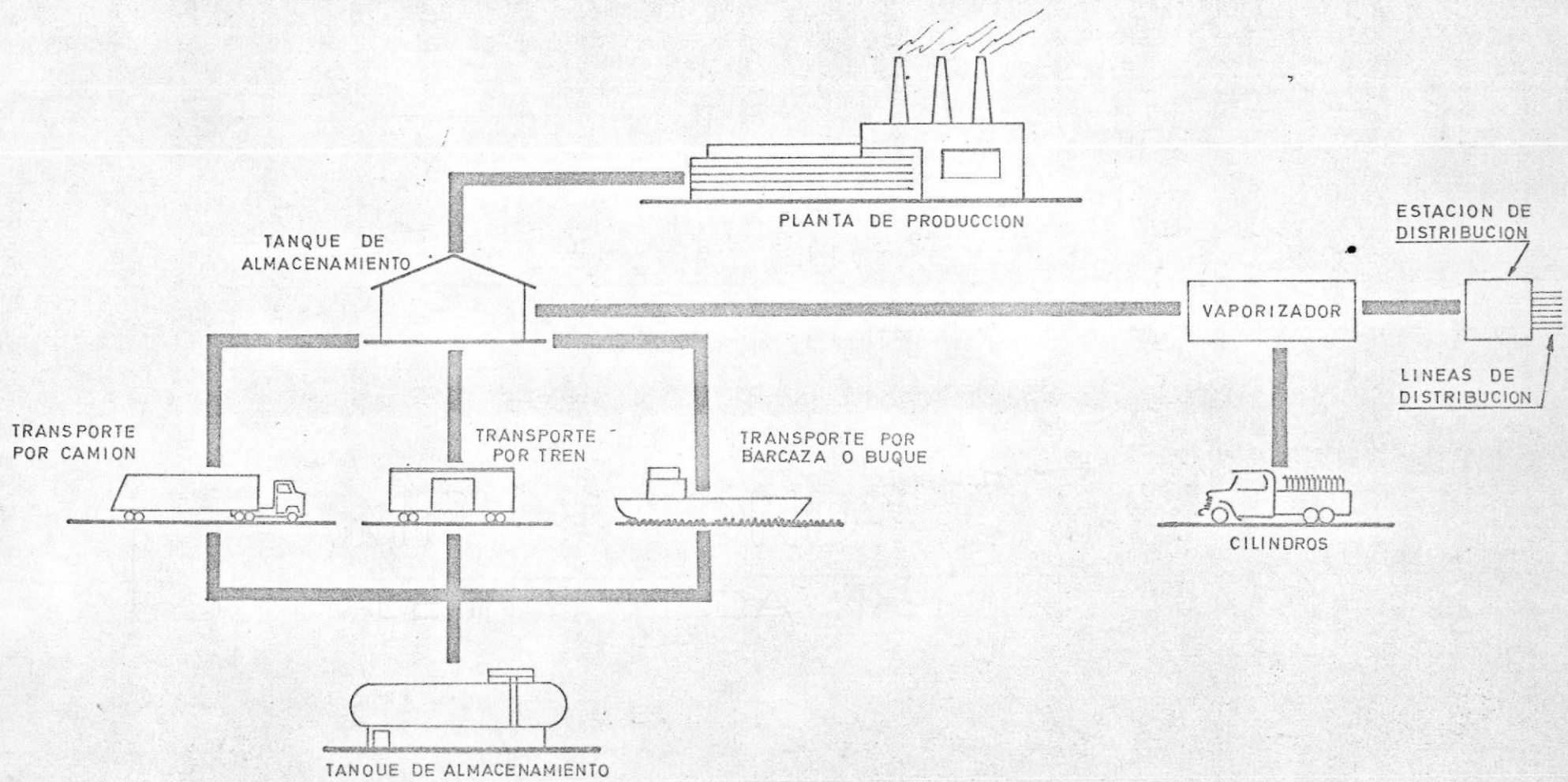


DIAGRAMA DE DISTRIBUCION DE GAS NATURAL LICUADO

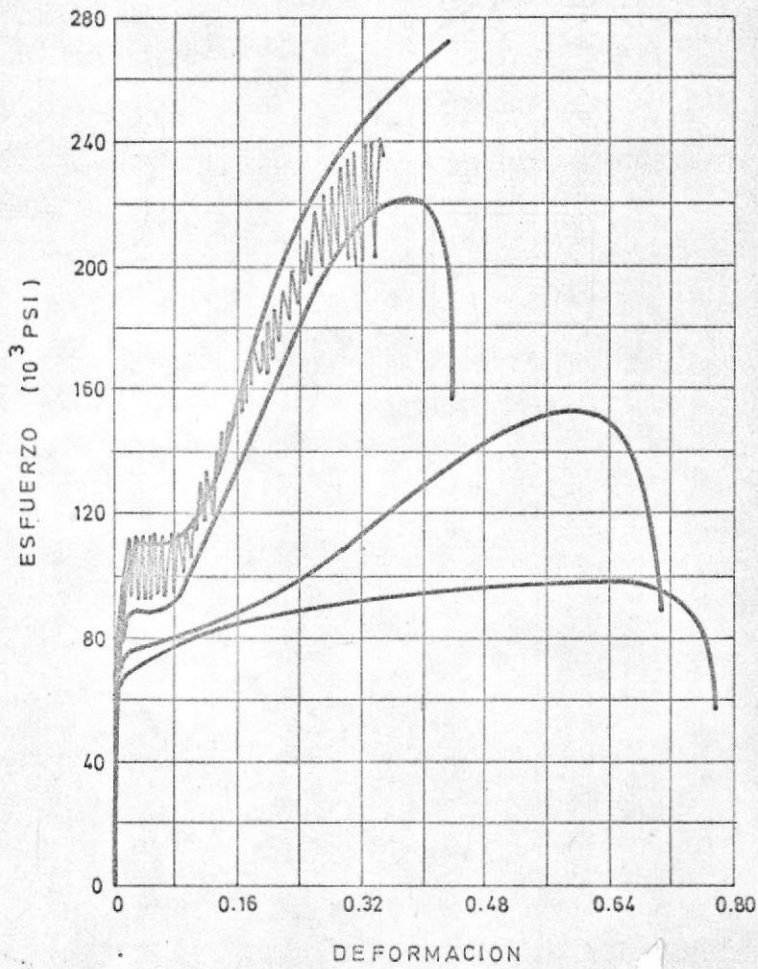
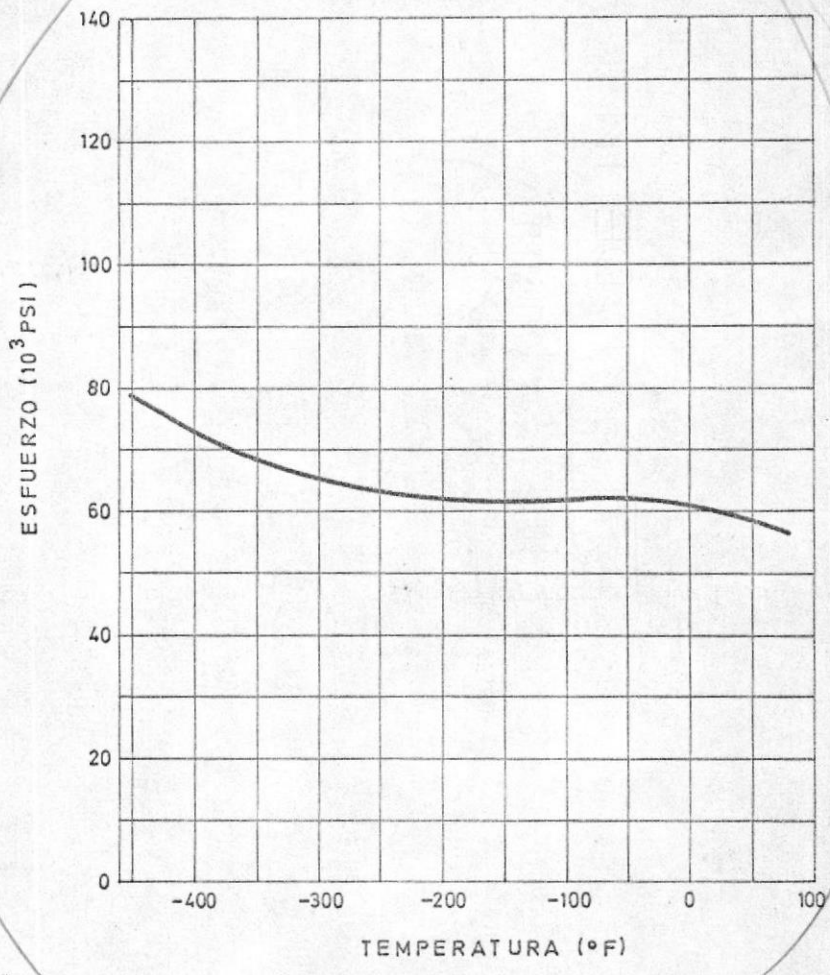
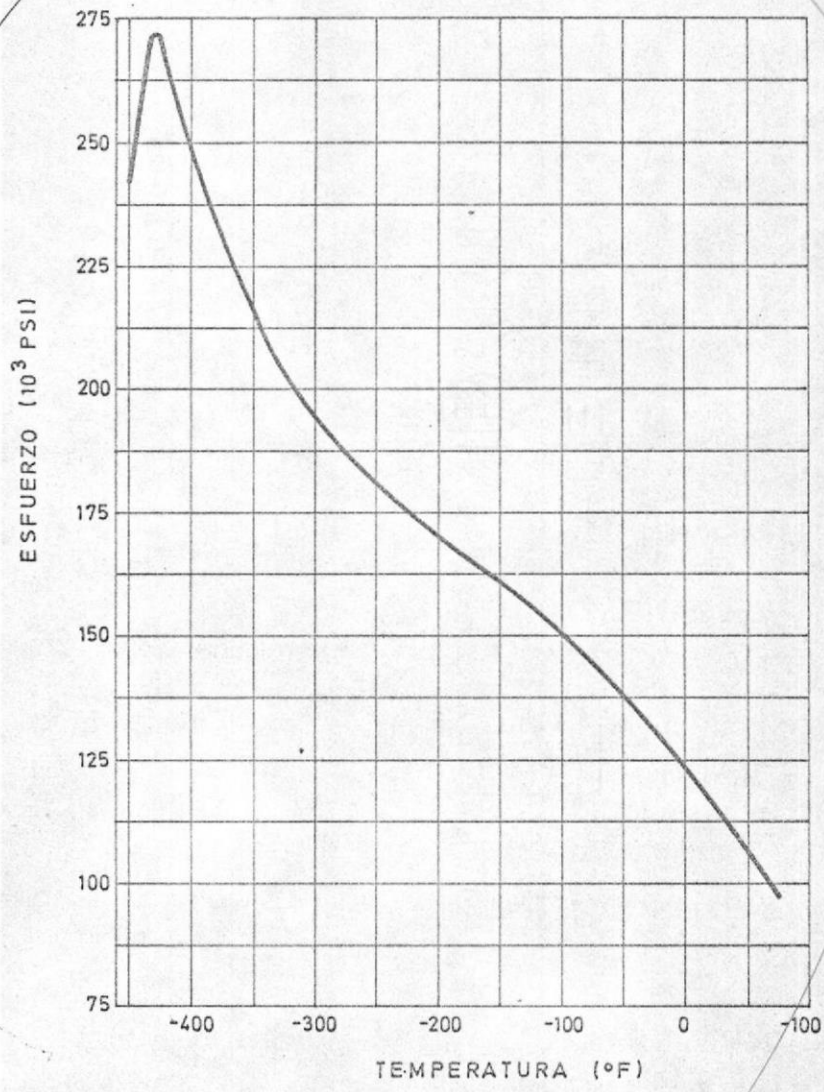


DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACION
DEL ACERO INOXIDABLE 304

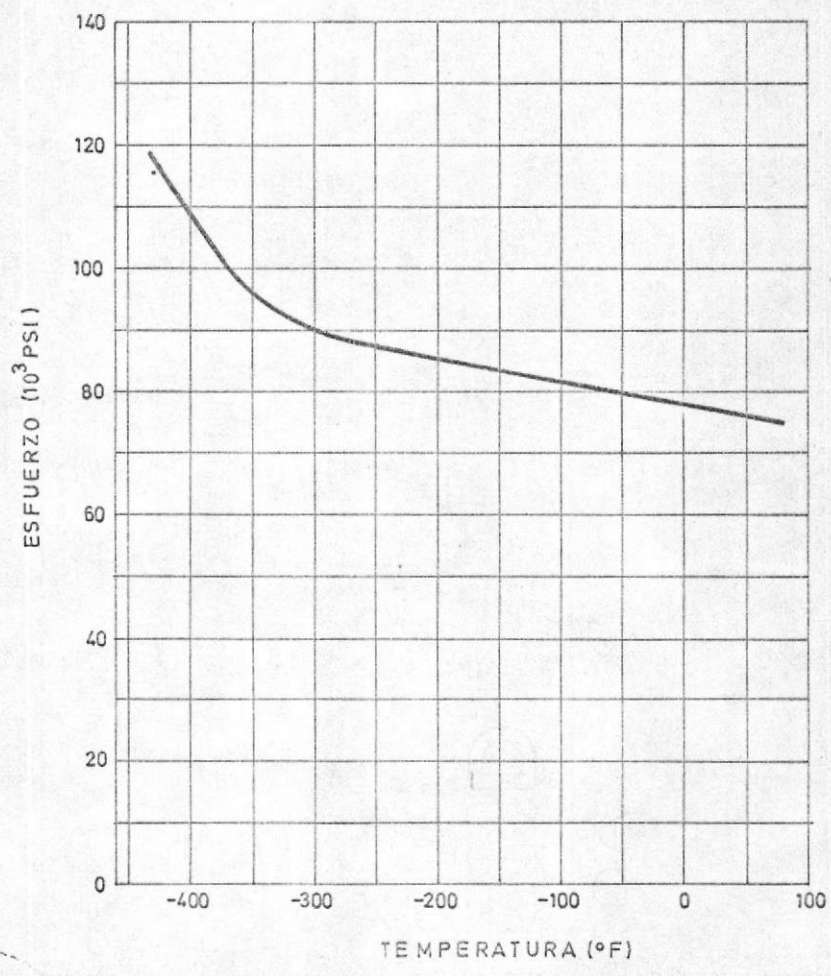




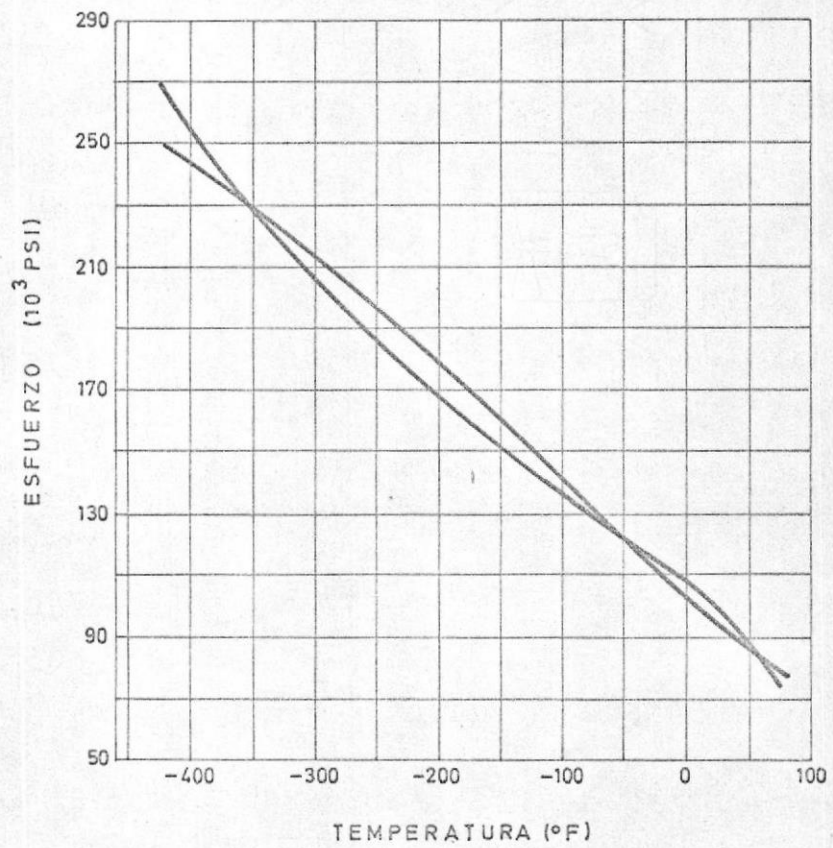
ESFUERZO DE FLUENCIA DEL ACERO
INOXIDABLE 304



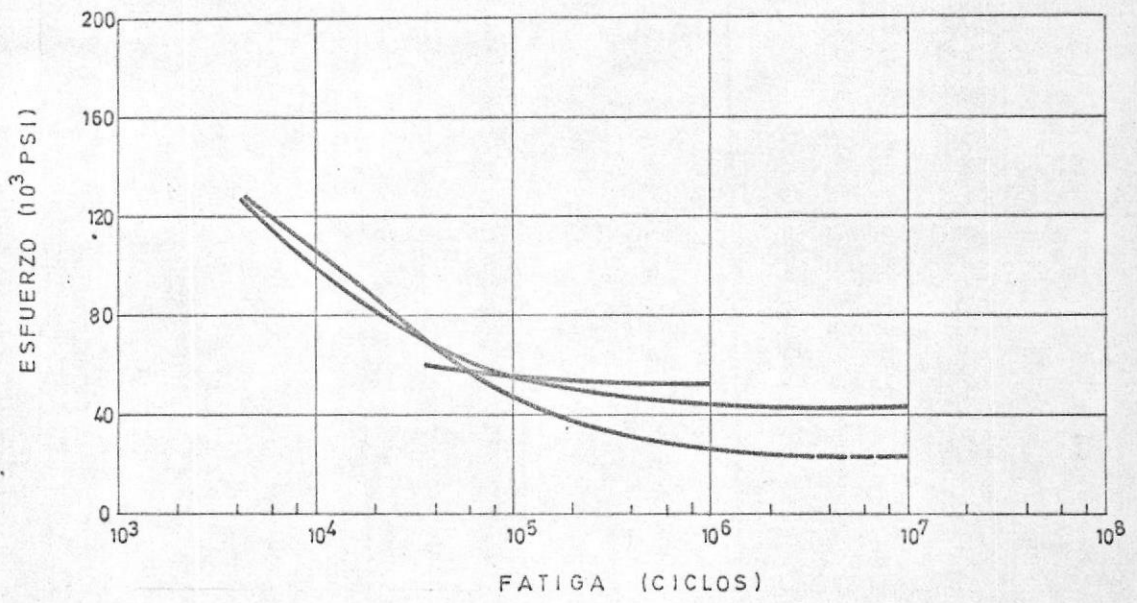
ESFUERZO DE ROPTURA DEL ACERO
INOXIDABLE 304



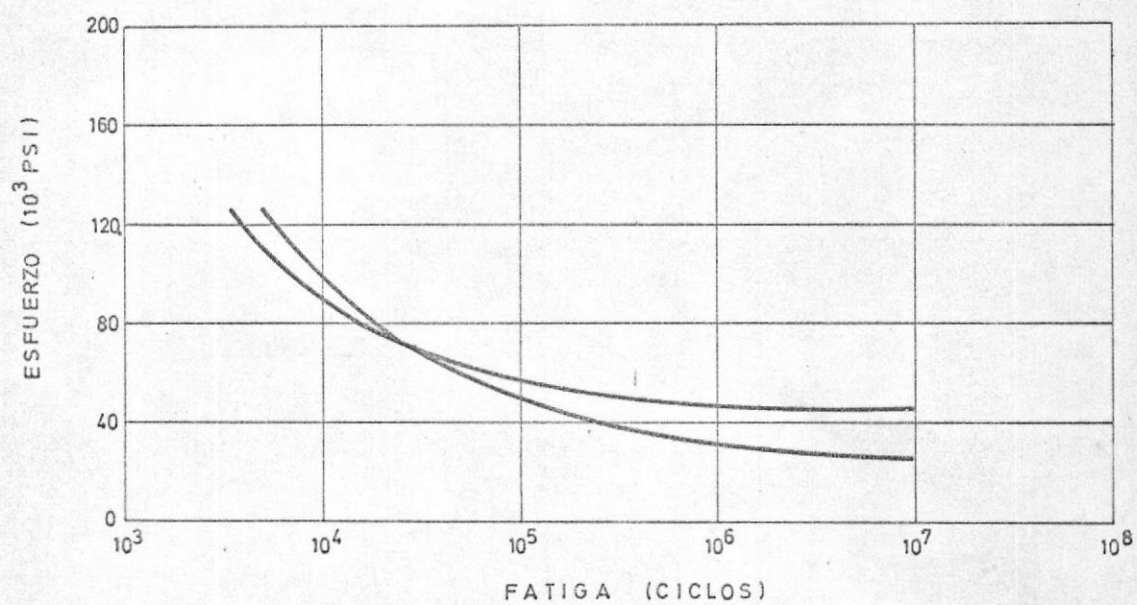
ESFUERZO DE COMPRESION DEL ACERO
INOXIDABLE 304.



ESFUERZO DE RUPTURA DE LA SOLDADURA
DE ACERO INOXIDABLE 304

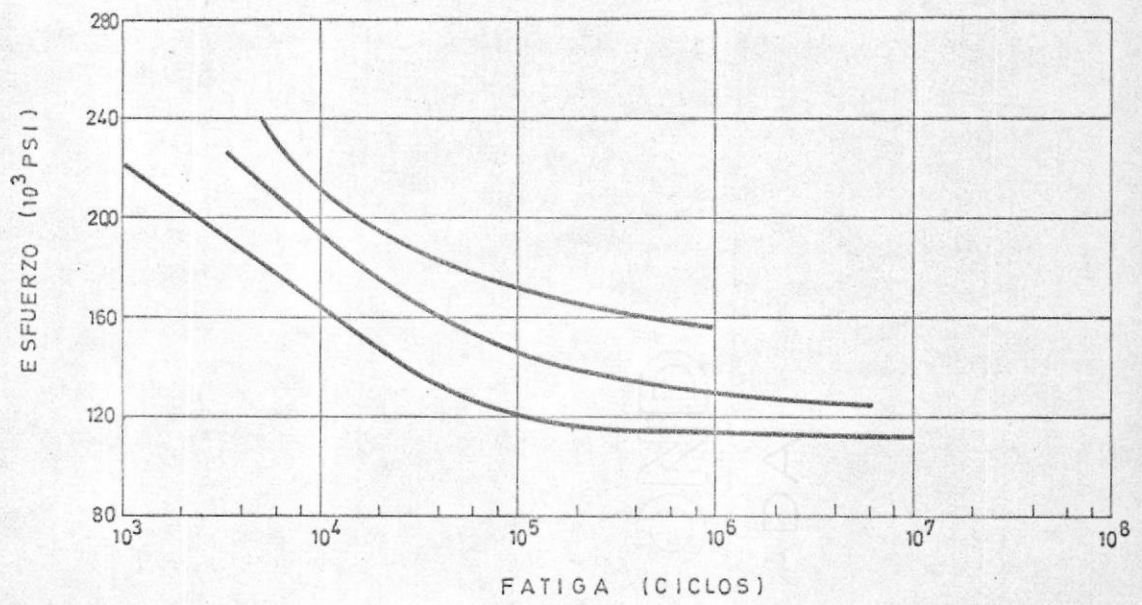


FATIGA DE LA MUESCA DEL ACERO
INOXIDABLE 304

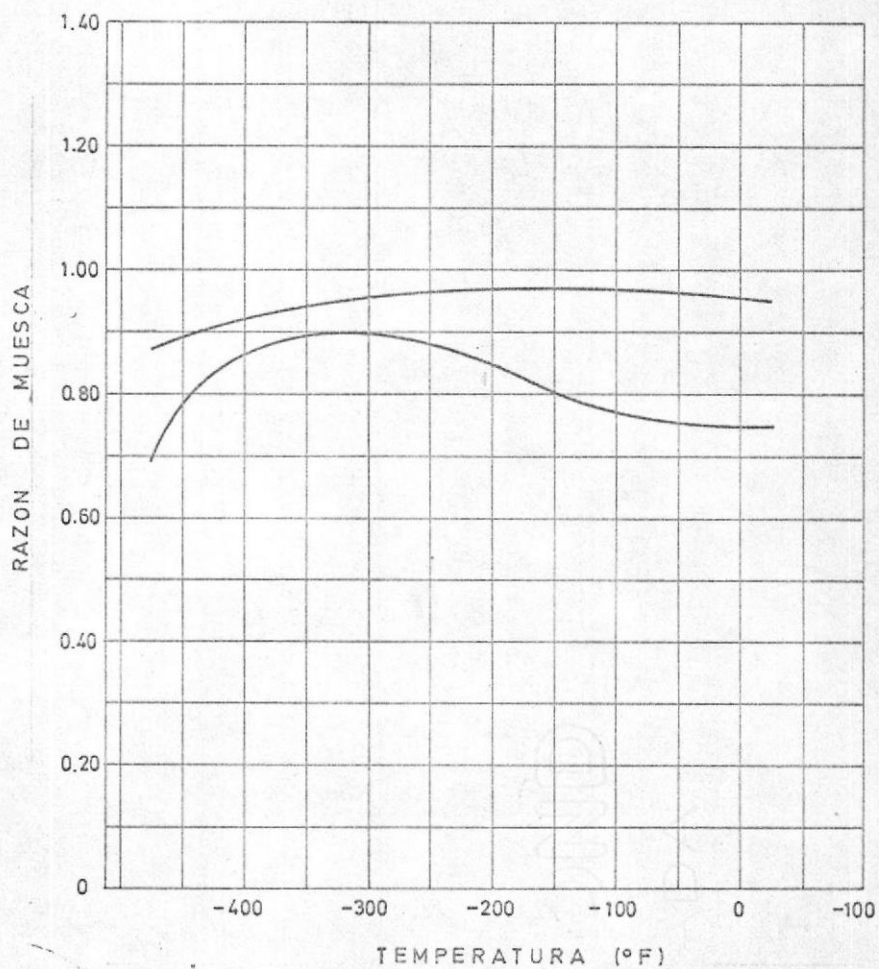


FATIGA DE LA MUESCA DEL ACERO
INOXIDABLE 304



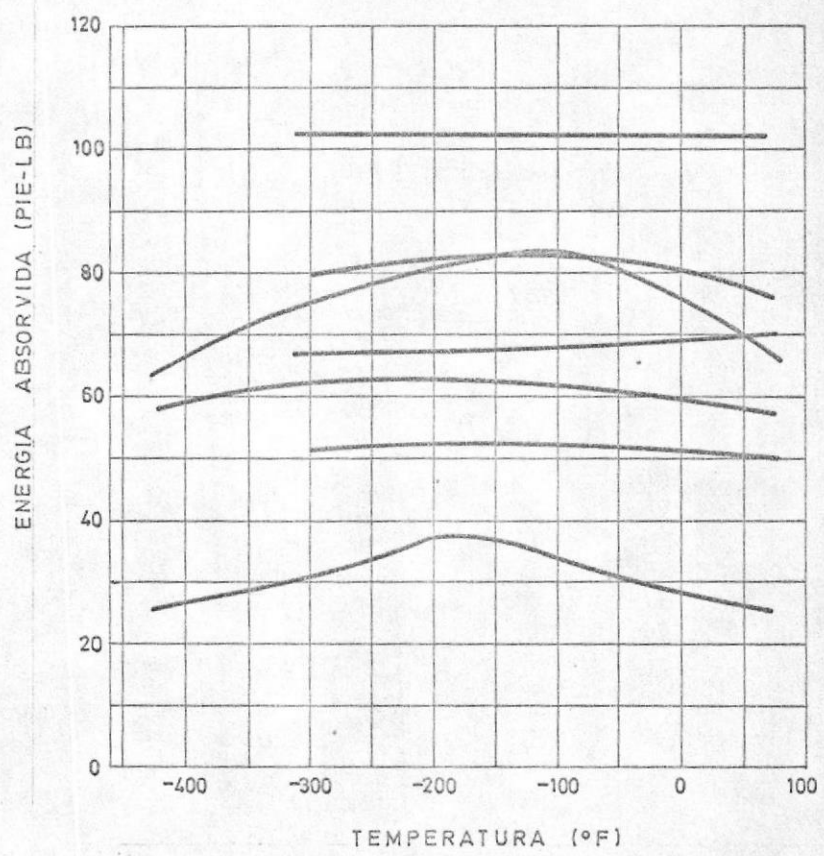


RESISTENCIA A LA FATIGA DEL ACERO
INOXIDABLE 304

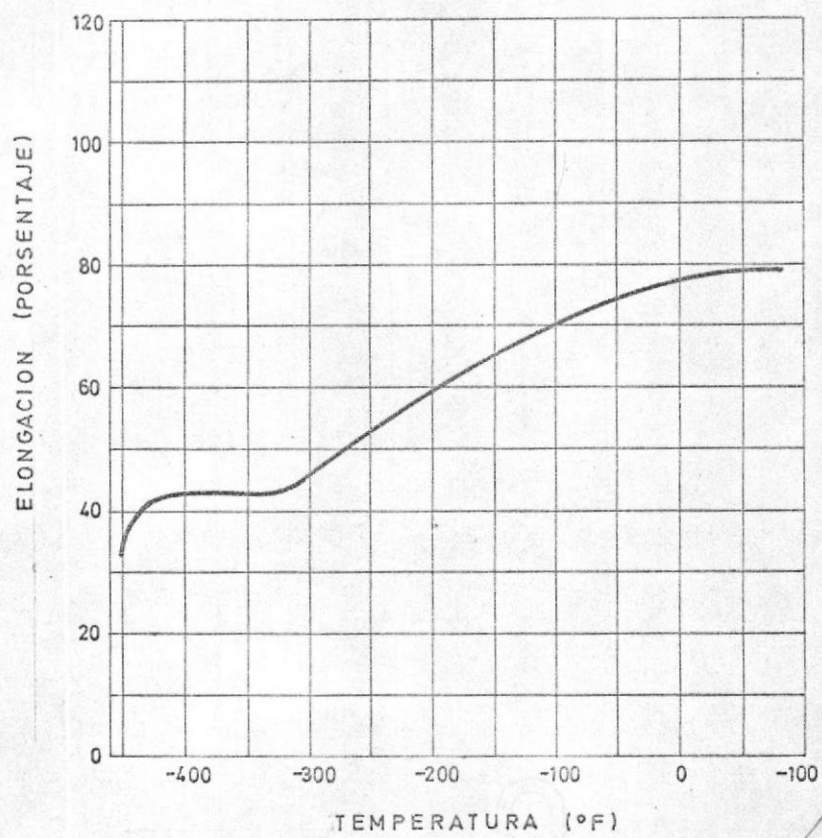


SENSITIVIDAD DE LA MUESCA DEL ACERO INOXIDABLE 304

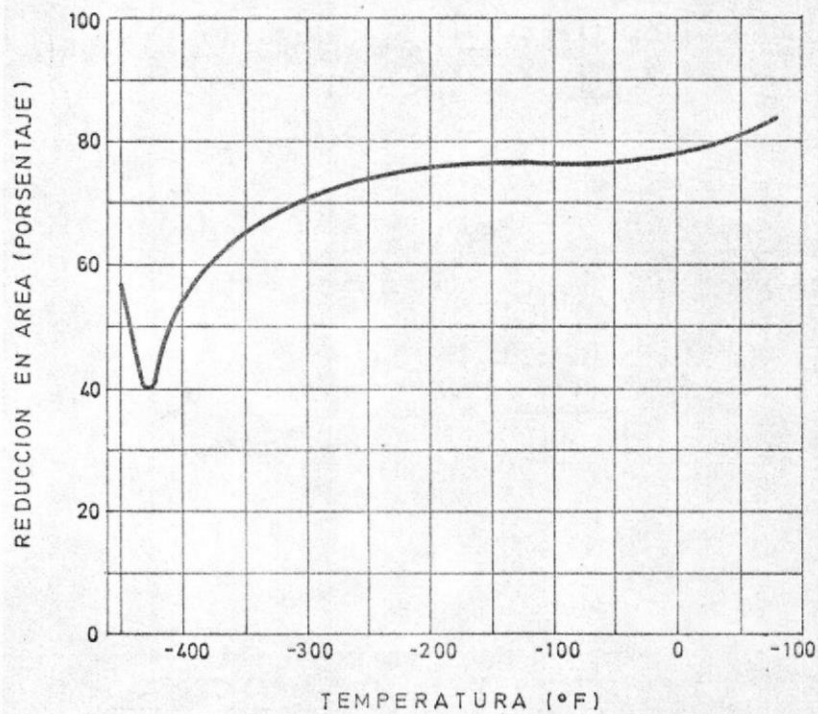




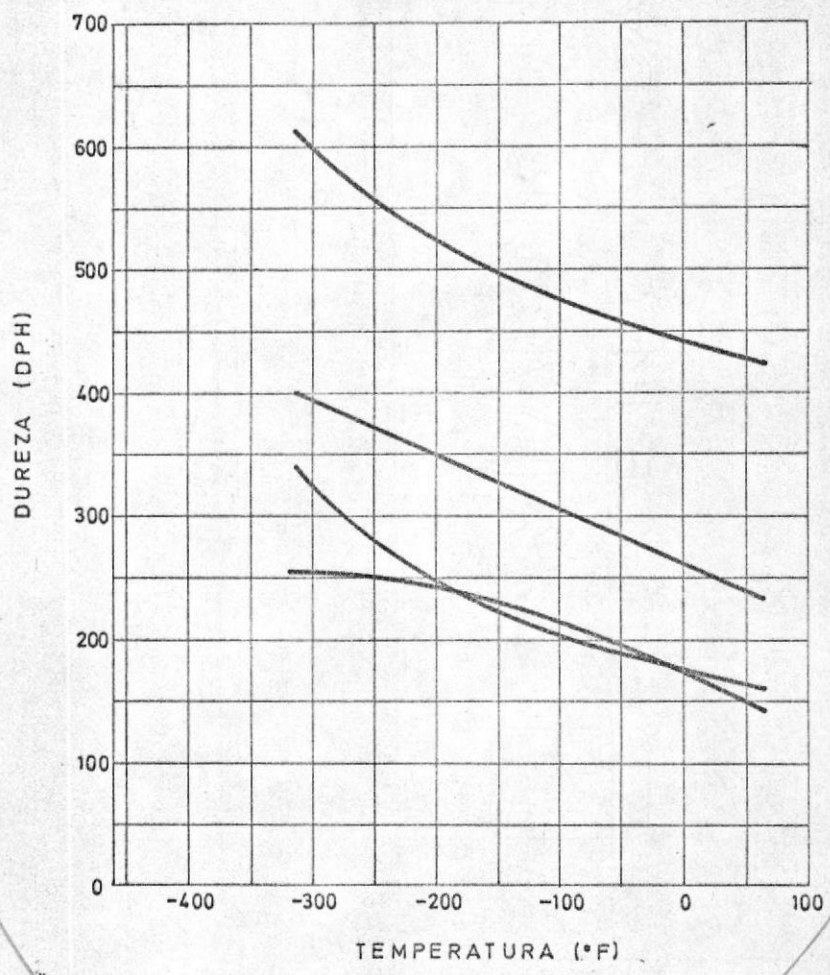
RESISTENCIA AL IMPACTO DEL ACERO
INOXIDABLE 304



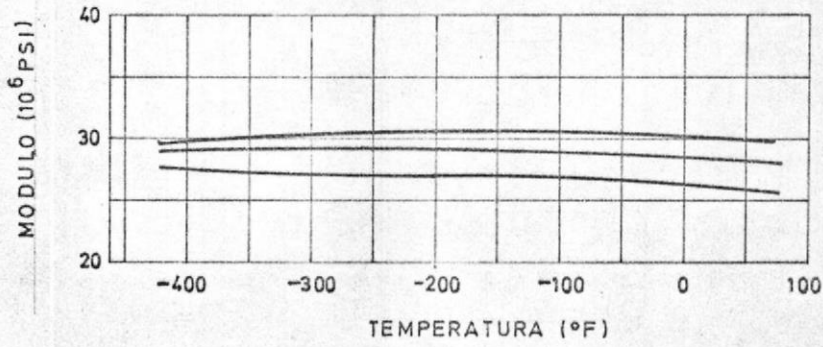
ELONGACION DEL ACERO INOXIDABLE 304



REDUCCION EN AREA DEL ACERO INOXIDABLE
304

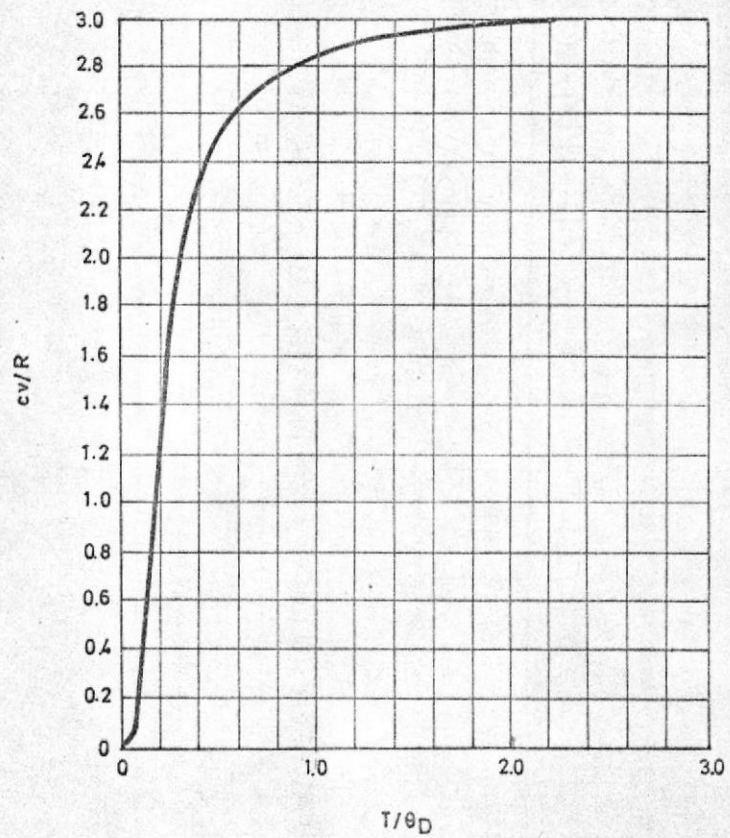


DUREZA DEL ACERO INOXIDABLE 304

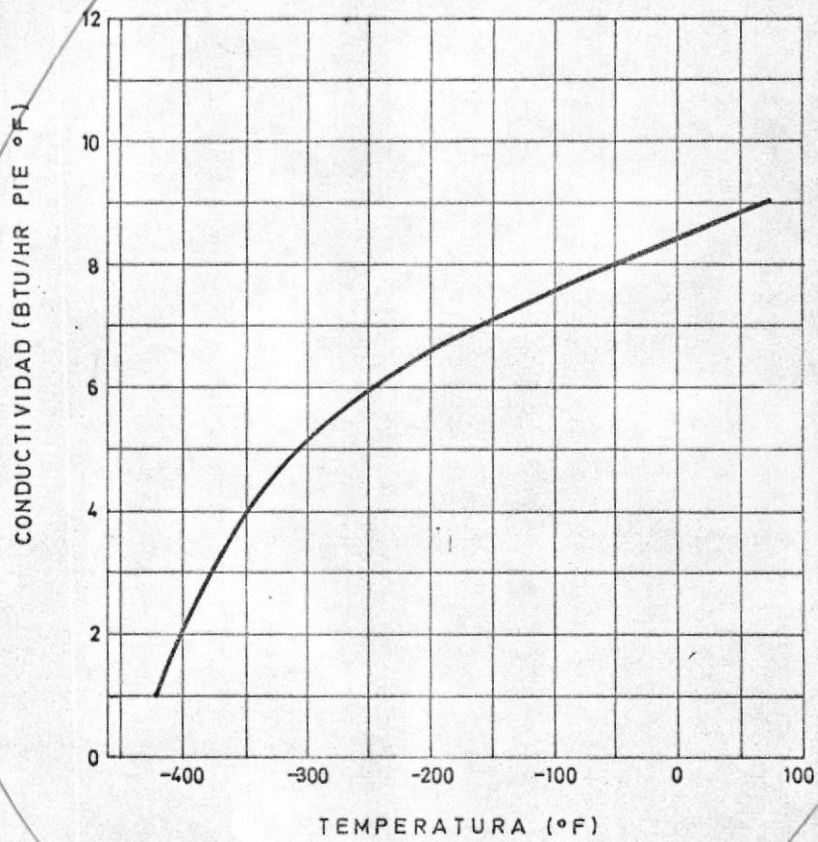


MODULO DE ELASTICIDAD DEL ACERO
INOXIDABLE 304

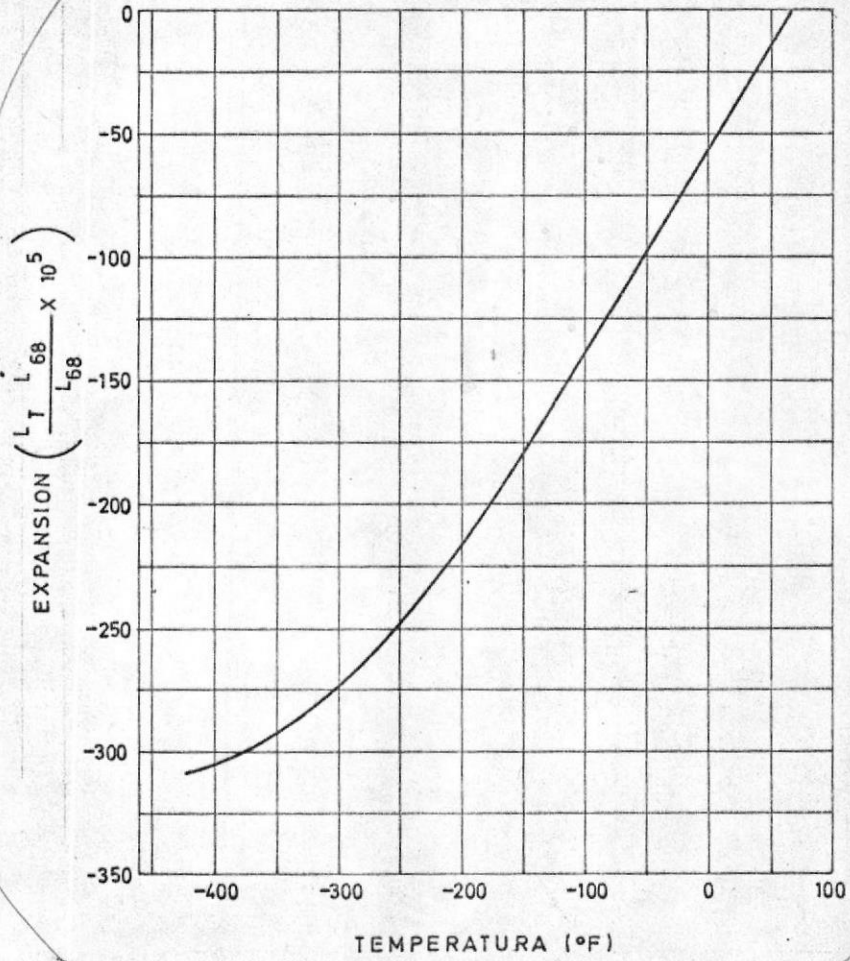




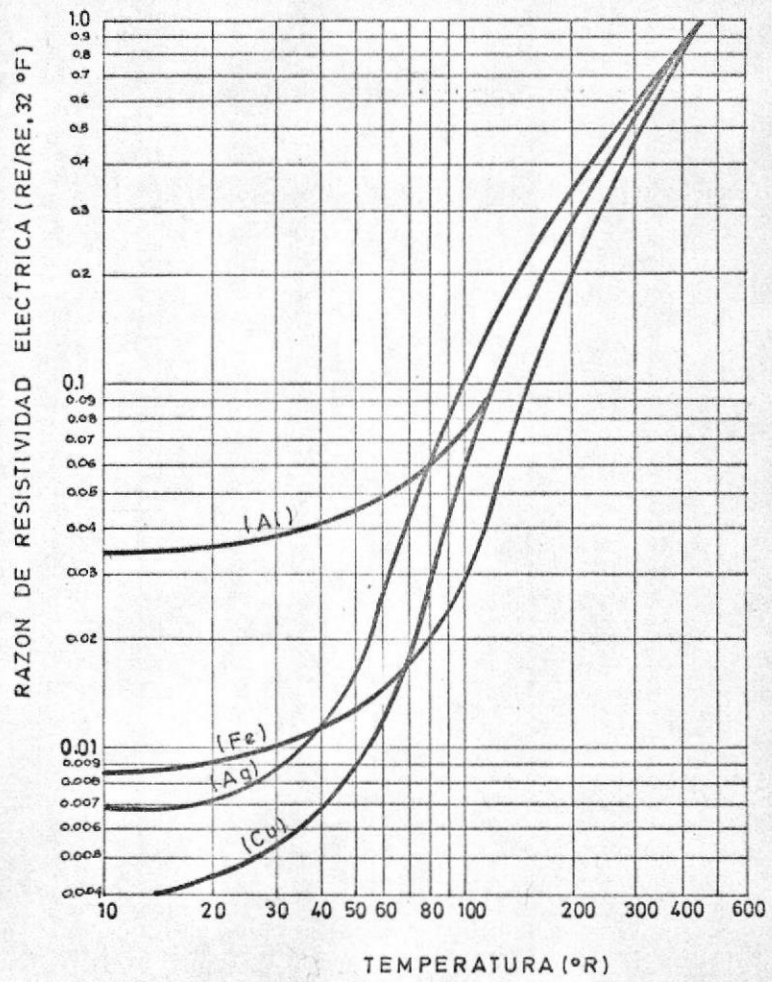
FUNCIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO DE DEBYE

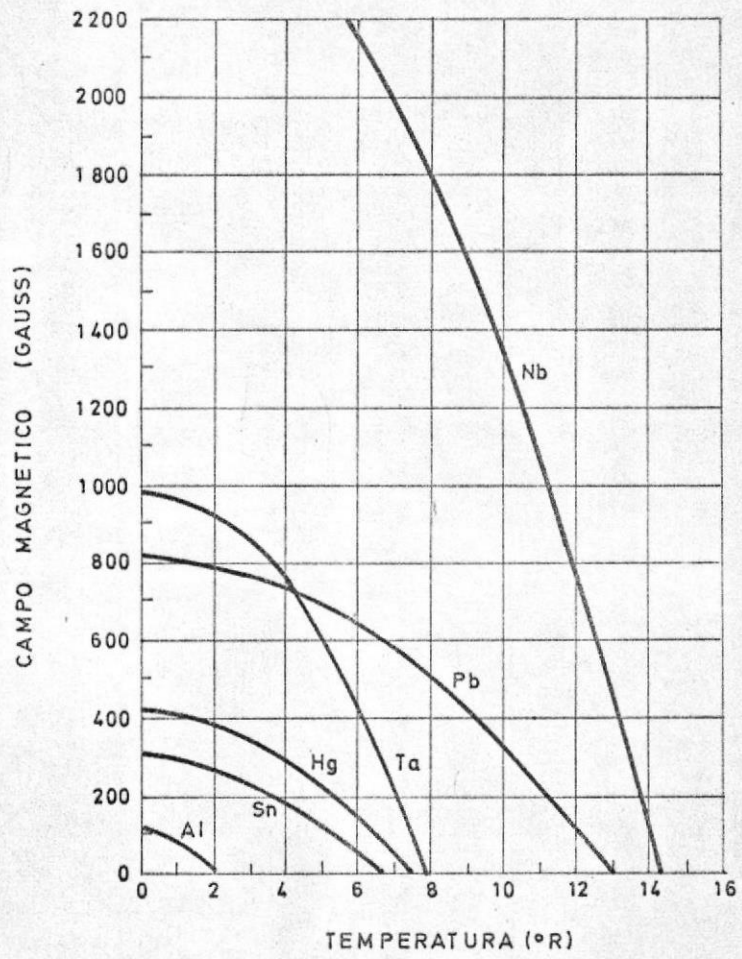


CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL ACERO
INOXIDABLE 304

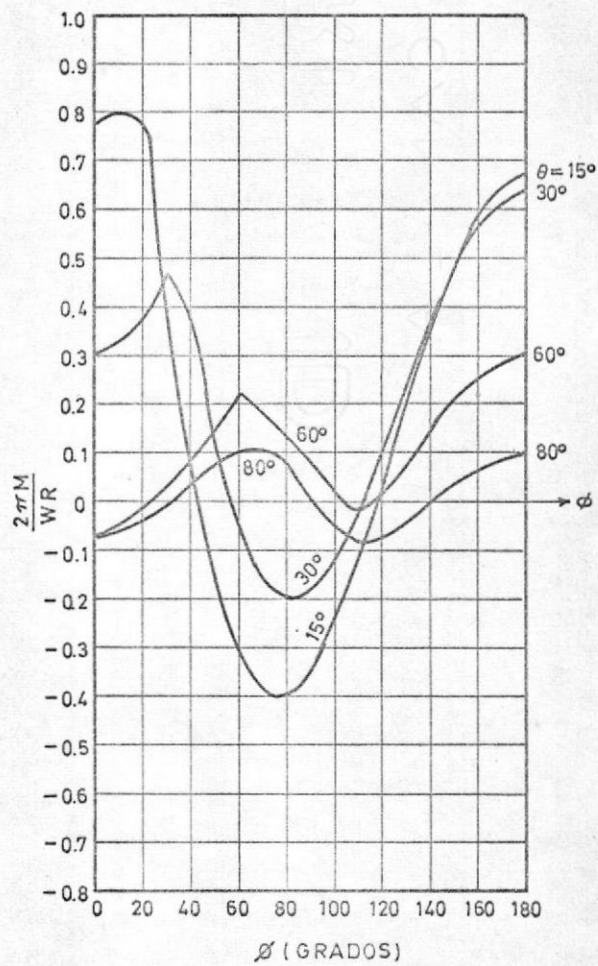


EXPANSION TERMICA DE ACERO INOXIDABLE
304



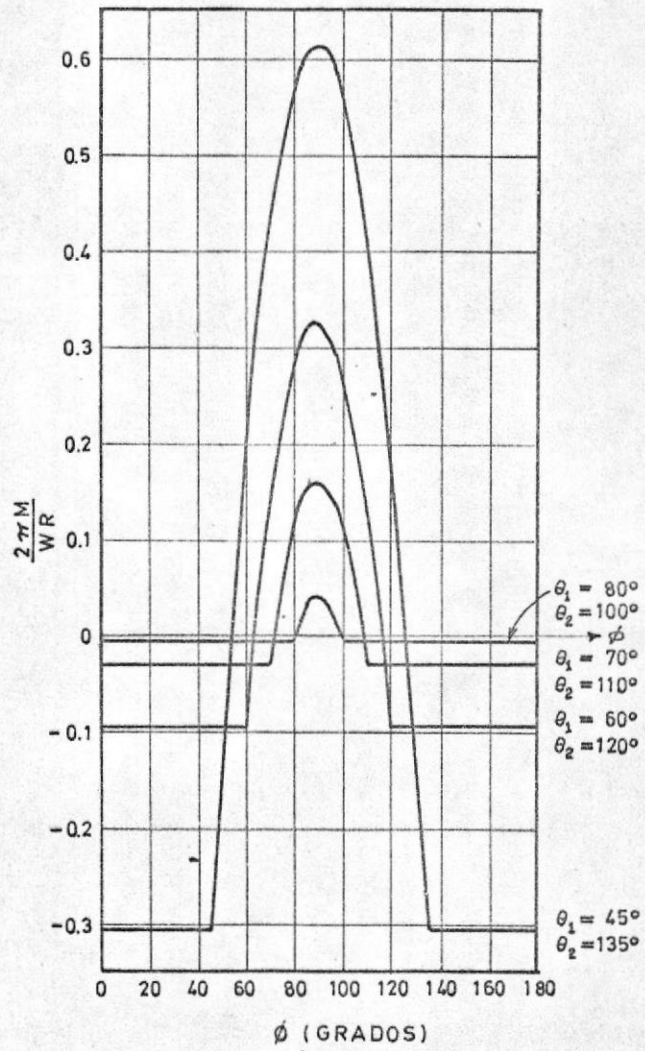


CAMPO DE ENTRADA PARA SUPERCONDUCTORES

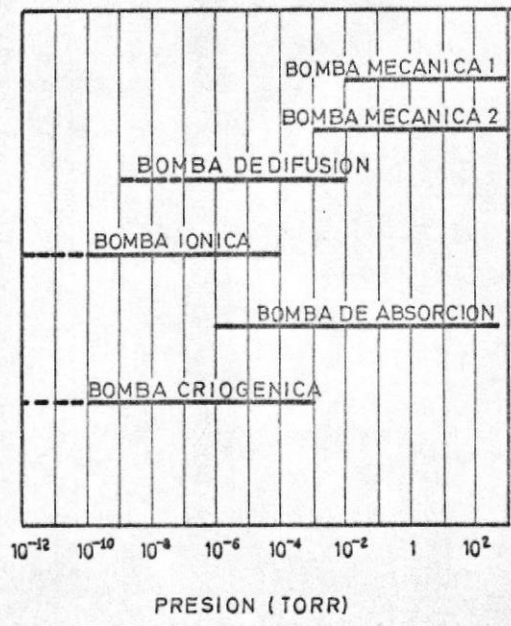


CURVA DEL MOMENTO DE FLEXION
 PARA ANILLOS DE RIGIDEZ EN LA
 NAVE DE PRESION INTERIOR.

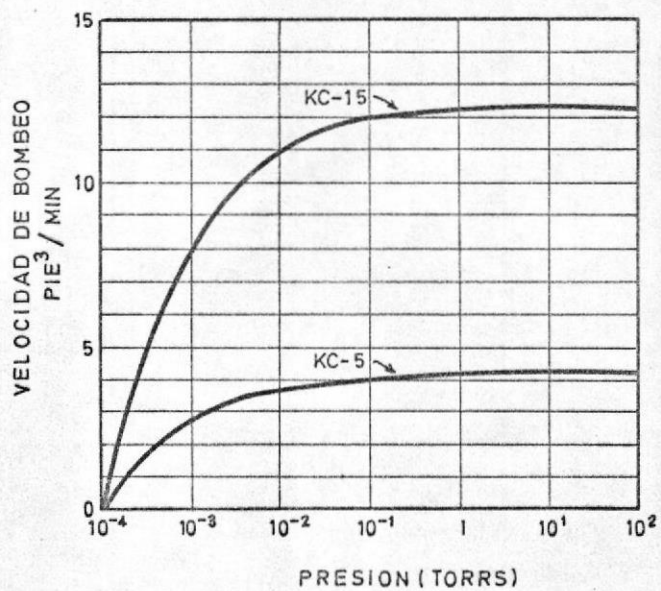




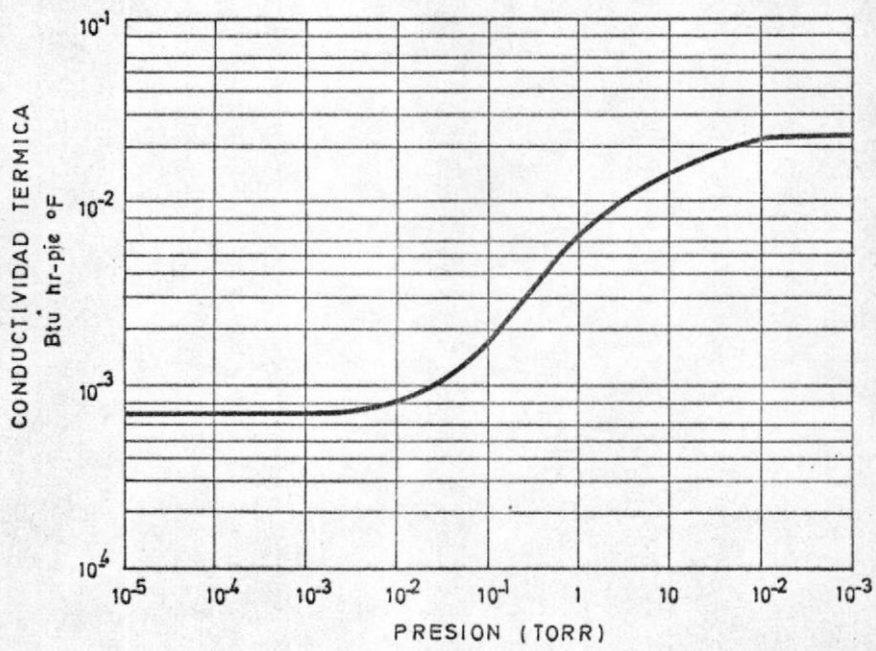
CURVA DEL MOMENTO DE FLEXION PARA EL ANILLO DE SOPORTE EN LA NAVE DE PRESION EXTERIOR.



RANGO DE OPERACION DE DIFERENTES BOMBAS DE VACIO

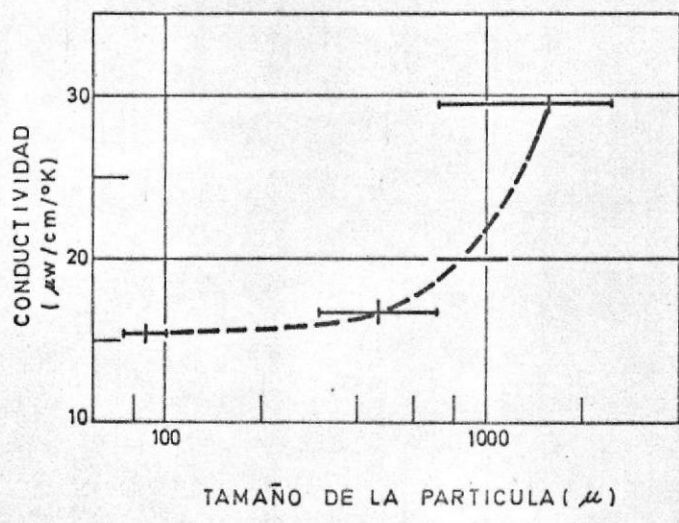


CURVAS DE VELOCIDAD DE BOMBEO PARA
BOMBAS MECANICAS

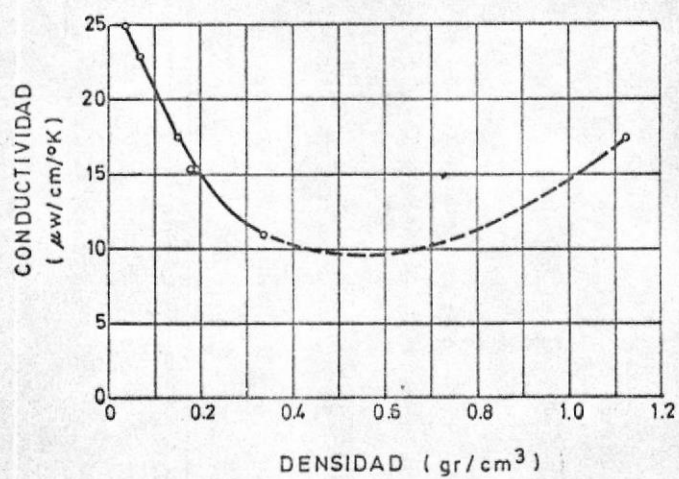


CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA PERLITA EXPANDIDA

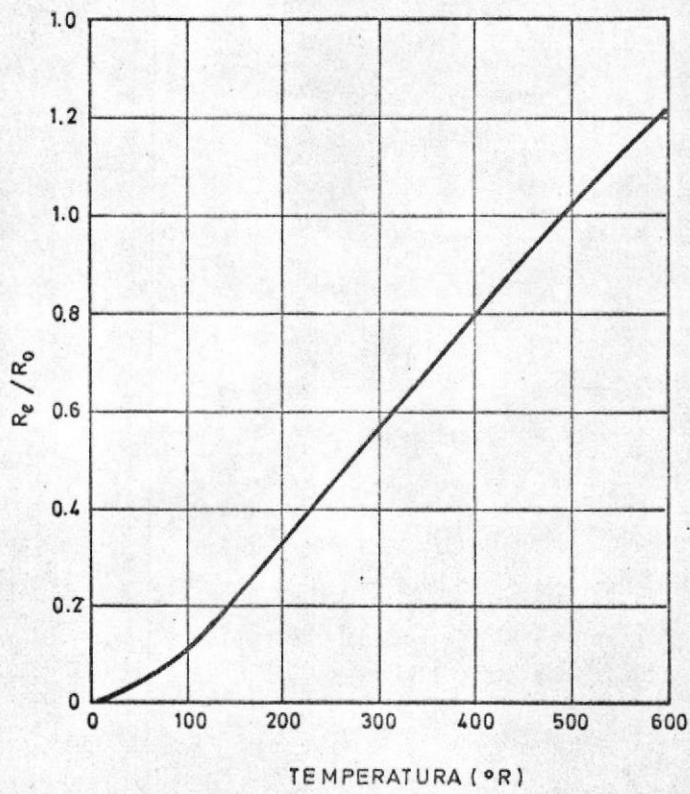




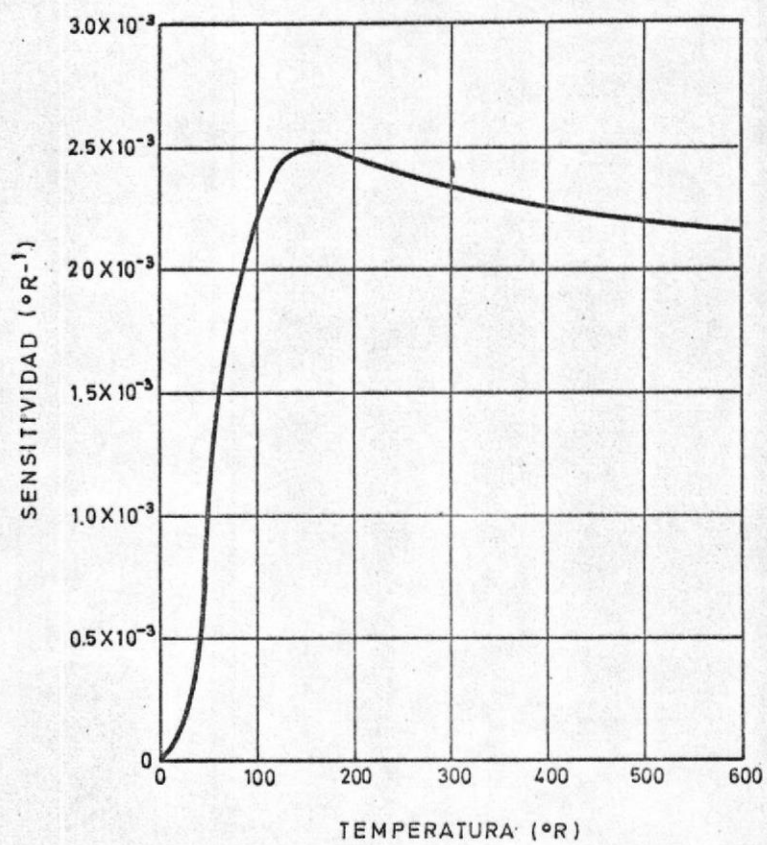
CONDUCTIVIDAD DE LA PERLITA EXPANDIDA



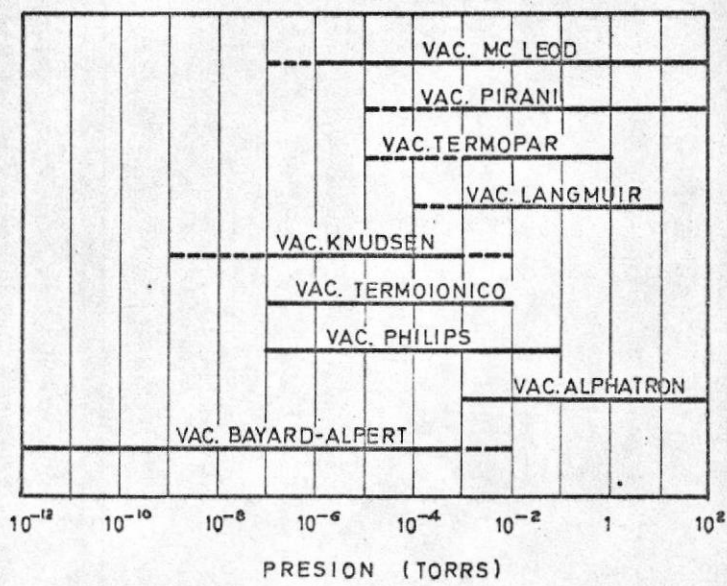
CONDUCTIVIDAD DE LA PERLITA EXPANDIDA



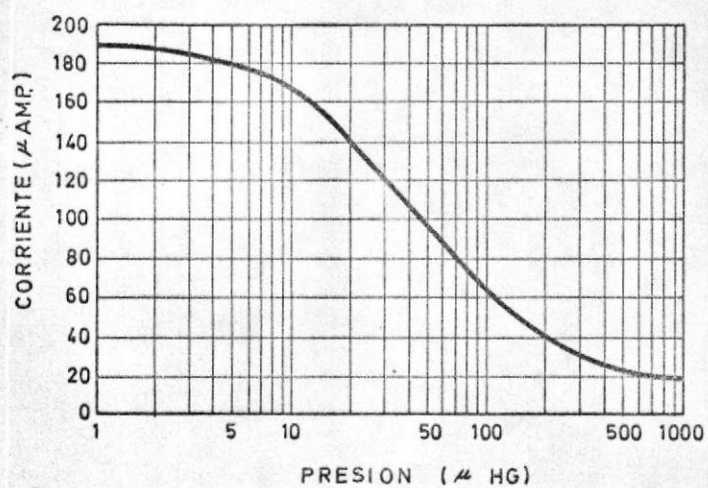
RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL PLATINO



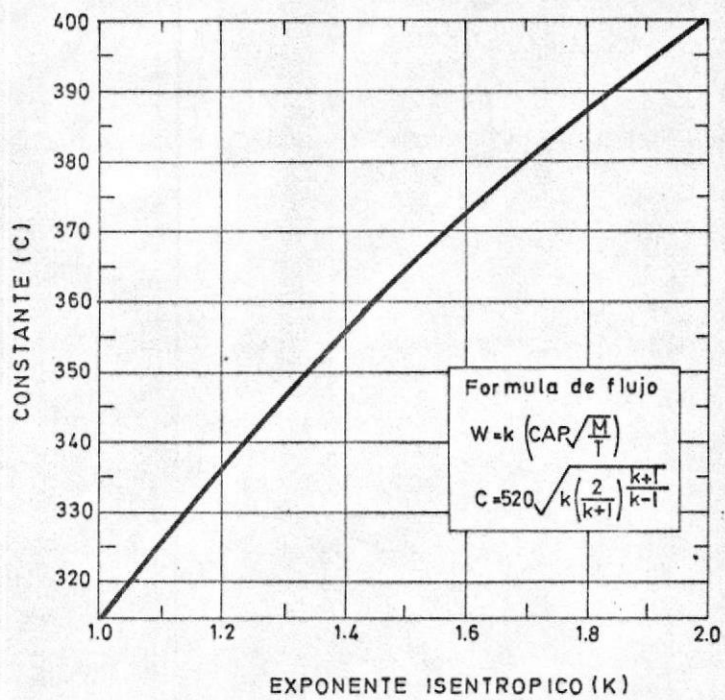
SENSITIVIDAD DEL TERMOMETRO DE RESISTENCIA DEL PLATINO.



RANGO DE OPERACION DE LOS VACUOMETROS

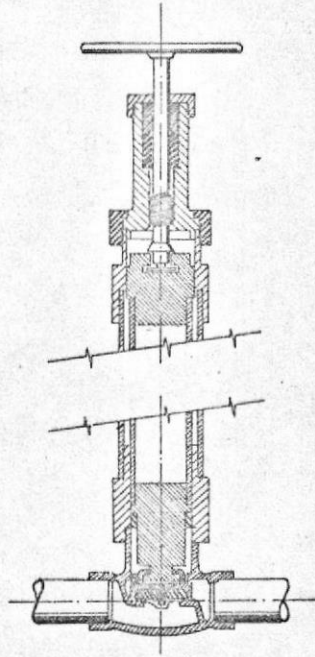


CURVA DE CALIBRACION PARA VACUOMETRO
DE TERMOPAR

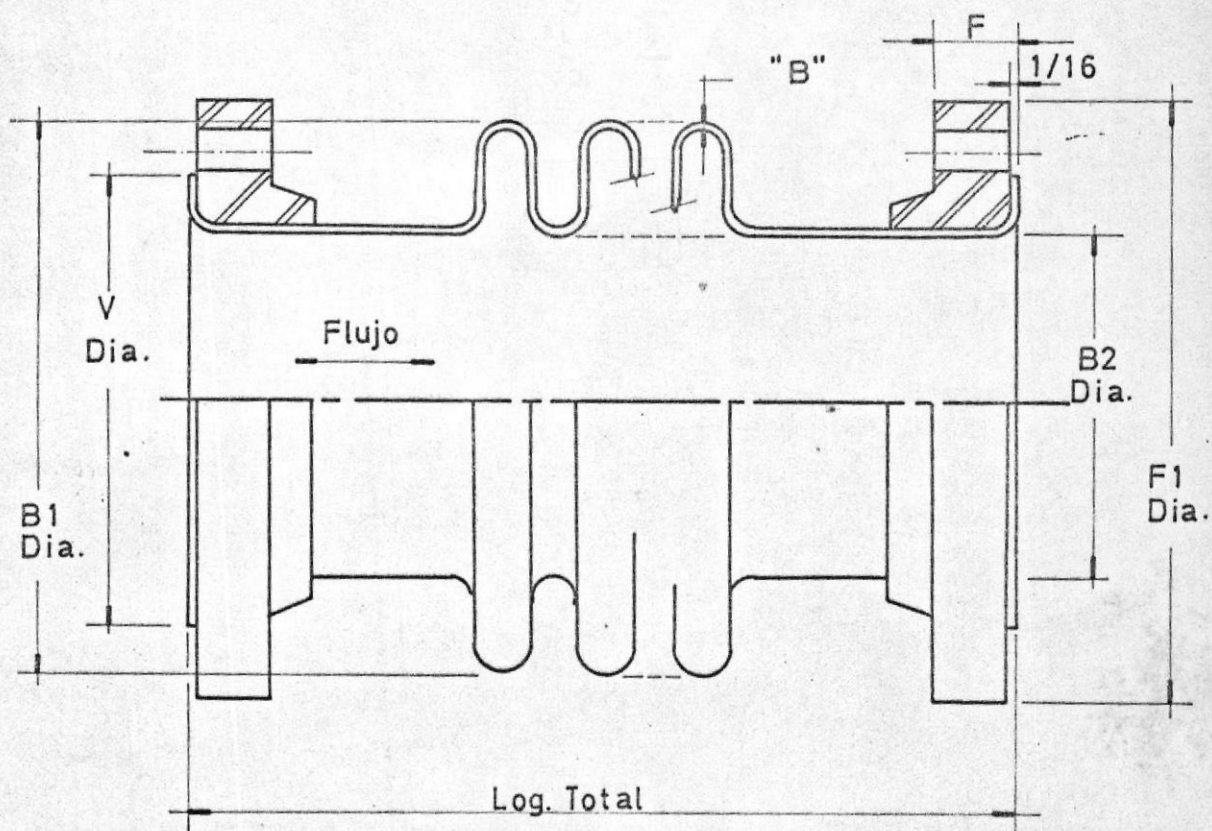


CURVA DEL FACTOR DE EXPANSION

PLANOS

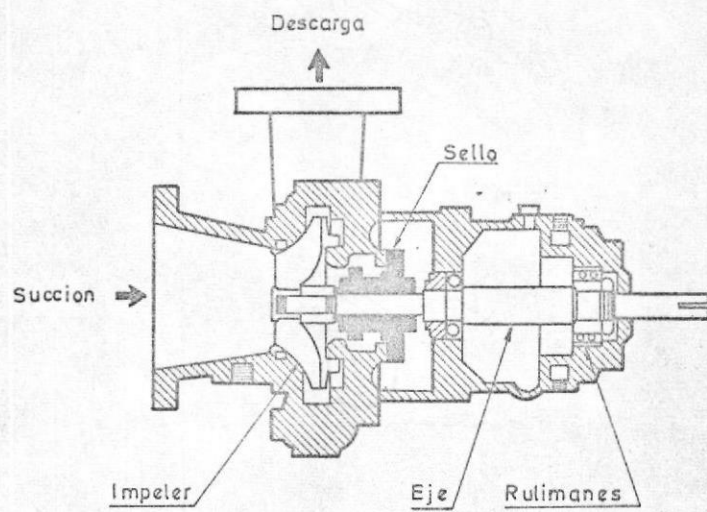


VALVULA DE VASTAGO
EXTENDIDO

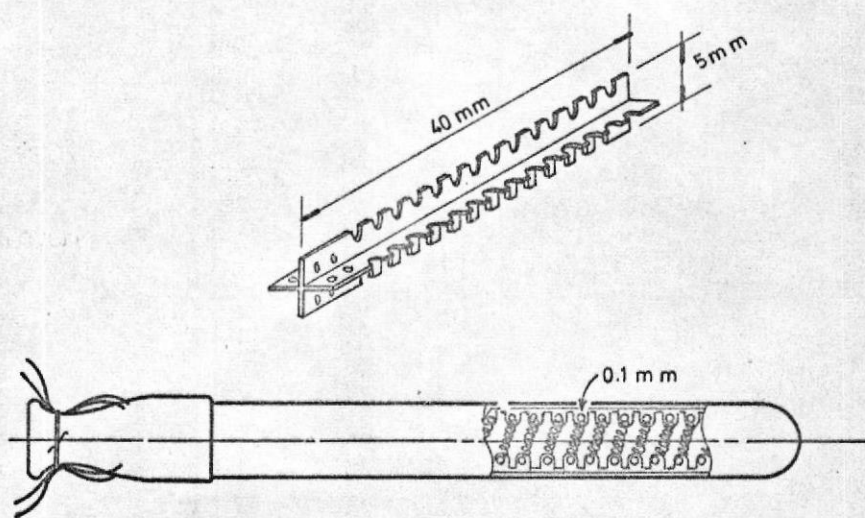


JUNTA DE EXPANSION

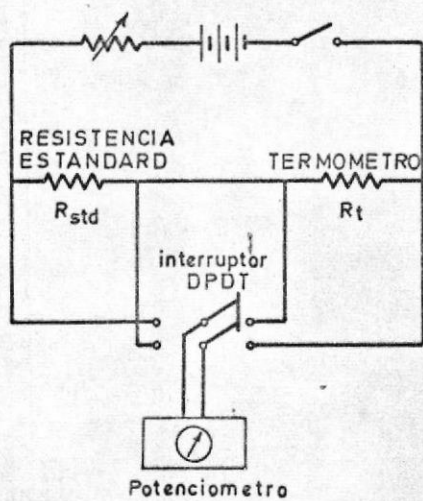




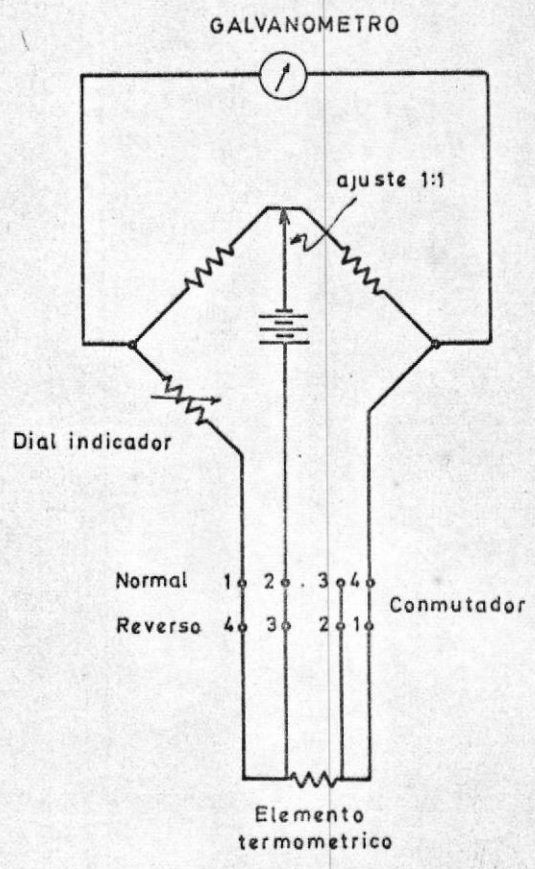
BOMBAS DE TRANSFERENCIA



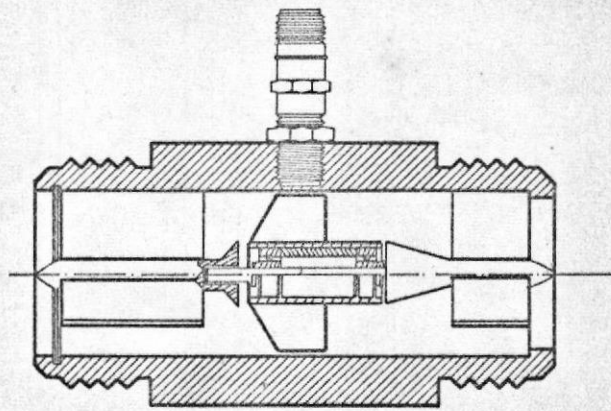
TERMOMETRO DE RESISTENCIA DE PLATINO



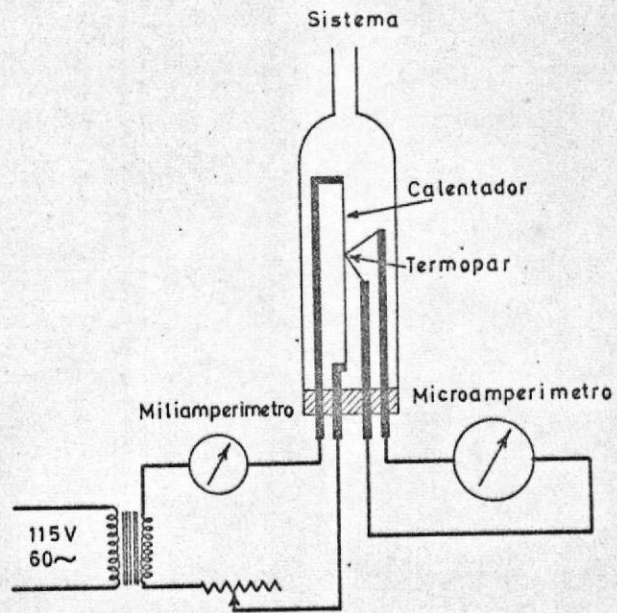
METODO DEL POTENCIOMETRO



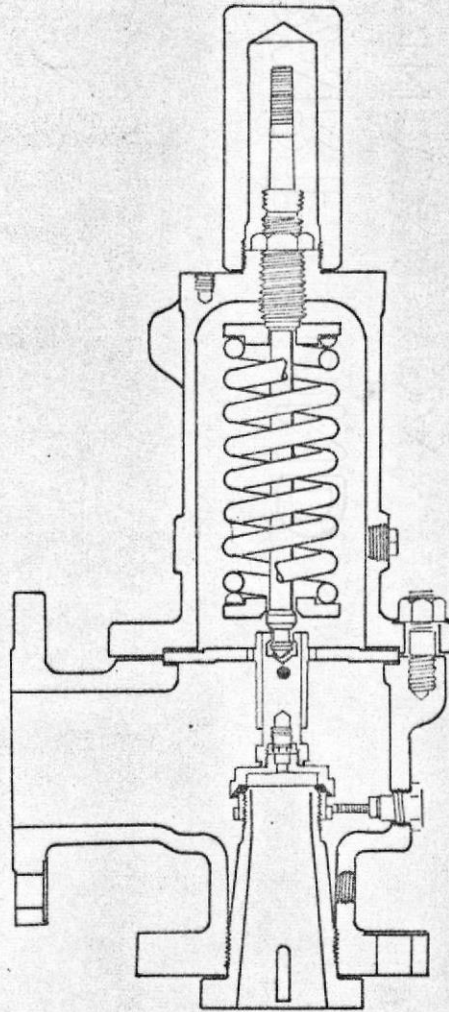
METODO DEL PUENTE MUELLER



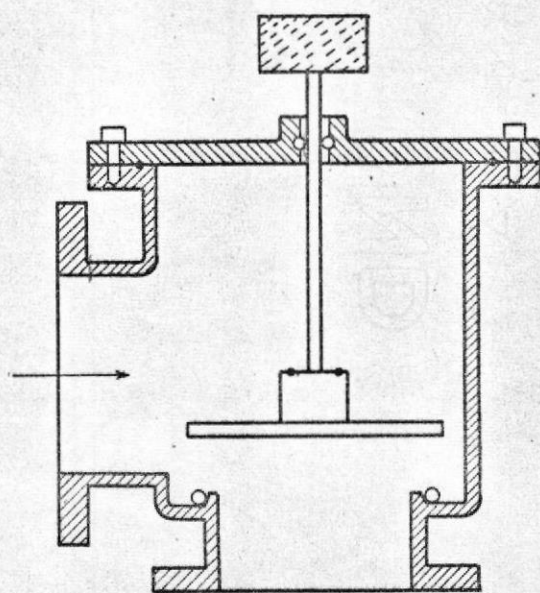
MEDIDOR DE FLUJO TIPO
TURBINA



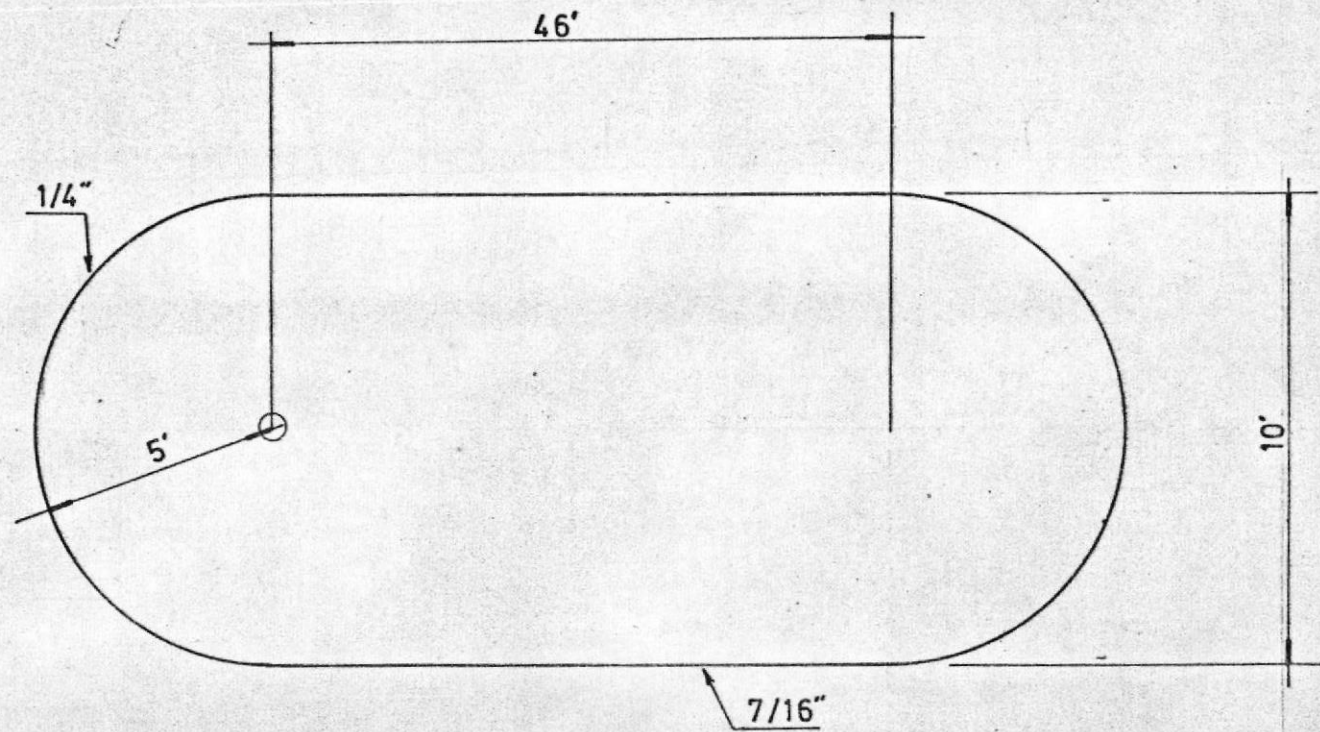
VACUOMETRO DE TERMOPAR



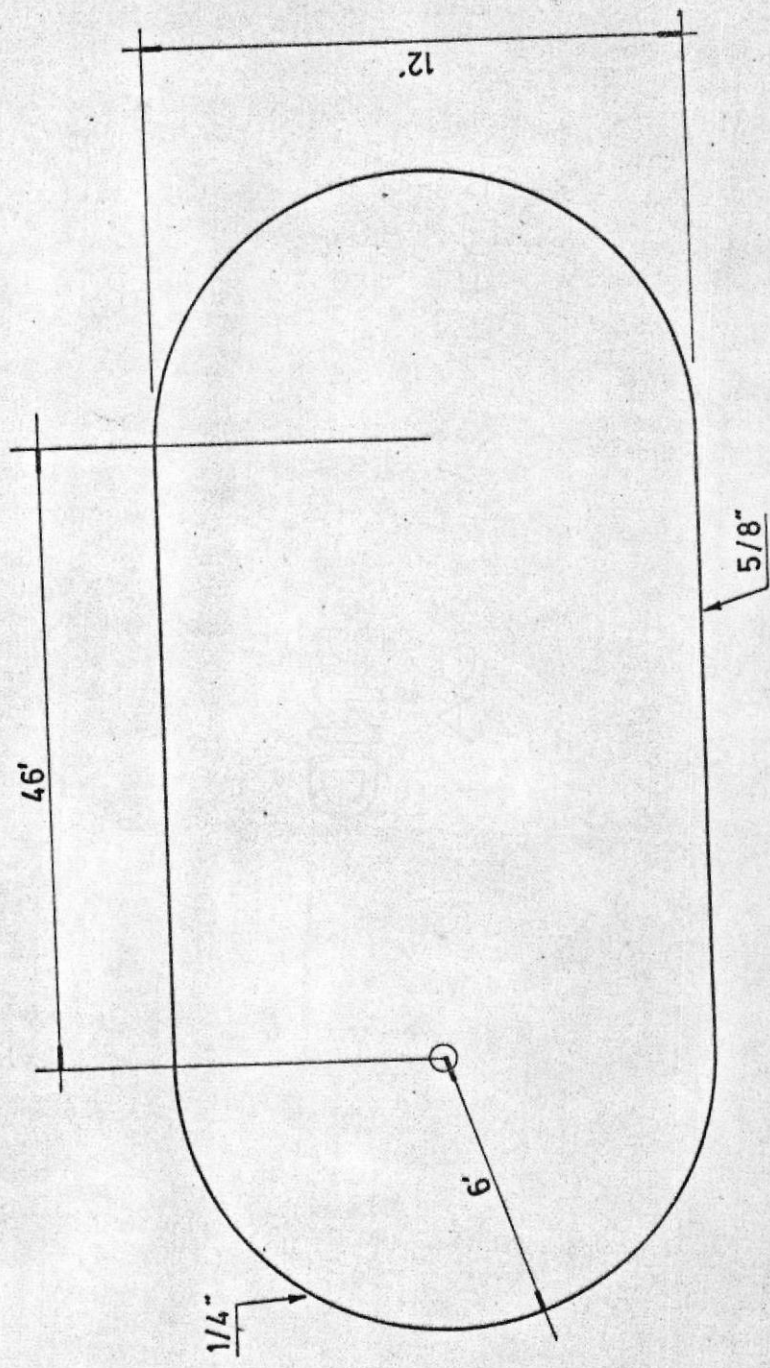
VALVULA DE SEGURIDAD



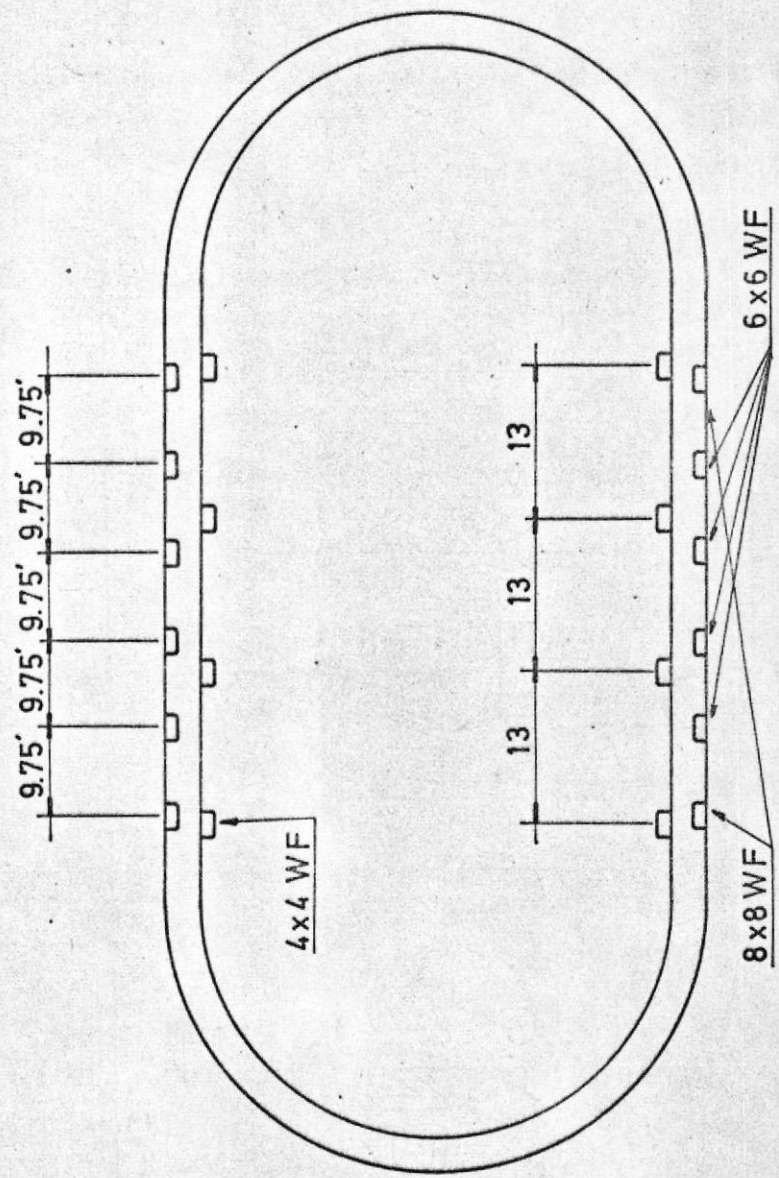
VALVULA EN ANGULO PARA
SISTEMA DE VACIO



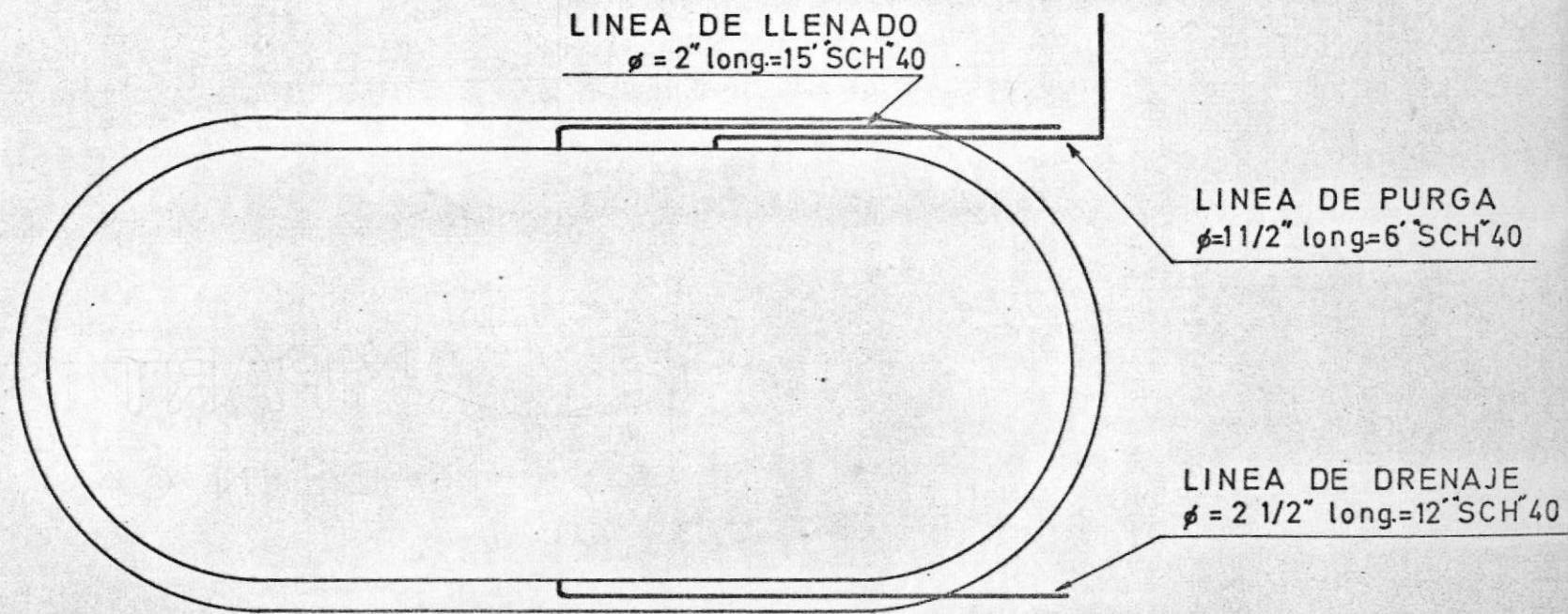
NAVE DE PRESION INTERIOR



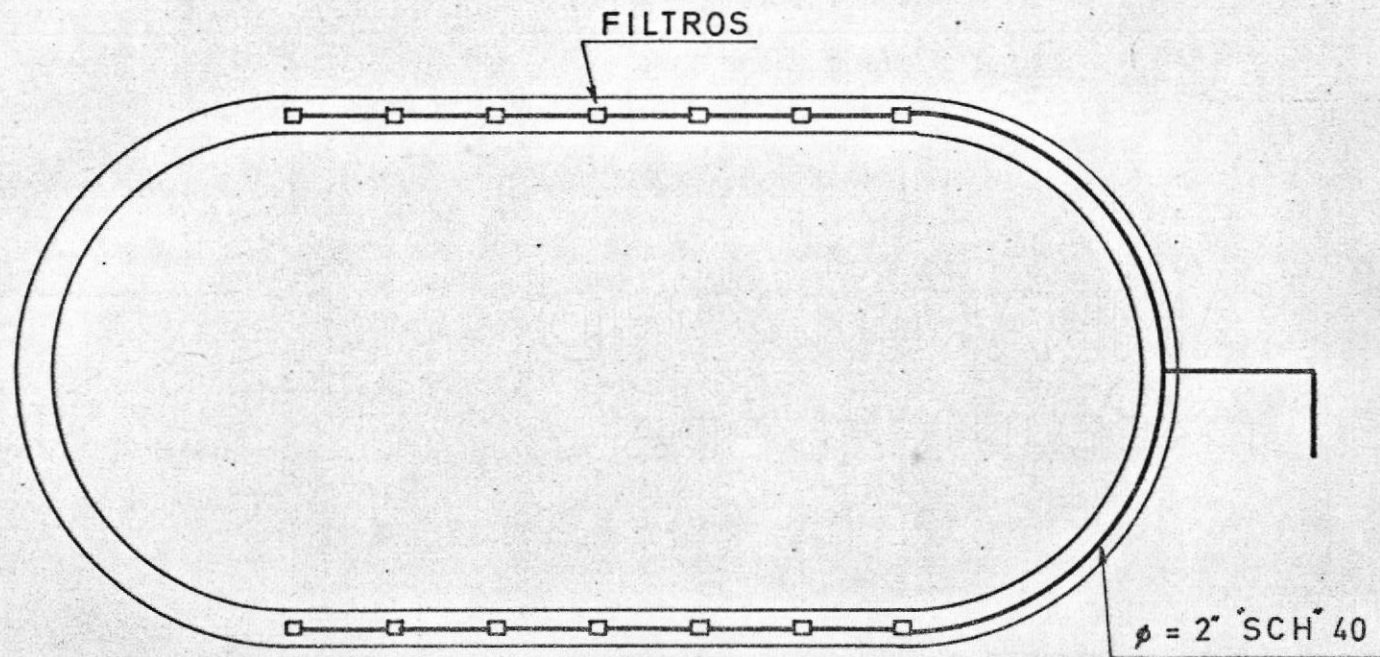
NAVE DE PRESION EXTERIOR



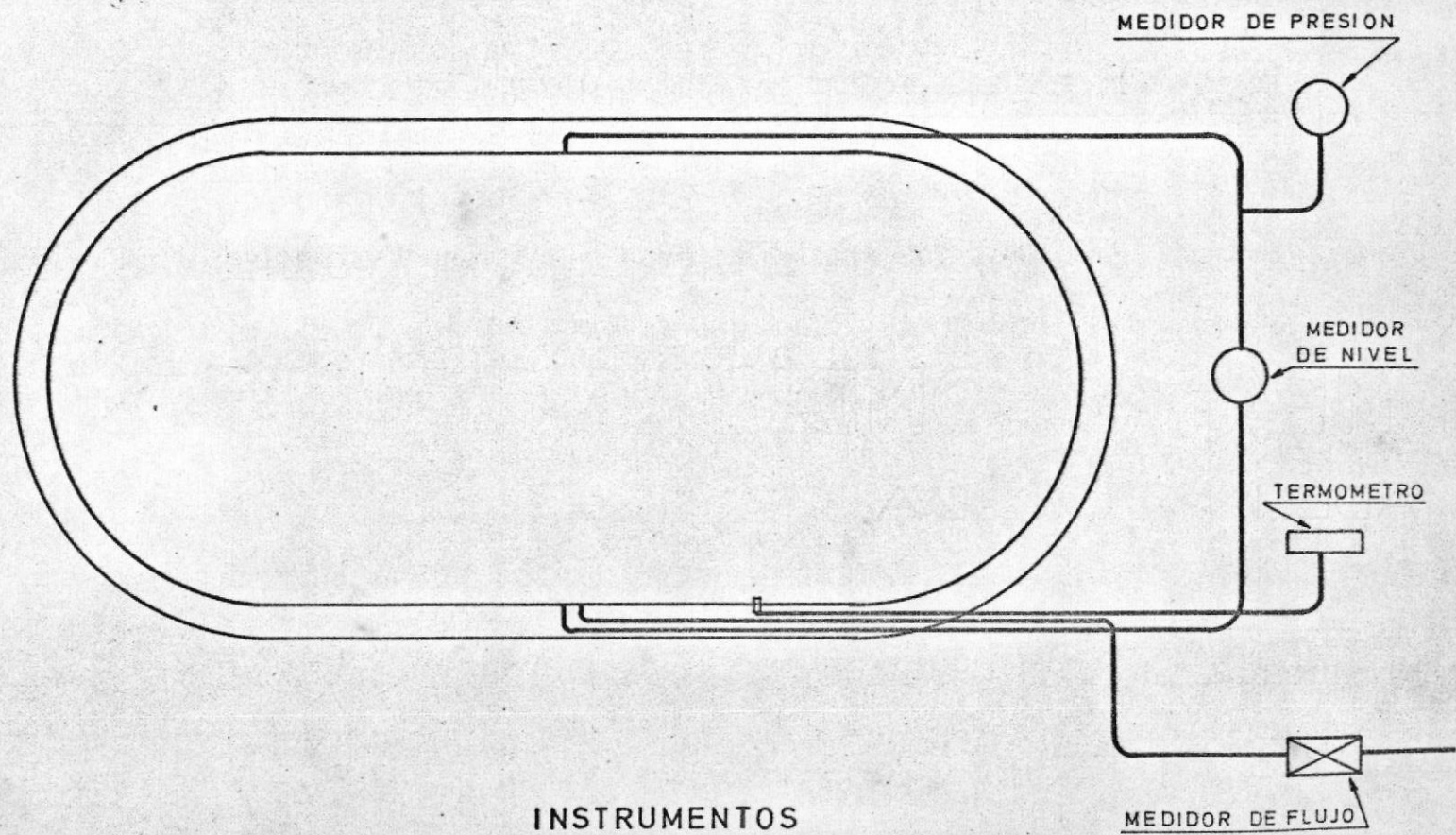
ANILLOS DE RIGIDEZ



LINEAS DE TRANSFERENCIA



SISTEMA DE VACIO



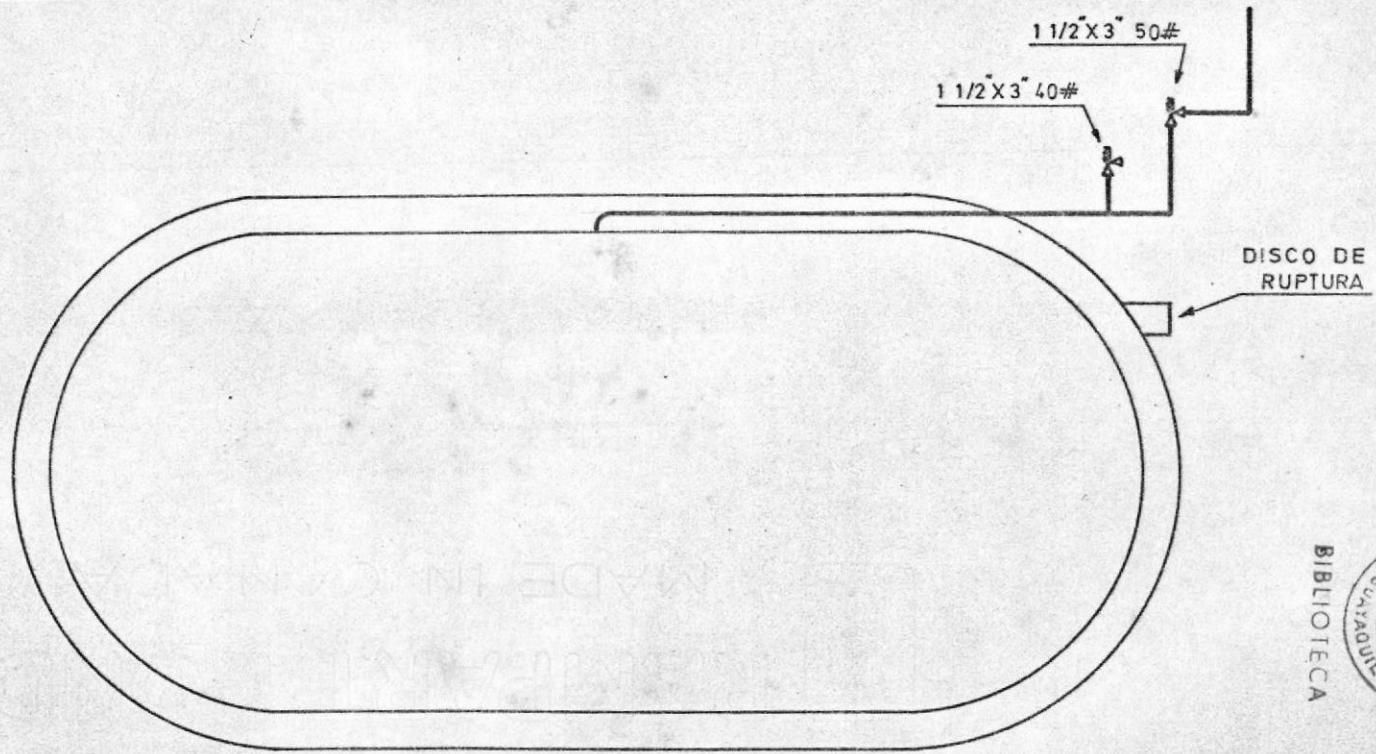
INSTRUMENTOS

MEDIDOR DE PRESION

MEDIDOR DE NIVEL

TERMOMETRO

MEDIDOR DE FLUJO



BIBLIOTECA



INSTRUMENTOS DE SEGURIDAD



BIBLIOTECA

BIBLIOGRAFIA

- W. VANCE Applied Cryogenic Engineering
- R. SCOTT Cryogenic Engineering
- W. VANCE Cryogenic Engineering
- R. BARROW Cryogenic Engineering System

*Ingreso Agosto 27/70.
Donación hecha por su autor
Hoja N° 0323
Año 2944
Valor 100,00*