

10  
25°



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA

“Diseño de Sartas  
de  
Perforación”

TESIS PROFESIONAL  
Que para obtener el Título de  
INGENIERO PETROLERO

Presenta:  
FERNANDO GONZALEZ RUBIO

Dir. de Tesis Dr. Daniel García Gavito

MEXICO, D. F.

1993

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

CAPITULO I.	INTRODUCCION.....	3
CAPITULO II.	SELECCION Y CARACTERISTICAS DE LAS BARENAS Y OTRAS HERRAMIENTAS DE CORTE....	5
	Descripción y características de las barrenas.....	5
	Tipos de barrenas.....	8
	Terminología fundamental sobre barrenas tricónicas.....	10
	Características del diseño.....	10
	Excentricidad de los conos.....	11
	Sistemas de rodamiento.....	16
	Selección del tipo adecuado de barrena.....	20
	Peso sobre barrena (PSB).....	21
	Velocidad de rotación.....	22
	Hidráulica de perforación.....	23
	Velocidad anular.....	24
	Evaluación y codificación de desgastes en barrenas tricónicas.....	24
	Código de desgastes para barrenas de dientes de acero.....	25
	Rotura de dientes.....	31
	Desgaste del calibre o pérdida de diámetro.....	32
	Desgaste fuera del centro.....	35
	Erosión por exceso de fluido circulante.....	36
	Embolamiento por falta de limpieza.....	36
	Desgaste de baleros.....	38
	Evaluación de desgastes en barrenas de insertos.....	42
	Utilización de los datos de desgaste.....	47
	Ejemplos de aplicación.....	50
	Evaluación de rendimientos.....	61
	Costo por metro.....	61
	Utilización del parámetro costo por metro.....	63
	Costo por metro parcial.....	63
	Mecánica de la perforación.....	68
	Efecto de la presión diferencial.....	69
	Efecto de la energía hidráulica en el fondo.....	72
	Molinos.....	75
	Interpretación de los recortes.....	76
	Aspectos generales sobre moliendas.....	76
	Estabilización del molino.....	77
	Tipos de molinos.....	78

<b>CAPITULO III.</b>	<b>COMPONENTES DE LA SARTA DE PERFORACION</b> .....	82
	Lastrabarrenas.....	82
	Tipos de lastrabarrenas.....	82
	Uso y cuidados en los lastrabarrenas.....	83
	Procedimiento para el manejo de lastrabarrenas nuevos.....	87
	Inspección magnética.....	88
	Reparación de las roscas con herramientas de mano.....	90
	Estabilizadores.....	93
	Tipos de estabilizadores.....	93
	Uso de los estabilizadores.....	93
	Tubería de trabajo.....	94
<b>CAPITULO IV.</b>	<b>TIPOS DE TUBERIA DE TRABAJO</b> .....	95
	Tubería de perforación.....	95
	Normas API.....	95
	Códigos para identificar peso y grado de las tuberías. ....	96
	Tubería Extrapesada.....	100
	Tipos de tubería de trabajo.....	102
	Fallas en las tuberías.....	107
<b>CAPITULO V.</b>	<b>DISEÑO DE LA SARTA DE PERFORACION</b> .....	110
	Peso máximo sobre barrena o molino.....	110
	Longitud de lastrabarrenas.....	113
	Análisis de esfuerzos a que se someten las tuberías.....	115
	Esfuerzo de tensión.....	115
	Procedimiento para el uso de gráficas en el diseño por tensión.....	117
	Esfuerzo de colapso.....	118
	Procedimiento para calcular el esfuerzo de colapso por tensión.....	120
	Esfuerzo de torsión.....	121
	Procedimiento del manejo de gráficas para el diseño por torsión.....	122
	Ejemplo de Diseño.....	123
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	133
	<b>APENDICE</b> .....	136
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	161

## I.-INTRODUCCION (2)

La primera etapa en el desarrollo de la ingeniería petrolera es la ingeniería de perforación, reparación y terminación de pozos. Esta se encarga de crear y mantener el conducto mediante el cual se comunican las formaciones productoras de hidrocarburos con la superficie.

Para la creación y mantenimiento óptimos de este conducto llamado pozo se cuenta con la utilización del equipo llamado sartas de trabajo, que es un conjunto de tuberías con características especiales para soportar esfuerzos de tensión, colapso y torsión.

El correcto manejo de las sartas de trabajo y la enorme responsabilidad que representa en las distintas operaciones que con ella se efectúan en los pozos petroleros, representa una mejor seguridad, economía y alta productividad.

A la sarta de trabajo que se selecciona según las necesidades en el pozo y capacidad del equipo se le llama tubería de trabajo, la cual se utiliza principalmente en:

- \* Viajes de reconocimiento.
- \* Moliendas o perforación.
- \* Pescas.
- \* Corridas de tubería corta.

Esta tubería se evita usarse en operaciones donde se aplican presiones elevadas internas, debido a que el sello que efectúan las juntas no proporciona la efectividad necesaria. Asimismo, se evita su uso en pozos que se encuentran en la etapa de explotación. El diseño de sus roscas facilita las operaciones de conexión y desconexión, y también proporciona una alta resistencia a daños por corrosión y golpes, así como a los efectos de torsión y tensión antes mencionados.

En el presente trabajo se analizará lo que son las sartas de trabajo, partes que la componen, recomendaciones técnicas en el uso de las mismas y diseño que se realiza de acuerdo a los esfuerzos a que serán sometidas, así como el resto del equipo para la creación y mantenimiento de los pozos petroleros.

Un elemento primario y de gran importancia en la ingeniería de la perforación es la "barrena", herramienta que se integra a las sartas de trabajo; este instrumento de importancia esencial sin el cual -es obvio señalarlo- sería imposible la presencia de los hidrocarburos, debido a esta importancia se analizarán diversos aspectos que van desde selección y aplicación de las barrenas y su correspondiente descripción de los tipos y modalidades, hasta la codificación y evaluación de sus usos y desgastes, pasando por los cálculos y optimizaciones de los rendimientos y llegar a la mecánica de la perforación, todo auxiliado con tablas y gráficas que apoyan la comprensión de los procesos, operaciones y aplicaciones de las barrenas.

## II.- SELECCION Y CARACTERISTICAS DE LAS BARRENAS Y OTRAS HERRAMIENTAS DE CORTE. (1,2,4)

### DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DE LAS BARRENAS:

Hoy en día existen diversos tipos de barrenas para la perforación de pozos petroleros. Estos tipos difieren entre sí, ya sea por su estructura de corte o por su sistema de rodamiento, cuando son de conos, por ejemplo, o por los materiales utilizados en su construcción. De acuerdo con lo anterior, las barrenas se clasifican en la siguiente forma.

Se ha a probado un sistema de nomenclatura para las barrenas comunes empleadas en perforación rotatoria, con el objeto de simplificar su identificación.

El sistema es numérico y clasifica a todas las barrenas, de acuerdo a lo siguiente:

- Por el diente maquinado o por el inserto de metal.
- Por el diseño específico según dureza y abrasividad de formación.
- Por características mecánicas que son comunes en las barrenas de dientes y de insertos.

De acuerdo a lo anterior la clasificación se hace de la siguiente manera, como se observa en la Tabla 1.

#### C O D I G O

Serie	Tipo	Características
1 - 2 - 3 4 5 - 6 - 7 - 8	1 - 2 - 3 - 4	1 - 2 - 3 - 4 - 5 6 - 7 - 8 - 9

Tabla 1.

#### POR SERIE:

- A). Barrena de dientes maquinados:
1. Para formación suave.
  2. Para formación media.
  3. Para formación dura o extradura.

## B). Barrena universal:

4. Aún en desarrollo.

## C). Barrena de insertos:

5. Para formación suave.
6. Para formación media suave.
7. Para formación dura.
8. Para formación muy dura.

## POR TIPO:

En esta clasificación se enmarca la dureza de formación desde la más suave hasta la más dura. "Dentro de cada serie" esta numeración se puede ampliar, aunque se considera poco probable que haya más de cuatro barrenas por cada serie.

## TIPO:

1. Para formación blanda.
2. Para formación media blanda.
3. Para formación media dura.
4. Para formación dura.

## POR CARACTERISTICAS:

Las características de las barrenas y de acuerdo al fabricante, tienen un sistema de clasificación de acuerdo a lo siguiente:

## CARACTERISTICAS:

1. Estándar.
2. Calibre "T".
3. Inserto de calibre.
4. Cojinete de rodillo.
5. Cojinete sellado y calibre.
6. Cojinete de fricción sellado.
7. Cojinete de fricción y calibre

8.- Direccional.

9.- Otras.

Para comprender mejor la nomenclatura antes descrita, supongamos que contamos con nueve barrenas de diferentes marcas; para la identificación de éstas usaremos la tabla 2, que se presenta a continuación:

BARRENAS	TIPO	CODIGO
1.- Smith Tool	DS	111
2.- Smith Tool	DT	121
3.- Smith Tool	DDT	122
4.- Smith tool	SDGH	135
5.- Hughes Tool	OSC-3A	111
6.- Hughes Tool	W7R-2	321
7.- Hughes Tool	J-33	537
8.- T.F de México	OSC-3A	111
9.- T.F de México	W7R-2	321

Tabla 2.

Analizando el siguiente ejemplo, donde tenemos:

Las barrenas números 6 y 7 .

Barrena número 6      Tipo W7R-2      Código 321

3. Significa - serie Barrena de dientes maquinados para formación dura.

2. Significa - el tipo correspondiente a la formación media blanda.

1. Se refiere a la barrena estándar.

Barrena número 7      Tipo J-33      Código 537

5. Serie - Barrena de inserto para formación suave.

3. Tipo - formación media dura.

7. Característica - Barrena con cojinete de fricción y calibre.

## TIPOS DE BARRENAS:

Los tipos de barrenas que se utilizan son los siguientes:

- Barrenas de dientes de acero y de insertos de carburo de tungsteno (tricónicas). (Figura.1).
- Barrenas de diamante. (Figura 2).
- Barrenas de compactos strata. (Figura 3).

Las barrenas tricónicas tienen, generalmente, tres conos cortadores que giran sobre su eje. Las hay también de dientes fresados (Figura 4) y de insertos de carburo de tungsteno. (Figura 5).

Por su sistema rodante pueden ser de balero estándar (Figura 6), de balero sellado (Figura 7) y de chumaceras.

Por el tipo de descarga del lodo o fluido circulante, las hay de toberas (Figura 8), o convencionales (Figura 9). Estas últimas se utilizan para casos especiales.

Las barrenas de diamante son cuerpos compactos, sin partes móviles, con piedras de diamante incrustadas parcialmente en su superficie inferior y lateral, que trituran la formación por fricción o arrastre.

Las barrenas de compactos strata aparecieron recientemente en el mercado y son parecidas a las de diamante, con la diferencia de que en vez de diamantes se le incrustan compactos sintéticos de tamaño relativamente grande, que perforan por el mismo sistema de fricción o arrastre. Estas barrenas, que se les conoce como strata, en algunos casos están aún en fase de experimentación o en pruebas de campo.

En términos generales, en México se utilizan en la perforación petrolera las barrenas tricónicas en más del noventa y cinco por ciento de los casos; quizá un tres o cuatro por ciento de las de diamante y algunas compactos strata en la fase de experimentación de campo.



Barrenas Tricónicas  
(Fig.1)



Barrenas de Diamante  
(Fig.2)



Barrenas de Compactos Strata  
(Fig.3)



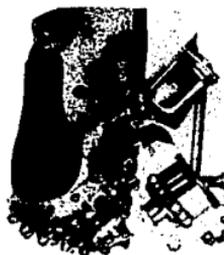
Barrena de Dientes  
Fresados  
(Fig.4)



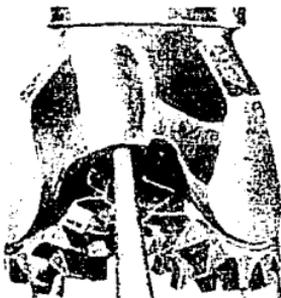
Barrena de Insertos de  
Carburo de Tungsteno  
(Fig.5)



Barrena con rodamiento  
de balero estándar (Fig.6)



Barrena con balero  
sellado (Fig.7)



Barrena de toberas  
(Fig. 8)



Barrena convencional  
(Fig. 9)

#### Terminología fundamental sobre barrenas tricónicas.

Las barrenas de conos se fabrican por lo general con tres conos cortadores. Poseen tres componentes importantes: las estructuras cortadoras, los sistemas de rodamientos (cojinetes o chumaceras) y el cuerpo mismo de la barrena.

Las estructuras cortadoras o conos están montadas sobre cojinetes, ya sea de rodillos o chumaceras (a estas últimas también se les llama de fricción) cerca de la punta del cono, o de su propia base. Los cojinetes de esferas sirven para retener los conos (candado) y en algunos casos para absorber cargas radiales y axiales. Los elementos de corte de la barrena están constituidos por hileras en circunferencias de dientes extendidos sobre cada cono y entrelazadas con hileras de dientes de los conos adyacentes.

#### Características del diseño:

Como características generales más importantes de las barrenas, están la estructura cortadora y el sistema de rodamiento de los conos. La estructura cortadora está definida por los dientes maquinados y/o los insertos de carburo de tungsteno. La correlación entre la estructura de corte y el tipo de formación para perforar, es la siguiente:

Dientes	insertos grandes y espaciados	formación blanda
Dientes	insertos medianos y no muy espaciados	formación media
Dientes	insertos chicos y muy juntos	formación dura
Insertos	tipo botón, pequeños y juntos	formación extradura

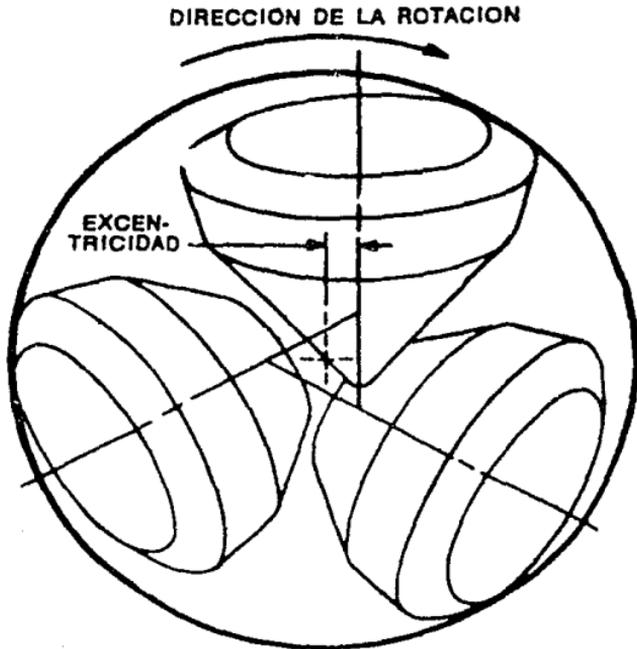
### Excentricidad de los conos :

Ya que los conos son forzados a que giren alrededor del centro de la barrena, ellos mismos resbalan en la medida en que giran y producen el escariado y paleo, que es la mejor forma de perforar efectivamente las formaciones blandas. Otra manera aún más eficiente para aumentar la penetración en rocas blandas se obtiene mediante la excentricidad de los ejes de los conos, como se muestra en la Figura 10.

Las barrenas de rodillos que se emplean en las formaciones blandas, tienen sus conos desalineados.

La alineación descentrada o excéntrica de los conos causa que los dientes raspen y excaven a la formación, según giran los conos en el fondo del pozo. La cantidad que raspan depende de la magnitud de la desalineación del cono.

El intergranaje de los dientes hace posible el uso de dientes más largos, así como la autolimpieza.



**EXCEN-TRICIDAD**

Fig.10

Las barrenas diseñadas para formaciones más blandas, con el mayor grado de características abrasivas, tienen más excentricidad.

La excentricidad reducida no existe en las barrenas diseñadas para formaciones más duras y abrasivas.

En general, los dientes que son ampliamente separados, largos y afilados, se emplean para formaciones blandas.

Los dientes con poca separación que son cortos y fuertes, se emplean para las rocas duras.

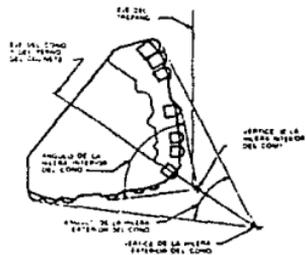
Es interesante observar que en la medida en que los dientes se empequeñecen, el espesor de la "concha" del cono aumenta, lo que le permitirá resistir mayores cargas sin peligro de romperse o dañarse (figura 11).

De esta manera los rodamientos y chumaceras se hacen de mayor dimensión y resistencia a la carga en la medida en que los dientes decrecen, es decir, cuando la barrena está destinada a formaciones más duras (figura 12).



DISEÑO DEL CONO PARA FORMACIONES BLANDAS

Fig. 11



DISEÑO DEL CONO PARA FORMACIONES DURAS

Fig. 12

Ultimamente se han realizado muchos avances en el diseño de las barrenas con insertos de carburo de tungsteno y cojinetes sellados.

En el pasado estas barrenas tenían solamente pequeñas extensiones de carburo, propias para los regímenes de penetración lentos que entonces se lograban. Este tipo de barrena se podía utilizar para diferentes formaciones; sin embargo, las velocidades de rotación lentas reducían los regímenes de penetración, mientras que las velocidades altas podían ocasionar rotura de los insertos.

Las barrenas modernas con los insertos antes mencionados, son capaces de alcanzar altas velocidades de rotación (hasta 180 rpm o más), comparadas con las 45 rpm de las barrenas antiguas. Además las barrenas nuevas con insertos de carburo de tungsteno para alta velocidad funcionan con un peso mayor sobre éstas, lo cual no podían soportar las antiguas.



En las operaciones de reparación y terminación de pozos, las barrenas que se utilizan son de rodillos y los conductos para el fluido de control (toberas) están perforados a través de la barrena, a este tipo se le llama barrena regular o convencional, como se aprecia en la siguiente figura. (Fig.17).

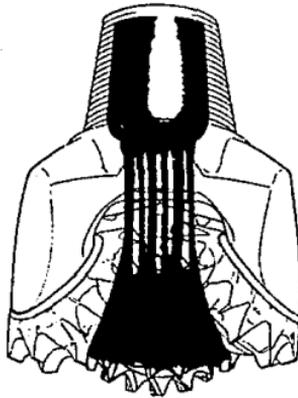


Fig. 35

#### BARRENA REGULAR O CONVENCIONAL

Fig.17

Las toberas en este tipo de barrena están situadas de modo que dirijan el fluido de control hacia los elementos cortantes, utilizando la mayor presión del fluido para mantener limpios los dientes.

En las barrenas de este tipo, solo una porción de la potencia generada por el fluido llega al fondo del pozo, para desalojar los recortes de roca hacia la superficie, los cuales suben por el espacio anular; la velocidad normal de circulación, es aproximadamente 30 m/seg. (100 pies/seg).

La vida útil de la barrena depende de diversos factores ; dos de ellos se localizan en la estructura de corte y en el tipo de sistema de rodamiento de los conos. En condiciones normales, esa vida útil de las barrenas se relaciona con los dos factores antes mencionados de la siguiente forma:

Tomando como base la vida de una barrena estándar de dientes maquinados, se tiene la siguiente relación:

Estructura cortador	Vida útil relativa
-Dientes fresados estándar	100 % (Fig.18)
-Dientes fresados revestidos con tungsteno	110 % (Fig.18 y 19)
-Dientes fresados con protección de calibre con dientes T	115 % (Fig.20)
-Dientes fresados con protección de calibre con insertos	120 % (Fig.21 y 22)
-Dientes de insertos y protectores de calibre	300 a 800 % (Fig.5)



Fig.18



Fig.19



Fig.20



Fig.21



Fig.22

#### Sistemas de rodamiento:

Como ya se ha mencionado uno de los componentes importantes de las barrenas tricónicas es el sistema de rodamiento (cojinetes o chumaceras). A continuación se podrán observar en las siguientes figuras los diferentes tipos de sistemas de rodamiento:

En la Figura (6) tenemos el tipo de baleros estándar, en las Figuras(23 y 7) el sistema de rodamiento por baleros sellados, el sistema de chumacera estándar y sellada, la observamos en las Figuras (24 y 25). tenemos otro tipo de sistema de rodamiento por chumacera, que es el de, chumacera con plata y sellada, la cual la podemos observar en las Figuras (26,27 y 28).



Bateros sellados

Fig. 23



Clamocera estandar y sellada

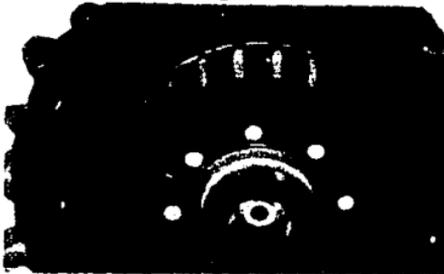
Fig. 24



Fig. 25



Fig. 26



Clamocera con plata y sellado

Fig. 27



Fig. 28

En las Tablas A y B tenemos un resumen de las características de diseño, construcción y funcionamiento, para las barrenas de dientes de acero maquinado y para las barrenas de dientes de insertos de carburo de tungsteno, respectivamente.

**CARACTERISTICAS DE DISEÑO, CONSTRUCCION Y FUNCIONAMIENTO DE LAS  
BARRERAS DE DIENTES DE ACERO MAQUINADO**

CLASIFICACION DE LA BARRERA	TIPO DE BARRERA	DESCRIPCION DE LA FORMACION O ROCA	ESTRUCTURA CORTADORA	EXCENTRICIDAD O ANGULO DE CONOS	TAMANO DE LOS BALEROS Y ESPESOR DE LA CONCHA
FORMACION SUAVE	111, 114 116, 121 124, 126	FORMACIONES BLANDAS QUE TENGAN BAJA RESISTENCIA COMPRESIVA Y ALTA PERFORABILIDAD (LUTITAS SUAVES; ARCILLAS; LICHO ROJOS; SAL; CALIZAS SUAVES; FORMACIONES NO CONSOLIDADAS; ETC.)	DIENTES LARGOS Y MUY ESPACIADOS PARA PENETRACION PROFUNDA SE UTILIZA EL DISEÑO DE DIENTES INTERRUPTIDOS PARA LIMPIEZA EFICIENTE Y MENOR ACERO EN EL FONDO DANDO POR RESULTADO VELOCIDAD DE PENETRACION ALTA	EXCENTRICIDAD EN LOS CONOS MAXIMA Y ANGULO DE CONO DISEÑADO PARA GENERAR UNA ACCION DE RASCADO -RASADO ASI COMO AGITACION Y ALTA VELOCIDAD DE PENETRACION EN FORMACIONES SUAVES.	GENERALMENTE BALEROS PEQUEÑOS; CONCHAS DE COMO DELGADAS PARA PERMITIR DIENTES MAS LARGOS PARA GENERAR VELOCIDADES DE PENETRACION MAYORES.
FORMACION MEDIA-SUAVE	131, 134 136, 211 214, 216	FORMACIONES SUAVES O MEDIA SUAVES O ESTRATOS SUAVES INTERCALADOS CON ESTRATOS MAS Duros. (LUTITAS FINES; NO CONSOLIDADAS O ARENOSAS; LICHO ROJOS; SAL; ANHIDRITA; CALIZAS SUAVES; ETC.).			
FORMACION MEDIA-SUAVE	221, 224 226, 231 234, 236 241, 244 246	FORMACIONES MEDIAS A MEDIAS DURAS (LUTITAS DURAS; LUTITAS ARENOSAS; ESTRATOS DE LUTITAS ALTERNADOS CON ESTRATOS DE ARENA Y CALIZA; ETC.).	DIENTES DE LONGITUD MEDIA MENOS ESPACIADOS; PARA PENETRACION DE DIENTE COMBINADO CON MAYOR RESISTENCIA A LA RUPTURA, ALGUNOS DISEÑOS CON DIENTES INTERRUPTIDOS PARA MENOR ACERO EN EL FONDO Y VELOCIDAD DE PENETRACION MAYOR.	EXCENTRICIDAD MEDIA Y ANGULOS DE CONO PARA ACCION COMBINADA DE RASCADO -RASADO Y TRITURADO -ASTILLADO.	BALEROS Y ESPESOR DE CONCHAS MEDIAS PARA CARGAS SOBRE BARRERA SEMI-PESADAS.
FORMACION DURA	311, 314 316, 321 324, 326 341, 344 346	FORMACIONES MEDIAS DURAS, DURAS ABRASIVAS A DURAS (ROCAS DE ALTA RESISTENCIA COMPRESIVA; BOLOMITAS; CALIZA DURA; LUTITA DURA; ETC.).	DIENTES CORTOS, CERCAAMENTE ESPACIADOS PARA ACCION TRITURANTE CON UNA MAXIMA RESISTENCIA A LA RUPTURA.	RODILLOS RECTOS PARA ACCION DE ASTILLADO - TRITURADO SIN RASADO EN FORMACIONES DURAS O FORMACIONES CON ALTA RESISTENCIA A LA COMPRESION.	BALEROS GRANDES Y CONCHAS DE CONO GRUESAS PARA CARGAS PESADAS NECESARIAS PARA UENCER FORMACIONES DURAS.

TABLA "A"

**CARACTERISTICAS DE DISEÑO, CONSTRUCCION Y FUNCIONAMIENTO DE LAS  
BARRENAS DE DIENTES DE INCERTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO**

CLASIFICACION DE LA BARRENA	TIPO DE BARRENA	DESCRIPCION DE LA FORMACION O ROCA	ESTRUCTURA CORTADORA	EXCENRICIDAD O ANGULO DE CONOS	TAMANO DE LOS BALEROS Y ESPESOR DE LA CONCHA
FORMACION MEDIO SUAVE	511,514 516,521 524,526	SUAVES NO CONSOLIDADAS; BAJA RESISTENCIA A LA COMPRESION Y ALTA PERFORABILIDAD (ARCILLAS; LUTITAS; SAL; ETC. DE INTERVALOS CONSIDERABLES).	INSERTOS BLANDOS. INSERTOS EN FORMA DE DIENTES DE EXTENSION MAXIMA.	INSERTOS BLANDOS PROUEEN ACCION RASCADORA Y RASPADORA.	LOS INSERTOS BLANDOS PROUEEN CONCHAS DE COMO MAS BELGADAS Y BALEROS MAS PAQUENOS
FORMACION MEDIA	531,534 536,611 614,618	INTERCALACIONES MAS BLANDAS DE FORMACIONES DURAS (CALIZAS; DOLOMITAS Y LUTITAS ARENOSAS DURAS).	INSERTOS MEDIOS. INSERTOS EN FORMA DE CUMA DE EXTENSION MEDIA.	INSERTOS MEDIOS. ACCION TRITURADORA CON LIGERO RASPADO.	INSERTO TIPO MEDIO. PREVISTO DE UNA SECCION DE CONCHA MAS GRUESA PARA MAYOR RESISTENCIA.
FORMACION MEDIA DURA	621,624 626,711 714,716	INTERCALACIONES MEDIAS EN FORMACIONES DURAS (FEDERNAL; GRANITO; BASALTO; FORMACIONES CUARCITICAS).			
FORMACIONES EXTREMADAMENTE DURAS	721,724 726,811 814,816	LAS FORMACIONES MAS ABRASIVAS Y DURAS (CUARCITA Y ARENAS CUARCITICAS DURAS).	INSERTOS Duros. INSERTOS EN FORMA CONICA DE MINIMA EXTENSION CON MAXIMA RESISTENCIA	INSERTOS Duros. ACCION TRITURADORA.	INSERTO TIPO DURO. PREVISTO DE BALEROS GRANDES CON UNA SECCION DE CONCHA GRUESA.

TABLA "B"

## SELECCION DEL TIPO ADECUADO DE BARRENA.

La selección apropiada de la barrena para un pozo petrolero es una decisión muy importante, ya que afecta al costo total del pozo.

Para esto se necesitan evaluar varios factores, como son, el costo de la barrena, tipos y propiedades de la formación, sistemas de lodos, costo de todo el equipo de perforación ( torre, malacate, motores, bombas del lodo, árbol de válvulas y demás equipo auxiliar).

El surgimiento tecnológico para designar barrena incluye un significado adicional, el cual es cuando evaluar todos los parámetros.

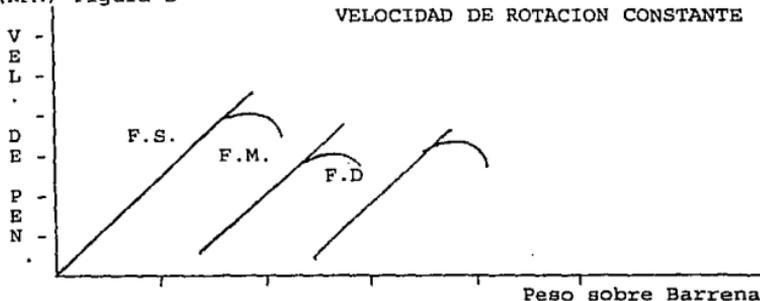
Para analizar lo anterior, la selección de la barrena se debe de enmarcar en tres factores principales.

Factores principales que se deben considerar:

Para seleccionar el tipo de barrena que remplace una usada (o durante la plantación de perforación de un pozo), los factores fundamentales serán entonces:

- a) Características anticipadas de la formación;
- b) Limitaciones mecánicas del equipo de perforación del pozo.
- c) Máximo rendimiento con el costo/metro mínimo.

Las barrenas para formación blanda requieren sólo de una carga o peso mínimo para sus dientes largos y espaciados, efectúen su acción de rascado y triturado; los factores limitantes de su rendimiento son la eficiencia hidráulica del equipo de perforación. Debe recordarse que un factor muy importante en estas formaciones es la velocidad de rotación (RPM) Figura B



Las barrenas para formaciones media-blandas tienen una estructura de corte capaz de resistir la mayor carga unitaria para penetrar la formación y el desgaste por abrasión en el área del calibre. Por esta razón, sus dientes son más fuertes y numerosos con mayor cantidad de metal en las hileras del calibre (fig.29).



Fig. 29

Las barrenas para formaciones medias-duras destruyen la formación por trituración con un mínimo de rascado. Requieren cargas unitarias altas, para exceder la resistencia a la compresión de la formación, las que generalmente son más abrasivas que las anteriores (Figura.20).

Las barrenas para formaciones duras requieren los máximos niveles de energía para vencer la alta resistencia compresiva de la formación, que contiene considerables cantidades de material abrasivo.

La mecánica de perforación de estas barrenas es básicamente por cincelamiento y necesitan la máxima protección del calibre (Figuras 20, 21 y 22).

La operación de las barrenas se define por tres parámetros:

- \* Peso sobre barrena
- \* velocidad de rotación (Rotaria)
- \* Hidráulica de perforación

Ahora se analizarán brevemente estos parámetros.

**Peso sobre barrena (PSB)**

Es la carga aplicada a la barrena por medio de la sarta de perforación. Para que ésta efectúe la penetración de las capas rocosas del subsuelo, llamadas también formaciones, la penetración se logra cuando la carga aplicada sobre la

barrena supera la resistencia de compresión de la formación en contacto con los dientes de la barrena.

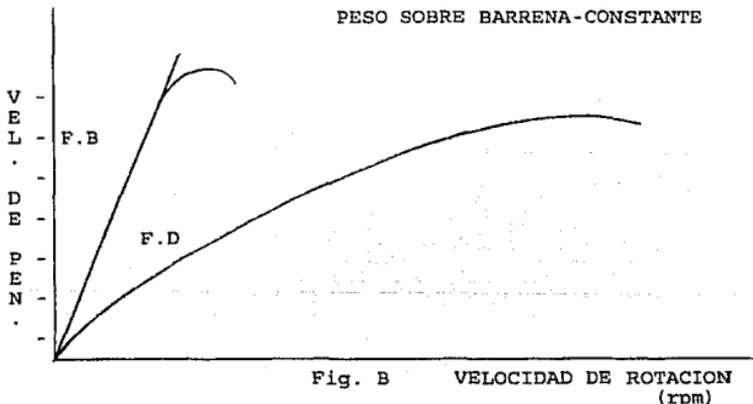
La "respuesta" de la formación en relación con el peso sobre barrena se puede medir a través de la velocidad de perforación. Así, la Figura A ilustra la variación de la velocidad de perforación con respecto a la carga sobre la barrena. (PSB).

En la Figura A se observa que la velocidad de perforación se encuentra en proporción directa con el peso sobre barrena.

#### Velocidad de rotación:

Se le llama generalmente "rotatoria" y consiste en la cantidad de vueltas por minuto que la mesa rotaria transmite a la sarta de perforación y ésta, a su vez, a la barrena.

La Figura B ilustra la variación de la velocidad de perforación con respecto a la velocidad de rotación (RPM).



En esta figura se observa que la velocidad de perforación es directamente proporcional a la velocidad de rotación (RPM) en formaciones suaves. En formaciones duras, el incremento de la velocidad de rotación, disminuye la velocidad de perforación en ciertos rangos.

Todo lo antes mencionado explica el porqué en formaciones suaves es más importante la velocidad de rotación (RPM) que el peso sobre barrena (PSB); y viceversa, en las formaciones duras.

Las Tablas 3 y 4 presentan algunos rangos de variación de estos parámetros PSB Y RPM que se han utilizado en algunos campos de perforación en México.

T A B L A 3  
PESO SOBRE BARRENA (PSB)

DIAM. DE BNA	FORM. SUAVE	FORM. MEDIA	FORM. DURA
14 3/4 - 12 1/4	8 - 12 Tons.	12 - 16 Tons.	15 - 22Tons.
9 1/2 - 8 1/2	6 - 10 Tons.	9 - 15 Tons.	14 - 18Tons.
6 1/2 - 5 7/8	6 - 8 Tons.	7 - 9 Tons.	9 - 12Tons.

T A B L A 4  
VELOCIDAD DE ROTACION (RPM).

DIAM. DE BNA	FORM. SUAVE	FORM. MEDIA	FORM. DURA
14 3/4 - 12 1/4	130 - 160 rpm.	80 - 100 rpm.	50 - 70 rpm.
9 1/2 - 8 1/2	120 - 150 rpm.	80 - 110 rpm.	50 - 75 rpm.
6 1/2 - 5 7/8	100 - 120 rpm.	80 - 100 rpm.	50 - 70 rpm.

#### Hidráulica de perforación:

La hidráulica de perforación es la distribución adecuada de la potencia útil desarrollada por la bomba de lodo. Para lograr este propósito, el técnico en perforación tiene que manejar y balancear los factores involucrados en este fenómeno. Estos factores son:

- \* Peso específico y viscosidad del lodo
- \* Gasto y presión máximos de bombeo
- \* Diámetro de barrena
- \* Velocidad de perforación
- \* Profundidad del pozo
- \* Características geométricas de la sarta de perforación.

En la mayoría de los casos, de todos estos factores sólo tres pueden ser modificados según el criterio del ingeniero de perforación (presión de bombeo, gasto y área de toberas.).

Con el fin de lograr la mayor optimización de esta hidráulica, existen tres criterios que son:

1. Máximo caballaje hidráulico en la barrena lo que se logra cuando  $\Sigma P$  barrena = 65% de la presión de bombeo.
2. Máxima fuerza de impacto en el fondo, que se obtiene cuando  $\Sigma P$  barrena 50% de la presión de bombeo.

## 3. Velocidad mínima de toberas.

Ultimamente se ha popularizado el criterio que se deriva del primero de los tres anteriores, que se conoce como índice de caballaje en el fondo, y se expresa en HHP/pg" del área en el fondo del pozo. En condiciones normales se sabe que 2.5 HHP/pg", es suficiente para un gran número de situaciones.

Para aplicar el método de velocidad mínima en toberas, se deben tomar en cuenta los siguientes datos de la Tabla 5., que funcionan como guías.

T A B L A 5			
DIAM. DE BNA. EN pg.	11 y Mayores	9 1/2-10 5/8	5 7/8 - 9
Vel. Min. en Tob. pies/seg.	20	22	25

## Velocidad anular:

No existe un criterio confiable para definir la velocidad anular mínima suficiente para obtener un transporte total de los recortes. Esta velocidad variará según las condiciones del agujero, la viscosidad del lodo, la velocidad del lodo, la velocidad de perforación y tipo de formación perforada. También se ha observado que la velocidad anular mínima aceptable varía inversamente con el diámetro del pozo. Velocidades anulares de 90 pies/minuto, y aún menores, han dado resultados satisfactorios en agujeros de 12 1/4.

La Tabla . 6 indica velocidades anulares para diferentes diámetros de agujero que parecen ser aceptables pero no necesariamente las más eficientes.

T A B L A 6						
DIAM. DE BNA.pg.	17 1/2	12 1/4	9 1/2	8 1/2	6 1/2	5 7/8
Vel. Anular pies/min	70	80	100	110	120	130

## EVALUACION Y CODIFICACION DE DESGASTES EN BARRENAS TRICONICAS

La clasificación y evaluación subsecuentes del grado y tipo de desgaste de una barrena usada, desempeña un papel muy importante en el proceso de la perforación. de hecho, esta evaluación es particularmente crítica hoy en día debido a los altos costos y a las condiciones de perforación más severas encontradas en pozos profundos. En este trabajo se ofrecen tres objetivos principales de esta evaluación.

1. Mejorar la selección del tipo adecuado de barrena.
2. Identificar aquellas prácticas operativas (PSB, RPM, hidráulica, estabilización, etc.) que puedan alterarse para mejorar el rendimiento total de la perforación.
3. Obtener la máxima utilización de las barrenas mediante la aplicación de procedimientos óptimos para dar por concluida su vida útil.

La clasificación y evaluación del desgaste de barrenas puede dividirse en dos aspectos importantes que son:

- a) Determinar el grado de desgaste material de la estructura de corte, desgaste de baleros y pérdida diámetro (desgaste del calibre).
- b) Análisis de las causas de la naturaleza física que provocaron esa condición de desgaste.

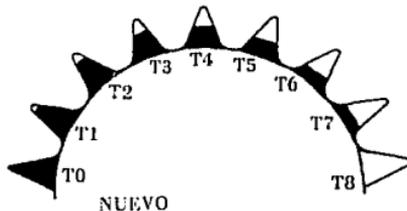
Código de desgastes para barrenas de dientes de acero.

A continuación se explican los códigos de desgaste más usados y aceptados en el campo de la perforación.

Desgaste de dientes:

- T0 = Diente nuevo
- T1 = Desgaste de 1/8 de la altura original del diente
- T2 = Desgaste de 1/4 de la altura original del diente
- T3 = Desgaste de 3/8 de la altura original del diente
- T4 = Desgaste de 1/2 de la altura original del diente
- T5 = Desgaste de 5/8 de la altura original del diente
- T6 = Desgaste de 3/4 de la altura original del diente
- T7 = Desgaste de 7/8 de la altura original del diente
- T8 = Desgaste total del diente

Lo descrito anteriormente se muestra en la figura N° 30, donde se presenta gráficamente la nomenclatura desde el T0 hasta T8.



Desgaste de dientes.Fig.30

La existencia de un número elevado de dientes rotos es conveniente denotarlo con las letras BT (broken teeth).

El desgaste de los baleros debe considerarse también según la escala de octavos. Para balero nuevo B0 y balero desgastado 100 % B8. Cuando los baleros se atraviesan en la superficie de rodamiento (pista) Y traban el cono, se considera B6. Cuando uno o varios rodillos se han caído fuera del cono, se considera B8.

Esto quiere decir:

- B0 = Vida del balero gastado 0
- B1 = Vida del balero gastado 1/8
- B2 = Vida del balero gastado 1/4 (todavía ajustados)
- B3 = Vida del balero gastado 3/8
- B4 = Vida del balero gastado 1/2 (algo flojos)
- B5 = Vida del balero gastado 5/8
- B6 = Vida del balero gastado 3/4 (muy flojos, trabados)
- B7 = Vida del balero gastado 7/8
- B8 = Vida del balero gastado 8/8 ( baleros perdidos y/o conos trabados )

Para indicar el desgaste en el calibre se utilizan las letras "I" cuando no hay desgaste y "O" seguida de la cantidad de desgaste en pulgadas.

Ejemplos:

T2-B4-I = Esta notación quiere decir que se tiene dientes con un desgaste de 1/4, 1/2 de vida de baleros, algo flojos, sin desgaste en calibre.

T6BT-O 1/2 = Esta notación quiere decir que se tienen dientes desgastados 3/4 de la altura original del diente, que se tienen un número elevado de dientes rotos, baleros muy flojos y diámetro reducido 1/2 pulgada.

Toda la información relacionada con las barrenas utilizadas en la perforación de un pozo se debe anotar en un formato conocido como registro de barrena o récord de barrenas el cual contiene la siguiente información.

INFORME DE BARRENAS:

POZO.

CARACTERISTICAS: Diámetro, Tipo, Marca, N° de Serie, Toberas.

RENDIMIENTO: Inicio, Termino, Horas, Min/Met.

CONDICIONES DE OPERACION: PSB, RPM, GPM, P.B.

LODO: Tipo, Densidad.

TIPO DE FORMACION:

DESGASTES: D, B, O.

OBSERVACIONES.

Toda la información anterior se registra en una tabla de informe de barrenas y se le envia a la gerencia de perforación.

Calibre de la barrena. Se mide el diámetro o calibre.

I - Indicaría que no hay desgaste, en decir diámetro inicial.

O - Indicaría si existe desgaste diametral, se anotará la magnitud en pulgadas como se indico anteriormente .

Con la finalidad de agregar información útil para los propósitos ya señalados se sugieren las siguientes abreviaturas:

BI - Indicará que más del 20% de insertos se han roto.

BG - La rotura de insertos ocurrió predominantemente en los calibradores.

WI - Los insertos se han desgastado.

LI - Los insertos se han perdido, es decir, se han caído del cono.

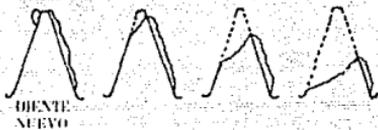
Como en el caso de las barrenas de dientes de acero, también los desgastes codificados de cada barrena utilizada, deberán anotarse en el récord de barrenas del pozo.

Evaluación de desgastes de barrenas de dientes de acero:

Continuando con el análisis de cada barrena gastada, éste puede ser de mucha ayuda, ya que nos auxiliará para decidir, el tipo de la siguiente barrena que bajará al pozo, y si la práctica de la operación debe ser cambiada. Aprender a leer el desgaste de cada barrena y aprender bien lo que significa su aspecto, permitirá acercarse a la obtención de un rendimiento máximo de cada una de ellas. Ahora se presentaran ejemplos de barrenas gastadas que pueden ser muy útiles para el aprendizaje de su lectura.

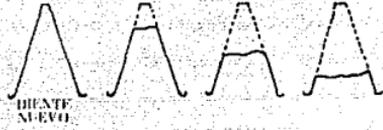
### Autoafilamiento de dientes.

Los dientes de acero están revestidos con carburo de tungsteno en un flanco que propicia el autoafilamiento durante el proceso de desgaste de la perforación Figuras 31 y 32



Dientes de acero con revestimiento de carburo de tungsteno

Fig. 31



Dientes de acero sin revestimiento de carburo de tungsteno

Fig. 32

Sin revestimiento, los dientes se gastaron como lo ilustra la Figura 32, que perdió su filo (diente achatado) lo que provoca que su penetración se reduzca considerablemente, a tal grado que se tornará necesario sacar la barrena para cambiarla prematuramente.

La Figura 33, ilustra la etapa inicial del desgaste de dientes con revestimiento de carburo de tungsteno en uno de sus flancos para su autoafilamiento. La ventaja de este tipo de desgaste permite que la barrena perfora con mayor tiempo con alta velocidad de penetración.

En la Figura 34 se muestra este desgaste en su etapa final. Las barrenas que presentan este tipo de desgaste permiten aprovecharlas hasta casi la totalidad de separación de sus dientes; y esto es por su autoafilamiento.



Fig.33



Fig.34

En la Figura 35, se muestra un desgaste de dientes no deseable, esto es por ausencia de autoafilamiento.

Si esta barrena, a pesar de poseer revestimiento duro en los flancos de los dientes, no se autoafiló, esto pudo ser provocado por falta de peso sobre la barrena lo suficientemente necesario para enterrar el diente en la formación, o por velocidad de rotación excesiva al inicio de la vida de la barrena. Una vez que los dientes se han achatado, su superficie de contacto con la roca aumenta y, como resultado, se disminuye la velocidad de penetración.



Fig.35

Como medidas correctivas para este tipo de desgaste, tenemos:

- Operar con mayores pesos sobre barrena y velocidades de rotación.
- Probar con tipo de barrena para formación más blanda.

#### Astillado de dientes.

En ocasiones, el astillamiento de dientes es aceptable como en el caso que se muestra en la figura 36, en la que se observa desgaste uniforme en los dientes sin astillamiento en una barrena para formación dura. La ausencia de astillamiento indica que el rendimiento podría mejorarse con más peso sobre barrena o velocidades de rotación más altas. Esta barrena perforó más rápido e hizo más metros, lo que indica que algo de astillamiento no es necesariamente malo.



Fig.36

En la Figura 37, se señala una estructura astillada pero sin desgaste apreciable. Los dientes en su totalidad gastados por su astillamiento, significa que pueden obtenerse mejores rendimientos con barrenas de dientes para formación más dura, barrenas de insertos o condiciones de operación menos forzadas. En términos generales, el astillamiento de los dientes puede interpretarse de la siguiente manera:

\* Si no hay astillamiento de los dientes, se está empleando un tipo de barrena para formación demasiado dura; las condiciones de operación son muy conservadoras.

\* Un astillamiento moderado indica que hay combinación correcta de tipo, peso y velocidad de rotación.

\* Astillamiento severo; el tipo de barrena es muy blando para la formación perforada, o bien las condiciones de operación son demasiado forzadas.



Fig.37

En comparación con las ilustraciones anteriores de barrenas con un astillamiento deseable o no muy severo, tenemos en las Figuras 38 y 39 una indicación de desgaste sumamente severo al extremo de mostrar aplastamiento de los dientes.



Fig. 38



Fig. 39

#### Rotura de dientes:

La rotura de los dientes representa desgaste prematura de la barrena. Cuando se rompe un diente se incrementa la carga aplicada a la estructura cortadora remanente, lo que puede provocar la rotura de una hilera completa de dientes, como lo indicamos en la Figura 40. Lo grave de esta rotura reside en que ocurre al principio de la vida de la barrena. Un diente nuevo afilado y largo está más propenso al rompimiento que un diente con la mitad gastada. La rotura de dientes puede ser causada por los siguientes aspectos:

1. Inicio inadecuado de la vida de la barrena.
2. Chatarra en el fondo.
3. Tipo inadecuado de barrena.
4. Condiciones inadecuadas de operación.

Para reducir o evitar la rotura de dientes tenemos algunas medidas correctivas o preventivas que son las siguientes:

1. Cuando comienza la vida de la barrena se debe aplicar el peso poco a poco (dos o tres toneladas cada diez minutos).
2. Lavar el fondo del pozo antes de aplicar el peso/barrena con la finalidad de levantar la chatarra.
3. Utilizar un tipo de barrena para formación dura.
4. Reducir la velocidad de rotación y/o el peso sobre barrena.

5. Considerar un tipo de barrena de insertos.
6. Utilizar amortiguador de vibraciones si las condiciones lo permiten o justifican.



Fig.40

Desgaste del calibre o pérdida de diámetro:

Mantener un agujero de calibre pleno en una parte importante en la operación de perforación. Por tal motivo, al estudiar las barrenas gastadas, se debe utilizar un anillo calibrador como se observa en la Figura 41, con la idea de determinar la condición de desgaste diametral. Si se presenta reducción del diámetro, se deben analizar las causas con el fin de corregirlas. La manera de reportar el desgaste se tiene; es realizando con la medición de la distancia que hay entre el anillo apoyado en dos puntos de la barrena y la tercera pierna o cono; esta distancia se multiplica por  $2/3$ , y el resultado será la reducción del diámetro.



Fig.41

La Figura 42 ilustra el redondeamiento en el área del calibre. La observación de este desgaste debe servir como una señal preventiva en el sentido de que la barrena se está aproximando al punto que provocará problemas de agujero reducido o descalabrado.



Fig.42



Fig.43

En la Figura 43 se muestra un desgaste ligero del calibre; esto se advierte con el excesivo redondeamiento. Si estas manifestaciones se ignoran, el desgaste del calibre puede llegar a alcanzar las proporciones denotadas en las Figuras 44, 45 y 46. El agujero reducido deberá corregirse repasando hasta el fondo con la siguiente barrena mediante la aplicación de poco paso. Es importante anticipar el punto en el que empieza la reducción del diámetro para empezar a corregir un poco antes de ese punto.

Algunos recursos para corregir o reducir el desgaste del calibre son los siguientes

1. Utilizar un tipo de barrena con menor excentricidad en los conos.
2. Usar un tipo de barrena con mayor área en la zona del calibre.
3. Emplear barrenas con protección del calibre con insertos.
4. Disminuir la velocidad de rotación.
5. Aumentar la estabilización de la barrena.

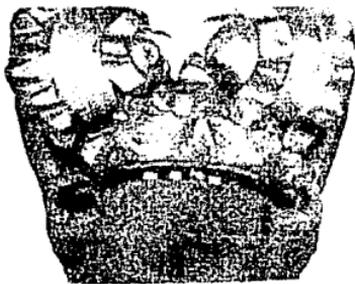


Fig. 44



Fig. 45



Fig. 46

Las fuerzas que se generan por el desgaste y redondeamiento del área de calibre, pueden provocar interferencias de los dientes sobre la concha del cono, según se nota por el anillo pulido de la Figura 47. Esto indica que hay desgaste en los cojinetes de la nariz o piernas dobladas (Figura 48). Si en la barrena se observa reducción, sin desgaste en el calibre y los baleros ajustados, y muestras claras de interferencia de dientes sobre concha de conos, la causa puede ser pernas flexibles (sin doblez permanente). La condición de piernas flexibles se refiere a que las piernas de la barrena están forzadas hacia adentro, hasta que los dientes de un cono rozan contra la concha de otro cono. Esto se provoca al introducir una barrena en un agujero reducido. Ya que la barrena es sacada del agujero, las piernas se extienden nuevamente a su calibre pleno y no hay aparentemente contacto de los dientes con las conchas de los conos.



Fig.47

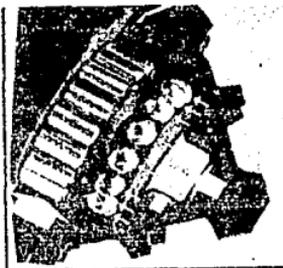


Fig.48

#### Desgaste fuera del centro:

El desgaste de las barrenas fuera del centro se presenta cuando la barrena gira en un eje diferente al eje del pozo. Cuando esto sucede, anillos de formación sin cortar quedan en el fondo del pozo, los que desgastan la parte posterior de los dientes, lo cual se muestra en las Figuras 49, 50 y 51. Este tipo de desgaste ocurre normalmente debido a las condiciones y procedimientos operativos pobres o deficientes; también se presenta en la perforación lenta de lutitas y cuando se emplean lodos de alta densidad. Las posibles medidas pueden ser:

1. Usar barrenas para formación más suave.
2. Aumentar el peso sobre barrena y/o la velocidad de rotación.
3. Mejorar la hidráulica.
4. Estabilizar mejor la barrena.
5. Mejorar las condiciones del lodo.
6. Si es posible, reducir la densidad del lodo al mínimo prudente.



Fig.49



Fig.50



Fig. 51

#### Erosión por exceso de fluido circulante:

Las barrenas con descarga convencional de fluido pueden sufrir un desgaste excesivo en los dientes, lo cual se muestra en la Figura 52, cuando el lodo contiene una gran cantidad de sólidos abrasivos, o el gasto de circulación es muy alto. En las barrenas convencionales el lodo golpea directamente sobre los conos; la solución a este problema es el uso de barrenas de toberas. Aún en las barrenas de toberas puede provocarse este desgaste por exceso de volumen circulante, aire o lodo Figura 53. Deberá revisarse el aspecto hidráulico para encontrar el gasto de circulación más conveniente.



Fig. 52



Fig. 53

#### Embolamiento por falta de limpieza:

El embolamiento o atascamiento de las barrenas puede ocurrir por un alto peso sobre la barrena y limpieza insuficiente. Las barrenas en estas condiciones presentan desgaste de los dientes en cierta área de los conos, como lo muestra la Figura 54, ya que estos dejan de girar obstruidos por los recortes de la formación que la limpieza insuficiente ha dejado. Una expresión de este problema puede ser el aumento

de torque en la rotaria. Si esto no se detecta a tiempo, el desgaste por embolamiento puede ser más severo aún, como lo muestra la Figura 55. Debe señalarse que este tipo de desgaste es interpretado erróneamente en ocasiones como desgaste por chatarra en el fondo. Algunas perforadoras, cuando observan este tipo de desgaste, dicen: Que la barrena trabajo sobre fierro, lo cual es incorrecto.

El gasto de circulación insuficiente provoca, también otros problemas, como el desgaste de orificios de toberas, que produce su caída; esta situación no permite continuar perforando normalmente, lo descrito anteriormente lo podemos observar en la Figura 56. La confirmación de que la causa de este desgaste es la falta de limpieza, se advierte en el hecho de que los baleros presentan buenas condiciones, es decir, los conos una vez lavados, giran libremente. Un desgaste parecido puede presentarse cuando los conos de la barrena se atorán por desgaste de los baleros.

En la Figura 57 se revela un desgaste por ausencia de limpieza adecuada; debe notarse el desgaste en la parte exterior de las piernas de la barrena. Por último, un indicador de gasto de circulación insuficiente se advierte en el tono azulado de la barrena cuando ésta es sacada del pozo. Este color azul se produce por el exceso de calor generado y que no fue disipado por el volumen de lodo circulante insuficiente. La solución de este problema se encuentra mediante un análisis adecuado de la distribución de energía hidráulica disponible para lograr la limpieza suficiente del fondo.



Fig.54



Fig.55



Fig. 56



Fig. 57

#### Desgaste de baleros:

La falla de las barrenas originada por desgaste en los baleros se puede presentar en los baleros exteriores, como se muestra en la Figura 58, esto puede suceder por horas excesivas de rotación y/o altos pesos sobre barrena. Observamos que los dientes están parcialmente achatados (planchados), en virtud de que los conos se atoraron por falla en los baleros exteriores. La falla no siempre ocurre en los tres conos, sino que puede ser sólo en uno, o en dos de ellos. Este tipo de falla, más que ninguna otra, contribuye a la terminación prematura de una "corrida" de barrena. En la Figura 59, se distingue el estado en que queda el muñón cuando fallan los baleros; notarse que las pistas, tanto de los rodillos como de las esferas, se encuentran muy dañadas, no obstante que se trata de una barrena sellada.



Fig. 58



Fig. 59

En las Figuras 60 y 61 se observan barrenas que fallaron por baleros interiores y exteriores. La falla de los baleros preocupa mucho a los perforadores, a tal grado que la decisión de sacar las barrenas por ese motivo provoca que la vida de las barrenas queda prematuramente finalizada. Existe el temor de que la falla de los baleros pueda ocasionar la caída de los conos, lo que es improbable pues las barrenas pueden haber perdido, por desgaste todos los rodillos (baleros exteriores); si las esferas o baleros de las bolas están en su lugar, el cono no se caerá. Lo descrito anteriormente lo ilustramos en la Figura 46.



Fig.60



Fig.61

La compañía Hughes desarrolló recientemente un sistema de anillo de acero que sustituye a las esferas, como se observa en la Figura 62. una falla de baleros exteriores se manifiesta por el incremento de torque en la rotaria, el que puede ser intermitente en un principio. Esto se debe a que alguno de los rodillos se han atravesado sobre la pista, lo cual provoca que el cono se trabe y ya no gire.

En resumen, la falla puede ser causada por los siguientes motivos:

- Altos pesos sobre barrena
- Horas excesivas de rotación
- Erosión por sólidos en el fluido de perforación
- Corrosión por la presencia de compuestos de azufre en el lodo.

Medidas correctivas:

1. Si es costeable, reducir el peso sobre barrena o cambiar a un tipo de barrena más duro.
2. Si es igualmente costeable, reducir la velocidad de
3. Eliminar sólidos y/o corrosivos del lodo



Fig.62

#### Problemas especiales:

El uso de cuadros en mal estado, por desgaste para conectar y desconectar las barrenas o cualquier otro procedimiento inadecuado en el apriete, puede dañar la barrena, tal como lo muestra la Figura 63, en la que se deformó el orificio de la tobera. Esta deformación, seguramente, dañó el anillo sellado y el candado, lo que provocó la caída de la tobera y el final de la vida de la barrena.

En la Figura 64 se registra el caso en el que se ha roto una pierna de la barrena con todo y cono. Esto pudo haber ocurrido por bordes en las rocas o por obstrucciones al introducir la barrena dentro del pozo.



Fig.63



Fig.64

Otros tipos de daños que suceden derivados del impacto, son:

\* Marcas en las pistas de los baleros (Figura 65).

\* Rotura de los conos y dientes.

Todos esos problemas, que pueden evitarse o disminuirse mediante la práctica de operaciones adecuadas, reducen notablemente el rendimiento de las barrenas. uno de esos problemas o practicas inadecuadas que originan deterioros es el paro repentino en la bajada de la sarta cerca del fondo, tal ocurre por inercia y elasticidad de la sarta, ya que ésta puede llegar a golpear el fondo del pozo.

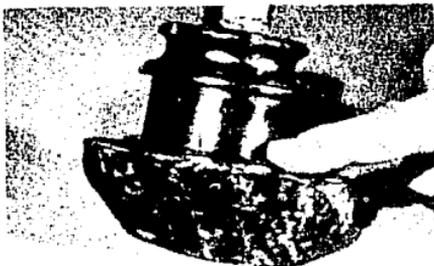


Fig. 65

#### Desgastes excesivos.

Puede decirse, en términos muy generales, que forzar a llegar a las barrenas a un grado de desgaste total de dientes y baleros no es cotejable en virtud de que su eficiencia en la perforación disminuye notablemente cuando los desgastes han llegado más allá del sesenta por ciento. Los desgastes excesivos también provocan problemas adicionales tales como pescados, agujeros reducidos, etc.

En conclusión, podría decirse la inconveniencia de desgastar excesivamente las barrenas, como lo muestran las Figuras 66 y 67.



Fig.66

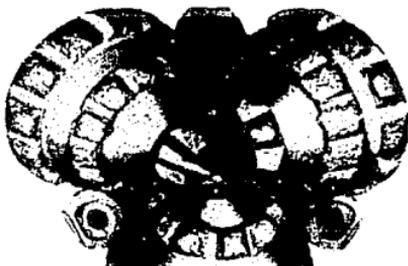


Fig.67

### Evaluación de desgastes en barrenas de insertos.

Las barrenas con insertos de carburo de tungsteno como dientes, se desarrollaron, en un principio, para perforar formaciones extremadamente duras por ejemplo, pedernales abrasivos y cuarzos, que resultaban muy costosos en su perforación debido a la corta duración de las barrenas de dientes de acero. Ahora ya se cuenta con tipos de insertos destinados a las formaciones blandas, medias y duras. La estructura cortadora de insertos tiene vida larga comparándolas con los dientes de acero, sobre todo cuando se seleccionan y operan adecuadamente. Como ejemplo de desgastes deseables en estas barrenas los tenemos en la Figura 68.

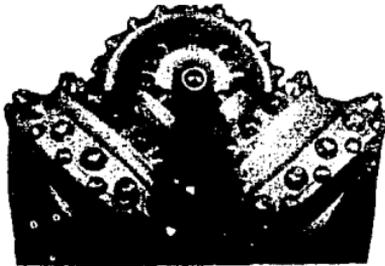


Fig.68

### Roturas de insertos.

La rotura de los insertos es el tipo de daño que comúnmente se registra en estas barrenas, y lo podremos observar en las Figuras 69 y 70. Esto sucede cuando la formación es más dura que el tipo de barrena, y si a ello se agrega el que la barrena por diseño tenga excentricidad en los conos, la formación muy dura y alta velocidad de rotación, sucede entonces que la rotura de insertos llega a ser muy severa, como se ilustra en la Figura 71.

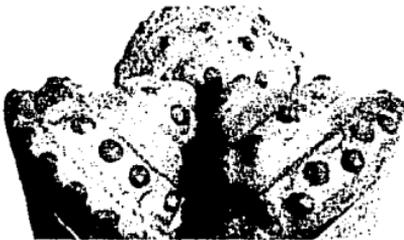


Fig.69



Fig.70



Fig. 71

Si la rotura de los insertos se concentra en los periféricos y calibradores, la causa específica se origina en la alta velocidad de rotación y demasiada excentricidad en los conos de la barrena, como se ilustra en las Figuras 72 y 73.

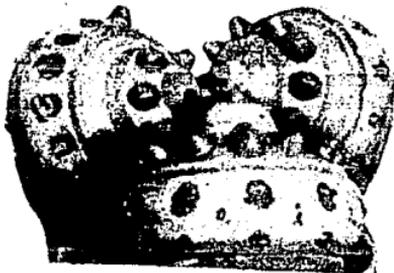


Fig. 72

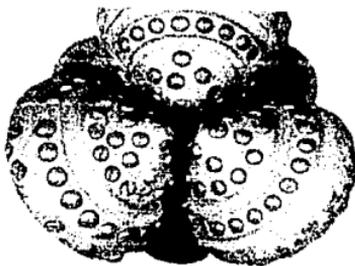


Fig. 73

Erosión de la coraza del cono.

Si los insertos son cortos y la formación blanda, se produce un contacto íntimo entre la formación y los conos lo cual provoca una erosión en la concha del mismo, como lo ilustran las Figuras 74 y 75. Esta erosión también pudo ser causada por un exceso de fluido circulante lo cual se puede apreciar en la Figura 76.



Fig. 74



Fig. 75

La erosión de los conos causa problemas adicionales como la pérdida de insertos (Figura 77), los que se salen de sus sitios por ausencia de soportes. En la Figura 78 se especifica el desgaste del cono alrededor de los insertos; ese desgaste puede provocar la caída o pérdida de los insertos; cabe agregar que esa caída origina el acortamiento prematuro de la barrena.



Fig. 76

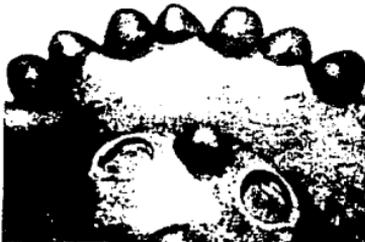


Fig. 77



Fig. 78

Otro problema que se deriva de la erosión del cono se observa en la fractura del mismo, cuyo origen se localiza en el debilitamiento de sus paredes, tal como lo muestra la Figura 79.

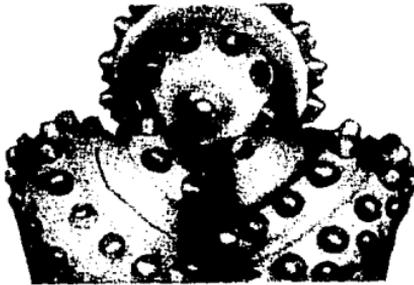


Fig.79

Desgaste fuera del centro en barrenas de insertos.

El desgaste fuera de centro ocurre en barrenas de insertos en las mismas condiciones e iguales resultados que en las barrenas de dientes maquinados. La primera razón del desgaste fuera de centro se advierte en la velocidad de penetración insuficiente en formaciones blandas y medias. En este caso, la penetración es tal que el nuevo agujero no se genera suficientemente rápido para contener la barrena dentro de los confines de agujero perforado. Cuando esto sucede, la excentricidad de los conos ocasiona que la barrena perfora un agujero de mayor calibre. Lo anterior se suscita porque uno de los conos rompe la pared del agujero y los otros dos cortan dentro del diámetro de ese agujero. Aquí se originan bordes de agujero sin cortar en el fondo que motivan el contacto excesivo entre la formación y las ranuras del cono entre hileras de insertos, como se muestra en las Figuras 80 y 81.



Fig.80



Fig.81

Problemas de escasa frecuencia.

En la Figura 82 se distingue una barrena "nucleada", en la que el área de la nariz de los tres conos se ha desgastado o perdido en virtud de la aplicación de pesos excesivos en esta porción del cono, lo que produce la rotura del cono o pérdida severa del metal interno del mismo. Esta acción no puede prevenirse normalmente y ocurrirá de vez en cuando. Lo importante, en este caso, una vez que se presente esta condición, es que en la operación de la siguiente barrena se tenga especial cuidado en el comienzo de su vida con la finalidad de eliminar el cono de formación remanente en el fondo del agujero. Si se aplica poco peso sobre barrena y altas revoluciones por minuto, la acción anterior arrojará mejores resultados. El inicio inadecuado de esta barrena engendrará excesivas cargas en las narices de los conos con la consiguiente rotura de los insertos y/o conos y, además la falla prematura de la barrena.



Fig. 82

En la Figura 83 se revela el desgaste de los insertos cuando los conos se traban debido a la falla de los baleros. Cabe indicar que este desgaste no se produce en barrenas de chumaceras. En la Figura 84 se muestra una barrena que se ha dañado por materiales extraños en el agujero, quizá materiales provenientes de chatarra de insertos o dientes de barrenas depositados en el agujero con anterioridad.

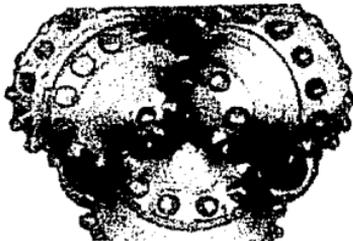


Fig. 83



Fig. 84

## Utilización de los datos de desgaste.

El objetivo de la clasificación del desgaste de insertos se fundamenta en la ayuda que ofrece para la adecuada selección de las barrenas que se utilizarán en perforaciones futuras.

Para esto se formularon algunas preguntas, que son las siguientes:

\* ¿Podrá utilizarse con éxito una barrena cuya perforación sea más rápida?

\* Si su vida al parecer es más corta, ¿debió usarse una barrena con insertos más cortos?

\* Una barrena diseñada con otra forma de insertos, ¿pudo haber perforado más rápidamente o en su caso, durado más tiempo?

\* ¿Se utilizó una barrena con la cantidad correcta de excentricidad?

Para responder adecuadamente a las anteriores preguntas es necesario tener la información que proporcionan los reportes de las barrenas en relación con la existencia de roturas de insertos en las hileras interiores, o bien roturas de insertos y/o desgaste en las hileras del calibre; si no hay insertos rotos ni desgaste en el calibre, por ejemplo se podría recomendar una barrena con mayor excentricidad e insertos tipo cincel largos si se piensa en mucha lutita. El desgaste en el calibre o rotura de insertos en la hilera del calibre, sugerirá una barrena con menor excentricidad.

A continuación se presentan algunos ejemplos de codificación de desgastes.

- En la Figura 65 se muestra una barrena que registra los siguientes desgastes:

T2 - La cuarta parte de los insertos se han gastado.

b7 - Casi se terminó la vida del sistema de rodamiento.

O - La barrena perdió diámetro.

En términos generales, los insertos están en buen estado; los baleros se acabaron. Quizá esto indique que se podría utilizar una barrena con mayor excentricidad, así como insertos más largos, sobre todo si se espera formación blanda.

En la Figura 86 se observa una barrena con las condiciones siguientes:

T8 - La estructura cortadora se terminó

B4 - Todavía queda vida en los baleros

I - No hay desgaste diametral.

BI - Insertos rotos en las hileras interiores.

Si la barrena se encuentra en esas condiciones, podrá sugerirse la utilización de barrenas con insertos más cortos.



Fig. 85



Fig. 86

En la Figura 87 se tiene una barrena, la cual revela los desgastes siguientes:

T3-B6-O-3/8;W1

El desgaste es excesivo en el calibre de esta barrena; con excentricidad y sin rotura de insertos, probablemente indicaría que se ha usado un tipo de barrena con demasiada excentricidad.



Fig. 87

En la Figura 88 se presenta una barrena con los desgastes siguientes;

T6-B4-O-1/3;BG

Esto indica que se tiene una barrena con excentricidad con las hileras calibradoras rotas. Lo anterior significa que la excentricidad de los conos es demasiada para la abrasividad de la formación.

En la Figura 89 se ilustra una barrena con un desgaste balanceado entre los insertos y los baleros. Aquí podría pensarse que la selección de la barrena ha sido adecuada. Sus condiciones de desgaste son:

T4-B5-I

T4 - La mitad de los insertos se han desgastado, roto o perdido.

B5 - La vida del balero gastada 5/8

I - No hay desgaste de calibre.



Fig. 88



Fig. 89

### Ejemplos de aplicación.

A continuación se presenta un análisis de ejemplos adicionales en relación con los desgastes, sus causas y soluciones.

#### Ejemplo 1:

En la Figura 90 se muestra una barrena con los siguientes desgastes :

TS-B4-I-BI

Causa: La formación es demasiado dura para el tipo de barrena, en los niveles de energía aplicados o para ambos.

Sugerencia: Utilícese una barrena diseñada para formación más dura.



Fig. 90

Ejemplo 2:

La Figura 91 muestra una barrena con el siguiente código de desgaste.

T4-B4-I-BG

Insertos rotos, en apariencia con fallas de tipo impacto en las hileras exteriores.

Causa: Niveles de energía con aplicación excesiva, especialmente en la velocidad de rotación para la dureza de la formación.

Sugerencia: Aplíquese menor velocidad de rotación.



Fig. 91

Ejemplo 3:

La barrena de la Figura 92 presenta el siguiente desgaste:

T2-B3-1-B1

Causa: Insertos rotos en la hilera media de dos conos, posiblemente producidos por nódulos de pirita de la formación, chatarra en el pozo, etc.

Sugerencia : Si hay chatarra, ejecutar un viaje de limpieza del fondo, o aplicar peso poco a poco hasta que la barrena forme su propia huella; mantener una carga uniforme.

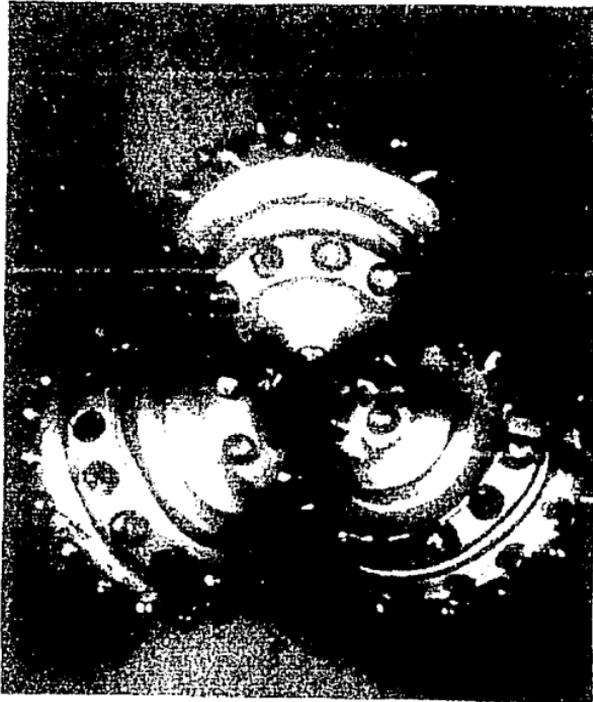


Fig.92

**Ejemplo 4:**

La barrena que se ilustra en la Figura 93 presenta el siguiente desgaste:

T7-B4-I-BI-WI

**Causa:** Insertos rotos en todo el cono quizá por una selección inadecuada de barrena, uso excesivo de los niveles de energía o ambos. La ruptura inicial produjo probablemente chatarra de carburo de insertos y originó fractura adicional.

**Sugerencia:** Mejorar la selección del tipo de barrena y/o aplicar niveles de energía más moderados.



Fig. 93

## Ejemplo 5:

La Figura 94 presenta las siguientes condiciones de desgaste:

T4-B2-I-LI

Causa: Erosión de los conos y pérdida de insertos en la hilera del calibre por circulación de volúmenes excesivos de aire en formaciones abrasivas. Los insertos se perdieron al erosionarse la matriz del cono.

Sugerencia: Utilizar el volumen de aire necesario si se confirma que el anterior fue excesivo.



Fig.94

**Ejemplo 6:**

En la Figura 95 se revelan los desgastes con la siguiente codificación:

T2-B6-I-BI.

**Causa:** Erosión severa de los conos y agrietamiento de uno de ellos, probablemente por utilizar un lodo con alto contenido de arena y sólidos, o también por peso excesivo sobre la barrena.

**Sugerencia:** Controlar el contenido de sólidos y arena en el lodo ; si es costearable, aplicar un menor peso sobre la barrena.



Fig.95

**Ejemplo 7:**

La barrena de la Figura 96 presenta los siguientes desgastes, cuya codificación es:

**T4-B4-I-BI**

**Causa:** El centro de la barrena está socavado por la aplicación excesiva de carga sobre el área de la nariz de los conos, en una barrena inadecuada, quizá por haber chatarra en el pozo o por falta de limpieza del fondo.

**Sugerencia:** Al inicio de la vida de la barrena, aplicar el peso sobre ella poco a poco (dos o tres toneladas cada cinco o diez minutos); si hay chatarra en el fondo, efectuar un viaje de limpieza o bien utilizar una canasta lateral cerca de la barrena.

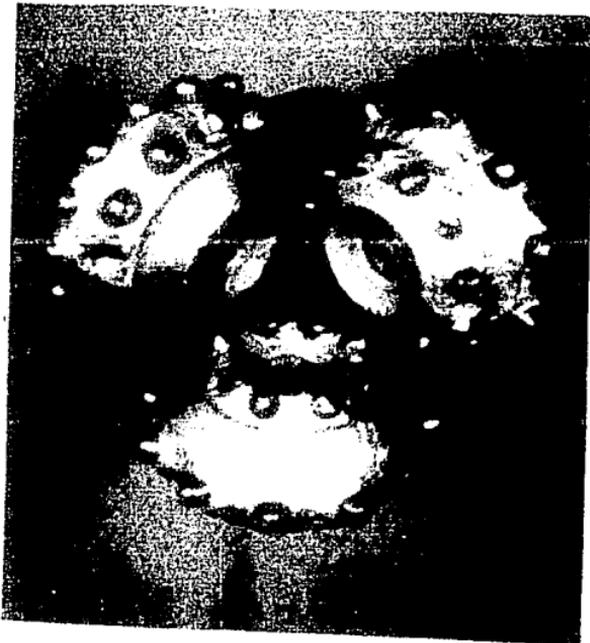


Fig.96

## Ejemplo 8:

En la Figura 97 se presenta una barrena "planchada" o arrastrada por desgaste, cuya codificación es la siguiente.

T2-B8-I-BI y LI

**Causa:** Esta barrena presenta desgaste por arrastre en los conos debido a que, cuando menos, uno de los conos se trabó por falla de los baleros, los que al atravesarse en la pista de rodamiento provocan el atoramiento de los conos.

**Sugerencia.** No alargar tanto la vida de la barrena; observar con mayor cuidado los indicadores de torsión de la rotaria.



Fig.97

Ejemplo 9:

La Figura 98 presenta una barrena cuyos desgastes son los siguientes:

T6-B8-I-BI

Causa: La interferencia de los conos y la subsecuente ruptura de los insertos se origina en la falla del sistema de rodamiento o piernas flexibles de la barrena.

Sugerencia: Reducir las horas de rotación de la barrena si su vida fue muy larga; observar con mayor cuidado el indicador de torsión en la rotaría con el fin de prevenir un desgaste tan severo.



Fig. 99

El factor económico es de gran importancia por lo cual el costo por metro perforado, también puede utilizarse para la evaluación de las diferentes condiciones de operación y tipos distintos de barrenas usados en intervalos similares.

Por ejemplo: se trabajó una barrena de 9 1/2", tipo 111, con doce toneladas de peso, 150 rpm, 320 gpm, 135 Kg/cm<sup>2</sup> de presión de bomba, en el intervalo 2100-2500m, habiendo perforado 365m. en 28 horas; si se considera el costo del equipo por hora en 35,000 dls, tiempo de viaje a esa profundidad 9.5, y tiempo de conexión 10 minutos. En estas mismas condiciones se trabajó otra barrena igual con 14 toneladas de peso y 130 rpm, que perforó 320m. en 24 horas.

Para obtener las mejores condiciones de operación se aplica el costo/m como factor de comparación. Como se muestra en la Tabla 7:

Bna.	Costo Bna.	Diámetro y tipo	Mts. Perf.	Vida Bna.	Velocidad de penet.	Costo por m(dls)
1	120,000	9 1/2-111	365	28	13.04 m/h	4562.18
2	120,000	9 1/2-111	320	24	13.34 m/h	4676.59

Tabla 7.

Esta comparación muestra que resulta más económico operar este tipo de barrena con 12 toneladas de peso y 250 rpm, que el de 14 toneladas y 130 rpm. Supóngase ahora que se prueba, en las mismas condiciones, una barrena de 9 1/2, tipo 121, con 16 toneladas y 120 rpm, que perfora 500 mts. en 40 horas. En este caso, el costo por metro será de 4342.52 dls/m, lo que indica que indica que estas condiciones y el tipo de barrena, son los más adecuados.

Otra manera de utilizar el costo por metro radica en mejorar el rendimiento de las barrenas cuya vida útil no fue consumida en su totalidad. Para esto se debe correlacionar el costo por metro con la codificación de desgastes. Así, por ejemplo, los datos de rendimiento y desgaste de una barrena, como se muestra en la tabla N° 8:

Bna.	Costo Bna.	Mts. perf.	Vida Bna.	Vel. Penet.	PSB	Rotaria	Desgastes
1	120,000	320	24 h	13.34m/h	14 ton	130 rpm	T3-B3-I

Tabla 8

Los desgastes indican que la barrena quedó con vida útil sin aprovechar; en una situación similar futura, el rendimiento podría representar estos valores:

395m. en 30 horas, desgastes T5-B5-I, con lo que el costo por metro será 4441.32 dls/m, que es menor que 4676.59 dls/m., lo que representa un ahorro de 92,931.65 dls., en el intervalo considerado.

A continuación se analizará un procedimiento basado en el costo/metro, que permitirá o se tratará de obtener con él los máximos rendimientos de cada barrena en uso. Se debe aclarar que este procedimiento no es totalmente teórico, sino que fue concebido y aplicado con resultados altamente satisfactorios en los campos de perforación del sureste de México y posteriormente en otras zonas del país. Este método es de aplicación práctica en el lugar mismo de la perforación. Para la descripción del procedimiento se expresarán dos consideraciones que son básicas en su aplicación. Como primer término, se ha observado que el costo por metro perforado sigue una tendencia descendente en el inicio de la vida de la barrena; posteriormente y como segundo término, se observa que la tendencia de costo por metro perforado se comporta de forma más o menos constante; incrementándose posteriormente; lo anterior puede visualizarse con mayor objetividad en la Figura 99:

CUEVA DEL COSTO/METRO  
VS. TIEMPO DE PERFORACION

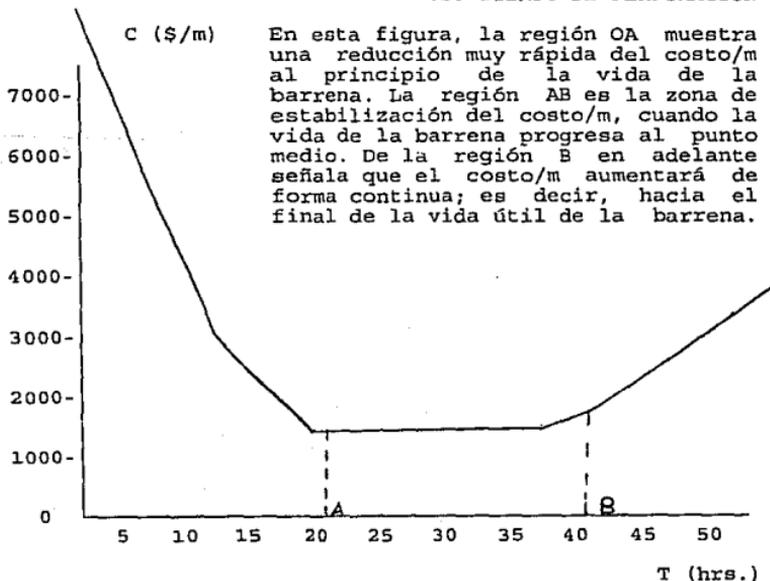


Fig.99

## EVALUACION DE RENDIMIENTOS.

## Costo por metro:

Con la finalidad de evaluar el rendimiento de las barrenas, se han utilizado diferentes parámetros de comparación, como: horas totales de vida útil, longitud total perforada, velocidad de perforación, costo de adquisición de la barrena etc.

El empleo de estos parámetros, como indicadores de rendimiento, será adecuado sólo en casos contados, cuyas características especiales lo justifiquen; en términos generales, estos parámetros en forma individual no es lo más aconsejable en virtud de que se deben tomar en cuenta otros factores de importancia.

El objetivo de la evaluación de los rendimientos de las barrenas, es de intentar mejorarlos hasta alcanzar un valor óptimo factible; es decir, buscar la obtención del costo mínimo de perforación sin descuidar la seguridad de las operaciones, cumplir simultáneamente con todas las especificaciones de las perforaciones mismas, y observar, inclusive, las restricciones que pudieran existir.

Este parámetro evaluativo llamado Costo por metro (o costo por pie) se ha considerado como uno de los mejores, el cual se calcula involucrando los siguientes factores:

1. Costo de la barrena
2. Costo de operación del equipo de perforación
3. Horas totales de vida útil de la barrena
4. Horas de viaje de tubería para cambiar las barrenas
5. Tiempo empleado para realizar las conexiones de tubería durante la vida de la barrena
6. Longitud total perforada por la barrena

Ahora considerando todo lo anterior tenemos el siguiente ejemplo:

Se tiene una barrena que perforó 175 metros en 25 horas, con un equipo cuya operación cubre un costo de 35,000.00 dls por hora, el tiempo empleado para realizar un cambio de barrena a esa profundidad, es de 8 horas, 20 minutos; las conexiones se efectúan, aproximadamente en 10 minutos cada una; el costo de la barrena es de 125,000.00 dolares; entonces, el costo por metro se calculará de la siguiente manera:

1. Se ordenan e identifican los datos.

- Costo de la barrena  $B = 125,000.00$  dólares
- Costo de operación de equipo  $R = 35,000.00$  dls/hora
- Horas de vida de la barrena  $T = 25$  horas
- Tiempo de viaje  $Tv = 8.333$  horas
- Tiempo de conexión  $Tc = \frac{175}{9.15} \times \frac{10}{60} = 3.19$  hrs
- Longitud perforada  $M = 175$  m.

Como se observó para calcular el tiempo de conexión se divide la longitud perforada  $M$  entre  $9.15$ , que es la longitud promedio de un tubo de perforación; con este cociente se calcula el número de conexiones, el cual resultó de  $19.125$  conexiones. A este resultado se le multiplica por el tiempo de conexión en minutos; finalmente se divide entre  $60$  como factor de conversión a horas; es decir:

$$\frac{19.125 \times 10}{60} = 3.19 \text{ horas}$$

2. En seguida se calcula el costo por metro mediante la aplicación de la ecuación:

$$C = \frac{B + R [T + tv + tc]}{M}$$

Sustituyendo valores

$$C = \frac{125,000 + [35,000 \times (25 + 8.33 + 3.19)]}{175}$$

$$C = 8018.28 \text{ dls/m}$$

El rendimiento obtenido por esta barrena significa que cada uno de los  $175$  metros que perforó, arroja un costo de  $8018.28$  dolares.

Nótese que además de incluir los factores mencionados anteriormente, tales como horas de vida, costo de la barrena, longitud perforada, etc para la obtención del parámetro Costo/m., se han involucrado más factores como son: costo de operación del equipo, tiempo de viaje y conexiones.

### Utilización del parámetro Costo/metro

Si en un mismo intervalo se tuvieran rendimientos de diferentes barrenas utilizadas en pozos vecinos, las diferencias del parámetro costo/m se tienen a continuación en la tabla N° 9.

Costo Bna (dls)	Vida útil	Longitud perforada	Velocidad de penetración	Costo/metro (dls)
A 125,000	25 hrs.	175 mts.	7 m/h	8018
B 200,000	38 hrs.	260 mts.	6.8 m/h	7643
C 600,000	75 hrs.	465 mts.	6.2 m/h	8200

Tabla 9

Analizando la tabla N° 9, tenemos que:

La barrena A podría ser considerada como la mejor, basándose en la velocidad de penetración ya que fue la mayor 7 m/h y se tiene el menor costo de barrena 125,000 dls.

Ahora la barrena C sería considerada la mejor desde el punto de vista de mayor longitud perforada (465 mts.) y mayor vida útil de 75 horas.

La barrena B podría considerarse poco interesante en virtud de que no tiene vida útil prolongada, ni la mayor longitud perforada ni, inclusive, la mayor velocidad de penetración; tampoco el menor costo de barrena.

Costo por metro parcial (Cp):

Ahora entraremos en la definición de un término denominado "costo/metro parcial"; su descripción es la siguiente:

- Costo/m parcial será el costo/m perforado que se obtenga en un determinado momento durante la vida de la barrena, al aplicar la siguiente ecuación:

$$C = \frac{[B + R (T + tc + tv)]}{M}$$

Considerando los valores actuales, en ese momento, de los parámetros T, tc y M.

En el caso particular del tiempo de viaje (tv), se deberá estimar su valor correspondiente con la utilización de un factor de la experiencia de campo en cada zona. El costo/m parcial será entonces una forma de evaluar de manera continua

o intermitente el costo/m durante el desarrollo de la vida de una barrena. Para mejor ilustración de este concepto, tenemos el siguiente ejemplo:

Sea una barrena de costo igual a 125,000.00 dls que en su operación presentó el siguiente récord de perforación, el cual se registro en la tabla N° 10:

Prof.	Long. perf.	Tiempo de conexión	Tiempo de vida	Penet.	Tiempo viaje	Costo parcial
2950 m	0	tc	0 hrs.	m/h	hrs.	dls/m
2975 m	25	0.455	2	12.5	11.9	25,097.00
2995 m	45	0.82	4	11.25	11.98	17,064.44
3031 m	81	1.48	8	10.125	12.12	11,554.32
3087 m	137	2.5	15	9.133	12.35	8,939.05
3157 m	207	3.77	25	8.28	12.63	7,869.02
3175 m	225	4.10	28	8.036	12.70	7,768.44
3185 m	235	4.28	30	7.833	12.74	7,768.51
3193 m	243	4.43	32	7.594	12.77	7,826.75
3199 m	249	4.54	34	7.323	12.80	7,938.96

Tabla 10.

Considerando 10 minutos por conexión y costo de operación del equipo de 35,000.00 dls/hora. Se calcularon los costos/m parciales mostrados en la ultima columna de la tabla anterior. Para el tiempo de viaje se aplicó la siguiente expresión:

$$tv = 0.004 (\text{hrs./m}) \times \text{Prof}(m)$$

Así el valor de este parámetro se calcula en función de la profundidad, el cual se tiene en la penúltima columna de la tabla anterior.

Ahora bien, analizando estos resultados se observa que, como antes mencionado, el costo/m parcial tiene una tendencia decreciente al principio, y hacia el final, después de haber pasado por un valor mínimo, se incrementa. En este caso a la profundidad de 3175 m, se obtuvo el costo/m parcial mínimo, cuando ya se había perforado 225, en 28 hrs. de rotación. A partir de este momento, el costo/m parcial, al aumentar, indica que ya resulta incosteable continuar perforando con esta barrena, ya que, si las condiciones de operación

permanecen constantes, así como las propiedades de la formación, la incosteabilidad se produce por efecto del grado de desgaste de la barrena. Sería muy ventajoso que se pudiera identificar oportunamente este momento del costo/m parcial mínimo para decidir el cambio de barrena. Debe aclararse que este es un punto de vista teórico, cuya eficiencia puede mejorar si se complementa con observaciones y criterios derivados de la experiencia operativa, práctica de campo y sentido común.

En muchos casos se podrá elaborar en el pozo la gráfica del costo/m parcial vs horas de perforación o metros perforados, la que, para este ejemplo quedaría como la Figura 100:

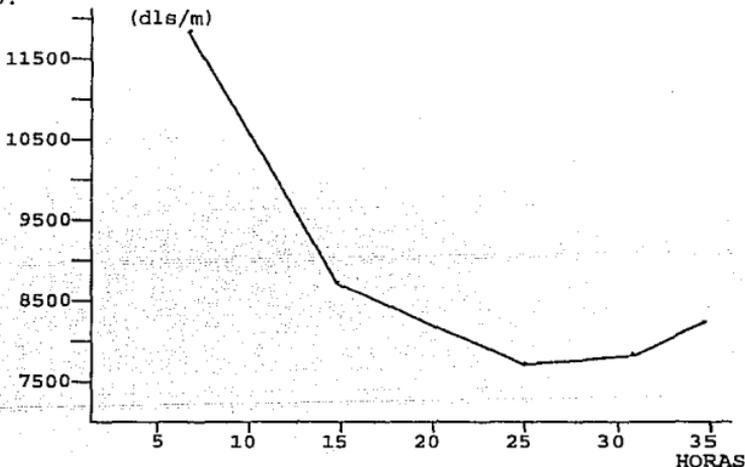


Fig.100

De acuerdo con la trayectoria de esta curva, el momento en que se sacó la barrena se había presentado un incremento en el costo/m parcial, lo que indica que la decisión tomada fue correcta, sin embargo, algunos de los aspectos prácticos que se deben conjuntar con esta técnica para la toma de decisiones, son los siguientes:

- 1) Tomar en cuenta las manifestaciones superficiales que indican el estado mecánico de la barrena tanto en su estructura de corte como en el sistema de rodamiento.
- 2) Tomar en cuenta las características de la litología que se está perforando y observar los cambios que se presenten.
- 3) Las características de diseño y operación de las barrenas en uso, tales como vida útil promedio, sistema de rodamiento, estructura de corte, etc.

El análisis del costo/m parcial deberá complementarse tomando en cuenta los aspectos antes señalados, esto es para fundamentar la toma de decisiones sobre la vida útil de las barrenas. A manera de ilustración se podría decir que en el ejemplo anterior, en el que se dio por terminada la vida de la barrena a las 34 horas, si la barrena en cuestión se tratara del tipo chumacera con insertos, entonces hubiera sido incorrecto sacarla basándose exclusivamente en el costo/m parcial ya que una barrena de ese tipo tiene una vida útil generalmente larga que podría llegar a ser de 150 horas o más. Otro caso podría presentarse en el que el costo/m parcial va decreciendo, por lo que se podría decir que se debe continuar perforando con esa barrena; sin embargo, si el indicador de torsión (si se cuenta con él) muestra incrementos fuertes en la torsión de la mesa rotatoria para girar la sarta, atribuible completamente a mal estado de los baleros de las barrenas, o si, por las observaciones directas en el piso de perforación resulta evidente que el sistema de rodamiento no está ya en buenas condiciones, resultaría riesgoso continuar perforando puesto que se podría dejar conos en el agujero, provocando la necesidad de trabajos de "pesca" consecuentes. Con esto se pretende mostrar la conveniencia de integrar los aspectos teóricos y prácticos para que las decisiones tomadas sean lo más efectivas posibles. Aun así es importante subrayar que la evaluación y codificación de los desgastes de cada barrena usada servirán para sancionar, corregir y perfeccionar el método.

Con el fin de darle un carácter sencillo y facilitar su aplicación en el campo, se ha establecido el siguiente procedimiento, antes mencionado, que ha sido aplicado en la práctica con buenos resultados en los campos de perforación de México.

Procedimiento para obtener el máximo rendimiento de las barrenas.

De acuerdo con lo anterior, y tomando en cuenta que no siempre será fácil elaborar la gráfica del costo/m parcial vs tiempo de rotación en el pozo, por las condiciones propias del trabajo, se ha definido un parámetro llamado "Tiempo máximo permisible" (TMP), que se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{TIEMPO MAX.PERM.} = \frac{\text{COSTO/M PARCIAL}}{\text{COSTO OPER. EQ'}} \times 60$$

$$\text{o más sencillo} \quad \text{TMP} = 60 \times \frac{\text{CP}}{\text{R}}$$

### Funcionamiento de este parámetro.

La mecánica consiste en que se debe detectar el punto de menor costo/m parcial para dar por terminada la vida de la barrena, pero con una tolerancia para compensar los errores en la medición y registro de los datos, ya que en el equipo de perforación no puede tenerse exactitud cuidadosa al marcar un metro sobre la flecha, puesto que se perdería tiempo.

De esta manera cuando ya se tiene calculado el costo/m parcial en un momento dado, simultáneamente se calcula el tiempo máximo permisible correspondiente, que será la base de comparación para los metros que se perforen subsecuentemente.

Este tiempo máximo promedio expresa los minutos que deberán emplearse para perforar el o los metros siguientes. Cuando la penetración real en minutos/metro es mayor que el TMP indica que el costo/m parcial está aumentando y el momento de sacar la barrena para cambiarla se aproxima. Por lo contrario, si la penetración real es menor que el TMP, entonces indica que el costo/m parcial sigue disminuyendo y la perforación es aún costeable. Aplicando este procedimiento al ejemplo ilustrado anteriormente, se tiene los siguientes resultados en la tabla N° 11:

Prof.	Mts. Perf.	Hrs. de Perf.	Penet. prom.	Penet. por etapa	TMP min/m	Costo/m parcial
2975	25	2	4.8 min/m	4.8 min/m	43.0	25,097.00
2995	45	4	5.33 "	6.0 "	29.2	17,064.44
3031	81	8	5.92 "	9.66 "	19.8	11,554.32
3087	137	15	6.57 "	7.50 "	15.3	8,939.05
3157	207	25	7.25 "	8.57 "	13.5	7,869.02
3175	225	28	7.47 "	10.00 "	13.3	7,768.44
3185	235	30	7.66 "	12.00 "	13.3	7,768.51
3193	243	32	7.90 "	15.00 "	13.4	7,826.75
3199	249	34	8.20 "	20.00 "	13.6	7,938.96

Tabla 11.

Ahora, si la tolerancia que se mencionó, es igual a un 10% se podría decir que a 3185 m el T.M.P., que es el que tiene el valor de 13.3 min./m más el 10% de tolerancia, significa que los siguientes metros deberán perforarse en un tiempo máximo de 14.6 minutos cada uno para que sea aun costeable continuar perforando con esa barrena, sin olvidar que los aspectos prácticos ya mencionados, sean tomados en cuenta para tomar decisiones e, inclusive, mejorar esta determinación.

## MECANICA DE LA PERFORACION.

## Mecanismo de la formación de cráter.

La capacidad de una barrena tricónica para perforar depende de su habilidad para formar y remover astillas de la "cara" de la roca. La eliminación de astillas es principalmente una función de las propiedades del fluido de perforación y de la hidráulica. Investigaciones que se han realizado han permitido conocer más a fondo el porqué se producen cambios en la velocidad de penetración, como consecuencia de proceso de formación de astillas.

Una barrena perfora formando pequeños cráteres sucesivos en la cara de la roca a medida que es contactada por dientes individuales. Esta formación de cráteres se ilustra en la Figura 101. Cuando un diente aplica primero una carga sobre la cara de la roca, los esfuerzos bajo la roca se incrementan hasta que exceden la resistencia compresiva de la roca, ésta es triturada y forma una astilla. La astilla está compuesta por material polvoso finalmente dividido que se rodea de roca sólida. En la medida en que la fuerza en el diente se incrementa el material dentro de la astilla se comprime aún más y produce esfuerzos horizontales en la roca adyacente. El esfuerzo se incrementa hasta que excede la resistencia de la roca, cuando la resistencia cohesiva de la roca también se excede las partículas rotas tienden a desplazarse a lo largo de la superficie de la falla.

## MECANISMO DE CORTE

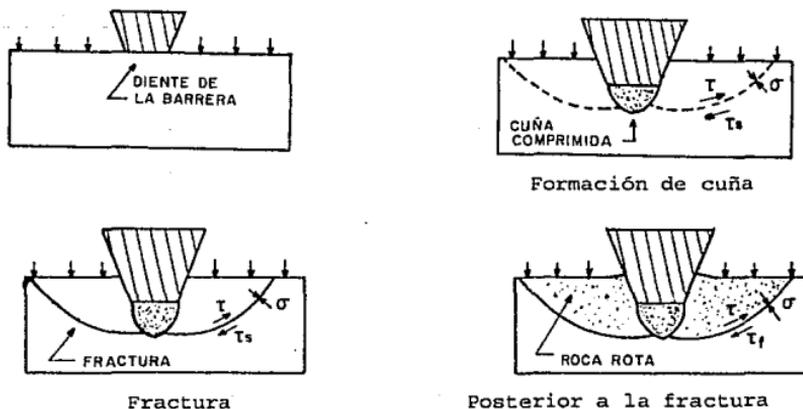
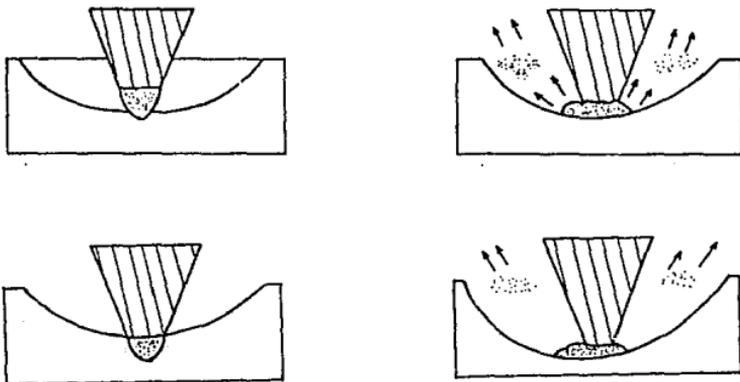


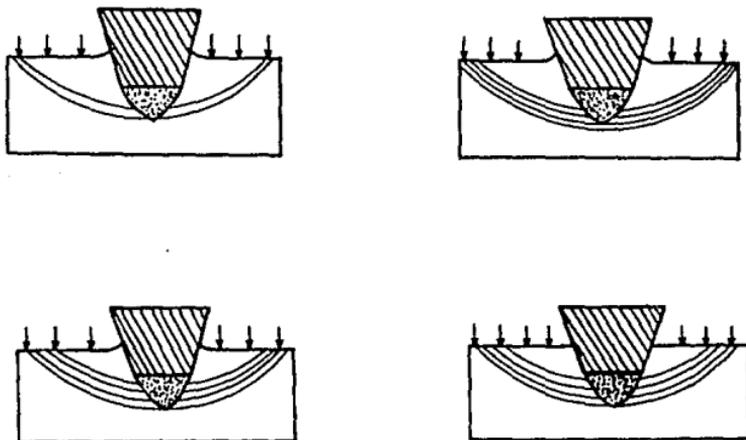
Fig.101

## Efecto de la presión diferencial.

Ya que el diente de la barrena ha formado un cráter, el problema que sigue es la eliminación de las astillas del mismo. La presión diferencial, a través de la "cara" de la roca, y la fricción interna de la misma están entre los factores que controlan este proceso de eliminación de astillas. Cuando la presión es baja o no existe presión diferencial en la "cara" de la roca (perforación con aire), los esfuerzos de fricción en la base del cráter son bajos, las partículas fácilmente se mueven a lo largo de la superficie de la falla y provocan que la cuña debajo del diente se colapse. A condiciones atmosféricas, las partículas son violentamente expulsadas del cráter tal como se registra en la Figura 102. Cuando la cara de la roca está sujeta a altas presiones (peso de lodo incrementado), o a presiones diferenciales (el peso del lodo excede la presión de formación), la serie de eventos mostrados en la Figura 103 produce una cuña confinada. Como resultado de muy altos esfuerzos de fricción a lo largo del plano de la falla en la base del cráter, las partículas de la roca son firmemente mantenidas en su lugar y la cuña permanece confinada. Los esfuerzos dentro de la cuña aumentan en la medida en que la fuerza en el diente también aumenta, hasta que ocurre una falla a lo largo de una segunda trayectoria. A medida que el diente penetra en la roca se inicia una serie de fracturas paralelas, con separación aproximada al diámetro de dos granos. Las partículas de la roca permanecerán dentro del cráter con un equilibrio existente entre los esfuerzos cortantes y de fricción.



CRATER BAJA-PRESION (CUÑA APLASTADA)



CRATER DE ALTA PRESION (CUÑA CONFINADA)

Fig.103

La relación del tipo de cráter con respecto a la limpieza del fondo, muestra que el cráter tipo cuña confinada requerirá mucha más ayuda del fluido de perforación, para la eliminación de los recortes de lo que requerirá un cráter tipo cuña colapsada. Las Figuras 104, 105 y 106 nos permiten visualizar mejor este fenómeno.

En la Figura 104 se observa que, cuando la limpieza del fondo es pobre debido a una presión hidrostática mucho mayor que la presión de poro de la formación, el fluido de perforación busca entrar en los poros para igualar las presiones, no obstante, los pequeños sólidos del lodo quedan en el frente de avance formando un "enjarre" que a su vez soporta la presión diferencial ( $\Delta P_{dif} = p_h - p_p$ ). A medida que los dientes de la barrena atraviesan el enjarre, astillan la formación que se encuentra bajo él. Al retirarse los dientes de la barrena, muchas partículas de la roca pueden quedar bajo el enjarre, lo que es verdadero cuando no hay limpieza completa del fondo. Así, se puede acumular una cantidad de partículas en el fondo que forman un relleno que entorpece la penetración.

En la Figura 105 se ilustra el efecto de la presión hidrostática externa sobre la resistencia de la roca, lo que es indicativo de su perforabilidad. La fuerza externa aumenta la resistencia de la roca a tal grado que cambia el tipo de falla de la misma.

La Figura 106 nos muestra el efecto de esta presión externa. Las dos fracturas de la izquierda fueron hechas bajo presión atmosférica. los números 1600 y 2200 representan las cargas en libras necesarias para producir las fracturas. Estas astillas representan una falla normal frágil y de fácil limpieza. las dos huellas de la derecha fueron hechas bajo una presión hidrostática de 5000 lb/pg<sup>2</sup>. Los números 4000 y 3500 son las cargas en libras necesarias para producir estas impresiones. Este tipo de falla es plástica y para producir estas marcas semiesféricas se utilizó un inserto de carburo de tungsteno de 5mm de diámetro, que fue presionado contra la roca en las condiciones ya descritas. La presión diferencial en el fondo del agujero no siempre se podrá mantener en un valor mínimo; por lo tanto, deberá tenerse la máxima energía hidráulica posible en el fondo para asegurar la mejor limpieza en cada caso.

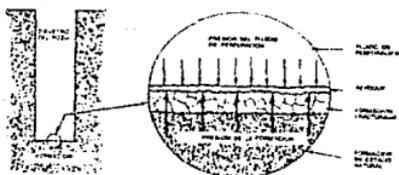


Fig. 104

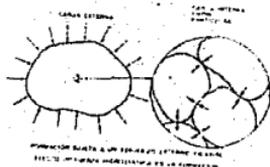


Fig. 105



Fig. 106

Efecto de la energía hidráulica en el fondo.

La hidráulica de perforación rotaria es un tema de gran importancia, por lo cual se presentará a continuación un resumen del procedimiento para asegurar limpieza completa en el fondo.

Los trabajos de investigación y observaciones de campo permiten establecer que, en términos generales, cualquier condición de perforación tendrá limpieza completa cuando el índice de energía hidráulica en el fondo, sea de 2.5 HHP/pg<sup>2</sup>. Este índice puede calcularse de la siguiente manera:

$$\text{IHHP} = \text{nPtob} \times \frac{Q}{1714 \times \text{Aag.}}$$

donde :

nPtob = Caída de presión en las toberas (lb/pg<sup>2</sup>)

Q = Gasto de circulación (gal/min.)

Aag = Area del fondo del agujero (pg<sup>2</sup>)

La caída de presión en las toberas se calcula de la siguiente forma:

$$\text{nPtob} = f \times \frac{Q^2}{1058 \times \text{A}^2\text{tob}}$$

donde:

f = Densidad del lodo (lb/gal)

A<sup>2</sup>tob = Area de flujo en toberas (pg<sup>2</sup>)

Ejemplo:

Se perfora con una barrena de 8 1/2" tipo 131, con un área de fondo del agujero de 56.745 pg<sup>2</sup> y un área de toberas de 0.543 pg<sup>2</sup>, con 320 gpm y lodo de 1.30 gr/cm<sup>3</sup>.

Cálculo del índice de energía hidráulica en el fondo:

$$f = 1.30 \times 8.33 = 10.83 \text{ lb/gal}$$

$$\text{nPtob} = 10.83 \times \frac{(320)^2}{10858 \times (0.543)^2} = 346.39 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{IHHP} = 346.39 \times \frac{320}{1714 \times 56.745} = 1.1396$$

$$\text{IHHP} = 1.1396 \text{ HHP/pg}^2$$

Como se observa en el resultado del ejemplo no se tiene el índice mínimo, de ahí para tener 2.5 HHP/pg<sup>2</sup> sin modificar el gasto, se calcula la caída de presión necesaria en toberas.

$$\text{nPto} = 2.5 \times 56.745 \times \frac{1714}{320} = 760 \text{ lb/pg}^2$$

Ahora se calcula el área de toberas  $A_{\text{to}}$ .

$$A_{\text{to}} = [10.83 \times 320^2 / 10858 \times 760]^{1/2} = 0.3666 \text{ pg}^2$$

Sin modificar el gasto se requiere aumentar la presión de bomba en superficie aproximadamente 400 lb/pg<sup>2</sup>, lo que se producirá automáticamente al reducir el área de toberas. Si la presión de bombeo está en su límite y no es posible admitir este incremento de presión, la alternativa será reducir un poco el gasto. Siguiendo con el ejemplo, supóngase que la presión de bombeo inicial es de 2000 lb/pg<sup>2</sup>, la máxima presión admisible es igual a 2200 lb/pg<sup>2</sup>; esto implica reducir el gasto para no rebasar el límite de 2000 lb/pg<sup>2</sup>.

Con el área nueva de toberas la presión de bombeo sería 2400 lb/pg<sup>2</sup> con 320 gpm; si se aplica la expresión siguiente:

$P = K Q^{1.86}$ , se puede calcular el gasto ajustado a la presión de 2000 lb/pg<sup>2</sup>.

$$Q_2 = (2200/2400)^{1/1.86} \times 320 = 305 \text{ gpm}$$

Con este nuevo gasto la caída de presión en toberas deberá ser:

$$\text{nPto} = 2.5 \times 56.745 \times \frac{1714}{305} = 796 \text{ lb/pg}^2$$

El área de la tobera será:

$$A_{\text{tobera}} = [(1083 \times 305^2) / 10858 \times 797]^{1/2} = 0.3411 \text{ pg}^2$$

De ahí que, con un juego de toberas equivalentes al área de flujo  $0.3411 \text{ pg}^2$ , y un gasto de 305 gal/min, se tendrá un índice de caballaje en el fondo de  $2.5 \text{ HHP/pg}^2$ , con una presión de bombeo en superficie de  $2200 \text{ lb/pg}^2$ .

Debe notarse que el incremento de caballaje en el fondo logrado con este cambio, ha sido de  $64.7 \text{ HHP}$  iniciales a  $141.8 \text{ HHP}$ , es decir, se aumentó  $77.1 \text{ HHP}$ . Ahora observese que en superficie, el cambio en caballaje hidráulico fue como se indica a continuación:

$$\text{Inicial HHP}_{\text{superf.}} = 2000 \times 320/1714 = 373.4$$

$$\text{Final HHP}_{\text{superf.}} = 2200 \times 305/1714 = 391.5$$

$$\text{Incremento en superficie} = 18.1 \text{ HHP}$$

Es decir, no se ha incrementado sensiblemente el esfuerzo de la bomba y/o su máquina impulsora.

## MOLINOS.

Los molinos son herramientas de una sola pieza hecha de aleación de acero y una conexión piñón en la parte superior.

Tienen orificios semejantes a una barrena de rodillos, regular y convencional y unas amplias astrías para desalojar el recorte que efectúan, así como el retorno de los fluidos; éstos orificios se adecúan al tipo de molienda que se vaya a realizar.

En las caras y filos cortantes se les aplica revestimiento de metal duro o carburo de tungsteno, por lo tanto, se consideran como herramientas de fricción.

Para obtener la máxima eficiencia de un molino, los cortes obtenidos deben ser expulsados del agujero mediante la circulación del fluido de control. Para la remoción de los recortes deberán seguirse las prácticas que a continuación se mencionan:

- 1.- Inspeccionar los substitutos u otras herramientas auxiliares, asegurándose de que sean de paso completo o del diámetro interior adecuado. Las restricciones pueden causar problemas de volumen de fluido, disminuyendo el ritmo de remoción de los recortes.
- 2.- Usar un fluido de control con una viscosidad mínima de 50 - 60 seg. marsh y una velocidad anular relativa mayor que la de asentamiento de los recortes.
- 3.- Colocar una canasta colectora inmediatamente arriba de la herramienta que se utilice para moler. Además se debe colocar un colector magnético en la caja de la temblorina o vibrador, con el fin de atrapar los recortes efectuados con el molino al retornar los fluidos de control.
- 4.- En los casos en que se observe poca recuperación de recortes que se desaloja en la circulación del fluido, puede deberse a que se tenga una baja velocidad en el espacio anular, por lo que inmediatamente se deberá suspender la operación de molienda y analizar las causas posibles.
- 5.- Cuando se tiene acumulación de chatarra en el fondo del pozo y el avance de la molienda no es satisfactorio, se hace necesario el uso de un bache de fluido bentonítico con viscosidad elevada, para efectuar un barrido de recortes, o también emplear como limpieza un bache de gelatina.

### Interpretación de los recortes.

Las dimensiones ideales de los recortes producidos por molinos deben ser de un espesor  $1/32$  pg y hasta 3 pg de largo.

Al obtener recortes de menor espesor con bajo ritmo de penetración, se tiene que aumentar el peso sobre el molino.

Cuando se obtienen recortes con escamas de pescado al moler secciones (como cuando se muele tubería de bajo grado de acero que se queda en el fondo del pozo), indican que el ritmo de penetración puede mejorarse disminuyendo el peso y aumentando la velocidad de la rotaria.

Ahora al moler tubería de alto grado de acero, se deben esperar recortes más finos, lo cual se considera normal debido al grado de tubería, en comparación con moliendas de otro tipo de menor grado.

### Aspectos generales sobre moliendas:

En general se obtienen resultados mayores con velocidades de rotaria de 100 rpm o más. Este aspecto puede variar dependiendo de la profundidad del pozo o la verticalidad del mismo.

Existe un tipo de molino que es el cónico, el cual opera con mayor eficiencia a 75 rpm y en algunas ocasiones con menor rotación cuando se les aplica el peso máximo.

Se tienen algunas recomendaciones que deben tomarse en cuenta cuando se presente algún problema al estar en la operación de molienda, las cuales serán determinantes para las soluciones de problemas correspondientes al manejo de tuberías, las cuales son las siguientes:

- Nunca empedar a dar rotación aplicando peso sobre el "pez", es decir, primero se debe verificar la circulación del pozo.
- Posteriormente, se verifica el peso de la sarta de trabajo, en movimiento ascendente, descendente y estático (se debe de anotar este peso en la libreta de trabajo).
- Iniciar la rotación del molino colocado a 30 cm. arriba del "pez".
- Después embragar su transmisión en alta velocidad y aplicar una velocidad de rotación gradual.
- Parar la rotaria y observar la torsión que ejerce la sarta de trabajo.

A continuación con una velocidad de rotación adecuada bajar hacia el "pez" aplicando la carga en forma gradual sobre el molino, ajustar la velocidad de rotación y variar el peso para mejorar el ritmo de penetración.

Para un ritmo de penetración mayor, se debe mantener el peso constante al estar moliendo. NO permitir que se recupere peso por espacios prolongados.

Al moler tubería severamente corroída, utilizar muy poco peso sobre el molino y una velocidad de rotación relativamente alta, esto evitará que se parta la tubería que se está moliendo.

El ritmo de molienda está gobernado por muchos factores los cuales incluyen: el tipo y la estabilidad del "pez", el peso sobre el molino, la velocidad a la cual se trabaja y la dureza, ya sea del fierro o cemento.

La huella del desgaste del molino indica el comportamiento de éste en el agujero; un desgaste parejo es indicativo de que la molienda es satisfactoria; un desgaste cónico generalmente indica que se utilizó demasiado peso, por lo cual se deforma la parte superior del "pez".

Procedimiento a realizar cuando se tiene hule en el pozo:

El hule contenido en un "pez" puede causar problemas durante la molienda, por lo tanto, si se reduce el ritmo de penetración, se tiene que realizar lo siguiente:

- a) Disminuir la presión de la bomba o parar totalmente el bombeo.
- b) Bajar la velocidad de rotación un 50% en relación a la que se esté aplicando.
- c) Aumentar de 0.5 a 1.0 toneladas el peso sobre el molino. Esta práctica se efectúa por un espacio de 3 minutos como máximo.
- d) Reiniciar la operación en condiciones normales.

Estabilización del molino:

Si se permite que el molino vibre, éste realiza un trabajo deficiente, por lo tanto, deberán programarse los lastrabarrenas necesarios, y colocar un estabilizador con insertos metálicos sobre el molino, esto permite que corra libremente y a la vez cumpla con su objetivo.

Procedimiento a seguir cuando la operación es difícil:

Para evitar los brincos y rebotes que se presentan en operaciones de molienda anormal, se debe bajar la velocidad de la rotaria y reducir el peso sobre el molino. Estas condiciones pueden variar, ya que el peso y velocidad de rotación quedan sujetas al diámetro del molino, profundidad del pozo, así como el material que se esté moliendo.

De acuerdo a lo anterior, se debe operar por un espacio de tiempo de una hora o el tiempo que sea necesario, hasta estabilizar el ritmo de molienda. Si bajo estas condiciones el molino opera bien y se obtiene un buen ritmo de penetración, se debe de continuar con este procedimiento.

Con el objeto de simplificar la identificación de los molinos, puesto que su empleo en pozos revestidos determina un tipo y recubrimiento de metal duro, se mencionaran los de uso más común, así como la función que desempeñan:

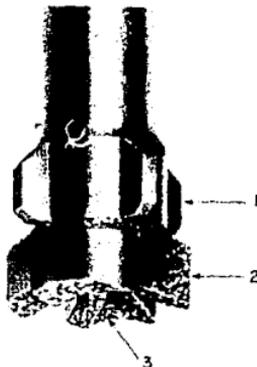
#### Tipos de molinos:

##### 1) JUNK-MILL.

Este molino es la herramienta universal (se conoce como molino chatarrero) ya que se puede utilizar para moler una variedad grande de herramientas que se quedan en el pozo, como son:

- empaques
- probadores
- tapones mecánicos
- tuberías de revestimiento
- lastrabarrenas
- tuberías de perforación y de producción
- tubería lavadora
- conos de barrena
- toda clase de chatarra, etc.

A continuación se muestra la Figura 107 éste molino con sus partes principales.



MOLINO JUNK-MILL  
Con estabilizador

- 1.- Estabilizador
- 2.- Ribetes u hojas
- 3.- Espejo o base de molino con carburo de tungsteno.

Recomendaciones para el uso del molino JUNK-MILL:

El diámetro del molino debe ser de 1/8 a 1/4 de pg. menor que el interior de la tubería de revestimiento.

Para un buen funcionamiento de cualquier molino, se tiene que cuidar la viscosidad del fluido de control y la velocidad en el espacio anular para el acarreo de los recortes.

Por si cualquier circunstancia no se cumple con este requisito, no se debe de permitir que "lajas" de chatarra se acumulen al lado del molino y permanezcan ahí.

Un indicativo en este problema es el aumento del torque en la tubería de trabajo, y el método que se sigue para eliminar este problema es golpear con el molino.

Para llevar a cabo esta operación se procede de la siguiente manera:

- a) Levantar la sarta de trabajo, determinar un punto neutral, colocar una marca en la flecha arriba del buje.
- b) Levantar la flecha de 1 a 1.5 mts.
- c) Aflojar el freno y dejar correr la tubería, frenar 50 cm. antes de que la marca llegue al buje; esto causa que la sarta de trabajo se slonge y golpee con fuerza la chatarra en el fondo del pozo, en tanto que la sarta está sometida a un esfuerzo de tensión. Como resultado, la sarta no se daña como lo haría si estuviera sometida a un esfuerzo de compresión en el momento del impacto.
- d) Golpear la chatarra de tres a cuatro veces girando el molino un cuarto de vuelta antes de cada golpe.

Nunca se debe trabajar con un molino JUNK-MILL por tiempo prolongado sobre un "pez" si se nota que no tiene avance, ya que se desarrollará una huella profunda en el espejo o base del molino. Levantar la sarta de trabajo frecuentemente y bajar con rotación, lo que se ocasiona con esto es una nueva huella de desgaste, conformando el desgaste anormal del molino.

2) MOLINO ECONOMIL. (Figura 108).

Este molino normalmente es usado para moler cemento endurecido, arena, cascarilla de tubería o chatarra de diferente tipo de fierro. se obtiene un buen resultado con este molino para moler tubería de producción atrapada en cemento, ya que sus hojas o ribetes que son seis, estabilizan o acaban con el "bamboleo", proporcionando a la tubería de revestimiento máxima protección contra daños.

El peso y la velocidad de rotación son semejantes al molino JUNK-MILL.



MOLINO ECONOMIL  
Fig.108

3) MOLINO TRAPER MILL. (Figura 109).

Este tipo de molino se utiliza para rimar parcialmente el interior de la tubería de revestimiento que se encuentre colapsada. Se le conoce como molino cónico.

Esta herramienta es de uso delicado por lo que es de gran importancia tomar muy en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Determinar el diámetro aproximado del colapso con sello de impresión, o bajar un calibrador que pase a través del tramo afectado.
- b) Si el colapso es severo, con los datos conocidos de la reducción que se tiene en el interior de la tubería de revestimiento, conforme o rime por etapas. Usar esta herramienta manejando los diámetros de la sección en donde se tiene soldadura de carburo de tungsteno en forma gradual, hasta llegar al diámetro interior original (Drift) de la tubería de revestimiento, con esto reducirá cualquier tendencia a desviarse, ya que en colapsos grandes esta herramienta puede eliminar la pared superior del colapso y "deflectarse" en el interior de la formación.



MOLINO TAPER MILL  
(Cónico)  
MODELO CT



MOLINO TAPER MILL  
(Cónico)  
MODELO CP

Fig.109

### III.- COMPONENTES DE LA SARTA DE PERFORACION (1,3,4)

Una sarta de perforación es un conjunto de tuberías con características especiales para soportar esfuerzos de tensión, colapso y torsión. Las partes principales que la componen son:

1. Lastrabarrenas
2. Estabilizadores
3. Tubería de trabajo

A continuación detallaremos cada uno de estos componentes.

#### LASTRABARRENAS:

El objetivo de esta herramienta es el de proporcionar peso y rigidez a la sarta de perforación o producción, cuando se trabaja en agujero abierto o revestido.

Cuando se tiene en operación una barrena o un molino, la tubería de trabajo debe de estar en tensión, puesto que es poco el espesor de pared que existe entre el diámetro interior de la tubería de revestimiento y el diámetro exterior de la sarta de perforación o trabajo; esto es que se tiene un espacio anular reducido entre ambas tuberías, por lo que el número de lastrabarrenas, el diámetro y la longitud de los mismos, está determinado por el diámetro de la tubería de revestimiento y por el diámetro del pozo; esto último cuando se está trabajando en agujero descubierto. Otro parámetro que también determina las especificaciones de los lastrabarrenas, antes mencionadas, es el peso que se aplique sobre la barrena.

La fabricación de los lastrabarrenas es esencialmente con diámetros interiores y exteriores uniformes y cuentan con roscas de sello. En el extremo inferior tienen piñón y en el extremo superior caja.

Para poder seleccionar el diámetro exterior de un lastrabarrena, se tiene que tomar en cuenta que se permita en lo posible el uso de tuberías lavadoras cuando se tengan problemas de pesca. Ahora con respecto a la determinación del diámetro interior se tiene que seleccionar el más adecuado, puesto que un diámetro reducido provoca altas caídas de presión en el sistema de circulación y restringe el paso de herramientas de línea o cable eléctrico.

#### Tipos de Lastrabarrenas:

Actualmente se cuenta con dos tipos de lastrabarrenas que son las siguientes:

- 1.- LASTRABARRENAS DE ESPIRAL. Este diseño de espiral reduce el área de contacto entre los lastrabarrenas y la pared del pozo, evitando así problemas de pegaduras por presión diferencial en agujero abierto.

- 2.- LASTRABARRENAS LISO. Este tipo de lastrabarrena tiene un acabado de fabrica liso el cual se denomina convencional, ya que trae la forma física tal como sale de la acería, cumpliendo con todos los requisitos nominales.

Los lastrabarrenas antes descritos se pueden observar en las Figuras 110 y 111.



LASTRABARRENA DE ESPIRAL  
Fig. 110



LASTRABARRENA LISO  
Fig. 111

En la Tabla "C" tenemos las dimensiones y especificaciones de los lastrabarrenas

Uso y cuidados en lastrabarrenas.

El uso y cuidados en Lastrabarrenas que se deben de tener son los siguientes:

Nota.- Son los cuidados o consideraciones que hay que tomar en cuenta para prolongar la vida de las juntas de los lastrabarrenas, así como de evitar o disminuir los efectos indeseables que se generan en las sargas de trabajo o perforación, cuando no se cumplen estas indicaciones.

La primera consideración es el calculo correcto del peso de los lastrabarrenas, tomando en cuenta el fluido de control con el cual se trabajará. La tubería de perforación se mantendrá en tensión y por esto tendremos como resultado menos fallas por fatiga, puesto que si la tubería trabajará bajo compresión se flexionaría demasiado debido a que el peso aplicado sobre la barrena fue mayor que el peso de los lastrabarrenas, por lo tanto sufrirá fatigas severas. Los efectos de compresión y tensión se visualizarán en la Figura 112.

DIMENSIONES Y ESPECIFICACIONES DE LASTRABARRENAS

DIAMETRO EXTERIOR Pg	DIAMETRO INTERIOR Pg	p e s o		CAPACIDAD lt/m	VOL.ACERO lt/m	CONEXION A. F. I. Pg	A P R I E T E	
		lb/pie	kg/m				lb-pie	kg-m
3 1/8	1.000	23.40	34.86	0.51	4.44	2 3/8 Reg	3,300	460
3 1/2	1 1/2	26.70	39.78	1.14	5.06	2 3/8 I.F.	4,600	630
4 1/8	2.000	34.75	51.77	2.02	6.59	2.7/8 I.F.	6,800	940
4 3/4	2.000	49.56	73.84	2.02	9.40	3 1/2 I.F.	10,800	1,500
4 3/4	2 1/4	46.72	69.60	2.56	8.86	3 1/2 I.F.	9,200	1,290
5	2.000	56.00	83.50	2.02	10.63	3 1/2 I.F.	10,800	1,530
5	2 1/4	53.20	79.30	2.56	10.10	3 1/2 I.F.	9,200	1,300
5 3/4	2 13/16	67.15	100.00	4.00	12.73	4 1/2 H.F.	12,100	1,730
6 1/4	2 13/16	83.17	123.92	4.00	15.78	4 I.F.	22,800	3,140
6 1/2	2 13/16	91.68	136.60	4.00	17.40	4 I.F.	23,300	3,121

T A B L A "C"



Fig. 112

La siguiente consideración que se debe de tomar en cuenta, es cuando se tiene la columna de los lastrabarrenas larga y tiende por esto a flexionarse y al estar rotando dentro del pozo, la flexión de la columna provoca grietas en las uniones de los lastrabarrenas, lo que implica que en agujeros de geometría amplia es recomendable intercalar estabilizadores (herramienta que posteriormente se describirá), puesto que el resultado que se tiene de la flexión, es de que las grietas generadas en las uniones abren y cierran continuamente; por lo tanto el área de la ranura pasa de tensión a compresión y viceversa, por lo que la grieta crece y si no se llega a detectar se produce una falla al estar operando. Lo descrito anteriormente se observa en la Figura 113.

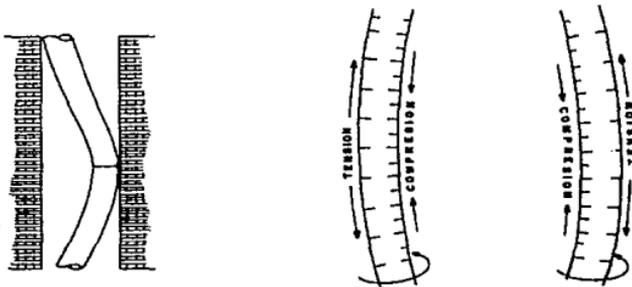


Fig. 113

Las partes donde principalmente ocurren la mayoría de las fallas son:

La caja  
El piñón

En estas dos áreas es donde se concentra el mayor esfuerzo. Cuando la junta de estas áreas se encuentra bien apretada, el punto más débil se localiza en el fondo de la caja; y cuando falta apriete, la falla ocurre a menudo cerca de la base del piñón.

Otro punto importante es la falta de apriete, lo que nos indica que la compresión en el hombro de la junta es muy baja y al girar la tubería el hombro se abre donde se tiene la tensión, ocasionando que entre fluido de control Figura 114. Un indicativo de lo antes mencionado se observa físicamente al desconectar, que el piñón se encuentra seco y un área alrededor del sello tiene un color gris opaco.

El lugar donde generalmente ocurren las fallas por falta de apriete es en el primer o segundo hilo cerca de la base del piñón, las cuales son más comunes que las fallas en las cajas con juntas bien apretadas.

En una junta el hombro es la única área donde puede efectuarse un buen sello, con un apriete bien balanceado. Los hilos de las juntas en los lastrabarrenas tienen un claro entre la raíz y la cresta, el cual actúa como canal de lubricación, como se observa en la en la Figura 115.

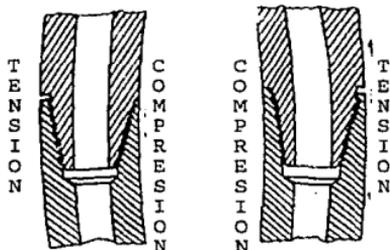


Fig. 114

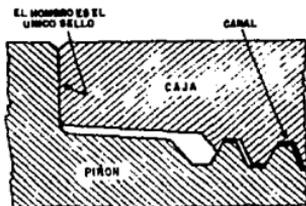
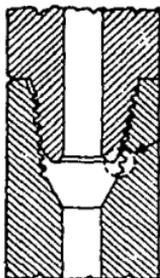


Fig. 115

Un área peligrosa en la conexión de los lastrabarrenas, es el fondo de la caja frente al extremo del piñón, puesto que en esta área de la junta es delgada comparada con las secciones adyacentes; los hilos de la rosca actúan como muescas o fisuras por lo tanto la corrosión y el fluido inducen a picaduras y a grietas. Esta zona de peligro la indicamos en la Figura 116



- Zona de peligro
- \* Sección delgada
  - \* Expuesta a la corrosión
  - \* Entallada

Fig.116

Otra falla de consideración ocurre cuando el sello de la junta no es uniforme, en el diámetro exterior de la caja con el piñón. Estas fallas se presentan o localizan a tres o cuatro hilos del hombro; ya que el hombro de la caja es muy delgado y no puede soportar las cargas del apriete más la deflexión.

Los puntos críticos de la resistencia al seleccionar juntas para lastrabarrenas son:

- a) El piñón cerca de su base
- b) La caja en su fondo frente al extremo del piñón .

En un buen diseño la caja es 2½ veces más fuerte que el piñón al haber flexionamiento en estos lugares o áreas.

Procedimiento Para el Manejo de Lastrabarrenas Nuevos:

- a) Limpiar perfectamente roscas de caja y piñón, limpiar hombros. Después de la limpieza, la junta debe secarse antes de aplicarle lubricantes.
- b) Bañar todas las áreas de las cuerdas del piñón y caja con lubricantes del grado adecuado.
- c) Tener cuidado al conectar las juntas si se utilizan madrinas, es aconsejable que se aprieten con herramientas de mano.
- d) Trabajar las juntas manualmente con llaves de cadena, y después con la llave de fuerza, aplicando el torque adecuado.
- e) Marcar una línea vertical a través de la junta.

- f) Quebrar la junta, limpiar y secar las roscas, inspeccionar las cuerdas y las caras de la junta, localizando raspones o rayaduras en el metal. Con piedra o lima se pueden remover las rebabas. Tener cuidado en no borrar la línea que se trazó a través de la junta.
- g) Conectar nuevamente la junta con la llave de cadena y con la llave de fuerza dar el torque recomendado. La marca debe coincidir o pasarse unos milímetros, si la junta no llega hasta la marca, quebrar nuevamente y secar, limpiar e inspeccionar las cuerdas y las caras de la junta, y proceder nuevamente como se indica en el punto anterior.
- h) Verificar que si al apretar la junta se alcanza la marca vertical o más allá, se recomienda hacer una marca (muesca) en las mitades de la caja y el piñón adyacentes a los hombros, con una marca permanente de inspección. Después de cada corrida se deben verificar estas marcas y de acuerdo a la discrepancia entre ellas, las juntas deberán dejarse sin quebrar. Conforme se usen los lastrarrenas se recomienda que se profundicen las marcas para que siempre sean visibles. Cuando se nota que ocurre la discrepancia en las juntas de enmedio (en una parada) deberá quebrarse, inspeccionarse y si es necesario rectificarse.

#### Inspección Magnética:

Por experimentos se ha considerado que 4,000 horas de rotación es un promedio excelente para una sarta de lastrarrenas; pasado este tiempo se deben programar estas herramientas para una inspección magnética.

Por ejemplo:

Si se riegan limaduras de hierro sobre una barra magnética, éstas son atraídas al polo sur en los extremos del imán.

si se secciona esta barra en dos partes, se tendrá dos barras magnéticas cada una de ellas con su polo norte y su polo sur.

Si se le hace una muesca a una barra magnética, una mitad de la muesca es el polo sur y la otra es el polo norte; las limaduras de hierro que se riegan a lo largo de la barra serán atraídas hacia la muesca debido a la presencia de los dos polos.

En la inspección magnética, la junta del lastrabarrenas se imanta para convertirla en una barra magnética. Si existe una grieta en la junta, un lado de la grieta es un polo norte y el otro es un polo sur, como si fuera una barra, las partículas magnéticas se acumulan en la grieta y son visibles, cuando ocurre esto sabemos que hay una grieta, aunque ésta no se detecte a simple vista.

El equipo para la inspección magnética de lastrabarrenas consiste principalmente de:

- 1). Planta de luz de 3 kw.
- 2). Unidad imantadora.
- 3). Dispositivo para rociar fluido a presión.
- 4). Herramientas de mano necesarias para limpiar e inspeccionar los lastrabarrenas.

#### Procedimiento para Realizar la Inspección Magnética

El primer paso al iniciar la inspección, es identificar los lastrabarrenas y tomar sus medidas. La primera medición es del diámetro exterior de la caja. Le sigue el diámetro interior en el extremo del piñón. Estas dos medidas son necesarias para poder calcular la fuerza de torsión con que se deben apretar estas conexiones. Si los lastrabarrenas están numerados, se registrarán el número de serie y la longitud de cada lastrabarrenas.

Posteriormente de que se registra esta información se debe de limpiar las roscas, se utiliza un cepillo de alambre. La junta se limpia con kerosina a presión.

Después de que la junta ha sido limpiada, se revisa el lastrabarrenas para verificar si se encuentra imantado; el inspector utiliza para este fin un indicador especial para campo magnético. La mayor parte de la sarta de operación que ha estado en servicio mucho tiempo se imanta al estar en operación. Esto es debido a que las partes de la sarta de operación se trabajan constantemente en el campo magnético de la tierra y al estar realizando un efecto de martilleo cuando golpean contra la pared del pozo, esto da como resultado que se imanten muy a menudo.

Si la junta no está lo suficientemente imantada para su inspección, se imanta envolviendo el cable de una unidad imantadora alrededor del lastrabarrenas. Después, pasando una corriente rectificadora de media onda a través de la bomba, se convierte al lastrabarrenas en un electro-ímán.

### Utilización de la Luz Negra para Detectar las Grietas.

Se rocian las juntas con un fluido que contiene partículas magnéticas muy pequeñas, estas partículas están recubiertas con un colorante fluorescente. Al drenarse el fluido, las partículas magnéticas son atraídas a cualquier área donde exista una grieta. Si se observa en la oscuridad a la junta utilizando una luz ultravioleta o luz negra, se verán brillar las partículas magnéticas fluorescentes que queden, y así fácilmente se detectarán las grietas.

Para localizar las grietas en la rosca de la caja, se utilizan un espejo de aumento de la siguiente manera. Se dirige la luz hacia el espejo y éste la refleja hacia la rosca. Esto permite inspeccionar las raíces de los hilos de la rosca hasta el fondo de la caja.

### Reparación de las Roscas con Herramientas de Mano.

Al encontrar en una rosca una grieta pequeña, se tratará de eliminarla utilizando un esmeril eléctrico de mano.

Para realizar esta operación, se utiliza una piedra blanda con un radio suave para que produzca un fondo de rosca redondo cuando se esmerila la grieta. Si se logra eliminar la grieta antes de esmerilar en 1/32 de pulgada (0.030 pg) la junta todavía sería satisfactoria para servicio adicional. Si no se logra, se marca la junta con la palabra "agrietada" y se envía al taller para que se maquine nuevamente.

Con frecuencia al inspeccionar los lastrarrenas encontramos rebordes en los hombros o topes de las juntas. Estos rebordes se forman con frecuencia cuando se enroscan dos lastrarrenas de diferentes diámetros (para esto se utilizan sustitutos de enlace), estos rebordes se pueden doblar hacia dentro y quedar atrapados entre los dos hombros de las juntas piñón y caja, por lo que es imposible formar un sello, aunque se les aplique el torque indicado. Por esto, es de mucha importancia que se eliminen estos rebordes tan pronto como se localizan.

Se recomienda tener siempre la herramienta adecuada para eliminar los rebordes, la cual es una lima plana. Se debe tener en todo momento un bisel adecuado en los hombros de las juntas para evitar que se formen los rebordes. Se debe tener cuidado al limar los rebordes y no permitir que la lima trabaje en el espejo plano del hombro, si se permite esto, se dañará el hombro y no sellará cuando se apriete.

### Consideraciones en el Uso de Herramientas Especiales.

El inspector de tuberías cuenta con herramientas especiales para acondicionar los hombros de los lastrarrenas. Algunas de las herramientas que se utilizan para reparar los hombros

de los lastrabarrenas son esencialmente marcos para fijar limas planas; después de que se ha limado el hombro hasta dejarlo plano, se utiliza un anillo calibrador que forma parte de la herramienta para reparar hombros y que sirve para verificar si el hombro se encuentra liso y plano.

Si el anillo calibrador se mece cuando se presiona contra el hombro, todavía quedan partes altas por lo tanto se debe de continuar limando; si el anillo no se mece se tiene que mirar entre el anillo y el hombro para ver si hay lugares bajos, si se ve luz detrás del anillo, todavía quedan partes bajas por lo que se debe de continuar limando.

Si el anillo calibrador no se mece cuando se presiona y no se puede ver luz detrás de él, en ningún punto, esto indica que ya se tiene un hombro plano que debe producir un sello adecuado cuando las juntas se aprietan con el torque indicado.

Para saber si las juntas están estiradas, se revisan usando un calibrador para perfil de roscas. Este calibrador se coloca en los primeros dos o tres hilos cerca de la base del piñón, a continuación se revisa el corte de alivio en la boca de la caja para investigar si la junta se estiró por exceso de apriete.

#### Registro de la Información y Marcado de las Juntas.

Después de terminar la inspección de los lastrabarrenas, se le aplica a las roscas de las juntas un anticorrosivo a fin de que no se oxiden antes de entrar en servicio nuevamente.

Se debe marcar cada junta para hacer constar su condición. Si las roscas están dañadas (sin incluir las grietas) y requieren de una reparación en el taller, se pinta una banda amarilla alrededor del extremo de la junta; y marcando con una leyenda que describa el daño.

Si existe una grieta, se marca alrededor de la base del piñón o en el extremo del lastrabarrenas, con una banda roja y se indica con la palabra "agrietada". En el caso de que se encuentre una grieta muy profunda, se marca la distancia de la grieta al extremo del piñón para que el tornero conozca la longitud de la rosca que tiene que descartar.

Si la junta se encuentra en buenas condiciones, se marca con "BC". Esto certifica que la junta no debe presentar problema en los próximos pozos si se maneja y se usa correctamente.

El reporte de la persona que realiza la inspección debe incluir la información siguiente:

1. Número económico del equipo al que pertenece la sarta de lastrabarrenas.

2. El lugar donde se efectuó la inspección.
3. Un resumen del trabajo realizado.
4. Una lista por número de serie, de la condición de cada lastrabarrena.

El reporte por cada lastrabarrena debe de incluir lo siguiente:

1. Número de serie.
2. Condición de la caja del lastrabrrena.
3. Condición del piñón.
4. Diámetro interior en el extremo del piñón.
5. Diámetro exterior en el extremo de la caja.
6. La longitud del lastrabarrenas.

Posteriormente se realiza un resumen donde se incluyen los resultados de la inspección, indicando tanto el número de juntas descartadas como las recuperadas.

En conclusión el reporte debe de formar parte de un archivo permanente, puesto que la acumulación de los datos obtenidos en estas inspecciones, a través de los años, es muy útil para obtener un método evaluativo para el récord de servicio de los lastrabarrenas en los diferentes equipos. Esta información también es útil para encontrar cuales son los tipos de juntas y los tamaños de lastrabarrenas que proporcionan el mejor servicio para determinadas condiciones de operación.

## Estabilizadores

Los estabilizadores tienen como funciones el estabilizar las sartas de tuberías tanto de producción como de trabajo y de proteger los lastrabarrenas y demás herramientas.

Al efectuar operaciones en agujero abierto, se debe usar estabilizadores de aletas con insertos de carburo de tungsteno, lo que permite mantener el calibre que perfora la barrena.

### Tipos de estabilizadores.

Existen varios tipos y marcas de estabilizadores; entre ellos tenemos a los de tipo solido, los cuales observamos en la Figura 117.



ESTABILIZADORES TIPO SOLIDO  
Fig. 117

Con respecto a la geometría de los pozos que se intervienen en agujeros revestidos, se deberá eliminar el uso de estabilizadores entre tuberías y lastrabarrenas en pozos convencionales de 5 1/2, 6 5/8, 7 y 7 5/8 de pg; no así en pozos de geometría amplia o desviados.

### Uso de los Estabilizadores:

Cuando las operaciones de molienda se efectúan en pozos revestidos con tubería de revestimiento igual o mayor de 5 1/2 pg., se recomienda colocar un estabilizador inmediatamente arriba del molino o barrena con la finalidad de:

- Distribuir adecuadamente el peso sobre la barrena o molino para mejorar los ritmos de penetración.
- Evitar daños a la tubería de revestimiento.
- Prolongar la vida útil de la barrena o molino.

### Tubería de trabajo:

La sarta que se selecciona según las necesidades en el pozo y capacidad del equipo, se le conoce como tubería de trabajo.

Se utiliza principalmente en las siguientes operaciones:

- Viajes de reconocimiento.
- Moliendas.
- Pescas.
- Corridas de tubería corta.

Se evita su uso en operaciones donde se aplican presiones elevadas internas, debido a que el sello que efectúan sus juntas no proporciona la efectividad necesaria. Así mismo, se evita su uso en pozos que se encuentran en la etapa de explotación.

El diseño de sus roscas facilita las operaciones de conexión y desconexión, y proporciona una alta resistencia a daños por corrosión y golpes, así como a los efectos de torsión y tensión.

Para la fabricación de tuberías se toman en cuenta las especificaciones que proporciona el API (American Petroleum Institute).

Nota.- En el siguiente capítulo se detallaran todos los aspectos de las tuberías, por lo que en este capítulo solo se mencionan.

#### IV.- TIPOS DE TUBERIAS DE TRABAJO (1,3,4)

##### TUBERIA DE PERFORACION:

Se le denomina así a la sarta de tubos, con características especiales que se emplean para realizar las operaciones de perforación, terminación y reparación de pozos, no así, para la explotación de los mismos.

La tubería de trabajo que se utiliza comúnmente es la de rango número dos, y tiene una longitud promedio de 10 m. por tramo. los tramos se unen entre sí por medio de juntas reforzadas conocidas como TOOLS JOINTS.

El diseño de la unión en sus roscas proporciona facilidad y rapidez en el enroscado y alto grado de resistencia al daño durante las operaciones, de introducción o extracción de tubería.

Se pueden tener fallas en un tramo nuevo de tubería por la aplicación de tensión excesiva o por una torsión grande, no obstante, la mayoría de las fallas se originan por corrosión y por lo general empiezan en el interior de la tubería.

Debido a los esfuerzos a que se someten las tuberías en los pozos, se requiere que reúnan ciertas características para que soporten los esfuerzos a que son sometidas; esto depende del tipo de acero con el cual son fabricadas estas tuberías. También es importante la estandarización de otros factores mecánicos, para el uso adecuado de diferentes herramientas durante las operaciones de terminación y reparación de pozos.

Las tuberías se rigen por normas API, por lo cual los fabricantes deben cumplir con las características siguientes:

- a) Grado. Es el esfuerzo mínimo del acero a la cedencia y en forma indirecta proporciona la resistencia de la tubería; la unidad de medida se da en lb/pg<sup>2</sup>.
- b) Medida. Es la parte cilíndrica exterior del tubo en toda su longitud, sin tomar en cuenta sus extremos reforzados, caja y piñón, ya que éstos son de un diámetro mayor. Se expresa en m.
- c) Espesor de pared. Se refiere al espesor de pared de la tubería, siendo diferente para cada peso. Se expresa en pg.
- d) Peso. Esta característica determina el diámetro interior. El peso nominal se refiere al peso por unidad de longitud del cuerpo del tubo, considerando además un promedio del peso de los extremos reforzados. El peso ajustado incluye los extremos reforzados y estará en función del tipo de conexión. Las unidades de medida son kg/m ó lb/pie.

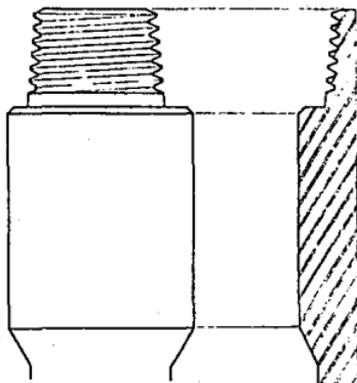
e) Rango. Es la longitud de cada tubo, incluyendo la caja y el piñón, se clasifican los tubos en tres rangos (I, II, III) su unidad de medida se da en metros (m).

Debido a la importancia que tiene la tubería de trabajo o perforación en las actividades petroleras, se diseñó el siguiente método para seleccionarlas en forma adecuada, para así cubrir las necesidades que tengan que cumplir en función a las operaciones que se requieren.

La forma que recomienda el API para identificar el peso y el grado de las tuberías, es la marca que se graba en la ranura del piñón, la cual está constituida con letras y números de golpe, estampando así el código correspondiente a cada uno de los tubos.

En las Figuras 118, 119, 120 y 121 se podrán apreciar lo descrito anteriormente:

#### CODIGOS PARA IDENTIFICAR EL PESO Y GRADO DE LAS TUBERIAS

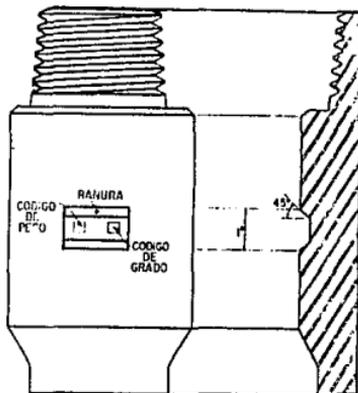


TUBERIA ESTANDAR EN PESO Y GRADO

Fig. 118

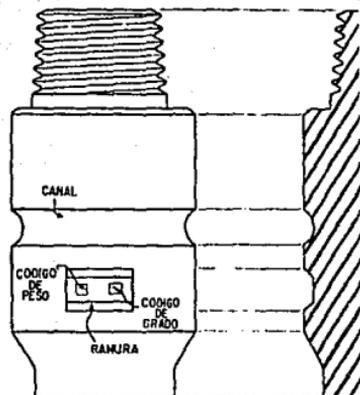
Cuando la ranura se localiza en el centro del piñón, o sea en la sección de la llave, como se ve en la figura, la tubería será de grado estándar y alto peso.

Cuando el piñón no tiene ninguna marca, es indicativo de que se trata de una tubería estándar en peso y grado



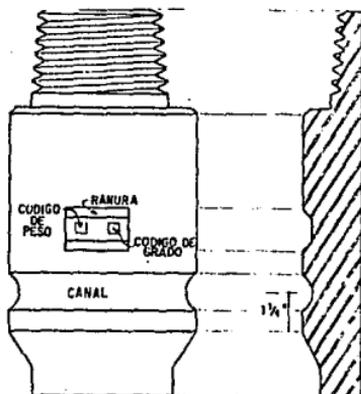
TUBERIA PESADA ESTANDAR EN GRADO

Fig. 119



TUBERIA DE ALTA RESISTENCIA  
ESTANDAR EN PESO  
Fig. 120

Si la ranura se localiza en la base y además tiene una acanaladura en la parte central del piñón, o sea en la parte donde se sujeta la llave, será una tubería de peso estándar y alta resistencia.



TUBERIA PESADA DE ALTA  
RESISTENCIA  
Fig. 121

Si el piñón tiene la acanaladura en la base de la ranura en el centro, se tratará de una tubería de alto peso y alta resistencia.

La clasificación que hace el API en las tuberías de perforación o trabajo en función de su desgaste es la siguiente:

- a) Clase nueva. Es la tubería que conserva sus propiedades o que ha sufrido como máximo un desgaste uniforme del 20%.
- b) Clase premium. En esta clase se clasifican a las tuberías que tienen como máximo un desgaste concéntrico uniforme del 12 al 20%.
- c) Clase 2. En esta clasificación se ubican las tuberías que han perdido entre el 12 y 20% del área de acero del cuerpo del tubo en forma excéntrica; y además en algún punto el espesor de pared es del 0.65% del espesor original como máximo. En esta clase se encuentran las tuberías ya utilizadas.
- d) Clase 3 (desecho). Cuando la tubería ha sufrido un desgaste del 20 al 35% del área del acero original en forma excéntrica.

En la Figura 122 se podrá observar e identificar el número de bandas y color de las mismas, las cuales se encuentran en la tabla "D":

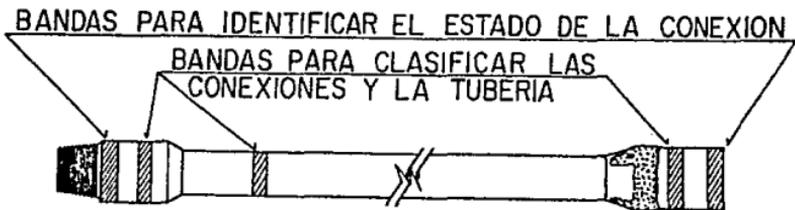


Fig. 122

CÓDIGO DE COLORES PARA IDENTIFICAR TUBERIAS DE TRABAJO	
CLASIFICACION DE LA TUBERIA Y SU CONEXION	COLOR Y NUMERO DE BANDAS
NUEVA	1 BLANCA
PREMIUM	2 BLANCAS
CLASE 2	1 AMARILLA
CLASE 3 DESECHO	1 ROSA

TABLA "D"

Para la identificación de grados y pesos de las tuberías, se presentan dos tablas donde se podrá seleccionar una sarta de tubería.

CODIGO DE GRADOS			
GRADOS ESTANDAR		GRADOS DE ALTO ESFUERZO	
GRADO	SIMBOLO	GRADO	SIMBOLO
N-80	N	X-95	X
E-75	E	G-105	G
C-75	C	P-110	P
		S-135	S
		V-150	V

TABLA "E"

CODIGO DE PESOS DE TUBERIAS			
DIAMETRO EXTERIOR (pg)	PESO NOMINAL (lb/pg)	ESPESOR DE PARED (pg)	NUMERO DE CODIGO
2 3/8	4.85	0.190	1
	6.65*	0.280	2
2 7/8	6.85	0.217	1
	10.40*	0.362	2
3 1/2	9.50	0.254	1
	13.30*	0.368	2
	15.50	0.449	3
	11.85	0.262	1
	14.00*	0.330	2
4 1/2	15.70	0.380	3
	13.75	0.271	1
	16.60*	0.337	2
	20.00	0.430	3

TABLA "F"

(\*) INDICA PESO ESTANDAR.

Otro componente en la sarta de perforación es la que a continuación se describe:

#### TUBERIA EXTRAPESADA DE PARED GRUESA (HW).

Es un componente de peso intermedio para la sarta de trabajo. Consiste en tubos de pared gruesa sujetos a uniones especiales extralargas, lo cual facilita su manejo al efectuarse las conexiones disminuyendo el tiempo de sacar o meter tubería. la diferencia que existe entre una tubería de perforación y una extrapesada es que ésta última tiene la sección central recalcada para protegerla contra la abrasión.

La de el rango dos tiene una sección central recalcada con dos bandas de 3 pg. de longitud de material duro, esto es con el fin de evitar el desgaste en el centro del tubo.

En pozos con tubería de revestimiento ésta tubería se puede utilizar para remplazar parte de los lastrarbarrenas que se hayan calculado para efectuar determinada carga sobre barrena o molino, ya sea para perforar cemento, moler empacadores, etc. Siempre y cuando la sección central recalcada no lleve material duro.

Se recomienda el uso de la tubería extrapesada (HW) en pozos desviados o direccionales, ya que ésta es menos rígida que los lastrarbarrenas y hace menos contacto con la pared del pozo. la resistencia a la flexión de ésta tubería con los lastrarbarrenas no debe de pasar de 5.5 y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Vol de T.P o LB} = \frac{\frac{D}{64} (D^4 - d_1^4)}{\frac{D}{2}}$$

$$\text{Resistencia a la flexión (Rf)} = \frac{\text{Vol. LB}}{\text{Vol. HW}}$$

Ejemplo:

TUBERIA	D.E. (pg.)	D.I. (pg.)
LB	6.500	2.250
HW	4.000	2.563

Tabla 12

$$\text{Vol. LB} = \frac{0.049(6.5^4 - 2.250^4)}{6.5 - 2.250} = 26.5$$

$$\text{Vol. HW} = \frac{0.049(4.0^4 - 2.563^4)}{4.0 - 2.563} = 5.2$$

A los resultados de la ecuaciones anteriores se les llama Módulos de sección

Con los cuales del cociente de los mismos se obtiene el Rf que es el siguiente:

$$Rf = \frac{26.5}{5.2} = 5.09$$

En las Tablas 13 y 14 se localizán los módulos de sección de diferentes diámetros de lastrabarrenas así como de tubería extrapesada y la resistencia a la flexión para el enlace de las mismas.

LASTRABARRENAS		
DIA. EXT. (pg.)	DIA. INT (pg.)	MODULO DE SECCION
6.500	2.250	26.5
7.250	2.813	36.5
8.250	2.813	54.3
TUBERIA EXTRAPESADA		
4.000	2.563	5.2
4.500	2.750	7.7
5.000	3.000	10.7

Tabla 13.

ENLACE DE TUBERIA EXTRAPESADA CON LASTRABARRENAS			
D. EXT. HW (pg.)	D. EXT. LB. (pg.)	D. INT. LB. (pg.)	MODULO DE SECCION
4.000	6.500	2.250	$\frac{26.5}{5.2} = 5.1$
4.500	7.250	2.813	$\frac{36.5}{7.7} = 4.7$
5.000	8.250	2.813	$\frac{54.3}{10.7} = 5.1$

Tabla 14.

En los trabajos que se realizan en el área de terminación y reparación de pozos, se han estandarizado las tuberías de trabajo de acuerdo a las necesidades de cada distrito, de la siguiente manera:

## M A R C A

MEDIDAS (pg.)

Hydril PH - 6	2 7/8
IF (Internal Flush)	2 3/8, 2 7/8 y 3 1/2
Vallourec	2 3/8, 2 7/8 y 3 1/2 derecha
Vallourec	2 3/8, 2 7/8 y 3 1/2 izquierda

A continuación se detallarán las características de algunas tuberías y conexiones, así como sus dimensiones y los esfuerzos a los que se les puede someter.

## TIPOS DE TUBERIAS DE TRABAJO:

Tubería de trabajo Hydril PH - 6.

Esta tubería debido a sus características especiales para soportar elevados esfuerzos de presión, torsión y tensión, así como por la forma en que está construida con juntas integrales, se utiliza como tubería de trabajo en pozos terminados con tubería corta (liner), y para operaciones de reconocimiento, moliendas y pescas.

Por su junta integral se elimina la posibilidad de ocasionar resistencias en la boca de la tubería corta, ya que anteriormente este problema se generaba en tubería con extremos reforzados.

Actualmente la única medida de que se dispone es de 2 7/8 de pg., grado P - 105, para emplearse en tuberías cortas de 4 1/2, 5 y 5 1/2 pg.

El tipo de conexión de esta tubería es "PH - 6" y está diseñada para ser empleada en tuberías de espesor amplio, así como para trabajos de presiones elevadas.

El esfuerzo a la tensión es consistente con la tubería a grandes esfuerzos, por lo que las roscas deben de ser fuertes para resistir el manejo.

El balanceo proporcionado en las secciones del piñón y la caja contra el tubo da eficiencia a la presión y tensión, y los hombros del piñón a la torsión.

#### DATOS TECNICOS DEL TUBO:

Medida nominal (pg.)	2 7/8
D.I. nominal (pg.)	2.259
Diámetro de paso (pg.)	2.165
Espesor de pared (pg.)	0.308
Peso de la tubería (incluyendo extremos)	8.7 lb/pie
Resistencia a la tensión del tubo	118,636 kg.
Resistencia al colapso del tubo	1,470 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la presión interna	1,385 kg/cm <sup>2</sup>

#### DATOS DE LA CONEXION:

Longitud del piñón (pg.)	2.942
D.E. de la junta (pg.)	3.500
D.I. de la junta (pg.)	2.200
Roscas de enlace	6 hilos/pg.
Porcentaje de eficiencia	107
Torque	484 kg-m

En la Figura 123 se podrán observar algunas características de ésta tubería:

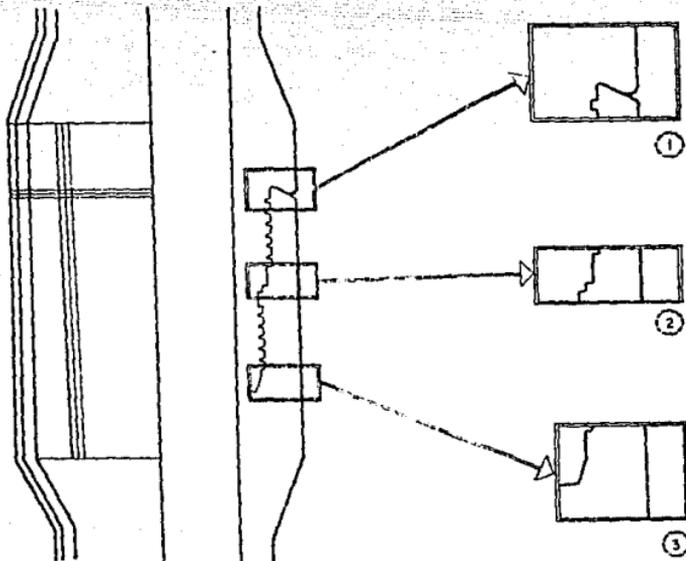


Fig. 123

- (1) El hombro externo proporciona la máxima eficiencia a la torsión y un sello de 30°.
- (2) Anillo intermedio que garantiza el ajuste correcto por sus roscas en dos diámetros diferentes.
- (3) Los hombros del piñón así como el apoyo intermedio evitan daños por efectos de torsión.

#### TUBERIA DE TRABAJO IF (HUGHES)

Este tipo de tubería es el de mayor empleo en la reparación y perforación de pozos, debido a que proporciona un amplio margen en los esfuerzos de tensión y torsión, con la limitación a elevadas presiones, ya que su conexión puede ocasionar fugas, sin embargo, soporta altas presiones

internas y externas sin lograr deformar permanentemente la tubería.

Actualmente se utiliza en tres medidas diferentes; 2 3/8, 2 7/8 (en dos pesos) y 3 1/2 pg (en tres pesos).

Existen sartas de trabajo con conexión IF izquierda que conserva las mismas medidas con respecto a las conexiones derechas.

En la Tabla 15 se presentan las características de ésta tubería y su conexión.

DATOS DE LA TUBERIA IF				
DIA. NOMINAL (pg.)	PESO (lb/pie)	GRADO	DIA. INT. (pg.)	CAPACIDAD lt/m
2 3/8	6.65	E	1.815	1.67
2 7/8	6.85	E	2.441	3.02
2 7/8	10.40	E	2.151	2.34
3 1/2	13.30	G	2.764	3.87
3 1/2	15.50	E	2.602	3.43

Tabla 15.

CONTINUACION DE LA TABLA 15.

DIAMETRO NOMINAL (pg)	PRESION INTERNA MAXIMA (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA AL COLAPSO (kg/cm <sup>2</sup> )	TENSION MAXIMA (kg)	TORSION MAXIMA (kg/M)
2 3/8	1088	1097	62695	749
2 7/8	697	736	61643	968
2 7/8	1162	1161	97203	1384
3 1/2	1358	1389	172451	3111
3 1/2	1184	1179	146410	2524

TUBERIA DE TRABAJO VALLOUREC:

Es bastante similar a la anterior (IF), tanto en sus dimensiones como en sus resistencias, a excepción de que este tipo se solicita con la rosca derecha e izquierda en diámetros de 2 3/8 y 3 1/2 pg.

La tubería que se solicita con la conexión izquierda tiene las mismas propiedades que la derecha, aunque es poco común utilizar tubería con conexión izquierda.

Se utiliza en operaciones de pesca que requieran desconectar el pescado en sus juntas o como extremo inferior a la herramienta inversora de rotación, cuando no es posible que ésta se aproxime a la boca del pescado.

En las Tablas 16 y 17, tenemos los datos de este tipo de tubería:

DATOS DE LA TUBERIA VALLOREC						
DIA. NOMINAL (pg.)	PESO (lb/pie)	GRADO	D. I. (pg.)	CAPACIDAD	PRESION INTERNA MAXIMA (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA AL CALAPSO (kg/cm <sup>2</sup> )
2 3/8	6.65	E	1.815	1.67	1088	1097
3 1/2	13.30	E	2.764	3.87	1358	1389

Tabla 16.

CONTINUACION DE LA TABLA 16.

DIA. NOMINAL (pg.)	TENSION MAXIMA (kg)	TORSION MAXIMA (kg)
2 3/8	62695	870
3 1/2	172727	3593

DATOS DE LA CONEXION					
DIA. NOM.	TIPO	D. E. (pg.)	D. I.	TENSION	TORSION
2 3/8	NC 26 IF Der	3 3/8	1 3/4	142727	953
2 3/8	NC 26 IF Izq	3 3/8	1 3/4	142727	953
3 1/2	NC 38 IF Der	4 3/4	2 9/16	321818	3068
3 1/2	NC 38 IF Izq	4 3/4	2 9/16	321818	3068

Tabla 17.

### FALLAS EN LAS TUBERIAS:

La mayoría de las fallas en las tuberías se deben a fatigas del material. Este tipo de fallas son el resultado de someter a la tubería a esfuerzos constantes con valores inferiores al límite de tensión del acero.

Las fracturas por fatiga son progresivas, iniciándose por una pequeña fractura que se eleva por el esfuerzo a que se somete la tubería. El grado de aumento se da de acuerdo a las cargas a las que se expone la tubería.

Las fallas no se persiben a simple vista sino hasta el momento en que se presenta un daño severo.

Las inspecciones que se le practican a la tubería nos determinan lo siguiente:

Fracturas, perforaciones, marcas profundas, medidas de diámetros tanto interior como exterior, espesor remanente de la tubería, área transversal.

Lo que no se determina en estas inspecciones son; un rango aceptable de vida útil de la tubería o bien el daño acumulado por fatiga.

Por lo antes mencionado la tubería que ha sido aceptable y libre de fracturas, puede generar daños posteriores después de ponerse nuevamente en servicio, incrementándose defectos a los previamente acumulados.

#### Condiciones de sello.

Es necesario inspeccionar las partes que componen el sello en las tuberías, esto es para detectar fallas que afecten la capacidad de fugas o estabilidad de las juntas. La junta debe de tener un bisel apropiado a su diámetro.

No obstante que los rompimientos de tubería pueden ser ocasionados por fatiga pura, generalmente también son provocados por corrosión. Otro tipo de falla es por desgaste o excentricidad, que se genera por el rozamiento de la tubería con la pared del pozo.

#### Rompimiento en espiral.

Este termino no debe ser utilizado para todo tipo de rotura de tubería; puesto que la verdadera causa de este rompimiento en espiral es una falla de la tubería por torsión pura.

Un corte en espiral se presenta cuando una barrena o molino se atrapa y en la superficie continúa girando la tubería en la rotaria. La forma de espiral es siempre hacia la derecha debido a la rotación y no por alguna línea débil en la tubería.

En ocasiones las tuberías son sometidas a valores de cargas cercanos a su punto de ruptura. Por lo que se debe de revisar la parte superior de la sarta calibrando sus diámetros tanto interior como exterior, para detectar un posible estiramiento de la tubería y eliminando los tramos en que se haya detectado la elongación.

Cuando la tubería es apretada sobre su límite de torque, con el efecto de flexión helicoidal puede presentarse ruptura después del refuerzo del tubo. Estas fracturas se inician con una fisura en la parte inferior de los últimos hilos de la rosca del cuerpo del tubo, y la ruptura es el resultado de los esfuerzos de compresión de la junta. La vibración también colabora en este tipo de falla, y afecta más en pozos con poca desviación, ya que a medida en que se aumenta el grado de ésta, se amortigua la vibración.

Un gran porcentaje de estas fallas se presentan en la parte final de la caja, lo que significa que la vibración viaja hacia arriba de la herramienta que se está trabajando, y provoca que la parte compacta de la caja detenga las vibraciones y las invierta en base de las últimas cuerdas.

Estas fallas son muchas cuando la tubería es sometida a elevados esfuerzos de compresión. En ocasiones la falla se presenta en la parte superior de la sarta, debido al efecto de tensión.

Las roturas por fatiga se dividen en tres que son :

- a). Por fatiga
- b). Fatiga pura
- c). Fatiga por corrosión

A continuación se detallan los tres casos de rotura.

a). Rotura Por Fatiga:

Es la falla más común en las tuberías, por ejemplo, cuando una rotura por fatiga no se detecta completamente alrededor del tubo, pero se localiza como un agujero, se le denomina "deslave", y cuando la falla es completa se denomina "twis off", pero la falla sigue siendo por la misma causa; por lo tanto, no puede haber un deslave producido por circulación del fluido de control sin que inicie con pequeños agujeros. Un deslave no corta por completo el tubo, pero si es una rotura causada por fatiga formada por el esfuerzo mecánico a que se expone la tubería y es aumentada por el efecto del fluido de control.

Un concepto equivocado con relación a la fatiga, es que el acero se cristaliza. Se ha comprobado que los cristales no cambian de tamaño, solamente se rompen provocando una fractura del tubo en forma de ojo brillante, la cual da la idea de cristalización, pero solo es la parte afilada de la fractura. El acero es normal en otra parte del tubo sin fractura, a excepción de una poca cantidad de endurecimiento.

#### Fatiga Pura.

Este tipo de fatiga que provoca un rompimiento es cuando el acero del tubo está sometido a esfuerzos de cambio de temperatura, flexión helicoidal, aglobamiento y efecto de pistón; el error se presenta como una falla por fatiga, ya que la flexión helicoidal y la tensión directa son los esfuerzos más severos a los que se somete la tubería.

Por ejemplo la fatiga que se produce por doblar y enderezar un alambre, en repetidas ocasiones, provoca que se rompa éste. Lo mismo ocurre en la tubería con elevado número de ciclos de esfuerzo; puede ceder, aunque la corrosión contribuye en gran parte a provocar la falla.

#### Fatigas Por Corrosión.

En las tuberías nuevas estas fallas son poco comunes por lo que no se toma una estadística de los esfuerzos a los que se van sometiendo, hasta el punto de no tener información de las sartas con relación a qué tramos de tubería se han fatigado más que otros.

Como ejemplo de esta fatiga tenemos que si se encuentra trabajando una sarta con rotación de 90 rpm, en un día habrá girado 129,600 veces; si trabaja ocho días acumulará más de un millón de ciclos de esfuerzos. Si se ha iniciado una fractura, el fluido de control erosiona la parte filosa de la fisura, pero la fisura se extiende alrededor del tubo, configurando un desgaste en forma de labio.

## V.- DISEÑO DE LA SARTA DE PERFORACION (1.4)

El objetivo en este capítulo es presentar la forma de calcular el diseño de las sargas en función de los esfuerzos a que son sometidas y de seleccionar los accesorios de la sarta para operar durante las intervenciones de perforación, reparación y terminación de pozos.

Para realizar las operaciones de molienda o perforación, pescas y acondicionamiento de pozos petroleros con las sargas de trabajo, se requiere que éstas se diseñen de acuerdo a los esfuerzos a que estarán sometidas. Por lo que en este capítulo se analizarán y calcularán el peso sobre barrena o molino, la longitud de lastrabarrenas y por medio de gráficas los esfuerzos a que se someten las tuberías; estos esfuerzos son: de tensión, de colapso y de torsión.

Para realizar lo anterior, se realizarán ciertos cálculos, pasos e interpolación de valores en gráficas, que se deberán comprender para realizar un buen diseño.

En las operaciones que se realizan para perforar, reparar y terminar pozos, es necesario analizar el comportamiento de las sargas bajo cada uno de los esfuerzos a que son sometidas. Tales esfuerzos son los siguientes:

TENSION.

COLAPSO.

TORSION.

Para realizar los procedimientos de diseño es necesario fijar los parámetros siguientes:

1. Peso máximo sobre barrena o molino.
2. Longitud de los lastrabarrenas.
3. Análisis de esfuerzos a que se someten las tuberías.

A continuación se analizarán los parámetros antes mencionados:

1. Peso Máximo Sobre Barrena o Molino.

El peso máximo que se debe aplicar a la barrena o molino lo proporciona una cantidad recomendable de lastrabarrenas.

En la Figura 124, se presenta el peso máximo que se debe aplicar. En el eje horizontal se tiene el diámetro de la barrena o molino en pg., y en el eje vertical se tiene el peso sobre barrena o molino en lb. En la gráfica tenemos dos curvas continuas para el caso en que se utilizan barrenas de diamante en formaciones suaves y duras. La línea discontinua se elaboró para la carga sobre los molinos, la cual se reduce en un 25% en peso si la sarta no lleva estabilizadores.

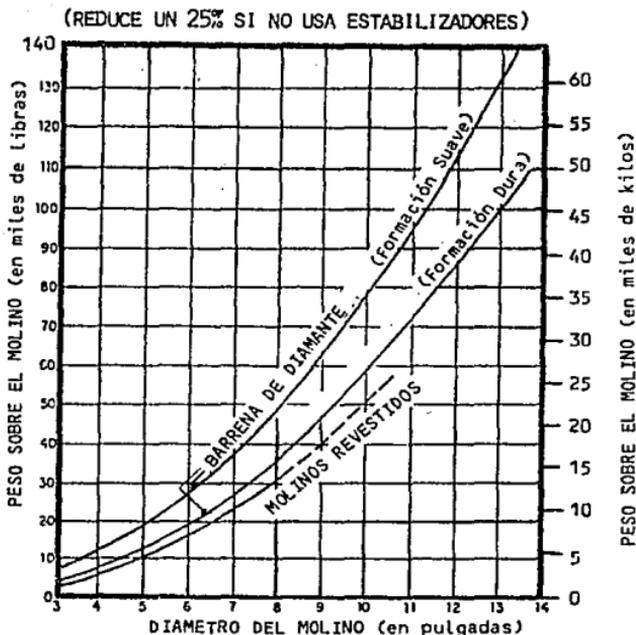


Fig. 124

Un ejemplo de lo anteriormente descrito es el siguiente:

¿Cuál sería el peso máximo que puede aplicarse a un molino cuyo diámetro es de 5 1/2 pg, si la sarta de trabajo no lleva estabilizadores?

Solución:

En el eje horizontal de la Figura 124 se marca 5 1/2 pg. correspondiente al diámetro del cual se está tratando, de este punto se traza una línea vertical hasta interceptar la línea discontinua, de ahí se traza hacia la izquierda una línea horizontal hasta interceptar al eje vertical, y en ese punto de intersección se tendrá el valor de 13,000 lb, por lo que:

$13,000 \times 0.75 = 9750$  lb. Que es el peso máximo por aplicar.

Nota. Se debe multiplicar por el 75% puesto que como no tiene estabilizadores el peso se reduce un 25%.

Otro ejemplo sería el siguiente:

¿Qué peso máximo podrá aplicarse a un molino con diámetro de 6 1/2 pg. si la sarta lleva estabilizadores?

Solución:

Se marca en el eje de las abscisas de la figura 124, 6 1/2 pg. que es el diámetro del molino, en este punto se traza una vertical hasta interceptar la línea discontinua; de éste punto se traza una línea horizontal hacia la izquierda hasta interceptar el eje de las ordenadas donde se tendrá el valor del peso máximo por aplicar:

PESO MAXIMO POR APLICAR = 20,000 lb.

Nota. Aquí no se afecta el resultado por ningún porcentaje, puesto que la sarta cuenta con estabilizadores.

Se puede decir que en determinado momento se pudiera aplicar más peso, lo que no es recomendable puesto que el molino trabaja por fricción, y los resultados en las operaciones que se llevan a cabo no tendrían los avances esperados; y además con pesos excesivos los valores de torsión que se originan en el aparejo de trabajo serían altos en perjuicio de la sarta.

Ahora en el caso de barrenas de dientes, el concepto del peso que se aplica sobre la barrena es diferente, ya que el sistema de cojinete de rodillos soporte valores extremadamente altos en cargas unitarias y de impacto, dependiendo del número de serie, tipo y características de las barrenas.

En la Tabla 18 se muestran los pesos máximos permisibles para molinos relacionados a su diámetro. Referente a barrenas de dientes, las cuales se analizaron en los capítulos anteriores.

MOLINOS	
DIAMETRO (pg)	PESO APLICADO (lb)
3 1/2	4500
3 5/8	5000
3 7/8	6000
4 1/8	6500
4 1/4	7000
4 5/8	7500
5 1/2	9750
5 7/8	12000
6 1/2	15000

Tabla 18.

\* Sin estabilizadores

## 2. Longitud De Los Lastrabarrenas.

El número de los lastrabarrenas que se requieren en la sarta se encuentra en función del peso sobre la barrena o molino; esta cantidad de lastrabarrenas se calcula con la siguiente expresión:

$$Llb = \frac{Psm}{Kb * Fs * \cos \beta * Plb} \quad (A)$$

donde:

Llb = Longitud de los lastrabarrenas (m)

Psm = Peso sobre el molino o barrena (kg)

$Kb = 1 - \frac{\tilde{a}f}{\tilde{a}a} = \text{Efecto de flotación.}$

$\bar{\alpha}f$  = Densidad del fluido de control ( $\text{gr/cm}^3$ )

$\bar{\alpha}a$  = Densidad del acero  $7.85 \text{ gr/cm}^3$

$F_s$  = Factor de seguridad de punto neutro

$\beta$  = Angulo de desviación del pozo referido a la vertical.

$P_{lb}$  = Peso nominal unitario de los lastrabarrenas ( $\text{kg/m}$ ).

Para ilustrar lo anteriormente descrito tenemos el siguiente ejemplo:

En la programación de una molienda de un empacador, se utilizará un molino cuyo diámetro es de  $5 \frac{5}{8}$  de pg; previamente se calculó el peso máximo permisible que fue de 10,584 lb, que es el peso que se pudiese aplicar sobre el molino. Por tanto se necesita conocer la cantidad de lastrabarrenas con un D.E. de  $4 \frac{1}{8}$  pg. por 2 pg. D.I., 51.77  $\text{kg/m}$ ., que deberán introducirse al pozo. Considerando la desviación de éste en  $0^\circ$  y un fluido de  $1.20 \text{ gr/cm}^3$ .

Solución:

Datos:

$$P_{sm} = 10,584 - 2.2 = 4811 \text{ kg.}$$

$$K_b = 1 - \frac{1.20}{7.85} = 0.85$$

$$F_s = 0.85$$

$$\cos 0^\circ = 1$$

$$P_{lb} = 51.77 \text{ kg/m}$$

$$\text{Longitud promedio de los lastrabarrenas} = 9.00 \text{ m.}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (A), tenemos:

$$Llb = \frac{4811}{0.85 * 0.85 * 1 * 51.77} = 128 \text{ m.}$$

$$Llb = 128 \text{ mts.}$$

$$128 - 9 = 14 \text{ lastrabarrenas}$$

Que es el número de lastrabarrenas que se deben de introducir.

### 3. Análisis de Esfuerzos a que se Someten las Tuberías.

Para el diseño de sartas de perforación o molienda se deben de considerar los tres esfuerzos principales a que son sometidas estas sartas, lo cual establece el Instituto Americano del Petroleo (API).

Los tres principales esfuerzos a que son sometidas las sartas son los siguientes:

- A. Por Tensión
- B. Por Colapso
- C. Por Torsión

A continuación se detallarán cada uno de estos esfuerzos, donde se señalarán algunos conceptos fundamentales.

#### A.- Esfuerzo de Tensión:

Una sarta de trabajo al estar suspendida verticalmente, sufrirá un esfuerzo axial llamado tensión, ocasionado por el mismo peso de la sarta. Cada junta debe soportar el peso de la sarta suspendido en ella.

La variación del valor de este esfuerzo es de cero en el punto neutro hasta un máximo en el punto de apoyo, es decir en la superficie.

En el caso de que la tubería se encontrara suspendida en el aire soportaría todo su peso muerto. Ahora si está sumergida en un líquido, disminuye su peso por el efecto del empuje del mismo líquido; dicho empuje se encuentra en función de la densidad del fluido, a este efecto se le conoce como efecto de flotación. Las sargas se someten a los Cambios de los esfuerzos de tensión a compresión, a partir del punto neutro, como se observa en la Figura 125.

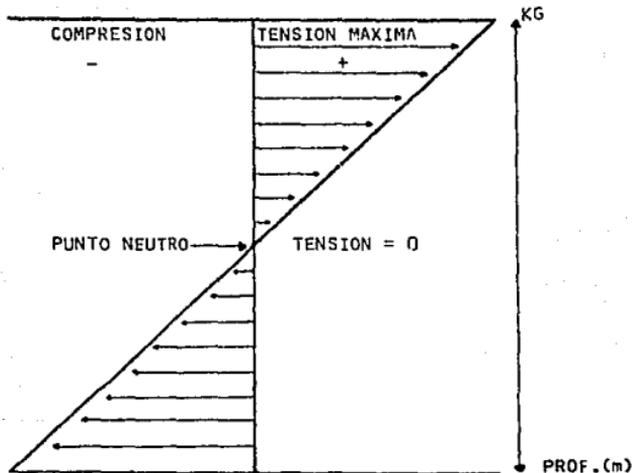


Fig. 125

Para el diseño de la sarga bajo el esfuerzo por tensión se anexan en el apéndice las gráficas necesarias para tuberías de 2 3/8, 2 7/8, 3 1/2 pg., para los grados E-75, X-95, G-105 y S-135; para clase nueva, premium y clase 2; en donde se podrá calcular la longitud de cada sección, dentro de diferentes densidades del fluido desde 0.8 hasta 2.0 gr/cm<sup>3</sup>.

En el eje de las abscisas se gráfica el esfuerzo a la tensión, lo que nos indica la máxima resistencia a la tensión de las tuberías (obtenidas de tablas de especificaciones) observándose como se va disminuyendo esta resistencia al aumentar la carga.

En el eje de las ordenadas se marca la profundidad y nos indica la máxima longitud de tubería que se podrá utilizar.

El procedimiento para manejar las gráficas por tensión es el siguiente:

#### PROCEDIMIENTO PARA USO DE GRAFICAS PARA DISEÑO POR TENSION

1. Se seleccionan las gráficas de las tuberías que se tengan disponibles
2. Con la gráfica de menor grado y peso se inicia el diseño.
3. Se calcula el peso de lastrabarrenas
4. Se establece el margen para tensionar (Mop)
5. Con la suma de los valores anteriores se entra al eje horizontal obteniendo un punto; desde ese punto, se baja una vertical hasta interceptar la recta correspondiente a la densidad del fluido que se está utilizando.
6. Desde este punto se traza una horizontal hasta el eje vertical, obteniendo la longitud máxima de tubería que se puede meter de esta primera sección.
7. Partiendo del valor máximo de resistencia a la tensión de la tubería antes mencionada, en la gráfica que sigue de mayor grado, mayor peso o diferente clase y procediendo de igual forma que en la explicada en el punto 3, se obtiene la longitud de la segunda sección.
8. Se sigue hasta completar la longitud total necesaria de tubería.
9. En el caso de que no se introduzca el total de la sección calculada como puede ser el caso de sartas combinadas, lo que se hace es transformar en resistencia la longitud de tubería que no entró y restarla del valor máximo que se tiene, obteniendo así la cantidad con que hay que entrar a las gráficas, para estimar la longitud de la siguiente sección.

### B. Esfuerzo de Colapso.

Este esfuerzo se debe principalmente al efecto de la presión exterior que ejerce la columna hidrostática de los fluidos de control en el interior de los pozos. La magnitud de la presión depende de la densidad del fluido. El colapso también puede ocurrir al aplicar una presión externa que sumada con la presión hidrostática, incrementa la presión al colapso.

El valor de la presión exterior aumenta en función de la profundidad y su valor máximo estará en el extremo inferior de la sarta, como se puede observar en la Figura 126.

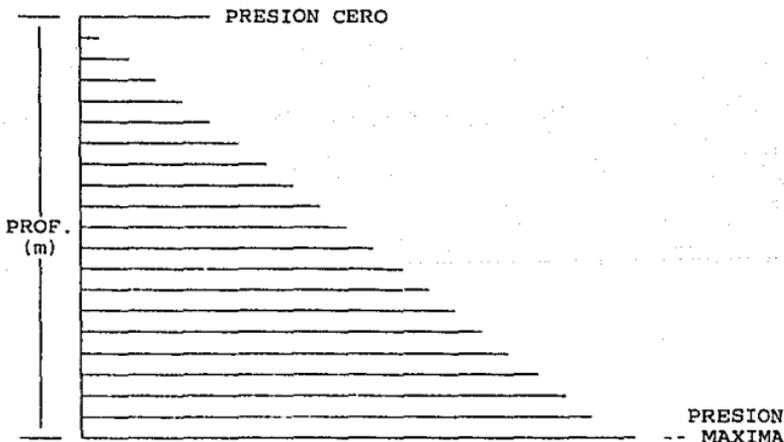


DIAGRAMA DE ESFUERZOS AL COLAPSO

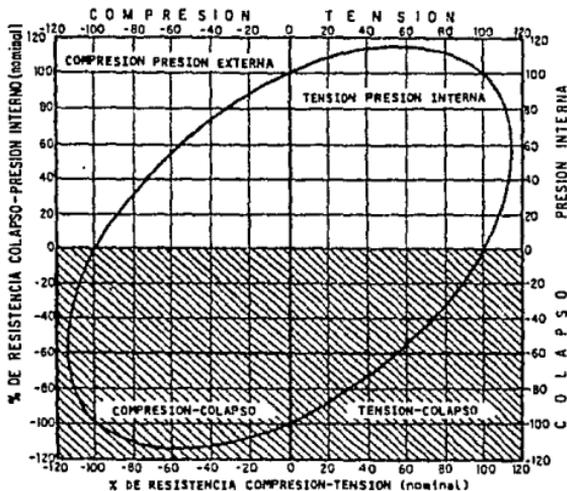
Fig. 126

Cuando un tubo está sometido a una presión exterior uniforme, el acero estará sujeto a esfuerzos de compresión, al aumentar la presión en condiciones de equilibrio, se contraerá gradualmente como cualquier cuerpo elástico, hasta una presión crítica

El diseño bajo el esfuerzo de colapso por tensión consiste en determinar la reducción en la capacidad de la tubería para resistir presión externa como resultado de la tensión aplicada. Esto debe efectuarse en los extremos de cada sección de tubería diseñada previamente por tensión, de acuerdo a las siguientes deducciones y consideraciones:

1. Al tensionar una tubería, se incrementa la capacidad a la presión interna.
2. Al tensionar una tubería, disminuye la capacidad de resistencia al colapso.
3. Al comprimir una tubería, disminuye la capacidad de resistencia a la presión interna.
4. Al comprimir una tubería, aumenta la capacidad de resistencia al colapso.

En base a estos conceptos y consideraciones se elaboró la gráfica de Elipse de esfuerzos biaxiales, (Figura 127), la cual se presenta a continuación:



ELIPSE DE ESFUERZOS BIAJIALES

Fig. 127

El procedimiento para calcular el esfuerzo de colapso por tensión es el siguiente:

- a) Contando con el peso en los extremos de cada una de las secciones previamente diseñadas, se procede a calcular la constante adimensional (r), en los extremos de cada sección definida con la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\text{tensión aplicada} * Kb + Mop}{At \overline{PCP}}$$

donde:

r = Constante adimensional

Tensión aplicada = Longitud de sección (m) \* el peso de la tubería (kg/m) \* 2.2 = lb

Mop = Margen para tensionar en (kg) \* 2.2 = lb

At = Area transversal del acero del cuerpo del tubo en (pg<sup>2</sup>)

Kb = Factor de flotación

$\overline{PCP}$  = Punto de cedencia promedio en (lb/pg<sup>2</sup>)

El punto de cedencia promedio ( $\overline{PCP}$ ), es la media aritmética de la mínima y máxima resistencia cedente, para cada calidad de acero, como se muestra en la Tabla 19:

GRADO	PCP (lb/pg <sup>2</sup> )	PC min (lb/pg <sup>2</sup> )	PC max (lb/pg <sup>2</sup> )
E	85000	75000	95000
X	110000	95000	125000
G	120000	105000	135000
S-135	145000	135000	155000

Tabla 19

- b) Con el valor de "r" se entra a la Elipse de Esfuerzos Biaxiales sobre el eje de tensión encontrando un punto. Se baja una vertical hasta interceptar la curva, obteniendo el porcentaje de resistencia al colapso que tiene la tubería cuando se tiene sometida a una cierta tensión.

Este valor encontrado se multiplica por el valor del colapso dado en tablas y se obtiene el valor al colapso en el punto deseado.

- c) Este valor se compara con la presión que ejerce el fluido en ese punto. Si es menor, la tubería de perforación no es recomendable por presión externa. Por lo tanto, se tendrá que acudir al siguiente grado de tubería y repetir el diseño por colapso.

Hasta que los valores de presión sean cercanos o iguales, la sarta estará en condiciones favorables por colapso.

### C. Esfuerzo De Torsión.

La cantidad de esfuerzo por torsión que resiste una tubería bajo tensión debe calcularse en cada cambio de grado, diámetro y peso de tubería. El valor mínimo que resulte en cualquiera de los puntos analizados será la condición de frontera en operaciones reales de campo.

En caso de herramientas que se operan con torsión como son algunas herramientas de percusión, el valor de torsión obtenido por el diseño deberá ser superior a la torsión necesaria; de lo contrario deberá cambiarse el diseño de la sarta.

Para calcular la resistencia a la torsión contra la tensión aplicada, se elaboraron las gráficas para tuberías de los siguientes diámetros: 2 3/8, 2 7/8, 3 1/2 pg., grados E-75, X-95, G-105 y S-135 para clase nueva, premium y clase 2, las cuales se encuentran en el apéndice.

En las gráficas antes mencionadas, está señalada en el eje de las abscisas la tensión de la tubería y en el eje de las ordenadas, la torsión.

Las curvas indican que a medida que aumente la tensión de la tubería el esfuerzo de torsión disminuye.

Procedimiento del manejo de gráficas para el diseño por torsión:

- a) Localizar en el eje de las abscisas de la gráfica conveniente el valor de tensión calculado; se levanta una vertical hasta interceptar la curva correspondiente a la clase de tubería.
- b) Se traza una horizontal del punto' localizado anteriormente hacia la ordenada de torsión y localizar el valor máximo del esfuerzo a la torsión

Con todos los valores de torsión encontrados en la sarta, se elegirá el mínimo, este valor será con el cual la sarta pueda trabajar o bien será el valor máximo al que deba regularse la mesa rotatoria.

A continuación se presenta un ejemplo de diseño bajo todos los esfuerzos y consideraciones antes mencionados, utilizando las gráficas del apéndice y las tablas correspondientes:

#### EJEMPLO DE DISEÑO:

De acuerdo al estado mecánico N° 1 (Figura 128), del pozo, se calculará lo siguiente:

- Peso sobre molino o barrena
- Longitud de los lastrabarrenas
- Diseño por tensión
- Diseño por colapso
- Diseño por torsión

Datos:

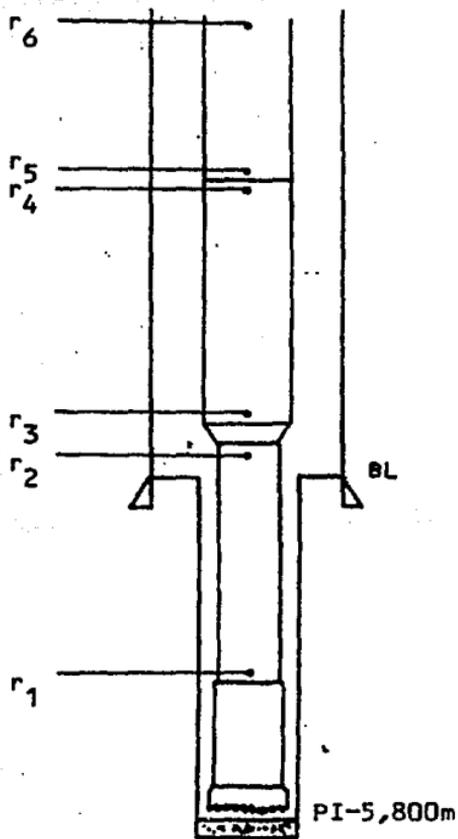
TUBERIA	D.E.	GRADO	PESO (lb/pie)	D.I (pg.)	LONG. (m)	OBSERVACIONES
T R	7.625	V-150	39	6.625	4,150	B.L. = 4,100 m <sup>3</sup> F.C.=1.20gr/cm <sup>3</sup>
T R CORTA	5.000	V-150	15	4.408	5,800	MOLINO =4.125pg ANGULO DE DESVIACION DEL POZO REFERIDO A LA VERTICAL °0

Tabla 20

#### TUBERIAS DE TRABAJO DISPONIBLES

TP (pg)	CLASE	CONEX.	GRA.	P.NOM. lb/pie	P.AJUT lb/pie	Rt lb.	RCN lb/pg <sup>2</sup>	TOR-- SION lb-pi
2 7/8	Nueva	Hydril PH-6	P105	----	8.7	261000	20900	14578
3 1/2	Nueva	I.F.	E	13.30	13.86	272000	14110	18550
3 1/2	Nueva	I.F.	X-95	13.3	14.32	343990	17880	23500
3 1/2	Nueva	I.F.	X-95	15.5	16.54	408850	21250	26710

Tabla 21



Estado Mecánico N° 1 del Ejemplo de Diseño.  
Fig.128

## Soluciones.

1. Peso sobre molino, igual a 6,500 lb ( de la tabla 18 ), de 4 1/8 pg. de diámetro.
2. Longitud de lastrabarrenas

$$Llb = \frac{Psm}{Kb \quad Fs \quad \text{Cos } \dot{A} \quad Plb}$$

sustituyendo valores:

$$Llb = \frac{6,500 - 2.2}{\left(1 - \frac{1.20}{7.85}\right) 0.85 * 1 * 39.78} = 103 \text{ m}$$

$$Llb = 103 \text{ m}$$

## 3. DISEÑO POR TENSION.

- a) Como la tubería de trabajo de 2 7/8 pg. Hydril PH-6 únicamente se utilizará en el interior de la TR corta más 100 m como margen de seguridad, tendremos:

Profundidad total =	5,800 m
Boca T R corta =	4,100 m
	1,700 m
Margen de seguridad =	100 m
	1,800 m

Pero como se cuenta con 103 m. de longitud de lastrabarrenas se obtendrá:

$$L1 = 1,800 - 103 = 1697 \quad L1 = 1,697 \text{ m.}$$

- b) La siguiente tubería que se usará es de un diámetro de 3 1/2 pg., de grado °E, con un peso de 13.3 lb/pie por lo cual, se calculará el peso de la sarta hasta la longitud de L1 que es igual al peso de los lastrabarrenas de 3 1/2 pg., de diámetro con un peso de 26.7 lb/pie (tabla "C") más el peso de la primera tubería más el margen de seguridad para tensionar (Mop).

$$\text{Peso de Lb} = 103 \text{ m.} \cdot 26.7 \text{ lb/pie} \cdot 1.49 \cdot 0.847 \cdot 2.2$$

$$\text{Peso Lb} = 7,635 \text{ lb}$$

$$\text{Peso de L1} = 1697 \text{ m.} \cdot 8.7 \text{ lb/pie} \cdot 1.49 \cdot 0.847 \cdot 2.2$$

$$\text{peso L1} = 40,991 \text{ lb}$$

$$\text{Mop} = 30,000 \text{ kg} \cdot 2.2 = 66,000 \text{ lb}$$

$$W_1 = W_{1b} + W_{L1} + \text{Mop}$$

Donde:

$W_1$  = Peso de la sección calculada flotada.

$W_{1b}$  = Peso de lastrabarrenas flotados

$W_{L1}$  = Peso de la tubería de 2 7/8 pg.

Mop = Margen para tensionar.

$$W_1 = 7,635 + 40,991 + 66,000 = 114,626 \text{ lb}$$

Con el valor del peso de la sección calculada anteriormente que fue de 114,626 lb., se entra al eje horizontal superior de la Figura 138 que corresponde a una gráfica de una T.P. de 3 1/2 pg grado E de 13.3 lb/pie (apéndice), se traza una vertical hasta interceptar la diagonal correspondiente a la tubería nueva y fluido con densidad de 1.20 gr/cm<sup>3</sup>. De este punto se traza una horizontal al margen izquierdo localizando en el eje vertical de profundidades un valor de 3625 m. siendo esta la longitud  $L_2$ , que es la longitud de la siguiente tubería a introducir al pozo.

c) Con el valor de  $W_1$  más el peso de  $L_2$  se calculará  $W_2$

$$W_2 = W_{1b} + W_{L1} + \text{Mop} + W_{L2}$$

$$W_{L2} = 3625 \text{ m.} \cdot 13.86 \text{ lb/pie} \cdot 1.49 \cdot 0.847 \cdot 2.2 = 139496$$

$$W_{L2} = 139,496 \text{ lb.}$$

$$W_2 = 7,635 + 40,991 + 66,000 + 139,496 = 254,122 \text{ lb.}$$

$$W_2 = 254,122 \text{ lb.}$$

Con el valor de 254,122 lb. se entra a la Figura 139 que corresponde a una gráfica, de una T.P. de 3 1/2 pg. de grado °X-95 de 13.3 lb/pie (apéndice A) y siguiendo las indicaciones antes mencionadas para el manejo de gráficas, se obtendrá una longitud de tubería de 2,400 m.

Pero en el dibujo del estado mecánico N° 1 (Figura 128) se tiene una profundidad de 5,800 m. por lo que de esta última tubería se utilizará únicamente una determinada longitud, considerando las secciones antes calculadas.

Lacum = Longitud acumulada

Lacum = L<sub>1b</sub> + L<sub>1</sub> + L<sub>2</sub>

Lacum = 103 + 1697 + 3625 = 5425 m.

P I = Profundidad Inicial

P.I - Lacum

5800 - 5425 = 375 m.

L<sub>3</sub> = 375 m.

W<sub>T</sub> = Peso Total

W<sub>T</sub> = W<sub>1b</sub> + W<sub>L1</sub> + W<sub>L2</sub> + W<sub>L3</sub> + Mop

W<sub>L3</sub> = 375 m. \* 14.32 lb/pie \* 1.49 \* 0.847 \* 2.2 = 14,909

W<sub>L3</sub> = 14,909 lb

W<sub>T</sub> = 7,635 + 40,991 + 139,496 + 14,909 + 66,000 = 269,031

W<sub>T</sub> = 269,031 lb

Con este valor de 269,031 lb. representa el peso total de la sarta, incluyendo el Mop.

La resistencia a la tensión de la L3, TP 3 1/2 pg. de grado °X-95 es de 343,990 lb. (valor obtenido de la tabla 21 de tuberías de trabajo disponibles del ejemplo del diseño), lo cual demuestra que tenemos capacidad suficiente para operar con este diseño. Puesto que la resistencia a la tensión de esta tubería es mayor que el peso total que la sarta.

343,990 lb. > 269,031 lb.

## 4. DISEÑO POR COLAPSO.

- a) Calculadas las secciones de tuberías por tensión, se procede a calcular el valor adimensional de  $r$ , que es la relación de tensión aplicada entre la resistencia a la tensión real de la tubería, utilizando la siguiente expresión:

$$r = \frac{\text{(tensión aplicada)} \text{ kb} + \text{Mop}}{\text{At} * \text{PCP}}$$

Los valores de  $r$  que se calcularán para este caso, son en los extremos donde se realiza el enlace de las diferentes secciones de tubería, los cuales aparecen señalados en la figura del estado mecánico del ejemplo, estos puntos son:  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $r_4$ ,  $r_5$ , y  $r_6$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$r_1 = \frac{[(103 * 39.78 * 0.847) + 30000] 2.2}{2.4838 * 120,000} = 0.247$$

$$r_1 = 0.247$$

$$r_2 = \frac{[(W_{1b} + W_{L1}) * K_b + \text{MOP}] * 2.2}{\text{At} * \overline{\text{PCP}}_{L1}}$$

$$r_2 = \frac{[(4097.34 + 1697 * 8.7 * 1.49) 0.847 + 30000] 2.2}{2.4838 * 120000} =$$

$$r_2 = 0.384$$

$$r_3 = \frac{[(W_{1b} + W_{L1}) K_b + \text{MOP}] 2.2}{\text{At} * \overline{\text{PCP}}_{L2}}$$

$$r_3 = \frac{[(4097.34 + 1697 * 8.7 * 1.49) 0.847 + 30000] 2.2}{3.6209 * 85000} =$$

$$r_3 = 372$$

$$r_4 = \frac{[(W_{1b} + W_{L1} + W_{L2}) K_b + MOP] 2.2}{At * \overline{PCP}_{L2}}$$

$$r_4 = \frac{[(4097.34 + 21998.211 + 74861.325) 0.847 + 30000] 2.2}{3.6209 * 85000} =$$

$$r_4 = 0.825$$

$$r_5 = \frac{[(W_{1b} + W_{L1} + W_{L2}) K_b + MOP] 2.2}{At * \overline{PCP}_{L3}}$$

$$r_5 = \frac{[(4097.34 + 21998.211 + 74861.325) 0.847 + 30000] 2.2}{3.6209 * 110000} =$$

$$r_5 = 0.638$$

$$r_6 = \frac{[(W_{1b} + W_{L1} + W_{L2} + W_{L3}) K_b + MOP] 2.2}{At * \overline{PCP}_{L3}}$$

$$r_6 = \frac{[(4097.3 + 21998.2 + 74861.3 + 8001.3) 0.847 + 30000] 2.2}{3.6209 * 110000} =$$

$$r_6 = 0.672$$

- b).- Conociendo los valores de r de un diseño por tensión, en la gráfica de Elipse de esfuerzos biaxiales, entrando por el cuadrante de tensión, desde ese punto se baja una vertical a interceptar la línea del Elipse que pasa por el cuadrante tensión-colapso, en ese punto se traza una horizontal hacia la derecha del mismo, donde se determina el porcentaje que corresponde a Z de cada r.

Con lo anteriormente descrito se obtendrán los valores siguientes:

$r_1 = 0.247$	$Z_1 = 0.85$
$r_2 = 0.384$	$Z_2 = 0.73$
$r_3 = 0.372$	$Z_3 = 0.76$
$r_4 = 0.825$	$Z_4 = 0.30$
$r_5 = 0.638$	$Z_5 = 0.50$
$r_6 = 0.672$	$Z_6 = 0.46$

- c). El valor de cada Z se multiplica por la resistencia al colapso nominal dado en tablas de la tubería seleccionada en el diseño, determinando con esto la resistencia al colapso que soporta cada tubería en cada uno de los puntos determinados estando en tensión (Rcbt).

Resistencia al colapso bajo tensión	Z		Colapso Nominal lb/pg <sup>2</sup>		Colapso bajo tensión lb/pg <sup>2</sup>
Rcbt <sub>1</sub>	= 0.85	*	20,900	=	17,765
Rcbt <sub>2</sub>	= 0.73	*	20,900	=	15,257
Rcbt <sub>3</sub>	= 0.76	*	14,110	=	10,723
Rcbt <sub>4</sub>	= 0.30	*	14,110	=	4,233
Rcbt <sub>5</sub>	= 0.50	*	17,880	=	9,940
Rcbt <sub>6</sub>	= 0.46	*	17,880	=	8,224

Ahora multiplicando la densidad del fluido por la profundidad de cada sección localizada y por la constante de conversión que es de 1.422 se obtendrá el valor de la presión hidrostática en ese punto en lb/pg<sup>2</sup>, lo cual al compararlo con la presión real que soporta la tubería (Rcbt), dará el margen de presión con que se pueda represionar el espacio anular. En la tabla N° 22 se tiene los resultados de lo anteriormente descrito:

Densidad del F.Ç. gr/cm <sup>3</sup>	PROF. m.	PRESION HIDROS. lb/pg <sup>2</sup>	Rcbt lb/pg <sup>2</sup>	Margen de presión lb/pg <sup>2</sup>
1.20	5697	9721	17,765	8,044
	4000	6825	15,525	8,432
	4000	6825	10,723	3,898
	375	640	4,233	3,597
	375	640	8,940	8,300
	0	0	8,224	8,224

Tabla 22.

Con los resultados obtenidos, el punto donde se puede ejercer menor presión por espacio anular es a la profundidad de 375 m. con la tubería de 3 1/2 pg. grado °E.

#### 5. DISEÑO POR TORSION.

En el caso de la primera sección de T.P de 2 7/8 pg. Hydril grado P-105 se omite calcular los valores por torsión debido a que la resistencia por torsión es de 14,578 lb-pie y a la profundidad donde se encuentra la resistencia de torsión contra tensión es mínima, por lo cual se procederá a calcular los valores para la segunda y tercera sección.

Primero se calculará el peso en los puntos:

$$r_3, r_4, r_5, r_6$$

$$Wr_3 = 48,626 \text{ lb}$$

$$Wr_4 = 188,122 \text{ lb}$$

$$Wr_5 = 188,122 \text{ lb}$$

$$Wr_6 = 203,031 \text{ lb}$$

Con estos valores se entra a la Figura 150 que corresponde a una gráfica de una TP 3 1/2 pg. de grado °E-75 (apéndice) y con el valor de  $Wr_3$  se entra en la abscisa de tensión localizando el valor de 48,626 lb. trazando una vertical a interceptar la curva correspondiente a tubería nueva, de este punto se traza una línea hacia la ordenada de torsión y la lectura será aproximadamente igual a 18,200 lb-pie.

En la misma gráfica se localiza  $Wr_4$  en la abscisa de tensión con el valor de 188,122 lb. y trazando una vertical a interceptar la curva correspondiente a tubería nueva, de ahí se traza hacia la ordenada de torsión y la lectura será aproximadamente igual a 13,400 lb-pie.

Con los valores de  $Wr_5$  y  $Wr_6$  se entra en la Figura 151 que corresponde a una gráfica de una TP 3 1/2 pg. de grado °X-95 (apéndice) y procediendo en la misma forma antes descrita se obtendrá para:

$$Wr_5 \text{ un valor de } 19,750 \text{ lb-pie}$$

$$Wr_6 \text{ un valor de } 19,150 \text{ lb-pie}$$

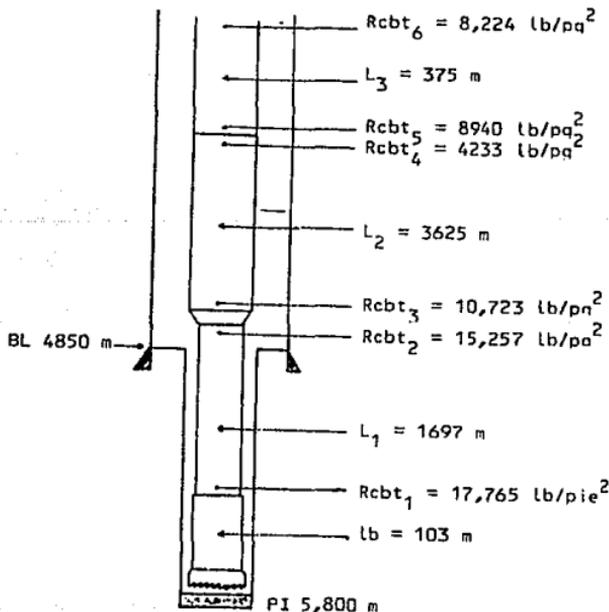
Los valores de torsión para la TP 3 1/2 pg. de grado °E se calcularon en 18,200 y 13,400 lb-pie, siendo el valor máximo de torsión de estas tuberías de 18,550 lb-pie (de tablas).

Los valores obtenidos para la TP 3 1/2 pg. de grado °X-95 se calcularon en 19,750 y 19,150 lb-pie, siendo el máximo de torsión de 23,500 lb-pie (de tablas).

Concluyendo que los dos tipos de tubería soportarán la torsión por tensión a la que estarán sometidas.

Por lo tanto la sarta de trabajo quedara como se ilustra en el estado mecánico N° 2 (Figura 129):

NOTA.- Al final de este capítulo se encuentra el apéndice A, donde se tienen las gráficas que se utilizan en el diseño de sarta de perforación o de trabajo.



Estado Mecánico N° 2.  
Fig. 129

## CONCLUSIONES.

Como se ha observado en el presente análisis, el diseño de una sarta de perforación o de trabajo, así como las herramientas y factores que intervienen en dicho diseño, es un aspecto muy importante en la industria petrolera, puesto que el realizar un mal diseño significa problemas costosos y de gran retraso en la planeación y realización de las operaciones de perforación y reparación de pozos.

Para esto, los aspectos o parámetros más importantes que se analizaron fueron:

A) Peso Máximo Sobre Barrena o Molino.

Se calcula en función del diámetro interior del agujero y el tipo de formación por perforar, recomendándose reducir el resultado en un 25 % cuando la sarta no utilice estabilizadores.

B) Longitud de Lastrabarrenas.

Por ser los lastrabarrenas los que suministran el peso y rigidez a la sarta, la cantidad requerida dependerá del peso calculado por aplicar a la barrena o molino. Dicha longitud es obtenida con la siguiente fórmula:

$$Llb = \frac{Psm}{Kb \cdot Fs \cdot \cos \alpha \cdot Plb}$$

Donde:

Llb = Longitud de los Lastrabarrenas (m)

Psm = Peso Sobre el Molino o Barrena

$Kb = 1 - \frac{\bar{\alpha}f}{\bar{\alpha}a}$  = Efecto De Flotación.

$\bar{\alpha}f$  = Densidad del Fluido de Control (gr/cm<sup>3</sup>)

$\bar{\alpha}a$  = Densidad del Acero 7.85 gr/cm<sup>3</sup>

$F_s$  = Factor de Seguridad de Punto Neutro.

$\hat{A}$  = Angulo De Desviación Del Pozo Referido a La Vertical.

$P_{lb}$  = Peso Nominal Unitario De Los Lastrabarreras (kg/m)

### C) Análisis de Esfuerzos a Que se Someten las Tuberías

Como fue descrito, una sarta de perforación o trabajo al operarse dentro del pozo está sometida a tres esfuerzos principales, los cuales son:

#### TENSION.

Este esfuerzo es generado por los siguientes parámetros:

- 1). El peso propio de la sarta.
- 2). Las fuerzas aplicadas mecánicamente desde la superficie.
- 3). La fricción de la tubería con las paredes del pozo o de la tubería de revestimiento.

El diseño de la sarta bajo este esfuerzo, se realiza por medio de gráficas en función del diámetro, grado y peso de la tubería y la densidad del fluido de control.

#### COLAPSO.

Este esfuerzo conocido también como aplastamiento, se debe principalmente al efecto de la presión externa que ejerce la columna hidrostática de los fluidos de control en los pozos.

El diseño de la sarta bajo este esfuerzo consiste básicamente en determinar la reducción en la capacidad de la tubería para resistir presión externa como resultado de la tensión aplicada, la cual se calcula por medio de la elipse de esfuerzos biaxiales.

**TORSION.**

El esfuerzo de torsión que resiste una tubería que se encuentra bajo tensión se calcula para cada cambio de grado, diámetro, peso de tubería. El valor mínimo que resulte en cualquiera de los puntos analizados, será la condición de frontera para las operaciones reales de campo.

El diseño de la sarta bajo este esfuerzo se efectúa a través de las gráficas de resistencia a la torsión contra la tensión aplicada, para los diferentes diámetros y grados de tuberías. Es importante que al operar herramientas de percusión, el valor de torsión obtenido por diseño, sea superior a la torsión necesaria para operarlas, de lo contrario deberá recalcularse el diseño.

**APENDICE (4)**

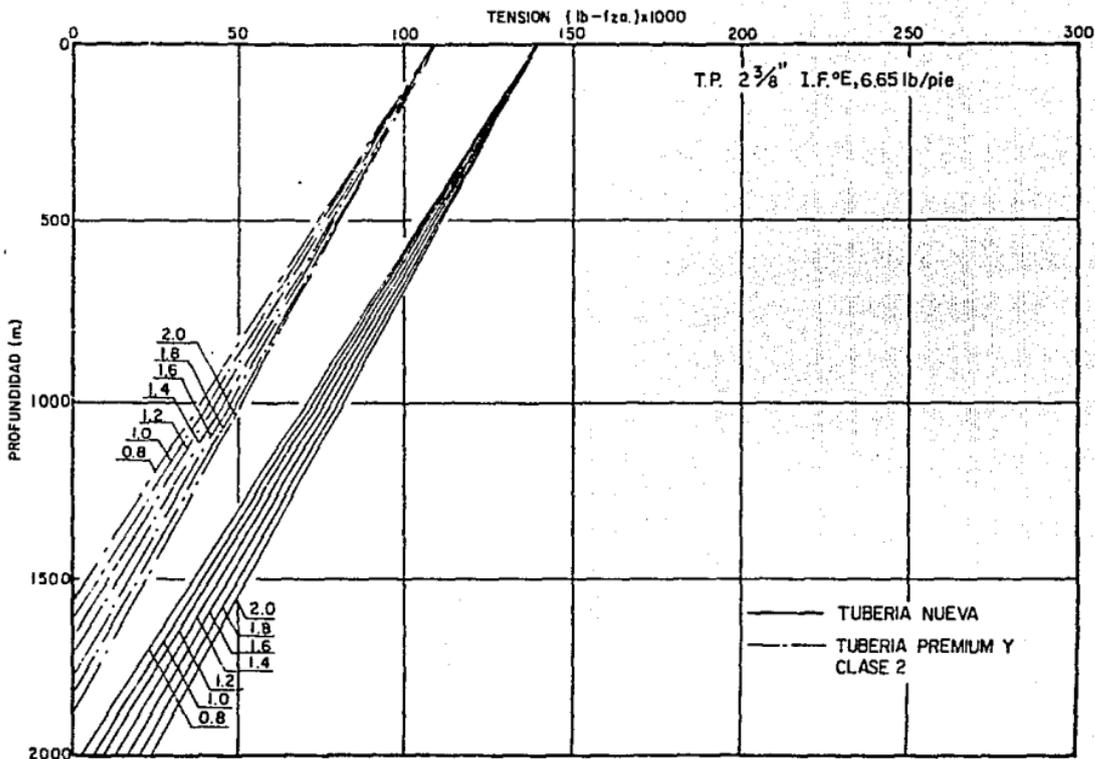


Figura 130.

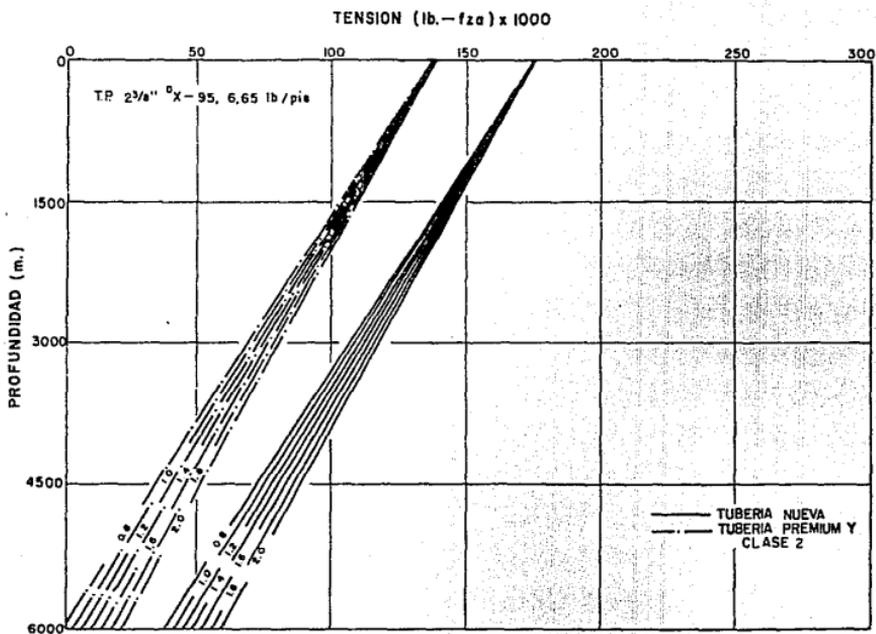


Figura 131.

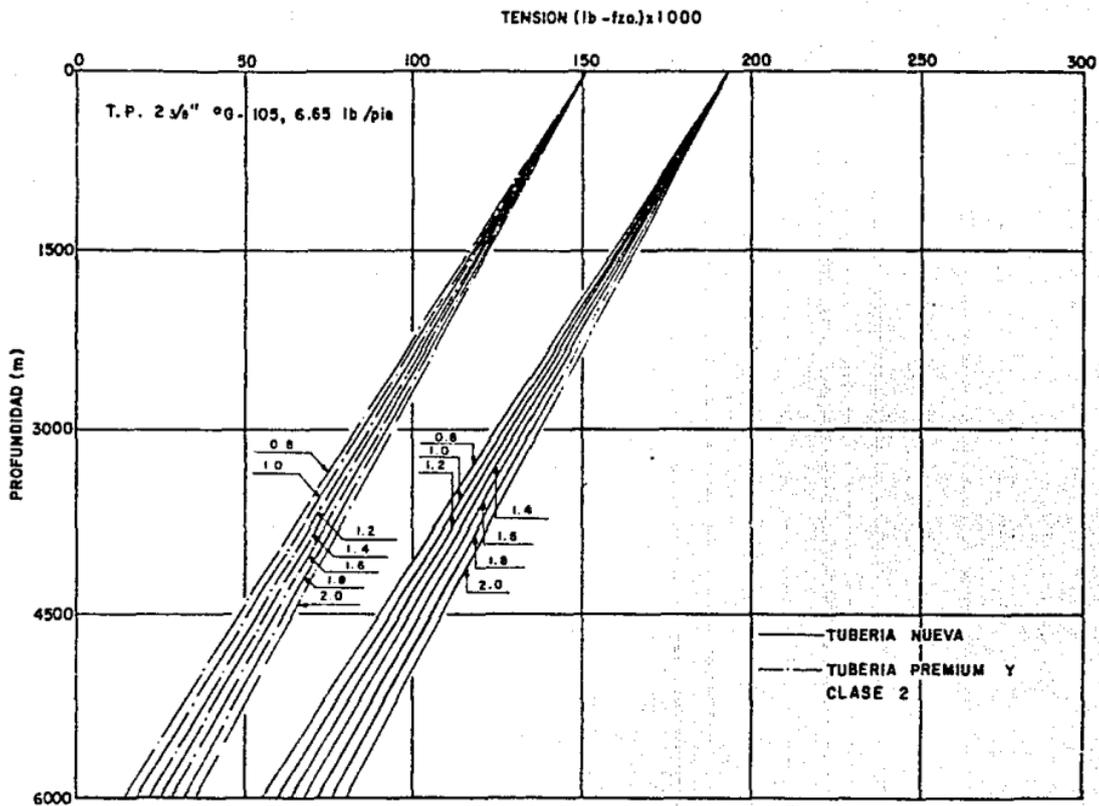


Figura 132.

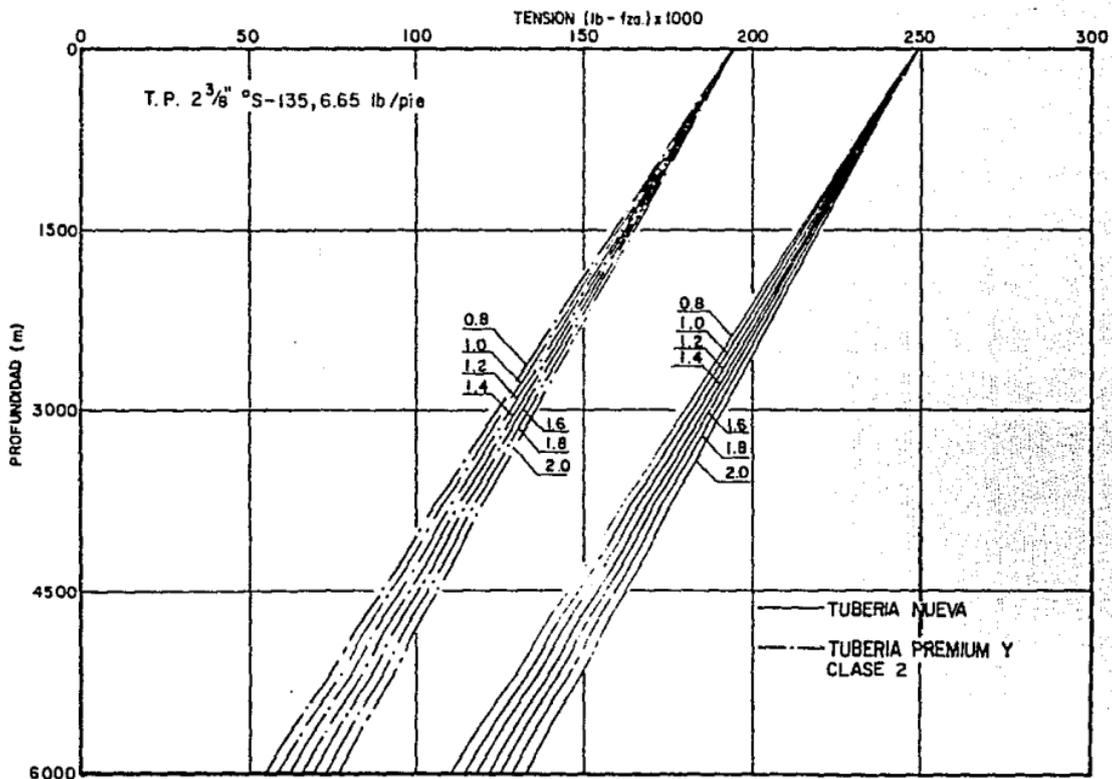


Figura 133.

TENSION (lb-fza) x 1000

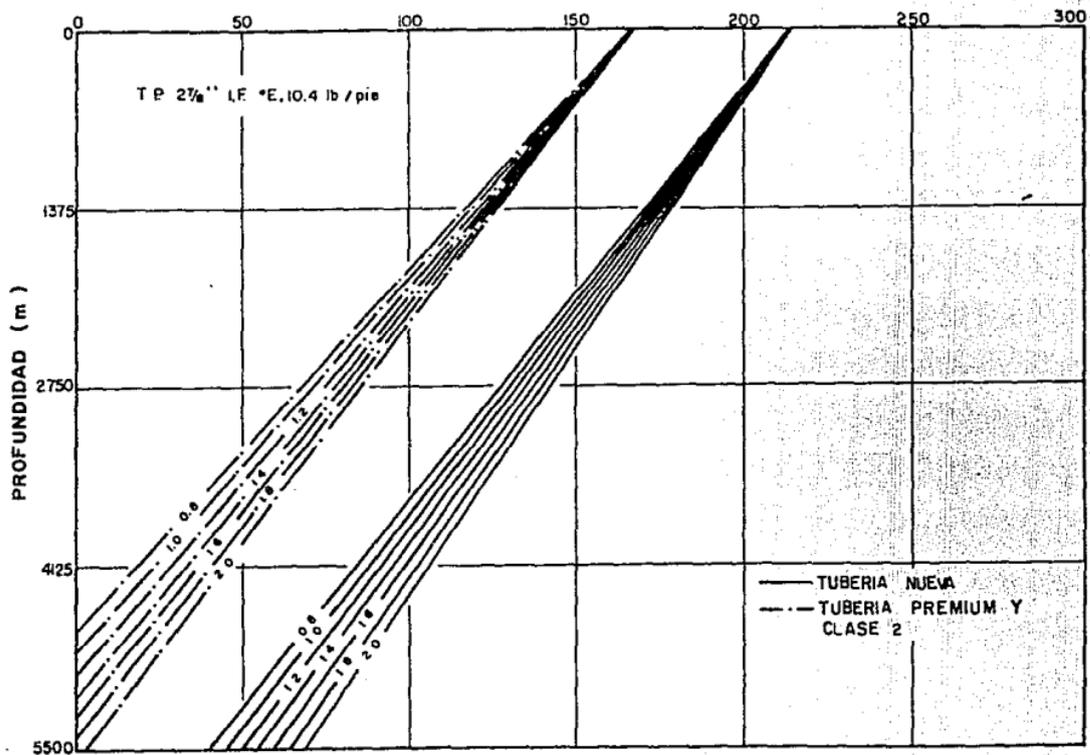


Figura 134.

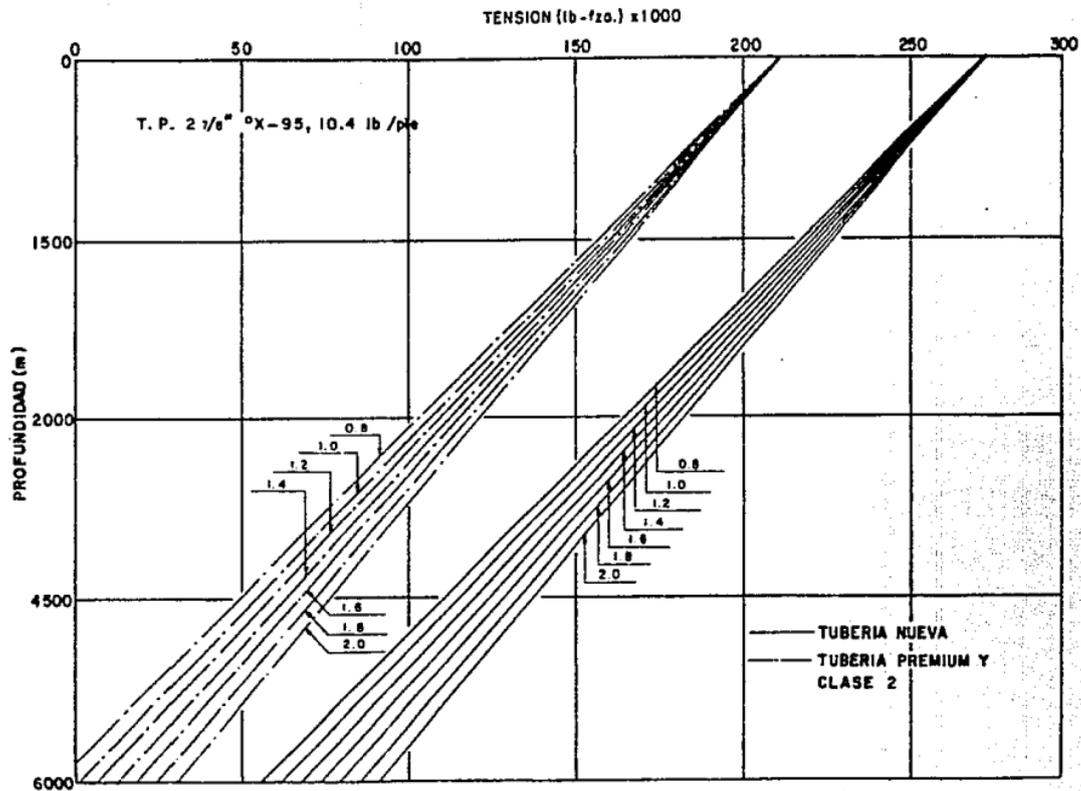


Figura 135.

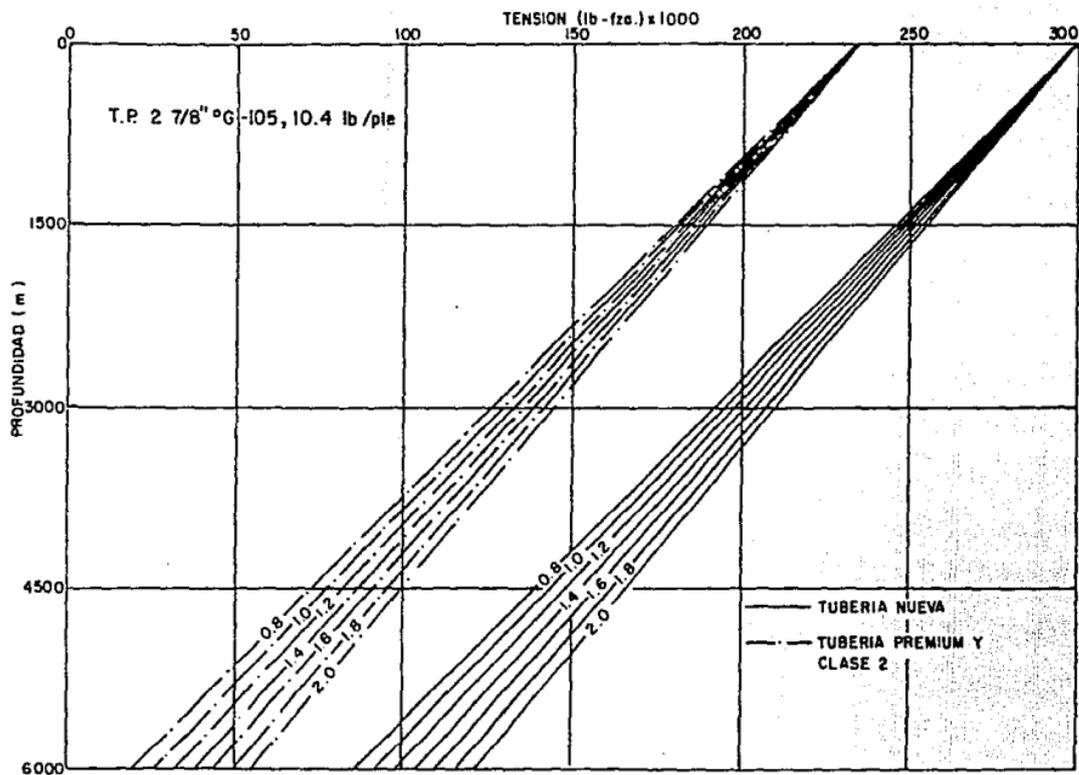


Figura 136.

TENSION (lb - fza.) x 1000

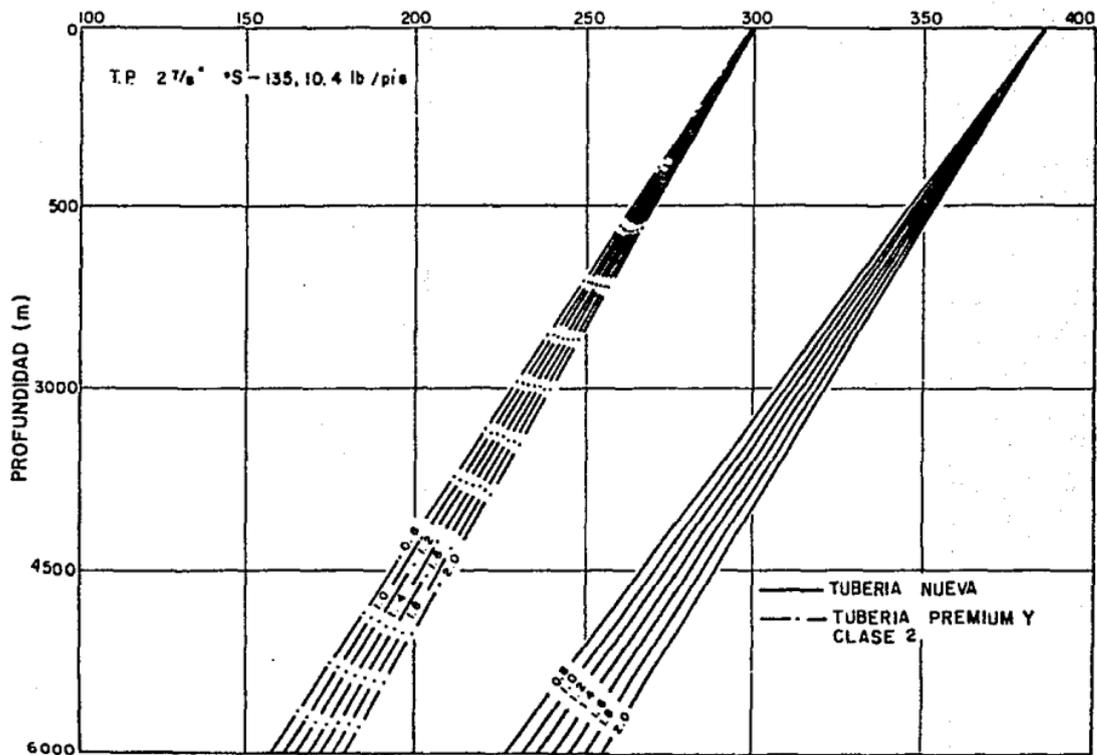
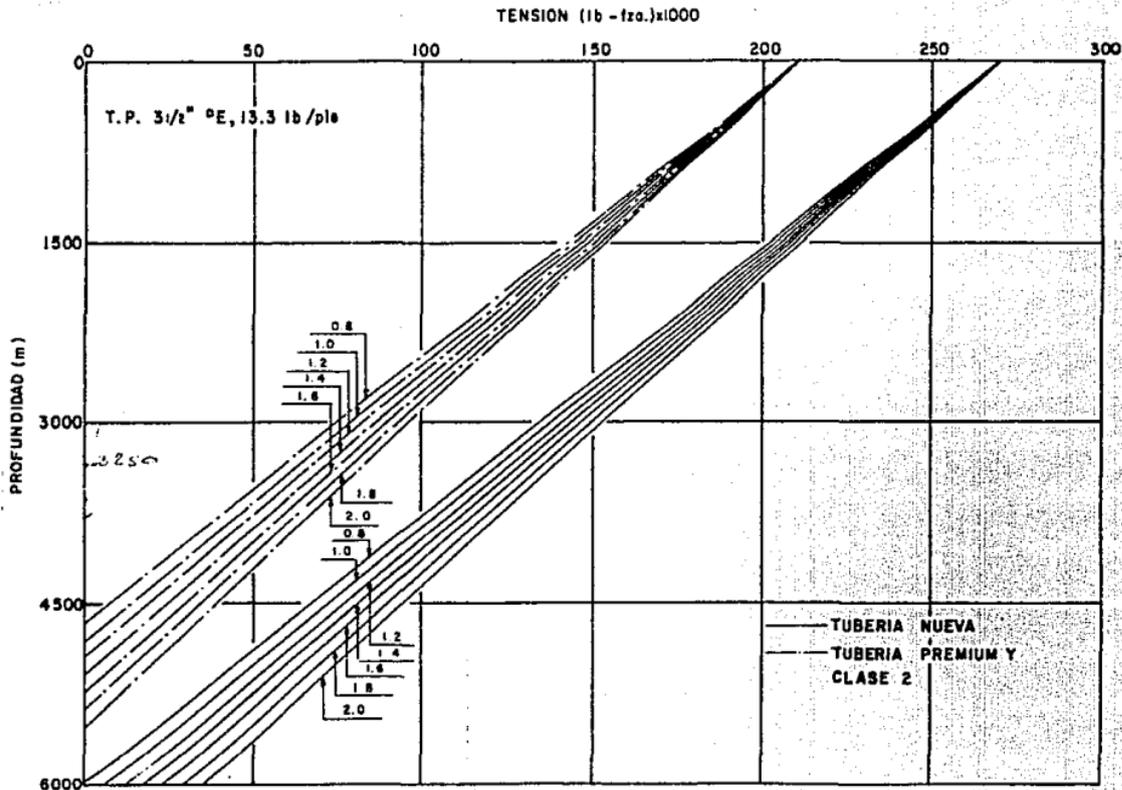


Figura 137.

Figura 13B.



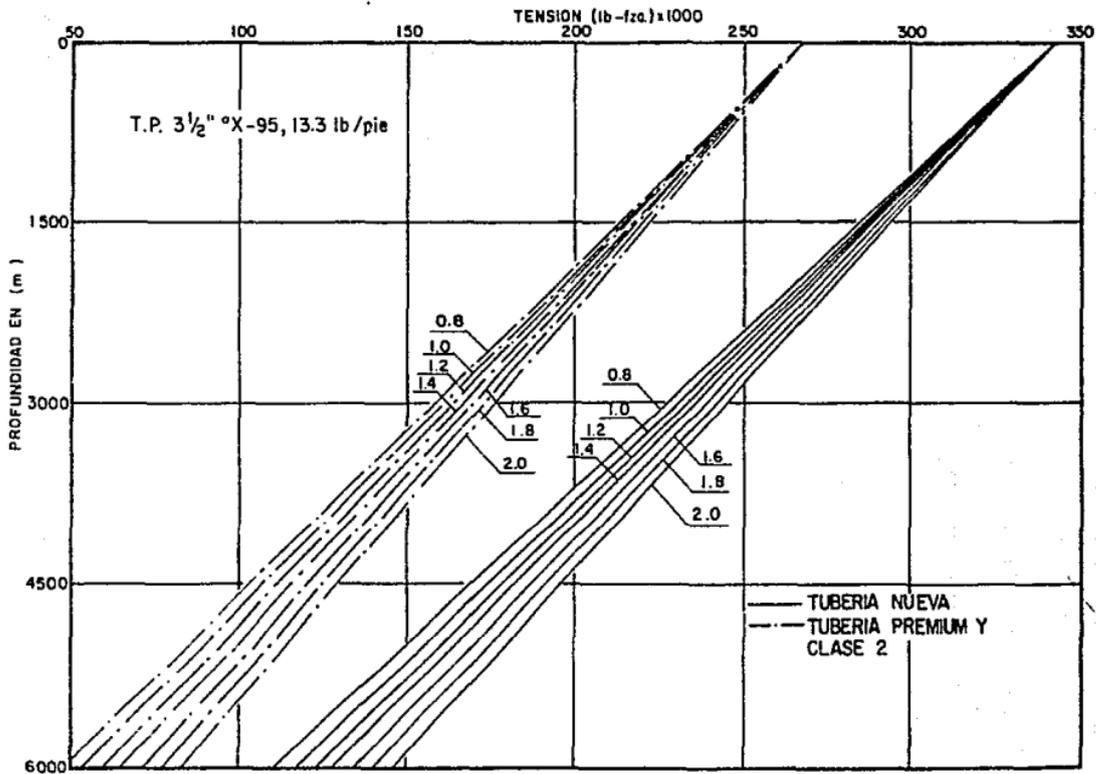


Figura 139.

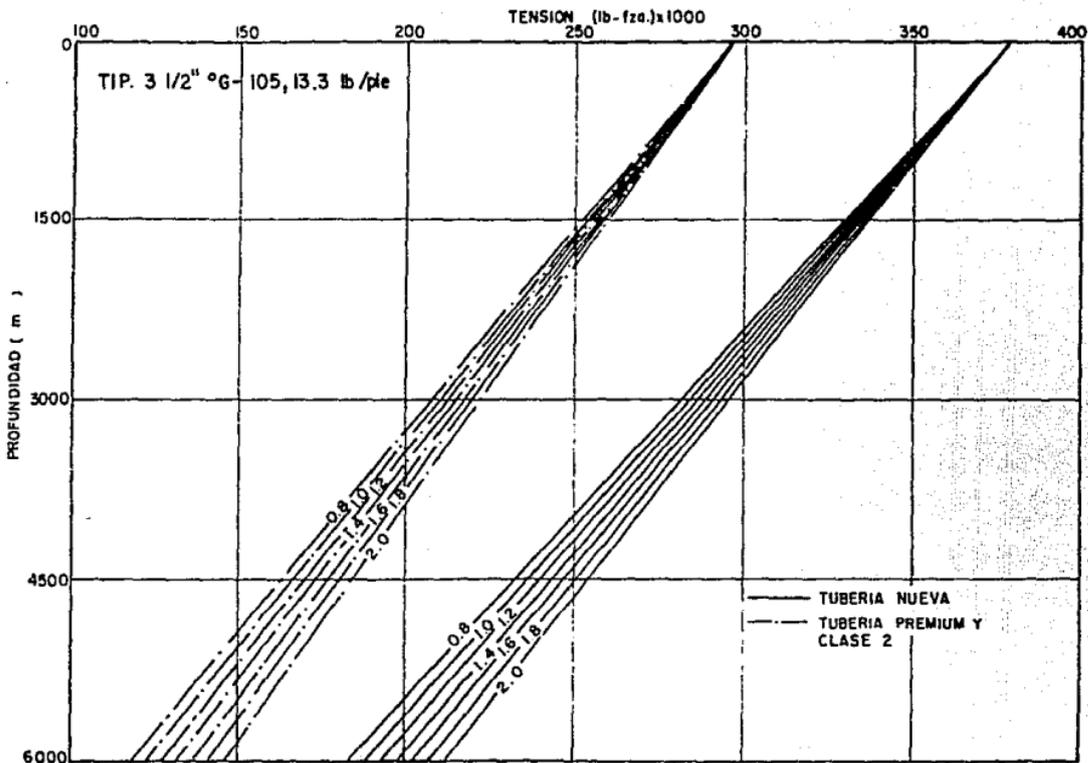


FIGURA 140.

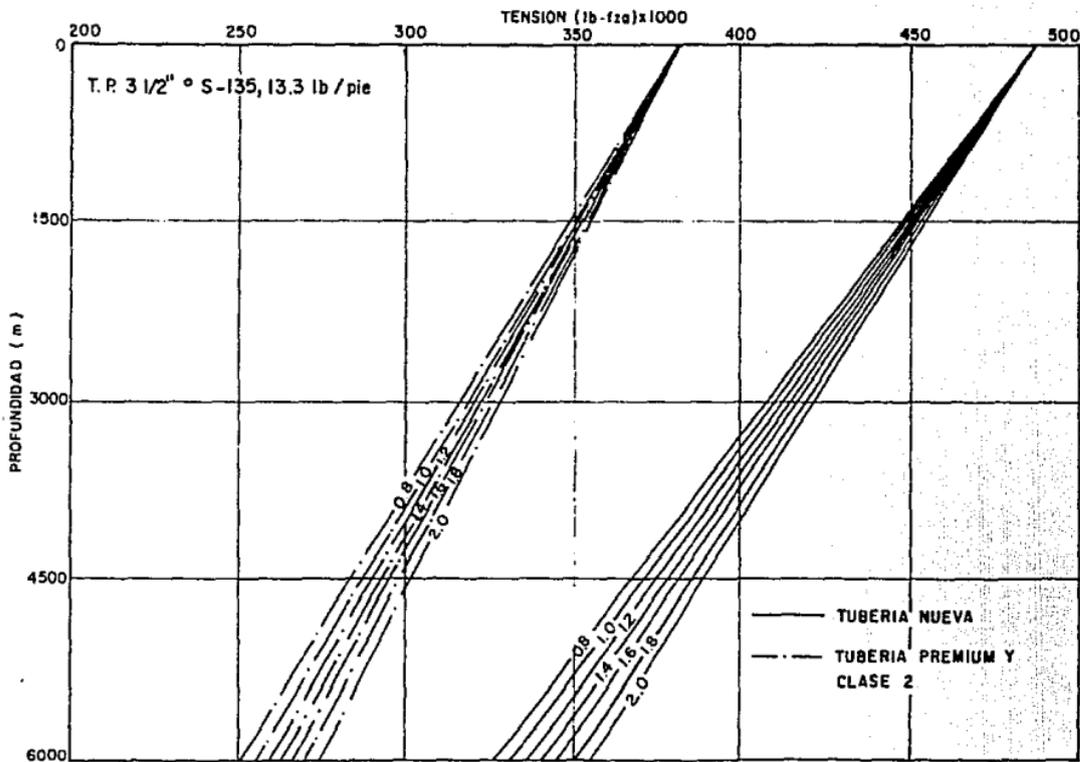


Figura 141.

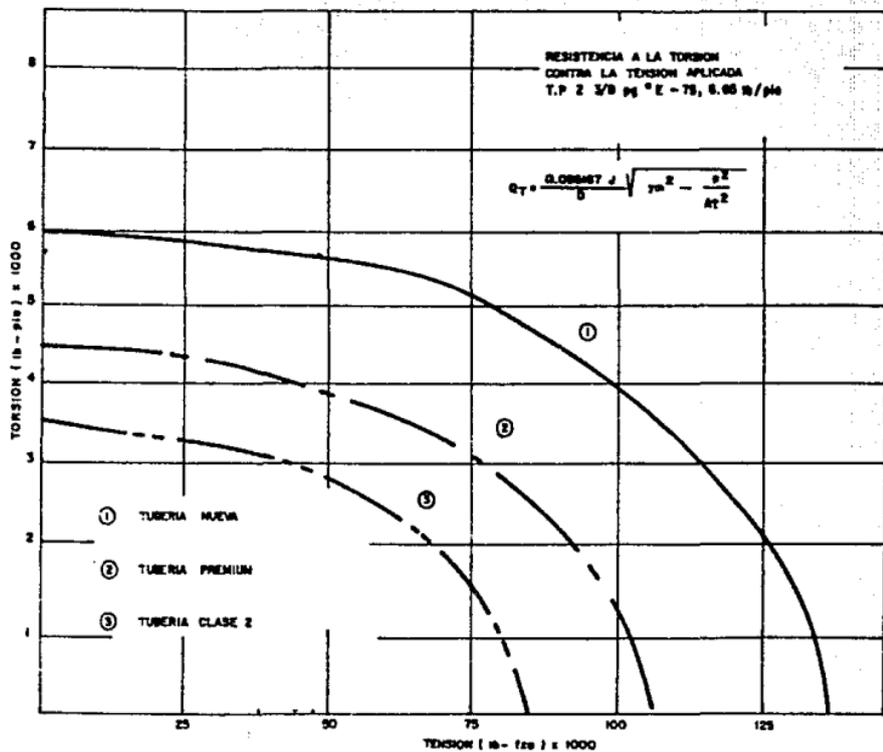


Figura 142.

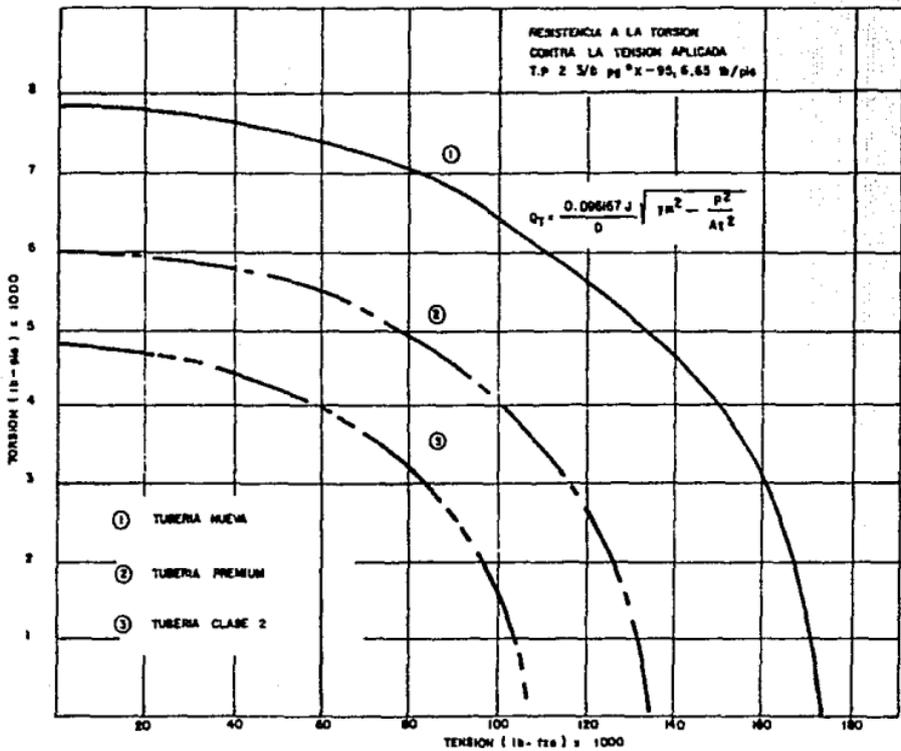


Figura 143.

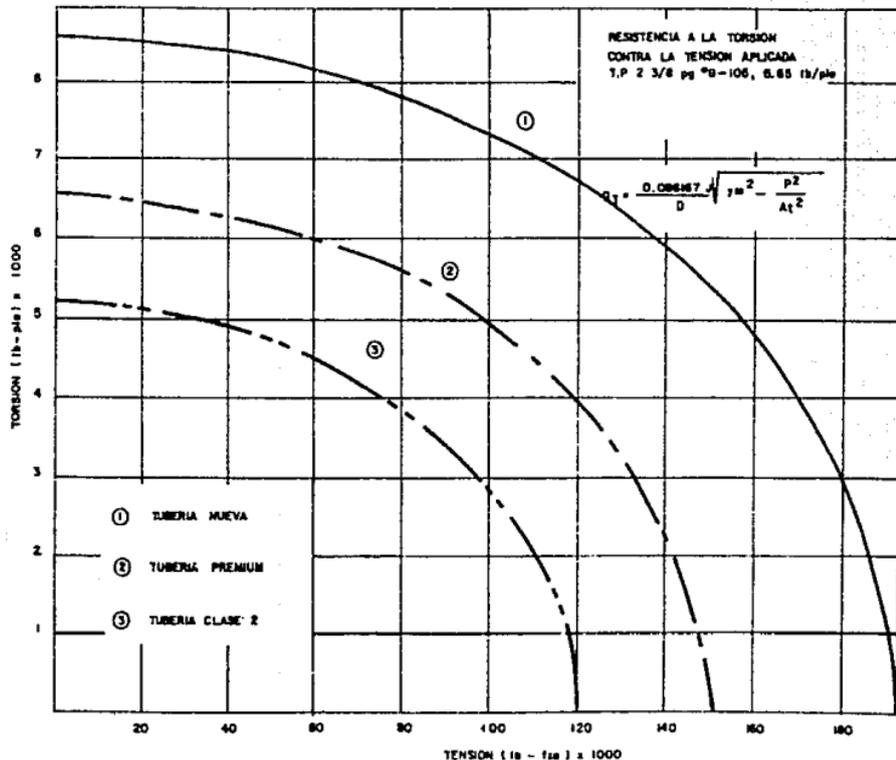


Figura 144.

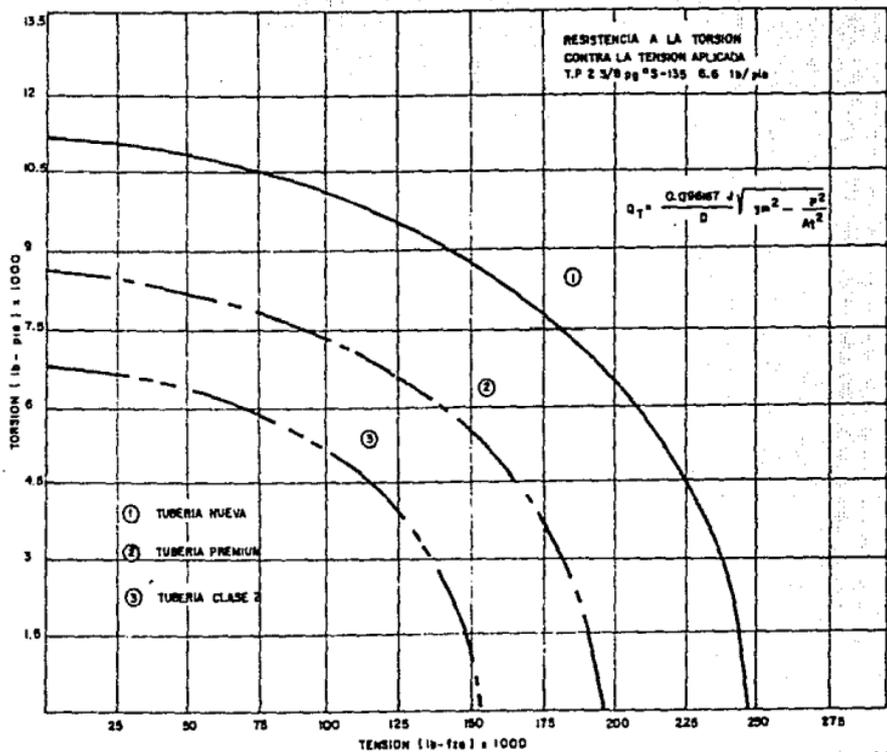


Figura 145.

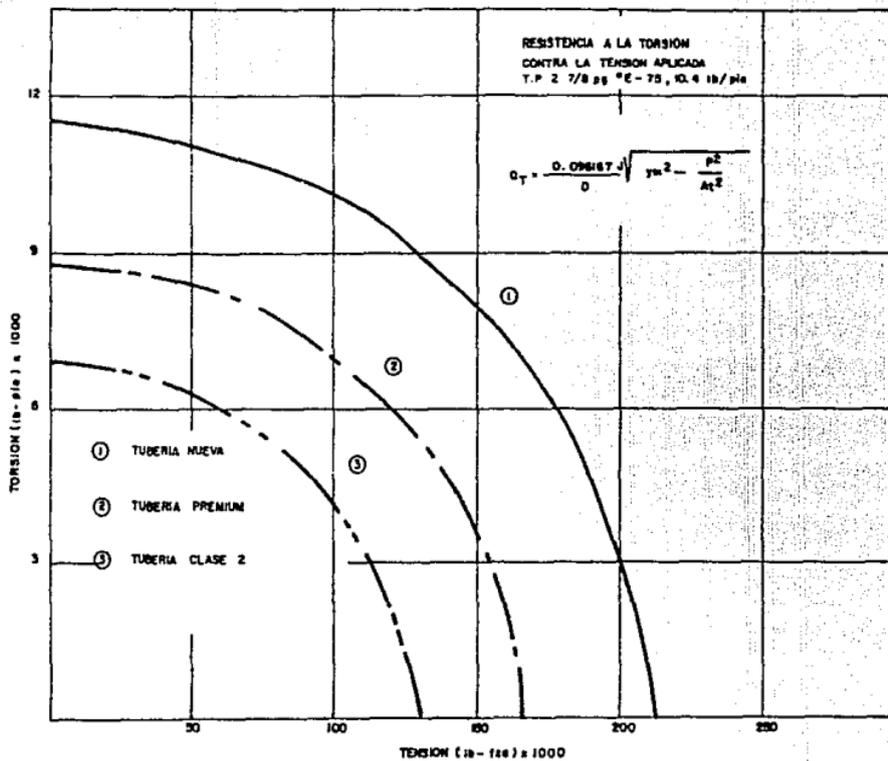


Figura 146.

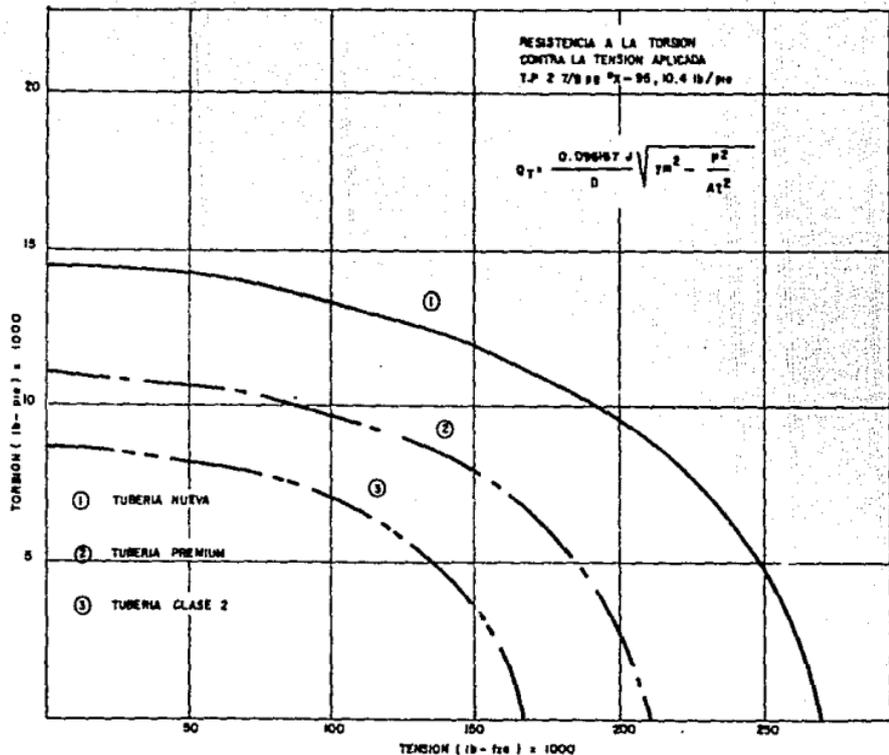


Figura 147.

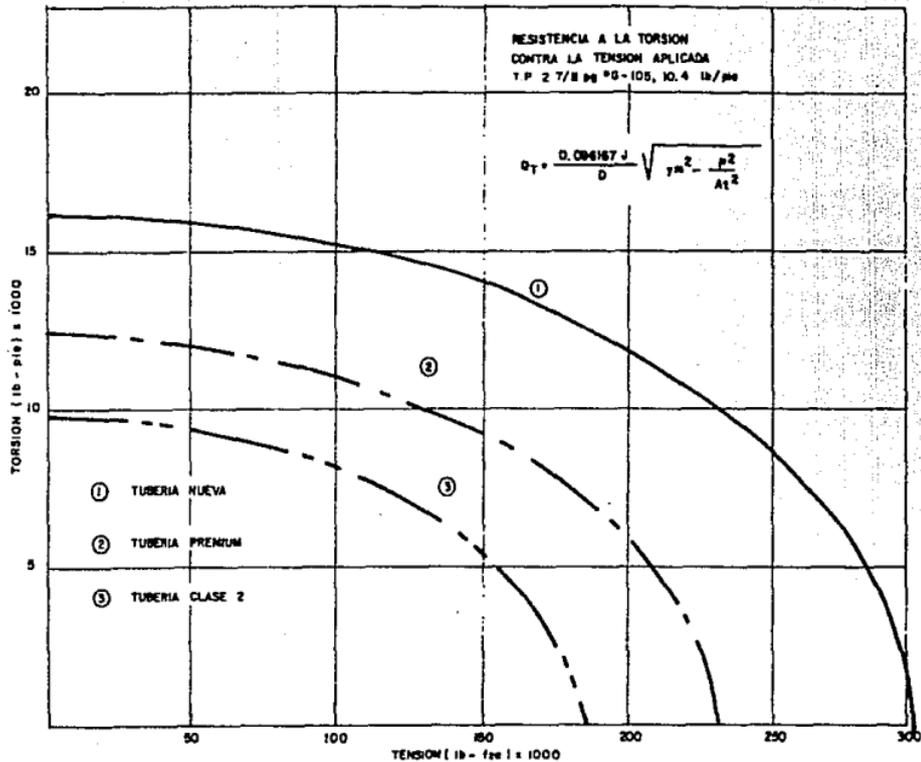


Figura 148.

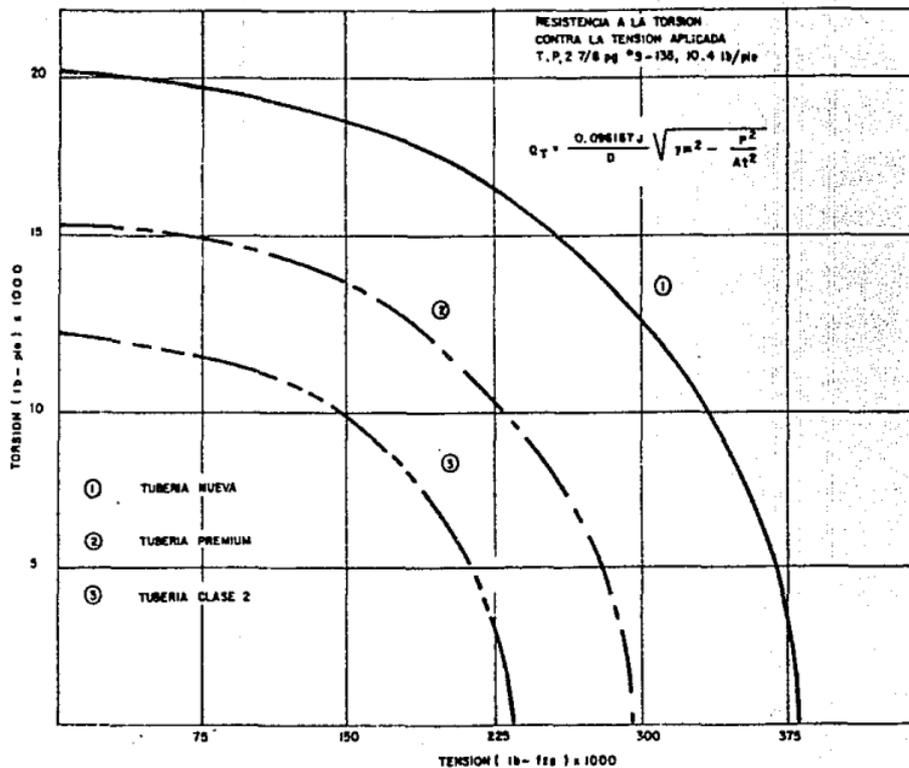


Figura 149.

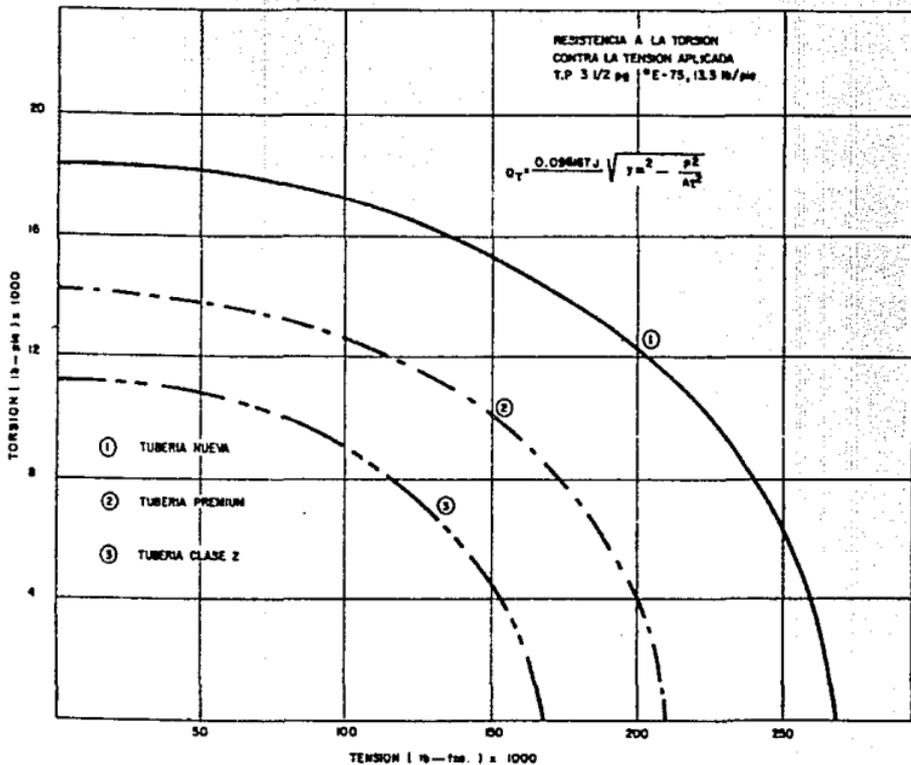


Figura 150.

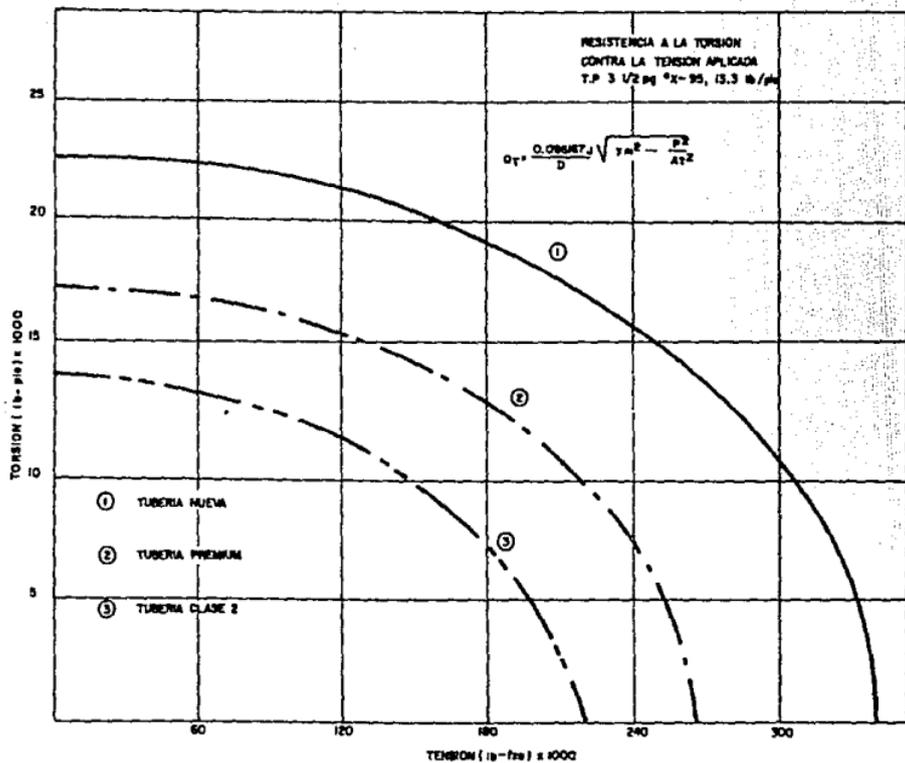


Figura 151.

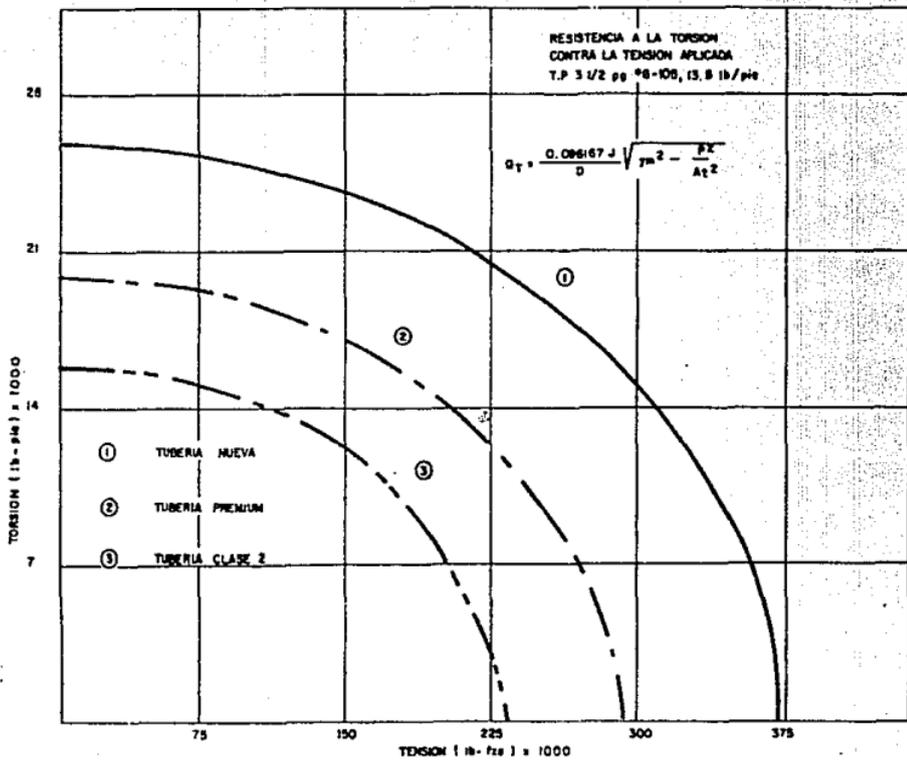


Figura 152.

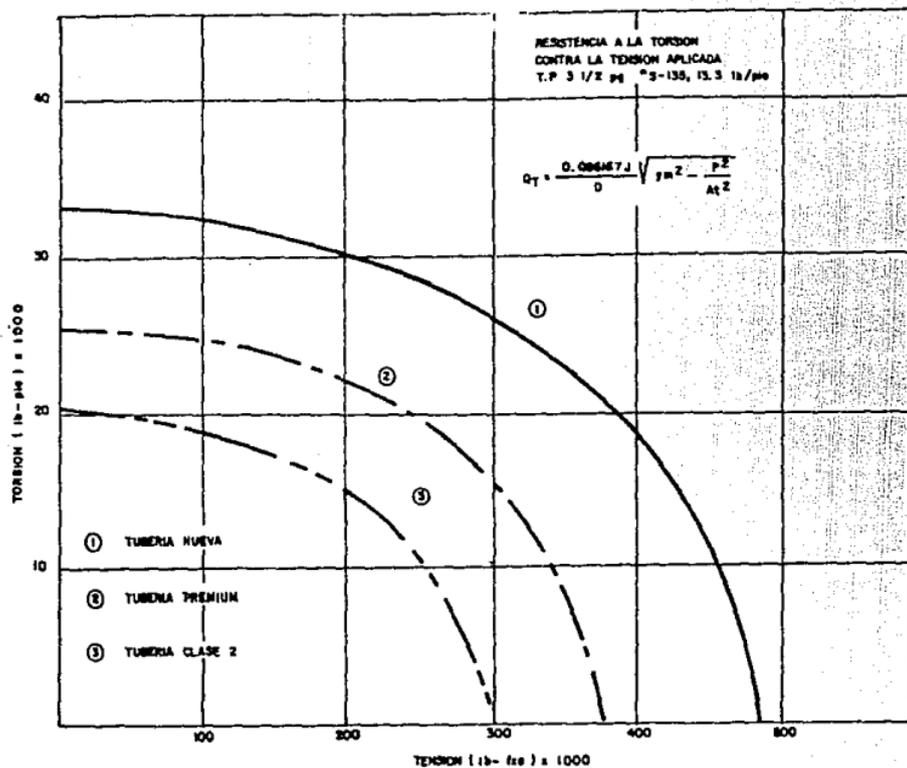


Figura 153.

## B I B L I O G R A F I A

- 1).- NEAL J. ADAMS. AND TOMMIE CHARRIER  
Drilling Eginieering.  
A Complete well Planning Approach.  
Research Associate.  
Penn Well Books.  
Penn Well Publishing Company  
Tulsa, Oklahoma 74101. 1985
  
- 2).- MANUAL DE OPERACION PARA BARRENAS TRICONICAS EN LA  
PERFORACION DE POZOS PETROLIFEROS  
Subdirección de Producción Primaria/Gerencia de  
Perforación (PETROLEOS MEXICANOS) México 1986.
  
- 3).- MANUAL DE HERRAMIENTAS ESPECIALES NIVEL 2.  
Gerencia de Reparación y Terminación de pozos.  
Programa Nacional de capacitación Profesional.  
Por el Ing. José de León Mojarro e Ing. Rafael Viñas  
Rodríguez. Asesoramiento y revisión técnica  
Ing. Rodolfo Mendivil Salgado. PEMEX - IMP.. 1985.

## 4).- REPARACION DE POZOS II NIVEL 3.

Gerencia de Reparación y Terminación de Pozos.

Programa Nacional de Capacitación.

Por el Ing. José de León Mojarro e Ing. Rafael Viñas

Rodríguez. Asesoramiento y revisión técnica

Ing. Rodolfo Mendivil Salgado. PEMEX - IMP.. 1985.