

T
628.15
9195



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA



BIBLIOTECA

“Diseño de Tubería de Revestimiento”

PROYECTO DE GRADO

**Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERO EN PETROLEO**

Presentado por:

Sergio Estuardo Gandara Marroquín

Guayaquil, Ecuador

1990

AGRADECIMIENTO

Hago público mi agradecimiento al Gobierno de Guatemala por la oportunidad que se me brindó para obtener el Título mediante una beca de estudios en Ecuador.

AL ING. DANIEL TAPIA F. Director del Tópico, por su ayuda y colaboración en la elaboración de este trabajo.


A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, en especial a la Facultad de Ingeniería de Ciencias de la Tierra, por los conocimientos que me inculcaron, y a la postre fueron la base para el desarrollo y conclusión de mi carrera.

A mis compañeros de estudio.


DEDICATORIA

A MIS PADRES


A MIS HERMANOS



.....
Ing. Daniel Tapia F.
DIRECTOR DE TOPICO



.....
Ing. José Cabezas
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

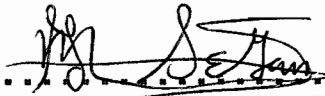


.....
Ing. Francisco Andrade
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este trabajo, me corresponde exclusivamente, y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)



.....
SERGIO ESTUARDO GANDARA MARROQUIN



BIBLIOTECA



INDICE GENERAL

	<u>Faq.</u>
INDICE GENERAL	VI
INDICE DE ABREVIATURAS	VIII
INDICE DE FIGURAS	X
INTRODUCCION	11
I. FUNDAMENTOS TEORICOS	12
1.1. Funciones de la Tubería de Revestimiento	12
1.2. Tipos de Columnas de Revestimiento	13
1.3. Diseño del Programa de Revestimiento	16
1.3.1. Esfuerzo a la Tensión	16
1.3.2. Esfuerzo al Colapso	18
1.3.3. Esfuerzo al Estallido	20
1.4. Características de la Tubería	22
1.4.1. Grado de Acero	22
1.4.2. Longitud y Diámetro	23
1.4.3. Peso por Pie	23
1.4.4. Resistencia de la Tubería	23
1.4.5. Efecto Combinado de la Resistencia	23
1.5. Parámetros y Factores de Diseño	25
1.5.1. Efecto de Flotación	27

	<u>Pag.</u>
II. DISEÑO DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO	28
2.1. EJEMPLO # 1	28
a) Diseño de Tubería de Revestimiento Superficial	29
b) Diseño de Tubería de Revestimiento de Producción	36
c) Diseño Gráfico	44
2.2. EJEMPLO # 2	52
a) Diseño de Tubería de Revestimiento Superficial	53
b) Diseño de Tubería de Revestimiento de Producción	59
2.3. EJEMPLO # 3	61
a) Diseño de Tubería de Revestimiento Superficial	63
b) Diseño de Tubería de Revestimiento de Producción	65
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
APENDICES	72
BIBLIOGRAFIA	83

INDICE DE ABREVIATURAS

API.	:	Instituto Americano de Petr6leo
d.	:	Densidad del Fluido de Perforaci6n
Dcd.	:	Profundidad Calculada
Dsd.	:	Profundidad Base para Iniciar el Ensayo
DDcd., DDsd.	:	Diferencia de Profundidades
E.	:	Esfuerzo
FF.	:	Factor de Flotaci6n
Fig.	:	Figura
Gc.	:	Gradiente al Colapso
h.	:	Profundidad Total
L.	:	Longitud Total
L'.	:	Longitud de cada Tubo
Lbs.	:	Libras
Long.	:	Longitud
lppc.	:	Libras por Pulgada Cuadrada
n.	:	N6mero de Tubos
OD.	:	Di6metro Externo
Pc.	:	Presi6n al Colapso
Pe.	:	Presi6n al Estallido
Pf.	:	Presi6n de la Formaci6n
Ph.	:	Presi6n Hidrost6tica
pulg.	:	Pulgada
pulg ² .	:	Pulgadas Cuadradas
R.	:	Relaci6n de Esfuerzos

- Recp. : Resistencia Efectiva al Colapso
- T.unión : Tensión Soportada por la Unión de dos
Tuberías
- Wtr. : Peso Total de la Tubería
- wtr. : Peso por Pie de Tubería



INDICE DE FIGURAS

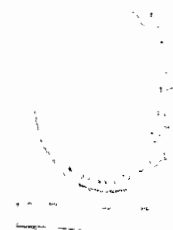
<u>NO</u>		<u>Pag.</u>
1	DIBUJO ESQUEMATICO DE LAS COLUMNAS UTILIZADAS EN EL REVESTIMIENTO DE UN POZO	14
2	DETALLE DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO	15
3	ACTUACION DE LOS DIFERENTES ESFUERZOS EN LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO	19
4	DISTRIBUCION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO EN UN POZO DE 11500 PIES. TUBERIA N-80 DE 7 PULGADAS	21
5	COMBINACION DE ESFUERZOS APLICADOS A LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO. ELIPSE DE LOS ESFUERZOS BI-AXIALES	24
6	VARIACION DE LA RESISTENCIA AL COLAPSO CON LA TENSION APLICADA	26
7	VARIACION DEL COLAPSO CON LA TENSION PARA TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 7 PULGADAS	46
8	VARIACION DEL COLAPSO CON LA TENSION PARA TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 5 PULGADAS	47
9	RESISTENCIA MINIMA AL COLAPSO COMO FUNCION DE LA RELACION DIAMETRO EXTERNO - ESPESOR DE LA PARED	69

INTRODUCCION

El siguiente estudio dá una explicación clara, fácil y ordenada del procedimiento a seguir para diseñar Tubería de Revestimiento, y encontrar las profundidades a las cuales va a asentarse y cementarse. Dicha explicación se realiza en base a dos métodos: Diseño por Ensayo y Error, y Diseño Gráfico.

La importancia de seleccionar apropiadamente las profundidades para asentar la Tubería de Revestimiento será enfatizada, ya que muchos pozos tiene fallas de tipo económico o ingenieriles; porque el programa de Revestimiento especifica profundidades muy someras o muy profundas.

Aplicando unos cuantos principios básicos de perforación combinados con un conocimiento de las condiciones geológicas en el área, pueden ayudar a determinar dónde deben asentarse las sartas de Tubería de Revestimiento para asegurar que la perforación puede hacerse con mínimas dificultades.



CAPITULO 1

FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 FUNCIONES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO EN LOS POZOS

- a) Soporta las paredes del pozo y detiene las tendencias de derrumbes de las formaciones no consolidadas.
- b) Evitar contaminación de agua superficial.
- c) Evita el escape de los fluidos de la formación a través del pozo de un estrato a otro.
- d) Sirve de punto de apoyo del equipo de trabajo.
- e) En la superficie, el Revestimiento constituye un medio para afianzar una válvula de control con la cual se puede regular el flujo de petróleo y gas y controlar la presión dentro del pozo (permite la facilidad de producción).

El costo del Revestimiento es generalmente el mayor de las partidas de gastos en el costo de un pozo de

petróleo o gas, por lo tanto hay que prestarle mucha atención a su diseño.

1.2 TIPOS DE COLUMNAS DE REVESTIMIENTO

El número de sartas de revestimiento que pueden introducirse en un pozo depende de las presiones que se esperan en el subsuelo. Generalmente se usan de dos a tres tipos de revestimiento mas un tubo protector en la parte mas superficial. Estas tuberías se les conoce como:

- a) Tubo Conductor o Protector
- b) Revestimiento Superficial
- c) Revestimiento Intermedio
- d) Revestimiento de Producción

En la Fig. 1 se muestra un dibujo esquemático de columnas utilizadas en el revestimiento de un pozo en un yacimiento; en la Fig. 2 se muestra un detalle del mismo. Sin embargo, la configuración física definitiva de un pozo depende de muchos factores que se tomarán en cuenta inmediatamente después de ser perforado y evaluado el pozo.

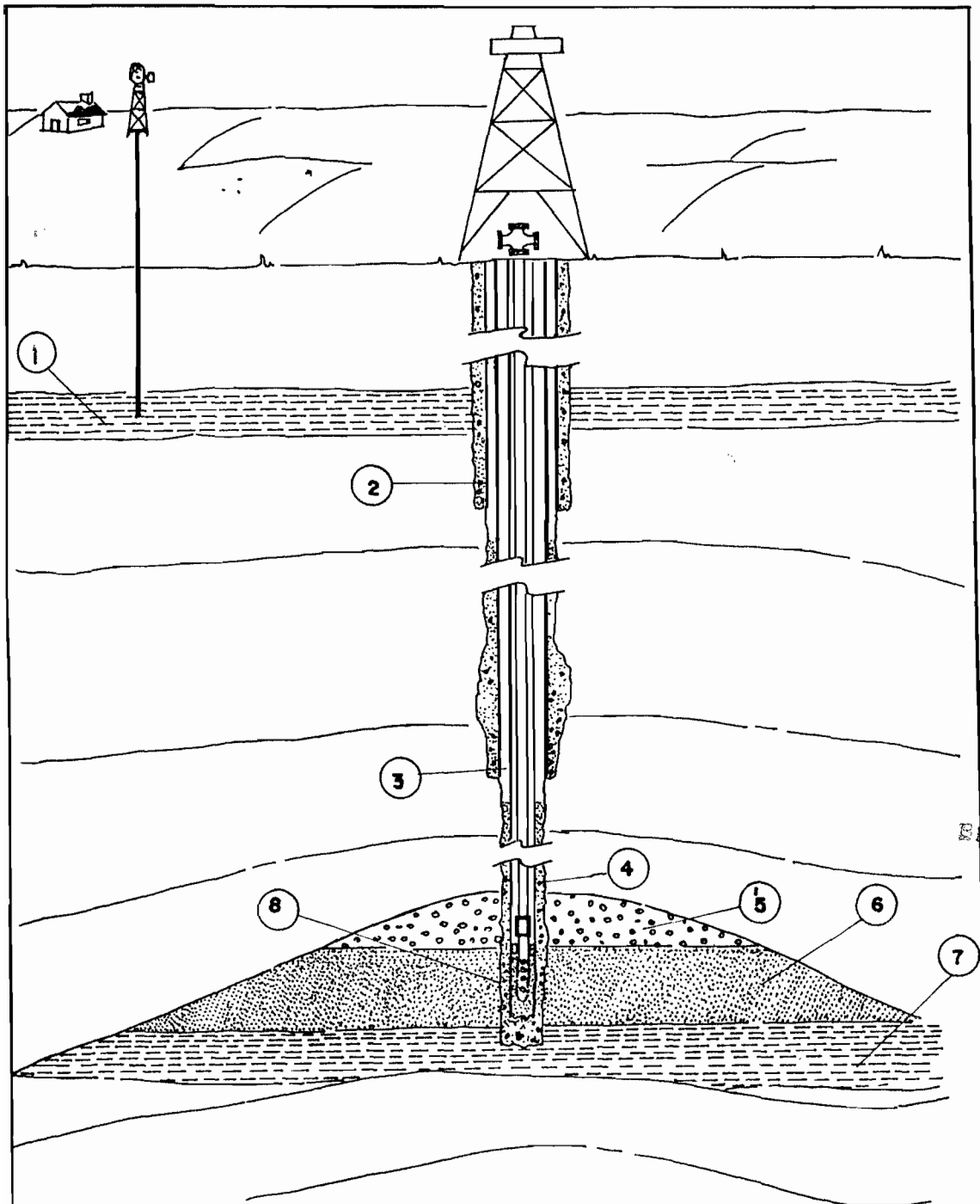


FIG. I DIBUJO ESQUEMATICO DE COLUMNAS TIPICAS DE CASING EN UN POZO.

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1. Abastecimiento de agua dulce | 6. Petróleo crudo en el yacimiento |
| 2. Casing de la superficie cementado | 7. Agua salada en el yacimiento |
| 3. Casing intermedio cementado | 8. Perforaciones en el casin de producción y en el cemento que lo rodea. |
| 4. Casing de producción cementado | |
| 5. Gas natural en el yacimiento | |

(Tomada de Fundamentos de Perforación Tomo 1)

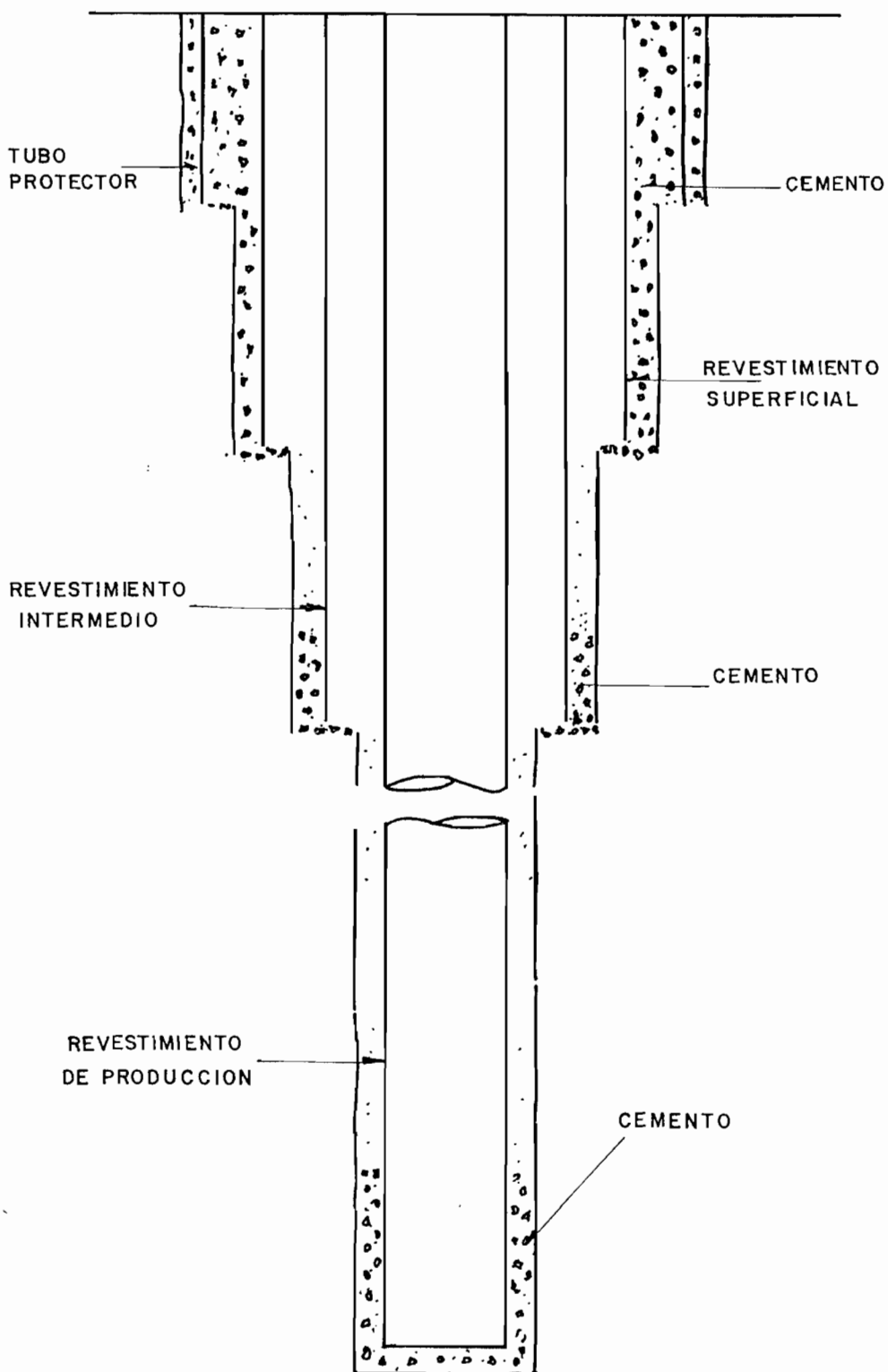


FIG. 2 DETALLE DE REVESTIMIENTOS COLOCADOS EN UN POZO PETROLERO.

(Tomado de Metodología para ,Analizar y Resolver Problemas de Perforacion)

1.3 DISEÑO DEL PROGRAMA DE REVESTIMIENTO

La columna de revestimiento más económica es la más ligera de peso, que pueda resistir los esfuerzos que se ejercen sobre ella.

Para diseñar tubería de revestimiento deben conocerse los esfuerzos a la cual estará sometida y las diferentes características del tipo de tubería a usarse.

Al introducir una tubería en el hueco, estará sometida simultáneamente a tres esfuerzos principales, los cuales son:

- a) Esfuerzo a la Tensión
- b) Esfuerzo al Colapso
- c) Esfuerzo al Estallido

Analizando cada esfuerzo como si actuara independientemente.

1.3.1 Esfuerzo a la Tensión

Estará originado por su propio peso. Si llamamos: w_{tr} al peso/pie de tubería, W_{tr} al peso total y L a la longitud, tenemos:

$$W_{tr} = w_{tr} \times L \quad (1)$$

Si "n" es el número de tubos que componen toda la tubería y L' la longitud de cada tubo, tenemos:

$$W_{tr} = n \times w_{tr} \times L' \quad (2)$$

El primer tubo, contando de la superficie hacia abajo, soportará el peso de los n-1 tubos más su propio peso. La unión del primer y segundo tubo estará sometida al peso de los n-1 tubos y así la unión del quinto con el sexto tubo estará sometida al peso de los n-5 tubos que tiene colgando. La última unión estará sometida solamente al peso del último tubo.

$$T_{unión} = (n-1) \times W_{tr} \times L' \quad (3)$$

Esto indica que la tensión decrece con la profundidad (Fig. 3a), o sea que en la superficie se originará la mayor tensión y en el fondo es nula.

Esto significa que en la superficie debe estar el mejor tipo de tubería, para que pueda resistir todo el peso de la misma, y a medida que se va profundizando, se puede ir utilizando tipos de tubería de menor calidad de acero,

siempre y cuando resistan la tensión de la tubería que esta por debajo. Esto hace más económico el diseño.

1.3.2 Esfuerzo al Colapso

Las presiones externas estan originadas por la presión hidrostática del fluido en el pozo y actúan sobre la tubería tratando de colapsarla (Fig. 3b).

La Presión Hidrostática actúa sobre toda la pared de la tubería. Para el diseño se supone que la tubería esta completamente vacía, por consiguiente la última oposición a estos esfuerzos es la resistencia de la tubería. A estos esfuerzos se les llaman esfuerzos al colapso, ya que tratan de aplastar la tubería y como es función de la Presión Hidrostática del fluido, dependerá entonces de la densidad del fluido y de la profundidad del pozo de acuerdo a la ecuación:

$$P_h = 0.052 \times d \times h \quad (4)$$

Manteniendo la densidad (d) constante, al introducir la tubería, la presión al colapso



BIBLIOTECA

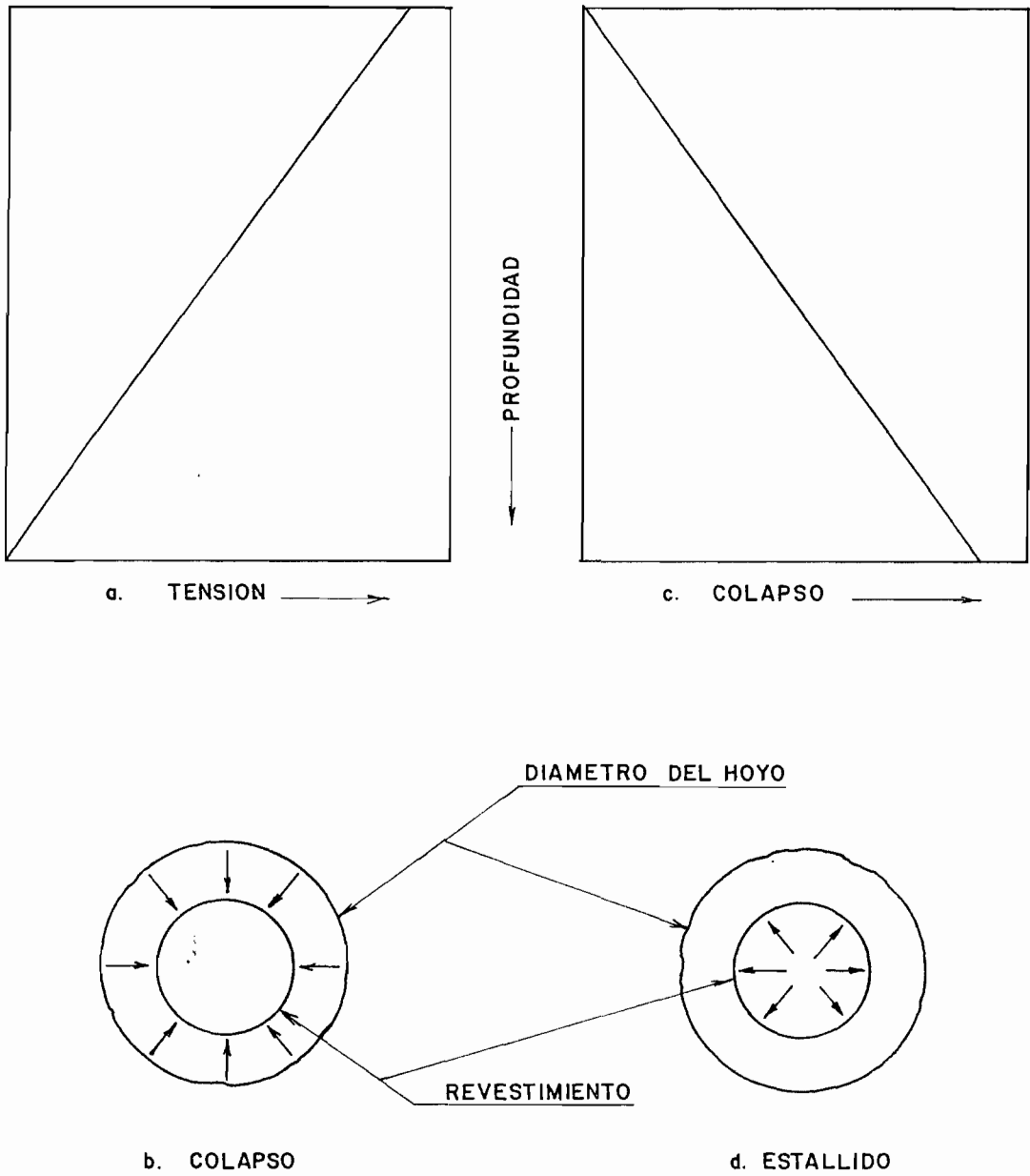


FIG. 3. ACTUACION DE LOS DIFERENTES ESFUERZOS EN LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.
 (Tomada de Metodología para Analizar y Resolver Problemas de Perforación)

dependerá de la profundidad y aumentará con ella.

Se observa entonces, que en el fondo del pozo se requiere un tipo de tubería que resista la presión máxima al colapso que se espera en el fondo (Fig. 3c). A medida que se va del fondo a la superficie, la presión al colapso va decreciendo y se puede entonces usar tubería de menor calidad de acero lo que hace más económico el diseño.

Si se superponen las figuras de tensión y colapso (Fig.3a y 3c), se puede ver que al iniciar la selección de la tubería, se debe seleccionar por colapso e ir decreciendo en calidad de acero, hasta que el colapso deje de tener efecto y se continúa la selección por tensión, usando tubería que vaya creciendo gradualmente en calidad de acero hasta usar en la superficie la que resista por tensión (Fig. 4).

1.3.3 Esfuerzo al Estallido

La Tubería de Revestimiento puede fallar por la aparición de presiones externas que actúan

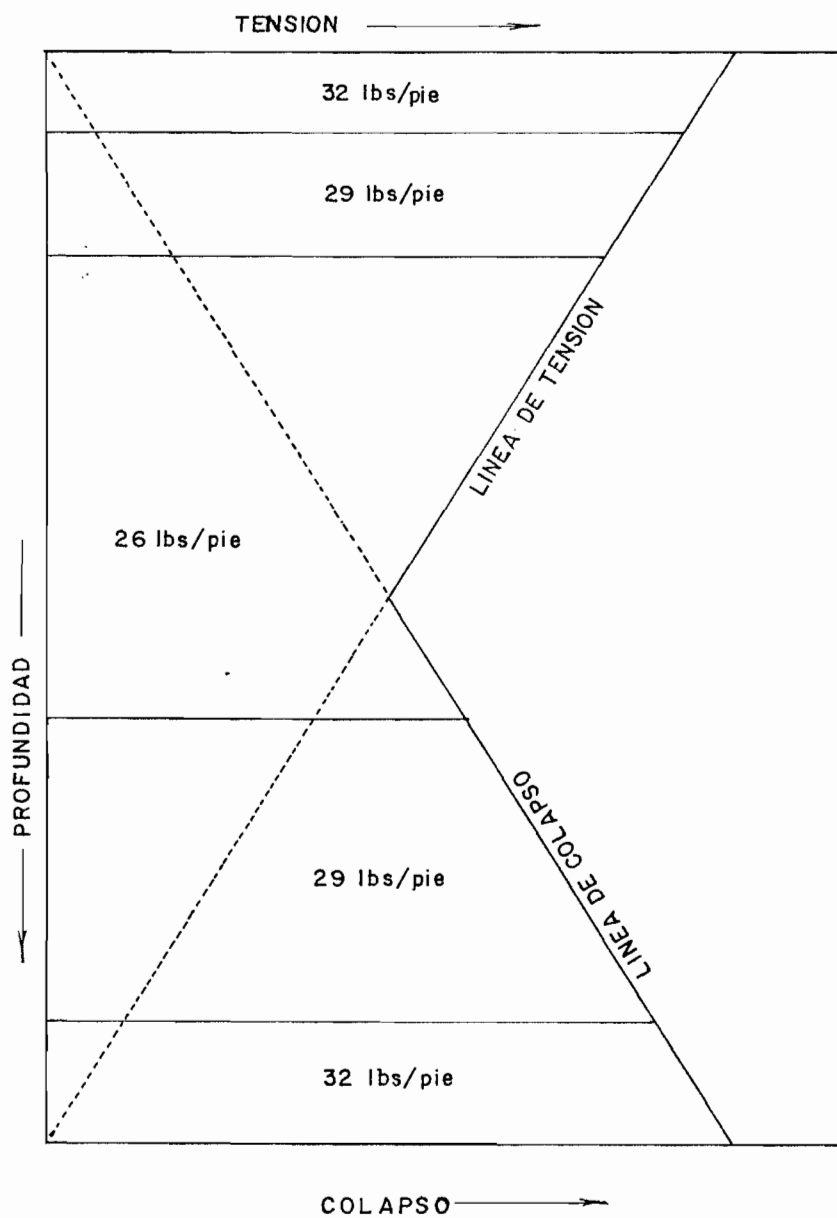


FIG. 4. DISTRIBUCION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO EN UN POZO DE 11500'. TUBERIA N-80 DE 7".

(FIG. 3a y 3c SUPERPUSTAS)

(Tomado de Metodología para Analizar y Resolver Problemas de Perforación)

del centro de la tubería hacia las paredes de la misma (Fig. 3d). Esta presión puede aparecer por un desbalance de presiones entre la Presión de la Formación y la Presión Hidrostática del fluido. Esto indica que la presión al estallido sería originada por la Presión de la Formación y su efecto sería mayor en la superficie por ser nula en ese punto la Presión Hidrostática. Para que el estallido se produzca, la presión al estallido debe ser:

$$P_e > P_h + \text{resist. al estallido de la tubería}$$

1.4 CARACTERISRICAS DE LA TUBERIA

El revestimiento lo constituyen tubos sin costura fabricados con acero de la más alta calidad y bajo estrictas recomendaciones del Instituto Americano de Petróleo (API). Entre las características encontramos:

1.4.1 Grado de Acero

H-40, J-55, K-55, N-80, etc.

Letra = Tipo de Acero.

Número = Punto Mínimo Cedente de la Tubería en miles de lbs/pulg².

1.4.2 Longitud y Diámetro

Se agrupan en tres rangos según su longitud:

Rango I: de 16 hasta 25 pies.

Rango II: de 25 hasta 34 pies.

Rango III: de 34 pies en adelante.

El diámetro varía de 4 1/2 pulg. hasta 20 pulg. de diámetro externo con un total de 14 diámetros diferentes.

1.4.3 Peso por Pie

Peso de la tubería por cada pie de longitud.

1.4.4 Resistencia de la Tubería

De la tabla 1 a la 4, se muestran las resistencias a los diferentes esfuerzos a que son sometidas las Tuberías de Revestimiento.

1.4.5 Efecto Combinado de la Resistencia

Existe una relación de variación de la resistencia cuando actúan combinadas, representada por una elipse llamada "ELIPSE DE LOS ESFUERZOS BI-AXIALES" (Fig. 5).

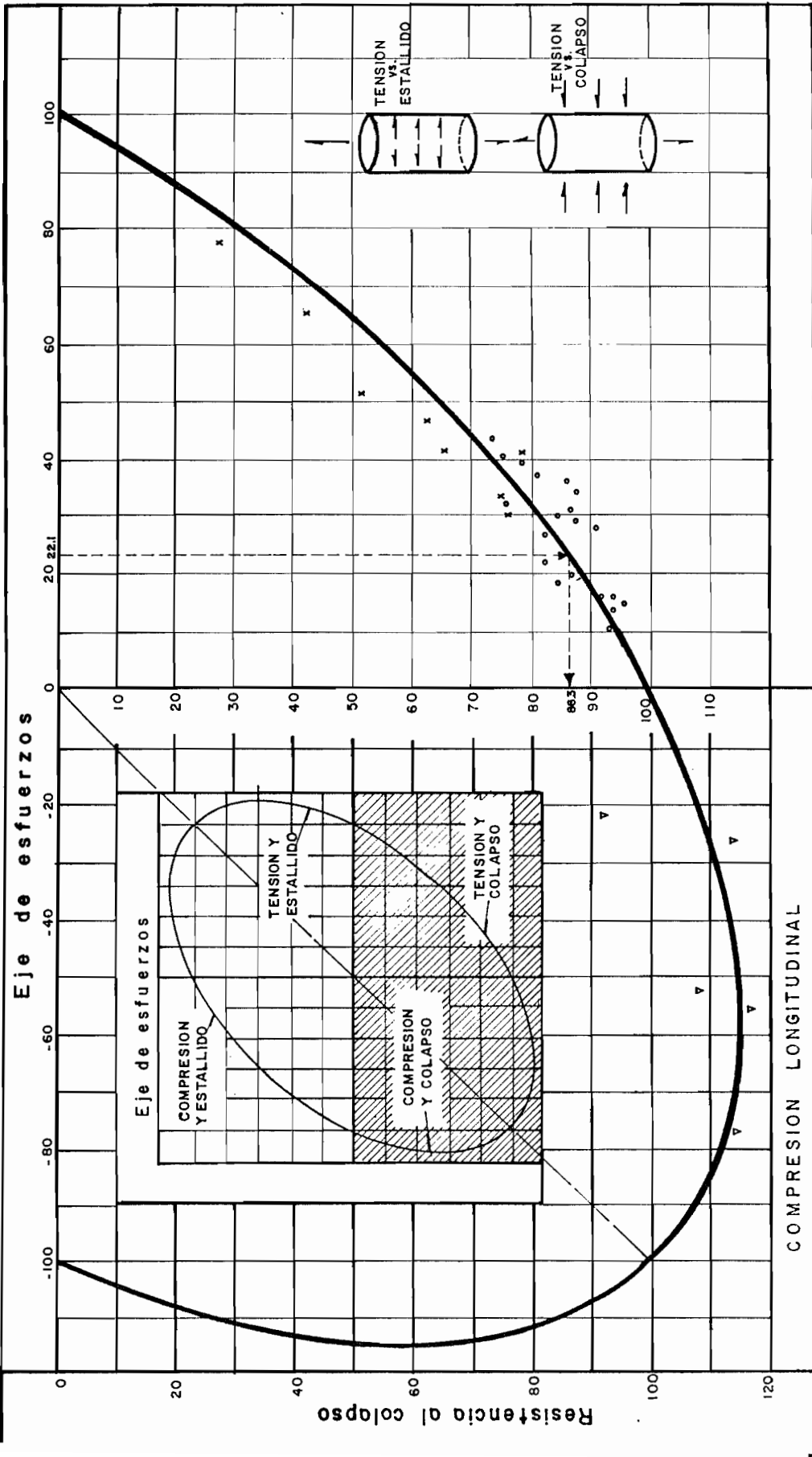


FIG. 5 :- COMBINACION DE ESFUERZOS APLICADOS A LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO
 (Tomado de Ingeniería de Producción de Petróleo)



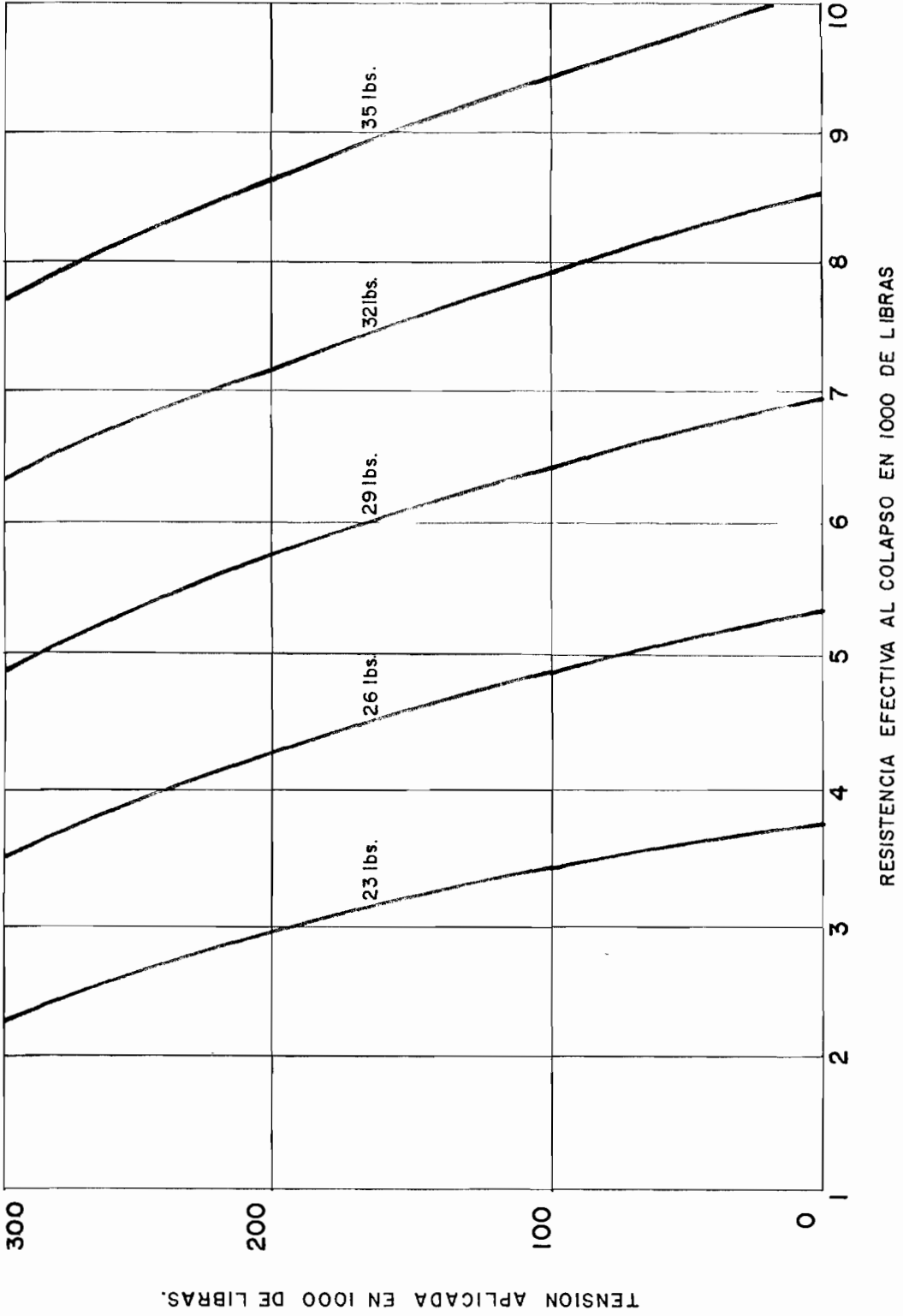
Para los efectos de diseño de Tubería de Revestimiento es de mucha importancia la porción que relaciona la tensión al colapso. La Fig. 6 muestra como varía la resistencia al colapso cuando tiene aplicada una tensión. La tabla 5 muestra el porcentaje efectivo de la resistencia original al colapso, cuando tiene aplicada una tensión.

1.5 PARAMETROS Y FACTORES DE DISEÑO

Para diseñar una Tubería de Revestimiento debe tenerse pleno conocimiento de los parámetros establecidos para el diseño y de los factores usados como medida de seguridad. Cualquier parámetro que escape del conocimiento del ingeniero puede influir negativamente en el diseño.

Los principales parámetros son:

- Profundidad del Pozo
- Diámetro de Tubería
- Densidad de Fluido
- Presión de Formación
- Disponibilidad de Tubería
- Longitud Mínima de Secciones
- Número Mínimo de Secciones



(Tomado de la Metodología para Analizar y Resolver Problemas de Perforación)

FIG. 6. VARIACION DE LA RESISTENCIA AL COLAPSO CON LA TENSION APLICADA (TUBERIA N-80 DE 7")

Los factores de diseño, conocidos como factores de seguridad, varían según el área y el criterio del diseñador. Lo que se debe tener siempre en mente es que por lo menos el diseño sea seguro. El rango de valores usados en la industria como factores de diseño son:

Para tensión de 1.6 a 2.0

Para colapso de 1.1 a 1.33

Para estallido de 1.0 a 1.25

Usar un factor para la tensión de 2.0 previene al diseñador de cualquier esfuerzo de tensión que se presenta en el momento de introducir la Tubería de Revestimiento.

1.5.1 Efecto de Flotación

Cuando se diseña por tensión, basado en el peso de la tubería en el aire, se desprecia el efecto de la flotación que ayuda con el peso de la tubería. La flotación reduce el peso de la tubería en un 15 al 17 %, por consiguiente cualquier factor de diseño no es real, sin embargo, es más seguro. El factor de flotación está dado por:

$$F.F. = 1 - 0.015 \times \text{densidad del fluido}$$

CAPITULO 2

DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO

2.1 EJEMPLO # 1

Hacer diseño de Revestimiento Superficial y de Producción.

POZO CARABOBO 3

Localización: Oriente Ecuatoriano.

El gradiente de presión de la formación en el área es de 0.465 (lbs/pulg²)/pie (gradiente normal).

Se utilizan los siguientes factores de diseño (asumidos):

Estallido = 1.0

Colapso = 1.125

Tensión = 2.0

Los datos del pozo para poder introducir ambas tuberías son:

a) Para Revestimiento Superficial:

Densidad del Fluido = 9,5 lbs/gal.

Diámetro Externo = 10.75 pulg.
 Profundidad = 2997.4 pies.
 Se dispone de Tubería J-55 y H-40.

b) Para Revestimiento de Producción:

Densidad del Fluido = 9.76 lbs/gal.
 Diámetro Externo = 7 pulg.
 Profundidad Total = 9380 pies.
 Se dispone de Tubería N-80.



BIBLIOTECA

PROCEDIMIENTO:

a) Diseño de Tubería de Revestimiento Superficial:

a.1 Determinar todos los factores que intervienen en el diseño.

a.1.1 Presión de la formación (Pf).

$$Pf = \text{gradiente de presión de formación} \times \text{profundidad}$$

$$Pf = 0.465(\text{lbs/pulg}^2)/\text{pie} \times 2997.4 \text{ pie}$$

$$Pf = 1394 \text{ lbs/pulg}^2$$

a.1.2 Presión Hidrostática (Ph).

$$Ph = 0.052 \times \text{densidad} \times \text{profundidad}$$

$$P_h = 0.052 \times 9.5 \text{ lbs/gal} \times 2997.4 \text{ pie}$$

$$P_h = 1481 \text{ lbs/pulg}^2$$

a.1.3 Presión al Colapso (P_c).

$$P_c = P_h \times \text{factor de diseño al colapso}$$

$$P_c = 1481 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.125$$

$$P_c = 1666 \text{ lbs/pulg}^2$$

a.1.4 Presión al Estallido (P_e).

$$P_e = P_f \times \text{factor diseño al estallido}$$

$$P_e = 1394 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.0$$

$$P_e = 1394 \text{ lbs/pulg}^2$$

a.1.5 Gradiente al Colapso (G_c).

$$G_c = P_c \div \text{profundidad}$$

$$G_c = [1666 \text{ (lbs/pulg}^2)] \div 2997.4 \text{ pies}$$

$$G_c = 0.556 \text{ (lbs/pulg}^2)/\text{pie}$$

a.2 Determinar en la tabla 3 que tipo de tubería resiste la Presión al Colapso. La tubería J-55 de 40.5 lbs/pie resiste 1730 lbs/pulg², por lo tanto, esta tubería se puede usar por colapso. Las tuberías de más peso se pueden usar por colapso también, pero la tubería más pesada es más costosa e influiría mucho en el

costo total del revestimiento.

- a.3 Determinar cuánto pesa la tubería si se fuera a introducir toda en el pozo.

$$W_{tr} = 40.5 \text{ lbs/pie} \times 2997.4 \text{ pies}$$

$$W_{tr} = 121395 \text{ lbs}$$

La tubería J-55 de 40.5 lbs/pie resiste por tensión 450000 lbs (tabla 3), y la resistencia de diseño a la tensión será:

$$\text{Resistencia a Tensión} \div \text{Factor Diseño a}$$

$$\text{Tensión} = 450000 \text{ lbs} \div 2.0 = 225000 \text{ lbs.}$$

Esto indica que la tubería seleccionada por colapso también resiste por tensión.

- a.4 Determinar hasta que profundidad se puede introducir tubería H-40 de 32.75 lbs/pie. Esta tubería tiene una resistencia al colapso de 880 lbs/pulg² (tabla 3), y tomando esta resistencia como referencia se supondrá una profundidad base para iniciar el ensayo de:

$$D_{sp} = \text{resistencia al colapso} \div G_c$$

$$D_{sp} = 880 \text{ lbs/pulg}^2 \div 0.556 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}/\text{pie}$$

$$D_{sp} = 1583 \text{ pies}$$

Usamos 1500 pies para iniciar el ensayo.

Si se supone que la tubería H-40 de 32.75 lbs/pie se puede introducir hasta 1500 pies, entonces la primera sección será:

J-55 de 40.5 lbs/pie desde 2997.4 hasta 1500 pies (1497.4 pies).

Los 1497.4 pies pesarán: $1497.4 \text{ pies} \times 40.5 \text{ lbs/pie} = 60645 \text{ lbs}$, este peso estará aplicado a la tubería H-40 de 32.75 lbs/pie, por lo tanto el esfuerzo (E) será:

$$E = \text{peso aplicado} \div \text{área plana}$$

$$E = 60645 \text{ lbs} \div 9.178 \text{ pulg}^2 \text{ (tabla 3)}$$

$$E = 6608 \text{ lbs/pulg}^2$$

La relación de esfuerzos (R) será:

$$R = E \div \text{Punto Mínimo Cedente}$$

$$R = 6608 \text{ lbs/pulg}^2 \div 40000 \text{ lbs/pulg}^2 \text{ (tabla 3)}$$

$$R = 0.165$$

De la Elipse de los Esfuerzos Bi-Axiales (tabla 5), para $R = 0.165$ se determina que la Resistencia Efectiva de la tubería es 90.6% del valor original, por lo tanto, la Resis-

tencia Efectiva (Recp) será:

$$\text{Recp} = \text{Resistencia al Colapso} \times \%$$

$$\text{Recp} = 880 \text{ lbs/pulg}^2 \times 0.906$$

$$\text{Recp} = 797 \text{ lbs/pulg}^2$$

Y finalmente, la profundidad calculada (Dcd) será:

$$\text{Dcd} = \text{Recp} \div \text{Gc}$$

$$\text{Dcd} = 797 \text{ lbs/pulg}^2 \div 0.556 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)/pie}$$

$$\text{Dcd} = 1433 \text{ pies}$$

Como asumimos 1500 pies y el cálculo dió 1433 pies, o sea, una diferencia de 67 pies, es necesario hacer un nuevo ensayo. Es recomendable ensayar con la profundidad calculada.

$$\text{Dsp} = 1430 \text{ pies}$$

$$\text{DDsp} = (2997.4 - 1430) \text{ pies} = 1567.4 \text{ pies}$$

$$\text{Wtr} = 1567.4 \text{ pies} \times 40.5 \text{ lbs/pie} = 63480 \text{ lbs}$$

$$\text{E} = 63480 \text{ lbs} \div 9.178 \text{ pulg}^2 = 6917 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$\text{R} = 6917 \text{ lbs/pulg}^2 \div 40000 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$\text{R} = 0.173$$

De la tabla 5, interpolando para $R = 0.173$, el porcentaje efectivo es 90.06%, y la Resistencia Efectiva será:

$$\text{Recp} = 880 \text{ lbs/pulg}^2 \times 0.9006 = 793 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$\text{Dcd} = 793 \text{ lbs/pulg}^2 \div 0.556 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}/\text{pie}$$

$$\text{Dcd} = 1426 \text{ pies}$$

$$\text{DDcd} = (1430 - 1426) \text{ pies} = 4 \text{ pies}$$

La tubería H-40 de 32,75 lbs/pie se puede introducir por colapso hasta una profundidad de 1430 pies y tendremos la primera sección:

J-55 de 40.5 lbs/pie de 2997.4 hasta 1430 pies (1567.4 pies).

La nueva tensión será:

1567.4 pies x 40.5 lbs/pie =	63480 lbs
1430 pies x 32.75 lbs/pie =	46832.5 lbs

Total	= 110312.5 lbs

La tubería H-40 de 32.75 lbs/pie tiene una resistencia de diseño a la tensión de 205000 lbs (tabla 3) ÷ Factor de Diseño a la Tensión, o sea, 102500 lbs.

Como toda la tubería pesa 110312.5 lbs, la tubería H-40 de 32.75 lbs/pie no resiste la tensión, por lo tanto no se puede introducir los 1430 pies de H-40. Ahora se debe determinar que longitud de tubería H-40 de 32.75



lbs/pie se puede introducir desde 1430 pies hacia la superficie, o sea, que longitud de su propio peso, élla resiste. La resistencia de diseño a la tensión es de 102500 lbs, de esta resistencia ya tiene ocupada el peso de la sección J-55 de 40.5 lbs/pie, como la diferencia será lo que resiste de su propio peso.

$$\text{Long. H-40} = \frac{(102500 - 63480)\text{lbs}}{32.75 \text{ lbs/pie}} = 1191 \text{ pies}$$

La tubería H-40 de 32.75 lbs/pie se puede introducir desde 1430 hasta 239 pies (1191 pies). Faltando 239 pies para alcanzar la superficie. Desde este punto es más importante la tensión que el colapso, por lo tanto se diseña por tensión.

La tubería J-55 de 40.5 lbs/pie tiene una resistencia de diseño a la tensión de 225000 lbs, y se puede usar una longitud de:

$$\begin{aligned} \text{Long. J-55} &= [225000 \text{ lbs} - 63480 \text{ lbs} - \\ & (1191 \text{ pies} \times 32.75 \text{ lbs/pie})] \div 40.5 \text{ lbs/pie} \\ \text{Long. J-55} &= 3025 \text{ pies} \end{aligned}$$

Como sólo se requieren 239 pies para alcanzar la superficie, se completarán con J-55 de 40.5 lbs/pie.

El programa queda así:

PROGRAMA DE REVESTIMIENTO SUPERFICIAL

INTERVALO	GRADO	PESO lbs/pie	LONGITUD pies
0 - 239	J-55	40.5	239
239 - 1430	H-40	32.75	1191
1430 - 2997.4	J-55	40.5	1567.4

La sección de H-40 de 32.75 lbs/pie es la de menor grado de acero y de menor peso. Esta sección hay que revisarla por estallido. La resistencia al estallido de la H-40 de 32.75 lbs/pie es de 1820 lbs/pulg², y la presión máxima esperada de la formación (Presión de Estallido) es de 1394 lbs/pulg², por lo tanto resiste al estallido.

b) Diseño de Tubería de Revestimiento de Producción:

- b.1. Determinar todos los factores que intervienen en el diseño.

b.1.1 Presión de la formación (Pf).

Pf = gradiente de presión de formación
x profundidad

$$Pf = 0.465(\text{lbs/pulg}^2)/\text{pie} \times 9380 \text{ pies}$$

$$Pf = 4362 \text{ lbs/pulg}^2$$

b.1.2 Presión Hidrostática (Ph).

Ph = 0.052 x densidad x profundidad

$$Ph = 0.052 \times 9.76 \text{ lbs/gal} \times 9380 \text{ pies}$$

$$Ph = 4762 \text{ lbs/pulg}^2$$



b.1.3 Presión al Colapso (Pc).

BIBLIOTECA

Pc = Ph x factor de diseño al colapso

$$Pc = 4762 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.125$$

$$Pc = 5357 \text{ lbs/pulg}^2$$

b.1.4 Presión al Estallido (Pe).

Pe = Pf x factor diseño al estallido

$$Pe = 4362 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.0$$

$$Pe = 4362 \text{ lbs/pulg}^2$$

b.1.5 Gradiente al Colapso (Gc).

Gc = Pc ÷ profundidad

$$G_c = [5357 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}] \div 9380 \text{ pies}$$

$$G_c = 0.571 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}/\text{pie}$$

b.2 Determinar en la tabla 2 que tipo de tubería resiste la Presión al Colapso. La tubería N-80 de 26 lbs/pie resiste 5410 lbs/pulg², por lo tanto, esta tubería se puede usar por colapso.

b.3 Determinar cuánto pesa la tubería si se fuera a introducir toda en el pozo.

$$W_{tr} = 26 \text{ lbs/pie} \times 9380 \text{ pies}$$

$$W_{tr} = 243880 \text{ lbs}$$

La tubería N-80 de 26 lbs/pie resiste por tensión 519000 lbs (tabla 2), y la resistencia de diseño a la tensión será:

$$\text{Resistencia a Tensión} \div \text{Factor Diseño a}$$

$$\text{Tensión} = 519000 \text{ lbs} \div 2.0 = 259500 \text{ lbs.}$$

Esto indica que la tubería seleccionada por colapso también resiste por tensión.

b.4 Determinar hasta que profundidad se puede introducir tubería N-80 de 23 lbs/pie. Esta

tubería tiene una resistencia al colapso de 3840 lbs/pulg² (tabla 2), y tomando esta resistencia como referencia se supondrá una profundidad base para iniciar el ensayo de:

$$Dsp = \text{resistencia al colapso} \div Gc$$

$$Dsp = 3840 \text{ lbs/pulg}^2 \div 0.571 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)/pie}$$

$$Dsp = 6725 \text{ pies}$$

Usamos 6700 pies para iniciar el ensayo.

Si se supone que la tubería N-80 de 23 lbs/pie se puede introducir hasta 6700 pies, entonces la primera sección será:

N-80 de 26 lbs/pie desde 9380 hasta 6700 pies (2680 pies).

Los 2680 pies pesarán: 2680 pies x 26 lbs/pie = 69680 lbs, este peso estará aplicado a la tubería N-80 de 23 lbs/pie, por lo tanto el esfuerzo (E) será:

$$E = \text{peso aplicado} \div \text{área plana}$$

$$E = 69680 \text{ lbs} \div 6.656 \text{ pulg}^2 \text{ (tabla 2)}$$

$$E = 10469 \text{ lbs/pulg}^2$$

La relación de esfuerzos (R) será:

$R = E \div \text{Punto M\u00ednimo Cedente}$

$R = 10469 \text{ lbs/pulg}^2 \div 80000 \text{ lbs/pulg}^2 \text{ (tabla 2)}$

$R = 0.131$

De la Elipse de los Esfuerzos Bi-Axiales (tabla 5), para $R = 0.131$ se determina que la Resistencia Efectiva de la tuber\u00eda es 92.64% del valor original, por lo tanto, la Resistencia Efectiva (Recp) ser\u00e1:

$\text{Recp} = \text{Resistencia al Colapso} \times \%$

$\text{Recp} = 3840 \text{ lbs/pulg}^2 \times 0.9264$

$\text{Recp} = 3557 \text{ lbs/pulg}^2$

Y finalmente, la profundidad calculada (Dcd) ser\u00e1:

$Dcd = \text{Recp} \div Gc$

$Dcd = 3557 \text{ lbs/pulg}^2 \div 0.571 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)/pie}$

$Dcd = 6229 \text{ pies}$

Como asumimos 6700 pies y el c\u00e1lculo di\u00f3 6229 pies, o sea, una diferencia de 471 pies, es necesario hacer un nuevo ensayo. Es recomendable ensayar con la profundidad calculada.

$Dsp = 6200 \text{ pies}$

$DDsp = (9380 - 6200) \text{ pies} = 3180 \text{ pies}$

$$Wtr = 3180 \text{ pies} \times 26 \text{ lbs/pie} = 82680 \text{ lbs}$$

$$E = 82680 \text{ lbs} \div 6.656 \text{ pulg}^2 = 12422 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$R = 12422 \text{ lbs/pulg}^2 \div 80000 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$R = 0.155$$



BIBLIOTECA

De la tabla 5, para $R = 0.155$, el porcentaje efectivo es 91.20%, y la Resistencia Efectiva será:

$$Recp = 3840 \text{ lbs/pulg}^2 \times 0.912 = 3502 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$Dcd = 3502 \text{ lbs/pulg}^2 \div 0.571 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}/\text{pie}$$

$$Dcd = 6133 \text{ pies}$$

$$DDcd = (6200 - 6133) \text{ pies} = 67 \text{ pies}$$

Como asumimos 6200 pies y el cálculo dió 6133 pies, o sea, una diferencia de 67 pies, es necesario hacer un nuevo ensayo.

$$Dsp = 6150 \text{ pies}$$

$$DDsp = (9380 - 6150) \text{ pies} = 3230 \text{ pies}$$

$$Wtr = 3230 \text{ pies} \times 26 \text{ lbs/pie} = 83980 \text{ lbs}$$

$$E = 83980 \text{ lbs} \div 6.656 \text{ pulg}^2 = 12617 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$R = 12617 \text{ lbs/pulg}^2 \div 80000 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$R = 0.158$$

De la tabla 5, interpolando para $R = 0.158$, el porcentaje efectivo es 91.02%, y la Resistencia Efectiva será:

$$\text{Recp} = 3840 \text{ lbs/pulg}^2 \times 0.9102 = 3495 \text{ lbs/pulg}^2$$

$$\text{Dcd} = 3495 \text{ lbs/pulg}^2 \div 0.571 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}/\text{pie}$$

$$\text{Dcd} = 6121 \text{ pies}$$

$$\text{DDcd} = (6150 - 6121) \text{ pies} = 29 \text{ pies}$$

La tubería N-80 de 26 lbs/pie se puede introducir por colapso hasta una profundidad de 6150 pies y tendremos la primera sección:

N-80 de 26 lbs/pie de 9380 hasta 6150 pies (3230 pies).

La nueva tensión será:

3230 pies x 26 lbs/pie =	83980 lbs
6150 pies x 23 lbs/pie =	141450 lbs
Total	= 225430 lbs

La tubería N-80 de 23 lbs/pie tiene una resistencia de diseño a la tensión de 442000 lbs (tabla 2) \div Factor de Diseño a la Tensión, o sea, 221000 lbs.

Como toda la tubería pesa 225430 lbs, la tubería N-80 de 23 lbs/pie no resiste la tensión, por lo tanto no se puede introducir los 6150 pies de N-80 de 23 lbs/pie. Ahora se

debe determinar que longitud de tubería N-80 de 23 lbs/pie se puede introducir desde 6150 pies hacia la superficie, o sea, que longitud de su propio peso, élla resiste. La resistencia de diseño a la tensión es de 221000 lbs, de esta resistencia ya tiene ocupada el peso de la sección N-80 de 26 lbs/pie, como la diferencia será lo que resiste de su propio peso.

$$\text{Long. N-80} = \frac{(221000 - 83980)\text{lbs}}{23 \text{ lbs/pie}} = 5957 \text{ pies}$$

La tubería N-80 de 23 lbs/pie se puede introducir desde 6150 hasta 193 pies (5957 pies). Faltando 193 pies para alcanzar la superficie. Desde este punto es más importante la tensión que el colapso, por lo tanto se diseña por tensión.

La tubería N-80 de 26 lbs/pie tiene una resistencia de diseño a la tensión de 259500 lbs, y se puede usar una longitud de:

$$\text{Long. N-80} = [259500 \text{ lbs} - 83980 \text{ lbs} - (5957 \text{ pies} \times 23 \text{ lbs/pie})] \div 26 \text{ lbs/pie}$$

$$\text{Long. N-80} = 1481 \text{ pies}$$

Como sólo se requieren 193 pies para alcanzar la superficie, se completarán con N-80 de 26 lbs/pie.

El programa queda así:

PROGRAMA DE REVESTIMIENTO DE PRODUCCION

INTERVALO	GRADO	PESO lbs/pie	LONGITUD pies
0 - 193	N-80	26	193
193 - 6150	N-80	23	5957
6150 - 9380	N-80	26	3230

La sección de N-80 de 23 lbs/pie es la de menor grado de acero y de menor peso. Esta sección hay que revisarla por estallido. La resistencia al estallido de la N-80 de 23 lbs/pie es de 6340 lbs/pulg², y la presión máxima esperada de la formación (Presión de Estallido) es de 4362 lbs/pulg², por lo tanto resiste al estallido.

c) Diseño Gráfico

El diseño se simplifica si se dispone de gráficas que indiquen la variación de la Resistencia al Colapso con la Tensión. Esto elimina el Ensayo y

Error. Las Figuras 7 y 8 muestran la variación del Colapso con la Tensión para tuberías de 5½ pulg. y 7 pulg. y sólo para tuberías de grado J-55, N-80 y P-110.

El procedimiento es el siguiente:

Densidad del Fluido = 9.76 lbs/gal.

Diámetro Externo = 7 pulg.

Profundidad Total = 9380 pies.

Se dispone de Tubería N-80.

c.1 Determinar todos los factores que intervienen en el diseño.

c.1.1 Presión de la formación (Pf).

Pf = gradiente de presión de formación
x profundidad

Pf = 0.465(lbs/pulg²)/pie x 9380 pies

Pf = 4362 lbs/pulg²

c.1.2 Presión Hidrostática (Ph).

Ph = 0.052 x densidad x profundidad

Ph = 0.052 x 9.76 lbs/gal x 9380 pies

Ph = 4762 lbs/pulg²

(Tomado de Metodología para Analizar y Resolver Problemas de Perforación)

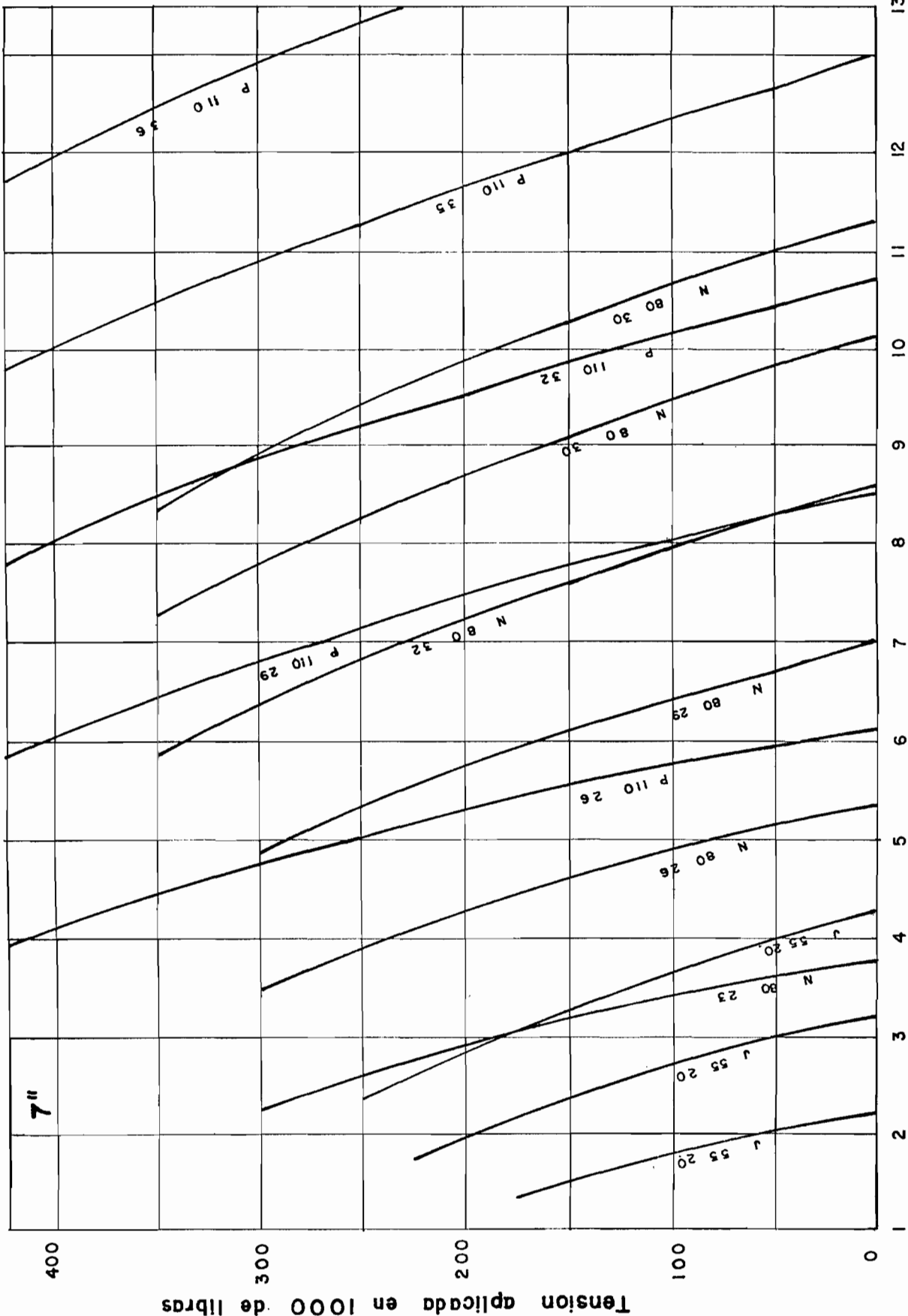


Fig. 7.- Resistencia al colapso en 1000 de lppc.

7"

Tension aplicada en 1000 de libras

400
300
200
100
0

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

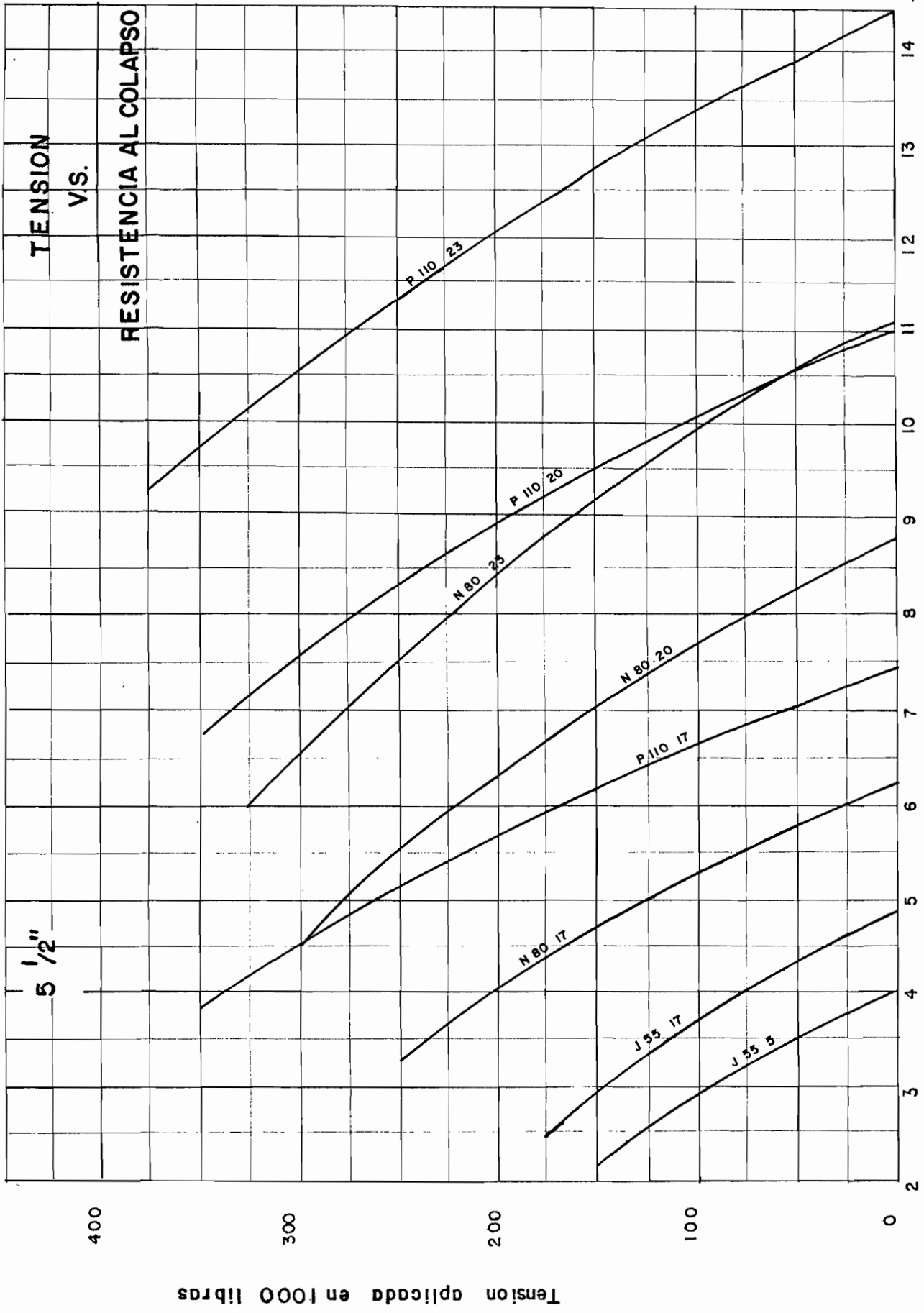


Fig. 8 - Resistencia al colapso en 1000 lppc.
 (Tomado de Metodología para Analizar y Resolver Problemas de Perforación)

c.1.3 Presión al Colapso (P_c).

$$P_c = P_h \times \text{factor de diseño al colapso}$$

$$P_c = 4762 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.125$$

$$P_c = 5357 \text{ lbs/pulg}^2$$

c.1.4 Presión al Estallido (P_e).

$$P_e = P_f \times \text{factor diseño al estallido}$$

$$P_e = 4362 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.0$$

$$P_e = 4362 \text{ lbs/pulg}^2$$

c.1.5 Gradiente al Colapso (G_c).

$$G_c = P_c \div \text{profundidad}$$

$$G_c = [5357 \text{ (lbs/pulg}^2)] \div 9380 \text{ pies}$$

$$G_c = 0.571 \text{ (lbs/pulg}^2)/\text{pie}$$

c.2 La Presión máxima al colapso que se espera en el pozo es de 5357 lbs/pulg². Este valor se grafica para tensión igual a cero. (Fig. 7, punto 1). Esto indica que la tubería N-80 de 26 lbs/pie resiste por colapso.

c.3 Calcular el peso total de la tubería como si todos los 9380 pies se fueran a introducir de N-80 de 26 lbs/pie.

$$W_{tr} = 9380 \text{ pies} \times 26 \text{ lbs/pie} = 243880 \text{ lbs}$$

Este valor se gráfica para colapso cero (Fig. 7, punto 2). Se une punto 1 con punto 2.

La tubería N-80 de 26 lbs/pie tiene una resistencia de diseño a la tensión de 519000 lbs (tabla 2) \div 2.0 = 259500 lbs. Lo que indica que si resiste por tensión si se introdujera desde la superficie hasta el fondo, pero es más costoso.

- c.4 La línea 1-2 corta la curva de N-80 de 23 lbs/pie en el punto 3. Este punto indica la presión efectiva al colapso de la tubería N-80 de 23 lbs/pie.

$$Recp = 3353 \text{ lbs/pulg}^2 \text{ (leído del gráfico)}$$

La tubería se podrá introducir hasta:

$$\text{Long. N-80(23 lbs/pie)} = \frac{3353 \text{ lbs/pulg}^2}{0.571 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}/\text{pie}}$$

$$\text{Long. N-80 (23 lbs/pie)} = 5872 \text{ pies}$$

Así se obtiene la primera sección de Tubería de Revestimiento.

N-80 (26 lbs/pie) desde 9380 hasta 5872 pies
(3508 pies).

c.5 La nueva tensión será:

$$\begin{array}{r}
 3508 \text{ pies} \times 26 \text{ lbs/pie} = 91208 \text{ lbs} \\
 5872 \text{ pies} \times 23 \text{ lbs/pie} = 135056 \text{ lbs} \\
 \hline
 \text{Total} \quad \quad = 226264 \text{ lbs}
 \end{array}$$

Este valor se grafica para Colapso cero, punto 4. La tubería N-80 de 23 lbs/pie tiene una resistencia de diseño a la tensión de 442000 lbs (tabla 2) \div 2.0 = 221000 lbs, por lo tanto, no puede usarse hasta la superficie.

Uniendo el punto 4 con el 3, se corta la curva de la tubería J-55 de 23 lbs/pie, pero no disponemos de ésta, y además no resiste por Estallido, por lo tanto, no podemos usarla.

c.6 Determinar que longitud de tubería N-80 de 23 lbs/pie se puede usar desde 5872 pies hacia la superficie.

$$\text{Long. N-80} = \frac{(221000 - 91208) \text{ lbs}}{23 \text{ lbs/pie}} = 5643 \text{ pies}$$

Se tendrá una nueva sección:

N-80 (23 lbs/pie) desde 5872 hasta 229 pies
(5643 pies).

c.7 La nueva tensión será:

$$\begin{array}{r}
 3058 \text{ pies} \times 26 \text{ lbs/pie} = 91208 \text{ lbs} \\
 5643 \text{ pies} \times 23 \text{ lbs/pie} = 129789 \text{ lbs} \\
 \hline
 \text{Total} = 220997 \text{ lbs}
 \end{array}$$

La tubería N-80 de 26 lbs/pie tiene una resistencia de diseño a la tensión de 259500 lbs.

c.8 Determinar que longitud de tubería N-80 de 26 lbs/pie se puede usar desde 229 pies hacia la superficie.

$$\text{Long. N-80} = \frac{(259500 - 220997) \text{ lbs}}{26 \text{ lbs/pie}} = 1481 \text{ pies}$$

En vista de que sólo se requieren 229 pies se usará N-80 de 26 lbs/pie hasta la superficie.

El programa queda así:

PROGRAMA DE REVESTIMIENTO DE PRODUCCION

INTERVALO	GRADO	PESO lbs/pie	LONGITUD pies
0 - 229	N-80	26	229
229 - 5872	N-80	23	5643
5872 - 9380	N-80	26	3508

Ahora, revisando para estallido nos damos cuenta de que todas las tuberías resisten al estallido.

2.2 EJEMPLO # 2

Hacer diseño de Revestimiento Superficial y de Producción.

POZO PARAISO 3

Localización: Oriente Ecuatoriano.

El gradiente de presión de la formación en el área es de 0.465 (lbs/pulg²)/pie (gradiente normal).

Se utilizan los siguientes factores de diseño (asumidos):

Estallido = 1.0

Colapso = 1.125

Tensión = 2.0

Los datos del pozo para poder introducir ambas tuberías son:

a) Para Revestimiento Superficial

Densidad del Fluido = 9,5 lbs/gal.

Diámetro Externo = 10.75 pulg.

Profundidad = 2441.14 pies.

Se dispone de Tubería J-55 y H-40.

b) Para Revestimiento de Producción

Densidad del Fluido = 10 lbs/gal.

Diámetro Externo = 7 pulg.

Profundidad Total = 9721 pies.

Se dispone de Tubería C-95.

PROCEDIMIENTO:

a) Diseño de Tubería de Revestimiento Superficial:

a.1 Determinar todos los factores que intervienen en el diseño.

a.1.1 Presión de la formación (Pf).

Pf= gradiente de presión de formación
x profundidad

$$P_f = 0.465(\text{lbs/pulg}^2)/\text{pie} \times 2441.14 \text{ pie}$$

$$P_f = 1135 \text{ lbs/pulg}^2$$

a.1.2 Presión Hidrostática (P_h).

$$P_h = 0.052 \times \text{densidad} \times \text{profundidad}$$

$$P_h = 0.052 \times 9.5 \text{ lbs/gal} \times 2441.14 \text{ pie}$$

$$P_h = 1206 \text{ lbs/pulg}^2$$

a.1.3 Presión al Colapso (P_c).

$$P_c = P_h \times \text{factor de diseño al colapso}$$

$$P_c = 1206 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.125$$

$$P_c = 1357 \text{ lbs/pulg}^2$$

a.1.4 Presión al Estallido (P_e).

$$P_e = P_f \times \text{factor diseño al estallido}$$

$$P_e = 1135 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.0$$

$$P_e = 1135 \text{ lbs/pulg}^2$$

a.1.5 Gradiente al Colapso (G_c).

$$G_c = P_c \div \text{profundidad}$$

$$G_c = [1357 \text{ (lbs/pulg}^2)] \div 2441.14 \text{ pies}$$

$$G_c = 0.556 \text{ (lbs/pulg}^2)/\text{pie}$$

a.2 Determinar en la tabla 3 que tipo de tubería

resiste la Presión al Colapso. La tubería J-55 de 40.5 lbs/pie resiste 1730 lbs/pulg², por lo tanto, esta tubería se puede usar por colapso.

- a.3 Determinar cuánto pesa la tubería si se fuera a introducir toda en el pozo.

$$W_{tr} = 40.5 \text{ lbs/pie} \times 2441.14 \text{ pies}$$

$$W_{tr} = 988866 \text{ lbs}$$

La tubería J-55 de 40.5 lbs/pie resiste por tensión 450000 lbs (tabla 3), y la resistencia de diseño a la tensión será:

$$\text{Resistencia a Tensión} \div \text{Factor Diseño a}$$

$$\text{Tensión} = 450000 \text{ lbs} \div 2.0 = 225000 \text{ lbs.}$$

Esto indica que la tubería seleccionada por colapso también resiste por tensión.

- a.4 Determinar hasta que profundidad se puede introducir tubería H-40 de 32.75 lbs/pie. Esta tubería tiene una resistencia al colapso de 880 lbs/pulg² (tabla 3), y tomando esta resistencia como referencia se supondrá una profundidad base para iniciar el ensayo de:

$D_{sp} = \text{resistencia al colapso} \div G_c$

$D_{sp} = 880 \text{ lbs/pulg}^2 \div 0.556 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}/\text{pie}$

$D_{sp} = 1583 \text{ pies}$

Usamos 1500 pies para iniciar el ensayo.

Si se supone que la tubería H-40 de 32.75 lbs/pie se puede introducir hasta 1500 pies, entonces la primera sección será:

J-55 de 40.5 lbs/pie desde 2441.14 hasta 1500 pies (941.14 pies).

Los 941.14 pies pesarán: $941.14 \text{ pies} \times 40.5 \text{ lbs/pie} = 38116 \text{ lbs}$, este peso estará aplicado a la tubería H-40 de 32.75 lbs/pie, por lo tanto el esfuerzo (E) será:

$E = \text{peso aplicado} \div \text{área plana}$

$E = 38116 \text{ lbs} \div 9.178 \text{ pulg}^2 \text{ (tabla 3)}$

$E = 4153 \text{ lbs/pulg}^2$

La relación de esfuerzos (R) será:

$R = E \div \text{Punto Mínimo Cedente}$

$R = 4153 \text{ lbs/pulg}^2 \div 40000 \text{ lbs/pulg}^2 \text{ (tabla 3)}$

$R = 0.104$

De la Elipse de los Esfuerzos Bi-Axiales (tabla 5), para $R = 0.104$ se determina que la Resistencia Efectiva de la tubería es 94.44% del valor original, por lo tanto, la Resistencia Efectiva (Recp) será:

$$\text{Recp} = \text{Resistencia al Colapso} \times \%$$

$$\text{Recp} = 880 \text{ lbs/pulg}^2 \times 0.9444$$

$$\text{Recp} = 831 \text{ lbs/pulg}^2$$

Y finalmente, la profundidad calculada (Dcd) será:

$$\text{Dcd} = \text{Recp} \div Gc$$

$$\text{Dcd} = 831 \text{ lbs/pulg}^2 \div 0.556 \text{ (lbs/pulg}^2\text{)/pie}$$

$$\text{Dcd} = 1495 \text{ pies}$$

Como asumimos 1500 pies y el cálculo dió 1495 pies, o sea, una diferencia de 5 pies; la tubería H-40 de 32.75 lbs/pie se puede introducir hasta una profundidad 1500 pies, y tendremos la primera sección.

J-55 de 40.5 lbs/pie de 2441.14 hasta 1500 pies (941.14 pies).

La nueva tensión será:

$$\begin{array}{r}
 941.14 \text{ pies} \times 40.5 \text{ lbs/pie} = 38116 \text{ lbs} \\
 1500 \text{ pies} \times 32.75 \text{ lbs/pie} = 49125 \text{ lbs} \\
 \hline
 \text{Total} = 87241 \text{ lbs}
 \end{array}$$

La tubería H-40 de 32.75 lbs/pie tiene una resistencia de diseño a la tensión de 205000 lbs (tabla 3) ÷ Factor de Diseño a la Tensión, o sea, 102500 lbs.

Como toda la tubería pesa 110312.5 lbs, la tubería H-40 de 32.75 lbs/pie si resiste la tensión, por lo tanto no se puede introducir los 1500 pies de H-40.

El programa queda así:

PROGRAMA DE REVESTIMIENTO SUPERFICIAL

INTERVALO	GRADO	PESO lbs/pie	LONGITUD pies
0 - 1500	H-40	32.75	1500
1500 - 2441.14	J-55	40.5	941.14

La sección de H-40 de 32.75 lbs/pie es la de menor grado de acero y de menor peso.

Esta sección hay que revisarla por estallido. La resistencia al estallido de la H-40 de

32.75 lbs/pie es de 1820 lbs/pulg², y la presión máxima esperada de la formación (Presión de Estallido) es de 1135 lbs/pulg², por lo tanto resiste al estallido.

b) Diseño de Tubería de Revestimiento de Producción:

b.1 Determinar todos los factores que intervienen en el diseño.

b.1.1 Presión de la formación (Pf).

Pf = gradiente de presión de formación
x profundidad

Pf = 0.465(lbs/pulg²)/pie x 9721 pies

Pf = 4520 lbs/pulg²

b.1.2 Presión Hidrostática (Ph).

Ph = 0.052 x densidad x profundidad

Ph = 0.052 x 10 lbs/gal x 9721 pies

Ph = 5055 lbs/pulg²

b.1.3 Presión al Colapso (Pc).

Pc = Ph x factor de diseño al colapso

Pc = 5055 lbs/pulg² x 1.125

Pc = 5687 lbs/pulg²

b.1.4 Presión al Estallido (Pe).

$$Pe = Pf \times \text{factor diseño al estallido}$$

$$Pe = 4520 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.0$$

$$Pe = 4520 \text{ lbs/pulg}^2$$

b.1.5 Gradiente al Colapso (Gc).

$$Gc = Pc \div \text{profundidad}$$

$$Gc = [5687 \text{ (lbs/pulg}^2)] \div 9721 \text{ pies}$$

$$Gc = 0.585 \text{ (lbs/pulg}^2)/\text{pie}$$

b.2 Determinar en la tabla 2 que tipo de tubería resiste la Presión al Colapso. La tubería C-95 de 26 lbs/pie resiste 5870 lbs/pulg², por lo tanto, esta tubería se puede usar por colapso.

b.3 Determinar cuánto pesa la tubería si se fuera a introducir toda en el pozo.

$$Wtr = 26 \text{ lbs/pie} \times 9721 \text{ pies}$$

$$Wtr = 252746 \text{ lbs}$$

La tubería C-95 de 26 lbs/pie resiste por tensión 593000 lbs (tabla 2), y la resistencia de diseño a la tensión será:

Resistencia a Tensión ÷ Factor Diseño a
 Tensión = 593000 lbs ÷ 2.0 = 296500 lbs.

Esto indica que la tubería seleccionada por colapso también resiste por tensión.

El programa queda así:

PROGRAMA DE REVESTIMIENTO DE PRODUCCION

INTERVALO	GRADO	PESO lbs/pie	LONGITUD pies
0 - 9721	C-95	26	9721

La sección de C-95 de 26 lbs/pie hay que revisarla por estallido. La resistencia al estallido de la C-95 de 26 lbs/pie es de 8600 lbs/pulg², y la presión máxima esperada de la formación (Presión de Estallido) es de 4520 lbs/pulg², por lo tanto resiste al estallido.

2.3 EJEMPLO # 3

Hacer diseño de Revestimiento Superficial y de Producción.

POZO PUCUNA 6

Localización: Oriente Ecuatoriano.

El gradiente de presión de la formación en el área es de 0.465 (lbs/pulg²)/pie (gradiente normal).

Se utilizan los siguientes factores de diseño (asumidos):

Estallido = 1.0

Colapso = 1.125

Tensión = 2.0

Los datos del pozo para poder introducir ambas tuberías son:

a) Para Revestimiento Superficial:

Densidad del Fluido = 9,2 lbs/gal.

Diámetro Externo = 10.75 pulg.

Profundidad = 2508 pies.

Se dispone de Tubería J-55.

b) Para Revestimiento de Producción:

Densidad del Fluido = 10 lbs/gal.

Diámetro Externo = 7 pulg.

Profundidad Total = 9940 pies.

Se dispone de Tubería C-95.

PROCEDIMIENTO:

a) Diseño de Tubería de Revestimiento Superficial:

a.1 Determinar todos los factores que intervienen en el diseño.

a.1.1 Presión de la formación (Pf).

$P_f = \text{gradiente de presión de formación}$
 $\times \text{profundidad}$

$P_f = 0.465(\text{lbs/pulg}^2)/\text{pie} \times 2508 \text{ pies}$

$P_f = 1166 \text{ lbs/pulg}^2$

a.1.2 Presión Hidrostática (Ph).

$P_h = 0.052 \times \text{densidad} \times \text{profundidad}$

$P_h = 0.052 \times 9.2 \text{ lbs/gal} \times 2508 \text{ pies}$

$P_h = 1200 \text{ lbs/pulg}^2$

a.1.3 Presión al Colapso (Pc).

$P_c = P_h \times \text{factor de diseño al colapso}$

$P_c = 1200 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.125$

$P_c = 1350 \text{ lbs/pulg}^2$

a.1.4 Presión al Estallido (Pe).

$$P_e = P_f \times \text{factor diseño al estallido}$$

$$P_e = 1166 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.0$$

$$P_e = 1166 \text{ lbs/pulg}^2$$

a.1.5 Gradiente al Colapso (G_c).

$$G_c = P_c \div \text{profundidad}$$

$$G_c = [1350 \text{ (lbs/pulg}^2)] \div 2508 \text{ pies}$$

$$G_c = 0.538 \text{ (lbs/pulg}^2)/\text{pie}$$

a.2 Determinar en la tabla 3 que tipo de tubería resiste la Presión al Colapso. La tubería J-55 de 40.5 lbs/pie resiste 1730 lbs/pulg², por lo tanto, esta tubería se puede usar por colapso.

a.3 Determinar cuánto pesa la tubería si se fuera a introducir toda en el pozo.

$$W_{tr} = 40.5 \text{ lbs/pie} \times 2508 \text{ pies}$$

$$W_{tr} = 101574 \text{ lbs}$$

La tubería J-55 de 40.5 lbs/pie resiste por tensión 450000 lbs (tabla 3), y la resistencia de diseño a la tensión será:

$$\text{Resistencia a Tensión} \div \text{Factor Diseño a}$$

$$\text{Tensión} = 450000 \text{ lbs} \div 2.0 = 225000 \text{ lbs.}$$

Esto indica que la tubería seleccionada por colapso también resiste por tensión.

El programa queda así:

PROGRAMA DE REVESTIMIENTO SUPERFICIAL

INTERVALO	GRADO	PESO lbs/pie	LONGITUD pies
0 - 2508	J-55	40.5	2508

La sección de J-55 de 40.5 lbs/pie hay que revisarla por estallido. La resistencia al estallido de la J-55 de 40.5 lbs/pie es de 3130 lbs/pulg², y la presión máxima esperada de la formación (Presión de Estallido) es de 1166 lbs/pulg², por lo tanto resiste al estallido.

b) Diseño de Tubería de Revestimiento de Producción:

b.1 Determinar todos los factores que intervienen en el diseño.

b.1.1 Presión de la formación (Pf).

$$Pf = \text{gradiente de presión de formación} \\ \times \text{profundidad}$$

$$P_f = 0.465(\text{lbs/pulg}^2)/\text{pie} \times 9940 \text{ pies}$$

$$P_f = 4622 \text{ lbs/pulg}^2$$

b.1.2 Presión Hidrostática (Ph).

$$P_h = 0.052 \times \text{densidad} \times \text{profundidad}$$

$$P_h = 0.052 \times 10 \text{ lbs/gal} \times 9940 \text{ pies}$$

$$P_h = 5169 \text{ lbs/pulg}^2$$

b.1.3 Presión al Colapso (Pc).

$$P_c = P_h \times \text{factor de diseño al colapso}$$

$$P_c = 5169 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.125$$

$$P_c = 5815 \text{ lbs/pulg}^2$$

b.1.4 Presión al Estallido (Pe).

$$P_e = P_f \times \text{factor diseño al estallido}$$

$$P_e = 4622 \text{ lbs/pulg}^2 \times 1.0$$

$$P_e = 4622 \text{ lbs/pulg}^2$$

b.1.5 Gradiente al Colapso (Gc).

$$G_c = P_c \div \text{profundidad}$$

$$G_c = [5815 (\text{lbs/pulg}^2)] \div 9940 \text{ pies}$$

$$G_c = 0.585 (\text{lbs/pulg}^2)/\text{pie}$$

b.2 Determinar en la tabla 2 que tipo de tubería

resiste la Presión al Colapso. La tubería C-95 de 26 lbs/pie resiste 5870 lbs/pulg², por lo tanto, esta tubería se puede usar por colapso.

- b.3 Determinar cuánto pesa la tubería si se fuera a introducir toda en el pozo.

$$Wtr = 26 \text{ lbs/pie} \times 9940 \text{ pies}$$

$$Wtr = 258440 \text{ lbs}$$

La tubería C-95 de 26 lbs/pie resiste por tensión 593000 lbs (tabla 2), y la resistencia de diseño a la tensión será:

$$\begin{aligned} \text{Resistencia a Tensión} \div \text{Factor Diseño a} \\ \text{Tensión} = 593000 \text{ lbs} \div 2.0 = 296500 \text{ lbs.} \end{aligned}$$

Esto indica que la tubería seleccionada por colapso también resiste por tensión.

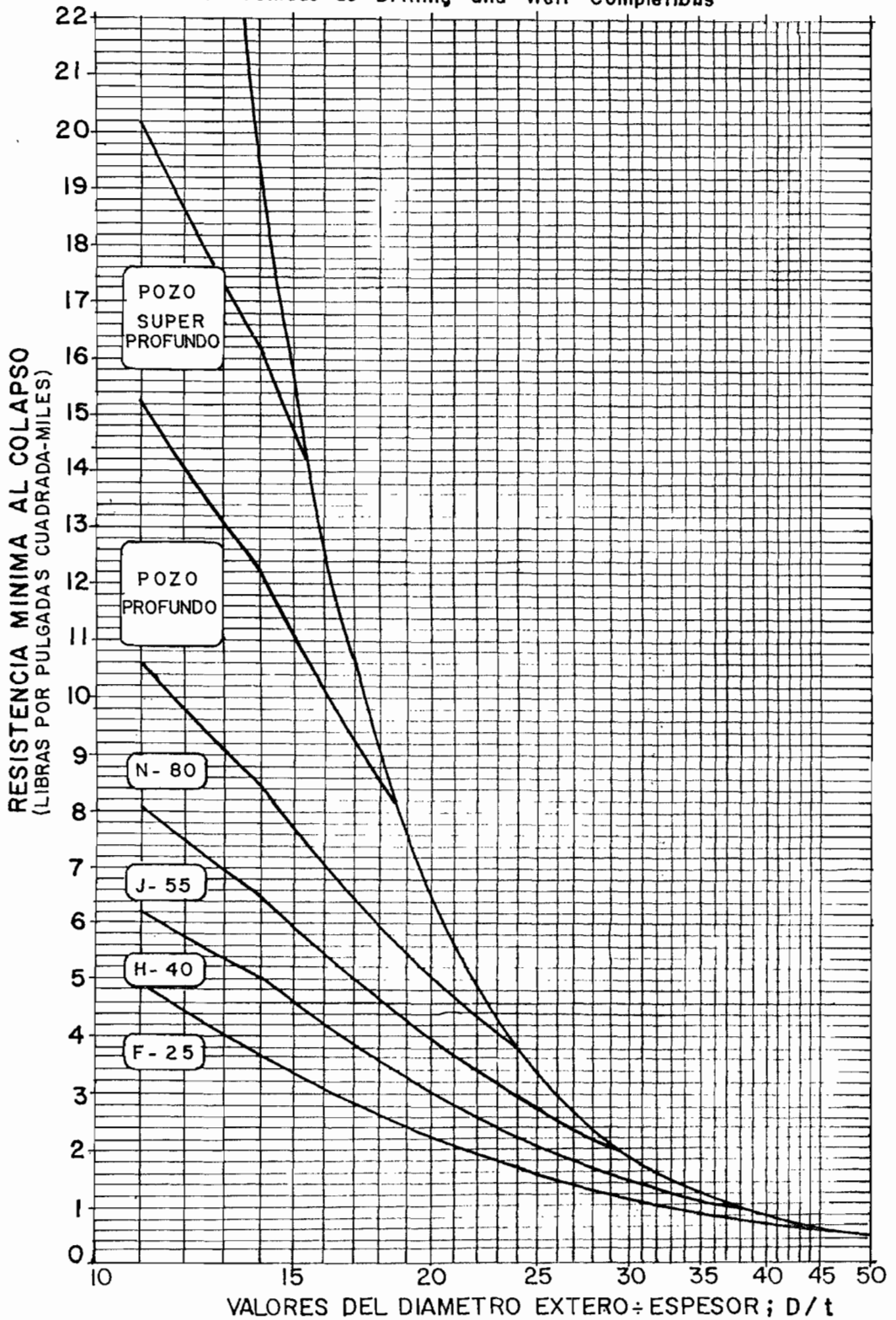
El programa queda así:

PROGRAMA DE REVESTIMIENTO DE PRODUCCION

INTERVALO	GRADO	PESO lbs/pie	LONGITUD pies
0 - 9940	C-95	26	9940

La sección de C-95 de 26 lbs/pie hay que revisarla por estallido. La resistencia al estallido de la C-95 de 26 lbs/pie es de 8600 lbs/pulg², y la presión máxima esperada de la formación (Presión de Estallido) es de 4622 lbs/pulg², por lo tanto resiste al estallido.

FIG. 9.- Tomado de Drilling and Well Completions



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones del presente estudio son las siguientes:

1. Todos los pozos petroleros deben tener como mínimo dos tipos de Revestimiento: Revestimiento Superficial y Revestimiento de Producción, ya que el Revestimiento Intermedio se utiliza cuando el pozo es muy profundo o cuando se espera algún problema de alta presión en las formaciones superficiales.
2. El diseño por el Método de Ensayo y Error da buenos resultados, y en la actualidad existen programas que se utilizan en computadoras, evitando así la pérdida de tiempo en la elaboración del Programa de Revestimiento.
3. El diseño por el Método Gráfico también da buenos resultados pero se presentan problemas si no se dispone de todas las gráficas necesarias para su elaboración, y además dichas gráficas no poseen los datos para todos los tipos de tuberías existentes en la industria.
4. Los errores que se cometen por estos dos métodos son mínimos y no afectan en el resultado del programa. Dichos errores se deben a malas aproximaciones o malas lecturas de los gráficos.

5. Al analizar los resultados se observa que tanto en la superficie como en el fondo del pozo se requiere el mejor tipo de tubería que resista los diferentes esfuerzos a que son sometidas.

Para realizar futuros diseños hay que tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Para mayor seguridad y mejores resultados, utilizar los programas de computadoras que los poseen las compañías especializadas en diseñar Tubería de Revestimiento.
2. Es necesario hacer un estudio de los diseños de Tubería de Revestimiento para ver si no se podría utilizar otro tipo de tubería de menor costo y que dé los mismos resultados, en lugar de utilizar un sólo tipo de tubería, lo cual afecta considerablemente el costo del revestimiento.

APENDICES

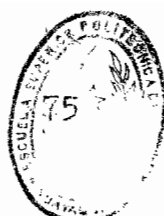
A. TABLAS

T A B L A 1

CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 5 1/2 PULG.

GRADO	PTO. MINIMO CEDENTE lppc	PESO NOMINAL lbs/pie	AREA PLANA pulg. cuad	DIAMETRO INTERNO pulg.	ESPESOR DE PARED pulg.	RESISTENCIAS			PRECIOS \$/pie
						COLAPSO lppc	ESTALLIDO lppc	TENSION 1000 lbs.	
F-25	25000	13	3.776	5.044	0.228	1660	1810	95	
H-40	40000	14	4.029	5.012	0.244	2440	3110	139	
J-55	55000	14	4.029	5.012	0.244	3120	4270	172	
		15.5	4.514	4.950	0.275	4040	4810	217	
		17	4.962	4.892	0.304	4910	5320	272	
K-55	55000	14	4.029	5.012	0.244	3120	4270	189	7.60
		15.5	4.514	4.950	0.275	4040	4810	239	8.50
		17	4.962	4.892	0.304	4910	5320	272	9.15
C-75	75000	17	4.962	4.892	0.304	6070	7250	327	16.04
		20	5.828	4.778	0.361	8440	8610	403	18.87
		23	6.630	4.670	0.415	10640	9260	473	21.70
N-80	80000	17	4.962	4.892	0.304	6280	7740	348	13.97
		20	5.828	4.778	0.361	8830	9190	428	16.43
		23	6.630	4.670	0.415	11160	9880	502	18.90
C-95	95000	17	4.962	4.892	0.304	6930	9190	374	16.37
		20	5.828	4.778	0.361	10000	10910	460	19.26
		23	6.630	4.670	0.415	12920	11730	540	22.15
P-110	110000	17	4.962	4.892	0.304	7460	10640	445	16.99
		20	5.828	4.778	0.361	11080	12640	548	19.99
		23	6.630	4.670	0.415	14520	13080	643	22.99

T A B L A 2



CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 7 PULG.

BIBLIOTECA

GRADO	PTO. MINIMO CEDENTE lppc	PESO NOMINAL lbs/pie	AREA PLANA pulg. cuad	DIAMETRO INTERNO pulg.	ESPESOR DE PARED pulg.	RESISTENCIAS			PRECIOS \$/pie
						COLAPSO lppc	ESTALLIDO lppc	TENSION 1000 lbs.	
H-40	40000	20	5.749	6.456	0.272	1980	2720	176	10.28
J-55	55000	20	5.749	6.456	0.272	2270	3740	234	
		23	6.656	6.366	0.317	3270	4360	313	
		26	7.549	6.276	0.362	4320	4980	367	
K-55	55000	20	5.749	6.456	0.272	2270	3740	254	10.44
		23	6.656	6.366	0.317	3270	4360	341	12.14
		26	7.549	6.276	0.362	4320	4980	401	13.53
C-75	75000	23	6.656	6.366	0.317	3770	5940	416	21.28
		26	7.549	6.276	0.362	5250	6790	489	23.72
		29	8.449	6.184	0.408	6760	7650	562	26.46
		32	9.317	6.094	0.453	8230	8490	633	29.20
		35	10.172	6.004	0.498	9710	8660	703	31.93
		38	10.959	5.920	0.540	10680	8660	767	34.67
H-80	80000	23	6.656	6.366	0.317	3840	6340	442	18.53
		26	7.549	6.276	0.362	5410	7240	519	20.65
		29	8.449	6.184	0.408	7020	8160	597	23.03
		32	9.317	6.094	0.453	8600	9060	672	25.42
		35	10.172	6.004	0.498	10180	9240	746	27.80
		38	10.959	5.920	0.540	11390	9240	814	30.18
C-95	95000	23	6.656	6.366	0.317	4150	7530	505	21.72
		26	7.549	6.276	0.362	5070	8600	593	24.21
		29	8.449	6.184	0.408	7820	9690	683	27.00
		32	9.317	6.094	0.453	9730	10760	769	29.80
		35	10.172	6.004	0.498	11640	10970	853	32.59
		38	10.959	5.920	0.540	13420	10970	931	35.38
P-110	110000	26	7.549	6.276	0.362	6210	9960	693	25.13
		29	8.449	6.184	0.408	8510	11220	797	28.03
		32	9.317	6.094	0.453	10760	12460	897	30.93
		35	10.172	6.004	0.498	13010	12700	996	33.83
		38	10.959	5.920	0.540	15110	12700	1087	36.73

T A B L A 3

CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 10 3/4 PULG.

GRADO	PTO. MINIMO CEDENTE lppc	PESO NOMINAL lbs/pie	AREA PLANA pulg. cuad	DIAMETRO INTERNO pulg.	ESPESOR DE PARED pulg.	RESISTENCIAS			PRECIOS \$/pie
						COLAPSO lppc	ESTALLIDO lppc	TENSION 1000 lbs.	
H-40	40000	32.75	9.178	10.192	0.279	880	1020	205	16.66
		40.5	11.435	10.050	0.350	1420	2280	314	20.24
J-55	55000	40.5	11.435	10.050	0.350	1730	3130	450	
		45.5	13.006	9.950	0.400	2300	3580	518	
		51.0	14.561	9.850	0.450	2870	4030	585	
K-55	55000	45.5	13.006	9.950	0.400	2090	3580	528	23.72
		51.0	14.561	9.850	0.450	2700	4030	606	25.22
N-80	80000	51.0	14.561	9.850	0.450	3220	5860	804	40.46
		55.0	15.947	9.760	0.495	4020	6450	895	44.03
P-110	110000	51.0	14.561	9.850	0.450	3670	8060	1080	49.24
		55.0	15.947	9.760	0.495	4630	8860	1203	53.59
		60.7	17.473	9.660	0.545	5860	9760	1338	58.61
		65.7	18.982	9.560	0.595	7490	10650	1472	63.44

T A B L A 4

CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 13 3/8 PULG.

GRADO	PTO. MINIMO CEDENTE lppc	PESO NOMINAL lbs/pie	AREA PLANA pulg. cuad	DIAMETRO INTERNO pulg.	ESPESOR DE PARED pulg.	RESISTENCIAS			PRECIOS \$/pie
						COLAPSO lppc	ESTALLIDO lppc	TENSION 1000 lbs.	
H-40	40000	48.0	13.524	12.715	0.330	770	1730	322	25.28
J-55	55000	54.5	15.513	12.615	0.380	1130	2730	514	
		61.0	17.487	12.515	0.430	1540	3090	595	
		68.0	19.445	12.415	0.480	1950	3450	675	
K-55	55000	54.5	15.513	12.615	0.380	1130	2730	547	28.63
		61.0	17.487	12.515	0.430	1540	3090	633	31.91
		68.0	19.445	12.415	0.480	1950	3450	718	35.44
C-75	75000	72.0	20.768	12.347	0.514	2590	5040	978	67.54
N-80	80000	72.0	20.768	12.347	0.514	2670	5380	1040	69.66
C-95	95000	72.0	20.768	12.347	0.514	2820	6390	1204	76.91

EFFECTO DE LA TENSION EN LA RESISTENCIA AL COLAPSO TOMADO DE LA CURVA ELIPSE DE ESFUERZOS BI-AXIALES

R	%	R	%	R	%	R	%
0.005	99.8	0.170	90.3	0.335	78.8	0.500	65.0
0.010	99.5	0.175	89.9	0.340	78.4	0.505	64.5
0.015	99.3	0.180	89.6	0.345	78.0	0.510	64.1
0.020	99.0	0.185	89.3	0.350	77.7	0.515	63.6
0.025	98.7	0.190	89.0	0.355	77.3	0.520	63.1
0.030	98.4	0.195	88.7	0.360	76.9	0.525	62.6
0.035	98.2	0.200	88.4	0.365	76.5	0.530	62.1
0.040	97.9	0.205	88.1	0.370	76.1	0.535	61.7
0.045	97.6	0.210	87.7	0.375	75.8	0.540	61.2
0.050	97.3	0.215	87.4	0.380	75.4	0.545	60.7
0.055	97.0	0.220	87.1	0.385	75.0	0.550	60.2
0.060	96.8	0.225	86.8	0.390	74.6	0.555	59.7
0.065	96.5	0.230	86.7	0.395	74.2	0.560	59.2
0.070	96.2	0.235	86.3	0.400	73.7	0.565	58.7
0.075	95.9	0.240	85.6	0.405	73.3	0.570	58.1
0.080	95.6	0.245	85.3	0.410	72.9	0.575	57.6
0.085	95.3	0.250	85.0	0.415	72.5	0.580	57.1
0.090	95.1	0.255	84.7	0.420	72.0	0.585	56.6
0.095	94.8	0.260	84.3	0.425	71.6	0.590	56.1
0.100	94.5	0.265	83.9	0.430	71.2	0.595	55.5
0.105	94.2	0.270	83.6	0.435	70.8	0.600	55.0
0.110	93.9	0.275	83.2	0.440	70.3	0.605	54.5
0.115	93.6	0.280	82.8	0.445	69.9	0.610	54.0
0.120	93.3	0.285	82.5	0.450	69.5	0.615	53.5
0.125	93.0	0.290	82.1	0.455	69.1	0.620	52.9
0.130	92.7	0.295	81.7	0.460	68.9	0.625	52.4
0.135	92.4	0.300	81.3	0.465	68.6	0.630	51.4
0.140	92.1	0.305	81.0	0.470	67.8	0.635	51.4
0.145	91.8	0.310	80.6	0.475	67.3	0.640	50.9
0.150	91.5	0.315	80.3	0.480	66.9	0.645	50.3
0.155	91.2	0.320	79.9	0.485	66.4		
0.160	90.9	0.325	79.6	0.490	65.9		
0.165	90.6	0.330	79.2	0.495	65.5		

R = Relacion entre el esfuerzo unitario aplicado, y el punto minimo cedente de la tuberia.

% = Porcentaje disponible de la resistencia original al colapso.

B. GRAFICOS

GRAFICO N° 1
POZO CARABOBO 3

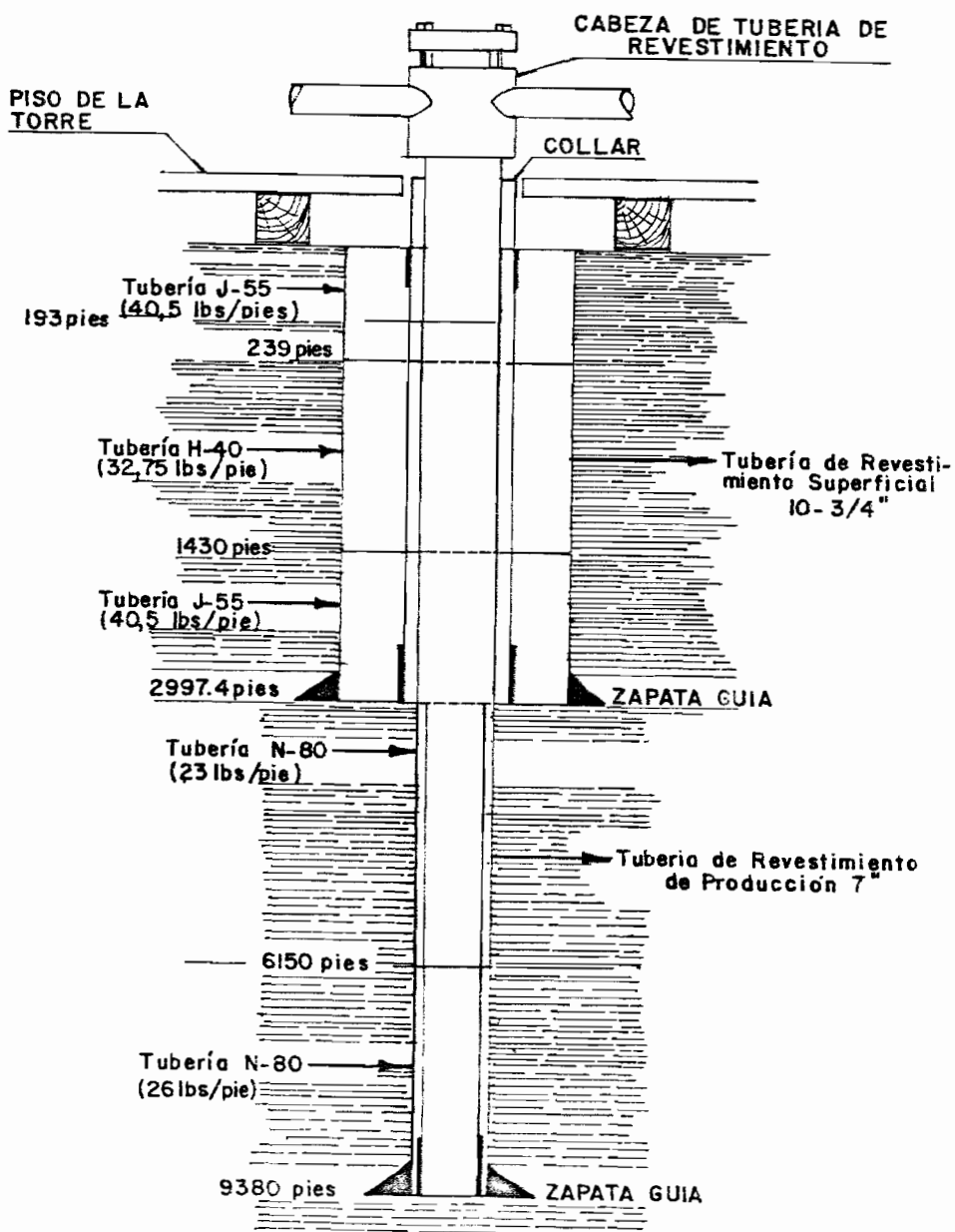


GRAFICO Nº 2
POZO PARAISO 3

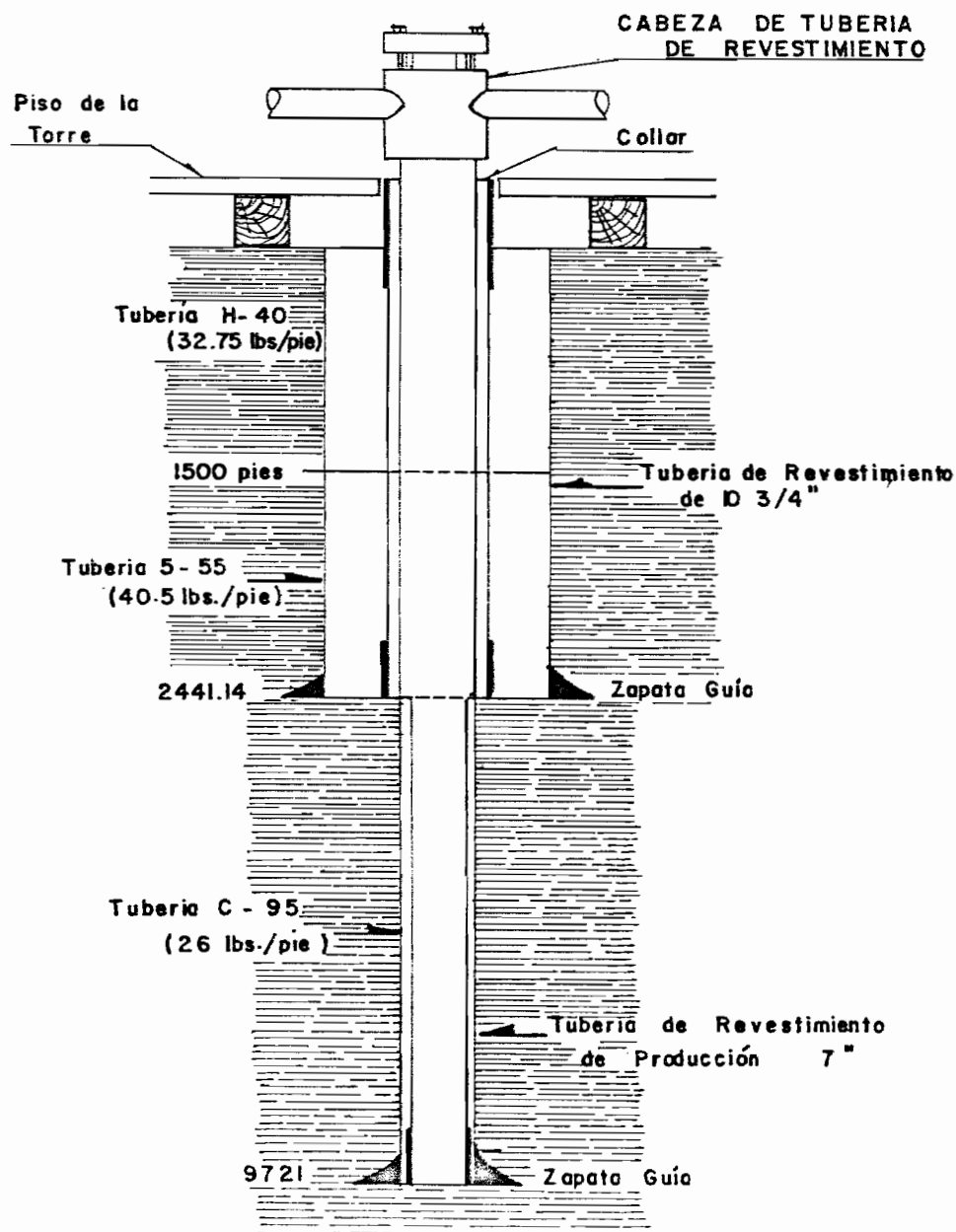
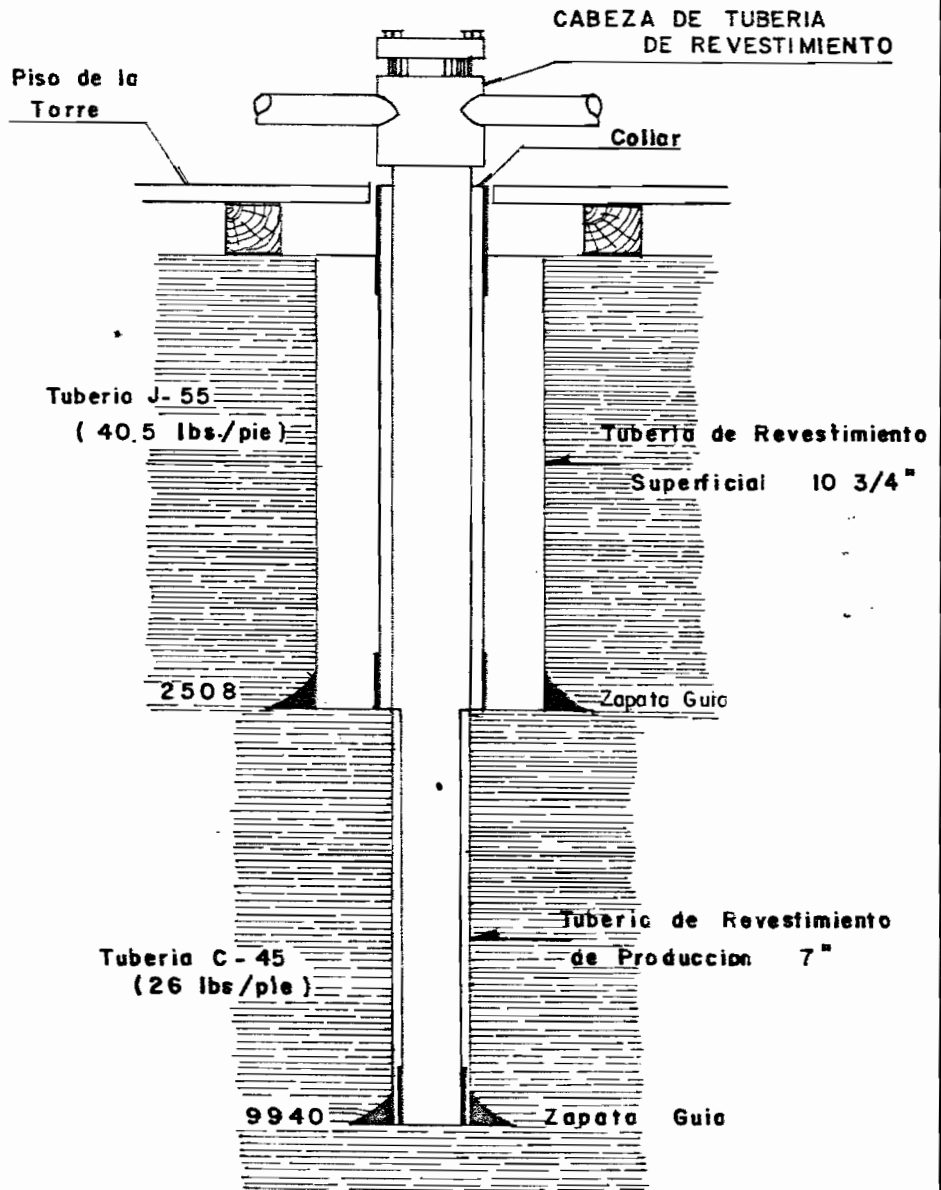


GRAFICO N° 3
POZO PUCUNA 6



BIBLIOGRAFIA

1. ADAMS N., CHARRIER T. Drilling Engineering a Complete Well Planning Aproach, Penn-Well Books, USA, 1985, pp. 116 - 138, pp. 386 - 429.
2. CARDOZO N. Metodologia para analizar y resolver problemas de perforación, Universidad de Zulia, Maracaibo - Venezuela, 1980, pp. 235 - 286.
3. CHARLES L. Ingenieria de Producción de Petróleo, Cuarta Edición, C.E.C.S.A., México D.F., 1964, pp. 459 - 537.
4. GATLIN C. Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions, Pretice - Hall Inc., USA, 1965, pp. 269 - 307.
5. PETROLEUM EXTENSION SERVICE. Fundamentos de Perforación, Tomo 1, USA, 1961, pp. 6-1 - 6-15, pp. 6A-1 - 6A-8.