

PAGINACION VARIA

01174
7
20j

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EL CONCEPTO DE CARGA MAXIMA EN
EL DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA PETROLERA

PRESENTA:

GUILLERMO ALBERTO SALAZAR CRUZ.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO D.F., 1994.



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.

DEDICATORIA

- A mi familia, esa entidad insustituible y nunca accidental en cada caso.

- A mi hermana Clara Eugenia, quien generosamente me entregó todo su apoyo y confianza.

GUILLEMO ALBERTO SALAZAR CRUZ

DEDICATORIA

- A mi amigo José Homero Treviño García, compañero de maestría.

GUILLERMO ALBERTO SALAZAR CRUZ

AGRADECIMIENTO

El autor expresa su agradecimiento :

- AL INGENIERO EUSEBIO CAPITANACHI GONZALEZ.

Director del presente trabajo de tesis.

- AL DOCTOR JESUS RIVERA RODRIGEZ.

Por el apoyo que me brindó durante mi permanencia como estudiante en la maestría, mis más sinceros agradecimientos.

- AL DOCTOR FERNANDO RODRIGEZ DE LA GARZA.

- AL DOCTOR FERNANDO SAMANIEGO VERDUZCO.

- AL DOCTOR VICENTE CASARIEGO GONZALEZ.

- AL MAESTRO EN INGENIERIA FILEMON RIOS CHAVEZ.

- A TODOS LOS PROFESORES CON QUIEN TUVE LA OPORTUNIDAD DE ESTUDIAR.

- A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE DE UNA U OTRA FORMA COLABORARON CON LA REALIZACION DEL PRESENTE TRABAJO.

GUILLERMO ALBERTO SALAZAR CRUZ

INDICE

	página
RESUMEN.	1
INTRODUCCION.	4
METODOLOGIA.	6
CAPITULO I REVISION DE LOS CONCEPTOS FUNDAMENTALES MANEJADOS.	-
1.1. Presión de formación.	9
1.2. Presión normal de formación.	9
1.2.1. Gradiente normal de formación.	10
1.3. Presión anormal de formación.	10
1.3.1. Gradiente anormal de formación.	11
1.4. Presión subnormal de formación.	12
1.5. Presión de sobrecarga.	12
1.5.1. Gradiente de presión de sobrecarga.	12
1.6. Presión de fractura.	13
1.6.1. Gradiente de presión de fractura.	13
1.7. Origen de las presiones anormales.	14
1.7.1. Efecto de compactación.	15
1.7.2. Efecto de diagénesis de sedimentos arcillosos.	15
1.7.3. Efectos de migración de fluidos.	16

1.7.4. Actividad tectónica.	16
1.7.5. Formaciones salinas.	17
Nomenclatura del Capítulo.	18
CAPITULO II.	
DISEÑO DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO	
2.1. Concepto de carga máxima	20
2.2. Criterio general del diseño.	20
2.2.1. Presión interna.	20
2.2.2. Colapso.	20
2.2.3. Tensión.	21
2.2.4. Efectos biaxiales.	21
2.3 Eventos de diseño.	23
2.3.1. Revestimiento superficial.	23
2.3.1.1. Presión interna.	23
2.3.1.1.1. Presión máxima en en el fondo.	23
2.3.1.1.2. Presión máxima en la superficie.	24
2.3.1.1.3. Respaldo de la presión interna.	25
2.3.1.2. Presión de colapso.	26
2.3.1.2.1. Presión en el fondo.	27
2.3.1.2.2. Presión en la superficie.	27
2.3.1.2.3. Respaldo del colapso.	27
2.3.1.3.- Cargas axiales y cálculos de los efectos biaxiales.	28
2.3.2. Revestimiento intermedio.	33

2.3.2.1. Presión interna.	33
2.3.2.1.1. Presión máxima en el fondo.	34
2.3.2.1.2. Presión máxima en la superficie.	35
2.3.2.1.3. Cálculo de las longitudes de diseño de las columnas de lodo y gas	35
2.3.2.1.4 Respaldo a la presión interna	36
2.3.2.2. Presión de colapso.	36
2.3.2.2.1. Respaldo al colapso.	36
2.3.2.3. Cargas axiales y cálculo de los efectos biaxiales.	38
2.3.3. Revestimiento intermedio y tubería corta	38
2.3.4. Revestimiento de producción	39
2.3.4.1. Presión interna	39
2.3.4.2. Presión de colapso	40
2.3.4.3. Cargas axiales y cálculo de los efectos biaxiales	41
2.4. Factores de seguridad.	41
Ejemplo (Diseño de TR intermedia)	43
Nomenclatura del Capítulo	47

CAPITULO III.

CONSIDERACIONES ESPECIALES DE DISEÑO.

3.1 Cambios en la presión interna.	50
3.2 Cambios en la presión externa.	55

3.3 Efectos termales.	57
Ejemplo (Análisis de estabilidad en una TR)	60
Nomenclatura del Capítulo	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	68
BIBLIOGRAFIA.	
ANEXO 1.	
PROGRAMAS DE APLICACION PARA EL DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO, APLICANDO EL CONCEPTO DE CARGA MAXIMA.	
- Diseño de tubería de revestimiento superficial.	
- Diseño de tubería de revestimiento intermedio.	
- Ejemplo (Diseño de tubería de revestimiento intermedio)	
Nomenclatura del ANEXO	
ANEXO 2.	
ANEXO 3.	

LISTA DE FIGURAS.

FIGURA 1

DIAGRAMA DE BLOQUES: PASOS A SEGUIR EN EL DISEÑO DEL REVESTIMIENTO
(anexo 1).

FIGURA 2

DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA MACRO "sup.xlm"
(anexo 1).

FIGURA 3

DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA MACRO "int.xlm"
(anexo 1).

FIGURA 4

CONDICIONES DE PRESION INTERNA
(anexo 1).

FIGURA 5

EVALUACION POR CONDICIONES DE PRESION INTERNA
(anexo 1).

FIGURA 6

EVALUACION POR LAS CONDICIONES DE COLAPSO
(anexo 1).

FIGURA 7

EVALUACION POR TENSION - COMPRESION
(anexo 1).

FIGURA 8

EVALUACION POR CORRECCION DE EFECTOS BIAXIALES (PRESION INTERNA)
(anexo 1).

FIGURA 9

EVALUACION POR CORRECCION DE EFECTOS BIAXIALES (COLAPSO)
(anexo 1).

FIGURA 10

DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE
(anexo 2).

FIGURA 11

EVALUACION DE LA "TR" POR TENSION
(anexo 2).

FIGURA 12

CORRECCION DE LAS RESISTENCIAS AL COLAPSO Y A LA PRESION INTERNA POR CAUSA DE LOS EFECTOS BIAXIALES
(anexo 2).

FIGURA 13

ELLIPSE OF BIAXIAL YIELD STRESS
(anexo 2).

FIGURA 14

GRAFICA PARA DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO INTERMEDIA Y CORTA (PRESION INTERNA).
(anexo 2).

FIGURA 15

**GRAFICAS PARA DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO INTERMEDIA Y CORTA (COLAPSO).
(anexo 2).**

FIGURA 16

**GRAFICAS PARA DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE PRODUCCION (TRP).
(anexo 2).**

FIGURA 17

**ESTADOS DE TENSION DE LA "TR" ANTES Y DESPUES DE LA CEMENTACION.
(Pag. 66)**

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.

FORMA EN QUE LA TENSION AFECTA A LA PRESION INTERNA Y A LA PRESION DE COLAPSO.
(pag. 22).

TABLA 2.

DATOS DE LAS SECCIONES DE LA " TR " (CAPITULO II).
(pag. 61).

RESUMEN

Esta tesis presenta el criterio de carga máxima para el diseño de la tubería de revestimiento en pozos verticales y su manejo como una importante herramienta de trabajo que provee al ingeniero de perforación la posibilidad de realizar rápida y objetivamente el diseño. Para cumplir con este objetivo, se analizó el procedimiento y se diseñaron dos programas de cómputo, los cuales admiten la posibilidad de adoptar diferentes "eventos de diseño". La experiencia adquirida en este proceso permite concluir que el diseño de tuberías de revestimiento debe tener diferentes eventos de diseño para cada zona en particular.

El Software en el cual se desarrollaron los programas es EXCEL 4. A continuación se proporciona un resumen del contenido de la tesis por capítulos.

El primer capítulo revisa los conceptos fundamentales que se manejan a lo largo del trabajo; se definen presiones y gradientes de formación (normales, subnormales y anormales) de acuerdo a los valores establecidos en las zonas costa afuera y en las zonas continentales; también se definen las presiones de sobrecarga y de fractura. Posteriormente se identifican los mecanismos más importantes que tienden a provocar presiones anormales en cuencas sedimentarias.

El segundo capítulo presenta el diseño de la tubería de revestimiento de un pozo. Este capítulo incluye el concepto de carga máxima, el criterio general del diseño (presión interna, colapso, esfuerzo axial de tensión y efectos biaxiales), los eventos de diseño que debe soportar la tubería de revestimiento superficial, intermedia (también intermedia y corta) y de producción; finalmente, los rangos de factores de seguridad que pueden ser adoptados por el personal a cargo del diseño.

En el anexo 1, se presentan dos programas (un programa para el diseño de revestimientos superficiales y otro programa para el diseño de revestimientos intermedios) desarrollados como parte principal del trabajo de la tesis; los programas son interactivos y permiten al ingeniero de diseño especificar los eventos de diseño. La impresión de los resultados muestra paso a paso la metodología que siguen los cálculos, y entrega las gráficas de las condiciones de presión interna, colapso y tensión, a las que va a estar sometida la tubería de revestimiento; también proporciona las gráficas de evaluación de la tubería a la presión interna y colapso corregidas por efecto de esfuerzos biaxiales.

Cada impresión de información o de gráficas, es el resultado de la interacción del ingeniero de diseño con el programa; así, el ingeniero tiene la posibilidad de visualizar el resultado de cada prueba de diseño en el lapso que dure la impresión y la entrada de datos en cada paso. Varias corridas del programa pueden efectuarse

hasta llegar a un resultado óptimo, asociado con los factores de seguridad seleccionados de acuerdo a la confiabilidad de los datos de campo. Un ejemplo de diseño de tubería de revestimiento intermedia es presentado en el anexo 1 de este trabajo.

Los efectos que tienen los cambios de presión interna, cambios de presión externa y cambios de temperatura sobre la tubería de revestimiento son tratados en el tercer Capítulo, al final del cual, un ejemplo sobre el tema es desarrollado.

INTRODUCCION

El diseño y selección de la tubería de revestimiento es uno de los aspectos más importantes en la planeación de la construcción de un pozo petrolero y representa una de las partes más costosas de un programa de perforación; el costo del revestimiento en México es aproximadamente el 30%¹ del costo total de un pozo.

Formaciones geológicas con presiones anormales en el subsuelo, han sido causa de graves problemas en la perforación y la terminación de pozos por fallas en el diseño de tuberías de revestimiento, dando como consecuencia grandes erogaciones económicas por conceptos de reparación o abandono de pozos; así, el diseño óptimo (teóricamente sin riesgo de falla) del programa de revestimiento menos costoso que permita que el pozo sea perforado con seguridad, justifica un considerable esfuerzo de ingeniería en esta fase del programa de perforación.

Este trabajo presenta un estudio sobre el diseño de tubería de revestimiento en pozos petroleros utilizando el concepto de carga máxima como principio fundamental en el proceso de diseño. Con los resultados de este estudio se desarrollaron dos programas de

¹ PEMEX (1992) "Reparación de Tuberías de Revestimiento"; México: Instituto Mexicano del Petróleo. Subdirección General de Capacitación y Desarrollo Profesional.

cómputo que evalúan y grafican las condiciones de presión interna y colapso en el pozo, así como el comportamiento que presentará el revestimiento seleccionado con respecto a estas condiciones.

La intención del presente trabajo es que sea una herramienta técnica de apoyo, para aquellos ingenieros que diseñan tuberías de revestimiento.

Para finalizar, es necesario anotar, que los programas presentados, pueden ser modificados según las conveniencias específicas de diseño.

METODOLOGIA

Para la elaboración del presente trabajo se contempló lo siguiente:

1. Investigación bibliográfica.

La investigación fue basada en la consulta de importantes autores que tratan el tema de diseño de tuberías de revestimiento con el criterio de carga máxima; también se consultó la bibliografía alterna sobre presiones anormales de formación.

2. Comparación de los eventos en el diseño de tubería de revestimiento y de las aplicaciones de factores de seguridad de los autores investigados, con el fin de conocer las variaciones existentes en el uso de los eventos de diseño y los factores de seguridad.

3. La planificación de un programa de cómputo (alimentado por toda la información anterior) para el diseño de tubería de revestimiento, de la siguiente manera:

3.1. Definición del problema que debe resolver el programa; en este caso, la definición de los eventos de diseño seleccionados (Presión interna, colapso, tensión).

3.2 Requerimientos de salida. Esto se refiere a los tipos de salidas de información que debe producir el programa, respondiendo a las siguientes preguntas:

¿Cómo deberían ser los informes?

¿Deben presentársele gráficos al usuario, para que él formule sugerencias y pueda interactuar con el programa?

3.3 Requerimientos de entrada.

Para proporcionar al programa la información a utilizar, se elaboró un método lógico de suministro de datos.

3.4. Selección de las herramientas con capacidad de cumplir con los requerimientos especificados hasta el inciso 3.3.

Después de la correspondiente investigación se seleccionó el software EXCEL 4 para desarrollar el programa.

3.5. Proceso de consecución del software EXCEL 4, equipo y aprendizaje de uso del software.

4. Diseño del programa.

La mejor manera de explicar en una idea como se diseñó el programa es la siguiente: un principio de programación es el hecho de que cualquier problema, independientemente de su tamaño, puede resolverse si se logra dividirlo en pequeñas secciones y correlacionarlas entre sí.

EXCEL, ofrece la posibilidad de programar de manera modular, ya que las macros -programas independientes- tienen la capacidad de llamar -ejecutar- a otros macros; en otras palabras, en EXCEL se pueden crear módulos de programación individuales en forma de macros. Cada macro es un módulo distinto que ejecuta una tarea, y puede acceder a otros módulos de forma que se puede llevar a cabo los distintos pasos de largos procedimientos en forma individual. Esta forma de programación reduce considerablemente la complejidad de los problemas a resolver y por lo tanto, reduce el tiempo empleado en la corrección de errores; además, la utilización de hojas de cálculo -en las cuales se realiza parte de la programación y en las que se imprimen los resultados-, facilita la labor de presentación y documentación de los resultados.

5. Verificación de programas.

Probar cada parte del programa cuando se finalizaba.

CAPITULO I.

REVISION DE LOS CONCEPTOS FUNDAMENTALES MANEJADOS.

1.1.- Presión de formación :

Es la presión ejercida sobre los fluidos en el espacio poroso de la formación.

1.2.- Presión normal de formación.

Bajo condiciones hidrostáticas la presión de formación está definida por:

$$P_n = 0.052 \ De_{ff} \ prof \quad (1.1)$$

donde:

P_n = presión normal de formación (psi).

De_{ff} = densidad de los fluidos de la formación (lb/gal).

$prof$ = profundidad (ft).

0.052 = Factor de conversión que convierte (Lb/gal* ft) a psi.

La ecuación (1.1) es de la forma :

$$P = 0.052 \ (De) \ prof \quad (1.2)$$

donde :

P = presión a la profundidad de interes (psi).

D_e = Densidad equivalente (lb/gal).

0.052 D_e = Gradiente de presión (psi/ft).

$prof$ = Profundidad vertical desde la superficie hasta el punto de interés

Densidad y gradiente de presión equivalentes a una pareja de valores P y $prof$ de acuerdo a la ecuación (1.2) son usados indistintamente en este trabajo; así, un gradiente de presión expresado en unidades de masa por volumen se refiere a la densidad equivalente obtenida de la ecuación (1.2).

1.2.1- Gradiente normal de formación.

Bajo condiciones promedio del subsuelo en regiones costa afuera, el fluido de formación es agua de una salinidad de 80,000 ppm de NaCl con una densidad de 8.91 lb/gal (1.07 g/cm³); éste es el gradiente normal aceptado para regiones costeras.

En regiones continentales, el gradiente de presión normal varía entre los valores de 8.16 a 8.83 lb/gal (0.98 a 1.06 g/cm³); un promedio puede tomar el gradiente normal como un valor igual al del agua dulce, 8.33 lb/gal (1 g/cm³).

1.3.- Presión anormal de formación.

Se define como aquella presión mayor a la presión hidrostática del fluido de la formación; las presiones anormales se pueden describir

de la siguiente manera:

$$P_a = 0.052 G_n \text{ prof} + \Delta P \quad (1.3)$$

ó bién:

$$P_a = 0.052 G_a \text{ prof} \quad (1.4)$$

donde:

P_a = presión anormal de formación (psi).

ΔP = incremento de presión (psi).

G_n = gradiente de presión normal (lb/gal).

prof = profundidad (ft).

G_a = gradiente de presión anormal (lb/gal).

1.3.1- Gradiente anormal de formación.

Se puede establecer que el gradiente anormal es mayor que 8.91 lb/gal (1.07 g/cm³) en regiones costeras y, mayor que 8.33 lb/gal (1.00 g/cm³) en regiones continentales; pero no existe un valor máximo bien definido; en términos generales se acepta un valor de 19.16 lb/gal (2.30 g/cm³).

Los gradientes más altos que se conocen son del orden de 17.49 - 17.91 lb/gal (2.10 - 2.15 g/cm³). También se han encontrado flujos

de agua salada que requieren fluidos de control con gradientes mayores de 20 lb/gal (2.40 g/cm³) Para ser controlados.

1.4.- Presión subnormal de formación :

Se definen como aquella presión menor que la presión hidrostática de los fluidos de la formación.

1.5.- Presión de sobrecarga.

Es la presión ejercida por el peso combinado de la matriz de la roca (formaciones suprayacentes) y los fluidos contenidos en los espacios porosos de la roca (fluido intersticial).

La presión de sobrecarga se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_s = 0.052 G_s \text{ prof} \quad (1.5)$$

donde:

P_s = presión de sobrecarga (psi).

G_s = gradiente de presión de sobrecarga (lb/gal).

1.5.1.- Gradiente de presión de sobrecarga.

El gradiente de presión de sobrecarga es:

$$G_s = (1-\phi) De_r + \phi G_n \quad (1.6)$$

donde:

GRD_s = gradiente de presión de sobrecarga (lb/gal).

D_e = densidad de la roca (lb/gal).

G_n = gradiente normal de la zona en estudio (lb/gal).

ϕ = Porosidad promedio de las formaciones encima del punto de interés (fracción).

El límite superior para un gradiente de presión anormal es el gradiente de sobrecarga.

1.6.- Presión de fractura.

Es la presión requerida para fracturar la roca en la pared del agujero descubierto.

1.6.1.- Gradiente de presión de fractura.

La siguiente ecuación relaciona el gradiente de fractura con los siguientes factores: el gradiente de presión de poro de la formación, el gradiente de presión de sobrecarga y la relación de esfuerzo efectivo.

$$G_{frac} = K (G_s - G_p) + G_p \quad (1.7)$$

donde:

G_{frac} = gradiente de presión de fractura (lb/gal).

G_s = gradiente de presión de sobrecarga (lb/gal).

G_p = gradiente de presión de poro (lb/gal).

K = relación de esfuerzo efectivo (adimensional).

K corresponde a una relación empírica derivada entre los esfuerzos normales verticales y horizontales de la roca, en función de la profundidad. Autores como Mathews y Kelly, Pennebaker, Eaton y Christman, han establecido esta correlación entre las profundidades y K (Ortega Solanao 1989). los valores de K fluctúan en un rango de 0.3 A 0.97 aproximadamente, esto permite concluir que la roca se fractura a presiones inferiores que la correspondiente presión de sobrecarga.

1.7.- Origen de las presiones anormales.

En la escala geológica respecto al tiempo, las presiones anormales se presentan en las tres eras: cenozoica, mesozoica y paleozoica. En la era cenozoica las zonas de presión anormal se encuentran con mayor frecuencia en el periodo terciario; en la era mesozoica se han encontrado presiones anormales en el periodo jurásico que han requerido para su control lodos con densidades mayores a 20 lb/gal (2.40 g/cm²).

Las presiones anormales pueden tener muchos orígenes; a continuación se identifican los mecanismos más importantes que tienden a provocar las presiones anormales en cuencas sedimentarias.

1.7.1.- Efecto de compactación.

El proceso normal de sedimentación involucra el depósito de capas o estratos de partículas de diferentes rocas. A medida que estas capas continúan depositándose, se incrementa la presión de sobrecarga y las capas inferiores de sedimentos son forzadas hacia abajo, por lo tanto se incrementa el contacto grano-grano de sus partículas individuales, y la porosidad disminuye con el aumento de la profundidad.

Mientras el agua de poro pueda escapar tan rápido como lo requiera la velocidad de compactación natural, la presión de poro permanece igual a la presión hidrostática correspondiente, sin embargo, si el camino del agua es bloqueado o restringido, el incremento del esfuerzo de sobrecarga causa presurización en el agua de poro arriba de la presión hidrostática; en este momento el proceso de compactación interna de la porosidad se interrumpe (no se permite que los fluidos del espacio poroso escapen) y la matriz rocosa no aumenta el contacto grano a grano (capacidad de soportar presión de sobrecarga).

La pérdida natural de la permeabilidad a través de la compactación de los sedimentos de grano fino como arcillas o evaporitas pueden crear un sello que permita el desarrollo de una presión anormal.

1.7.2.- Efecto de diagénesis de sedimentos arcillosos.

La diagénesis es una alteración química de los minerales de la roca

por procesos geológicos, incluye la formación de nuevos minerales, redistribución y recristalización.

Se cree que las lutitas y carbonatos sufren cambios en su estructura cristalina; un ejemplo es la posible conversión de montmorillonita en illita, alteración que libera agua de los espacios porosos. Esta alteración contribuye al origen de presiones anormales al incrementar el contenido de agua en el sistema; si la expulsión de estos fluidos se inhibe, entonces el fluido dentro de la roca observa un incremento de carga generando una sobrepresión.

1.7.3.- Efectos de migración de fluidos.

Cuando ocurre el flujo ascendente de fluidos de un yacimiento profundo hacia una formación somera se dice que la formación somera esta cargada.

1.7.4.- Actividad tectónica.

En zonas de movimientos subterráneos significativos se pueden crear ambientes geopresionados por el levantamiento (plegamientos de manera sinclinal) o fallamiento de capas o estratos. Formaciones normalmente compactadas a gran profundidad, pueden ser levantadas a profundidades más someras y si la presión original es retenida entonces se genera una presión anormal.

1.7.5.- Formaciones salinas.

La transmisión de la presión en la sal se asemeja más a la de los fluidos que a la de los sólidos; puesto que la sal es plástica, se deforma y fluye en todas las direcciones.

Es importante especificar que en zonas de presión normal, la estructura rocosa soporta un poco más de la mitad de la sobrecarga (53.5 %) y los fluidos de los poros absorben la sobrecarga remanente (46.5 %); en el caso de la sal que no tiene estructura rocosa, transmite la presión de sobrecarga (en todas las direcciones) hacia la tubería de revestimiento. Por lo anterior cualquier punto dentro de una sección masiva de sal debe ser analizado cuidadosamente en el diseño del revestimiento.

NOMENCLATURA DEL CAPITULO I.

1. D_{ef}Densidad de los fluidos de la formación (lb/gal)
2. D_eDensidad de la roca (lb/gal)
3. G_a^*Gradiente de presión anormal (lb/gal)
4. G_{frac}^*Gradiente de presión de fractura (lb/gal)
5. G_n^*Gradiente de presión normal (lb/gal)
6. G_p^*Gradiente de presión de poro (lb/gal)
7. G_s^*Gradiente de presión de sobrecarga (lb/gal)
8. KRelación de esfuerzo efectivo (adimensional)
9. P_aPresión anormal de formación (psi)
10. P_nPresión normal de formación (psi)
11. $prof$Profundidad (ft)
12. P_sPresión de sobrecarga (psi)
13. ΔPIncremento de presión (psi)
14. ϕPorosidad promedio de las formaciones encima de la
profundidad del punto de interes (fracción)
15. 0.052.....Factor de conversión para convertir (1/gal * ft)
a psi

* Densidad y gradiente de presión equivalentes a una pareja de valores P y $prof$ de acuerdo a la ecuación (1.2) son usadas indistintamente en este trabajo; asi, un gradiente de presión expresado en unidades de masa por volumen se refiere a la densidad equivalente obtenida de la ecuación (1.2).

CAPITULO II.

DISEÑO DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.

Objetivo del diseño de revestimiento en un pozo.

El objetivo principal del diseño de revestimiento en un pozo es aislar las formaciones de alta presión y/o formaciones problema para permitir continuar las operaciones de perforación con seguridad hasta llegar al objetivo programado. El anexo 3 contiene un resumen sobre los métodos de diseño de TR más usados.

La primera tubería que se coloca es la tubería conductora (también llamada estructural o de dirección) y su profundidad de asentamiento depende de prácticas de campo (9 hasta 90 m). Esta tubería provee el soporte inicial del agujero y algunas veces puede llegar a ser la primera línea de revestimiento que proporciona alguna protección en contra de la presión de formación. Las siguientes tuberías de revestimiento que se colocan son:

- * tubería de revestimiento superficial.
- * tubería de revestimiento intermedia.
- * tubería de revestimiento intermedia y corta (liner).
- * tubería de revestimiento de producción.

2.1.- Concepto de carga máxima.

El concepto de carga máxima consiste en diseñar la tubería de revestimiento para soportar condiciones extremas que puedan presentarse durante la perforación.

El concepto de carga máxima presentado en este trabajo está enfocado a pozos verticales con presiones anormales; sin embargo deberán ser analizados otros factores importantes como:

- La presencia de ácido sulfhídrico (H₂S).
- El fracturamiento hidráulico (si hay antecedentes en la zona).

Dichos factores no se contemplan en el presente trabajo.

2.2.- Criterio general del diseño.

La tubería de revestimiento es diseñada para resistir satisfactoriamente condiciones de presión interna, colapso, tensión axial y efectos biaxiales.

2.2.1. Presión interna.

La presión interna está dada por una presión hidrostática dentro de la tubería de revestimiento.

2.2.2. Colapso:

La presión de colapso está dada por la presión que genera la columna hidrostática de los fluidos que se encuentran fuera de la tubería de revestimiento.

2.2.3. Tensión :

Es el vector que precisa el peso que soporta la tubería en el punto de interés. Las fuerzas de tensión son definidas con el cálculo de las fuerzas de flotación actuando en la tubería y el peso propio de la tubería.

2.2.4. Efectos biaxiales :

Es la relación que precisa un incremento o disminución en la resistencia al colapso y a la presión interna de la tubería de revestimiento por efecto de la tensión axial. La Tabla 1., muestra la forma en la cual la tensión afecta tanto a la presión interna como a la presión de colapso.

Para el diseño de la tubería se tiene la siguiente secuencia: Se establecen las condiciones de presión interna a la profundidad de interés; posteriormente, se selecciona la tubería de menor costo que satisfaga la máxima carga a la presión interna; subsecuentemente las cargas de colapso son definidas y la sección tentativa de tubería se evalúa para la resistencia al colapso. Si alguna sección del diseño tentativo no alcanza el límite de la carga de colapso, el grado de la tubería de ésta sección, es reajustada para obtener un valor suficiente de resistencia al colapso; por lo tanto, en este punto el diseño tentativo de la tubería de menor costo satisface ambos requerimientos: presión interna y colapso.

En el siguiente paso se definen las cargas axiales (tensión y compresión) y se evalúa la sección tentativa de tubería para la tensión; si alguna sección de tubería no resiste adecuadamente la carga de tensión, se deberá cambiar el grado o peso unitario.

La resistencia de la tubería a la presión interna y al colapso se ven afectadas por la tensión, debido a los efectos biaxiales, esta corrección se realiza al final del proceso de diseño y puede afectarlo en forma tan significativa, que alguna parte de la sarta que inicialmente fue descartada, es rehabilitada por corrección de efectos biaxiales; incluso, alguna parte que inicialmente fue incluida, puede ser descartada por corrección de efectos biaxiales.

La siguiente tabla muestra la forma en que la tensión afecta a la presión interna y a la presión de colapso.

TABLA 1
FORMA EN QUE LA TENSION AFECTA
A LA PRESION INTERNA Y A LA PRESION DE COLAPSO

TIPO DE CARGA	RESULTADO
tensión	presión interna ---- aumenta
tensión	colapso ---- disminuye
compresión	presión interna ---- disminuye
compresión	colapso ---- aumenta

Finalmente el diseño debe ser corregido por la existencia de formaciones plásticas. Los programas presentados en esta tesis no corrigen el diseño por la existencia de formaciones plásticas.

2.3. Eventos de diseño

A continuación se presentan los eventos de diseño que manejan los programas de cómputo presentados en el presente trabajo.

2.3.1. Revestimiento superficial

2.3.1.1. Presión interna.

La condición de carga de presión interna utilizada para el diseño está basada en una situación de control del pozo que, se supone, ocurre durante la circulación de un brote. Las cargas de presión interna son establecidas definiendo las presiones máximas posibles en la superficie y en el fondo de la tubería.

2.3.1.1.1. - Presión máxima en el fondo.

La presión máxima que puede ser alcanzada en el fondo del revestimiento depende del gradiente de fractura de la formación (la formación se establece como vínculo débil del sistema). La resistencia del revestimiento a la presión interna debe ser igual a la presión de inyección²:

$$P_T = 0.052 (G_{frac} + 11b/gal) L \quad (2.1)$$

2

Autores aplican el concepto de carga máxima con pequeñas diferencias por ejemplo:

a. Los siguientes autores estiman conveniente considerar la presión de inyección (ec 2.1) para el cálculo de la presión máxima en el fondo del revestimiento. Adams, Neal., 1980, 1985; Bourgoyne, Adam T. Jr. et. al. 1991; PEMIEN, 1991;

b. En 1986, Moore utiliza, la presión de fractura en vez de la presión de inyección como el valor de la presión máxima en el fondo del revestimiento.

donde:

G_{fr} = Gradiente de presión de fractura en la zapata del revestimiento (lb/gal).

P_i = presión de inyección (psi).

L = Profundidad de la zapata (ft).

1 lb/gal = margen de seguridad que permite una presión de inyección.

0.052 = Factor de conversión para convertir (lb/gal*ft) a psi.

2.3.1.1.2 - Presión máxima en la superficie.

Este diseño asegura que la presión de fractura de la formación en la zapata del revestimiento será excedida antes de que se alcance la presión que sobrepase la resistencia a la presión interna de la tubería de revestimiento (TR) en la superficie. La presión dentro de la TR se calcula suponiendo que una columna de gas llenó el espacio anular desde la parte inferior de la TR hasta la superficie. La presión superficial máxima ocurre en el evento en que la presión del brote en la zapata de la TR sea igual al gradiente de fractura de la formación; cualquier presión adicional en el asiento de la TR resulta en un reventón subterráneo, por lo que la presión superficial se calcula como la presión de inyección menos la presión del peso de la columna de gas desde la

superficie³.

$$P_{supr} = P_I - P_g \quad (2.2)$$

Donde:

P_{supr} = Presión en superficie dentro de la TR superficial (psi).

P_g = Presión ejercida por la columna del gas dentro de la TR superficial (psi).

Este diseño utiliza la fractura de la formación como un mecanismo seguro de liberación de presión, y evita que la ruptura del revestimiento ocurra en la superficie.

2.3.1.1.3 - Respaldo de la presión interna.

Ya que es improbable que la densidad del fluido de respaldo sea inferior a la densidad de los fluidos de la formación, la densidad del mismo se supone igual a la densidad de los fluidos de la formación⁴

3

Adams, Neal., 1980, 1985; Hourgoyne, Adam T. Jr. et. al. 1991; PEMEX, 1991.
En 1986, Moore utiliza el gradiente de fractura menos la presión del peso de la columna de gas.

4

Adams, Neal., 1980, 1985; Hourgoyne, Adam T. Jr. et. al. 1991; PEMEX, 1991. En 1986, Preston Moore utiliza la densidad del lodo de perforación para obtener los valores de carga de respaldo a la presión interna. EL PROGRAMA TAMBIEN PUEDE SER EJECUTADO ADMITIENDO ESTE EVENTO.

$$P_{ripif} = 0.052 D_{eff} L \quad (2.3)$$

donde:

P_{ripif} = Presión de respaldo a la presión interna en el fondo de la TR superficial (psi).

L = Profundidad de la zapata (ft).

D_{eff} = Densidad de los fluidos de la formación (lb/gal).

Se puede observar que la presión de respaldo a la presión interna en la superficie es cero.

El efecto de la presión interna sobre la TR es definido como la resta entre las cargas de presión interna y las cargas de respaldo a la presión interna multiplicada por un factor de seguridad (FS). FS es un factor de seguridad que corrige efectos de desgaste y posibles daños que pueda sufrir la tubería durante su transportación y manejo en el campo.

2.3.1.2. Presión de colapso.

La condición de carga de colapso utilizada para el diseño, está basada en un severo problema de pérdida de circulación. Las cargas al colapso son ocasionadas por el lodo de perforación que está en el agujero cuando el revestimiento es colocado y cementado.

2.3.1.2.1 Presión en el fondo.

Es la presión ejercida por la columna de lodo en donde es colocada la TR (P_{cl}). A la profundidad de la zapata (L) la presión de la columna de lodo es:

$$P_{cl} = 0.052 D_{e_{lc}} L \quad (2.4)$$

donde:

D_{e_r} = Densidad del lodo de perforación en el cual es colocada la TR (lb/gal).

2.3.1.2.2 Presión en la superficie.

La presión de la columna de lodo en la superficie es cero, por lo tanto esta presión es cero.

2.3.1.2.3 - Respaldo del colapso.

El revestimiento superficial se diseña sin respaldo al colapso (presión de respaldo igual a cero).

La modificación de considerar alturas de respaldo, se toma en cuenta en el diseño de revestimiento intermedio.

El efecto de la presión de colapso sobre la TR esta definida como la resta entre las cargas de colapso y las cargas de respaldo al

colapso multiplicada por un factor de seguridad (FS).

FS es un factor de seguridad que corrige efectos de desgaste y posibles daños que pueda sufrir la tubería durante su transportación y manejo en el campo.

2.3.1.3.- Cargas axiales y cálculo de los efectos biaxiales.

La condición de carga de tensión axial está basado en la suposición de que la TR está atrapada durante la corrida dentro del pozo antes de la operación de cementación.

Las cargas axiales son definidas mediante el cálculo de las fuerzas de flotación (efecto neto de la presión hidráulica actuando en un cuerpo inmerso en un fluido) en los puntos donde se acoplan las diferentes secciones de tubería que forman la sarta de revestimiento (fig 10 - anexo 2) y las fuerzas debidas al peso de la tubería; a continuación se describe la secuencia del procedimiento del cálculo:

a. Se calcula el peso de cada sección de tubería en el aire mediante la siguiente ecuación.

$$W = L_s W_n \quad (2.5)$$

Donde:

W = Peso de una sección de tubería en el aire(lb).

W_n = Peso nominal de tubería (lb/ft).

L_s = Longitud de la sección de tubería (ft).

b. Se calculan las fuerzas de flotación y se manejan vectorialmente a lo largo de la sarta de revestimiento con el objeto de definir las cargas de compresión y/o tensión actuantes sobre la tubería.

Así, manejando de manera vectorial las fuerzas de flotación, se definen los signos de tensión y compresión axial (fig 10 - anexo 2).

El signo menos (-) define una fuerza de compresión axial.

El signo más (+) define una fuerza de tensión axial.

Las fuerzas de flotación se calculan con la siguiente fórmula:

$$B_f = 0.052 D_{lc} \text{ prof } \Delta A_s \quad (2.6)$$

Donde:

B_f = Fuerza de flotación (lb).

ΔA_s = Diferencia de áreas entre las áreas transversales de las secciones de TR acopladas subsecuentemente (in²).

D_{lc} = Densidad del lodo de perforación en el cual es colocada la TR
 ΔA_s da como resultado el signo que define la clase de carga actuante sobre el punto de análisis en la TR. Así, por ejemplo, si la TR consta de dos secciones con áreas 12 y 11 in², respectivamente, la

resta de las áreas se realiza en forma ascendente así:

$$\Delta A_1 = A_2 - A_1 = (11 - 12) = -1 \text{ in}^2.$$

Si se substituye este valor (-1 in^2) en la ecuación que define una fuerza de flotación en ese punto, independientemente del resultado de la operación, la magnitud de la fuerza de flotación en ese punto de la tubería es de compresión; si el resultado es positivo, la fuerza de flotación sera de tensión.

c. Con los datos anteriores se resuelve un diagrama de cuerpo libre de la tubería (fig 10 - anexo 2) y la solución de éste se grafica en un plano cartesiano con ejes horizontal y vértical dados por valores de carga (lb) y profundidad (ft) respectivamente (fig 11- anexo 2).

d. En el plano cartesiano se grafican también las máximas resistencias a la carga axial (en lb) de las tuberías (fig 11). Estas se calculan multiplicando el esfuerzo de cedencia de la tubería (en lb/in^2) por el área de la sección transversal (en in^2).

Hasta este momento se tienen graficadas las cargas axiales a las que está sometida la tubería y la resistencia a la tensión axial de la sarta de revestimiento; pero, La carga máxima de tensión axial está basada en la suposición de que la TR está atrapada durante la corrida dentro del pozo antes de la operación de cementación.

Consecuentemente con lo anterior, la carga axial de diseño considera dos valores de seguridad:

- (i).- Se agrega un factor de 100,000 lb de sobrejalon para las consideraciones de tubería pegada.
- (ii).- Un factor de seguridad (FS) de 1.6

Cuando la carga axial de tensión es superior a 166,666 lb, el factor FS controla el diseño, de lo contrario es el factor de sobrejalon (100,000 lb) el que controla el diseño. Por ejemplo, si se tiene una carga axial de 70,000 lb y se necesita conocer el valor que controla el diseño, éste se conocerá con el siguiente procedimiento.

Aplicando el FS de 1.6, el resultado es 112,000 lb; y aplicando el factor de sobrejalon de 100,000 lb, el resultado es 170,000 lb. Por lo que la respuesta es que el factor de sobrejalon (valor más alto) controla el diseño. De esta manera se asegura que el perforador por lo menos va a tener 100,000 lb para jalar en el caso de una pegadura. Una regla general es que siempre el valor más alto que resulta de la aplicación de los dos factores, -FS y sobrejalon- controla el diseño. Así, cuando la carga axial supere 166,666 lb el

valor resultante de la aplicación del FS siempre supera el valor resultante de la aplicación del factor de sobrejalon.

Estos resultados también son graficados con las cargas axiales a la que está sometida la TR y la resistencia a la tensión axial de la TR (fig 11 - anexo 2).

El siguiente paso es el cálculo de la corrección de la resistencia al colapso y a la presión interna de la tubería por efecto de esfuerzos biaxiales. Esta corrección se realiza acorde con el boletín 5C3 del API (Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe and Line Pipe Properties).

Posteriormente, estos resultados son graficados con las líneas de diseño de presión interna y colapso. En el anexo 2 se muestra una gráfica "efectos biaxiales" que ilustra la manera en la cual los efectos biaxiales pueden afectar las resistencias iniciales a la presión interna y al colapso de las diferentes secciones de la sarta de revestimiento. También se presenta la elipse de esfuerzos biaxiales de Holmsquist and Nadai presentada en el libro de Neal Adams en 1985 ⁵.

⁵Adams, Neal., 1985

2.3.2 Revestimiento intermedio.

El diseño para revestimiento intermedio usa diferentes principios respecto al diseño para revestimiento superficial. Aunque el diseño se realiza de manera similar, la filosofía para diseñar las líneas de presión interna y colapso es modificada.

2.3.2.1.- Presión interna.

Cuando es posible, el procedimiento general descrito para el diseño del revestimiento superficial, también es utilizado para sartas de revestimiento intermedio⁶; sin embargo, los requerimientos de diseño de revestimiento superficial, se convierten en un factor extremadamente costoso para su aplicación en el diseño de revestimiento intermedio, especialmente cuando la alta presión resultante está en exceso de la presión de trabajo del equipo preventor superficial disponible; en este caso, la operación acepta un riesgo ligeramente más grande de pérdida del pozo y selecciona una carga de diseño menos severa.

La carga del diseño está basada en una situación de reventón subterráneo y supone que éste ocurre mientras el brote de gas es circulado⁷, sin embargo la pérdida de lodo aceptable está limitada por la cantidad máxima de presión de trabajo del equipo preventor

⁶

Moore (1986) utiliza el procedimiento de diseño de revestimiento superficial para diseñar el revestimiento intermedio.

⁷La circulación de un brote se puede realizar por medio de dos técnicas de circulación de fluidos, esta son: (a) De densificar y esperar, (b) Del operador

superficial (en el diseño de revestimiento superficial la pérdida de lodo que se acepta es total); ésta presión de trabajo también limita por consecuencia el diseño del revestimiento.

No tiene objeto diseñar un revestimiento que tenga una presión de trabajo más alta que la del equipo superficial (presión máxima de superficie), así que, la carga de presión de reventón superficial está basada en la presión de trabajo del equipo superficial de preventores.

La presión interna en las profundidades intermedias es determinada suponiendo que la porción superior del revestimiento está llena con lodo y la inferior con gas; la profundidad de la interfase lodo-gas es determinada con una ecuación de diseño. El lodo a considerar es el más pesado que será utilizado bajo la TR intermedia. La máxima presión que puede ser alcanzada en el fondo del revestimiento depende del gradiente de fractura de la formación⁸.

2.3.2.1.1- Presión máxima en el fondo.

La máxima presión en el fondo (ec 2.1) es igual a la presión de inyección⁹.

⁸ Adams, 1980. El autor presenta este criterio y lo refiere al documento original (SPE 2560, posteriormente reimpreso por Journal of Petroleum Technology con el No 805-811); 1985; Bourgoyne, et. al., 1991; PEMEX, 1991.

⁹ Adams, 1980; 1985; Bourgoyne, et al., 1991; PEMEX 1991.

2.3.2.1.2- Presión máxima en la superficie.

La presión superficial del revestimiento no necesita ser más grande que la presión de trabajo del equipo superficial, por lo tanto, la máxima presión superficial es igual a la presión de trabajo del equipo superficial¹⁰.

2.3.2.1.3 - Cálculo de las longitudes de diseño de las columnas de lodo y gas.

La presión en cualquier punto del revestimiento es máxima cuando los puntos extremos (presión superficial y presión de inyección) son satisfechos simultáneamente por el siguiente sistema de ecuaciones¹¹.

Primera ecuación:

$$P_I = MXPS + X (0.052 D_{e_{imp}}) + Y (G_g) \quad (2.7)$$

donde:

$MXPS$ = máxima presión superficial o presión de trabajo del equipo superficial(psi).

X = longitud de la columna de lodo, es la profundidad de la interfase lodo - gas (ft).

¹⁰ Ibíd.

¹¹ Ibíd.

- Y = longitud de la columna de gas (ft).
 De_{imp} = Densidad del lodo más pesado a ser utilizado
 debajo de la zapata (lb/gal).
 G_g = gradiente del gas (psi/ft).
 P_i = presión de inyección en la zapata (psi).

Segunda ecuación:

$$X + Y = L \quad (2.8)$$

donde:

L = profundidad de la zapata (ft).

Resolviendo este sistema de ecuaciones se obtienen las longitudes de las columnas de lodo y gas.

2.3.2.1.4.- Respaldo a la presión interna.

El respaldo a las cargas de presión interna en el diseño de la TR intermedia se calculan de la misma manera que en el diseño de la TR superficial.

2.3.2.2.- Presión de colapso.

Las cargas de colapso son proporcionadas por el lodo donde es colocado el revestimiento¹². Las cargas de presión de colapso son calculadas de la misma manera que en el diseño de TR superficial.

12

Adams, 1980; Bourgoynne, et. al. 1991; PEMEX, 1991.

En un análisis de las cargas de colapso en el momento de la cementación se utiliza la(s) densidad(es) de la(s) lechada(s) con que se cementado el revestimiento.

2.3.2.2.1 - Respaldo al colapso.

En el peor caso, la base del revestimiento deberá ser capaz de soportar por lo menos una columna de fluido nativo de la formación. El respaldo es calculado como una columna del lodo más pesado a ser usada debajo del revestimiento, que puede ser soportada por la formación¹³.

La siguiente ecuación relaciona los gradientes con sus correspondientes longitudes de columnas.

$$0.052 G_f L = 0.052 G_{imp} LBK \quad (2.9)$$

donde:

- L = Profundidad de la zapata (ft).
- LBK = Longitud del respaldo (ft).
- G_f = Gradiente de los fluidos de la formación (lb/gal).
- G_{imp} = Gradiente del lodo más pesado a utilizarse debajo de la zapata (lb/gal).

Otros casos diferentes al gradiente de los fluidos de la formación pueden ser considerados (por ejemplo: Considerar que la formación puede resistir una columna de lodo con una densidad menor o mayor

¹³

Adams, 1980; 1985.

que G_f ¹⁴), El programa considera la posibilidad de este cambio de variable.

2.3.2.3.- Cargas axiales y cálculo de los efectos biaxiales.

Utiliza la norma presentada en el boletín 5C3 del API.

2.3.3.- Revestimiento intermedio y tubería corta.

Si una tubería corta (liner) de revestimiento es programado para completar el revestimiento del pozo, su diseño sigue el mismo método que el diseño del revestimiento intermedio, y se debe aplicar el mismo criterio de carga máxima presentado en el principio de este Capítulo. Así, la tubería corta y la TR intermedia se diseñan paralelamente utilizando la presión de inyección calculada a la profundidad de la tubería corta, así como la presión superficial máxima a utilizarse también a la profundidad de la tubería corta (anexo 2). En otras palabras, se hace la evaluación de las condiciones de presión interna y de las condiciones de colapso a la profundidad total (profundidad de la tubería corta), como si se fuera a diseñar una sola TR intermedia; posteriormente se realiza el diseño teniendo en cuenta la profundidad a la cual se van a traslapar ambas tuberías.

Ninguno de los programas presentados en este trabajo tiene el objetivo de servir como herramienta para el diseño de TR intermedia

14

Bourgoyne, et. al. 1991.

y tubería corta. Pero, el programa que sirve como herramienta para diseño de TR intermedia puede ser usado DE MANERA PARCIAL en el diseño de TR intermedia y tubería corta. Esto es, cuando se diseñan

unas TR intermedia y corta, los resultados del programa son válidos sólo en lo que corresponde a la evaluación del revestimiento para las condiciones de presión interna y colapso.

Para el cálculo de las cargas de tensión y compresión, así como para el cálculo de la corrección del estado de esfuerzo de la tubería por causa de los efectos biaxiales, se debe elaborar un programa alternativo (subrutina) en excel o, realizar el procesamiento de los datos a mano.

2.3.4.- Revestimiento de producción.

El presente trabajo no incluye un programa que sirva como herramienta de ayuda en el diseño de TR de producción (TRP), pero, a continuación se explica el procedimiento del diseño para una TR de producción.

2.3.4.1.- Presión interna.

El diseño de presión interna involucra dos suposiciones (Pueden requerirse condiciones diferentes, en otros casos se debe de hacer el ajuste requerido).

Primera suposición: El fluido de empaque es igual en densidad al peso del lodo donde la sarta fue corrida. El resultado de suponer

"este evento de diseño" es que el efecto de las presiones hidráulicas impuestas por el fluido de empaque dentro de la TRP se cancela con el efecto de las presiones hidráulicas ejercida por el respaldo a la presión interna en la parte externa de la TRP (ver anexo 2).

Segunda suposición: Se supone la posibilidad de que una fuga se produzca en la tubería de producción. El evento de diseño supuesto es que por medio de esta fuga, en algún momento, una presión muy cercana a la presión del fondo del pozo (en realidad se considera la presión de fondo del pozo) sea transmitida a la superficie por una burbuja de gas o un tirante de burbujas de gas (ver anexo 2).

2.3.4.2. Presión de colapso.

Se supone la posibilidad de que aparezca una fuga en la base de la tubería de producción; el diseño se realiza teniendo en cuenta que el yacimiento ya se encuentra depresionado y que el lodo confinado entre la TRP y la tubería de producción se ha escurrido por gravedad (la presión de fondo del agujero ya no puede contrarrestar el peso de la columna de lodo). De esta manera, en el diseño, la tubería se considera vacía y, las cargas de colapso son proporcionadas por la presión debido a una columna hidrostática con densidad igual a la del lodo en el que fue puesta la TRP (ver anexo 2).

2.3.4.3. Cargas axiales y cálculo de los efectos biaxiales.

Utiliza el mismo criterio que usa el diseño de la tubería de revestimiento superficial.

2.4.- Factores de seguridad.

Los factores de seguridad (PEMEX 1991) tienen gran importancia en el diseño de TR; este factor asegura que el esfuerzo real de trabajo no coincida con el máximo esfuerzo permisible (presión interna, colapso, tensión).

La selección del factor de seguridad depende de los siguientes factores:

- a. La confiabilidad y exactitud de los datos de esfuerzos usados para diseñar (en el caso de TR que no utilizan normas API el fabricante debe garantizar sus resistencias).
- b. El grado de similitud entre las condiciones de servicio y las condiciones de prueba usadas para determinar los datos de esfuerzos.
- c.- La confiabilidad y exactitud de las cargas supuestas para el diseño. Si la carga supuesta se aproxima a la del servicio, el factor de seguridad se puede reducir tanto como el ingeniero determine.
- d. Las consecuencias de fallas operacionales de manejo de los tubulares (daños en el cuerpo de la tubería cuando ésta es

transportada y cargada) por descuido del personal o por falta de entrenamiento del mismo, determinan el uso de altos factores de seguridad.

Estudios del API (PEMEX 1991) reportan los siguientes rangos de factores de seguridad que han sido adoptados por un número considerable de compañías.

Diseño por:	Factor de seguridad:
Colapso:	1.0 - 1.50
Presión interna:	1.0 - 1.75
Tensión:	1.5 - 2.0

Los factores de seguridad mas comunmente usados reportados por los estudios del API son:

Diseño por:	Factor de seguridad:
Colapso:	1.125
Presión interna:	1.1
Tensión:	1.8

Ejemplo.

Diseño de una TR intermedia de 10.75 in. de diámetro externo.

Se aplicará el concepto de carga máxima.

Datos:

- * Profundidad de asentamiento: 13,124 ft.

- * Gradiente de fractura en la zapata: 0.868 psi/ft (16.7 lb/gal).

- * Gradiente de presión del gas de la formación: 0.115 psi/ft.

- * Densidad del lodo a utilizarse debajo de la zapata : 15 lb/gal.

- * Máxima presión superficial: El equipo disponible en superficie posee una capacidad de trabajo de 4900 psi.

- * Construcción de la línea de carga de respaldo a la presión interna con un gradiente de 0.477 psi/ft (9.18 lb/gal).

- * Densidad del lodo en el cual es colocada la TR: 13.4 lb/gal.

- * Construcción de la línea de respaldo al colapso con un gradiente de 0.477 psi/ft (9.18 lb/gal).

Los detalles de cada cálculo para el desarrollo del diseño se presentan en el anexo 1.

SOLUCION:

a. Análisis de las condiciones de presión interna para el diseño.

- Longitudes de diseño de las columnas de lodo y gas:

Longitud de la columna (ft)

Lodo	gas
8,526.42	4,597.58

- Cargas de presión interna correspondientes a la anterior condición.

Profundidad (ft)	presión (psi)
0	4,900
8,526.42	7,560
13,124	5,937

En donde el segundo valor corresponde a la presión en la profundidad de la interfase lodo - gas.

La TR que cumple con los requerimientos de presión interna para las condiciones de servicio correspondientes a la presión de trabajo del equipo superficial se puede ver en el anexo 1, y la evaluación gráfica de la TR por condiciones de presión interna se puede ver en la figura 5.

Como se puede observar, la TR se diseña en función del equipo de trabajo en superficie. Si cambia la capacidad de trabajo del equipo disponible en superficie, los requerimientos de presión interna de servicio para la selección de la TR también cambiarán.

b. Análisis de las condiciones de colapso para el diseño.

La evaluación de la TR por colapso es independiente de la capacidad de trabajo del equipo en superficie.

- Longitud de la columna de lodo de densidad 15 lb/gal que proporciona las cargas de respaldo al colapso (LBK):

Si el valor del gradiente de presión de poro de una posible zona de pérdida de circulación localizada en la formación debajo de la zapata se toma como 0.477 psi/ft (i.e., una densidad equivalente de lodo de 9.18 lb/gal), LBK tiene una longitud de 8,031.89 ft medida desde la zapata hacia la superficie (ver fig 6).

Como se puede observar, el diseño de la TR por condiciones de colapso está en función de la condición de pérdida de circulación al profundizar la siguiente sección del pozo.

Es importante anotar que si esta condición de pérdida de circulación no se toma en cuenta y por consiguiente la TR se considera vacía para el diseño, la carga de servicio de la TR en la

profundidad de 13,124 ft se incrementaría en un 300 %, en 8,000 ft se presentaría un incremento de 150 % y arriba de 5,092 no existe incremento (ver figura 6.)

La evaluación gráfica para las condiciones de colapso de la TR seleccionada en (a) se puede ver en la gráfica 6. De esta manera la TR cumple con las condiciones de diseño de presión interna y colapso.

c. Estado de tensión de la TR al momento de la colocación en el pozo.

Como se puede ver en la figura 7 la evaluación por tensión de la TR es satisfactoria.

d. Corrección de las resistencias de la TR a la presión interna y al colapso por causa de efectos biaxiales.

Como se puede ver en las figuras 8 y 9, la evaluación de la TR después de la corrección de las resistencias a la presión interna es satisfactoria.

NOMENCLATURA DEL CAPITULO II.

1. A_sArea transversal de tubería (in²).
2. B_fFuerza de flotación (lb).
3. De_fDensidad de los fluidos de la formación
(lb/gal).
4. De_{ic} Densidad del lodo de perforación en el cual es
colocada la TR (revestimiento) (lb/gal).
5. De_{imp}Densidad del lodo más pesado a utilizarse
debajo de la zapata (lb/gal).
6. FSFactor de seguridad o de diseño (adim).
7. G_f^*Gradiente de los fluidos de la formación.
(lb/gal).
8. G_{frac}^*Gradiente de presión de fractura (lb/gal).
9. G_gGradiente de presión del gas (psi/ft).
10. G_{imp}^*Gradiente del lodo más pesado a utilizarse
debajo de la zapata (lb/gal).
11. LProfundidad de la zapata (ft).
12. L_sLongitud de la sección de tubería (ft).
13. LBKLongitud de la columna de lodo que respalda
el colapso en la TR intermedia (ft).
14. $MXPS$Máxima presión superficial en la TR intermedia
o presión de trabajo del equipo superficial
(psi).

15. P_dPresión ejercida por la columna de lodo en donde es colocada la TR (psi).
16. P_gPresión ejercida por la columna de gas dentro de la TR superficial (psi).
17. P_iPresión de inyección en la zapata (psi).
18. P_{rpl}Presión de respaldo a la presión interna en el fondo de la TR superficial (psi).
19. P_{supr}Presión en superficie dentro de la TR superficial (psi).
20. WPeso de una sección de tubería en el aire (lb).
21. W_nPeso nominal de tubería (lb/ft).
22. X Longitud de la columna de lodo (utilizada en el cálculo de cargas de presión interna para TR intermedia), es la profundidad de la interfase lodo-gas (ft).
23. Y Longitud de la columna de gas (utilizada en el cálculo de cargas de presión interna para TR intermedia) (ft).
24. 1 lb/gal.....Margen de seguridad que permite una presión de inyección.
25. 0.053Factor de conversión para convertir (lb/gal * ft) a psi.

26. ΔA_i ,.....Diferencia de áreas entre las áreas transversales de las secciones de la TR acopladas subsecuentemente (in^2).

* Densidad y gradiente de presión equivalentes a una pareja de valores P y ρ de acuerdo a la ecuación (1.2) son usadas indistintamente en este trabajo; así, un gradiente de presión expresado en unidades de masa por volumen se refiere a la densidad equivalente obtenida de la ecuación (1.2).

CAPITULO III.

CONSIDERACIONES ESPECIALES DE DISEÑO.

En el Capítulo dos las consideraciones de diseño están basadas en condiciones seleccionadas de carga de presión interna, colapso y tensión axial; en este capítulo se consideran condiciones adicionales que son causadas por cambios en la presión interna, cambios en la presión externa y efectos termales.

3.1 Cambios en la presión interna.

En el Capítulo dos las condiciones de carga de diseño están basadas en la máxima presión interna anticipada que puede ocurrir durante operaciones de control de pozo y durante la vida productiva del pozo; sin embargo, cambios en la presión interna también pueden causar cambios significativos en el esfuerzo axial, estos cambios en el esfuerzo axial pueden ocurrir durante y después de que la TR es cementada y colgada.

Durante las operaciones de cementación la TR es expuesta a alta presión interna por causa de la presión hidrostática de la lechada de cemento y de la presión de la bomba impuesta para desplazar la lechada; esto crea aumento en la presión interna y un incremento en el esfuerzo axial. Mientras que la presión interna dentro de la TR

es reconocida y mantenida dentro de los límites permisibles por el personal de campo, el incremento en las cargas de tensión axial algunas veces es despreciado. La presión superficial dentro de la TR causa una carga axial dada por

$$\Delta F_a = P_{pb} A_i \quad (3.1)$$

donde:

ΔF_a = Cambio de fuerza axial (lb)

P_{pb} = Presión permitida a la bomba (psi).

A_i = Area interna de la TR o area correspondiente al diámetro interno de la tubería (in²).

El cambio de fuerza axial depende del peso efectivo que soporta la TR en el punto de interés; de esta forma la presión permitida a la bomba es calculada y el incremento de fuerza axial estará dentro del límite permisible de tensión axial.

Un incremento en la presión interna causa un incremento en el esfuerzo tangencial en la pared de la TR, por lo tanto la TR tiende a contraerse, similarmente un decremento en la presión interna tiende a causar elongación en la TR. Sin embargo, si la TR esta cementada y colgada en la cabeza del pozo puede que no esté libre a la contracción o elongación en respuesta a cambios de presión

interna. De acuerdo a la ley de Hooke, esto puede causar cambios en el esfuerzo axial que son directamente proporcionales a la deformación que es evitada.

La ley de Hooke es aplicable si:

- a. La TR fue colgada con suficiente tensión para prevenir que ocurra un pandeo helicoidal en una parte de la porción libre de la TR arriba de la cima del cemento.
- b. El esfuerzo axial de servicio de la TR es menor que el esfuerzo de cedencia del acero.

La deformación axial que podría ocurrir si la TR estuviera libre al movimiento¹⁵ está dada por

$$\Delta \epsilon_z = - \frac{\mu}{E} \Delta (\sigma_x - \sigma_t) \quad (3.2)$$

donde:

$\Delta \epsilon_z$ = Deformación axial (adimensional)

E = Módulo de Young o de elasticidad ($30 \cdot 10^6$ psi)

¹⁵Lubinski, 1988.

μ = Módulo de poisson (0.3)

σ_r = Esfuerzo radial (psi)

σ_t = Esfuerzo tangencial (psi)

Ya que

$$\sigma_r = \frac{-P_i r_i^2 (r_o^2 - r^2) - P_e r_o^2 (r^2 - r_i^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (3.3)$$

y

$$\sigma_t = \frac{P_i r_i^2 (r_o^2 - r^2) - P_e r_o^2 (r_i^2 + r^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (3.4)$$

La suma del esfuerzo radial y tangencial es

$$(\sigma_r + \sigma_t) = 2 \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_e}{r_o^2 - r_i^2} \quad (3.5)$$

$$(\sigma_r + \sigma_t) = 2 \frac{A_i P_i - A_e P_e}{A_e - A_i} \quad (3.6)$$

$$(\sigma_r + \sigma_t) = \frac{2}{A_s} (A_i P_i - A_e P_e) \quad (3.7)$$

donde:

r_i = Radio interno (in)

r_o = Radio externo (in)

P_i = Presión interna (psi)

P_e = Presión externa (psi)

A_s = Area transversal de la tubería (in²)

y el cambio en el esfuerzo radial y tangencial causado por un cambio en la presión interna esta dado por:

$$\Delta(\sigma_r + \sigma_t) = 2 \frac{A_i}{A_s} \Delta P_i \quad (3.8)$$

donde:

ΔP_i = Cambio en la presión interna (psi)

Esto causaría una deformación axial dada por:

$$\Delta \epsilon_z = - 2 \frac{\mu}{E} \frac{A_i}{A_s} \Delta P_i \quad (3.9)$$

Donde el signo negativo indica un decremento en la longitud por un incremento en la presión interna. Si esta deformación se evita, la ley de Hooke es aplicable a la deformación total y se desarrollaría un esfuerzo axial de tensión que es dado por:

$$\Delta \sigma_z = 2\mu \frac{A_i}{A_s} \Delta P_i \quad (3.10)$$

donde:

$\Delta \sigma_z$ = Cambio de esfuerzo axial (psi)

3.2 Cambios en la presión externa

Un aumento en la presión externa de la TR causa un decremento en el esfuerzo tensional tangencial (o lo que es lo mismo, un aumento en el esfuerzo de compresión tangencial); Esto puede causar que el diámetro de la TR disminuya y la longitud de la TR se incremente. Similarmente una reducción en la presión externa puede causar que la TR se acorte. Si la TR está cementada y colgada en la cabeza del pozo con suficiente tensión para prevenir el pandeo helicoidal,

puede que la TR no esté libre a la contracción o elongación en respuesta presiones externas cambiantes; esto puede causar esfuerzos axiales que son directamente proporcionales a la deformación que no se permite desarrollar. La ecuación 3.7 da el cambio en el esfuerzo radial y tangencial causado por un cambio en la presión externa, este cambio es

$$\Delta(\sigma_r + \sigma_t) = -2 \frac{A_e}{A_s} \Delta P_e \quad (3.11)$$

donde:

A_e = Area externa de la tubería (in²).

ΔP_e = Cambio en la presión externa (psi).

substituyendo esta ecuación en 3.2 da

$$\Delta \epsilon_z = +2 \frac{\mu}{E} \frac{A_e}{A_s} \Delta P_e \quad (3.12)$$

Donde el signo positivo indica un aumento en la longitud para un incremento dado en la presión externa. Si esta deformación se evita, la ley de Hooke es aplicable a la deformación total y se desarrollaría un esfuerzo axial de compresión que es dado por

$$\Delta \sigma_z = - 2\mu \frac{A_e}{A_s} \Delta P_e \quad (3.13)$$

Donde el signo negativo indica un decremento en el esfuerzo de tensión en la TR por un incremento en la presión externa.

3.3 Efectos termales.

Los cambios de temperatura encontrados después de que la TR es cementada y colgada en la cabeza del pozo resultan en un esfuerzo axial que debe ser considerado. La deformación axial causada por un cambio de temperatura es determinada del coeficiente de expansión térmica con la siguiente ecuación¹⁶.

$$\Delta \epsilon_z = \alpha_t \Delta T \quad (3.14)$$

donde:

α_t = Coeficiente de expansión térmica.

ΔT = Cambio de temperatura (°F)

El coeficiente promedio de expansión térmica para el acero es

¹⁶Popov, 1990.

$6.667 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{F}$. Así, si la TR es cementada y colgada con suficiente tensión para prevenir el pandeo, y el esfuerzo axial es menor que el esfuerzo de cedencia, entonces el cambio en el esfuerzo axial está dado por

$$\Delta\sigma_z = -E \alpha_t \Delta T \quad (3.15)$$

W.C.Goins tomó estas condiciones y publicó una serie de dos artículos¹⁷ "Better Understanding Prevents Tubular Buckling Problems," WORLD OIL, Part 1 (Jan 1980), Part 2 (Feb 1980)., en donde presenta un análisis sobre las fuerzas involucradas en el pandeo de TR. Como resultado de este análisis Goins obtiene la fuerza de pandeo que actúa en la TR (F_b)

$$F_b = F_s - F_a \quad (3.16)$$

donde:

F_b = Fuerza de pandeo (lb).

F_a = Fuerza axial (lb).

F_s = La fuerza de estabilidad (lb).

¹⁷Goins, W.C. 1980

Goins relacionó de esta manera la fuerza de pandeo (buckling force) con la la fuerza axial (axial force) y la fuerza de estabilidad ¹⁸ (stability force). En una sarta de TR si la fuerza axial es menor que la fuerza de estabilidad, existe pandeo abajo del punto neutro. De esta manera si se conoce el estado de esfuerzo axial que tendría la sarta en el momento de la cementación (como realmente sucede), al finalizar la perforación del siguiente intervalo, los incrementos y decrementos de esfuerzo axial (de acuerdo a la ley de Hooke) en la sarta definen un nuevo estado de tensión y F_c es conocida; el cambio en la fuerza de estabilidad es calculada y el valor de la fuerza de pandeo se puede predecir.

A continuación se desarrollará un ejemplo que muestra de manera gráfica el cambio del estado de fuerza axial que tiene la TR cuando es sometida a varias condiciones de carga. Los resultados de este ejemplo servirán de base para obtener conclusiones importantes de este Capítulo.

¹⁸Klinkenberg en un análisis sobre la estabilidad de un tubo en presencia de presiones internas y externas demostró que el punto neutro se encuentra donde el promedio de la suma de los esfuerzos radial y tangencial es igual al esfuerzo axial, esto es.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r + \sigma_t}{2}$$

Chesney y Garcia usaron una fórmula equivalente utilizando presiones internas y externas, ellos llamaron al promedio de la suma del esfuerzo radial y tangencial la fuerza de estabilidad (F_s)

$$F_s = A_i P_i - A_o P_o$$

El punto neutro existe donde la fuerza de estabilidad iguala la carga axial en la tubería. (con referencia al pie de pagina No 17)

Ejemplo.

Una TR intermedia de 9.625 in, compuesta de 3 secciones va a ser colocada a 10,000 ft en un pozo vertical y se cuenta con los siguientes datos.

Densidad del lodo de perforación = 10 lb/gal

Altura de la cementación = 2,000 ft

Densidad de la lechada de cemento = 15.7 lb/gal

Subsecuentemente el pozo va a ser profundizado a 15,000 ft y la densidad del lodo será incrementada de 10 a 16 lb/gal.

A causa de la mayor profundidad del pozo la temperatura del lodo circulante elevará el promedio de temperatura de la TR a 26.5 °F por encima de la temperatura presente después de la cementación.

A continuación se desarrollará un análisis de estabilidad con el fin de establecer la porción de la TR que podría tener una tendencia al pandeo y recomendar una(s) solución(es) para evitar el posible pandeo de la TR.

TABLA 2

DATOS DE LAS SECCIONES DE LA " TR " (UNICO EJEMPLO DEL CAPITULO III).

SECCIONES			
	1	2	3
Profundidad del intervalo (ft)	6,200 a 10,000	1,800 a 6,200	0 a 1,800
Longitud (ft)	3,800	4,400	1,800
Grado	P-110	P-110	P-110
Peso (lb/ft)	40.0	43.5	47
Diámetro interno (in)	8.835	8.755	8.681
Area interna (in ²)	61.31	60.20	59.19
Area externa (in ²)	72.76	72.76	72.76
Area del acero (in ²)	11.454	12.559	13.572

SOLUCION:

a. Análisis de estabilidad de la TR al tiempo en que es rodada (esto es en las condiciones iniciales).

.- FUERZAS DE FLOTACION

Prof (ft)	Flotación (lb)
10,000	- 59,561
6,200	- 3,578
1,800	- 945
0	0

.- FUERZAS DE TENSION (F_a) Y DE ESTABILIDAD (F_s)

	F_a (lb)	F_s (lb)
Parte baja de la sección 1	- 59,561	- 59,561
Parte alta de la sección 1	92,439	- 36,915
Parte baja de la sección 2	88,860	- 40,493
Parte alta de la sección 2	280,260	- 11,756
Parte baja de la sección 3	279,315	- 12,702
Parte alta de la sección 3	363,915	0

Análisis de los resultados: Como se puede observar en los resultados y en la fig 17, los valores de F_a y F_s a 10,000 ft son iguales (i.e., el punto neutro esta localizado en el fondo del pozo) y en ningun punto de la TR la fuerza de estabilidad es mas alta que la fuerza de tensión; por lo tanto no existe tendencia al pandeo.

b. Análisis de estabilidad de la TR al tiempo de terminar la cementación

.- FUERZAS DE FLOTACION

Prof (ft)	Flotación (lb)
10,000	- 102,708
6,200	- 3,578
1,800	- 945
0	0

.- FUERZAS DE TENSION (F_a) Y DE ESTABILIDAD (F_s)

	(F_{a2}) (lb)	(F_{s2}) (lb)
Parte baja de la sección 1	- 102,708	- 102,686
Parte alta de la sección 1	43,085	- 36,914
Parte baja de la sección 2	39,506	- 40,493
Parte alta de la sección 2	230,906	- 11,756
Parte baja de la sección 3	229,916	- 12,702
Parte alta de la sección 3	314,561	0

Análisis de los resultados: Existe un nuevo estado de tensión axial (fig 17) y la diferencia entre los valores de F_{a2} y F_{s2} a 10,000 ft es 22 lb (i.e., el punto neutro esta localizado prácticamente en el fondo del pozo). Por lo tanto, no existe tendencia al pandeo.

c. Análisis de estabilidad de la TR después de perforar 15,000 ft

.- FUERZAS DE FLOTACION

.- El incremento en la densidad del lodo causa un cambio total de las fuerzas de flotación de - 2,520 lb, la distribución de las fuerzas de flotación queda de la siguiente manera

Prof (ft)	Flotación (lb)
6,200	- 5,531
1,800	- 1,512
0	0

.- FUERZAS DE TENSION (F_t) Y DE ESTABILIDAD (F_s)

.- De acuerdo a la ley de Hooke, el incremento de presión interna en la tubería causa una fuerza tensil de 44,948 lb.

.- De acuerdo a la ley de Hooke, el incremento promedio de la temperatura en la tubería causa una fuerza tensil de - 68,778 lb.

El cambio total de fuerza axial causado en la TR después de profundizar a 15,000 ft es - 26,350 lb (44,948 - 68,778 - 2,520). Este cambio total de fuerza axial causa un nuevo estado de tensión axial en la TR. Este nuevo estado de tensión axial es el siguiente.

	(F_{a3}) (lb)	(F_{s3}) (lb)
8,000 ft	- 49,059	105,398
Parte alta de la sección 1	16,735	81,683
Parte baja de la sección 2	13,156	75,957
Parte alta de la sección 2	204,556	22,052
Parte baja de la sección 3	203,566	20,539
Parte alta de la sección 3	288,211	0

Análisis de los resultados: Existe un nuevo estado de tensión axial (fig 17) y la fuerza de estabilidad (F_{s3}) es igual a la carga axial (F_{a3}) en aproximadamente a la profundidad de 5,050 ft (i.e., el punto neutro se encuentra aproximadamente a 5,050 ft). La fuerza de pandeo (F_b) tiene un valor de 154,457 lb.

Recomendación

La TR presenta un valor de fuerza de pandeo igual a 154,457 lb, por lo tanto, si la TR es colocada con una tensión adicional igual a 154,457 lb, el pandeo puede ser prevenido.

Otra solución al problema de pandeo de este ejemplo es colocar la cima del cemento sobre el punto neutro de pandeo y la tendencia de pandeo quedaría eliminada

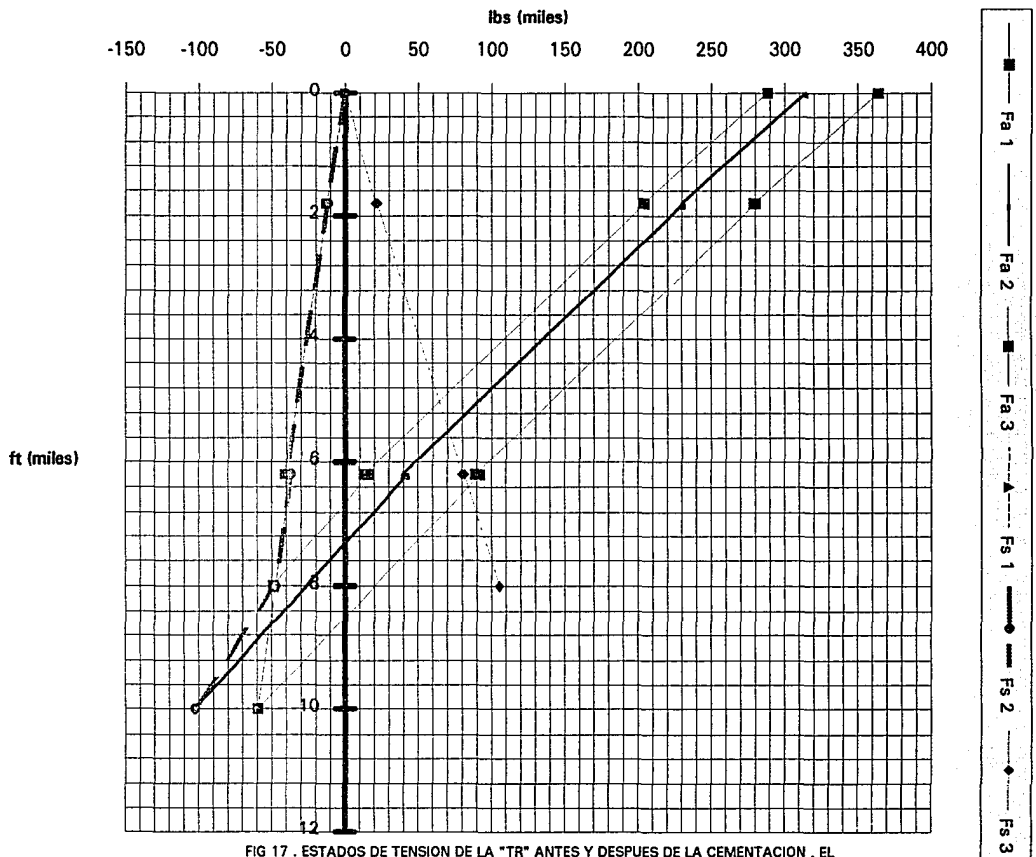


FIG 17 . ESTADOS DE TENSION DE LA "TR" ANTES Y DESPUES DE LA CEMENTACION . EL INTERVALO DE PANDEO OCURRE DESPUES DE PERFORAR 5,000 ft.

NOMENCLATURA DEL CAPITULO III.

1. A_e Area externa de tubería (in^2).
2. A_i Area interna de la TR (in^2).
3. A_s Area transversal de tubería (in^2).
4. E Módulo de Young o de elasticidad (psi).
5. F_a Fuerza axial (lb).
6. F_b Fuerza de pandeo (lb).
7. F_s La fuerza de estabilidad (lb).
8. P_e Presión externa (psi).
9. P_i Presión interna (psi).
10. P_{pb} Presión permitida a la bomba (psi).
11. r_i Radio interno de tubería (in).
12. r_o Radio externo de tubería (in).
13. ΔF_a Cambio de fuerza axial (lb).
14. ΔP_e Cambio en la presión externa (psi).
15. ΔP_i Cambio en la presión interna (psi).
16. ΔT Cambio de temperatura ($^{\circ}\text{F}$).
17. $\Delta \epsilon_z$ Deformación axial (adimensional).
18. $\Delta \sigma_z$ Cambio de esfuerzo axial (psi).
19. σ_r Esfuerzo radial (psi).
20. σ_t Esfuerzo tangencial (psi).
21. α_t Coeficiente de expansión térmica ($1/^{\circ}\text{F}$).
22. μ Módulo de poisson (adimensional).

CONCLUSIONES

La experiencia adquirida en el proceso del análisis de la metodología de cargas máximas en el diseño de tuberías de revestimiento permite concluir:

1.- El conocimiento certero del gradiente de fractura es una herramienta fundamental porque el diseño del revestimiento debe asegurar que la formación se fracture antes de que se alcance la presión que sobrepase la resistencia a la presión interna de la tubería de revestimiento en la superficie.

2.- Las representaciones gráficas del ambiente de esfuerzos de presión interna, colapso y efectos biaxiales vs profundidad no son necesarias en el trabajo del diseño, pero facilitan el análisis de las posibles variantes (diferentes combinaciones de tuberías) que se puedan tener en el diseño.

3.- Los valores de los factores de seguridad son seleccionados por el diseñador y no representan una norma estricta que se debe cumplir; los valores de factores de seguridad (también llamados factores de diseño) presentados en este trabajo representan solamente una recomendación.

4.- El ingeniero de diseño debe tener clara la diferencia existente entre el concepto de "carga máxima" y el concepto de "evento de

diseño"; La carga máxima que va a soportar la tubería de revestimiento depende del evento de diseño que se aplique.

5.- Los eventos de diseño seleccionados pueden reducir o elevar considerablemente los costos del revestimiento, por lo tanto, es de vital importancia tener datos confiables de los cuales se pueda obtener una representación real de los esfuerzos de servicio a los que va a estar expuesta la tubería.

6.- Los programas aquí presentados, hacen posible que varios esquemas de revestimiento, sean analizados en un lapso de tiempo relativamente corto; en tanto, la atención del ingeniero puede ser totalmente dirigida al análisis de los posibles esquemas de revestimiento a adoptar, al comportamiento del equipo de superficie disponible con relación a las especificaciones de tuberías, y a lograr el diseño óptimo de revestimiento para las condiciones de trabajo especificadas.

Se deja a los programas, el trabajo del cálculo de las presiones efectivas internas y de colapso, los esfuerzos a que estará sometida la tubería (axial de tensión - compresión) y la elaboración de gráficas de análisis para varias condiciones de carga que en conjunto requieren de una gran inversión de tiempo.

7.- La corrección del revestimiento por efectos biaxiales, puede causar la exclusión de secciones de revestimiento que inicialmente

son incluidas en el diseño; esta parte del diseño es fundamental y siempre debe ser tomada en cuenta.

8.- Al diseñar una TR que contiene una sección que atraviesa una formación salina, la presión de colapso para el diseño de esta sección debe considerarse igual a la presión de sobrecarga.

9.- La TR puede presentar pandeo aún si el esfuerzo axial en la cima del cemento es positivo (i.e., puede haber pandeo aunque no exista un valor de esfuerzo compresivo en la cima del cemento); de esta manera aunque una TR sea colgada de tal forma que toda la longitud de la tubería quede en tensión, alguna parte sobre la cima del cemento puede tener un valor inferior al valor de la fuerza de estabilidad en ese punto.

10.- Aunque en el diseño común de las TR no se considera el esfuerzo axial causado por los cambios de temperatura; después de que la TR es cementada y colgada en la cabeza del pozo los cambios de temperatura encontrados durante la vida del pozo generalmente no son pequeños ni pueden ser despreciados. De acuerdo a la ley de Hooke y tomando como referencia los resultados del ejemplo del Capítulo tres, el mayor esfuerzo compresivo que experimenta la TR después de su cementación es calculado por el efecto del cambio promedio de temperatura en la TR, de esta manera si los cambios de temperatura son despreciados, un importante esfuerzo de compresión es ignorado y el pandeo puede ocurrir.

11.- Con referencia al ejemplo presentado en el Capítulo tres. La representación gráfica del estado de tensión axial de la TR en varias condiciones de servicio anticipadas, permite concluir que los esfuerzos axiales desarrollados en la tubería después de la cementación son menores que los desarrollados antes de la misma.

12. Los métodos de diseño de TR han aportado herramientas que permiten refinar el diseño.

a. Método gráfico: aporta una importante herramienta que es la metodología que permite obtener el diseño de presión interna por medio de gráficas que representan los requerimientos de presión interna para la tubería de revestimiento, simplificando así la gran cantidad de cálculos que se requerían realizar con el diseño convencional.

b. Método de carga máxima: toma en cuenta como parte principal e innovadora la condición de carga máxima de presión interna que puede resistir el sistema (i.e., el sistema esta conformado por la TR, el equipo de trabajo superficial y la formación abajo la zapata) cuando se circula un brote de gas. De acuerdo con la capacidad de trabajo del equipo superficial disponible y por medio de la solución de un sistema de ecuaciones simultáneas, permite conocer los valores máximos de las presiones en la superficie, en

la interfase lodo-gas y en el fondo del revestimiento para las cuales el sistema falla en la formación. De esta manera la TR se diseña en función de la capacidad del equipo de trabajo en superficie y para las condiciones de carga máxima de presión interna que puede resistir el sistema.

Con lo anterior se puede concluir que las diferentes metodologías existentes para el diseño de TR son el resultado de la evolución de la investigación y que las diferencias entre éstas son, en cada caso, una aportación al contexto general del diseño.

RECOMENDACIONES.

1. Una investigación tendiente a adoptar eventos de diseño para una zona de perforación, daría continuidad al presente trabajo y, los resultados podrían causar un beneficio económico en lo que respecta al costo de tubulares en el revestimiento.

BIBLIOGRAFIA

Adams, Neal. Well Control Problems and Solutions. Tulsa, Oklahoma: Petroleum Publishing Company, 1980.

Adams, Neal. Drilling Engineering. Tulsa, Oklahoma: PennWellBooks, 1985.

Bourgoyne, Adam T. Jr; Keith K, Millheim; Martin, E. Chenevert y F.S, Young Jr. Applied Drilling Engineering. United States of America: Society of Petroleum Engineers, 1991.

Bulletin on Performance Properties of Casing, Tubing, and Drill Pipe, Bull. 5C2, 18th edition, API. Dallas. March , 1982.

Casing, Tubing, Drill Pipe and Line Pipe Properties Bull. 5C3, API, (1980) with Supplement 2, 1983.

Charles, M. Prentice. "Maximun Load Casing Design." Society of Petroleum Engineers. Paper number SPE 2560.

Egor, P.Popov. Mecánica de Sólidos . México: Limusa Noriega,1990.

Goins, W.C. "Better Understanding Prevents Tubular Buckling Problems." World Oil, Part 1 (Jan. 1980), Part 2 (Feb. 1980).

Goins, W.C., Collings, B.J., O'Brien, T.B. "A New Approach to Tubular String Design." World Oil, Part 1 (Nov. 1965), Part 2 (Dec. 1965), Part 3 (Jan. 1966), Part 4 (Feb. 1966).

Greenip, John.F. "Designing and Running Pipe", The Oil and Gas Journal, Part 1 (Oct 9. 1978), Part 2 (Oct 16. 1978), Part 3 (Oct 30. 1978), Part 4 (Nov 13. 1978), Part 5 (Nov 27. 1978).

Hall Stewar, A. Drilling and Producing Offshore. Tulsa, Oklahoma: PennWell Books, 1983.

Hammerlindl, D.J. "Movement, Forces, and Stresses Associated with Combination Tubing Strings Sealed in Packers." Journal of Petroleum Technology, February, 1977.

Harrie, Krus and Jean-Marie Priour. "High-Pressure Well Design." Society of Petroleum Engineers. SPE Drilling Engineering, December, 1991.

Lubinski, Arthur. Developments in Petroleum Engineering. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1987.

Lubinski, Arthur. ; Althouse W.S. y Logan, J.L. "Helical Buckling of Tubing Sealed in Packers." Journal of Petroleum Technology, June, 1962.

Mcray, Arthur W. y Frank W. Cole. Tecnología de la Perforación de Pozos Petroleros. México: editorial Continental, edición autorizada por University of Oklahoma press., Norman, Oklahoma, 1982.

Méndez Rodríguez, Enrique Tecnología de Perforación, Presiones Anormales. México: editorial: No. de registro-1067/89. libro 8, Fojas 188, enero 20, 1989.

Moore Preston, L. Drilling Practices Manual. Tulsa, Oklahoma: PennWell Books, 1986.

Ortega Solano, A. Tecnología de Perforación. Planeación de la Perforación de Pozos. México: editorial: No. de registro-1067/89. libro 8, Fojas 188, enero 20, 1989.

Ortega Solano, A. Tecnología de Perforación. Perdidas de circulación. México: editorial: No. de registro-1067/89. libro 8, Fojas 188, enero 20, 1989.

PEMEX, Instituto Mexicano del Petróleo . Diseño de Tuberías de Revestimiento. México: Instituto Mexicano del Petróleo, 1991.

PEMEX, Instituto Mexicano del Petróleo. Reparación de Tuberías de Revestimiento. México: Instituto Mexicano del Petróleo, 1992.

Rabia, H. Oilwell Drilling Engineering. Great Britain: Graham & Trotman Limited, 1985.

Short Jim, J.A. Drilling and Casing Operations. Tulsa, Oklahoma: PennWell Books, 1982.

Short Jim, J.A. Drilling. Tulsa, Oklahoma: PennWell Books, 1983.

ANEXO 1

PROGRAMAS DE APLICACION PARA EL DISEÑO DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO APLICANDO EL CONCEPTO DE CARGA MAXIMA.

La metodología presentada en este trabajo expone claramente las razones para elegir el software de trabajo, así como el sistema de y programación que utiliza; mayor detalle sobre las técnicas de manejo y programación se pueden encontrar en el manual de EXCEL.

Diseño de tubería de revestimiento superficial.

Este programa admite el diseño del revestimiento compuesto por dos secciones de tubería como límite máximo; en la práctica, este diseño se realiza generalmente con una sola clase de TR. A continuación se presenta el diagrama de bloques y el listado del programa (macro) llamado sup.xml

SUP.XLM

SUP (S)

1. Abre el documento DISENO_S. XLS, pregunta los datos necesarios para que DISENO_S. XLS calcule las condiciones de presión interna para el diseño de la TR. Imprime de DISENO_S. XLS los cálculos y la gráfica "CONDICIONES DE PRESION INTERNA".

2. Pregunta los datos de la sección de la TR que cumple con las condiciones de presión interna y los introduce a DISENO_S. XLS.

3. Pregunta los datos necesarios para que DISENO_S. XLS calcule las condiciones de colapso para el diseño. Imprime de DISENO_S. XLS los cálculos y las gráficas "EVALUACION POR CONDICIONES DE PRESION INTERNA" Y "EVALUACION POR CONDICIONES DE COLAPSO".

4. Pregunta si se requiere de otra sección de tubería. Si la respuesta es "si" llama a la subrutina "TENSUNO"; si la respuesta es "no" llama a la subrutina "TENSUNO"

Cuando la subrutina termina el mando regresa a SUP (S).

5. Cierra los documentos abiertos y finaliza la ejecución de la macro.

TENSUNO

TENSUNO

FIG 1. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA MACRO "SUP: XLM"

NOTA : LOS DOCUMENTOS SON HOJAS DE CALCULO Y LAS SUBROUTINAS SON LOS MODULOS

TENSUNO

1. Abre el documento TENSIO1S. XLS del que imprime el cálculo de las cargas de tensión compresión que actúan sobre la TR, la gráfica "EVALUACION POR TENSION - COMPRESION", el valor de los esfuerzos actuantes en los extremos de la sección y la relación "esfuerzo axial / EY " calculada también en los extremos de la sección.

2. Pregunta al usuario las resistencias al colapso y a la presión interna corregidas por efectos biaxiales e imprime la gráfica " EVALUACION POR CORRECCION DE EFECTOS BIAXIALES (*LINEAS DE DISEÑO)"

3. Finaliza la subrutina.

TENS DOS

1. Pregunta los datos de la segunda sección de tubería e introduce esta información en DISENO_S. XLS. Imprime de DISENO_S. XLS los datos de la segunda sección y la gráfica " DISEÑO DE "TR" POR COLAPSO".

2. Abre el documento TENSIO2S. XLS del que imprime el cálculo de las cargas de tensión compresión que actúan sobre la TR, la gráfica "EVALUACION POR TENSION - COMPRESION", el valor de los esfuerzos actuantes en los extremos de cada sección y la relación " esfuerzo axial / EY " calculada también en los extremos de cada sección.

3. Pregunta las resistencias al colapso y a la presión interna corregidas por efectos biaxiales e imprime las gráficas " EVALUACION POR CORRECCION DE EFECTOS BIAXIALES (PRESION INTERNA)" y " EVALUACION POR CORRECCION DE EFECTOS BIAXIALES (COLAPSO)".

4. Finaliza la subrutina.

CONTINUACION DE LA FIG 1.

NOTA : LOS DOCUMENTOS SON HOJAS DE CALCULO Y LAS SUBROUTINAS SON LOS MODULOS

SUP.XLM

	A
1	Sup (S)
2	= DIRECTORY("A:")
3	= OPEN("A:DISENO S.XLS")
4	
5	= SELECT("R4C5:R7C5")
6	= CLEAR(1)
7	= VLINE(1)
8	= SELECT("R19C1")
9	= FILL.AUTO("R[-1]C:RC",FALSE)
10	= VLINE(24)
11	= SELECT("R37C8")
12	= FILL.AUTO("RC[-1]:RC",FALSE)
13	= VLINE(70)
14	= SELECT("R102C4:R108C4")
15	= FILL.AUTO("RC:R[6]C[1]",FALSE)
16	= SELECT("R111C8")
17	= CLEAR(1)
18	= VLINE(151)
19	= SELECT("R251C5")
20	= FILL.AUTO("RC:R[8]C",FALSE)
21	= VLINE(145)
22	= FORMULA.GOTO("R1C1")
23	= SELECT("R4C5")
24	= FORMULA(INPUT(" ",1,"PROFUNDIDAD DE ASENTAMIENTO (ft)"))
25	= SELECT("R6C5")
26	= FORMULA(INPUT("Gradiente de fractura en el asiento del revestimiento (lb/gal)",1,"GRADIENTE DE
27	= SELECT("R7C5")
28	= FORMULA(INPUT(" (psi/ft) ",1," GRADIENTE DE PRESION DEL GAS (psi/ft)"))
29	= SELECT("R18C1")
30	= FORMULA(INPUT(" 8.33 y 9 lb/gal son las densidades promedio de fluidos de formación en zona
31	= SELECT("R37C7")
32	= FORMULA(INPUT("FS para línea de Presión interna toma valores de 1 a 1.75 (el valor comunment
33	= SELECT("R38C30")
34	= PRINT(2,1,2,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
35	= FORMULA(ALERT("Por favor, liste los datos de la TR que cumpla con las condiciones de presión inte
36	
37	= SELECT("R102C5")
38	= FORMULA(INPUT("TR1 grado",2))
39	= SELECT("R103C5")
40	= FORMULA(INPUT("TR1 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
41	= SELECT("R104C5")
42	= FORMULA(INPUT("TR1 resistencia al colapso (psi)",1))
43	= SELECT("R105C5")
44	= FORMULA(INPUT("TR1 diámetro interno (in)",1))
45	= SELECT("R106C5")
46	= FORMULA(INPUT("TR1 peso (lb/ft)",1))
47	= SELECT("R107C5")
48	= FORMULA(INPUT("TR1 diámetro (in) ",1))

SUP.XLM

	A
49	=SELECT("R108C5")
50	=FORMULA(INPUT("TR1 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
51	
52	=SELECT("R111C8")
53	=FORMULA(INPUT("FS para línea de colapso toma valores de 1 a 1.5, (El valor comunmente usado e
54	=SELECT("R113C7")
55	=FORMULA(INPUT("Densidad del lodo en donde es colocado el revestimiento (lb/gal) ",1," DENSIDA
56	=PRINT(2,3,5,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
57	
58	=SELECT("R1C15")
59	=FORMULA(INPUT("1(SI), 2 (NO)",1,"OTRA SECCION ?"))
60	=IF(IO1 = 1,TENSADOS())
61	=IF(IO1 = 2,TENSUNO())
62	=CLOSE()
63	=CLOSE()
64	=CLOSE()
65	=RETURN()

	B
1	TENSUNO
2	=OPEN("A:\TENSIO1S.XLS")
3	=FORMULA.GOTO("R1C1")
4	=PRINT(2,1,3,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
5	=SELECT("R154C6")
6	=FILL.AUTO("RC:R(6)C",FALSE)
7	=ALERT("Lea la elipse de esfuerzos biaxiales",2)
8	=ALERT("TR1 parte superior ",2)
9	=SELECT("R155C6")
10	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte superior)",1))
11	=SELECT("R156C6")
12	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte superior)",1))
13	=ALERT("TR1 parte inferior ",2)
14	=SELECT("R159C6")
15	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte inferior)",1))
16	=SELECT("R160C6")
17	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte inferior)",1))
18	=PRINT(2,1,4,5,FALSE,FALSE,1,,,180)
19	=RETURN()
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	

SUP.XLM

	B
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	

	C
1	TENSIDOS
2	=SELECT("R252C5")
3	=FORMULA(INPUT("Profundidad del cople(ft)",1))
4	=SELECT("R253C5")
5	=FORMULA(INPUT("TR2 grado",2))
6	=SELECT("R254C5")
7	=FORMULA(INPUT("TR2 resistencia a la presión interna(psi)",1))
8	=SELECT("R255C5")
9	=FORMULA(INPUT("TR2 resistencia al colapso (psi)",1))
10	=SELECT("R256C5")
11	=FORMULA(INPUT("TR2 diámetro interno (in)",1))
12	=SELECT("R257C5")
13	=FORMULA(INPUT("TR2 peso (lb/ft)",1))
14	=SELECT("R258C5")
15	=FORMULA(INPUT("TR2 diámetro (in)",1))
16	=SELECT("R259C5")
17	=FORMULA(INPUT("TR2 esfuerzo cedencia (psi)",1))
18	=PRINT(2,6,7,1,FALSE,FALSE,1,,180)
19	=OPEN("A:\TENSIO2S.XLS")
20	=FORMULA.GOTO("R1C1")
21	=PRINT(2,1,3,1,FALSE,FALSE,1,,180)
22	=SELECT("R157C6")
23	=FILL.AUTO("RC:R16JC",FALSE)
24	=ALERT("Lea la elipse de esfuerzos biaxiales",2)
25	=ALERT("TR1 parte superior",2)
26	=SELECT("R158C6")
27	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte superior)",1))
28	=SELECT("R159C6")
29	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte superior)",1))
30	=ALERT("TR1 parte inferior",2)
31	=SELECT("R162C6")
32	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte inferior)",1))
33	=SELECT("R163C6")
34	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte inferior)",1))
35	=ALERT("TR2 parte superior",2)
36	=SELECT("R168C6")
37	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR2 parte superior)",1))
38	=SELECT("R169C6")
39	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte superior)",1))
40	=ALERT("TR2 parte inferior",2)
41	=SELECT("R172C6")
42	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR2 parte inferior)",1))
43	=SELECT("R173C6")
44	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte inferior)",1))
45	=PRINT(2,4,6,1,FALSE,FALSE,1,,180)
46	=RETURN()
47	
48	

Diseño de tubería de revestimiento intermedio.

Este programa admite el diseño del revestimiento compuesto por cuatro secciones de tubería como límite máximo; a continuación se presenta el diagrama de bloques y el listado del programa (macro) llamado int.xmlm

DIS_I (I)

1. Abre el documento DISENO_I. XLS, pregunta los datos necesarios para que DISENO_I. XLS calcule las condiciones de presión interna para el diseño de la TR. Imprime de DISENO_I. XLS los cálculos y la gráfica "CONDICIONES DE PRESION INTERNA".

2. Pregunta al usuario el número de secciones que desea evaluar con respecto a los resultados obtenidos en el punto "1". Si el número de secciones es 1,2,3, ó 4 llama una de las siguientes subrutinas: UNA, DOS, TRES o CUATRO

Cuando la subrutina termina el mando regresa a DIS_I(I).

3. Imprime de DISENO_I. XLS los datos de las tuberías seleccionadas y la gráfica "EVALUACION POR CONDICIONES DE PRESION INTERNA".

4. Pregunta al usuario los datos necesarios para que DISENO_I. XLS calcule las condiciones de colapso para el diseño. Imprime de DISENO_I. XLS los cálculos y la gráfica "EVALUACION POR CONDICIONES DE COLAPSO".

5. Si el número de secciones es 1,2,3, ó 4, llama una de las siguientes subrutinas: TENSION 1, TENSION 2, TENSION 3 ó TENSION 4 .

Cuando la subrutina termina el mando regresa a DIS_I(I).

6. Cierra los documentos abiertos y finaliza la ejecución de la macro.

UNA

DOS

TRES

CUATRO

TENSION_1

TENSION_2

TENSION_3

TENSION_4

FIG 2. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA MACRO "int.xlm"

NOTA : LOS DOCUMENTOS SON HOJAS DE CALCULO Y LAS SUBROUTINAS SON LOS MODULOS

*La subrutina abierta pregunta los datos de las tuberías seleccionadas e introduce esta información en DISEN_I. XLS.

** La subrutina abierta abre uno de los siguientes documentos:

TENSION1. XLS
TENSION2. XLS
TENSION3. XLS
TENSION4. XLS

Después de abrir el documento, todas las subrutinas realizan paso iguales, la secuencia de los pasos es la siguiente:

1. De el documento abierto imprime: el cálculo de las cargas de tensión y compresión actuantes en la TR, la gráfica "EVALUACION POR TENSION - COMPRESION, el valor de los esfuerzos actuantes en los extremos de cada sección y la relación " esfuerzo axial / EY " calculada también en los extremos de cada sección.

2. Pregunta al usuario las resistencias al colapso y a la presión interna corregidas por efectos biaxiales e imprime las gráficas " EVALUACION POR CORRECCION DE EFECTOS BIAXIALES (PRESION INTERNA)" Y " EVALUACION POR CORRECCION DE EFECTOS BIAXIALES (COLAPSO)".

3. Finaliza la subrutina.

CONTINUACION FIG 2.

NOTA : LOS DOCUMENTOS SON HOJAS DE CALCULO Y LAS SUBROUTINAS SON LOS MODULOS

	A
1	DIS_I (I)
2	=OPEN("A:\DISENO I.XLS")
3	=SELECT("R1C1")
4	=SELECT("R2C15")
5	=FILL.AUTO("R[-1]C:RC",FALSE)
6	=SELECT("R2C5")
7	=FILL.AUTO("RC:R[6]C",FALSE)
8	=SELECT("R62C1")
9	=FILL.AUTO("R[-1]C:RC",FALSE)
10	=SELECT("R83C6")
11	=FILL.AUTO("R[-1]C:RC",FALSE)
12	=SELECT("R154C5:R154C8")
13	=FILL.AUTO("RC:R[9]C[3]",FALSE)
14	=SELECT("R266C8")
15	=FILL.AUTO("R[-1]C:RC",FALSE)
16	=SELECT("R266C8")
17	=FILL.AUTO("RC:R[2]C",FALSE)
18	=SELECT("R272C8")
19	=FILL.AUTO("R[-2]C:RC",FALSE)
20	=SELECT("R284C8")
21	=FILL.AUTO("RC:R[1]C",FALSE)
22	=SELECT("R446C8")
23	
24	=FORMULA.GOTO("R1C1")
25	=SELECT("R3C5")
26	=FORMULA(INPUT(" ",1,"PROFUNDIDAD DE ASENTAMIENTO (ft)"))
27	=SELECT("R5C5")
28	=FORMULA(INPUT("Gradiente de fractura en el asiento del revestimiento (lb/gal)",1,"GRADIENTE DE
29	=SELECT("R6C5")
30	=FORMULA(INPUT(" psi/ft ",1," GRADIENTE DE PRESION DEL GAS (psi/ft)"))
31	=SELECT("R7C5")
32	=FORMULA(INPUT("Densidad del lodo más pesado programado para perforar la siguiente sección (lb/
33	=SELECT("R8C5")
34	=FORMULA(INPUT("Presión de trabajo (psi)",1, "MAXIMA PRESION SUPERFICIAL"))
35	=SELECT("R61C1")
36	=FORMULA(INPUT(" 8.33 y 9 lb/gal son las densidades promedio de fluidos de formación en zona
37	=SELECT("R82C6")
38	=FORMULA(INPUT("FS para línea de Presión interna toma valores de 1 a 1.75 (el valor comunment
39	=SELECT("R82C18")
40	=PRINT(2,1,3,1,FALSE,FALSE,1,,180)
41	=FORMULA(ALERT("Por favor, liste los datos de la TR que cumpla con las condiciones de presión inte
42	=SELECT("R1C15")
43	=FORMULA(INPUT("La cantidad máxima de secciones a analizar son 4. ¿Cuántas quiere ?",1,"No. DE
44	
45	=IF(!O1 = 1,UNA())
46	=IF(!O1 = 2,DOS())
47	=IF(!O1 = 3,TRES())
48	=IF(!O1 = 4,CUATRO())

INT.XLM

	A
49	
50	=PRINT(2,4,4,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
51	=PRINT(2,5,5,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
52	=FORMULA(ALERT("Comienza el cálculo de la línea de diseño al colapso, por favor liste los datos ",2))
53	
54	=SELECT("R265C8")
55	=FORMULA(INPUT("FS para línea de colapso toma valores de 1 a 1.5, (El valor comunmente usado e
56	=SELECT("R270C8")
57	=FORMULA(INPUT("Densidad del lodo en donde es colocado el revestimiento (lb/gal) ",1," DENSIDA
58	=SELECT("R285C8")
59	=FORMULA(INPUT("Presión de poro de la zona de pérdida de circulación. 8.33, 9 lb/gal o la que ud.
60	=PRINT(2,6,6,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
61	=PRINT(2,7,7,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
62	
63	=IF(!O1 = 1,TENSION 1())
64	=IF(!O1 = 2,TENSION 2())
65	=IF(!O1 = 3,TENSION 3())
66	=IF(!O1 = 4,TENSION 4())
67	=CLOSE()
68	=CLOSE()
69	=CLOSE()
70	=RETURN()
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	

INT.XLM

	B
1	UNA
2	=SELECT("R155C5")
3	=FORMULA(INPUT("TR1 va desde (ft)",1))
4	=SELECT("R156C5")
5	=FORMULA(INPUT("TR1 va hasta (ft)",1))
6	=SELECT("R157C5")
7	=FORMULA(INPUT("TR1 grado",2))
8	=SELECT("R158C5")
9	=FORMULA(INPUT("TR1 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
10	=SELECT("R159C5")
11	=FORMULA(INPUT("TR1 resistencia al colapso (psi)",1))
12	=SELECT("R160C5")
13	=FORMULA(INPUT("TR1 diámetro interno (in)",1))
14	=SELECT("R161C5")
15	=FORMULA(INPUT("TR1 peso (lb/ft)",1))
16	=SELECT("R162C5")
17	=FORMULA(INPUT("TR1 diámetro exterior(in) ",1))
18	=SELECT("R163C5")
19	=FORMULA(INPUT("TR1 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
20	=SELECT("R164C18")
21	=RETURN()
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	

INT.XLM

	B
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	

	C
1	DOS
2	=SELECT("R155C5")
3	=FORMULA(INPUT("TR1 va desde (ft)",1))
4	=SELECT("R156C5")
5	=FORMULA(INPUT("TR1 va hasta (ft)",1))
6	=SELECT("R157C5")
7	=FORMULA(INPUT("TR1 grado",2))
8	=SELECT("R158C5")
9	=FORMULA(INPUT("TR1 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
10	=SELECT("R159C5")
11	=FORMULA(INPUT("TR1 resistencia al colapso (psi) ",1))
12	=SELECT("R160C5")
13	=FORMULA(INPUT("TR1 diámetro interno (in)",1))
14	=SELECT("R161C5")
15	=FORMULA(INPUT("TR1 peso (lb/ft)",1))
16	=SELECT("R162C5")
17	=FORMULA(INPUT("TR1 diámetro exterior(in) ",1))
18	=SELECT("R163C5")
19	=FORMULA(INPUT("TR1 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
20	
21	
22	=SELECT("R155C6")
23	=FORMULA(INPUT("TR2 va desde (ft)",1))
24	=SELECT("R156C6")
25	=FORMULA(INPUT("TR2 va hasta (ft)",1))
26	=SELECT("R157C6")
27	=FORMULA(INPUT("TR2 grado",2))
28	=SELECT("R158C6")
29	=FORMULA(INPUT("TR2 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
30	=SELECT("R159C6")
31	=FORMULA(INPUT("TR2 resistencia al colapso (psi) ",1))
32	=SELECT("R160C6")
33	=FORMULA(INPUT("TR2 diámetro interno (in)",1))
34	=SELECT("R161C6")
35	=FORMULA(INPUT("TR2 peso (lb/ft)",1))
36	=SELECT("R162C6")
37	=FORMULA(INPUT("TR2 diámetro exterior (in) ",1))
38	=SELECT("R163C6")
39	=FORMULA(INPUT("TR2 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
40	=SELECT("R163C18")
41	=RETURN()
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	

INT.XLM

	C
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	

	D
1	TRES
2	=SELECT("R155C5")
3	=FORMULA(INPUT("TR1 va desde (ft)",1))
4	=SELECT("R156C5")
5	=FORMULA(INPUT("TR1 va hasta (ft)",1))
6	=SELECT("R157C5")
7	=FORMULA(INPUT("TR1 grado",2))
8	=SELECT("R158C5")
9	=FORMULA(INPUT("TR1 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
10	=SELECT("R159C5")
11	=FORMULA(INPUT("TR1 resistencia al colapso (psi)",1))
12	=SELECT("R160C5")
13	=FORMULA(INPUT("TR1 diámetro interno (in)",1))
14	=SELECT("R161C5")
15	=FORMULA(INPUT("TR1 peso (lb/ft)",1))
16	=SELECT("R162C5")
17	=FORMULA(INPUT("TR1 diámetro exterior (in) ",1))
18	=SELECT("R163C5")
19	=FORMULA(INPUT("TR1 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
20	
21	
22	=SELECT("R155C6")
23	=FORMULA(INPUT("TR2 va desde (ft)",1))
24	=SELECT("R156C6")
25	=FORMULA(INPUT("TR2 va hasta (ft)",1))
26	=SELECT("R157C6")
27	=FORMULA(INPUT("TR2 grado",2))
28	=SELECT("R158C6")
29	=FORMULA(INPUT("TR2 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
30	=SELECT("R159C6")
31	=FORMULA(INPUT("TR2 resistencia al colapso (psi)",1))
32	=SELECT("R160C6")
33	=FORMULA(INPUT("TR2 diámetro interno (in)",1))
34	=SELECT("R161C6")
35	=FORMULA(INPUT("TR2 peso (lb/ft)",1))
36	=SELECT("R162C6")
37	=FORMULA(INPUT("TR2 diámetro exterior (in) ",1))
38	=SELECT("R163C6")
39	=FORMULA(INPUT("TR2 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
40	
41	
42	=SELECT("R155C7")
43	=FORMULA(INPUT("TR3 va desde (ft)",1))
44	=SELECT("R156C7")
45	=FORMULA(INPUT("TR3 va hasta (ft)",1))
46	=SELECT("R157C7")
47	=FORMULA(INPUT("TR3 grado",2))
48	=SELECT("R158C7")

INT.XLM

	D
49	=FORMULA(INPUT("TR3 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
50	=SELECT("R159C7")
51	=FORMULA(INPUT("TR3 resistencia al colapso (psi)",1))
52	=SELECT("R160C7")
53	=FORMULA(INPUT("TR3 diámetro interno (in)",1))
54	=SELECT("R161C7")
55	=FORMULA(INPUT("TR3 peso (lb/ft)",1))
56	=SELECT("R162C7")
57	=FORMULA(INPUT("TR3 diámetro exterior (in) ",1))
58	=SELECT("R163C7")
59	=FORMULA(INPUT("TR3 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
60	=SELECT("R164C18")
61	=RETURN()
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	

1	CUATRO
2	=SELECT("R155C5")
3	=FORMULA(INPUT("TR1 va desde (ft)",1))
4	=SELECT("R156C5")
5	=FORMULA(INPUT("TR1 va hasta (ft)",1))
6	=SELECT("R157C5")
7	=FORMULA(INPUT("TR1 grado",2))
8	=SELECT("R158C5")
9	=FORMULA(INPUT("TR1 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
10	=SELECT("R159C5")
11	=FORMULA(INPUT("TR1 resistencia al colapso (psi)",1))
12	=SELECT("R160C5")
13	=FORMULA(INPUT("TR1 diámetro interno (in)",1))
14	=SELECT("R161C5")
15	=FORMULA(INPUT("TR1 peso (lb/ft)",1))
16	=SELECT("R162C5")
17	=FORMULA(INPUT("TR1 diámetro exterior (in) ",1))
18	=SELECT("R163C5")
19	=FORMULA(INPUT("TR1 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
20	
21	
22	=SELECT("R155C6")
23	=FORMULA(INPUT("TR2 va desde (ft)",1))
24	=SELECT("R156C6")
25	=FORMULA(INPUT("TR2 va hasta (ft)",1))
26	=SELECT("R157C6")
27	=FORMULA(INPUT("TR2 grado",2))
28	=SELECT("R158C6")
29	=FORMULA(INPUT("TR2 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
30	=SELECT("R159C6")
31	=FORMULA(INPUT("TR2 resistencia al colapso (psi)",1))
32	=SELECT("R160C6")
33	=FORMULA(INPUT("TR2 diámetro interno (in)",1))
34	=SELECT("R161C6")
35	=FORMULA(INPUT("TR2 peso (lb/ft)",1))
36	=SELECT("R162C6")
37	=FORMULA(INPUT("TR2 diámetro exterior (in) ",1))
38	=SELECT("R163C6")
39	=FORMULA(INPUT("TR2 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
40	
41	
42	=SELECT("R155C7")
43	=FORMULA(INPUT("TR3 va desde (ft)",1))
44	=SELECT("R156C7")
45	=FORMULA(INPUT("TR3 va hasta (ft)",1))
46	=SELECT("R157C7")
47	=FORMULA(INPUT("TR3 grado",2))
48	=SELECT("R158C7")

	E
49	=FORMULA(INPUT("TR3 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
50	=SELECT("R159C7")
51	=FORMULA(INPUT("TR3 resistencia al colapso (psi)",1))
52	=SELECT("R160C7")
53	=FORMULA(INPUT("TR3 diámetro interno (in)",1))
54	=SELECT("R161C7")
55	=FORMULA(INPUT("TR3 peso (lb/ft)",1))
56	=SELECT("R162C7")
57	=FORMULA(INPUT("TR3 diámetro exterior (in) ",1))
58	=SELECT("R163C7")
59	=FORMULA(INPUT("TR3 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
60	
61	
62	=SELECT("R155C8")
63	=FORMULA(INPUT("TR4 va desde (ft)",1))
64	=SELECT("R156C8")
65	=FORMULA(INPUT("TR4 va hasta (ft)",1))
66	=SELECT("R157C8")
67	=FORMULA(INPUT("TR4 grado",2))
68	=SELECT("R158C8")
69	=FORMULA(INPUT("TR4 resistencia a la presión interna(psi) ",1))
70	=SELECT("R159C8")
71	=FORMULA(INPUT("TR4 resistencia al colapso (psi)",1))
72	=SELECT("R160C8")
73	=FORMULA(INPUT("TR4 diámetro interno (in)",1))
74	=SELECT("R161C8")
75	=FORMULA(INPUT("TR4 peso (lb/ft)",1))
76	=SELECT("R162C8")
77	=FORMULA(INPUT("TR4 diámetro exterior (in) ",1))
78	=SELECT("R163C8")
79	=FORMULA(INPUT("TR4 esfuerzo de cedencia (psi) ",1))
80	=SELECT("R164C8")
81	=RETURN()

	F
1	TENSION_1
2	=OPEN("A:ATENSION1.XLS")
3	=SELECT("R120C6")
4	=FILL.AUTO("RC:RIGIC",FALSE)
5	=FORMULA.GOTO("R1C1")
6	=PRINT(2,1,3,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
7	
8	=ALERT("Lea la elipse de esfuerzos biaxiales",2)
9	
10	=ALERT("TR1 parte superior ",2)
11	=SELECT("R121C6")
12	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte superior)",1))
13	=SELECT("R122C6")
14	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte superior) ",1))
15	
16	=ALERT("TR1 parte inferior ",2)
17	=SELECT("R125C6")
18	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte inferior) ",1))
19	=SELECT("R126C6")
20	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte inferior) ",1))
21	=RETURN()
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	

INT.XLM

	F
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	

	G
1	TENSION_2
2	=OPEN("A:\TENSION2.XLS")
3	=SELECT("R162C6")
4	=FILL.AUTO("RC:R161C",FALSE)
5	=FORMULA.GOTO("R1C1")
6	=PRINT(2,1,3,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
7	
8	=ALERT("Lea la elipse de esfuerzos biaxiales",2)
9	
10	=ALERT("TR1 parte superior ",2)
11	=SELECT("R163C6")
12	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte superior)",1))
13	=SELECT("R164C6")
14	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte superior)",1))
15	
16	=ALERT("TR1 parte inferior ",2)
17	=SELECT("R167C6")
18	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte inferior)",1))
19	=SELECT("R168C6")
20	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte inferior)",1))
21	
22	=ALERT("TR2 parte superior ",2)
23	=SELECT("R173C6")
24	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR2 parte superior)",1))
25	=SELECT("R174C6")
26	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte superior)",1))
27	
28	=ALERT("TR2 parte inferior ",2)
29	=SELECT("R177C6")
30	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR2 parte inferior)",1))
31	=SELECT("R178C6")
32	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte inferior)",1))
33	=PRINT(2,4,6,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
34	=RETURN()
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	

INT.XLM

	G
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	

H	
1	TENSION 3
2	=OPEN("A:\TENSION3.XLS")
3	=SELECT("R163C6")
4	=FILL.AUTO("RC:R127|C",FALSE)
5	=FORMULA.GOTO("R1C1")
6	=PRINT(2,1,3,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
7	
8	=ALERT("Lea la elipse de esfuerzos biaxiales",2)
9	
10	=ALERT("TR1 parte superior ",2)
11	=SELECT("R164C6")
12	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte superior)",1))
13	=SELECT("R165C6")
14	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte superior) ",1))
15	
16	=ALERT("TR1 parte inferior ",2)
17	=SELECT("R168C6")
18	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte inferior) ",1))
19	=SELECT("R169C6")
20	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte inferior)",1))
21	
22	=ALERT("TR2 parte superior ",2)
23	=SELECT("R174C6")
24	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR2 parte superior)",1))
25	=SELECT("R175C6")
26	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte superior) ",1))
27	
28	=ALERT("TR2 parte inferior ",2)
29	=SELECT("R178C6")
30	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR2 parte inferior) ",1))
31	=SELECT("R179C6")
32	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte inferior)",1))
33	
34	=ALERT("TR3 parte superior ",2)
35	=SELECT("R185C6")
36	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR3 parte superior)",1))
37	=SELECT("R186C6")
38	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte superior) ",1))
39	
40	=ALERT("TR3 parte inferior ",2)
41	=SELECT("R189C6")
42	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR3 parte inferior) ",1))
43	=SELECT("R190C6")
44	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR3 parte inferior)",1))
45	=SELECT("R198C6")
46	=PRINT(2,4,6,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
47	=RETURN()
48	

INT.XLM

	H
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	

1	TENSION_4
2	=OPEN("A:\TENSION4.XLS")
3	=SELECT("R215C6")
4	=FILL.AUTO("RC:R38IC",FALSE)
5	=FORMULA.GOTO("R1C1")
6	=PRINT(2,1,4,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
7	
8	=ALERT("Lea la elipse de esfuerzos biaxiales",2)
9	
10	=ALERT("TR1 parte superior ",2)
11	=SELECT("R216C6")
12	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte superior)",1))
13	=SELECT("R217C6")
14	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte superior) ",1))
15	
16	=ALERT("TR1 parte inferior ",2)
17	=SELECT("R220C6")
18	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR1 parte inferior) ",1))
19	=SELECT("R221C6")
20	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR1 parte inferior)",1))
21	
22	=ALERT("TR2 parte superior ",2)
23	=SELECT("R226C6")
24	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR2 parte superior)",1))
25	=SELECT("R227C6")
26	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte superior) ",1))
27	
28	=ALERT("TR2 parte inferior ",2)
29	=SELECT("R230C6")
30	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR2 parte inferior) ",1))
31	=SELECT("R231C6")
32	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte inferior)",1))
33	
34	=ALERT("TR3 parte superior ",2)
35	=SELECT("R237C6")
36	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR3 parte superior)",1))
37	=SELECT("R238C6")
38	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR2 parte superior) ",1))
39	
40	=ALERT("TR3 parte inferior ",2)
41	=SELECT("R241C6")
42	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR3 parte inferior) ",1))
43	=SELECT("R242C6")
44	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR3 parte inferior)",1))
45	
46	=ALERT("TR4 parte superior ",2)
47	=SELECT("R248C6")
48	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR4 parte superior)",1))

49	=SELECT("R249C6")
50	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR4 parte superior) ",1))
51	
52	=ALERT("TR4 parte inferior ",2)
53	=SELECT("R252C6")
54	=FORMULA(INPUT("Presión interna (TR4 parte inferior) ",1))
55	=SELECT("R253C6")
56	=FORMULA(INPUT("Colapso (TR4 parte inferior)",1))
57	
58	
59	=PRINT(2,5,7,1,FALSE,FALSE,1,,,180)
60	=RETURN()
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	

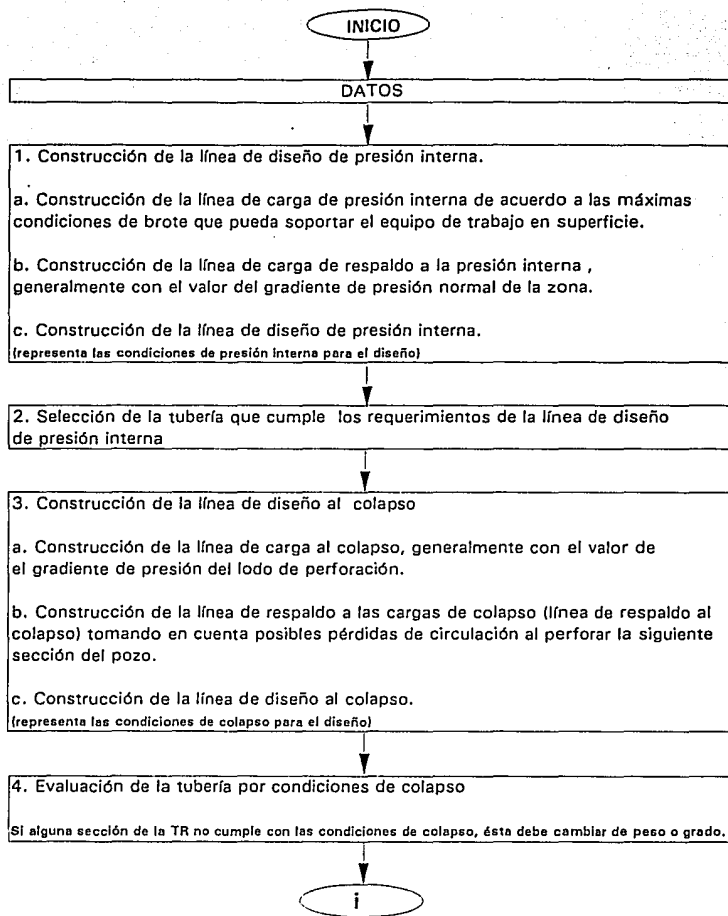
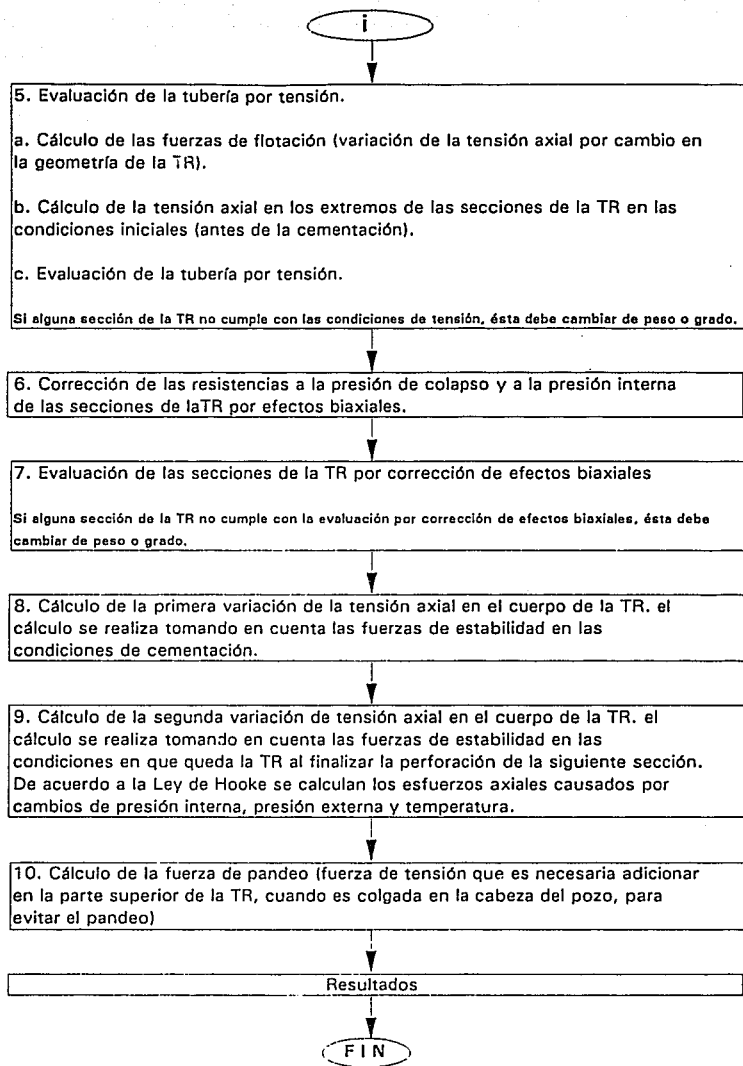


FIG 3. DIAGRAMA DE BLOQUES: PASOS A SEGUIR EN EL DISEÑO DEL REVESTIMIENTO



Ejemplo.

Diseño de una TR intermedia de 10.75 in. de diámetro externo.
Se aplicará el concepto de carga máxima.

Datos:

- * Profundidad de asentamiento: 13,124 ft.

- * Gradiente de fractura en la zapata: 0.868 psi/ft (16.7 lb/gal).

- * Gradiente de presión del gas de la formación: 0.115 psi/ft.

- * Densidad del lodo a utilizarse debajo de la zapata : 15 lb/gal.

- * Máxima presión superficial: El equipo disponible en superficie posee una capacidad de trabajo de 4900 psi.

- * Construcción de la línea de carga de respaldo a la presión interna con un gradiente de 0.477 psi/ft (9.18 lb/gal).

- * Densidad del lodo en el cual es colocada la TR: 13.4 lb/gal.

- * Construcción de la línea de respaldo al colapso con un gradiente de 0.477 psi/ft (9.18 lb/gal).

DISEÑO_I.XLS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	DISEÑO DE REVESTIMIENTO INTERMEDIA									
2										
3	Profundidad de la zapata L =				13124	ft			NOTA :	
4	Gradiente de fractura en									
5	la zapata GRADfrac =				16.7	lb/gal			Los valores encerrados	
6	Gradiente de presión del gas GRADg =				0.115	psi/ft			en esta clase de	
7	Densidad del lodo más pesado Delmp =				15	lb/gal			recuadro, son	
8	Máxima presión superficial MXPS =				4900	psi			datos de entrada del	
9									programa.	
10										
11	1.- Construcción de la línea de carga de presión interna									
12										
13	Presión de inyección (PI) = (GRADfrac + 1) * .052 * L =						12079.33	psi		
14										
15	Las longitudes de las columnas de gas y lodo se calculan por ecuaciones simultáneas como sigue :									
16										
17	Ecuación No 1.									
18										
19	PI = MXPS + X (0.052 * Delmp) + Y (0.052 * Deg) =						12079.33	psi		
20										
21		ó								
22										
23	PI = MXPS + X (0.052 * Delmp) + Y(GRADg) =						12079.33	psi		
24										
25										
26										
27	Ecuación No 2.									
28										
29	X + Y = L =		13124	ft					Donde: x es la longitud de la columna de lodo.	
30									Por lo que la longitud de la columna de gas sera Y = L - X	
31										
32	La solución de este sistema de ecuaciones es la siguiente :									
33										
34	Para la longitud de la columna de lodo :									
35										
36	X = (PI - MXPS) / (.052 * (Delmp - Deg)) - (Deg * L) / (Delmp - Deg) =						8526.42	ft		
37										
38	Presión de la columna de lodo (Pcl) = X * Delmp * .052 =						6650.608	psi		
39										
40										
41	Para la longitud de la columna de gas :									
42										
43	Y = (PI - MXPS - X (.052 * Delmp)) / (.052 * Deg) =						4597.58	ft		
44										
45	Presión de la columna de gas (Pcg) = Y * GRADg =						528.7216	psi		
46										
47										
48										
49										
50										
51										

DISEÑO_I.XLS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
52									
53									
54	<i>La línea de carga de la presión interna queda :</i>								
55									
56	presión		prof			presión		prof	
57						(psi)		(ft)	
58									
59	MXPS		0			4900		0	
60	Pcl + MXPS		X			11550.61		8526.42	
61	Pcl + MXPS + Pcg		L			12079.33		13124	
62									
63	<i>2.- Construcción de la línea de carga de respaldo a la presión interna con un gradiente de:</i>								
64									
65									
66	Presp@ X = X *			9	* 0.052	3990.365	psi		
67	Presp @L = L *			9	* 0.052	6142.032	psi		
68									
69			presión		prof		presión	prof	
70							(psi)	(ft)	
71									
72			0		0		0	0	
73			Presp @ X		X		3990.365	8526.42	
74			Presp@ L		L		6142.032	13124	
75									
76	<i>3.- Construcción de la línea "resultante" de las cargas de presión interna.</i>								
77									
78			presion		prof		presion	prof	
79							(psi)	(ft)	
80									
81			MXPS		0		4900	0	
82			(MXPS + Pcl) - Presp @ X		X		7560.243	8526.42	
83			(MXPS + Pcl + Pcg) - Presp @ L		L		5937.298	13124	
84									
85	<i>4. - Usando un (F.S) de 1.1 para construir la línea de diseño de presión interna.</i>								
86									
87									
88	<i>La línea de diseño de presión interna queda.</i>								
89									
90									
91									
92					presión	prof			
93					(psi)	(ft)			
94									
95					5390	0			
96					8316.267	8526.42			
97					6531.027	13124			
98									
99									
100									
101									
102									
103									

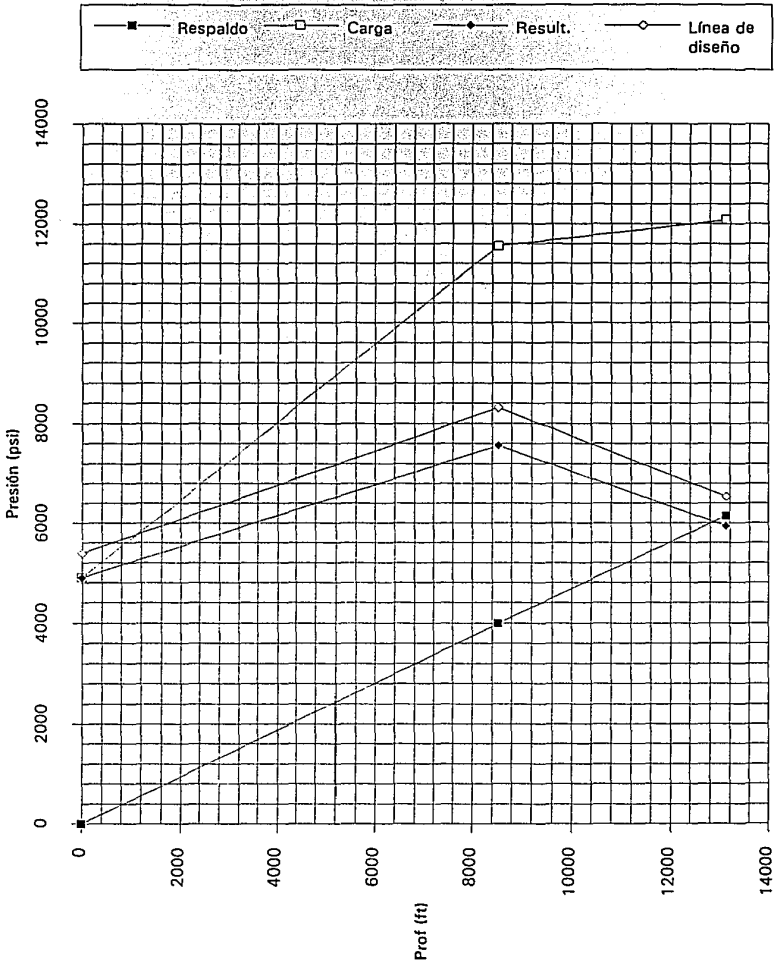


FIG 4. CONDICIONES DE PRESION INTERNA

DISENO_I.XLS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
156									
157									
158	5.- Tubería que cumple los requerimientos de la gráfica de condiciones de presión interna.								
159									
160									
161	SECCIONES DE REVESTIMIENTO.			→	TR				
162					TR1	TR2	TR3	TR4	
163	DE				0	4000	11500		ft
164	A				4000	11500	13124		ft
165	Grado				P-110	P-110	C-95		
166	Resistencia a la presión interna				8060	8860	7660		psi
167	Resistencia a la presión de colapso				3670	4630	4300		psi
168	Diámetro interno				9.85	9.76	9.76		in
169	Peso				51	55.5	55.5		lb/ft
170	Diámetro externo				10.75	10.75	10.75		in
171	Esfuerzo de cedencia				110000	110000	95000		psi
172									
173									
174									
175									
176									
192									
193									
194									
195									
196									
197									
198									
199									
200									
201									
202									
203									
204									
205									
206									
207									
208									
209									
210									
211									
212									
213									
214									
215									
216									
217									
218									
219									
220									
221									
222									

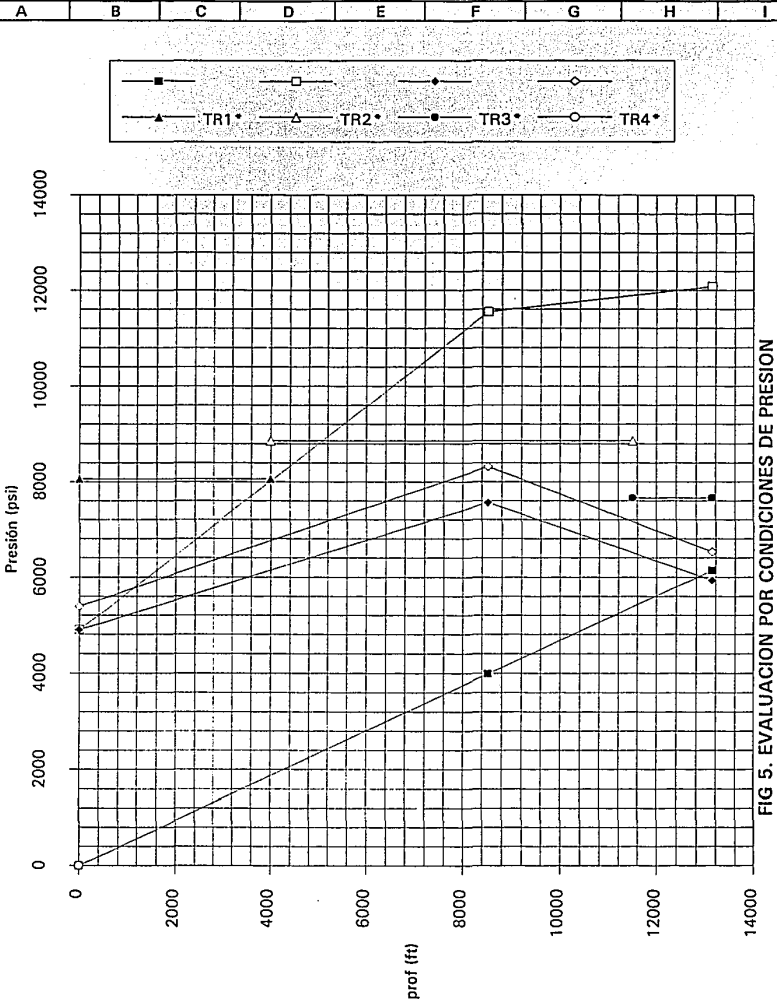


FIG 5. EVALUACION POR CONDICIONES DE PRESION INTERNA (* Secciones del revestimiento)

DISEÑO_I.XLS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
275									
276	6. Construcción de la línea de diseño al colapso con FS de							1.125	
277									
278									
279									
280	Densidad del lodo más pesado a utilizarse Delmp =							15 lb/gal	
281	Densidad del lodo en donde es colocada la TR Delc =							13.4 lb/gal	
282									
283									
284									
285	La línea de carga de colapso queda :								
286									
287			presión		prof		presión	prof	
288							(psi)	(ft)	
289									
290			0		0		0	0	
291			Delc*L*0.052		L		9144.803	13124	
292									
293									
294	Para la línea de respaldo al colapso se utiliza la fórmula que calcula la longitud de la columna de lodo de								
295	respaldo en el peor evento.			Gradiente de presión de poro de					
296				la zona de pérdida de circulación =			9 lb/gal		
297									
298	0.052 *	9	lb/gal	*	L = 0.052 * Delmp * LBK				
299									
300	Donde LBK es la longitud de la columna de lodo que respalda el colapso (ft)								
301									
302	LBK =:	(0.052 *	9	lb/gal	* L) / (0.052 * Delmp)				
303									
304	LBK =	7874.4	ft						
305									
306	Los puntos de la línea de respaldo al colapso quedan de la siguiente manera.								
307									
308									
309			presión		prof		presión	prof	
310							(psi)	(ft)	
311									
312			0		L - LBK		0	5249.6	
313			Delmp * .052 * LBK		L		6142.032	13124	
314									
315									
316									
317									
318									
319									
320									
321									
322									
323									
324									
325									
326									
327									
328									
329									
330									
331									
332									
333	La línea de diseño es es :								
334									
335									
336									
337									
338									
339							1.125		
340									
341	Esta línea es mostrada en la gráfica " evaluación por condiciones de colapso "								
342									
343									
344									
345									
346									
347									

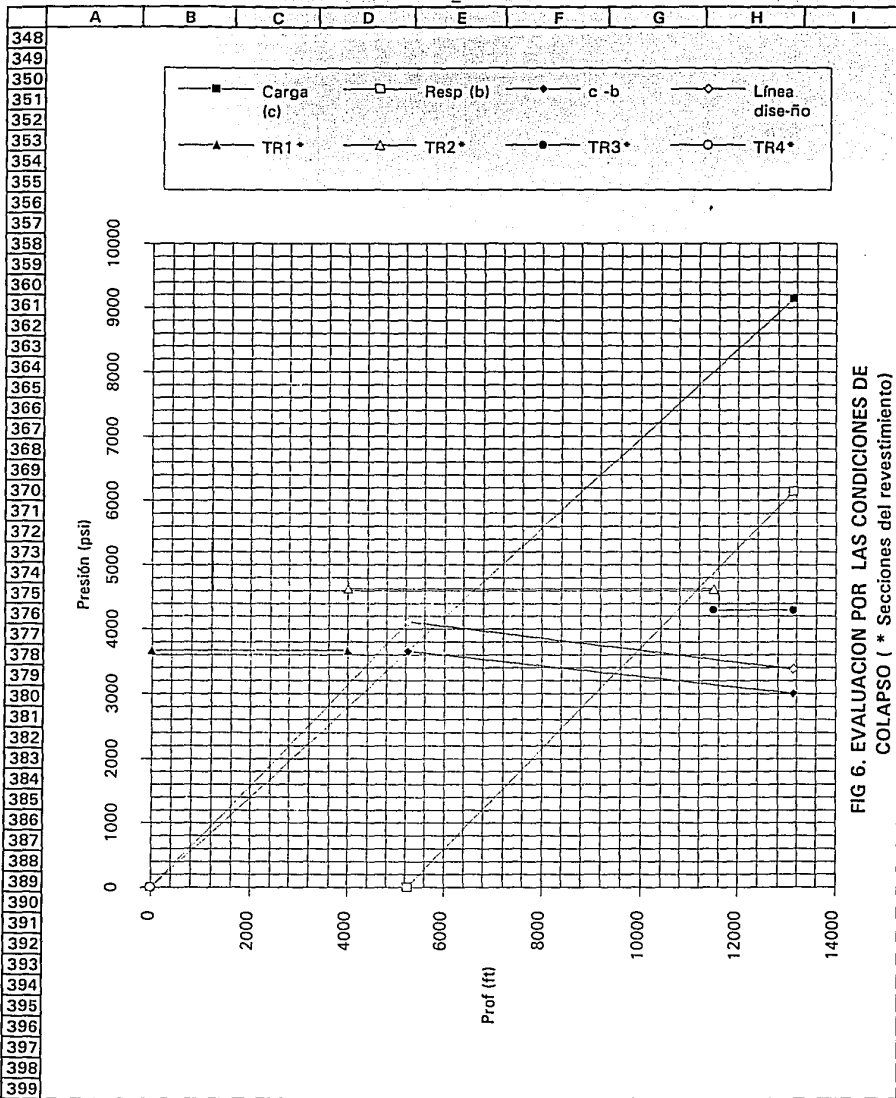


FIG 6. EVALUACION POR LAS CONDICIONES DE COLAPSO (* Secciones del revestimiento)

TENSION3.XLS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	7. DISEÑO POR TENSION								
2									
3	Profundidad (L) :			13124	ft				
4	Densidad del lodo en el que es puesta la TR (Delc) :					13.4	lb/gal		
5									
6									
7									
8						Sección 1	Sección 2	Sección 3	
9						(TR1)	(TR2)	(TR3)	
10	Grado :				P-110	P-110	C-95		
11	Resistencia a la presión interna :				8060	8860	7660	psi	
12	Resistencia al colapso :				3670	4630	4300	pis	
13	Longitud de sección (Ls):				4000	7500	1624	ft	
14	Diámetro interno (d) :				9.85	9.76	9.76	in	
15	Peso nominal por pie (Wn) :				51	55.5	55.5	lb/ft	
16	Diámetro externo (D) :				10.75	10.75	10.75	in	
17	Esfuerzo de cedencia (EY) :				110000	110000	95000	psi	
18	Profundidad de cople (pc) :				4000	11500		ft	
19									
20	a.- Areas transversales de las secciones 1,2 y 3 :								
21									
22	$A1 = \frac{\pi}{4} * (D1^2 - d1^2) =$				14.56128	in ²			
23	$A2 = \frac{\pi}{4} * (D2^2 - d2^2) =$				15.94743	in ²			
24	$A3 = \frac{\pi}{4} * (D3^2 - d3^2) =$				15.94743	in ²			
25									
26	b.- Peso de la TR en el aire, fuerzas de flotación y peso de la TR en el pozo :								
27									
28	Peso sección 1 $W1 = (Ls1 * Wn1) =$					204000	lb		
29	Peso sección 2 $W2 = (Ls2 * Wn2) =$					416250	lb		W1,A1
30	Peso sección 3 $W3 = (Ls3 * Wn3) =$					90132	lb		
31	Peso de la TR en el aire $WS = W1 + W2 + W3 =$					710382	lb		Bf3
32	$Bf1 = -(0.052 * Delc * L) * A3 =$					-145836	lb		
33	$Bf2 = (0.052 * Delc) * (Ls2 + Ls1) * (A3 - A2) =$					0	lb		V2,A2
34	$Bf3 = (0.052 * Delc * Ls1) * (A2 - A1) =$					3863.475	lb		
35	Peso TR en el pozo $WSP = WS + Bf2 + Bf1 + Bf3 =$					568409.4	lb		Bf2
36									
37									
38	NOTA:			(-)					W3,A3
39	Para efectos de cálculos,								
40	los vectores se toman de								Bf1
41	la manera como se muestran.								
42				Compresión					(+)
43									Tensión
44	c.- Máxima resistencia a la carga axial de las secciones del revestimiento								
45									
46	Sección 1 = $EY1 * A1 =$				1601741	lb			
47	Sección 2 = $EY2 * A2 =$				1754217	lb			
48	Sección 3 = $EY2 * A2 =$				1515006	lb			
49									
50									
51									
52									

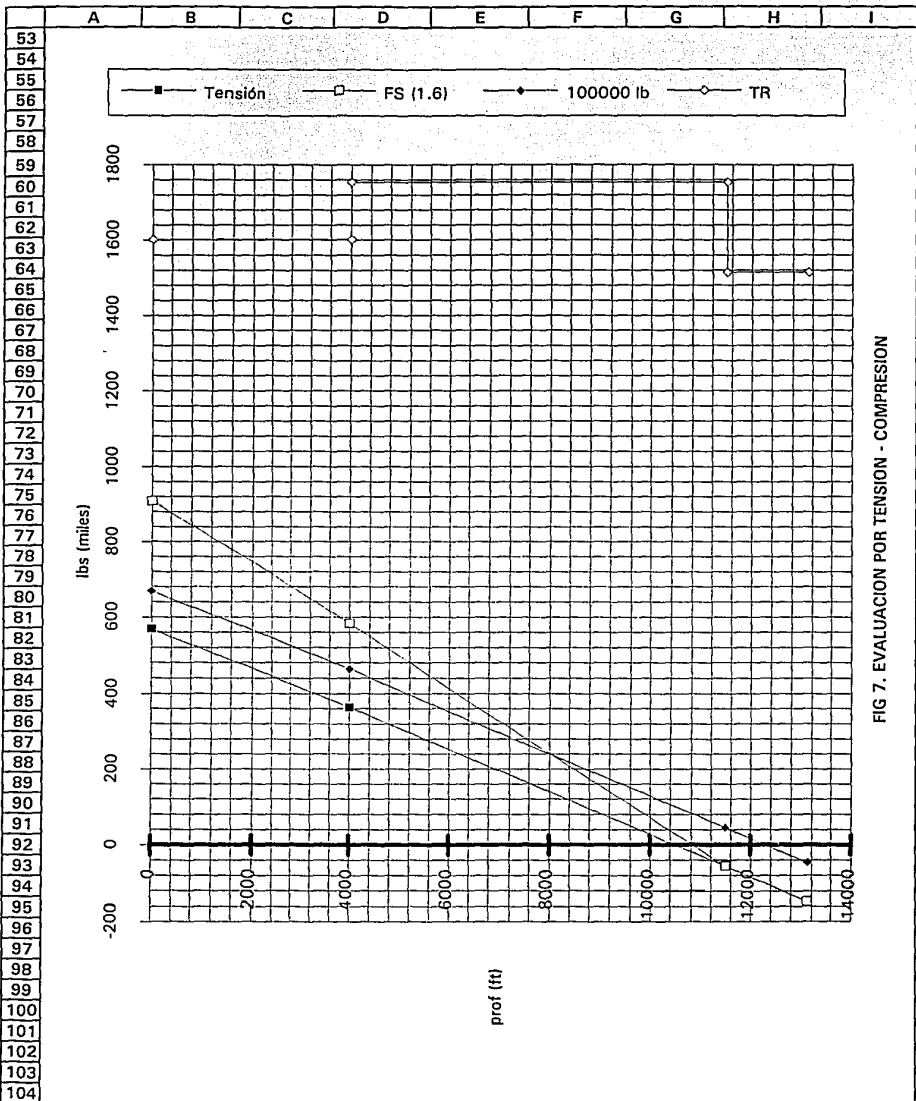


FIG 7. EVALUACION POR TENSION - COMPRESION

TENSION3.XLS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
105									
106									
107	<i>d.- Para la gráfica de tensión-compresión se tienen los siguientes puntos :</i>								
108									
109									
110			Prof.	Tensión	FS (1.6)	Sobrejalón			
111			(ft)	(lb-miles)		100000 lb			
112									
114			0	568.4094	909.455	668.4094			
115			4000	364.4094	583.055	464.4094			
116			4000	364.4094	583.055	464.4094			
117			11500	-55.7041	-55.7041	44.29588			
118			11500	-55.7041	-55.7041	44.29588			
119			13124	-145.836	-145.836	-45.8361			
126									
127									
128									
129	B. CALCULO DE LOS EFECTOS BIAXIALES EN LA TR								
130									
131									
132	<i>a.- Determinación de los esfuerzos actuales en la tubería .</i>								
133									
134	Sección 1:								
135	Esfuerzo parte alta	=			39035.67	(lb/in ²)		Tensión	
136	Esfuerzo parte baja	=			25025.91	(lb/in ²)		Tensión	
137	Sección 2:								
138	Esfuerzo parte alta	=			22850.66	(lb/in ²)		Tensión	
139	Esfuerzo parte baja	=			-3492.98	(lb/in ²)		compresión	
140	Sección 3:								
141	Esfuerzo parte alta	=			-3492.98	(lb/in ²)		compresión	
142	Esfuerzo parte baja	=			-9144.8	(lb/in ²)		compresión	
143									
144									
145	<i>b.- Determinación de la relación "esfuerzo actual en la tubería / EY "</i>								
146									
147	Sección 1								
148	Parte alta	=	Esfuerzo parte alta / EY1 =		0.35487			Tensión	
149	Parte baja	=	Esfuerzo parte baja / EY1 =		0.227508			Tensión	
150									
151	Sección 2								
152	Parte alta	=	Esfuerzo parte alta / EY2 =		0.207733			Tensión	
153	Parte baja	=	Esfuerzo parte baja / EY2 =		-0.03175			compresión	
154									
155	Sección 3								
156	Parte alta	=	Esfuerzo parte alta / EY3 =		0.036768			compresión	
157	Parte baja	=	Esfuerzo parte baja / EY3 =		-0.09626			compresión	
158									
159									
160									
161									
162									

TENSION3.XLS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
163									
164	<i>c.- Nuevas resistencias de la tubería por causa de los esfuerzos biaxiales</i>								
165									
166									
167	Sección 1								
168									
169	Parte superior :								
170	Resistencia a la presión interna :					9108	psi		
171	Resistencia al colapso :					3320	psi		
172									
173	Parte inferior :								
174	Resistencia a la presión interna :					8785	psi		
175	Resistencia al colapso :					3490	psi		
176									
177	Sección 2								
178									
179	Parte superior :								
180	Resistencia a la presión interna :					9657	psi		
181	Resistencia al colapso :					4330	psi		
182									
183	Parte inferior :								
184	Resistencia a la presión interna :					8683	psi		
185	Resistencia al colapso :					4640	psi		
186									
187									
188	Sección 3								
189									
190	Parte superior :								
191	Resistencia a la presión interna :					7506	psi		
192	Resistencia al colapso :					4330	psi		
193									
194	Parte inferior :								
195	Resistencia a la presión interna :					7277	psi		
196	Resistencia al colapso :					4389	psi		
197									
198									
199									
200									
201									
202									
203									
204									
205									
206									
207									
208									
209									
210									
211									
212									
213									
214									

TENSION3.XLS

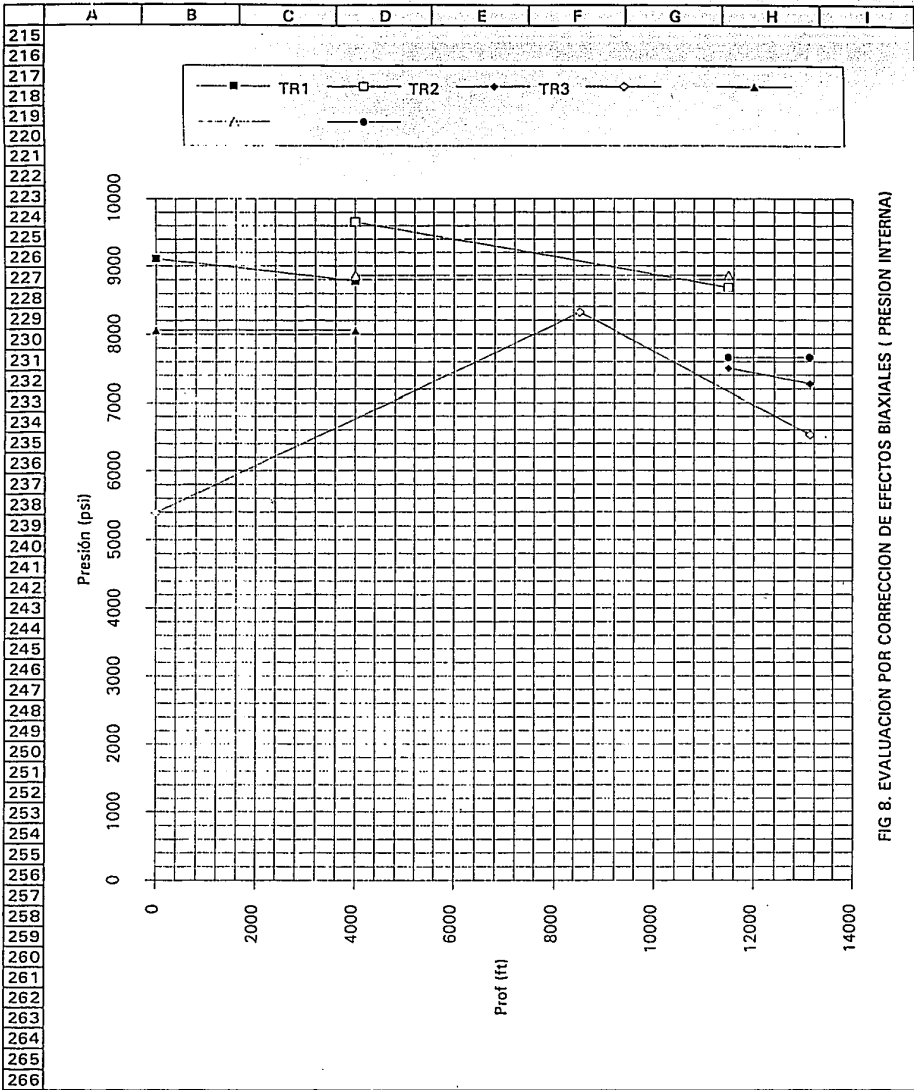
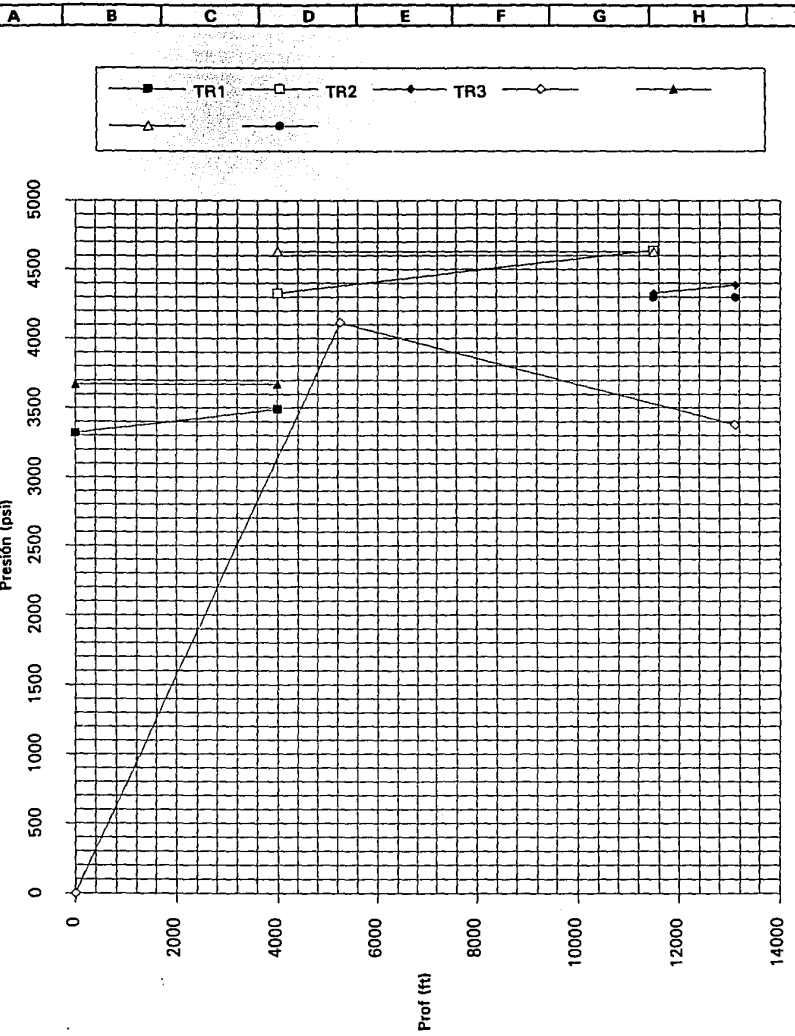


FIG 8. EVALUACION POR CORRECCION DE EFECTOS BIAJIALES (PRESION INTERNA)



EVALUACION POR CORRECCION DE EFECTOS BIAJIALES (COLAPSO)

NOMENCLATURA (ANEXO 1)

A1,A2,A3 *	.....	Áreas transversales de tubería (in ²).
Bf1,Bf2 y Bf3	.....	Fuerzas de flotación (lb).
d1,d2,d3 *	.....	Diámetros internos de tubería (in).
D1,D2,D3 *	.....	Diámetros externos de tubería (in).
Deg	.....	Densidad del gas (lb/gal).
Delmp	.....	Densidad del lodo más pesado a utilizarse debajo de la zapata (lb/gal).
Delc	.....	Densidad del lodo en el cual es colocada la TR (revestimiento) (lb/gal).
EY1,EY2,EY3*	.....	Esfuerzos de cedencia de tubería (psi).
FS	.....	Factor de seguridad (adim).
GRADfrac	.....	Gradiente de fractura en la zapata (lb/gal).
GRADg	.....	Gradiente de presión del gas GRADg (psi/ft).
L	.....	Profundidad de la zapata (ft).
LBK	.....	Longitud de la columna de lodo de respaldo al colapso (TR intermedia) (ft)
Ls1,Ls2,Ls3	.....	Longitudes de las secciones de la TR (ft).
MXPS	.....	Máxima presión superficial MXPS (TR intermedia) o Presión de trabajo del equipo superficial (psi).
pc1	.....	Profundidad del cople entre la sección 1 y la sección 2 (ft).
pc2	.....	Profundidad del cople entre la sección 2 y la sección 3 (ft).
pc3	.....	Profundidad del cople entre la sección 3 y la sección 4 (ft).
Pcg	.....	Presión ejercida por la columna de gas de longitud Y (psi).
Pcl	.....	Presión ejercida por la columna de lodo de longitud X (psi).
PI	.....	Presión de inyección en la zapata (psi).
Presp @L	.....	Valor (de presión) de la línea de respaldo a la presión interna a la profundidad L (psi).
Presp@ X	.....	Valor (de presión) de la línea de respaldo a la presión interna a la Profundidad X (psi).

W1,W2,W3	..... Pesos de las secciones de tubería que conforman la TR (lb).
Wn1,Wn2,Wn3*	..... Pesos nominales de tubería (lb/ft).
WS	..... Peso de la TR en el aire (lb).
WSP	..... Peso de laTR en el pozo (lb).
X	..... Longitud de la columna de lodo (utilizada en en cálculo de las cargas de presión interna para TR intermedia), es la profundidad de la interfase lodo - gas (ft).
Y	..... Longitud de la columna de gas (utilizada en el cálculo de las cargas de presión interna para TR intermedia) (ft).
π	..... Número Pi (3.14159).

(*) Los números 1,2,y 3 se refieren a las secciones de tubería que conforman el revestimiento.

ANEXO 2

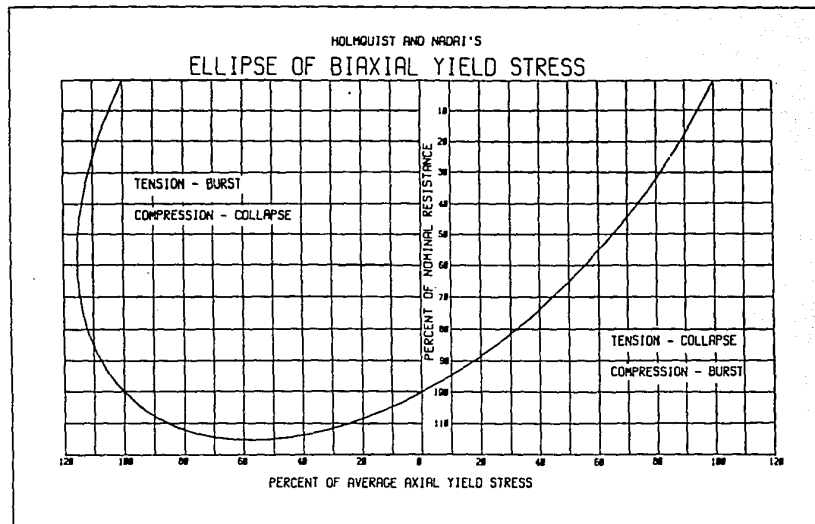


FIG 13. ELLIPSE OF BIAXIAL YIELD STRESS

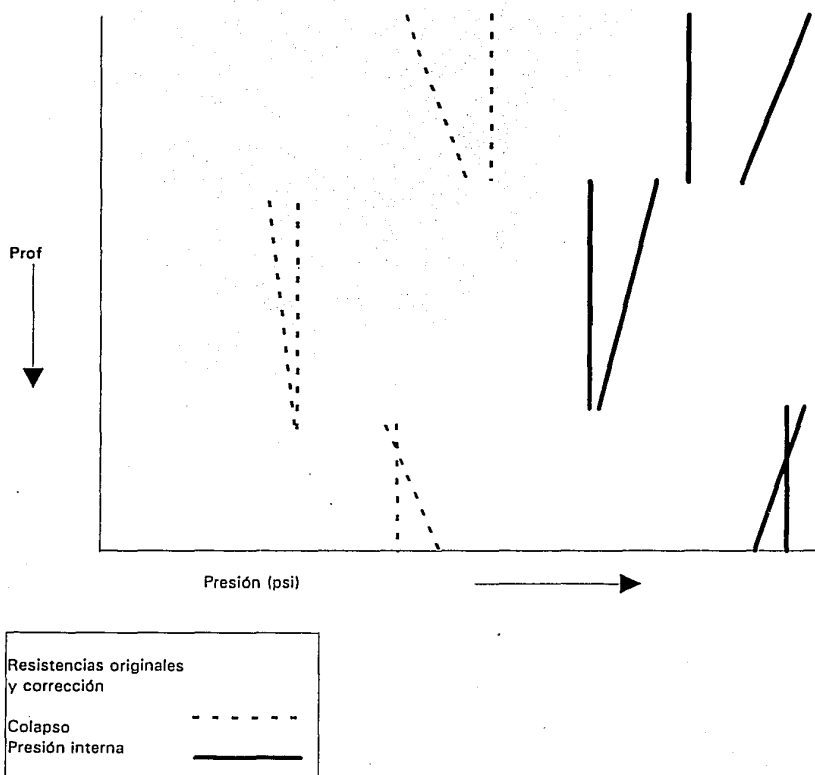


FIG 12. CORRECCION DE LAS RESISTENCIAS AL COLAPSO Y A LA PRESION INTERNA POR CAUSA DE LOS EFECTOS BIAXIALES

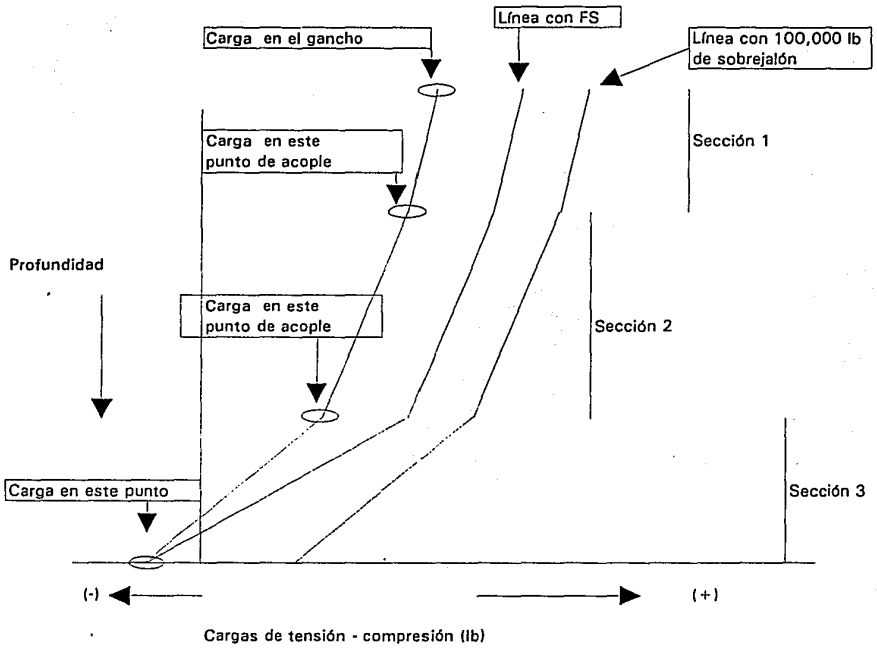


FIG 11. EVALUACION DE LA "TR " POR TENSION.
 (Es el resultado de la solución del diagrama de cuerpo libre)

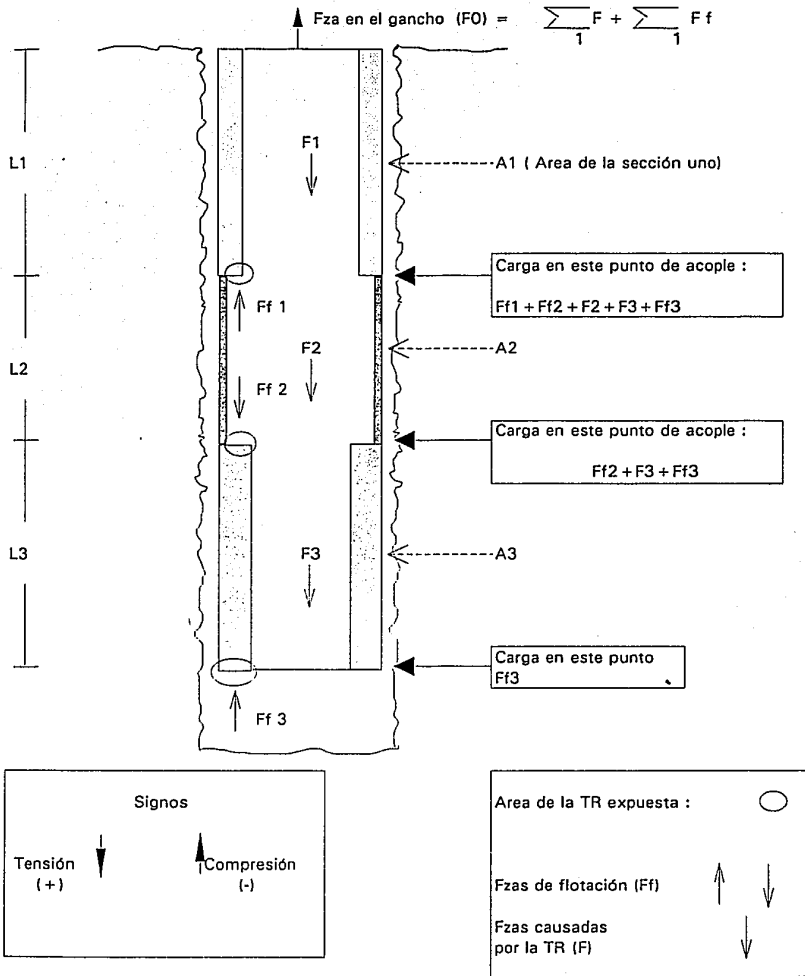


FIG 10. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE

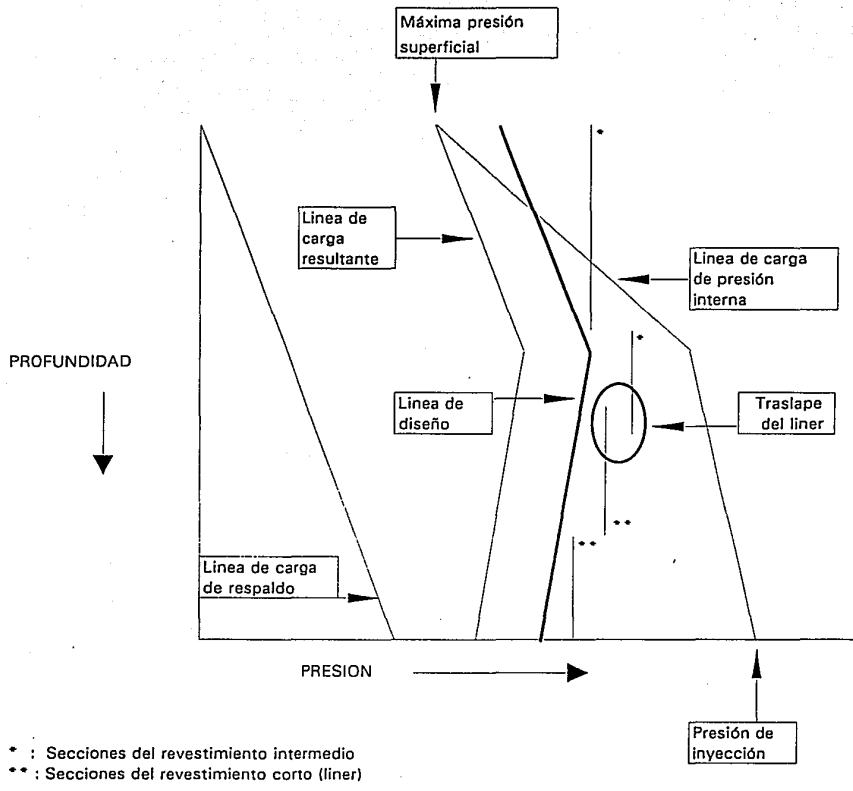


FIG 14. GRAFICA PARA DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO INTERMEDIA Y CORTA (PRESION INTERNA)

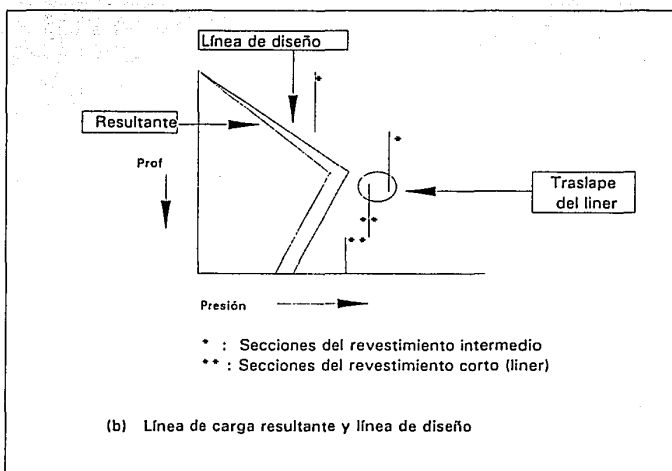
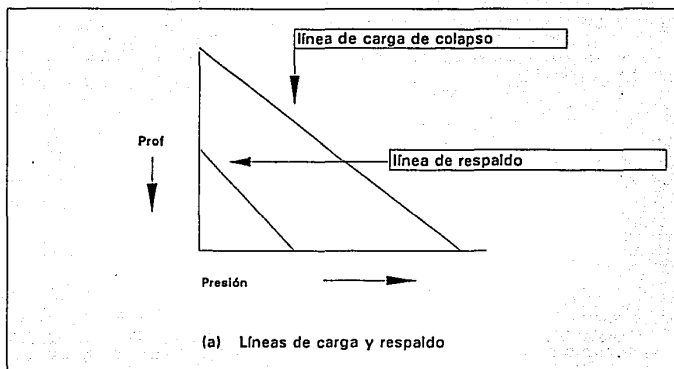


FIG 15. GRAFICAS PARA DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO INTERMEDIA Y CORTA (COLAPSO)

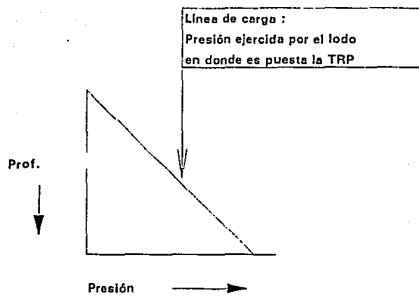
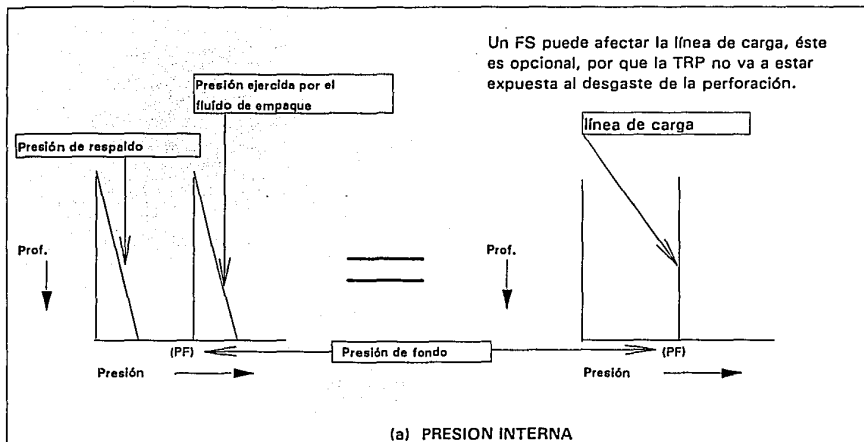


FIG 16. GRAFICAS PARA DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE PRODUCCION (TRP)

ANEXO 3

PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO

El presente resumen consta de dos partes:

Las consideraciones de colapso, presión interna y tensión que se aplicaron en el diseño de TR en las costas del golfo a finales de los años cincuenta y en los años sesenta (método convencional) ¹. y las consideraciones del método gráfico ².

a. Consideraciones de colapso, presión interna y tensión axial que se aplicaron en el diseño de TR en las costas del golfo a finales de los años cincuenta y en los años sesenta.

Tres consideraciones básicas que afectan el diseño de la TR se toman en cuenta, estas son: Colapso, Tensión axial y Presión interna. Generalmente no se toma en cuenta ninguna otra consideración.

- COLAPSO : Las cargas de colapso son proporcionadas por el fluido de perforación o por el fluido de la formación en la parte externa de la TR, el factor de diseño o factor de seguridad es el valor resultante de dividir el valor de la resistencia de la tubería al colapso entre la presión hidrostática del fluido en la parte externa de la tubería.

¹Goins, et. al 1965

²Goins, et. al 1966

El diseño de la TR consiste en seleccionar la combinación de tuberías más económica que tenga suficiente resistencia al colapso para producir el diseño deseado. Si existe una duda acerca de escoger entre dos tuberías, una pesada de bajo grado y otra ligera de alto grado, ambas con la misma resistencia al colapso e igual costo, la de mayor grado y liviana debe ser escogida para disminuir la tensión en las secciones superiores de la TR.

Debajo de la cima del cemento se recomienda un factor de seguridad de 0.85 y después un factor de seguridad de 1.0 es aplicado en toda la longitud restante. La TR se considera generalmente vacía, aunque existe la posibilidad de considerar que el nivel del lodo de perforación no caerá por debajo de una profundidad específica. El cálculo de los efectos biaxiales por efecto de la tensión se realiza.

- TENSION : El diseño de TR generalmente es controlado por las cargas de tensión en la TR, asumiendo que la TR cuelga libremente en el aire (el efecto de flotación también puede ser considerado). El factor de diseño se encuentra en el rango comprendido entre 1.50 y 2.00.

-PRESION INTERNA :

En la mayoría de las áreas no se consideraron las cargas de presión interna, usualmente las presiones son presiones normales (0.465 psi/ft) y la carga de tensión axial requeridas, exigen suficiente

peso en la TR para resistir las presiones internas que pudien ser impuestas. Excepciones a esta regla son algunos pozos de gas con presión anormal situados en las áreas de las costas del golfo. En pozos de gas la máxima presión esperada es la presión en el fondo del pozo. El factor de seguridad que generalmente se usa es 1.1.

DISEÑO DE LA "TR" SUPERFICIAL E INTERMEDIA A LA PRESION INTERNA EN POZOS DE ALTA PRESION.

La condición en la cual existe la mayor carga de presión interna en algún punto de la TR ocurre si la TR se encuentra cerrada y llena con gas de la formación, en este caso, la máxima presión que se puede desarrollar corresponde a un gradiente de presión del orden de 1.00 psi/ft. Esta presión fraturaría la formación bajo la zapata y alguna presión más alta sería liberada. De esta manera, la máxima presión se desarrollaría en el fondo del pozo y decrece hacia la superficie con el peso proporcionado por el gradiente del gas. La carga neta de presión interna en la TR en cualquier punto es la presión del gas menos la presión hidrostática fuera de la TR. Matemáticamente, esto es:

$$P_{neta} = G_s \text{ prof}_1 - G_g (\text{ prof}_1 - \text{ prof}_2) - 0.052 \text{ De}_{1mp} \text{ prof}_2 \quad (1)$$

donde:

P_{neta} = Presión interna neta (psi) en la profundidad $prof_2$, donde $prof_2 < prof_1$.

$prof_1$ = Profundidad de la zapata (ft).

$prof_2$ = Profundidad en consideración (ft).

G_s = Gradiente de sobrecarga (psi/ft).

De_{imp} = Densidad del lodo más pesado a utilizarse debajo de la zapata (lb/gal).

Para diseñar la parte superior de una sección (parte inferior de la siguiente sección) de un particular peso y grado, la ecuación (1) es rearmada al substituir $R_t/1.1$ por P_{neta} y resolviendo para $prof_2$,

$$prof_2 = \frac{0.9 prof_1 - P_{neta}}{0.052 De_{imp} - 0.1} = \frac{0.9 prof_1 - \frac{R_t}{1.1}}{0.052 De_{imp} - 0.1}$$

$$prof_2 = \frac{17.3 prof_1 - 17.5 R_t}{De_{imp} - 1.92} \quad (2)$$

donde:

R_t = Resistencia de la tubería a la presión interna.

Las fórmulas (1) y (2) suponen que debajo de la zapata existe una formación que puede resistir el peso que proporciona una columna de

lodo de densidad 19.2 lb/gal (i.e., un gradiente de 1 psi/ft), las fórmulas también asumen la condición de presión interna más severa (i.e., se considera la TR llena de gas).

Si se substituye $(0.052 D_{e_x})$ por G , en la ecuación anterior se tiene

$$prof_2 = \frac{prof_1 (0.052 D_{e_x} - 0.1) - \frac{R_t}{1.1}}{(0.052 D_{e_{1mp}} - 0.1)}$$

$$prof_2 = \frac{prof_1 (D_{e_x} - 1.92) - 17.5 R_t}{D_{e_{1mp}} - 1.92} \quad (3)$$

donde:

D_{e_x} = Densidad del lodo requerido para fracturar la formación debajo de la zapata (lb/gal).

Esta ecuación es usada para localizar puntos de cambio (i.e., para localizar la parte superior de una sección) que resultan de cualquier densidad de lodo anticipada por encima o por debajo de un gradiente de 1 psi/ft.

DISEÑO DE LA "TR" DE PRODUCCION A LA PRESION INTERNA.

Cuando una TR de producción es diseñada, la condición de presión interna mas severa ocurre si llega a existir una fuga en el fondo de la TR y una columna de gas que asciende a través del lodo llega a la superficie, entonces la máxima presión interna en cualquier punto de la TR de producción es la presión de la formación más el peso de la columna de lodo desde la superficie hasta el punto en consideración menos la presión del lodo en el espacio anular de la TR de producción desde la superficie hasta el punto en consideración. Matemáticamente esto es:

$$P_{neta} = P_f + 0.052 De_i prof_2 - 0.052 De_e prof_2$$

$$P_{neta} = P_f + 0.052 prof_2 (De_e - De_i) \quad (4)$$

donde:

De_e = densidad del fluido localizado en el exterior de la TR
(lb/gal)

De_i = densidad del fluido localizado en el interior de la TR
(lb/gal)

Substituyendo $R_i/1.1$ por P_{neta} y resolviendo para $prof_2$

$$prof_2 = \frac{\frac{R_t}{1.1} - P_f}{0.052 (De_i - De_e)} = \frac{17.5 R_t - 19.2 P_f}{De_i - De_e} \quad (5)$$

Esta fórmula se usa para determinar los cambios de puntos de tubería cuando la densidad del lodo es mayor dentro de la TR que en su parte exterior.

Cuando la densidad de el lodo es igual en el interior y en el exterior de la TR, no se requiere cambios en la resistencia de la TR a la presión interna y la fórmula (4) se convierte en

$$R_t = P_f \quad (6)$$

donde:

P_f = Presión de formación (psi)

El requerimiento de presión interna para la TR en cualquier profundidad es

$$R_t = 1.1 P_f \quad (7)$$

Si la densidad del fluido que se encuentra en el interior de la TR es menor que el que se encuentra en la parte externa, la fórmula

número (5) se puede utilizar y $prof_2$ es la parte superior de la sección de análisis, de esta manera la carga de presión interna disminuye cuando disminuye la profundidad.

Si la TR se asume sin lodo en su interior:

$$P_{neta} = P_f - G_g (prof_1 - prof_2) - 0.052 prof_2 De_{lc} \quad (8)$$

Y resolviendo para $prof_2$

$$prof_2 = \frac{P_{neta} - P_f + G_g prof_1}{G_g - 0.052 De_e} \quad (9)$$

Substituyendo $R_t/1.1$ por P_{neta} para obtener el punto de cambio

$$prof_2 = \frac{P_f - 0.91 R_t - G_g prof_1}{0.052 De_e - G_g} \quad (10)$$

Utilizando 0.1 psi/ft como el valor del gradiente del gas se tiene

$$prof_2 = \frac{1.92 (10 P_f - prof_1) - 17.5 TR}{De_e - 1.92} \quad (11)$$

En donde nuevamente $prof_2$ es la parte superior de la sección de análisis y la carga de presión interna disminuye cuando disminuye la profundidad.

b. CONSIDERACIONES DEL METODO GRAFICO

El método gráfico es presentado por W. C. Goins., B. J. Collins., y , T.B. O'Brien en 1,966 , en la última parte de una serie de cuatro artículos " A new approach to tubular string design " publicada en la revista WORLD OIL y el título original del método es " Graphical method for burst design ". Las ecuaciones desarrolladas para cambios de puntos en la primera parte de este resumen sirven como alternativa al método gráfico y viceversa, en otras palabras el método gráfico toma en cuenta las mismas consideraciones que toma en cuenta el método convencional desarrollado en el inicio del resumen. El método grafica las máximas condiciones de presión interna de servicio requeridas para el diseño en una gráfica de presión (psi) vs profundidad (ft) y los cambios de puntos se realizan sobre la gráfica. De esta manera, la ventaja que presenta la utilización del método gráfico sobre el método convencional es evidente, la utilización del método gráfico evita una gran cantidad de cálculos correspondientes a los cambios de puntos de las diferentes secciones de la TR.