

24/28



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

Calculo de movimientos en aparejos  
de producción, debidos a cambios  
de presión y temperatura

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A  
Fernando Siles Coria

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D.F.

1988





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

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

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

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

# I N D I C E

Pagina

I	INTRODUCCION .....	1
II	TIPOS DE TERMINACION DE POZOS	
	PETROLEROS .....	3
II.1	OBJETIVOS DE LA TERMINACION DE POZOS	
	PRODUCTORES DE HIDROCARBUROS .....	3
III	EFFECTOS DE LOS CAMBIOS DE PRESION Y	
	TEMPERATURA EN EL APAREJO DE	
	PRODUCCION .....	22
III.1	LEY DE HOOKE .....	22
III.2	ECUACIONES QUE DETERMINAN LOS CAMBIOS	
	DE LONGITUD Y ESFUERZOS EN EL	
	APAREJO DE PRODUCCION .....	28
	- EFECTO PISTON .....	31
	- EFECTO DE PANDEO HELICOIDAL O	
	ALABEO .....	35
	- EFECTO DE ABALONAMIENTO .....	42
	- EFECTO DE TEMPERATURA .....	45
	- EFECTOS COMBINADOS .....	52
	- EFECTO QUE PRODUCE DEJAR CARGA	
	SOBRE EL EMPACADOR .....	52
	- DETERMINACION DE ESFUERZOS EN EL	
	APAREJO DE PRODUCCION FIJO AL	
	EMPACADOR .....	56
	- DETERMINACION DEL ESFUERZO DE PLEXION	
	EN EL APAREJO DE PRODUCCION .....	65

	Pagina
IV	PROGRAMA DE COMPUTO ..... 67
IV.1	PROCEDIMIENTO DE CALCULO ..... 69
-	ALGORITMO ..... 71
-	DIAGRAMA DE FLUJO ..... 95
-	LISTADO ..... 104
V	EJEMPLOS NUMERICOS ..... 114
	CONCLUSIONES ..... 137
	NOMENCLATURA ..... 139
	BIBLIOGRAFIA ..... 144

## CAPITULO I

## INTRODUCCION

Es una realidad que durante las operaciones de terminación, estimulación y reparación de pozos productores de aceite, los cambios de presión y temperatura tienen gran efecto sobre la tubería de producción anclada al empacador .

Durante el bombeo de grandes volúmenes de fluidos de estimulación a altas presiones y con temperaturas menores que la del fondo del pozo, la longitud de la tubería de producción se acorta notablemente y éste acortamiento puede ser mayor que la longitud de los sellos del empacador, en el caso de que el empacador permita el movimiento de la tubería de producción, ésta puede desanclarse del empacador y ocasionar fuga de presión al espacio anular, con el consecuente daño a la tubería de revestimiento de explotación .

Cuando se tiene un aparejo con la tubería de producción anclada al empacador sin permitir movimiento alguno de la tubería de producción, los cambios de presión y temperatura, producen grandes esfuerzos tanto en la tubería de producción como en el empacador, que pueden provocar daños permanentes al aparejo de producción .

El estudio analítico de estos cambios de longitud y esfuerzos en la tubería de producción con empacador por efecto de presión y temperatura fue desarrollado por Arthur Lubinski<sup>5</sup> en el año de 1961, para el tipo de terminaciones uniformes que se caracterizan por estar compuestas de un solo diámetro de tubería de producción y tubería de revestimiento. Posteriormente, D.J.Hammerlindl<sup>4</sup> en el año de 1977, aplicó el análisis de A.Lubinski, para la determinación del cambio de

longitud y esfuerzos en el aparejo de producción para el tipo de terminaciones combinadas, las cuales están caracterizadas por estar compuestas de más de un diámetro, tanto de tubería de producción como de tubería de revestimiento.

La presentación de éste trabajo se fundamenta en los estudios anteriormente presentados por A.Lubinski y D.J.Hammerlindl.

Cabe señalar que en la presentación de éste trabajo, se determinarán los siguientes cambios de longitud y esfuerzos, en el aparejo de producción, estos son :

- Efecto de pistón
- Efecto de pandeo helicoidal
- Efecto de abalonzamiento
- Efecto de temperatura
- Efectos combinados por presión y temperatura
- Efectos al dejar carga sobre el empacador
- Esfuerzos cuando se tiene el aparejo de producción fijo al empacador.
- Esfuerzo de flexión por presión interna en el aparejo de producción.

Así mismo, cabe señalar que con la determinación de los cambios de longitud y esfuerzos en el aparejo de producción - se podrá seleccionar el tipo de empacador, la longitud de extensiones pulidas y de sellos, para operaciones de reparación futuras, así como la resistencia mínima de la tubería de producción y de las juntas .

Es necesario indicar que en el cálculo del efecto por temperatura, se aplicó el método simplificado de A.Romero Juárez<sup>8</sup>, para pozos inyectoros y productores, ya que éste efecto es de lo más importante.

## C A P I T U L O    I I

## "TIPOS DE TERMINACION DE POZOS PETROLEROS".

La terminación de un pozo productor de hidrocarburos, es el conjunto de actividades realizadas para comunicar la formación productora de hidrocarburos con la superficie.

Esta debe planearse de acuerdo al tipo de yacimiento que se requiera explotar, durante un tiempo determinado.

### II. 1 OBJETIVOS DE LA TERMINACION DE POZOS PRODUCTORES DE HIDROCARBUROS.<sup>9</sup>

Es importante definir las consideraciones necesarias para establecer la comunicación de la formación productora de hidrocarburos con la superficie.

Estas consideraciones se mencionan brevemente a continuación:

- Permitir la explotación óptima de hidrocarburos al mínimo costo. En función del análisis económico establecido para la explotación de los hidrocarburos, se deberán minimizar en lo mas posible los costos operativos de la terminación.
- Selección del equipo superficial y subsuperficial. Es importante efectuar la selección adecuada del equipo superficial y subsuperficial, dependiendo del tipo de terminación que se instale, de su capacidad productiva, de las operaciones de reparación que se efectuen a futuro y del lugar de ubicación del pozo productor de hidrocarburos.
- Minimizar en lo mas posible el daño a la formación. Es importante minimizar el daño a la formación cuando se lleve a cabo la terminación, reparación o tratamientos de estimulación al pozo. Esto ayudará a que el pozo produzca su máximo gasto.
- Permitir la instalación de equipos para llevar a cabo tratamientos de estimulación, reparaciones mayores y menores.

Quando se lleven a cabo operaciones que nos permitan mantener la productividad de los pozos, es necesario que no exista cualquier tipo de obstrucción ó impedimento para llevar a cabo este tipo de operaciones.

- Permitir la instalación de sistemas artificiales de producción, cuando la energía del yacimiento no es la suficiente para transportar los fluidos hasta la superficie, el pozo deberá estar acondicionado para que se pueda llevar a cabo la instalación de algún sistema artificial de producción, que puede ser de:
  - Bombeo neumático continuo e intermitente
  - Bombeo hidráulico tipo pistón
  - Bombeo hidráulico jet (chorro)
  - Bombeo electrocentrifugo.

## II.2 TIPOS DE TERMINACION DE POZOS PRODUCTORES DE HIDROCARBUROS.<sup>1</sup>

La terminación de un pozo productor de hidrocarburos, es la actividad que sigue a la perforación de este mismo. Es así como por medio de la terminación de un pozo petrolero es posible extraer los hidrocarburos del yacimiento a la superficie.

Para efectuar la terminación, debe planearse y programar se previamente su desarrollo.

Para cualquiera que sea la terminación que se programe, se tienen dos tipos de pozos:

- Pozo con yacimiento productor descubierto.
- Pozo con yacimiento productor ademado.

Los tipos de terminación mas usuales son :

- A.- Terminación en agujero descubierto.
- B.- Terminación en agujero ademado.

A.- Terminación en agujero descubierto.

A.1- Terminación con tubería de producción franca.

Este tipo de terminación es recomendable cuando la formación productora se encuentra ubicada exclusivamente en la zona de aceite. Así mismo, la formación productora deberá ser no deleznable, y a la vez, se deberá tener conocimiento de las características de los fluidos producidos. ( Fig. 2.1 )

A continuación se describen brevemente las ventajas y desventajas de este tipo de terminación.

#### V E N T A J A S :

Es una terminación, en la cual el tipo de operación es mínimo, ya que solamente se instala la tubería de producción en el **cabezal** con su respectivo equipo superficial.

Es una terminación muy económica y bastante rentable, - ya que no requiere de accesorios subsuperficiales y se puede explotar por tubería de producción y espacio anular.

Es recomendable para la producción de aceites viscosos, ya que explotando los hidrocarburos por espacio anular, la caída de presión por fricción **es menor** .

En este tipo de terminación existe la posibilidad de la instalación de una tubería corta ó liner, para incrementar - la vida productiva del pozo.

#### D E S V E N T A J A S :

La tubería de revestimiento estará expuesta a las presiones ejercidas por el yacimiento, lo cual, provocará fatigamiento en la tubería de ademe.

Daño a la tubería de ademe de explotación, debido a que los hidrocarburos producidos contienen sustancias corrosivas ó abrasivas.

Es difícil inducirlo cuando no fluye, debido a la comunicación que existe entre la tubería de producción y tubería de revestimiento.

No se pueden efectuar tratamientos ó estimulaciones -- cuando las presiones de inyección son mayores que la presión interior que resiste la tubería de revestimiento. Así mismo, nó se tendrá un control en la dirección del fluido al efectuar una estimulación .

No existe un control efectivo en la producción de agua - ó gas, debido a que la formación productora está descubierta.

No existe la manera de tener un control de flujo en el - interior del pozo, ya que no se pueden instalar dispositivos de control de flujo, tales como : estranguladores de fondo, valvulas de seguridad ó de pie, etc.

Se requiere llevar a cabo limpiezas periódicas en la - formación productora, ya que el área de flujo es muy extensa y estará expuesta a disminuir su permeabilidad, debido a impurezas de la misma formación o hidrocarburos .

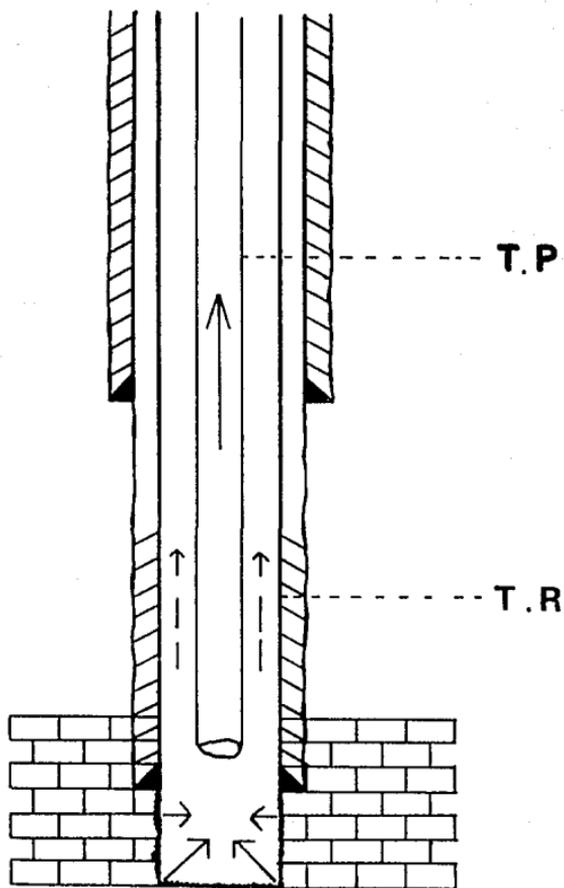


FIG.2.1 Terminación con T.P franca .

## A.2.- Terminación con tubería de producción, un empacador y accesorios.

Este tipo de terminación en un pozo con formación productora descubierta, se puede efectuar con empacador sencillo recuperable ó permanente, todo dependiera de la profundidad a la que va ir instalado, de las presiones del yacimiento durante su explotación y de las operaciones que se dese realizar despues de la terminación, como son: tratamientos de limpieza, estimulaciones, etc.

En este tipo de aparejos, la tubería de producción lleva como accesorios una válvula de circulación y un niple de asiento. ( Fig. 2.2 )

Las ventajas y desventajas se mencionan brevemente a continuación.

### V e n t a j a s :

Se puede realizar cualquier tipo de tratamientos de estimulación, ya que el empacador aislara la tubería de adme intermedia.

La presión del yacimiento y la presencia de fluidos corrosivos no afecta la tubería de adme de explotación, debido al aislamiento del empacador y la tubería de producción.

Se puede explotar simultaneamente por espacio anular, abriendo la válvula de circulación para obtener altos gastos.

### D e s v e n t a j a s :

No existe un control efectivo en la producción de agua ó gas, debido a que la formación productora está descubierta.

Mayor tiempo de operación debido a diversos viajes que se hacen con diferentes herramientas y mayor costo por los accesorios que lleva la tubería de producción.

Es difícil la explotación para aceites viscosos, debido a que la caída de presión por fricción es mayor.

No existe algun control que nos determine la dirección del fluido al efectuar un tratamiento de estimulación.

Se requiere llevar a cabo limpiezas periódicas en la formación productora, ya que el área de flujo es muy extensa y estará expuesta a disminuir su permeabilidad, debido a impurezas de la misma formación e hidrocarburos.

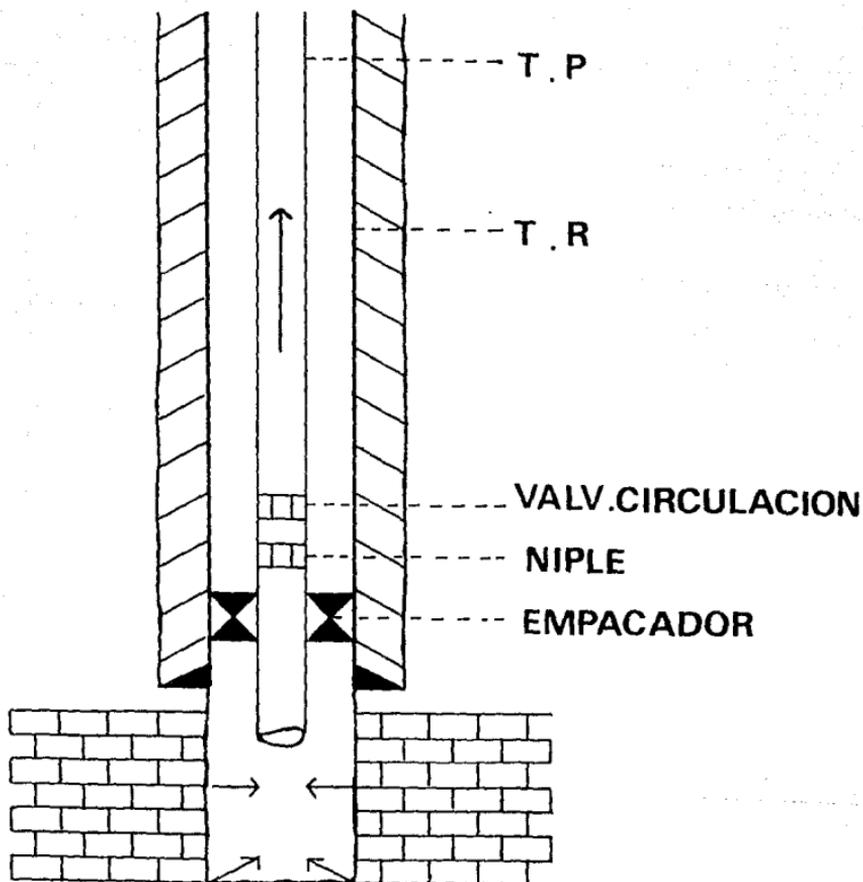


FIG.2.2 Terminación con T.P, empacador y accesorios.

B. - Terminación en agujero ademado.

B.1.- Terminación sencilla con tubería de producción franca.

En este tipo de terminación la tubería de ademe de explotación se encuentra cementada en la formación productora de hidrocarburos. Por lo tanto, se requiere disparar la tubería de ademe de explotación, para comunicar la formación productora con el pozo. ( Fig. 2.3 )

A continuación se mencionan brevemente las ventajas y desventajas de este tipo de terminación.

**V e n t a j a s :**

Existe la posibilidad de incrementar la profundidad del pozo, perforando dicho intervalo e instalando una tubería corta ó liner, para incrementar la producción de aceite en caso de existir conificación gas-aceite.

Este tipo de terminación se puede acondicionar a una terminación múltiple, cuando se tiene más de un yacimiento productor de hidrocarburos.

Es recomendable para la producción de aceites viscosos, ya que explotando los hidrocarburos por el espacio anular - la caída de presión por fricción es menor.

El tiempo de operación es mínimo, ya que solamente se instala la tubería de producción en el **cabezal** con su respectivo equipo **superficial** .

Es una terminación económica y rentable, ya que no requiere de accesorios subsuperficiales, se puede explotar por tubería de producción y espacio anular.

Se pueden efectuar tratamientos de estimulación, ya que se podrá controlar la dirección del fluido durante el

tratamiento de estimulación.

#### Desventajas:

Es difícil inducirlo cuando no fluye debido a la comunicación que existe entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento.

Daño a la tubería de ademe de explotación debido a que los hidrocarburos producidos contienen sustancias corrosivas o abrasivas.

El diámetro del pozo es menor a comparación del tipo de terminación en agujero descubierto, debido a la cementación de la tubería de ademe de explotación y por lo tanto existirá una ligera disminución en la producción del pozo.

Se requiere de una buena cementación en la tubería de revestimiento de explotación, para evitar la producción de fluidos indeseables. Así mismo, para los trabajos subsecuentes u operaciones que se realicen en el pozo sean efectivas.

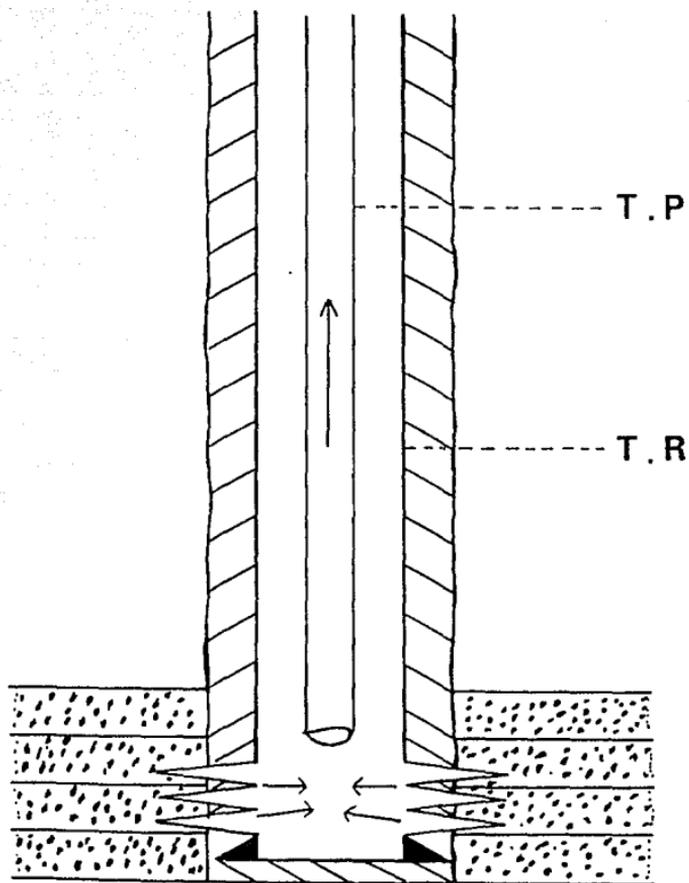


FIG.2.3 Terminación con T.P franca .

### 3.2.- Terminación sencilla con tubería de producción, un emparador y accesorios.

Esta terminación puede efectuarse con emparador permanente ó recuperable dependiendo de la presión del yacimiento y del tipo de fluidos que se produzcan.

El yacimiento puede tener contactos gas-aceite ó aceite-agua, que mediante una buena cementación de la tubería de ademe y - disparos precisos, se tendrá una adecuada terminación.

En este tipo de aparatos la tubería de producción lleva como accesorios una válvula de circulación y un niple de asiento. ( Fig. 2.4 )

A continuación se mencionan brevemente las ventajas y - desventajas de esta terminación:

#### V e n t a j a s :

Se puede realizar cualquier tipo de tratamientos de estimulación, ya que el emparador aislará la tubería de ademe de explotación. Así mismo, existirá un control en la dirección del fluido al efectuar el tratamiento, ya que éste, se desplazará por los disparos.

La presión del yacimiento y la presencia de fluidos corrosivos no afecta la tubería de ademe de explotación, debido al aislamiento del emparador y la tubería de producción.

Es fácil inducirlo, ya que el emparador aislara la tubería de ademe de explotación.

Se puede explotar simultáneamente por espacio anular, abriendo la válvula de circulación para obtener altos gastos.

Existe la posibilidad de incrementar la profundidad del pozo, perforando dicho intervalo e instalando una tubería corta ó liner, para incrementar la producción de aceite en caso de exis-

terminación gas-aceite.

En este tipo de terminación se puede acondicionar a una terminación múltiple cuando se tiene más de un yacimiento productor de hidrocarburos.

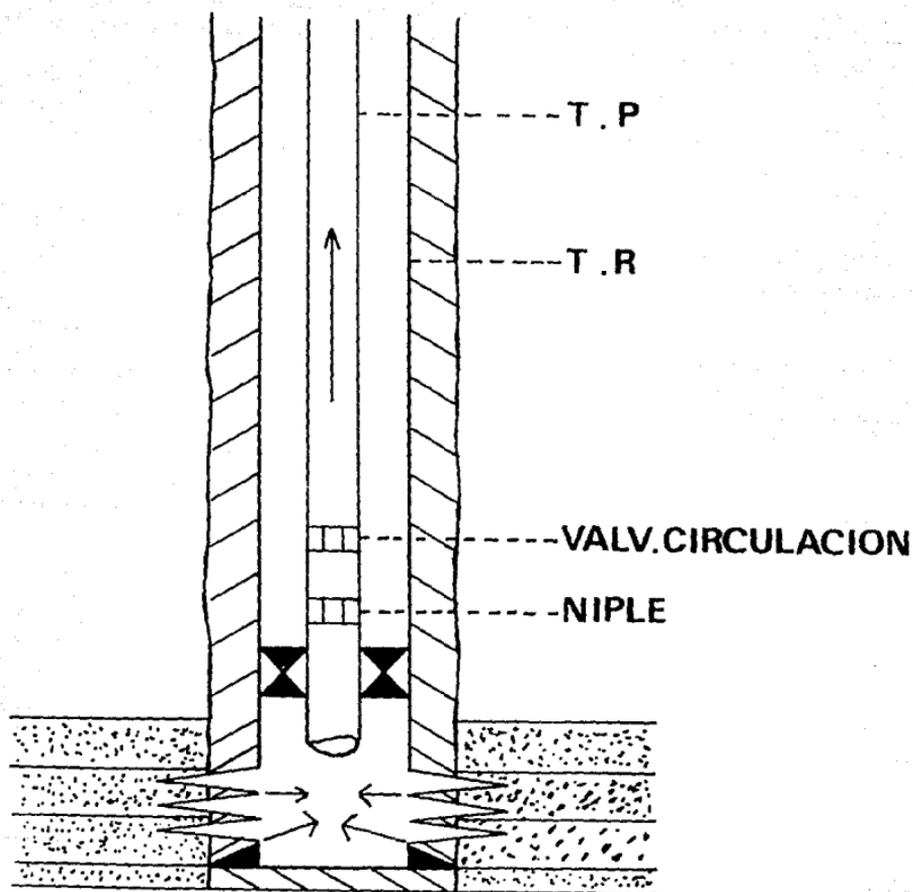
Se puede controlar la conificación agua-aceite, ya que se puede seleccionar y disparar el intervalo de interés.

**D e s v e n t a j a s :**

Mayor tiempo de operación, debido a diversos viajes - que se hacen con diferentes herramientas y mayor costo por los accesorios que lleva la tubería de producción.

Es difícil la explotación para aceites viscosos, debido a que la caída de presión por fricción es mayor.

El diámetro del pozo es menor a comparación del tipo de terminación en agujero descubierto, debido a la cementación de la tubería de adorno de explotación, y por lo tanto existirá una ligera disminución en la producción del pozo.



**FIG.2.4** Terminación con T.P, empacador y accesorios .

5.3 .- Terminación doble con dos tuberías de producción, dos empaques y accesorios.

Este tipo de terminación es aplicable cuando se tiene más de dos yacimientos productores con características diferentes, ya sea por presiones ó por tipos de yacimientos. ( Fig. 2.5 )

A continuación se mencionan las ventajas y desventajas.

#### V e n t a j a s :

En caso de que exista producción de fluidos indeseables en uno de los yacimientos, se puede cerrar su tubería de producción correspondiente, sin que el pozo deje de producir.

Este tipo de terminación puede ser bastante rentable, ya que se pueden explotar simultáneamente ó independientemente los yacimientos que se tengan.

Se pueden realizar tratamientos de estimulación en forma simultánea ó independiente, ya que se tienen dos tuberías de producción.

Quando la energía de uno de los yacimientos decrece, debido al tiempo de producción, y otro yacimiento produce gas, se podrá explotar los dos yacimientos simultáneamente. Esto es similar a un sistema artificial de producción.<sup>9</sup>

#### D e s v e n t a j a s :

Este tipo de terminación es de mayor costo económico, debido a que se tienen dos tuberías de producción, un empaque doble, un empaque sencillo y accesorios correspondientes.

Mayor tiempo de operación en la terminación, debido a las diversas herramientas que deben introducirse antes de instalar los empaques.

Utilización de conexiones provisionales hasta la instalación del aparejo de producción y medio arbol de valvulas.

Este tipo de terminación debe utilizarse en caso bastante especiales por lo compleja que és y por que se requiere experiencia en la instalación de ésta.

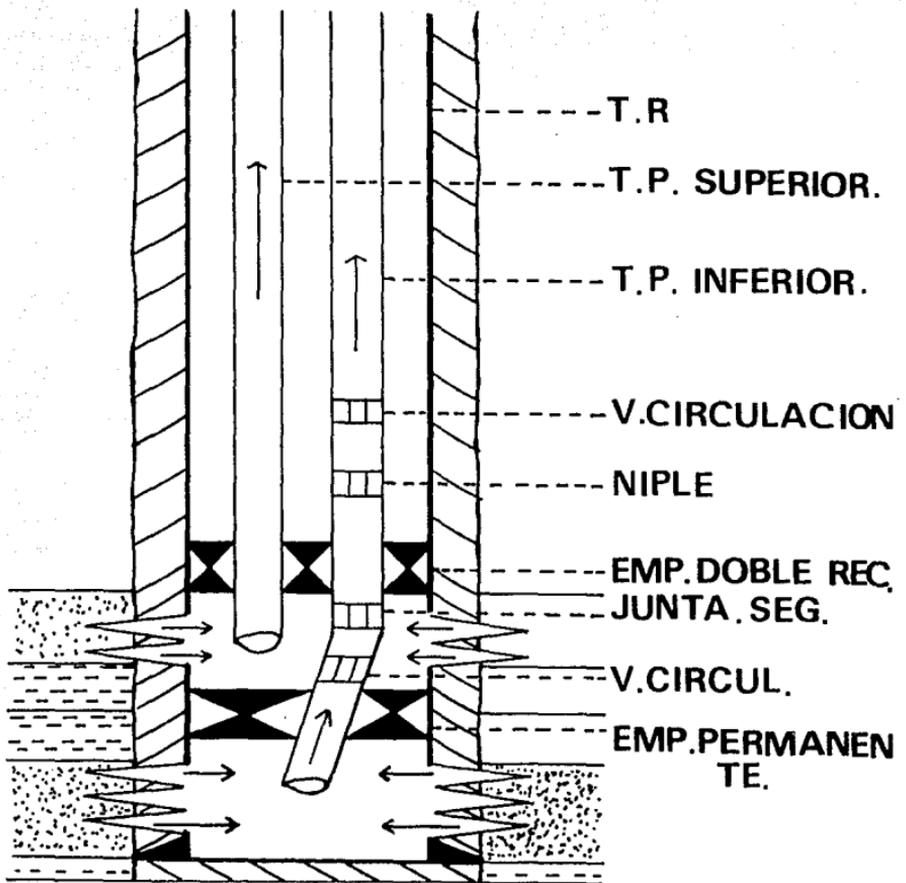


FIG.2.5 Terminación con doble T.P .

**B.4.- Terminación sencilla con tubería de producción, receptáculo pulido en el empacador y accesorios.**

Este tipo de terminación es muy recomendable en pozos profundos. Lo característico de esta terminación, es que la tubería de producción no queda completamente fija al empacador, sino que existiera un movimiento ascendente ó descendente de la tubería de producción sobre la sección del receptáculo pulido. ( Fig. 2.6 )

Estos movimientos de la tubería de producción se debiera a enfriamientos ó calentamientos, la cual, estará sometida cuando se lleven a cabo operaciones de reparación y estimulación de pozos.

Se mencionán brevemente las ventajas y desventajas de este tipo de terminación.

**V e n t a j a s :**

El receptáculo pulido en el empacador resiste altas temperaturas.

Recomendable para pozos profundos debido a su mecanismo.

**Disipa** esfuerzos de la tubería de producción sobre el empacador y **soporta** fuertes cambios de temperatura .

**D e s v e n t a j a s :**

Es una herramienta muy costosa.

Facilmente se daña el receptáculo pulido y la sección de sellos.

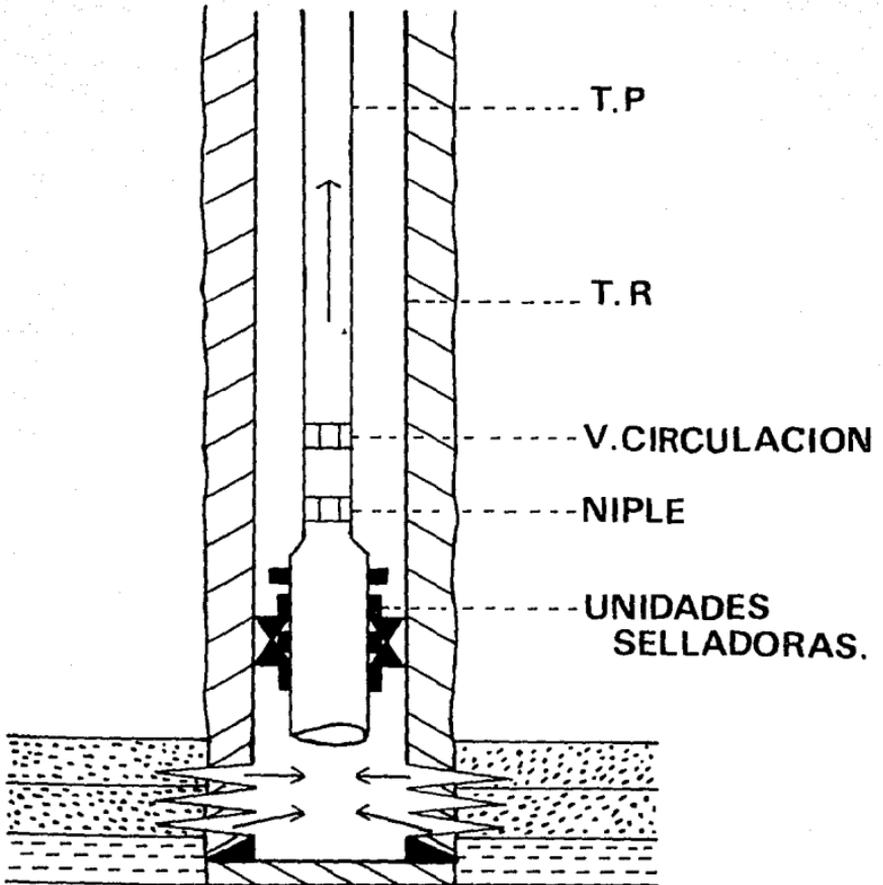


FIG.2.6 Terminación con receptáculo pulido en el empacador.

## C A P Í T U L O 111.

Efectos de los cambios de presión y temperatura en el aparejo de producción.

Los efectos ocasionados por los cambios de presión y temperatura en el aparejo de producción se manifiestan en forma de alabeo, acortamiento ó elongación.

Estos efectos son mencionados a continuación:

- Efecto pistón.
- Efecto de pandeo helicoidal ó alabeo.
- Efecto de abalonamiento.
- Efecto de temperatura.

El cambio de longitud debido a los efectos mencionados anteriormente, nos determinan la longitud resultante de dichos efectos, cuando la tubería se puede deslizar en los sellos del emparador. Cabe señalar, que se tendran aparejos de producción en los cuales se dejará carga sobre el emparador ó se tendra la tubería de producción completamente fija al emparador.

Con lo mencionado anteriormente, se determinarán los cambios de longitud y esfuerzos que se presentan en el aparejo de producción. Así mismo, es importante considerar la determinación del esfuerzo de flexión por presión interna, ya que en operaciones de estimulación ó tratamientos, se inyectaran fluidos a alta presión.

Los efectos debidos a los cambios de presión se basan, fundamentalmente en la Ley de Hooke, la cual se menciona a continuación:

## 111.1 Ley de Hooke

La ecuación que gobierna el comportamiento de un material en su región lineal, se conoce como Ley de Hooke.

Esta ecuación relaciona la deformación unitaria con el esfuerzo normal aplicado a ella, como se muestra en la figura 3.1 .

Este esfuerzo normal aplicado a la barra de la figura 3.1, se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (\text{lb/pg}^2) \quad \dots (1)$$

$$\text{como: } \sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{lb/pg}^2) \quad \dots (2)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{adimensional}) \quad \dots (3)$$

sustituyendo (2) y (3) en (1), tenemos:

$$\frac{F}{A} = \frac{E \cdot \Delta L}{L} \quad \dots (4)$$

despejando  $\Delta L$  de (4), se tiene:

$$\Delta L = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad (\text{pg}) \quad \dots (5)$$

donde:

$\sigma$  : Esfuerzo normal ( lb/pg<sup>2</sup> ).

$\epsilon$  : Deformación unitaria (adimensional).

E : Módulo de elasticidad (lb/pg<sup>2</sup>).

F : Fuerza aplicada ( lb ).

A : Área de la sección donde actúa la fuerza aplicada (pg<sup>2</sup>).

L : Longitud original (pg).

$\Delta L$  : Deformación total (pg).

La ecuación (5) puede aplicarse a un aparejo de producción para determinar el cambio de longitud, cuando es sometido a operaciones de estimulación, cementación, inyección, etc.

Este fenómeno de la ley de hooke se puede apreciar en la figura 3.2, la cual nos representa una elongación de la tubería de producción debido al propio peso de la tubería, cuando se instala en el cabezal. De lo contrario, si a la tubería se le

aplica una fuerza de tensión también existirá una elongación en la tubería de producción, como se muestra en la figura - 3.3.

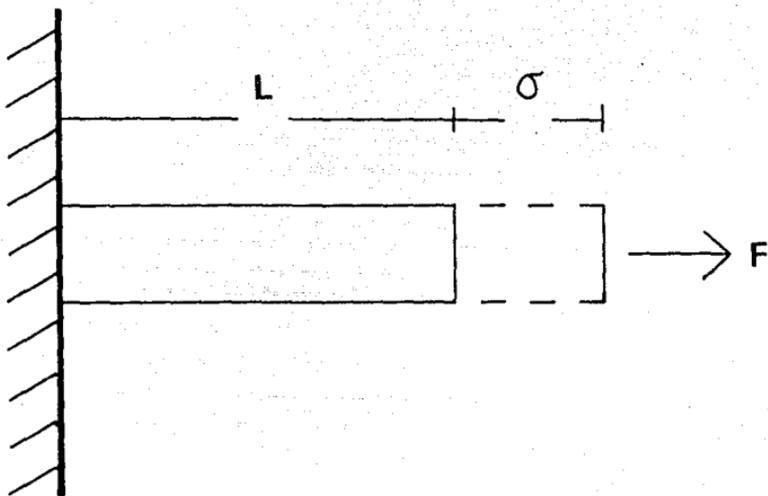
Es importante indicar la diferencia que existe en el es fuerza de ruptura cuando exista una fuerza de tensión o compresión.

Si existe una fuerza de tensión es posible fracturar un material, en compresión lo que sucede es que se deforma indefinidamente.

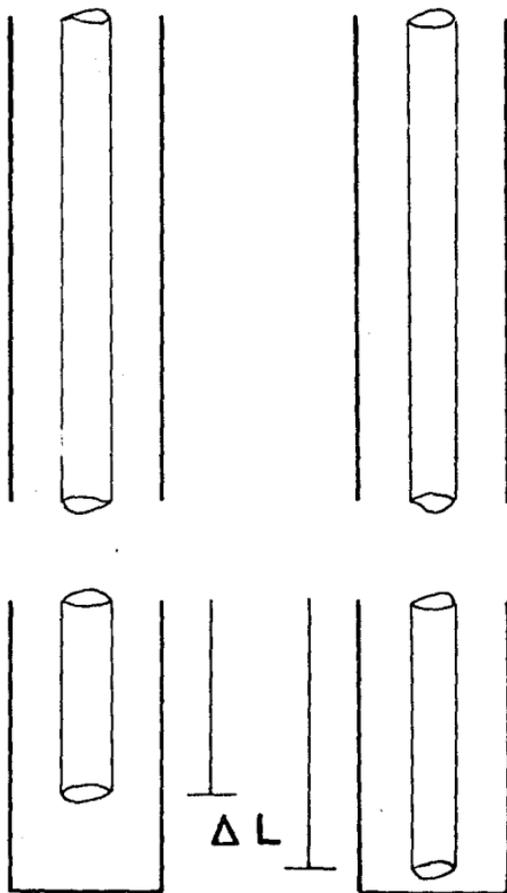
La ecuación (5) puede aplicarse si se tienen las condiciones siguientes:

- a) La sección transversal de la tubería es constante.
- b) La fuerza interna "F" no varía en dirección axial.
- c) El material es isotrópico y homogéneo.

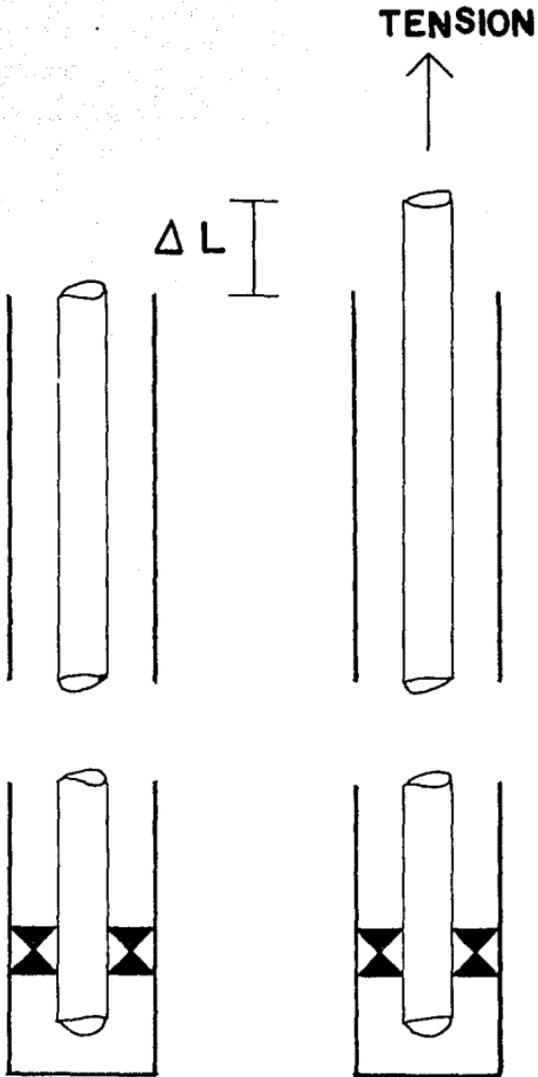
**Isotropismo:** Propiedades elasticas idénticas en cualquier dirección del material .



**FIG.3.1 DEFORMACION POR UNIDAD DE LONGITUD .**



**FIG.3.2 ELONGACION DE LA TUBERIA  
DEBIDO A SU PESO.**



**FIG.3.3 ELONGACION POR INCREMENTO DE TENSION.**

### 111.2 Ecuaciones que determinan los cambios de longitud y esfuerzos en el aparejo de producción.<sup>4</sup>

Como se menciono anteriormente, los cambios de longitud y esfuerzos en el aparejo de producción son ocasionados por los efectos de:

- Pistón.
- Pandeo helicoidal ó alabeo.
- Abalonamiento.
- Temperatura.
- Combinación de efectos (pistón, pandeo, abalonamiento y temperatura).
- Carga aplicada de la tubería de producción sobre el empacador.
- Tubería de producción fija al empacador.

El efecto de temperatura y abalonamiento se puede presentar a lo largo de la tubería de producción.

El efecto pistón se presenta como cargas aplicadas en la tubería de producción, donde existe un área de la sección transversal de la tubería expuesta al flujo ó carga.

El efecto de pandeo se manifiesta del punto neutro ó punto muerto hacia abajo.

El cambio de longitud debido a la presión y temperatura es real unicamente cuando la tubería esté libre ó se pueda deslizar en los sellos del empacador.

Quando la tubería se encuentra fija al empacador, este cambio de longitud es ficticio y sirve de base para calcular los esfuerzos.

Con lo que respecta a las fuerzas de tensión o comprensión desarrolladas, la convención de signos es la siguiente:

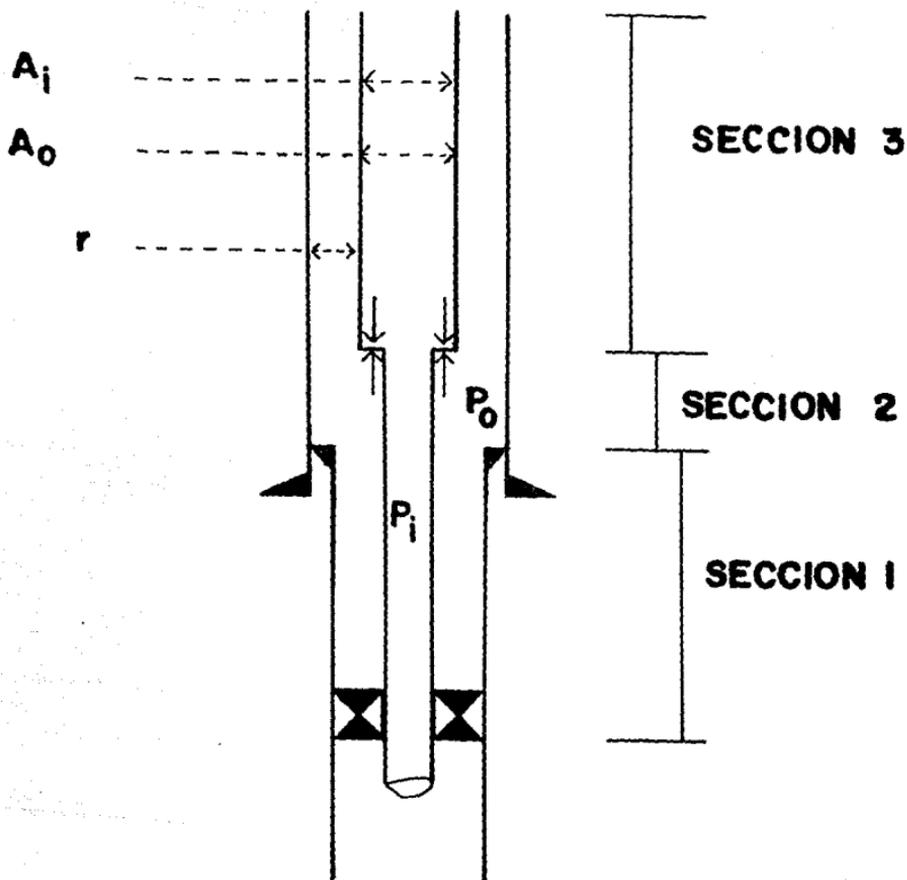
La fuerza de tensión nos representa una elongación y es tá dada por el signo negativo (-).

La fuerza de compresión nos representa un acortamiento y está dada por el signo positivo (+).

Para el desarrollo de las ecuaciones que nos determinaran los cambios de longitud y esfuerzos se hará referencia a la figura 3.4.

La figura 3.4 nos representa un aparejo de producción - con un pacador dividido en tres secciones, ya que se tienen diferentes diámetros de tubería de producción y de tubería de revestimiento.

A continuación se describirán los efectos mencionados anteriormente que intervienen en los cambios de longitud y esfuerzos en el aparejo de producción.



**FIG. 3.4 TERMINACION COMBINADA DE TRES SECCIONES.**

### 3.2.1 Efecto pistón.

Las presiones en el interior de la tubería de producción y en el espacio anular van a actuar perpendicularmente a una configuración areal denotada por la tubería de producción y el empacador.

El efecto de esta presión aplicada por unidad de área nos determina una carga, la cual, se manifestara en la tubería de producción como alargamiento ó acortamiento.

A este efecto mencionado anteriormente se le conoce como efecto pistón ó efecto de la ley de hooke, descrito en paginas anteriores.

Para ilustrar de una manera breve el efecto pistón, en la figura 3.5 se aprecia, que cuando se tiene una presión mayor en la tubería de producción y una presión menor en la tubería de revestimiento, la carga que actua perpendicularmente a la tubería de producción provocara un alargamiento en la tubería de producción.

En cambio si se tiene una presión mayor en la tubería de revestimiento y una presión menor en la tubería de producción la carga generada en el área del empacador y de la tubería de producción nos generara un acortamiento de la tubería de producción, ya que ésta carga actuara en sentido ascendente a la configuración areal de la tubería de producción.

De esta manera es importante definir la fuerza efectiva generada tanto en la tubería de producción como en el empacador.

#### - Fuerza efectiva

Es la fuerza real que actua en el fondo de la tubería de producción al nivel del empacador, cuando la tubería de producción no esta fija al empacador, ó sea que existe movimiento de la tubería de producción sobre los sellos del empacador.

Esta fuerza efectiva está representada por la siguiente ecuación :

$$F_n = (A_p - A_i) \cdot P_i - (A_p - A_o) \cdot P_o$$

- Efecto pistón

Así mismo , la ecuación que nos representa el efecto pistón , es la siguiente :

$$\Delta L_1 = - \frac{L}{E \cdot A_s} \cdot ( (A_p - A_i) \Delta P_i - (A_p - A_o) \Delta P_o )$$

donde :

$$A_s = (DE^2 - DI^2) / 4$$

Ecuación generalizada para terminaciones combinadas.

Cuando se tengan terminaciones combinadas es necesario - determinar :

- La fuerza efectiva .
- El área de la sección transversal .
- Los cambios de presión en la tubería de producción, como en el espacio anular al nivel del empacador .
- La longitud de cada sección de tubería .

Todo esto para cada sección del pozo, como se muestra en la figura 3.4 .

Las ecuaciones que nos representan el efecto pistón en terminaciones combinadas son las siguientes :

Fuerza efectiva :

$$F_{an} = \sum_{i=1}^n F'_{an} - \sum_{i=1}^n (L \cdot W_c)_{i-1}$$

Cambio en la fuerza efectiva :

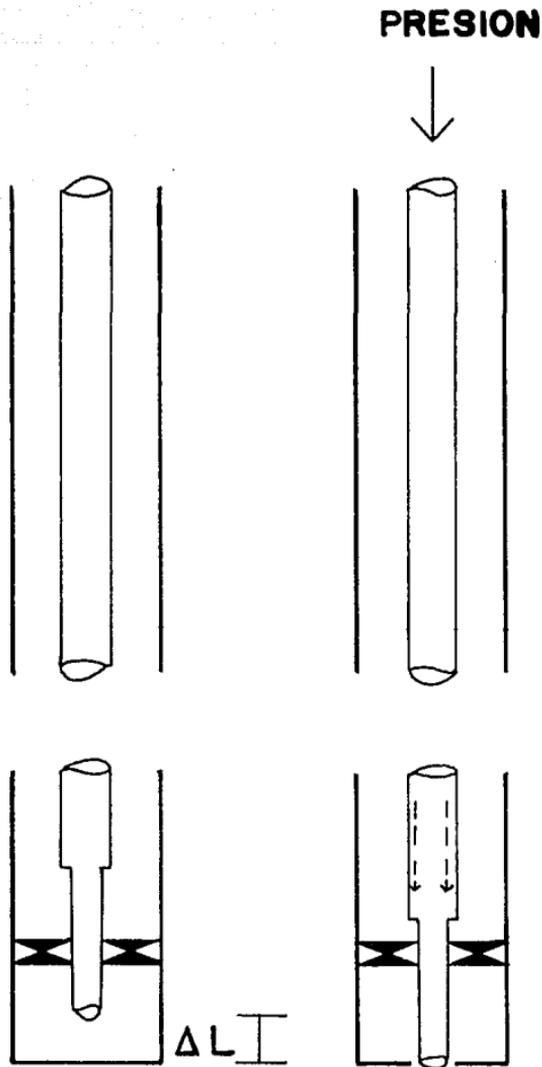
$$\Delta F_n = \sum_{i=1}^n \Delta F_i$$

Efecto pistón :

$$\Delta L_1 = - \sum_{i=1}^n \left( \frac{L}{E A_c} \cdot \Delta F \right)_i$$

donde :

n .- Es el número de secciones del pozo .



**FIG. 3.5 EFECTO PISTON EN LA T.P.**

### 3.2.2. Efecto de pandeo helicoidal ó alabeo.

El efecto de pandeo helicoidal en la tubería de producción con empacador puede ser producido dependiendo de las condiciones de operación que se tengan. Algunas condiciones se mencionan a continuación.<sup>7</sup>

- Aplicación de fuerzas sobre el empacador cuando se deja carga en el mismo.
- Presión interior en la tubería de producción mayor a la presión en el espacio anular.
- Incremento en la distancia radial de la t.r a la t.p .
- Mayor configuración areal del empacador. :

Para ilustrar este efecto, se tiene en la figura 3.6, el efecto de pandeo helicoidal en donde la presión ejercida en el fondo de la tubería de producción se traduce en una carga que actúa sobre el área del empacador y la tubería de producción en sentido hacia arriba. Esta carga provocara una compresión que se manifestara en forma de acortamiento de la tubería de producción.

En este caso, ésta carga sera mayor a la carga ejercida por la presión en la tubería de revestimiento sobre el empacador en sentido opuesto.

De otra manera, en la figura 3.7, se puede apreciar el pandeo de la tubería de producción cuando en una operación de anclaje se disminuye la tensión y se deja carga sobre el empacador.

En este efecto de pandeo helicoidal es importante definir la fuerza ficticia que actúa al nivel del empacador y el punto neutro , el cual nos determinara la longitud pandeada.

- Fuerza ficticia

La fuerza ficticia es aquella que actúa sobre el empacador cuando existe movimiento de la tubería de producción.

Está representada por la siguiente ecuación :

$$F_f = A_p \cdot ( P_i - P_o )$$

- Punto neutro ó muerto

Es aquel punto en la tubería de producción, donde los principales esfuerzos ( axial, radial y tangencial ) son iguales.

Esta representado por la siguiente ecuación :

$$N = \frac{F_f}{W_f}$$

donde :

$$W_f = W_s + ( \rho_i \cdot A_i - \rho_o \cdot A_o )$$

Es importante notar que si existe una  $P_o$  mayor a una  $P_i$ , no existira pandeo helicoidal, debido a que esa  $P_o$  mantendra a la tubería de producción casi vertical ó tendera a colapsarse, por lo tanto, no existira pandeo helicoidal.

Tambien se puede dar el caso en que  $P_i = P_o$ , por lo tanto, existira un equilibrio de cargas y la fuerza ficticia sera igual a cero, entonces no existira pandeo helicoidal.

Es necesario definir cuando la longitud al punto neutro es menor a la longitud de la tubería de producción, en este caso, existirá una parte de la tubería pandeada.

Cuando la longitud al punto neutro es mayor que la longitud de la tubería de producción, entonces toda la longitud de la tubería estará completamente pandeada.

Y cuando la longitud al punto neutro es cero, la tubería de producción se mantendrá vertical.

La ecuación que nos representa el pandeo helicoidal, es la siguiente :

Pandeo helicoidal .-

Si  $N \leq L$  :

$$\Delta L_2 = - \frac{r^2 \cdot A_p^2 \cdot (P_i - P_o)^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f}$$

Si  $N > L$  :

$$\Delta L_2 = - \frac{r^2 \cdot A_p^2 \cdot (P_i - P_o)^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{L \cdot W_f}{A_p \cdot (P_i - P_o)} \left[ 2 - \frac{L \cdot W_f}{A_p \cdot (P_i - P_o)} \right] \right]$$

donde :

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (DE^4 - DI^4)$$

$$r = (DTR - DI) / 2$$

Ecuación generalizada para terminaciones combinadas. Cuando se tienen terminaciones combinadas como lo muestra la figura 3.4, es necesario determinar para cada sección del pozo lo siguiente :

- El peso unitario de la tubería de producción sumergida en fluido .
- El momento de inercia de la sección transversal de la tubería de producción .
- La diferencia radial de la tubería de producción y la tubería de revestimiento .
- El cambio de presión en la tubería de producción y la tubería de revestimiento .

Las ecuaciones que nos determinan el efecto de pandeo helicoidal para terminaciones combinadas son las siguientes :

Fuerza ficticia :

$$F_{fn} = F_f - \sum_{i=1}^n (L \cdot W_f)_i$$

Punto neutro:

$$N = \frac{F_f - \sum_{i=1}^m (L \cdot W_f)_i}{W_{m+1}} + \sum_{i=1}^m L_i$$

Prundeo helicoidal :

$$\Delta L_2 = - \sum_{i=1}^m \left[ \frac{r^2 \cdot P_{fn}^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{L \cdot W_f}{P_{fn}} \left( 2 - \frac{L \cdot W_f}{P_{fn}} \right) \right] \right]_i \dots$$

$$\dots - \left[ \frac{r^2 \cdot P_{fn}^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \right]_{m+1}$$

donde :

m .- Es el número de secciones de tubería de pro--  
ducción abajo del punto neutro .

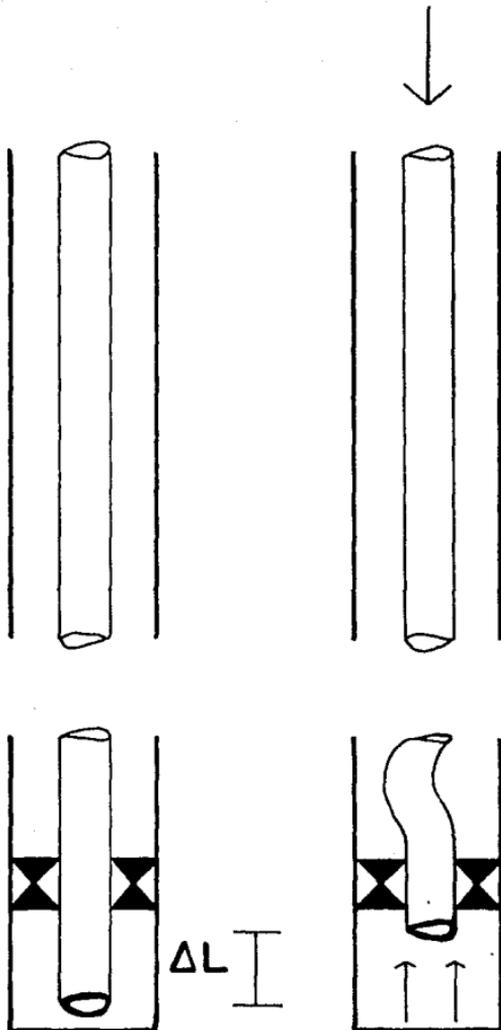


FIG. 3.6 EFECTO DE ALABEO EN LA T.P.

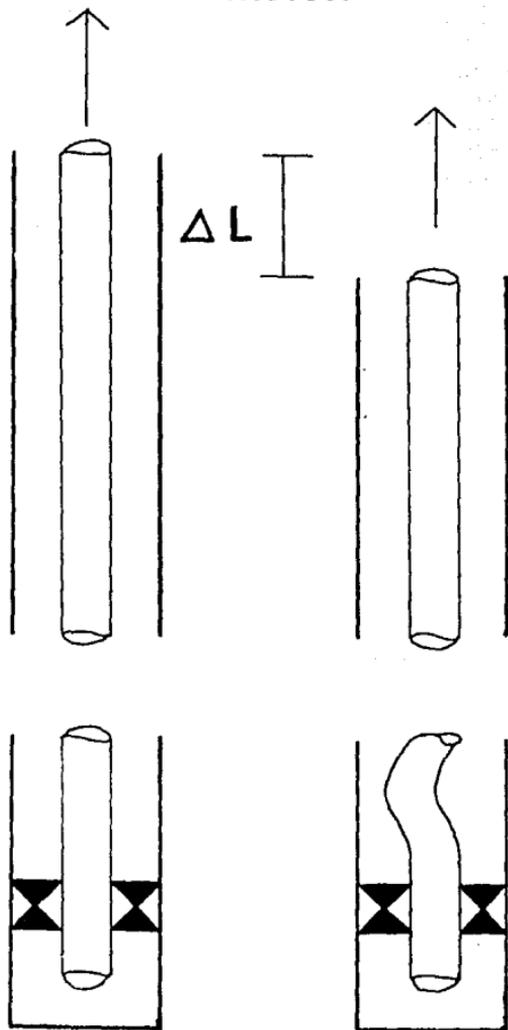


FIG.3.7 EFECTO DE ALABEO DEBIDO A ESFUERZOS DE COMPRESION .

### 3.2.3. Efecto de abalancamiento

Cuando la presión interior en la tubería de producción es mayor a la presión en el espacio anular, se producirá una expansión radial en la tubería de producción la cual provocará un incremento en el diámetro de la tubería de producción.

Este efecto de abalancamiento producirá un acortamiento en la tubería de producción.

Contrariamente, si la presión en el espacio anular es mayor a la presión interna de la tubería de producción, se producirá un efecto de colapsamiento, el cual, se manifestará en forma de elongación de la tubería de producción.

El efecto de abalancamiento por presión es generado por las condiciones estáticas ó de flujo de fluidos. El flujo de fluido creará una presión radial en la pared interna y externa de la tubería de producción.

Este efecto de abalancamiento se puede apreciar en la figura 3.8. En esta figura se indica, como es que actúa la presión radial en la pared interior de la tubería de producción.

La ecuación que nos representa el efecto de abalancamiento es la siguiente:

$$\Delta L_3 = - \frac{\mu \cdot L^2}{E} \cdot \left[ \frac{(\Delta P_i - R^2 \Delta P_o) - \frac{1+2\nu}{2\rho} \cdot \rho}{R^2 - 1} \right] - \frac{2 \cdot \mu \cdot L}{E} \cdot \left[ \frac{\Delta P_{is} - R^2 \cdot \Delta P_{os}}{R^2 - 1} \right]$$

Es importante mencionar que en el cálculo del efecto de abalancamiento, se considerarán las caídas de presión por fricción igual a cero, así se tendrá un alto factor de seguridad en el cálculo.

Ecuación generalizada para terminaciones combinadas.

En terminaciones combinadas es necesario considerar los cambios de densidad y presión en la tubería de producción, en el espacio anular y así mismo la relación de diámetros, para cada sección del pozo, como lo ilustra la figura 3.4.

La ecuación que nos representa el efecto de abalonamiento es la siguiente:

Efecto de abalonamiento:

$$\Delta L_3 = - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\mu \cdot L^2}{E} \left[ \frac{(\Delta P_i - R^2 \Delta P_o) - \frac{1 + 2\mu \sigma}{2\mu} \sigma^2}{R^2 - 1} \right] + \frac{2 \cdot L_i \mu}{E} \right] \cdot \left[ \frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right] \quad i$$

donde:

n.- es el número de secciones del pozo.

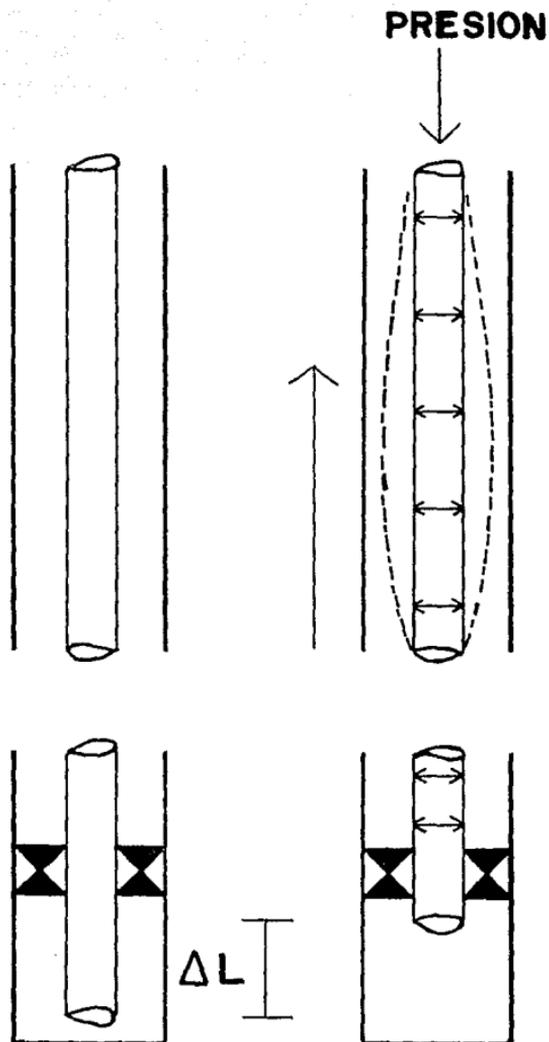


FIG.3.8 EFECTO DE ABALONAMIENTO .

3.2.4. Efecto de temperatura.

Los cambios térmicos pueden producir mayores efectos que los cambios por presión, ya que el acero tiene la propiedad de ser un excelente conductor térmico .

En la figura 3.9., se tiene una tubería de producción que es introducida al pozo, la tubería tiende a calentarse debido a los fluidos producidos ó fluidos contenidos en el pozo. Este calentamiento ocasiona un alargamiento en la tubería de producción.

Si se bombean fluidos por la tubería de producción, existira una diferencial de temperatura, ya que el fluido bombeado tiene una temperatura menor, que la temperatura del fluido producido ó que contiene el pozo. Por lo tanto, existira un acortamiento en la tubería de producción, debido al enfriamiento causado por los fluidos bombeados.

La ecuación que nos determina el efecto de temperatura es la siguiente:

$$\Delta L_4 = \beta \cdot L \cdot \Delta T$$

Para la determinación del cambio por temperatura ( $\Delta T$ ) se aplico el método simplificado de A. Romero Juarez<sup>8</sup>, para pozos petroleros sometidos a operaciones de estimulación .

Asi mismo, se aplico la ecuación de Ramey<sup>2</sup> para pozos productores de hidrocarburos líquidos.

En el método simplificado de A. Romero Juarez se aplica la ecuación de Ramey, que a continuación se muestra:

$$T(Z, t) = \epsilon_e \cdot Z + T_{es} - \epsilon_e \cdot A + (T_{fs} + \epsilon_e \cdot A - T_{es}) \exp(-Z/A) \dots (A)$$

donde:

$$A = \frac{r_f \cdot C_f (K_{he} + r_{ti} \cdot U \cdot f(t))}{2 r_{ti} \cdot K_{he} \cdot U \cdot \pi} \dots (B)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x_t + x_c}{K_{hs}} + \frac{x_{an}}{K_{han}} \dots (C)$$

La función del tiempo  $f(t)$  es posible calcularla para  $t_i$  empos menores de 400 días, con la siguiente ecuación?

$$\text{Log } f(t) = 0.31333 \text{ Log } Y - 0.06 (\text{Log } Y)^2 + 0.00666 (\text{Log } Y)^3 \dots (D)$$

donde:

$$Y = \frac{552 \cdot t}{DTRE^2} \dots (E)$$

La ecuación puede ser escrita para un pozo inyector como:

$$A = FF \cdot q_{iny} \dots (F)$$

donde:

$$FF = \frac{\rho_f \cdot C_f}{2 \cdot K_{he} \cdot \pi} \left( \frac{1 + B \cdot f(t)}{B} \right) \dots (G)$$

$$B = \frac{r_{ti} \cdot U}{K_{he}} \dots (H)$$

Utilizando los valores típicos de:

$$\begin{aligned} \rho_f &= 350 \quad (\text{lb}_m / \text{bl}) \\ C_f &= 1 \quad (\text{BTU} / \text{lb}_m - ^\circ\text{F}) \\ K_{he} &= 33.6 \quad (\text{BTU} / \text{dia} - \text{pie}) \\ K_{hs} &= 600 \quad (\text{BTU} / \text{dia} - \text{pie} - ^\circ\text{F}) \\ K_{han} &= 9.432 \quad (\text{BTU} / \text{dia} - \text{pie} - ^\circ\text{F}) \end{aligned}$$

Suponiendo que el espacio anular se encuentra lleno de agua y sustituyendo los datos anteriores en las ecuaciones -

(G) y (H), se tiene :

$$FF = 1.658 \cdot (1 + B \cdot f(t)) / B \dots\dots (I)$$

$$B = \frac{DI \cdot U}{366.4} \dots\dots (J)$$

De la ecuación (G), despreciando la resistencia al flujo de calor de los dos primeros terminos, ya que son valores muy pequeños, comparados con la resistencia al flujo de calor del espacio anular, se tiene :

$$U = \frac{226.4}{DTR - DE} \dots\dots (K)$$

$$B = \frac{0.281 \cdot DI}{DTR - DE} \dots\dots (L)$$

Cuando el espacio anular contiene aceite con :

$$K_{han} = 1.896 \quad ( BTU / dia - pie - ^\circ F )$$

$$\rho_f = 308 \quad ( lb_m / bl )$$

$$C_f = 0.4 \quad ( BTU / lb_m - ^\circ F )$$

Se tienen las siguientes ecuaciones :

$$U = \frac{45.50}{DTR - DE} ; \quad B = \frac{0.0564 \cdot DI}{DTR - DE} \dots (M)$$

$$FF = 0.584 \cdot (1 + B \cdot f(t)) / B \dots (N)$$

Cuando el pozo petrolero esté sometido a una operación de estimulación, ó que sea un pozo inyector , se aplicaran las ecuaciones (A),(D),(E),(F),(I),(L) y (N); para determinar la temperatura en el fondo del pozo .

Para pozos productores de hidrocarburos líquidos, la ecuación de Ramey se convierte en :

$$T(Z, t) = T_{bh} + \epsilon_e \cdot A - \epsilon_e \cdot Z - (\epsilon_e \cdot A) \cdot \exp(-Z/A) \dots\dots(O)$$

El valor de "A" se calcula con la ecuación (B)

Considerando que el espacio anular está lleno de aceite y sus tituyendo los siguientes valores en la ecuación (B).

$$U = \frac{45.50}{DTR - DE} \quad ; \quad w_f = q_o \cdot M$$

$$r_{ti} = \frac{DI}{24} \quad ; \quad K_{he} = 33.6$$

$$K_{han} = 1.896$$

Se tiene:

$$A = \frac{q_o \cdot M \cdot C_f \cdot (DTR - DE) \cdot (33.6 + 1.896 \cdot DI \cdot f(t) / (DTR - DE))}{400.27 \cdot DI} \dots(P)$$

Considerando que el espacio anular está lleno de agua y substituyendo los siguientes valores en la ecuación (B):

$$U = \frac{226.4}{(DTR - DE)} \quad ; \quad w_f = q_o \cdot M$$

$$r_{ti} = \frac{DI}{24} \quad ; \quad K_{he} = 33.6$$

$$K_{han} = 9.432$$

Se tiene:

$$A = \frac{q_o \cdot M \cdot C_f \cdot (DTR - DE) \cdot (33.6 + 9.432 \cdot DI \cdot f(t) / (DTR - DE))}{1991.52 \cdot DI} \dots(Q)$$

El calor específico de los fluidos producidos se considera como dato.

El valor de la masa asociada a un barril de aceite, se cal cula con la siguiente ecuación:

$$M = 350.5 \cdot (\gamma_{ro}) + 0.0764 \cdot RGA(\gamma_g) \dots (R)$$

Ya que el pozo es productor de hidrocarburos, para calcular la temperatura en la cabeza del pozo, se aplicaran las ecuaciones (D), (E), (O), (P), (Q), (R).

Ahora bien, si el pozo petrolero es inyector ó fue sometido a una operación de estimulación, el cambio por temperatura, esta dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta T = \frac{T_{fs} + T(Z)}{2} - \frac{T_{es} + T_{bh}}{2} \dots (S)$$

Por lo tanto, si el pozo petrolero es productor, el cambio por temperatura, esta dado con la siguiente ecuación.

$$\Delta T = \frac{T_{bh} + T(Z)}{2} - \frac{T_{bh} + T_s}{2} \dots (T)$$

Ecuación generalizada para terminaciones combinadas.

Para calcular la temperatura en el fondo de cada sección de tubería, es necesario realizar el procedimiento de cálculo para cada sección del pozo y así determinar el cálculo del cambio por temperatura para cada sección del pozo.

Si el pozo es inyector ó el pozo se sometio a una operación de estimulación, se tienen las siguientes ecuaciones

$$T(Z_i, t) = \epsilon_e \cdot Z_i + T_{es} - \epsilon_e \cdot A_i + (T_{fs} + \epsilon_e \cdot A_i - T_{es}) \exp$$

$$(- Z_i / A_i) ; \quad Y_i = \frac{552 \cdot t}{DTR^2}$$

$$\text{Log } f(t)_i = 0.31333 \cdot \text{Log } Y_i - 0.06 \cdot (\text{Log } Y_i)^2 + 0.00666 (\text{Log } Y_i)^3$$

Si el espacio anular contiene agua, se tiene:

$$B_i = \frac{0.281 \cdot DI_i}{DTR_i - DE_i}$$

Si el espacio anular contiene aceite, se tiene:

$$B_i = \frac{0.0564 \cdot DI_i}{DTR_i - DE_i}$$

Por lo tanto:

$$FF_i = 1.658 \frac{(1 + B_i \cdot f(t)_i)}{B_i}$$

$$A_i = FF_i \cdot q_{iny}$$

$$\Delta T_i = \frac{T_{bh} + T_i(Z_i)}{2} - \frac{T_{bh} + T_s}{2}$$

Si el pozo es productor de hidrocarburos líquidos, se tienen las siguientes ecuaciones:

Si el espacio anular está lleno de aceite, se tiene:

$$A_i = \frac{q_o \cdot M \cdot C_f (DTR_i - DE_i) \cdot (33.6 + 1.896 \cdot DI_i \cdot f(t)_i / (DTR_i - DE_i))}{400.27 \cdot DI_i}$$

Si el espacio anular está lleno de agua, se tiene:

$$A_i = \frac{q_o \cdot M \cdot C_f (DTR_i - DE_i) \cdot (33.6 + 9.433 \cdot DI_i \cdot f(t)_i / (DTR_i - DE_i))}{1991.52 \cdot DI_i}$$

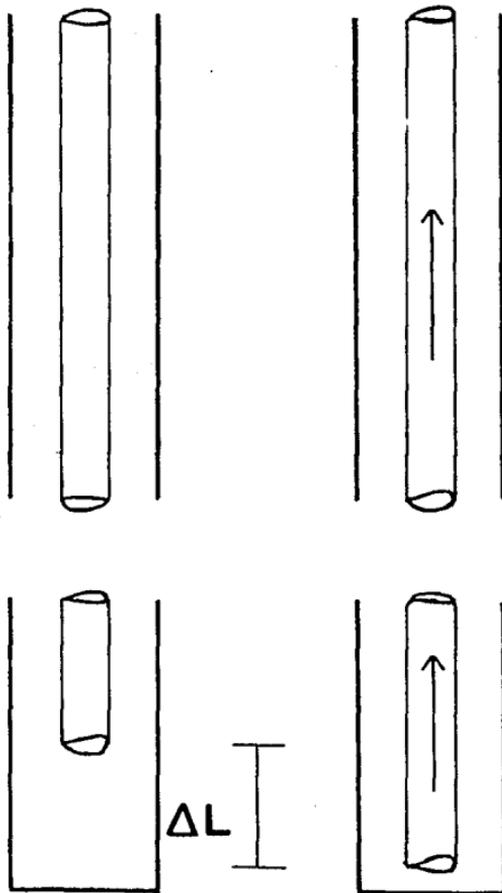
$$M = 350.5 \cdot (\gamma_{ro}) + 0.0764 \cdot RGA \cdot (\gamma_g)$$

$$T(Z_i, t) = T_{bh} + E_e \cdot A_i - E_e \cdot Z_i - (E_e \cdot A_i) \cdot \exp(-Z_i / k_i)$$

$$\Delta T_i = \frac{T_{bh} + T_i(Z_i)}{2} - \frac{T_{bh} + T_s}{2}$$

donde:

i.- nos representa cada sección del pozo.



**FIG. 3.9 EFECTO POR TEMPERATURA EN LA T.P .**

### 3.2.5. Efectos combinados de pistón, pandeo, abalonamiento y temperatura.

El cambio de longitud total en la tubería de producción, se obtiene sumando algebraicamente los cuatro efectos. Este efecto está representado por la siguiente ecuación:

$$\Delta L_t = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \Delta L_4$$

Para operaciones de estimulación, en donde la presión en la tubería de producción es mayor que la presión en el espacio anular, todos los efectos producirán acortamiento en la tubería de producción.

En la figura 3.10 se ilustra los efectos combinados de pistón, alabeo, abalonamiento y temperatura. En este tipo de terminación se tiene un empacador que permite el movimiento de la tubería de producción sobre los sellos del empacador. Así mismo, se ilustra el cambio de longitud total.

### 3.2.6 Efecto que produce aplicar carga sobre el empacador.

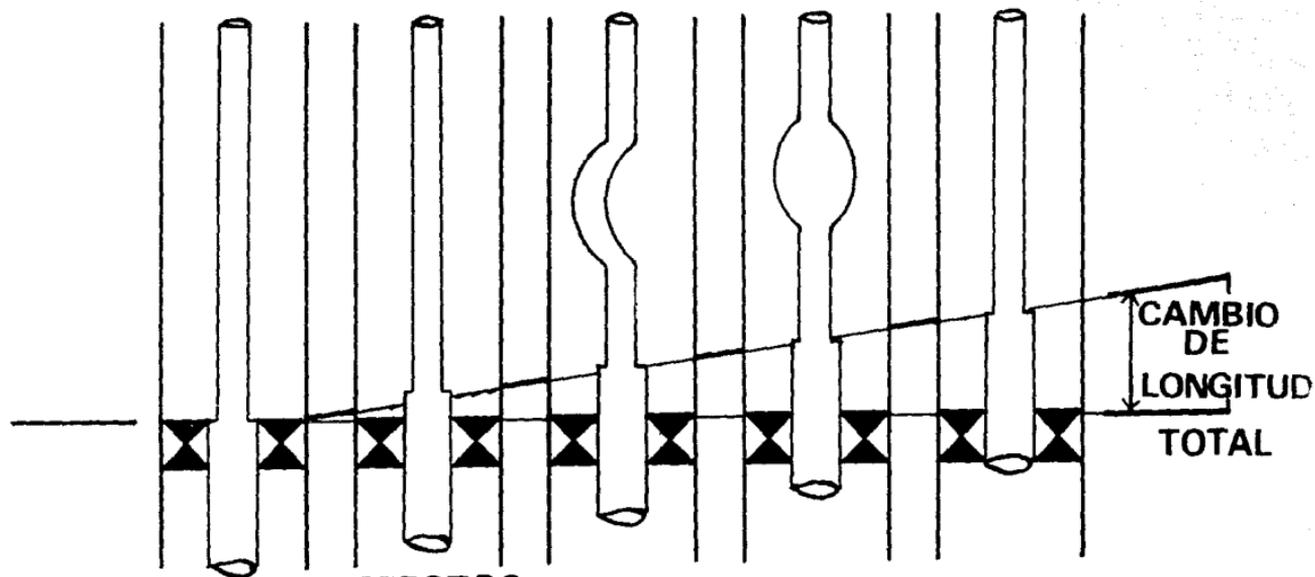
Cuando se realiza el anclaje del empacador, se deja una carga sobre el empacador, que es parte del peso de la tubería de producción. Esta carga sobre el empacador compensará parte del acortamiento de la tubería de producción.

Es recomendable no aplicar grandes cargas, ya que flexionan y deforman la tubería de producción, lo que restringirá el paso de cualquier herramienta que se quiera introducir posteriormente.

Las ecuaciones que nos representan este efecto a continuación se indican:

Efecto pistón:

$$\Delta L_1 = \frac{L \cdot F}{E \cdot A_B}$$



EFFECTOS;

PISTON. ALABEO. ABALONA-TEMPERATURA.  
MIENTO.

FIG:3.10.EFFECTOS COMBINADOS EN EL APAREJO DE PRODUCCION .

Efecto de pandeo helicoidal:

Si  $N < L$  :

$$\Delta L_2 = \frac{r^2 \cdot F^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot w_1}$$

Si  $N > L$  :

$$\Delta L_2' = \frac{r^2 \cdot F^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot w_1} \left[ \frac{L \cdot w_1}{F} \left[ 2 - \frac{L \cdot w_1}{F} \right] \right]$$

Es importante señalar que la fuerza aplicada sobre el empacador permaneciera constante en toda la tubería de producción, debido al propio peso de la tubería de producción.

Como la carga aplicada sobre el empacador tendrá influencia en el efecto pistón y el pandeo helicoidal, entonces, sumando algebraicamente estos dos efectos y considerando los efectos combinados mencionados anteriormente, se tendrá el efecto que produce el aplicar carga sobre el empacador, esto es:

$$\Delta L_5 = \Delta L_1 + (\Delta L_2 \text{ ó } \Delta L_2')$$

Por lo tanto, el efecto que produce el aplicar carga sobre el empacador, está dado por:

$$\Delta L_6 = \Delta L_4 + \Delta L_5$$

Ecuaciones generalizadas para terminaciones combinadas.

Cuando se tiene una terminación combinada, como la que se ilustra en la figura 3.4, es necesario determinar para cada sección del pozo, lo siguiente:

- el área de la sección transversal de la tubería de producción.
- el peso unitario de la tubería de producción sumergida en el fluido a condiciones iniciales.
- el momento de inercia de la sección transversal de la tubería de producción.
- la diferencia radial de la tubería de producción a la tu-

bería de revestimiento.

Las ecuaciones generalizadas que nos representan este efecto se indican a continuación:

Efecto de pistón:

$$\Delta L_1 = \frac{F}{E} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{L}{A_s} \right]_i$$

Efecto de pandeo helicoidal:

Si  $N < L$ :

$$\Delta L_2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{r^2 \cdot F^2}{E \cdot I \cdot W_i} \right]_i$$

Si  $N > L$ :

$$\Delta L_2' = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{r^2 \cdot F^2}{E \cdot I \cdot W_i} \left[ \frac{L \cdot W_i}{F} \left( 2 - \frac{L \cdot W_i}{F} \right) \right] \right]_i$$

donde:

n.- es el número de secciones del pozo.

Entonces:

$$\Delta L_5 = \Delta L_1 + (\Delta L_2 \text{ ó } \Delta L_2')$$

Por lo tanto, el efecto que produce el dejar carga sobre el em pacador, está dado por:

$$\Delta L_6 = \Delta L_t + \Delta L_5$$

### 3.2.7 Determinación de esfuerzos en un aparejo de producción fijo al empacador.<sup>4,5,6</sup>

Quando se tiene un empacador en el que se fija el aparejo de producción, como se muestra en la figura 3.11 ; la tubería de producción no podrá moverse ascendente ó descendentemente.

Los cambios de longitud se transformarán en esfuerzos de compresión y tensión en la tubería de producción, ya que estará fija al empacador, y por lo tanto, estos esfuerzos provocaran deformaciones en la tubería de producción .

Las ecuaciones para determinar los esfuerzos en la tubería de producción fija al empacador, para cada sección del pozo, se describen a continuación :

La fuerza real que actúa de la tubería de producción al empacador, debido a las presiones y restricciones del empacador, esta dada por :

$$F_a^* = F_a + F_p$$

La fuerza ficticia con restricción del empacador, esta dada por :

$$F_f^* = F_f + F_p$$

El cambio de longitud de la tubería de producción debido a la carga aplicada sobre el empacador y a los efectos combinados, esta dado por :

$$-\Delta L_G = \Delta L_p$$

Se tendrá un comportamiento lineal de la fuerza empa-  
cador - tubería y del cambio de longitud total de la tubería -  
de producción, debido a la fuerza aplicada sobre el empa-  
cador y a los efectos combinados, esto es :

$$\Delta L_f^{**} = - \frac{L \cdot P}{E \cdot A_s} \quad \therefore \quad P_p = - \frac{\Delta L_f^{**} \cdot E \cdot A_s}{L}$$

Quando exista pandeo helicoidal, es necesario determi-  
nar la fuerza ficticia y el punto neutro , para ob-  
tener el cambio de longitud debido a la fuerza aplicada en -  
el emparador con la tubería parcialmente ó totalmente pan-  
deada, esto es :

Si  $F_f$  es positiva y  $N < L$  , entonces :

$$\Delta L_f^* = - \frac{L \cdot P_{an}}{E \cdot A_s} - \frac{r^2 \cdot F_f^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f}$$

Si  $F_f$  es positiva y  $N > L$  , entonces :

$$\Delta L_f^* = - \frac{L \cdot P_{an}}{E \cdot A_s} - \frac{r^2 \cdot F_f^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{L \cdot W_f}{F_f} \left( 2 - \frac{L \cdot W_f}{F_f} \right) \right]$$

donde  $n$  : es el número de secciones de pozo.

Para valores negativos de la fuerza ficticia, es impo-  
sible aplicar la ecuación del pandeo helicoidal, ya que -  
dicho efecto no existe .

Entonces, aplicaremos el efecto de la ley de hooke, esto es :

Si  $F_f$  es negativa :

$$\Delta L_f^* = - \frac{L \cdot P_{sn}}{E \cdot A_s}$$

Ahora bien, el cambio de longitud total considerando la carga sobre el empacador, esta dado por :

$$\Delta L_f^{**} = \Delta L_p + (\Delta L_f^* \text{ ó } \Delta L_f'^*)$$

Por la tanto, es necesario conocer el signo de  $\Delta L_f^{**}$ , para calcular la fuerza real con restricción del empacador, esto es :

Si  $\Delta L_f^{**}$  es positiva :

$$F_a^* = - \frac{\Delta L_f^{**} \cdot E \cdot A_s}{L}$$

Si  $\Delta L_f^{**}$  es negativa :

Se realiza un proceso de cálculo de ensaye - error, esto es :

$$\text{Igualar : } F_{f1} = F_p$$

Si  $N < L$  :

$$\Delta L_2 = - \frac{r^2 \cdot (F_{f1})^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f}$$

Si  $N > L$  :

$$\Delta L_2 = - \frac{r^2 \cdot F_{f1}^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{L \cdot W_f}{F_{f1}} \left( 2 - \frac{L \cdot W_f}{F_{f1}} \right) \right]$$

Y como :

$$\Delta L_{f1}^* = - \frac{L \cdot F_{f1}}{E \cdot A_s}$$

Entonces :

$$\Delta L_{f1}^{*'} = \Delta L_{f1}^* + ( \Delta L_2 \text{ ó } \Delta L_2' )$$

Como la tubería esta fija al empacador, los movimientos en la tubería se convertirán en esfuerzos, por lo tanto :

$$\text{Suponer : } F_{f2} = 0.90 \cdot (F_{f1})$$

Si  $N < L$  :

$$\Delta L_2 = - \frac{r^2 \cdot (F_{f2})^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f}$$

Si  $N > L$  :

$$\Delta L_2' = - \frac{r^2 \cdot F_f^2}{8 \cdot B \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{L \cdot W_f}{F_f^2} \left( 2 - \frac{L \cdot W_f}{F_f^2} \right) \right]$$

Entonces :

$$\Delta L_{f2}^* = - \frac{L \cdot F_f^2}{E \cdot A_s}$$

$$\Delta L_{f2}^{*'} = \Delta L_{f2}^* + ( \Delta L_2 \text{ ó } \Delta L_2' )$$

Por lo tanto, se tiene :

$$F_a^* = F_{f1} - \left[ \frac{(F_{f1} - F_{f2}) \cdot (\Delta L_{f1}^{*'} - \Delta L_{f1}^{**})}{(\Delta L_{f1}^{*'} - \Delta L_{f2}^{*'})} \right]$$

Conociendo las fuerzas que intervienen en el empacador - traducidas en movimiento, se debiera cumplir la siguiente condición :

$$\left| \frac{F_a^* - F_{f2}}{F_a^*} \right| < 0.10$$

Si se cumple la tolerancia anterior, se procedera a calcular la fuerza empacador - tubería de producción .

De lo contrario, continuar el proceso iterativo, suponiendo lo siguiente :

$$\Delta L_{f1}^* = \Delta L_{f2}^*$$

$$F_{f1} = F_{f2}$$

$$F_{f2} = F_a^*$$

Y continuar el proceso iterativo, calculando las variables siguientes :

$$F_{f2}, \Delta L_{f2}^*, \Delta L_{f2}^* \text{ y } F_a^*$$

Hasta cumplir la tolerancia .

Por lo tanto, la fuerza empacador - tubería, esta dada - por :

$$F_p = F_a^* - F_{an}$$

La fuerza real de la tubería de producción sujeta al empacador , esta dada por :

$$F_a^* = F_a + F_p$$

Y la fuerza de la tubería de producción en el cabezal, esta dada por :

$$F_t = F_a^* - W_s \cdot L$$

Ecuaciones generalizadas para terminaciones combinadas .

Cuando se tiene una terminación combinada como la mostrada en la figura 3.4, es necesario determinar para cada sección del pozo, lo siguiente:

- La fuerza real de la tubería de producción sujeta al empacador.
- La fuerza ficticia con restricción del empacador.
- La diferencia radial de la tubería de producción a la tubería de revestimiento.
- El momento de inercia de la sección transversal de la tubería de producción.
- El peso unitario de la tubería de producción sumergida en fluidos.
- El área de la sección transversal de la tubería de producción.

En base a lo mencionado anteriormente, se calcula el cambio de longitud debido a la fuerza aplicada en el empacador.

Las ecuaciones que nos determinaran el cambio de longitud debido a la fuerza aplicada en el empacador, son las siguientes:

La fuerza real resultante, esta dada por:

$$F_{an}^* = F_{an} + F_p$$

La fuerza ficticia resultante, esta dada por:

$$F_{fn}^* = F_{fn} + F_p$$

El cambio de longitud de la tubería de producción debido a la carga aplicada en el empacador, esta dado por:

$$\Delta L_f^* = - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{L \cdot F_{an}}{E \cdot A_s} \right] - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{r^2 \cdot F_f}{8 \cdot E \cdot I \cdot w_f} \right]_i$$

$$\Delta L_f'^* = - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{L \cdot F_{an}}{E \cdot A_s} \right]_i - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{r^2 \cdot r_f^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{L \cdot W_f}{F_f} \left( 2 - \frac{L \cdot W_f}{F_f} \right) \right] \right]_i$$

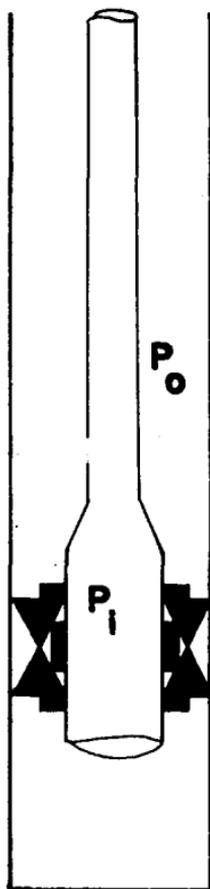
$$\Delta L_f^* = - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{L \cdot F_{an}}{E \cdot A_s} \right]_i$$

Entonces la fuerza de la tubería de producción en el **cabzal** esta dada por:

$$F_t = \sum_{i=1}^n F_{an}' - \sum_{i=1}^n (L \cdot W_s)_i + F_p$$

donde:

n.- es el número de secciones del pozo.



**FIG. 3.11 TUBERIA DE PRODUCCION FIJA AL EMPACADOR .**

### 3.2.8. Determinación del esfuerzo de flexión en el aparejo de producción 4,6

Es importante determinar el esfuerzo de flexión en el aparejo de producción, ya que al compararlo con la resistencia mínima de la tubería de producción, según su grado de resistencia, se determinará si este valor producirá deformaciones permanentes en la tubería de producción.

Esto es, con el fin de asegurar que en operaciones de estimulación a alta presión, la tubería de producción no se fracture.

La ecuación que nos determina el esfuerzo de flexión en la pared interior de la tubería de producción, está dada por :

$$S_i = \left[ 3 \cdot \left[ \frac{R^2 \cdot (P_i - P_o)}{R^2 - 1} \right]^2 + \left[ \frac{P_i - R^2 \cdot P_o}{R^2 - 1} + S_a + \frac{S_b}{R} \right]^2 \right]^{0.5}$$

$$S_a = \frac{P_f^*}{A_s} \quad \text{y} \quad S_b = \frac{E \cdot r}{4 \cdot I} \cdot (P_f^*)$$

"  $S_i$  " se puede determinar para las condiciones de fondo y del cabezal .

Es necesario utilizar los valores correspondientes de presión en cada sección del pozo .

Si la tubería de producción no está pandeada, entonces existirá una fuerza de tensión, por lo tanto , el valor de "  $S_b$  " es igual a cero , ya que "  $F_f$  " es menor que cero.

Calculando los valores de  $S_a$  ,  $S_b$  y  $S_i$  , se tendrá que comparar con el valor del mínimo esfuerzo a la deformación de la tubería de producción , esto es :

$$S_i \leq S$$

Sí se cumple esta desigualdad, no se tendrá deformación permanente en la tubería de producción .

## CAPITULO IV

## Programa de Cómputo .

En este capítulo se determinara el procedimiento de cálculo, diagrama de flujo simplificado y el programa de cómputo, para la obtención de los movimientos y esfuerzos en aparajes de producción combinados .

Es importante mencionar que al algoritmo descrito en el capítulo anterior, se le realizó una aplicación, considerando que al pozo en análisis, se le someta a una operación de estimulación, empiese a producir aceite y posteriormente se cierre el pozo . Esta secuencia se realizó, ya que en el campo es una operación común .

Se considera que el pozo es productor de aceite, ya que se suponen valores prácticos de campo que a continuación se mencionan :

$$\text{Calor específico del fluido producido} = 0.55 \frac{\text{B.T.U}}{\text{lb-}^{\circ}\text{F}}$$

$$\text{Densidad relativa del gas} = 0.70 \quad (\text{aire}=1)$$

$$\text{Densidad relativa del aceite} = 0.90 \quad (\text{agua}=1)$$

$$\text{Tiempo de producción} = 50 \text{ horas}$$

$$\text{Relación gas-aceite} = 620 \text{ pie}^3 / \text{bl}_o$$

Para pozos sometidos a una estimulación, se supone lo siguiente :

$$\text{Tiempo de inyección} = 1 \text{ hora}$$

Tipo de fluido de la estimulación : Agua = 1.0 gr/cm<sup>3</sup>  
 Aceite = 0.90 gr/cm<sup>3</sup>  
 Acido = 1.15 gr/cm<sup>3</sup>  
 Otro = ? gr/cm<sup>3</sup>

Cabe señalar que se aplico el método simplificado de A. Romero Juaréz<sup>8</sup>, para calcular la temperatura en el extremo del pozo, cuando el pozo es inyector ó productor de aceite .

Así mismo, se determinará el cambio de temperatura para cada sección del pozo .

Los datos necesarios para efectuar los cálculos que nos determinarán los movimientos y esfuerzos en le aparejo de - producción, estan fundamentados en la geometría de flujo del pozo, las condiciones de operación del pozo ( presión, temperatura y fluidos ) y la profundidad interior del pozo .

Los datos utilizados están en un sistema de unidades - practicas de campo. Con este procedimiento de cálculo, se - podran considerar hasta 5 secciones de pozo .

## IV.1 .- PROCEDIMIENTO DE CALCULO .

Datos generales del pozo .

Geometría de flujo del pozo :

Profundidad que alcanza la t.p ..( metro )

Diametro exterior de la t.p .....( pulgada )

Peso Unitario de la t.p .....( libra/pie )

Diametro exterior de la t.r .....( pulgada )

Peso Unitario de la t.r .....( libra/pie )

Profundidad interior del pozo .....( metro )

Diametro interior del empacador ...( pulgada )

Tubería de producción anclada ó

con receptáculo pulido .

Espacio anular lleno de agua ó

aceite .

Temperatura superficial del te-

rreno .....( centigrados )

Peso ó Tensión sobre el empacador ..( tonelada )

( + ) : Fuerza de compresión .

( - ) : Fuerza de Tensión .

Gradiente Geotérmico .....( centigrados / metro )

Temperatura superficial del fluido .....( centigrados )

Gasto de inyección ...( barriles por minuto )

Tipo de fluido en la estimulación :

- Agua .            - Otro .

- Aceite .

- Acido .

Presión superficial de inyección en

la t.p .....( Kg / Cm<sup>2</sup> )

Presión superficial en la t.r .....( Kg / Cm<sup>2</sup> )

Presión de inyección en el fondo

del pozo .....( Kg / Cm<sup>2</sup> )

Gasto de producción .....( barriles por día )

Presión superficial de pro-

ducción en la t.p.....( Kg / Cm<sup>2</sup> )

Presión superficial en la t.r ..( Kg / Cm<sup>2</sup> )

Presión de fondo fluyendo .....( Kg / Cm<sup>2</sup> )

Presión estática de fondo .....( Kg / Cm<sup>2</sup> )

## 4.1.1 ALGORITMO .

- 1.- Area exterior de la tubería de producción para cada -  
sección :

$$A_o = \pi \cdot ( DE^2 ) / 4 \quad \dots ( pg^2 )$$

- 2.- Area interior de la tubería de producción para cada -  
sección :

$$A_i = \pi \cdot ( DI^2 ) / 4 \quad \dots ( pg^2 )$$

- 3.- Area de la sección transversal de la tubería de pro-  
ducción para cada sección :

$$A_s = \pi \cdot ( DE^2 - DI^2 ) / 4 \quad \dots ( pg^2 )$$

- 4.- Area interior del empacador :

$$A_p = \pi \cdot ( DIE^2 ) / 4 \quad \dots ( pg^2 )$$

- 5.- Relación de diámetros de la tubería de producción para  
cada sección :

$$R = DE / DI \quad \dots ( adimensional )$$

- 6.- Distancia libre radial de la tubería de producción a -  
la tubería de revestimiento :

$$r = ( DTR - DE ) / 2 \quad \dots ( pg )$$

- 7.- Momento de inercia de la sección transversal de la tubería de producción para cada sección :

$$I = (\pi / 64) \cdot (D E^4 - D I^4) \dots (pg^4)$$

- 8.- Gradiente de presión hidráulico para cada sección considerada a condiciones iniciales de operación del pozo :

$$G.P_i = \rho_f \cdot (1.42) \dots (lb/pg^2/m)$$

- 9.- Gradiente de presión hidráulico para cada sección considerada a condiciones finales de operación del pozo :

$$G.P_f = \rho_f \cdot (1.42) \dots (lb/pg^2/m)$$

- 10.- Presión inicial en la tubería de producción y la tubería de revestimiento para cada sección considerada a condiciones iniciales de operación del pozo :

Se contemplaran los casos siguientes :

- Pozo estimulado .
- Pozo productor fluyente .
- Pozo productor cerrado .

Se determinaran las presiones para cada sección del pozo , desde la superficie hasta el fondo del pozo, para los siguientes casos :

Pozo estimulado

$$P_{is} = 0 \quad , \quad P_{os} = 0$$

$$P_{i.t.p} = G.P_i \cdot (\text{Longitud sección}) + P_{is} \cdot (lb/pg^2)$$

$$P_{i.t.r} = G.P_i \cdot (\text{Longitud sección}) + P_{os} \cdot (lb/pg^2)$$

Pozo productor de aceite fluyendo

$$P_{is} = 0 \quad , \quad P_{os} = 0$$

$$P_{i.t.p} = G.P_i \cdot (\text{Longitud sección}) + P_{is} \cdot (lb/pg^2)$$

$$P_{i.t.r} = G.P_i \cdot (\text{Longitud sección}) + P_{is} \cdot (lb/pg^2)$$

Pozo productor de aceite cerrado

$P_{is}$  = Presión superficial de producción en la t.p

$P_{os}$  = Presión superficial de producción en la t.r

$$P_{i.t.p} = G.P_{f.p.f} \cdot (\text{Longitud sección}) + P_{is} \dots (lb/pg^2)$$

$$P_{i.t.r} = G.P_i \cdot (\text{Longitud sección}) + P_{os} \dots (lb/pg^2)$$

El .-- Presión final en la T.P y T.R para cada sección considerada a condiciones actuales de operación del pozo, para los siguientes casos :

Pozo estimulado

$P_{is}$  = Presión superficial de inyección en la t.p

$P_{os}$  = Presión superficial en la t.r

$P_{iny}$  = Presión de inyección en el fondo del pozo

$P_{int}$  = Profundidad interior del pozo

$$G.P_{f.e} = (P_{iny} - P_{is}) / P_{int} \dots (lb/pg^2/m)$$

$$P_{f.t.p} = G.P_{f.e} \cdot (\text{Longitud sección}) + P_{is} \dots (lb/pg^2)$$

$$P_{f.t.r} = G.P_f \cdot (\text{Longitud sección}) + P_{os} \dots (lb/pg^2)$$

Pozo productor de aceite fluyendo

$P_{is}$  = Presión superficial de producción en la t.p

$P_{os}$  = Presión superficial en la t.r

$P_{wf}$  = Presión de fondo fluyendo

$P_{int}$  = Profundidad interior del pozo

$$G.P_{f.p.f} = ( P_{wf} - P_{is} ) / P_{int} \dots (lb/pg^2/m)$$

$$P_{f.t.p} = G.P_{f.p.f} \cdot ( \text{Longitud sección} ) + P_{is} \dots (lb/pg^2)$$

$$P_{f.t.r} = G.P_f \cdot ( \text{Longitud sección} ) + P_{os} \dots (lb/pg^2)$$

Pozo productor de aceite cerrado

$P_{is}$  = Presión superficial de producción en la t.p

$P_{os}$  = Presión superficial en la t.r

$P_{ws}$  = Presión estática de fondo

$P_{int}$  = Profundidad interior del pozo

$$P_{is} = P_{ws} - 1.42 \cdot ( 0.90 ) \cdot P_{int} \dots (lb/pg^2)$$

$$P_{f.t.p} = G.P_f \cdot ( \text{Longitud sección} ) + P_{is} \dots (lb/pg^2)$$

$$P_{f.t.r} = G.P_f \cdot ( \text{Longitud sección} ) + P_{os} \dots (lb/pg^2)$$

- 12 .- Diferencia de la presión en la T.P y T.R , para cada sección a condiciones iniciales y actuales de operación del pozo :

Tubería de producción :

$$\Delta P_i = \text{Presión final} - \text{Presión inicial} \dots (\text{lb/pg}^2)$$

Tubería de revestimiento :

$$\Delta P_o = \text{Presión final} - \text{Presión inicial} \dots (\text{lb/pg}^2)$$

- 13 .- Diferencia de densidad del fluido utilizado en la T.P y T.R, para cada sección considerada a condiciones actuales e iniciales de operación del pozo :

Tubería de producción :

$$\Delta \rho_i = \text{Densidad final} - \text{Densidad inicial} \dots (\text{g/cm}^3)$$

Tubería de revestimiento :

$$\Delta \rho_o = \text{Densidad final} - \text{Densidad inicial} \dots (\text{g/cm}^3)$$

- 14 .- Peso unitario de la tubería de producción sumergida en liquido a condiciones iniciales y finales de operación del pozo, para cada sección del pozo considerada :

$$W_i = ( W_B / 12 ) + ( ( \rho_i A_i - \rho_o A_o ) / 27.7 ) \dots (\text{lb/pg})$$

$$W_f = ( W_B / 12 ) + ( ( \rho_i A_i - \rho_o A_o ) / 27.7 ) \dots (\text{lb/pg})$$

15 .- EMPACADOR PERMITIENDO LIBRE MOVIMIENTO DE LA  
TUBERIA DE PRODUCCION .

15.1 .- Fuerza efectiva en el empacador.

Fuerza en el fondo de la sección 1 (  $F_{a1}$  ):

$$F_{a1} = ( A_{p1} - A_{i1} ) \cdot P_{i1} - ( A_{p0} - A_{o0} ) \cdot P_{o0} \quad \dots (1b)$$

Fuerza en el fondo de la sección 2 (  $F_{a2}$  ):

$$F_{a2}' = ( A_{i1} - A_{i2} ) \cdot P_{i2} - ( A_{o1} - A_{o2} ) \cdot P_{o2} \quad \dots (1b)$$

$$F_{a1}' = F_{a1}$$

$$F_{a2} = F_{a1}' + F_{a2}' - ( L W_s )_1 \cdot 39.37 \quad \dots (1b)$$

Fuerza en el fondo de la sección 3 (  $F_{a3}$  ):

$$F_{a3}' = ( A_{i2} - A_{i3} ) \cdot P_{i3} - ( A_{o2} - A_{o3} ) \cdot P_{o3}$$

$$F_{a3} = F_{a1}' + F_{a2}' + F_{a3}' - (( L W_s )_1 - ( L W_s )_2 ) \cdot 39.37$$

... (1c)

y así sucesivamente, hasta n secciones .

$F_a$  puede ser : ( + ) Fuerza de compresión

( - ) Fuerza de tensión

15.2 .- Cambio de la fuerza efectiva debido : los cambios  
por presión en el empacador :

$$\Delta F = (A_p - A_i) \Delta P_i - (A_p - A_c) \Delta P_c \quad \dots (1b)$$

Sección 1 :

$$\Delta F'_1 = (A_p - A_i) \Delta P_i - (A_p - A_c) \Delta P_c \quad \dots (1b)$$

Sección 2 :

$$\Delta F'_2 = (A_{11} - A_{12}) \Delta P_{12} - (A_{01} - A_{c2}) \Delta P_{02} \quad \dots (1b)$$

Sección 3 :

$$\Delta F'_{a3} = (A_{12} - A_{13}) \Delta P_{13} - (A_{02} - A_{c3}) \Delta P_{03} \quad \dots (1b)$$

Donde :

$$\text{Sección 1 : } \Delta F_1 = \Delta F'_1 \quad \dots (1b)$$

$$\text{Sección 2 : } \Delta F_2 = \Delta F'_1 + \Delta F'_2 \quad \dots (1b)$$

$$\text{Sección 3 : } \Delta F_3 = \Delta F'_1 + \Delta F'_2 + \Delta F'_3 \quad \dots (1b)$$

15.3 -- Efecto riston para cada sección del nore :

$$\Delta L_1 = - \frac{39.37 \cdot L}{E \cdot A_c} \Delta F \quad ; \quad \Delta L_1 \text{ total} = \sum_{i=1}^n (\Delta L_1)_i$$

... (PE)

15.4 .- Fuerza ficticia en el empacador.

Fuerza ficticia en el fondo de la sección 1 ( $F_f$ ):

$$F_f = A_p \cdot ( P_1 - P_0 ) \dots (1b)$$

Fuerza ficticia en el fondo de la sección 2 ( $F_{f2}$ ):

$$F_{f2} = F_f - ( ( L \cdot W )_1 ) \cdot 39.37 \dots (1b)$$

Fuerza ficticia en el fondo de la sección 3 ( $F_{f3}$ ):

$$F_{f3} = F_f - ( ( L \cdot W )_1 - ( L \cdot W )_2 ) \cdot 39.37 \dots (1b)$$

Y así sucesivamente para cada sección del pozo.

NOTA.- Si  $F_f$  es negativa no existira pandeo helicoidal.

15.5 .- Punto neutro.

$$N = F_f / W_f \dots (PE)$$

Si  $N < L_1$ , entonces, el punto neutro esta en la sección 1, por lo cual, la tubería de producción esta parcialmente pandeada.

Si  $N > L_1$ , la tubería de producción esta enteramente pandeada, por lo tanto, se procedera a calcular lo siguiente:

Sección 2 del pozo:

$$N = ( F_{f2} / W_{f2} ) + ( L_1 \cdot 39.37 ) \dots (PE)$$

Si  $N < (L_1 + L_2)$ , el punto neutro esta en la sección 2

Si  $N > (L_1 + L_2)$ , el punto neutro se localiza arriba de la sección 2 del pozo, por lo tanto, calcular lo siguiente:

Sección 3 del pozo:

$$N = ( F_{f3} / W_{f3} ) + ( L_1 + L_2 ) \cdot 39.37 \dots (PE)$$

Continuar el procedimiento hasta localizar el punto neutro .

15.6.- Efecto de pandeo helicoidal ó alabes para cada sección del pozo.

Si  $N > L$  ( Tubería enteramente pandeada )

$$\Delta L'_2 = - \frac{r^2 \cdot A_p^2 \cdot (P_i - P_o)^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{39.37 \cdot L \cdot W_f}{A_i (P_i - P_o)} \right]^2 - \frac{39.37 \cdot L \cdot W_f}{A_p (P_i - P_o)} \dots (PG)$$

Si  $N < L$  ( Tubería parcialmente pandeada )

$$\Delta L_2 = - \frac{r^2 \cdot A_p^2 \cdot (P_i - P_o)^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \dots (PG)$$

$$\Delta L_2 \text{ total} = \sum_{i=1}^n (\Delta L_2)_i \text{ ó } (\Delta L'_2)_i \dots (PG)$$

15.7.- Diferencia de presiones superficiales en la T.P y T.R, a condiciones actuales e iniciales de operación del pozo para cada sección:

$$\Delta P_{is} = P_{if} - P_{ii} \dots (lb/pg^2)$$

$$\Delta P_{os} = P_{of} - P_{oi} \dots (lb/pg^2)$$

15.8.- Efecto de abalonzamiento para cada sección del pozo.

$$\Delta L_3 = - \frac{\mu \cdot L^2}{0.0254 \cdot E} \left[ \frac{0.0361 \cdot (\Delta \rho_1 - R^2 \Delta \rho_o) - \frac{1 + 2\mu}{2} \delta}{R^2 - 1} \dots \right]$$

$$\dots - \frac{(39.37) \cdot 2 \cdot L \cdot \mu}{E} \left[ \frac{\Delta P_{is} - R^2 \Delta P_{os}}{R^2 - 1} \right] \dots (PG)$$

$$\Delta L_3 \text{ total} = \sum_{i=1}^n (\Delta L_3)_i \dots (PG)$$

15.9 .- Efecto por temperatura para cada sección del pozo .

$$Y = 552 \cdot t / (DTR E^2)$$

$$\text{Log } f(t) = 0.31333 \cdot \text{Log}_E (Y) - 0.06 \cdot (\text{Log } Y)^2 + 0.00666 \cdot (\text{Log } Y)^3$$

$$f(t) = 10^{(\text{Log } f(t))}$$

Si el espacio anular esta lleno de agua :

$$B = 0.281 \cdot DI / (DTR - DE)$$

$$FF = 1.658 \cdot (1 + B \cdot f(t)) / B$$

Si el espacio anular esta lleno de aceite :

$$B = 0.0564 \cdot DI / (DTR - DE)$$

$$FF = 0.584 \cdot (1 + B \cdot f(t)) / B$$

$$A = FF \cdot q_{iny}$$

$$T(Z, t) = g_e \cdot Z + T_{es} - k_e \cdot A + (T_{fs} + g_e \cdot A - T_{es}) \cdot \exp(-Z/A) \quad \dots (\text{°F})$$

$$T_a = (T_{fs} + T(Z, t)) / 2 \quad \dots (\text{°F})$$

$$T_f = (T_{es} + (g_e \cdot Z + T_{es})) / 2 \quad \dots (\text{°F})$$

Igualar :  $T_{es} = T(Z, t)$  y  $T_{fs} = T(Z, t)$  para calcular

$T_a$  y  $T_f$  en cada sección del pozo .

Si el pozo es productor de aceite , se tiene :

Espacio anular lleno de aceite.-

$$A = \frac{q_o \cdot M \cdot C_f \cdot (DTR - DE) \cdot (33.6 + 1.896 \cdot DI \cdot f(t) / (DTR - DE))}{400.27 \cdot DI}$$

Espacio anular lleno de agua.-

$$A = \frac{q_o \cdot M \cdot C_f \cdot (DTR - DE) \cdot (33.6 + 9.432 \cdot DI \cdot f(t) / (DTR - DE))}{1991.52 \cdot DI}$$

$$T_f = T_{es} + (\epsilon_e \cdot (Z / 2)) \dots (^\circ F)$$

Como el pozo es productor, entonces, el sentido de flujo, sera desde el fondo del pozo hasta la superficie.

$$T(Z, t) = T_{bh} + \epsilon_e \cdot A - \epsilon_e \cdot Z - (\epsilon_e \cdot A) \exp(-Z / A) \dots (^\circ F)$$

$$T_a = (T_{bh} + T(Z, t)) / 2 \dots (^\circ F)$$

Igualar:  $T_{bh} = T(Z, t)$ , para calcular  $T_a$  en cada sección del pozo.

Por lo tanto, el efecto por temperatura esta dado por:

$$\Delta L_4 = (6.9 \times 10^{-6}) \cdot L \cdot (T_a - T_f) \dots (pg)$$

$$\Delta L_4 \text{ total} = \sum_{i=1}^n (L_4)_i \dots (pg)$$

15.10.- Efectos combinados (pistón, pandeo, abalonzamiento y temperatura).

Cambios de longitud total:

$$\Delta L_{\text{total}} = \Delta L_{1\text{total}} + \Delta L_{2\text{total}} + \Delta L_{3\text{total}} + \Delta L_{4\text{total}} \dots \text{(PE)}$$

16 .- APLICANDO CARGA SOBRE EL EMPACADOR

16.1 .- Efecto pistón para cada sección del pozo.

$$\Delta L_1 = \frac{39.37 \cdot L \cdot F}{E \cdot A_s} \dots \text{(PE)}$$

$$\Delta L_{1\text{total}} = \sum_{i=1}^n (\Delta L_1)_i \dots \text{(PE)}$$

Donde: "F" es la fuerza sobre el empacador.

16.2 .- Efecto de pandeo helicoidal ó alabeo para cada sección del pozo.

Si  $n < 1$  :

$$\Delta L_2 = \frac{r^2 \cdot F^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_i} \dots \text{(PE)}$$

Si  $n > 1$  :

$$\Delta L_2' = \frac{r^2 \cdot F^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_i} \left[ \frac{39.37 \cdot L \cdot W_i}{F} \left( 2 - \frac{39.37 \cdot L \cdot W_i}{F} \right) \right] \dots \text{(PE)}$$

$$\Delta L_{2\text{total}} = \sum_{i=1}^n (\Delta L_2')_i \text{ ó } (\Delta L_2)_i \dots \text{(PE)}$$

16.3 .- Cambio de longitud total en la tubería de producción, debido a la fuerza aplicada sobre el empacador, para cada sección del pozo.

$$\Delta L_5 = \Delta L_1 + (\Delta L_2 \text{ ó } \Delta L_2') \dots (pg)$$

$$\Delta L_{5_{total}} = \Delta L_{1_{total}} + (\Delta L_{2_{total}} \text{ ó } \Delta L_{2'_{total}}) \dots (pg)$$

16.4.- Longitud mínima requerida de los sellos del empacador, ó cambios de longitud de la tubería de producción, debido a la fuerza aplicada sobre el empacador y a los efectos combinados.

$$\Delta L_6 = \Delta L_{total} + \Delta L_{5_{total}} \dots (pg)$$

Nota: ( + ):Representa una elongación .

( - ):Representa un acortamiento .

#### 17 .- DETERMINACION DE ESFUERZOS EN EL APAREJO DE PRODUCCION FIJO AL EMPACADOR .

17.1.- Fuerza real de la tubería de producción debido a la fuerza aplicada y a los efectos combinados .

$$- \Delta L_6 = \Delta L_p$$

Si existe pandeo helicoidal y la fuerza ficticia es positiva :

Si  $N < L$  :

$$\Delta L_f^* = - \frac{39.37 \cdot L \cdot F_{an}}{E \cdot A_s} - \frac{r^2 \cdot F_f^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \dots (pg)$$

$$\Delta L_f^* = \sum_{i=1}^n (\Delta L_f^*)_i \dots (pg)$$

Si  $N > L$  :

$$\Delta L_f^* = - \frac{39.37 \cdot L \cdot P_{an}}{E \cdot A_s} - \frac{r^2 \cdot P_f^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{39.37 \cdot L \cdot W_f}{P_f} \left( 2 - \frac{39.37 \cdot L \cdot W_f}{P_f} \right) \right] \dots$$

... (pg)

$$\Delta L_f^* = \sum_{i=1}^n (\Delta L_f^*)_i \dots (pg)$$

Si no existe pandeo helicoidal, la fuerza ficticia es igual a cero, por lo tanto :

$$\Delta L_f^* = - \frac{39.37 \cdot L \cdot P_{an}}{E \cdot A_s} \dots (pg)$$

$$\Delta L_f^* = \sum_{i=1}^n (\Delta L_f^*)_i \dots (pg)$$

17.2 -- Cambio de longitud en la tubería de producción considerando la carga sobre el empacador para cada sección del pozo .

$$\Delta L_f^{**} = \Delta L_f^{*} + \Delta L_p^{*} \quad \dots (pg)$$

Si  $\Delta L_f^{**}$  es positiva (+) :

$$F_a^{*} = \frac{\Delta L_f^{**} \cdot E \cdot A_s}{39.37 \cdot L} \quad \dots (1b)$$

$$F_a^{*} = \sum_{i=1}^n (F_a^{*})_i \quad \dots (1b)$$

Si  $\Delta L_f^{**}$  es negativa (-) :

Si  $N < L$  ( tubería parcialmente pandeada )

$$\Delta L_2 = \frac{r^2 \cdot (F_a^{*})^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \quad \dots (pg)$$

Si  $N > L$  ( tubería enteramente pandeada )

$$\Delta L_2 = \frac{r^2 \cdot (F_a^{*})^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{39.37 \cdot L \cdot W_f}{F_a^{*}} \left( 2 - \frac{39.37 \cdot L \cdot W_f}{F_a^{*}} \right) \right]$$

... (pg)

$$\Delta L_{f1}^{**} = - \frac{F_a^* \cdot L \cdot 39.37}{E \cdot A_s} \quad \dots (pE)$$

$$\Delta L_{f1}^{**} = \sum_{i=1}^n (\Delta L_{f1}^{**})_i \quad \dots (pE)$$

$$\Delta L_2^{**} = \sum_{i=1}^n (\Delta L_2)_i \text{ ó } (\Delta L_2')_i \quad \dots (pE)$$

$$\Delta L_{f1+2}^{**} = \Delta L_{f1}^{**} + \Delta L_2^{**} \quad \dots (pE)$$

Obteniendo los resultados anteriores, se procede a — realizar el proceso iterativo, aproximando ( $F_a^{**}$ ) con ( $\Delta L_f^{**}$ ), para así obtener la fuerza empujador-tubería, está es :

$$F_{f1}^{**} = F_a^{**} \cdot (0.90) \quad \dots (1b)$$

Si  $N < L$  ( tubería parcialmente pandeada )

$$\Delta L_2 = - \frac{r^2 \cdot (F_{f1}^{**})^2}{2 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \quad \dots (pE)$$

Si  $N > L$  ( tubería enteramente pandeada )

$$\Delta L_2' = \frac{r^2 \cdot (P_{f1}^*)^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot W_f} \left[ \frac{39.37 \cdot L \cdot W_f}{P_{f1}^*} \left( 2 - \frac{39.37 \cdot L \cdot W_f}{P_{f1}^*} \right) \right]$$

$$\Delta L_2^{**} = \sum_{i=1}^n (\Delta L_2)_i \text{ ó } (\Delta L_2')_i \quad \dots \text{ (pg)}$$

$$\Delta L_{f1}^{**} = \frac{P_{f1}^* \cdot L \cdot 39.37}{E \cdot A_E} \quad \dots \text{ (pg)}$$

$$\Delta L_{f1}^{**} = \sum_{i=1}^n (\Delta L_{f1}^{**})_i \quad \dots \text{ (pg)}$$

$$\Delta L_{r+2}^{**} = \Delta L_{r+1}^{**} + \Delta L_2^{**} \quad \dots \text{ (pg)}$$

Entonces para la obtención de  $(P_a)^*$ , se tiene :

$$P_a^{**} = P_a^{**} - (P_a^{**} - P_{f1}^{**}) \left[ \frac{(\Delta L_{ft1}^{**} - \Delta L_f^{**})}{(\Delta L_{ft1}^{**} - \Delta L_{ft2}^{**})} \right]$$

Si se cumple la siguiente condición :

$$\left| \frac{F_a^{**} - F_{f1}^{**}}{F_a^{**}} \right| < 0.1$$

por lo tanto , termina el proceso iterativo , de lo contrario :

$$F_a^{**} = F_{f1}^{**}$$

$$F_{f1}^{**} = F_a^{**}$$

$$\Delta L_{ft1}^{**} = \Delta L_{ft2}^{**}$$

y continuar el proceso iterativo , hasta que se cumpla la condición anteriormente mencionada .

17.3 .- Fuerza ficticia de la tubería de producción anclada al empacador para cada sección del pozo :

$$F_f^* = F_f + F_p \quad \dots (1b)$$

17.4 .- Fuerza empacador - tubería de producción :

$$F_p = F_a^* - F_{an} \quad \dots (1b)$$

17.5 .- Fuerza real de la tubería de producción anclada al empacador para cada sección del pozo :

$$F_a^* = F_a + F_p \quad \dots (1b)$$

17.6 .- Fuerza de la tubería de producción en el cabezal :

$$F_T = F_{a1}^* - 39.37 \cdot (W_S \cdot L)_1 \quad \dots (1b)$$

17.7 .- Fuerza de la tubería de producción en el extremo de cada sección del pozo :

Sección 1 :

$$F_{t1} = F_{a1} + F_p \quad \dots (1b)$$

Sección 2 :

$$F_{t2} = F_{a2} + F_p \quad \dots (1b)$$

Sección 3 :

$$F_{t3} = F_{a3} + F_p \quad \dots (1b)$$

. . . . .  
 . . . . .

$$F_{tn} = F_{an} + F_p$$

Y así sucesivamente hasta "n" secciones.

- 18.- Esfuerzo de flexión en el acople de producción por presión interna, para cada sección del pozo.

$$S_i = \left[ 3 \left[ \frac{R^2 \cdot (F_i - P_o)}{R^2 - 1} \right]^2 + \left[ \frac{F_i - R^2 \cdot F_o}{R^2 - 1} \right]^2 + S_a + \frac{S_b}{R} \right]^{0.5}$$

.... (lb/pg<sup>2</sup>)

$$S_a = F_a^* / A_s \quad \dots (\text{lb/pg}^2)$$

$$S_b = \frac{D \cdot r}{4 \cdot I} \cdot F_f^* \quad \dots (\text{lb/pg}^2)$$

Si  $F_f^* \leq 0$ , entonces  $S_b = 0$

donde:  $F_a^*$  y  $F_f^*$  son las fuerzas que actúan en cada sección del pozo .

19.- Resultados del procedimiento de cálculo en unidades prácticas de campo, para cada sección del pozo .

19.1.- Efecto pistón .

$$\Delta L_1 = \Delta L_1 \cdot 2.54 \quad \dots \text{ ( centimetro )}$$

$$\Delta L_{1total} = \Delta L_{1total} \cdot 2.54 \quad \dots \text{ ( centimetro )}$$

19.2.- Efecto de pandeo helicoidal ó alabeo .

$$\Delta L_2 = \Delta L_2 \cdot 2.54 \quad \dots \text{ ( centimetro )}$$

$$\Delta L_{2total} = \Delta L_{2total} \cdot 2.54 \quad \dots \text{ ( centimetro )}$$

19.3.- Efecto de abalonzamiento .

$$\Delta L_3 = \Delta L_3 \cdot 2.54 \quad \dots \text{ ( centimetro )}$$

$$\Delta L_{3total} = \Delta L_{3total} \cdot 2.54 \quad \dots \text{ ( centimetro )}$$

19.4.- Efecto por temperatura .

$$\Delta L_4 = \Delta L_4 \cdot 2.54 \quad \dots \text{ ( centimetro )}$$

$$\Delta L_{4total} = \Delta L_{4total} \cdot 2.54 \quad \dots \text{ ( centimetro )}$$

19.5.- Cambio de longitud total en el aparejo de producción.

$$\begin{aligned} \Delta L_{total} = & \Delta L_{1total} + \Delta L_{2total} + \Delta L_{3total} \\ & + \Delta L_{4total} \quad \dots \text{ ( centimetro )} \end{aligned}$$

19.6 .- Longitud mínima requerida de los sellos del empa-  
cador ó movimiento neto .

$$\Delta L_6 = \Delta L_6 \cdot 2.54 \quad \dots \text{ ( centimetro )}$$

19.7 .- Fuerza emparador-tubería de producción .

$$F_p = F_p \cdot 4.545 \times 10^{-4} \quad \dots \text{ ( tonelada )}$$

19.8 .- Fuerza de la tubería de producción en el cabezal .

$$F_T = F_T \cdot 4.545 \times 10^{-4} \quad \dots \text{ ( tonelada )}$$

19.9 .- Fuerza de la tubería de producción en el extremo  
de cada sección del pozo .

$$F_t = F_t \cdot 4.545 \times 10^{-4} \quad \dots \text{ ( tonelada )}$$

19.10 .- Esfuerzo de flexión en el cabezal .

$$S_i = S_i \cdot 0.0703 \quad \dots \text{ ( kg / cm}^2 \text{ )}$$

19.11 .- Esfuerzo de flexión en el extremo de cada sección  
del pozo .

$$S_i = S_i \cdot 0.0703 \quad \dots \text{ ( kg / cm}^2 \text{ )}$$

19.12 .- Presión en el extremo de cada sección del pozo  
en la T.P y T.R .

$$P_i = P_i \cdot 0.0703 \quad \dots \text{ ( kg / cm}^2 \text{ )}$$

$$P_o = P_o = 0.0703 \quad \dots \text{ ( kg / cm}^2 \text{ )}$$

19.13 .- Temperatura en el extremo de cada sección del pozo.

$$T ( Z, t ) \quad \dots \text{ ( centigrados )}$$

19.14 .- Punto neutro para cada sección del pozo .

$$N = F_f / W_f \quad \dots \text{ ( metro )}$$

20 .- Fin del procedimiento de cálculo .

## 4.1.2

## DIAGRAMA DE FLUJO

El diagrama de flujo que se presenta a continuación sobre el procedimiento de cálculo para la determinación de los cambios de longitud y esfuerzo de flexión en la tubería de producción, está estructurado en dos etapas de procesamiento.

La primer etapa consiste en la introducción de datos generales del pozo en análisis y la segunda en el procesamiento de cálculo .

El programa de cómputo cuenta con el programa principal y 17 subrutinas, cada una de las cuales tiene una determinada función .

El programa principal nos determina la verificación de la entrada al bloque de datos generales del pozo. Enseguida se eligirá que alternativa se desea aplicar , esto es :

- Sí el pozo es estimulado .
- Sí el pozo es productor fluyendo .
- Sí el pozo es productor cerrado .

Posteriormente se efectúa el procesamiento de cálculo y se procede a elegir si se termina ó se inicia el procedimiento de cálculo.

A continuación se proporciona una lista de las subrutinas empleadas y la función que tiene cada una de ellas :

SUBROUTINAFUNCION

JENY1	Introduce y verifica los datos generales del pozo .
DATA	Bloque de datos de la tubería de producción y de revestimiento, los cuales son los siguientes : - Diametro interior de T.P y T.R . - Diametro exterior de T.P y T.R . - Peso unitario de T.P y T.R .
JENY3	Imprime los datos generales del pozo .
JENY2	Realiza el procesamiento de cálculo .
TEMP	Cálcula la temperatura en el fondo de cada sección del pozo , cuando el pozo es sometido a una estimulación .
PROD	Cálcula la temperatura en el extremo superior de cada sección , cuando el pozo es fluyente . Cuando el pozo está cerrado nos determina la temperatura media para cada sección del pozo .
ESTIM	Nos determina las presiones en el fondo de cada sección , cuando el pozo es sometido a una estimulación .

SUBROUTINAFUNCION

FLUY	Nos determina las presiones en el fondo de cada sección cuando el pozo es fluvente y cuando está cerrado .
PISTON	Cálcula el efecto de pistón para cada sección del pozo .
HELIC	Cálcula el efecto de pandeo helicoidal ó alabeo para cada sección del pozo .
ABALON	Cálcula el efecto de abaloniamiento para cada sección del pozo .
TEMPER	Cálcula el efecto por temperatura para cada sección del pozo .
FEMPAC	Nos determina el cambio de longitud total en el aparejo de producción cuando se aplica carga .
FEMPC	Nos determina el cambio de longitud total cuando el aparejo está anclado .
FEMPC1	Nos determina la fuerza emparador - tubería de producción .
ESFUER	Cálcula el esfuerzo de flexión en el aparejo de producción para cada sección del pozo .

## SUBROUTINA

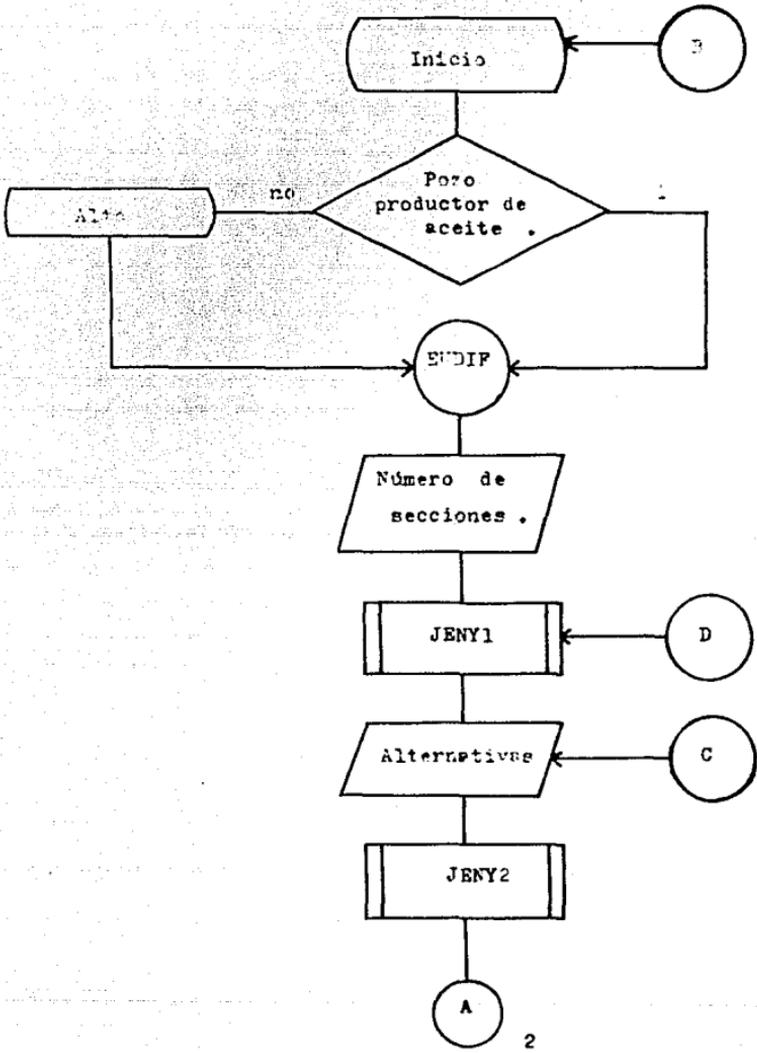
JENY5

## FUNCION

Imprime los resultados del procedimiento de cálculo, estos son :

- Punto neutro.
- Temperatura en el extremo ó media.
- Cambio de longitud por los efectos de : Pistón.  
Alabeo.  
Abalonzamiento.  
Temperatura.
- Cambio de longitud total.
- Fuerza real.
- Esfuerzo de flexión por presión interna.
- Presiones en la T.P y T.R .
- Fuerza que impide el movimiento de la tubería de producción cuando está fija al empacador .

A continuación se presenta el diagrama de flujo simplificado del procedimiento de cálculo para la determinación de los cambios de longitud y esfuerzo de flexión en el aparejo de producción .



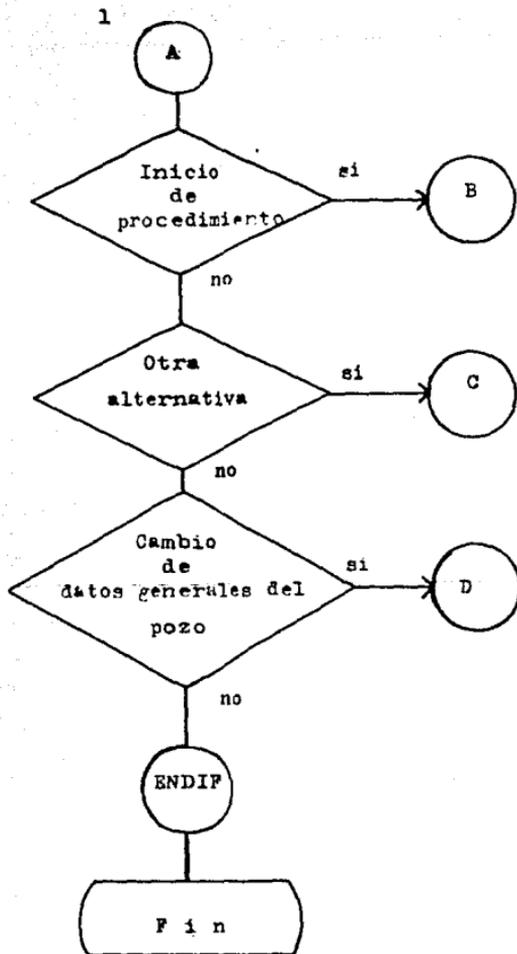
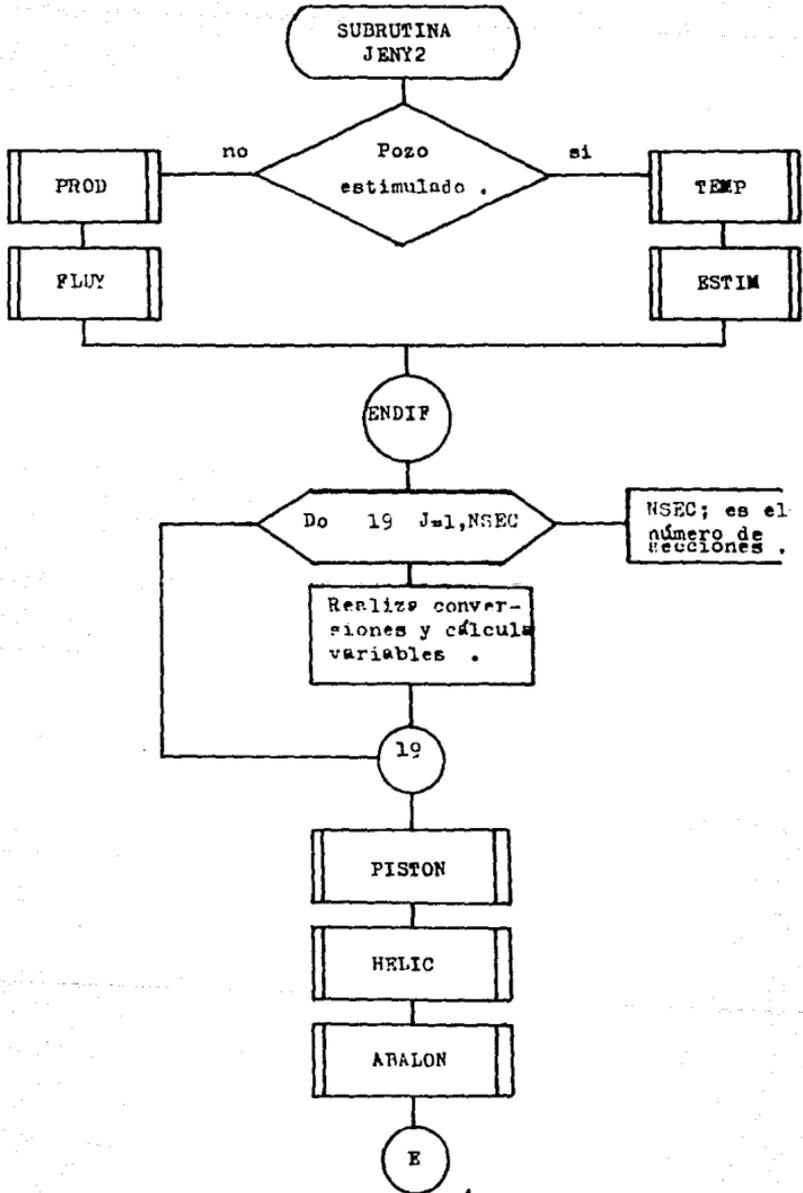


Diagrama de flujo simplificado del programa principal .



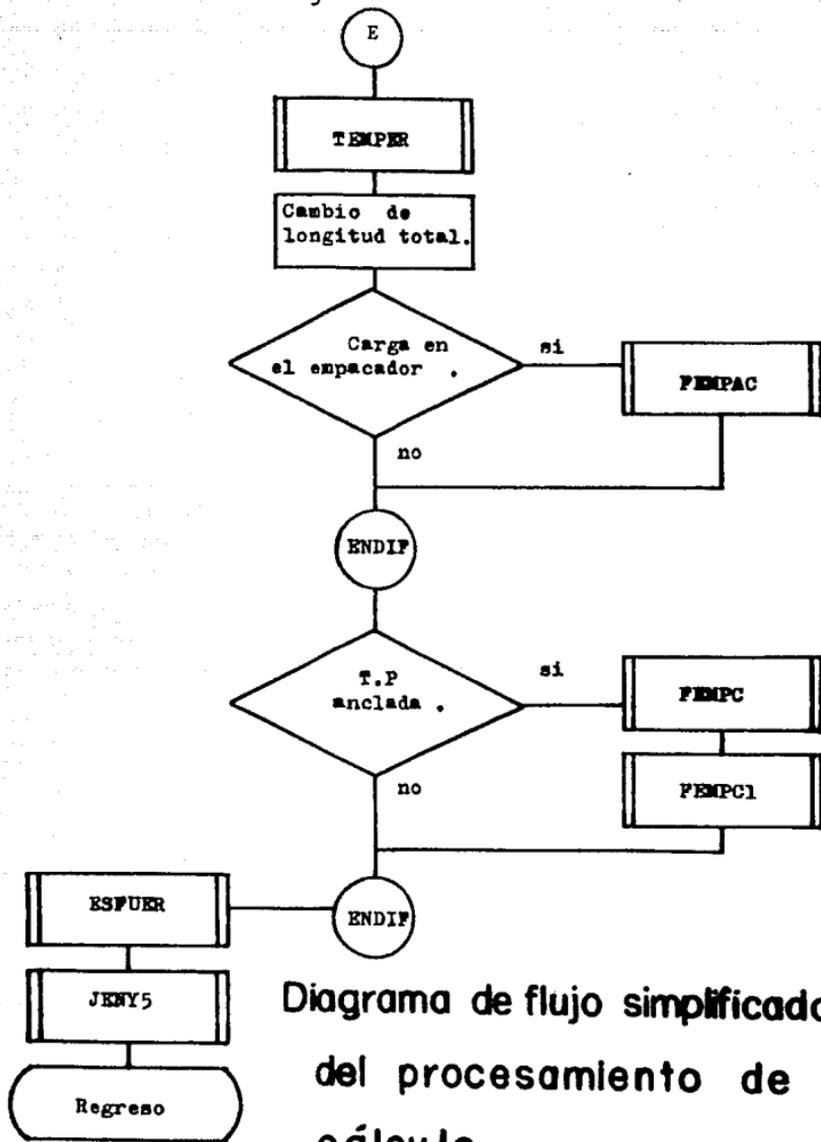


Diagrama de flujo simplificado del procesamiento de cálculo .

4.1.3 LISTADO DEL PROGRAMA DE COMPUTO<sup>3</sup>

El listado del programa de cómputo que se muestra a continuación , se elaboro en lenguaje de programación Fortran 77, para procesarse en una computadora personal " PC " .

A continuación se presentan los listados del programa - principal , la intrpducción de datos generales del pozo y el - procesamiento de cálculo .

```

*****
*** IDENTIFICACION DEL PROGRAMA ***
***
*** PROGRAMA PARA CALCULAR LOS MOVIMIENTOS EN APAREJOS- ***
*** DE PRODUCCION COMBINADOS DEBIDOS A CAMBIOS POR ***
*** PRESION Y TEMPERATURA. ***
*** METODO APLICADO DE ARTHUR LUBINZKI Y D.J HANNEFLINE ***
***
*****

*****
*** IDENTIFICACION DE VARIAS I.B. ***
*****

RAIN ..... Tipo de fluido en el espacio anular ..... (Agua o Aceite )
NOMO ..... Cateria anclada o con receptacion fija .
DIE ..... Diametro interior del capador.....(pulgada)
PTA1.....Profundidad interior del pozo.....(metro)
PSE1.....Peso e Tension sobre el capador.....(tonelada)
TSA1 .....Temperatura superficial.....(centigrados)
TFA1 .....Temperatura del fluido en la superficie.....
.....(centigrados)
GASTO2 .....Gasto de inyeccion.....(bariles por minuto)
GASTO .....Gasto de produccion.....(bariles por dia)
GRAD .....Gradiente geotermico.....(centigrados / metro)
PIF1E ,PIF1P.....Presion superficial en la t.p.....(kg/cm2)
POF2E ,POF2P.....Presion superficial en la t.p.....(g/cm2)
PWS .....Presion de fondo estatico.....(kg/cm2)
PWF .....Presion de fondo fluyendo.....(kg/cm2)
PINY .....Presion de inyeccion en el fondo del pozo.....
.....(kg/cm2)
J.....Numero de seccion del pozo .
PFTP(J) ..... Profundidad que alcanza la t.p.....(metro)
DSEC (J) .....Longitud de la seccion.....(metro)
DIA(J) .....Densidad inicial del fluido en la t.p.....
.....(g /cm3)
DIF(J) .....Densidad final del fluido en la t.p.....
.....(g /cm3)
DGA(J) .....Densidad inicial del fluido en la t.p.....
.....(g /cm3)
DOF(J) .....Densidad final del fluido en la t.p.....(g/cm3)
DIC (J) .....Diametro interior de la t.p para cada .....
seccion del pozo.....(pulgada)
DICEX (J) .....Diametro exterior de la t.p para cada .....
seccion del pozo.....(pulgada)
DOT (J).....Diametro exterior de la t.p para cada .....
seccion del pozo.....(pulgada)
DIT (J).....Diametro interior de la t.p para cada .....
seccion del pozo.....(pulgada)
TFF2(J).....Temperatura en el extremo de cada .....
seccion del pozo.....(centigrados)
WS (J).....Peso unitario de la t.p en el aire para .....

```

1.FDR

Wednesday, October 5, 1988

Page

\*                    cada seccion del pozo.....(libra / pie)  
 \* WIK(J).....Peso unitario de la t.r en el aire para .....  
 \*                    cada seccion del pozo.....(libra / pie)

-----  
 \*                    R E S U L T A D O S  
 \*                    -----

\* DELT21(J).....Efecto piston para cada seccion del ..... -  
 \*                    pozo.....(centimetro)  
 \* DELT22(J).....Efecto de pandeo helicoidal o alabeo para .....  
 \*                    cada seccion del pozo.....(centimetro)  
 \* DELT23(J).....Efecto de abalonamiento para cada seccion .....  
 \*                    del pozo.....(centimetro)  
 \* DELT24(J).....Efecto por temperatura para cada seccion .....  
 \*                    del pozo .....(centimetro)  
 \* SUM21.....Efecto de piston total.....(centimetro)  
 \* SUM22.....Efecto de alabeo total.....(centimetro)  
 \* SUM23.....Efecto de abalonamiento total.....(centimetro)  
 \* SUM24.....Efecto de temperatura total.....(centimetro)  
 \* STOTAZ.....Efectos combinados (Piston + Alabeo +  
 \*                    Abalonamiento + Temperatura)..(centimetro)  
 \* DELTAZ.....Longitud minima de los sellos del empacador -  
 \*                    o movimiento neto.....(centimetro)  
 \* FCOL1.....Fuerza en el cabezal.....(tonelada)  
 \* S10Z.....Esfuerzo de flexion en el cabezal....(kg/cm<sup>2</sup>)  
 \* FA1Z(J).....Fuerza en el extremo de cada seccion .....  
 \*                    del pozo.....(tonelada)  
 \* S1J(J).....Esfuerzo de flexion en el extremo de cada .....  
 \*                    seccion del pozo.....(kg/cm<sup>2</sup>)  
 \* PIFIZ(J).....Presion en la t.p en el extremo de cada .....  
 \*                    seccion del pozo.....(kg/cm<sup>2</sup>)  
 \* POPIZ(J).....Presion de la t.r en el extremo de cada .....  
 \*                    seccion del pozo.....(kg/cm<sup>2</sup>)  
 \* FPZ.....Fuerza que impide el movimiento de la tuberia-  
 \*                    de produccion.....(tonelada)

\*\*\*\*\*

\*                    CHARACTER PRINT#40  
 \*                    COMMON /ELIZ/ / HSEC,PRINT,MAPY

\*  
 \* 50  
 \* 110

\* WRITE(\*,110)  
 \* FORMAT('#####  
 \*    ,,5X,' Universidad Nacional Autonoma de Mexico .',,,  
 \*    15X,' Facultad de Ingenieria .',,,10X,' Ingenieria Petrolera .'  
 \*    ,,35X,' Ano de 1988 .',,  
 \*    '#####',,,  
 \*    3X,' Este Programa Calcula los Movimientos y',,  
 \*    5X,' Esfuerzos internos debidos a Cambios de',,  
 \*    5X,' de Presion y Temperatura en Aparejos de',,  
 \*    5X,' Produccion Combinados .',,  
 \*    '#####',,,)

PAUSE 000

1.FOR

Wednesday, October 5, 1988

Page 3

```

10  WRITE(*,*) 'El pozo anclado que desea analizar es : '
    WRITE(*,*) ' Productor de Aceite _____ ? [ Teclaa ]'
    WRITE(*,*) ' a) -- 5 1 _____ [ 1 ]'
    WRITE(*,*) ' b) -- 0 _____ [ 2 ]'
    WRITE(*,*)
    WRITE(*,*) 'Recomendaciones de Secciones de Pozo'
    READ(*,*,ERR=10) INICIO
    IF((INICIO.LT.1).OR.(INICIO.GT.2)) GOTO 40
    IF(INICIO.EQ.2) THEN
        NSEC=100
    STOP
    ENDIF
20  FORMAT(//, 'Este Programa NO es aplicable para Pozos :', //,
* //, 'a) -- Productores de ACEITE Y GAS ', //,
* //, 'b) -- Productores de GAS ', //,
* //, 'Recomendaciones de Secciones de Pozo', //)
120  WRITE(*,120)
    FORMAT(
* //, 'Recomendaciones de Secciones de Pozo', //,
* //, 'El Programa Calcula de 1 hasta 5 Secciones de Pozo', //,
* //, 'Seleccione Diametros de :', //,
* //, 'Tuberias de Produccion : [ 1.050 hasta 4.5 "pulgada" ]',
* //, //, //,
* //, 'Tuberias de Revestimiento : [ 5.0 hasta 12.0 "pulgada" ]',
* //, //, //,
* //, 'Seleccione Profundidades de 2000 hasta 7000 "metro"',
* //, //, //,
* //, 'Recomendaciones de Secciones de Pozo', //)
    PAUSE 000

    WRITE(*,*)
    WRITE(*,*) 'Recomendaciones de Secciones de Pozo'
    WRITE(*,*) 'Recomendaciones de Secciones de Pozo'
    WRITE(*,*) 'Recomendaciones de Secciones de Pozo'
    WRITE(*,*)
20  WRITE(*,*) ' Nombre del Pozo _____ ? : '
    READ(*,13,ERR=20) PRINT
13  FORMAT( A40 )
15  WRITE(*,*) ' Numero de Secciones del Pozo [ Adimensional ] _ _ ? : '
    READ(*,*,ERR=15) NSEC
    IF((NSEC.LT.1).OR.(NSEC.GT.5)) GOTO 15
*
70  CALL JENY1
    PAUSE 000
*
*
10  WRITE(*,*)
    WRITE(*,*) '-----'
    WRITE(*,*) ' Que alternativa desea _ _ _ _ _ ? : [ Teclaa ]'
    WRITE(*,*)
    WRITE(*,*) ' a) -- Pozo Estimulado _____ [ 1 ]'
    WRITE(*,*) ' b) -- Pozo Productor Fluyendo _____ [ 2 ]'

```

1.FOR

Wednesday, October 5, 1988

Page 4

```

WRITE(*,*)' c).- Poco Productor Correda_____ [ 3 ]'
WRITE(*,*)'-----'
  READ(*,*,ERR=10) MARY
  IF((MARY.LT.1).OR.(MARY.GT.3)) GOTO 10

```

CALL JENY2

```

100 WRITE(*,*)'-----'
WRITE(*,*)'Desnas realizar otro calculo _ _ ? : [ Teclaa ]'
WRITE(*,*)'-----'
WRITE(*,*)'a).- Inicio del Procedimiento _____ [ 1 ]'
WRITE(*,*)'-----'
WRITE(*,*)'b).- Otra Alternativa _____ [ 2 ]'
WRITE(*,*)'-----'
WRITE(*,*)'c).- Cambio de Datos Generales _____ [ 3 ]'
WRITE(*,*)'-----'
WRITE(*,*)'d).- Fin del Procedimiento _____ [ 4 ]'
WRITE(*,*)'-----'
WRITE(*,*)'-----'

```

```

  READ(*,*,ERR=100) KAKIN
  IF((KAKIN.LT.1).OR.(KAKIN.GT.4)) GOTO 100
  IF((KAKIN.EQ.1). THEN

```

GOTO 30

ELSEIF(KAKIN.EQ.2) THEN

GOTO 10

ELSEIF(KAKIN.EQ.3) THEN

GOTO 70

ELSE

WRITE(\*,100)

ENDIF

200 FORMAT

```

* '#####' Fin del Procedimiento',//,
* SX,'de Calculo de Novedades',//,
* SX,'de Aparatos de Produccion',//,
* SX,' Combinados',//,
* '#####'
* ,//)

```

END

\*\*\*\*\*

```

*****
*** IDENTIFICACION DEL PROGRAMA ***
***
*** SUBROUTINA PARA INGRESAR LOS DATOS DEL CALCULO DE
*** MOVIMIENTOS EN APAREJOS DE PRODUCCION COMBINADOS ***
*** DEBIDOS A CAMBIOS POR PRESION Y TEMPERATURA. ***
*** METODO APLICADO DE ARTHUR LUBINZKI Y D.J HAMMERLAND ***
***
*****

```

```

SUBROUTINE JENY1
CHARACTER PRINT*40

```

```

DIMENSION SECC(6),DOT1(5),WS1(5),DICEX2(5),WTR2(5),WTR(5)

```

```

COMMON /ELIZA3/ DIE,PA1,DOMO,PSE1,PTA1,GRAD,TSA1,TA41,DENS,
GASTO2,NURSEC,RIP11,POFDE,PINY,GASTO,PWF,PWS,RIP1P,
POF2P,DOT(5),DIT(5),WS(5),DICEX(5),DIC(5),DBEC(5),
PFTP(5) /ELIZA4/NSEC,PRINT,MARY

```

```

*****
***** DATOS GENERALES DEL POZO *****
*****

```

```

245 WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'GEOMETRIA DE FLUJO DEL POZO : '
WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*)
DO 3 J=1,NSEC
WRITE(*,*) ' ' SECCION ' , J , ' '
WRITE(*,*)
410 WRITE(*,*) 'PROFUNDIDAD QUE ALCANZA LA t-p [ metro ] _ _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=410) PFTP(J)
IF (PFTP(J)-LE(0.0)-OR.(PFTP(J)-GT.7000.0)) GO TO 410
412 WRITE(*,*) 'DIAMETRO EXTERIOR DE LA t-p [ pulgada ] _ _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=412) DGT1(J)
IF (DGT1(J)-LT.1.050)-OR.(DGT1(J)-GT.4.5) GO TO 412
414 WRITE(*,*) 'PESO UNITARIO DE LA t-p [ libra / pie ] _ _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=414) WS1(J)
IF (WS1(J)-LT.1.14)-OR.(WS1(J)-GT.19.200) GO TO 414
416 WRITE(*,*) 'DIAMETRO EXTERIOR DE LA t-p [ pulgada ] _ _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=416) DICEX2(J)
IF (DICEX2(J)-LT.5.0)-OR.(DICEX2(J)-GT.16.0) GO TO 416
418 WRITE(*,*) 'PESO UNITARIO DE LA t-p [ libra / pie ] _ _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=418) WTR2(J)
IF (WTR2(J)-LT.11.500)-OR.(WTR2(J)-GT.109.0) GO TO 418
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) '-----'

```

```

CONTINUE

```

```

CALL DATA (NSEC,DOT1,WS1,DICEX2,WTR2,WS,DIT,DOT,DICEX,DIC,WTR)

```

```

DO 3 J=1,NSEC

```

```

      IF((WS(J)/WS1(J)).EQ.1.0).AND.((WTR(J)/WTR2(J)).EQ.1.0) THEN
          GOTO 3
      ELSE
          WRITE(*,340)
          GOTO 345
      ENDIF
300 CONTINUE
   300 FORMAT(////,
   * '#####',//,10X,
   * ' Error en Introduccion de Datos ',//,12X,
   * ' IDENTIFICA TUS DATOS DE : ',//,13X,
   * ' diametros y pesos de b.p y l.r ',//,
   * '#####',//)
   350 WRITE(*,*)'PROFUNDIDAD INTERIOR DEL POZO [ metro ]_ _ _ _ ? : '
      READ(*,*,ERR=356) PTA1
      IF((PTA1.LE.PTA1MIN).OR.(PTA1.GT.7500.0)) GOTO 356
   352 WRITE(*,*)'DIAMETRO INTERIOR DEL EMPACADOR [ pulgada ]_ _ _ ? : '
      READ(*,*,ERR=352) DIE
      IF((DIE.LE.0).OR.(DIE.GT.16.0)) GOTO 352
   354 WRITE(*,*)'-----'
      WRITE(*,*)'FLUIDO EN EL ESPACIO ANULAR_ _ _ _ ? : [ Teclaa ]'
      WRITE(*,*)'-----'
      WRITE(*,*)'a)- LLENO DE ACEITE (30 A.P.1)_____ [ 1 ]'
      WRITE(*,*)'b)- LLENO DE AGUA (1.0 g/cm3)_____ [ 0 ]'
      WRITE(*,*)'-----'
      READ(*,*,ERR=374) RAIN
      IF((RAIN.LT.0).OR.(RAIN.GT.1)) GOTO 374
   376 WRITE(*,*)'-----'
      WRITE(*,*)'TIPO DE APAREJO DE PRODUCCION _ _ _ ? : [ Teclaa ]'
      WRITE(*,*)'-----'
      WRITE(*,*)'a)- APAREJO CON RECEPTACULO PULIDO_____ [ 0 ]'
      WRITE(*,*)'b)- APAREJO ANCLADO_____ [ 1 ]'
      WRITE(*,*)'-----'
      READ(*,*,ERR=400) NOMO
      IF((NOMO.LE.0).OR.(NOMO.GT.1)) GOTO 400
   400 WRITE(*,*)'-----'
      WRITE(*,*)'CAPA APLICADA SOBRE EL EMPACADOR [ tonelada ]'
      WRITE(*,*)' [ (-)Peso o (-):Tension ]_ _ _ _ ? : '
      READ(*,*,ERR=420) PSE1
      IF((PSE1.LT.-20.0).OR.(PSE1.GT.40.0)) GOTO 420
      WRITE(*,*)'-----'
   450 WRITE(*,*)'GRADIENTE GEOTERMICO [ centigrado / metro ]_ _ ? : '
      READ(*,*,ERR=350) GRAD
      IF((GRAD.LE.0).OR.(GRAD.GT.0.10)) GOTO 350
   342 WRITE(*,*)'TEMPERATURA SUPERFICIAL [ centigrado ]_ _ _ _ ? : '
      READ(*,*,ERR=342) TSA1
      IF((TSA1.LT.-20.0).OR.(TSA1.GT.60.0)) GOTO 342
      WRITE(*,*)'-----'
      WRITE(*,*)' DATOS DE LA ESTIMULACION : '
      WRITE(*,*)'-----'
   344 WRITE(*,*)'TEMPERATURA DEL FLUIDO [ centigrado ]_ _ _ _ ? : '
      READ(*,*,ERR=344) TFA1
      IF((TFA1.LE.0).OR.(TFA1.GT.90)) GOTO 344
   370 WRITE(*,*)'GASO DE LA ESTIMULACION [ b.p.m ]_ _ _ _ ? : '
      READ(*,*,ERR=370) GASTO

```

2.FRM

Wednesday, October 5, 1968

Page

```

IF((GASTO2.LE.0).OR.(GASTO2.GT.10)) GOTO 370
355 WRITE(*,*)
-----
WRITE(*,*)'TIPO DE FLUIDO DE LA ESTIMULACION_ _ _ ? : [ Teclas ]'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'a).-- Agua : (1.0 g/cm3) _____ [ 1 ]'
WRITE(*,*)'b).-- Aceite : (0.9 g/cm3) _____ [ 2 ]'
WRITE(*,*)'c).-- Alcido : (1.15 g/cm3) _____ [ 3 ]'
WRITE(*,*)'d).-- Otro Fluido : ( ? ) _____ [ 4 ]'
WRITE(*,*)
-----
PEAD(*,*,ERR=359) NURSEC
IF((NURSEC.LT.1).OR.(NURSEC.GT.4)) GOTO 358
IF(NURSEC.EQ.4) THEN
424 WRITE(*,*)'DENSIDAD DEL FLUIDO [ g/cm3 ] _ _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=424) DENS
IF((DENS.LE.0.0).OR.(DENS.GT.3.0)) GOTO 424
ENDIF
408 WRITE(*,*)'PRESION DE INYECCION EN t.p y t.r [kg/cm2] _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=408) PIF1E,POF2E
IF((PIF1E.LE.0).OR.(PIF1E.GT.1060.0)) GOTO 408
IF((POF2E.LT.0).OR.(POF2E.GT.1060.0)) GOTO 408
360 WRITE(*,*)'PRESION INYECCION EN EL FONDO DEL POZO [kg/cm2] _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=360) PINY
IF((PINY.LE.PIF1E).OR.(PINY.GT.2000.0)) GOTO 360
WRITE(*,*)
-----
WRITE(*,*)
-----
WRITE(*,*)' DATOS DE PRODUCCION : '
WRITE(*,*)
-----
362 WRITE(*,*)' GASTO DE PRODUCCION [ b.p.d ] _ _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=362) GASTO
IF((GASTO.LE.0).OR.(GASTO.GT.3000.0)) GOTO 362
366 WRITE(*,*)' PRESION DE FONDO FLUYENDO [ kg / cm2 ] _ _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=366) PWF
IF((PWF.LE.0).OR.(PWF.GT.1000.0)) GOTO 366
368 WRITE(*,*)'PRESION DE FONDO ESTATICA [ kg / cm2 ] _ _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=368) PWS
IF((PWS.LE.PWF).OR.(PWS.GT.1000.0)) GOTO 368
372 WRITE(*,*)'PRESION DE PRODUCCION EN t.p y t.r [kg/cm2] _ _ ? : '
READ(*,*,ERR=372) PIF1P,POF2P
IF((PIF1P.LE.0).OR.(PIF1P.GT.1060.0)) GOTO 372
IF((POF2P.LT.0).OR.(POF2P.GT.1060.0)) GOTO 372
WRITE(*,*)'#####'
WRITE(*,*)' Fin de Introduccion de datos generales '
WRITE(*,*)'#####'
SECC(1)=0.0
DO 5 J=1,NPAC
SECC(J)=VAPETD(J)
USE(J)=SECC(J)+1) SECC(J)
5 CONTINUE
PAUSE
CALL JENYD (CON,DT1,US,DTCL),DIC,DIE,FAIN,ROFO,PSE1,PTA1,GRCL,
* TSA,FEA1,GASTO2,NURSEC,PIF1E,POF2E,PINY,GASTO,DENS
* PWF,PWS,PIF1P,POF2P,PRINT,SECC,NSCC,WTR,PATF)
RETURN

```



6. FOR

Wednesday, October 5, 1988

Page

```

SECL(J)=DSECL(J)*3.281
CIN(J)=0.0491*(DOT(J)**4-DIT(J)**4)
R2H(J)=((DIC(J)-DOT(J))*0.5)**2
R9(J)=DOT(J)/DIT(J)
DELDI(J)=DIF(J)-DIA(J)
DELDO(J)=DOF(J)-DOA(J)
WA(J)=WS(J)+0.433*(DIA(J)*AI(J)-DOA(J)*AO(J))
W(J)=WS(J)+0.433*(DIF(J)*AI(J)-DOF(J)*AO(J))

```

10 CONTINUE

```

-----
CALL PISTON (AD, AI, PIFI, AO, POFI, NSEC, SECL, DELPI, DELPO, AS, WS, FAI
, DELTA1, DELTA)

```

```

SUMA1=0.0
DO 10 J=1, NSEC
  SUMA1=DELTA1(J)+SUMA1
  DELTZ1(J)=DELTA1(J)*2.54
  SUMZ1=SUMA1*2.54

```

10 CONTINUE

```

-----
FFIC=AP*(PIFI/NSEC)-POFI(NSEC)
PUNTO(NSEC)=0.0

```

```

CALL HELIC (PUNTO, CIN, R2H, W, FFIC, NSEC, SECL, FORC, DELTA2, B1, PITCH)

```

```

SUMA2=0.0
DO 13 J=1, NSEC
  SUMA2=DELTA2(J)+SUMA2
  DELTZ2(J)=DELTA2(J)*2.54
  PITCH(J)=PFTP(NSEC)-PITCH(J)*0.3048
  SUMZ2=SUMA2*2.54

```

13 CONTINUE

```

-----
CALL ADALOW (MAY, SECL, DELDI, DELDO, R9, DELPI, DELPO, PIFI, PTA1,
, POF2E, PIFI, P, POF2P, PWS, NSEC, DELTA3)

```

```

SUMA3=0.0
DO 15 J=1, NSEC
  SUMA3=DELTA3(J)+SUMA3
  DELTZ3(J)=DELTA3(J)*2.54
  SUMZ3=SUMA3*2.54

```

15 CONTINUE

```

-----
CALL TEMPER (MAY, NSEC, SECL, TA, TF, DELTA4)

```

```

SUMA4=0.0
DO 17 J=1, NSEC
  SUMA4=DELTA4(J)+SUMA4
  DELTZ4(J)=DELTA4(J)*2.54
  SUMZ4=SUMA4*2.54

```

17 CONTINUE

```

-----
STOTAL=SUMA1+SUMA2+SUMA3+SUMA4
STOTA7=STOTAL*2.54

```

```

FP=0.0
  FEMP=PSE
  IF((FEMP.GT.0.0).OR.(FEMP.LT.0.0)) THEN
    CALL FEMPAC (STOTAZ,FEMP,SECL,AS,NSEC,WA,R2H,CIN,DELTAZ)
  ELSE
    DELTAZ=STOTAZ
  ENDIF
  IF(NOMO.EQ.1) THEN
    CALL FEMPC (NSEC,FA1,SECL,AS,DELTAZ,DELTA,FPZ)
*
*   CALL FLMP01 (DELTAZ,PUNTO,NSEC,DELTA,CAI,STOTAL,CIN,R2H,W,
*     SECL,FORT,FP,FPZ)
*
  ENDIF
  DO 27 J=1,NSEC
    FA1(J)=FP+FA1(J)
    FOPC(J)=FP+FOPC(J)
    FA1Z(J)=FA1(J)*4.545E-4
27  CONTINUE
    FCOLG=FA1(1)-SECL(1)*WS(1)
    FCOL=FP+FCOLG
    FCOL1=FCOL*4.545E-4
*-----
  CALL ESFUER (PIF1,POF1,NSEC,R9,FA1,AS,FOPC,DOT,DIC,CIN,MARY,PWS
*   ,PTA1,PIF1E,POF2E,PIF1P,POF2P,FCOL,S1Z,S11Z,S1OZ)
*-----
  PAUSE
  CALL JENY5 (TF,DELTAZ1,DELTAZ2,DELTAZ3,DELTAZ4,SUMZ1,SUMZ2,SUMZ3,
* SUMZ4,STOTAZ,FCOL1,S1OZ,PIF1E,DELTAZ,POF2E,FA1Z,S1Z,PIF1Z,
* POF1Z,FPZ,NSEC,D1A,D0A,D0F,D1F,PIF1P,POF2P,MARY,PITCH,TFC2,
* FEMP,NOMO,PTA1,PWS)
  RETURN
  END
*
* ##### FIN DEL PROCESAMIENTO #####
* #####

```

## CAPITULO V

## Ejemplos numéricos .

Los ejemplos numéricos presentados en este capítulo, se obtuvieron de los artículos publicados por A. Romero Juarez<sup>8</sup> y A. Lubinski<sup>5</sup>.

En el ejemplo numérico # 1 del artículo publicado por A. Romero Juarez, se obtuvieron los datos del ejemplo de aplicación para la determinación de la temperatura en el extremo del pozo y del efecto del cambio de longitud en la tubería de producción, cuando el pozo es sometido a una estimulación .

Los datos del ejemplo de aplicación son los siguientes :

Profundidad = 14000 pie = 4267 m  
 Diametro exterior de la t.p = 4.5 pg  
 Diametro exterior de la t.r = 7.625 pg  
 Tiempo de inyección = 1 hora  
 Gasto de inyección = 10 b.p.m  
 Espacio anular lleno de agua  
 Temperatura del fluido en superficie = 70 °F = 21 °C  
 Temperatura superficial = 70 °F = 21 °C  
 Gradiente geotérmico = 0.019 °F /pie = 0.0347 °C /m

Los datos posteriores son aproximados a las características del pozo .

Los resultados son los siguientes :

Temperatura en el extremo del pozo =  $96^{\circ}\text{F} = 36^{\circ}\text{C}$

Cambio de longitud = - 11.2 pie = - 342 cm

En el ejemplo numérico # 2, del artículo publicado por -  
A. Lubinski, se obtuvieron los datos del ejemplo de aplicación  
para la determinación de los movimientos en el aparato de  
producción por cambios de presión y temperatura, cuando el -  
pozo es sometido a una estimulación .

Los datos del ejemplo de aplicación son los siguientes :

Profundidad = 10000 pie = 3048 m

Diametro exterior de t.p = 2.875 pg

Diametro exterior de t.r = 7.0 pg

Espacio anular lleno de aceite

Densidad del fluido estimulante = 15 lb/gal =  $1.8 \text{ g./cm}^3$

Presión superficial en t.p =  $5000 \text{ lb/pg}^2 = 352 \text{ kg/cm}^2$

Presión superficial en t.r =  $1000 \text{ lb/pg}^2 = 70 \text{ kg/cm}^2$

Aparato de producción con receptáculo pulido

Peso sobre el empacador = 20000 lb = 9.1 tonelada

Gasto de inyección = 1 b.p.m

Temperatura superficial del fluido =  $50^{\circ}\text{C}$

Temperatura superficial =  $19.4^{\circ}\text{C}$

Gradiente geotermico =  $0.030^{\circ}\text{C} / \text{m}$

Los datos posteriores son aproximados a las caracteris-  
ticas del pozo .

Los resultados son los siguientes :



Nombre del Pozo : EJEMPLO NUMERICO # 1

Profundidad Interior del Pozo = 4271. metro  
Profundidad del Empacador = 4267. metro  
Diámetro Interior del Empacador = 5.000 pulgada

Gradiente Geotermico = .035 centigrado/metro

Temperatura Superficial = 21. centigrado

Carga en el Empacador = .0 tonelada

" (-): Tension sobre el Empacador "  
" (+): Peso sobre el Empacador "

tubería con empacador sellado

Espacio Anular lleno de Agua

000

Please press <return> to continue.

---

D A T O S D E L A E S T I M U L A C I O N :

Gasto de Inyeccion = 10. b.p.m

Temperatura del fluido Superficial = 21. centigrado

Presion de Inyeccion en el Fondo del Pozo = 480. kg/cm<sup>2</sup>

Presion Hidrostatica de Inyeccion en la Superficie = 100. kg/cm<sup>2</sup>

Tipo de Fluido en la Estimulación : A C E I T E  
000

Please press <return> to continue.

D A T O S   D E   P R O D U C C I O N   :

Presion de Fondo Fluyendo = 400. kg/cm<sup>2</sup>

Presion Estatica de Fondo = 405. kg/cm<sup>2</sup>

Gasto de Produccion = 2000. b.p.d

Presion Superficial de Produccion en la t.p = 10. kg/cm<sup>2</sup>

Presion Superficial en la t.r = 0. kg/cm<sup>2</sup>

000

Please press <return> to continue.

Seccion -- 1 de -- 0 -- # a # 4267: Metro

Longitud de la Seccion = 4267. metro

\_\_\_ T U B E R I A   D E   P R O D U C C I O N   \_\_\_

S E C C I O N   1

Diametro Exterior = 4.500 pulgada

Diametro Interior = 3.950 pulgada

Peso Unitario = 12.600 libra / pie

000  
Please press <return> to continue.

\_\_\_ T U B E R I A   D E   R E V E S T I M I E N T O   \_\_\_

S E C C I O N   1

Diametro Exterior = 7.625 pulgada

Diametro Interior = 6.625 pulgada

Peso Unitario = 39.000 libra / pie

Please press <return> to continue.

R e s u l t a d o s

POZO EN TRATAMIENTO DE ESTIMULACION

===== D E N S I D A D E S =====

S E C C I O N 1

	Inicial	Final	
Fluido en la t.p. =	1.00	.90	g /cm <sup>3</sup>
Fluido en la t.r =	1.00	1.00	g /cm <sup>3</sup>

000

Please press <return> to continue.

Seccion	Punto Neutral a: [metro]	Temperatura en el Extremo del Pozo [centigrado]
1	3835.	36.4

E F E C T O S P O R P R E S I O N Y  
T E M P E R A T U R A E N E L  
A P A R E J O D E P R O D U C C I O N

## Cambios de longitud en la " T.P " ... [Centimetro].

(-): Representa Acortamiento.

(+) : Representa Elongacion.

Seccion	Efecto piston. [cm]	Efecto alabro. [cm]	Efecto abalonzamiento. [cm]	Efecto temperatura. [cm]
1	-22.	0.	-33.	-341.
Total	-22.	0.	-33.	-341.

Cambio de Longitud Total en el  
Aparejo de Produccion ..... -396. centimetro

Longitud Minima de los Sellos  
del Empacador o Movimiento Neto ..... 396. centimetro

000

Please press &lt;return&gt; to continue.

Fuerza Real y Esfuerzo por Presion  
Interna en la " T.P " .

(-): Representa Fuerza de Tension .

(+) : Representa Fuerza de Compresion .

	Fuerza en la t.p. [tonelada]	Esfuerzo en la t.p. [kg/cm <sup>2</sup> ]	Presiones. [kg/cm <sup>2</sup> ] [t.p].	[t.r].
Cabezal	-67.7	2679.	100.	0.
Extremo Seccion				
1	12.4	591.	480.	426.

#####

-----  
 Deseas realizar otro calculo \_ \_ \_ ? : [ Teclas ]

a).- Inicio del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 1 ]

b).- Otra Alternativa \_\_\_\_\_ [ 2 ]

c).- Codigo de Datos Generales \_\_\_\_\_ [ 3 ]

d).- Fin del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 4 ]

-----  
 2

Que alternativa deseas \_ \_ \_ \_ \_ ? : [ Teclas ]

a).- Pozo Estimulado \_\_\_\_\_ [ 1 ]

b).- Pozo Productor Fluyendo \_\_\_\_\_ [ 2 ]

c).- Pozo Productor Cerrado \_\_\_\_\_ [ 3 ]

-----  
 2

Pause.

Please press <return> to continue.

-----

## R e s u l t a d o s

-----

-----

POZO PRODUCTOR DE ACEITE " FLUYENTE "

-----

===== D E N S I D A D E S =====

### S E C C I O N 1

	Inicial	Final	
Fluido en la t.p =	.90	.90	g /cm <sup>3</sup>
Fluido en la t.r =	1.00	1.00	g /cm <sup>3</sup>

Please press <return> to continue.

#####

Seccion	Punto Neutral a: [metro]	Temperatura en el Extremo del Puro [centigrado]
---------	-----------------------------	--

1	4267.	26.8
---	-------	------

#####

E F E C T O S   P O R   P R E S I O N   Y  
T E M P E R A T U R A   E N   E L  
A . P A R E J O   D E   P R O D U C C I O N

#####

000

Please press <return> to continue.

Cambios de longitud en la " T.P. "...[Centimetro].

(-):Representa Acortamiento .  
(+):Representa Elongacion .

Seccion	Efecto piston. [cm]	Efecto alabeo. [cm]	Efecto abalonamiento. [cm]	Efecto temperatura. [cm]
1	-7.	0.	-4.	169.
Total	-7.	0.	-4.	169.

Cambio de Longitud Total en el  
Aparejo de Produccion ..... 158. centimetro

Longitud Minima de los Sellos  
del Empeador o Movimiento Neto..... 158. centimetro

#####

Please press <return> to continue.

Fuerza Real y Esfuerzo por Fricción  
Interna en la "C.P."

(-): Representa Fuerza de Tension.  
(+): Representa Fuerza de Compresion.

	Fuerza en la t.p. [tonelada]	Esfuerzo en la t.p. [kg/cm <sup>2</sup> ]	Presiones. [t.p].	[t.r].
Cabeza:	-71.5	3039.	10.	0.
Extremo Seccion				
1	8.7	251.	400.	426.

#####

000

Please press <return> to continue.

-----  
Deseas realizar otro calculo\_ \_ \_ ? : [ Teclia ]

a).- Inicio del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 1 ]  
-----  
b).- Otro Alternativa \_\_\_\_\_ [ 2 ]  
-----  
c).- Cambio de Datos Generales \_\_\_\_\_ [ 3 ]  
-----  
d).- fin del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 4 ]  
-----

2

-----  
Que alternativa deseas \_ \_ \_ \_ ? : [ Teclia ]

a).- Pozo Estimulado \_\_\_\_\_ [ 1 ]  
b).- Pozo Productor Fluyendo \_\_\_\_\_ [ 2 ]  
c).- Pozo Productor Cerrado \_\_\_\_\_ [ 3 ]  
-----

3  
Pause.  
Please press <return> to continue.

R e s u l t a d o s

POZO PRODUCTOR DE ACEITE " CERRADO "

===== D E N S I D A D E S =====

S E C C I O N 1

Inicial Final

Fluido en la t.p = .90 .90 g /cm<sup>3</sup>

Fluido en la t.r = 1.00 1.00 g /cm<sup>3</sup>

000  
Please press <return> to continue.

Seccion	Punto Neutral [metro]	Temperatura Media del Pozo [centigrado]
1	4267.	94.2

EFECTOS POR PRESION Y  
TEMPERATURA EN EL  
APAREJO DE PRODUCCION

Please press <return> to continue.

Cambios de longitud en la " T.P " .-. [Centimetro].-

(-): Representa Acortamiento .

(+): Representa Elongación .

Seccion	Efecto piston. [cm]	Efecto alabeo. [cm]	Efecto abalonamiento. [cm]	Efecto temperatura. [cm]
1	-5.	0.	-5.	-169.
Total	-5.	0.	-5.	-169.

Cambio de Longitud Total en el  
Aparejo de Produccion ..... -178. centimetro

Longitud Minima de los Sellos  
del Empacador o Movimiento Neto..... 178. centimetro

#####

000

Please press <return> to continue.

Fuerza Real y Esfuerzo por Presion  
Interna en Pa " T.P " .

(-): Representa Fuerza de Tension .

(+): Representa Fuerza de Compresion .

	Fuerza en la t.p. [tonelada]	Esfuerzo en la t.p. [kg/cm <sup>2</sup> ]	Presiones. [kg/cm <sup>2</sup> ]	
			[t.p].	[t.r].
Cabezal	-71.3	2995.	21.	0.
Extremo Seccion				
1	8.9	204.	405.	426.

000

Please press &lt;return&gt; to continue.

Deseas realizar otro calculo \_ \_ ? : [ Teclas ]

- a).- Inicio del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 1 ]
- b).- Otra Alternativa \_\_\_\_\_ [ 2 ]
- c).- Cambio de Datos Generales \_\_\_\_\_ [ 3 ]
- d).- Fin del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 4 ]

4

```
#####
```

Fin del Procedimiento  
de Calculo de Movimientos  
en Aparejos de Producción  
Combinados

```
#####
```

Nombre del Pozo : EJEMPLO NUMERICO # 2

D A T O S

Profundidad Interior del Pozo = 3048. metro

Profundidad del Empacador = 3048. metro

Diámetro Interior del Empacador = 3.250 pulgada

Gradiente Geotermico = .030 centigrado/metro

Temperatura Superficial = 19. centigrado

Carga en el Empacador = 9.1 tonelada

" (-):Tension sobre el Empacador "

" (+):Peso sobre el Empacador "

Tronera con Receptaculo Pulido

Espacio Anular lleno de Aceite

000

Please press <return> to continue.

D A T O S D E L A E S T I M U L A C I O N :

Costo de Inyeccion = 1. b.p.m

Temperatura del Fluido Superficial = 50. centigrado

Presion de Inyeccion en el Fondo del Pozo = 899. kg/cm<sup>2</sup>

Presion Superficial de Inyeccion en la t.p = 352. kg/cm<sup>2</sup>

Presion Superficial en la b.p = 70. kg/cm<sup>2</sup>

Densidad del Fluido en la Estimulacion = 1.80 g / cm<sup>3</sup>

000

Please press <return> to continue.

D A T O S D E P R O D U C C I O N :

Presion de Fondo Fluyendo = 283. kg/cm<sup>2</sup>

Presion Estatica de Fondo = 290. kg/cm<sup>2</sup>

Costo de Produccion = 1000. b.p.d

Presion Superficial de Produccion en la t.p = 7. kg/cm<sup>2</sup>

Presion Superficial en la t.r = 0. kg/cm<sup>2</sup>

000

Please press <return> to continue.

Seccion 1 de 0. # a # 3048. Metro

Longitud de la Seccion = 3048. metro

\_\_\_\_\_ T U B E R I A D E P R O D U C C I O N \_\_\_\_\_

S E C C I O N 1

Diámetro Exterior = 2.875 pulgada

Diámetro Interior = 2.441 pulgada

Peso Unitario = 6.500 libra / pie

000

Please press <return> to continue.

\_\_\_\_\_ T U B E R I A D E R E V E S T I M I E N T O \_\_\_\_\_

S E C C I O N 1

Diámetro Exterior = 7.000 pulgada

Diámetro Interior = 6.094 pulgada

Peso Unitario = 32.000 libra / pie

Please press <return> to continue.

```
#####
# FIN DE DATOS #
# GENERALES DEL POZO #
#####
```

000

Please press <return> to continue.

-----  
 Que alternativa deseas \_ \_ \_ \_ \_ ? : [ Teclaa ]  
 -----

a).- Pozo Estimulado \_\_\_\_\_ [ 1 ]  
 b).- Pozo Productor Fluyendo \_\_\_\_\_ [ 2 ]  
 c).- Pozo Productor Cerrado \_\_\_\_\_ [ 3 ]  
 -----

1

Pause.

Please press <return> to continue.

```
#####
# R e s u l t a d o s #
#####
```

```
#####
# POZO EN TRATAMIENTO DE ESTIMULACION #
#####
```

===== DENSIDADES =====

SECCION 1

	Inicial	Final	
Fluido en la t.p =	.88	1.80	g /cm <sup>3</sup>
Fluido en la t.r =	.88	.88	g /cm <sup>3</sup>

000

Please press <return> to continue.

#####

Seccion	Punto Neutral a: [metro]	Temperatura en el Extremo del Pozo [centigrado]
1	420.	57.3

#####

E F E C T O S   P O R   P R E S I O N   Y  
T E M P E R A T U R A   E N   E L  
A P A R E J O   D E   P R O D U C C I O N

#####

000

Please press <return> to continue.

Cambios de longitud en la " T.P. "...[Centimetro].

(-):Representa Acortamiento .  
(+):Representa Elongacion .

Seccion	Efecto piston. [cm]	Efecto alabeo. [cm]	Efecto abalonamiento. [cm]	Efecto temperatura. [cm]
1	-172.	-117.	+88.	-42.
Total	-172.	-117.	-88.	-42.

Cambio de longitud Total en el  
Aparejo de Produccion ..... -419. centimetro

Longitud Minima de los Sellos  
del Separador o Movimiento Neto..... 292. centimetro

#####

Please press <return> to continue.

Fuerza Real y Esfuerzo por Presion  
Internas en la " T.P. " .

- (-): Representa Fuerza de Tension .  
(+): Representa Fuerza de Compresion .

	Fuerza en la t.p.	Esfuerzo en la t.p.	Presiones.	
	[tonelada]	[kg/cm <sup>2</sup> ]	[t.p.]	[t.r.]
Cabezal	-12.5	1793.	352.	70.
Extremo Seccion				
1	17.1	6425.	899.	338.

000

Please press <return> to continue.

Deseas realizar otro calculo \_ \_ \_ ? : [ Teclia ]

- a).- Inicio del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 1 ]  
 =====  
 b).- Otra Alternativa \_\_\_\_\_ [ 2 ]  
 =====  
 c).- Cambio de Datos Generales \_\_\_\_\_ [ 3 ]  
 =====  
 d).- Fin del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 4 ]  
 =====

2

-----  
 Que alternativa deseas \_ \_ \_ \_ \_ ? : [ Teclia ]  
 -----

- a).- Pozo Estimulado \_\_\_\_\_ [ 1 ]  
 b).- Pozo Productor Fluyendo \_\_\_\_\_ [ 2 ]  
 c).- Pozo Productor Cerrado \_\_\_\_\_ [ 3 ]  
 -----

2  
 Pause.  
 Please press <return> to continue.

R e s u l t a d o s

POZO "PRODUCTOR DE ACEITE " FLUYENTE "

D E N S I D A D E S

S E C C I O N 1

	Inicial	Final	
Fluido en la t.p =	1.80	.90	g /cm <sup>3</sup>
Fluido en la t.r =	.88	.88	g /cm <sup>3</sup>

000  
 Please press <return> to continue.

Seccion	Punto Neutral a: [metro]	Temperatura en el Extremo del Pozo [centigrado]
1	2956.	93.7

E F E C T O S P O R P R E S I O N Y  
 T E M P E R A T U R A E N E L  
 A P A R E J O D E P R O D U C T I O N

Please press <return> to continue.

Cambios de longitud en la " T.P " ...[Centimetro].

(-) Representa Acortamiento .  
(+) Representa Elongacion .

Seccion	Efecto piston. [cm]	Efecto alabeo. [cm]	Efecto abalanzamiento. [cm]	Efecto temperatura. [cm]
1	76.	0.	29.	136.
Total	76.	0.	29.	136.

Cambio de Longitud Total en el  
Aparato de Produccion ..... 242. centimetro

Longitud Minima de los Sellos  
del Empacador o Movimiento Neto..... 365. centimetro

000  
Please press <return> to continue.

Fuerza Real y Esfuerzo por Presion  
Interna en la " T.P " .

(-) : Representa Fuerza de Tension .  
(+) : Representa Fuerza de Compresion .

	Fuerza en la t.p. [tonelada]	Esfuerzo en la t.p. [kg/cm <sup>2</sup> ]	Presiones. [kg/cm <sup>2</sup> ] [t.p].	[t.r].
Caberal	-26.1	2206.	7.	0.
Extremo Seccion				
1	3.5	172.	283.	268.

000

Please press &lt;return&gt; to continue.

-----  
 Deseas realizar otro calculo\_ \_ \_ ? : [ Teclas ]

- a).- Inicio del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 1 ] ]  
 b).- Otra Alternativa \_\_\_\_\_ [ 2 ] ]  
 c).- Cambio de Datos Generales \_\_\_\_\_ [ 3 ] ]  
 d).- Fin del Procedimiento \_\_\_\_\_ [ 4 ] ]

2

-----  
 Que alternativa deseas \_ \_ \_ \_ \_ ? : [ Teclas ]

- a).- Pozo Estimado \_\_\_\_\_ [ 1 ] ]  
 b).- Pozo Productor Fluyendo \_\_\_\_\_ [ 2 ] ]  
 c).- Pozo Productor Cerrado \_\_\_\_\_ [ 3 ] ]

3

Pause.

Please press &lt;return&gt; to continue.

#####  
 R e s u l t a d o s  
 #####

#####  
 POZO PRODUCTOR DE ACEITE " CERRADO "  
 #####

===== D E N S I D A D E S =====

S E C C I O N 1

	Initial	Final	
Fluido en la t.p =	.90	.90	g /cm <sup>3</sup>
Fluido en la t.r =	.88	.88	g /cm <sup>3</sup>

=====

Please press <return> to continue.

#####

Seccion	Punto Neutra [metro]	Temperatura Media del Pozo [centigrado]
---------	-------------------------	--

1	2913.	64.5
---	-------	------

#####

E F E C T O S   P O R   P R E S I O N   Y  
T E M P E R A T U R A   E N   E L  
A P A R E J O   D E   P R O D U C C I O N

#####

000

Please press <return> to continue.

Cambios de longitud en la " T.P " ... [Centimetro].

(-): Representa Acortamiento .

(+): Representa Elongacion .

Seccion	Efecto piston. [cm]	Efecto alabeo. [cm]	Efecto abalombamiento. [cm]	Efecto temperatura. [cm]
1	-3.	0.	-2.	-136.
Total	-3.	0.	-2.	-136.

Cambio de Longitud Total en el  
Aparejo de Produccion ..... -141. centimetro

Longitud Minima de los Sellos  
del Empacador o Movimiento Neto ..... 15. centimetro

#####

000

Please press <return> to continue.

Fuerza Real y Esfuerzo por Presion  
Interna en la "T.P."

(-): Representa Fuerza de Tension.  
(+): Representa Fuerza de Compresion.

	Fuerza en la t.p. [tonelada]	Esfuerzo en la t.p. [kg/cm <sup>2</sup> ]	Presiones. [t.p.]	[t.r.]
Cabezal	-25.9	2171.	16.	0.
Extremo Seccion				
1	3.7	252.	290.	268.

000  
Please press <return> to continue.

Deseas realizar otro calculo\_ \_ ? : [ Teclaa ]

- a).- Inicio del Procedimiento [ 1 ]
- b).- Otra Alternativa [ 2 ]
- c).- Cambio de Datos Generales [ 3 ]
- d).- fin del Procedimiento [ d ]

4

Fin del Procedimiento  
de Calculo de Movimientos  
en Aparejos de Produccion  
Combinados

## CONCLUSIONES

A continuación se mencionán de manera breve algunas conclusiones :

- 1.- Cuando la tubería de producción se desconecta del empacador a causa de un acortamiento nó previsto, se comunica el espacio anular con la tubería de producción - causando fuertes problemas en el pozo .
- 2.- La deformación permanente que se produce cuando se sobrepasa el mínimo esfuerzo al punto de cedencia en la tubería de producción, sometida a esfuerzos inducidos en operaciones de reparación ó cuando está produciendo el pozo, impedirán el paso de las herramientas y - dificultara el flujo en operaciones posteriores .
- 3.- El deslizamiento del empacador con la tubería de producción, cuando el peso que actua en el empacador sobrepasa los limites de carga, al cual está diseñado - este, produce severos daños a la tubería de revestimiento y al empacador mismo .
- 4.- La determinación de los cambios de longitud por efectos de presión y temperatura, así como la fuerza real y - el esfuerzo por presión interna, define el comportamiento mecánico del aparato de producción . Esto debe ser la base del diseño de ésta importantísima parte - del pozo .

- 5.- El programa de cómputo desarrollado en este trabajo nos auxiliara para la obtención de los cambios de longitud y esfuerzos internos en la tubería de producción debidos a cambios por presión y temperatura .
  
- 6.- El procedimiento de cálculo desarrollado en este trabajo ,solo es aplicable para pozos anclados productores de aceite (fluyentes y cerrados) y puede ser utilizado - para predecir el comportamiento mecánico del aparejo - de producción del pozo .

## N O M E N C L A T U R A .

- A : Función definida por la ecuación (B).
- $A_o$  : Área exterior de la tubería de producción (  $pg^2$  ).
- $A_i$  : Área interior de la tubería de producción (  $pg^2$  ).
- $A_p$  : Área interior del empacador (  $pg^2$  ).
- $A_s$  : Área de la sección transversal de la tubería de producción (  $pg^2$  ).
- B : Función definida por la ecuación (H).
- $C_f$  : Calor específico del fluido ( BTU /  $lb_m$  - $^{\circ}F$  ).
- DE : Diametro exterior de la tubería de producción (  $pg$  ).
- DI : Diametro interior de la tubería de producción (  $pg$  ).
- DTR : Diametro interior de la tubería de revestimiento (  $pg$  ).
- DTRE : Diametro exterior de la tubería de revestimiento (  $pg$  ).
- E : Módulo de Young ( Para el acero:  $E = 30 \times 10^6$  lb/ $pg^2$  ).
- F : Fuerza ó peso sobre el empacador ( lb ), (negativa si es tensión, positiva si es compresión).
- $F_a$  : Fuerza real en el extremo inferior de la tubería de producción, cuando hay movimiento de tubería ( lb ).
- $F_f$  : Fuerza ficticia cuando existe movimiento de la tubería - de producción ( lb ).
- $F_p$  : Fuerza empacador - tubería de producción ( lb ).
- $F_t$  : Fuerza de la tubería de producción en el **cabezal** ( lb ).
- $F_a^*$  : Fuerza real de la tubería de producción sujeta al empacador, debido a las presiones y restricciones del empacador. ( lb ).
- $F_f^*$  : Fuerza ficticia con restricción del empacador ( lb ).
- $\Delta F$  : Cambio de la fuerza real debido a los cambios de presión en el empacador ( lb ).

- FF : Factor definido por la ecuación ( I ).
- f(t): Función del tiempo de la conducción del calor.
- $\epsilon_a$  : Gradiente, estático ( °F / pie ).
- h : Coeficiente de transferencia de calor de la película interior ( BTU / dia - pie<sup>2</sup> - °F ).
- I : Momento de inercia de la sección transversal de la tubería de producción ( pg<sup>4</sup> ).
- $K_{han}$  : Conductividad térmica en el espacio anular (BTU/dia-pie-°F).
- $K_{he}$  : Conductividad térmica de la tierra ( BTU / dia-pie-°F ).
- $K_{hs}$  : Conductividad térmica del acero ( BTU / dia-pie-°F ).
- L : Longitud de la tubería de producción,  $L_1$  = longitud de la sección 1,  $L_2$  = longitud de la sección 2, etc ( pg ).
- $\Delta L$  : Cambio de longitud en la tubería de producción ( acortamiento ó elongación ) ( pg ).
- $\Delta L_t$  : Cambio total de la longitud de la tubería de producción, debido a cambios de presión, temperatura y densidad de los fluidos ( pg ).
- $\Delta L_1$  : Cambio de longitud de la tubería de producción por efecto de pistón ( pg ).
- $\Delta L_2$  : Cambio de longitud de la tubería de producción por efecto de pandeo helicoidal ( pg ).
- $\Delta L_3$  : Cambio de longitud de la tubería de producción por efecto de abalanzamiento ( pg ).
- $\Delta L_4$  : Cambio de longitud de la tubería de producción por efecto de temperatura ( pg ).
- $\Delta L_5$  : Cambio de longitud de la tubería de producción debido a la aplicación de la fuerza mecánica ( pg ).

- $\Delta L_6$  : Cambio de longitud de la tubería de producción debido al peso aplicado sobre el empacador y a los efectos combinados (  $pg$  ).
- $\Delta L_2'$  : Cambio de longitud debido al pandeo helicoidal cuando el punto neutro es mayor a la longitud de la tubería de producción (  $pg$  ).
- $\Delta L_f^*$  : Cambio de longitud debido a la fuerza aplicada en el empacador con la tubería de producción parcialmente pandeada (  $pg$  ).
- $\Delta L_f^{**}$  : Cambio de longitud debido a la fuerza aplicada en el empacador con la tubería de producción totalmente pandeada (  $pg$  ).
- $\Delta L_{f^{**}}$  : Cambio de longitud total de la tubería de producción considerando la carga sobre el empacador y la fuerza ficticia (  $pg$  ).
- $\Delta L_p$  : Longitud de la tubería de producción que hay que suponer, para que la tubería de producción quede sujeta al empacador (  $pg$  ).
- $N$  : Masa asociada a un barril de aceite (  $W_m / W_o$  o c.c. ).
- $N$  : Distancia desde el empacador al punto neutro (  $pg$  ).
- $P_i$  : Presión interior en la tubería de producción al nivel del empacador (  $lb / pg^2$  ).
- $P_{is}$  : Presión superficial en la tubería de producción (  $lb/pg^2$  ).
- $P_o$  : Presión en el espacio anular al nivel del empacador (  $lb / pg^2$  ).
- $P_{os}$  : Presión superficial en el espacio anular (  $lb / pg^2$  ).
- $\Delta P_i$  : Cambio de presión dentro de la tubería de producción al nivel del empacador (  $lb / pg^2$  ).

- $\Delta P_o$  : Cambio de presión en el espacio anular al nivel del em  
pensor ( lb /  $pg^2$  ).
- $\Delta P_{is}$  : Cambio de presión en la superficie de la tubería de —  
producción ( lb /  $pg^2$  ).
- $\Delta P_{os}$  : Cambio de presión en la superficie del espacio anular  
( lb /  $pg^2$  ).
- $q_{iny}$  : Gasto de inyección ( b.p.d ).
- $q_o$  : Gasto de aceite ( b.p.d ).
- $r$  : Diferencia radial de la tubería de revestimiento a la  
tubería de producción (pg).
- $r_{ti}$  : Radio interior de la tubería de producción (pie).
- $R$  : Relación de diámetros de la tubería de producción —  
( adimensional ).
- RGA : Relación gas-aceite ( pie<sup>3</sup> / bl ).
- $S$  : Mínimo esfuerzo a la deformación de la tubería de pro-  
ducción ( lb /  $pg^2$  ).
- $S_i$  : Esfuerzo combinado en la pared interior de la tubería  
de producción ( lb /  $pg^2$  ).
- $S_n$  : Esfuerzo normal axial ( lb /  $pg^2$  ).
- $S_b$  : Esfuerzo por doblamiento de la pared exterior de la tu-  
bería de producción ( lb /  $pg^2$  ).
- $t$  : Tiempo (días).
- $T_{bh}$  : Temperatura en el fondo del pozo ( °F ).
- $T_{es}$  : Temperatura del terreno en la superficie ( °F ).
- $T_{fs}$  : Temperatura del fluido en la superficie ( °F ).
- $\Delta T$  : Cambio promedio de la temperatura en la tubería de pro-  
ducción ( °F ).

- $U$  : Coeficiente de transferencia de calor total ( BTU /  
 dia-pie<sup>2</sup> - °F ).
- $W_i$  : Peso unitario de la tubería de producción, sumergida en  
 liquido a condiciones iniciales de flujo ( lb / PG ).
- $W_f$  : Peso unitario de la tubería de producción, sumergida en  
 liquido a condiciones finales de flujo ( lb / PG ).
- $W_a$  : Peso unitario de la tubería de producción en el aire --  
 ( lb / PG ).
- $W_m$  : Gasto masico ( lb<sub>m</sub> / dia ).
- $X_{an}$  : Amplitud del espacio anular ( pie ).
- $X_c$  : Espesor de la tubería de revestimiento ( pie ).
- $X_t$  : Espesor de la tubería de producción ( pie ).
- $\rho_f$  : Densidad del fluido ( lb<sub>m</sub> / bl ).
- $\gamma_{ro}$  : Densidad relativa del aceite producido ( agua = 1 ).
- $\gamma_g$  : Densidad relativa del gas ( aire = 1 ).
- $\beta$  : Coeficiente de expansión térmica de la tubería de pro-  
 ducción ( para el acero: =  $6.9 \times 10^{-6}$  / °F ).
- $\delta$  : Caída de presión en la tubería de producción, debido al  
 flujo por unidad de longitud ( lb / PG<sup>2</sup> / PG ).
- $\rho_i$  : Densidad del fluido dentro de tubería de producción --  
 ( lb / PG<sup>3</sup> ).
- $\rho_o$  : Densidad del fluido en el espacio anular ( lb / PG<sup>3</sup> ).
- $\nu$  : Módulo de Poisson ( para el acero: = 0.3 ).
- $\Delta \rho_i$  : Cambio de densidad del fluido dentro de la tubería de -  
 producción ( lb / PG<sup>3</sup> ).
- $\Delta \rho_o$  : Cambio de densidad del fluido en el espacio anular ( lb / PG<sup>3</sup> ).
- $Z_i$  : Longitud de cada sección del pozo ( pies ).

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

- 1.- Alonso Cárdenas Ignacio . "Apuntes de terminación de pozos", Facultad de Ingeniería, UNAM. 1983.
- 2.- Garaiicochea Petrirena Fco. "Apuntes de transporte de hidrocarburos", Facultad de Ingeniería. UNAM. 1983.
- 3.- Gordon B. Davis. and. Thomas R. Hoffmann. Fortran 77. McGraw-Hill. 1984.
- 4.- Hammerlind D. J. "Movement forces and stresses associated with combination tubing string sealed in packers". J. Pet. Tech. February 1977.
- 5.- Lubinski Arthur., Althoff W y Logan J. L. "Helical buckling of tubing sealed in packers". J. Pet. Tech. June 1962.
- 6.- Morales Figueroa J. : "Solución grafica para determinar acortamientos y esfuerzos de aparatos de producción en operaciones de estimulación". Ingeniería Petrolera. AIPM. Julio 1982.
- 7.- Production Operations. Course I. Well Completions. SPE.1972.
- 8.- Romero Juarez A. "A simplified method for calculations, temperature changes in deep wells". J. Pet. Tech. June 1979.
- 9.- Well Completions and Workover. Petroleum engineer international. April 1979.