

24/11



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

FALLAS EN LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO DEBIDO AL EFECTO DE PANDEO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE;
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :

JOSE ISABEL FLORES RODRIGUEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

PAGINA

INTRODUCCION

I.	FALLAS QUE SE PRESENTAN EN LA T.R.	1
I.1.-	Casos Reales	2
I.2.-	Pandeo de T.R.	5
I.3.-	Más Respecto a la Temperatura	17
I.4.-	Anclado de la T.R.	19
II.	COMO EVITAR EL PANDEO EN LA T.R.	24
II.1.-	Efecto de flotación sobre la compresión y el pandeo	24
II.2.-	La ampliación del pozo contri- buye al pandeo	29
II.3.-	Control de la compresión con - buenos trabajos de cementación.	30
II.4.-	Desgaste en T.R.	33
II.5.-	Efecto del anclaje de la T.R. sobre la resistencia a la presi- sión interna.	40
II.6.-	Prevención del pandeo	42
II.7.-	Reparación de fallas	47

	PAGINA
III. PRACTICAS RECOMENDADAS EN EL ANCLAJE DE LA T.R.	49
III.1.- Descripción del problema	49
III.2.- Mediciones experimentales en campo.	51
III.3.- Método para el cálculo de la carga de anclado de la T.R. y la operación de anclado.	52
IV. COMO DISMINUIR LOS COSTOS DE CEMENTACION EN T.R. QUE SE CONSIDERAN TRABAJANDO BAJO EL EFECTO DE PANDEO	59
IV.1.- Mecanismos de pandeo	60
IV.2.- Desarrollo Matemático	69
CONCLUSIONES	75
NOMENCLATURA	76
BIBLIOGRAFIA	81

I N T R O D U C C I O N

Se dice que una tubería de revestimiento se encuentra bajo el efecto de pandeo o alabeo cuando está "torcida" con respecto a su posición vertical.

Las desventajas que presenta una tubería de revestimiento pandeada son numerosas, pero las más importantes son: Dificultad de introducir el aparejo de terminación cuando el pozo ya esta listo para su explotación, deterioro prematuro de la tubería de revestimiento en las secciones que se encuentran con el efecto de pandeo, fallas en las juntas o conexiones de la tubería pandeadas que se encuentran frente a secciones del pozo con diámetro agrandado con respecto al diámetro de barrena empleado.

Es generalmente aceptado que las tuberías se pandean debido a que durante la operación de cementarlas actúan en ella fuerzas compresivas que originan el efecto de pandeo.

En el presente trabajo se discuten los principales factores que contribuyen al pandeo así como ejemplos de casos reales que se presentaron por error en las operaciones de trabajo en los pozos, se proporcionan ecuaciones, que al emplearse auxilién a solucionar el aspecto práctico para prevenir futuros problemas.

C A P I T U L O I

FALLAS QUE SE PRESENTAN EN LA T.R.

Por estudios realizados se ha llegado a determinar que prácticas inadecuadas en la T.R. originan fallas. Las cargas combinadas debido a la temperatura, presión, anclaje, variación del diámetro del pozo y mala cementación traen con frecuencia mayores daños en conjunto, que considerando cada parámetro por separado.

Las cargas dinámicas que actúan sobre la T.R. cuando se tiene condiciones inmóviles que al momento de estar circulando, pueden ser del mismo orden que las calculadas para cargas estáticas, siendo que si los efectos del desgaste, corrosión y fatiga se agregan a estas cargas la probabilidad de falla aumenta.

Es común usar las condiciones más adversas para algunos parámetros, pero para otros, las cargas son ignoradas o se suponen valores arbitrarios que proporcionarían fallas aceptables. Teniéndose que para diseños más precisos es necesario cuantificar las fuerzas que actúan sobre la T.R., aún cuando muchos de los cálculos son inexactos se hace indispensable improvisar la precisión.

Se ha llegado a suponer que cualquier falla de tubería en el fondo del pozo que a originado una reducción en el diámetro de trabajo (drift), se debe a fallas por colapso, pero estudios hechos han mostrado que la mayoría de estos casos - eran provocados por los efectos del pandeo. Para ilustrar lo anterior se hace mención a los siguientes problemas.

I.1. CASOS REALES.

Caso 1. Una T.R. de 7 5/8 pg, S-95, LT & C fue combinada con una 7 3/4 pg, 46.1 lb/pie para colocarla a 12,350 pies -- (después se uso como T.R. de producción) usando en la operación lodo de 9.7 lb/gal, la cual se cementó en dos etapas, de 12,350 a 8,000 pies con lechada de 13.0 lb/gal y de 15.8 lb/gal para el resto. La tubería se ancló a medida que se cementaba, posteriormente se encontró pegada a 5,400 pies, lo que - probablemente ocurrió antes de que la T.R. fuera colocada en sus cuñas. La sección inferior de la tubería era de 7 3/4 pg, en el intervalo de 8,900 a 12,350 pies, siendo de 7 5/8 pg de 8,900 pies a la superficie, y teniéndose en este intervalo pedos de tuberías de 39.0 lb/pie de 0 a 1,700 pies y de 4,540 a 8,900 pies y con 33.7 lb/pie de 1,700 a 4,540 pies.

Después de que la T.R. se colocó, la perforación continuo a 14,700 pies, donde fue instalada una T.R. corta (liner) de 5 pg con lodo de 16.0 lb/gal.

Durante las operaciones de taponamiento iniciadas después de la terminación la zona resulto antieconómica, más sin embargo, se intento estimularla para aumentar la producción, se bombeo lodo de 16.0 lb/gal y se presiono la T.P. con 10,000 lb/pg², observándose que en la T.R. se incrementaba la presión a 4,600 lb/pg² debido probablemente a que la T.R. y/o empacador fallaban, originando que la T.P. se rompiera a 10,600 pies y que a 2,700 pies fallara una conexión de la T.R., provocando una elevación de 30 pies del cabezal del pozo y tubería, e instantáneamente al caer en el pozo la presión se abatió a cero, determinándose un traslape de 5 pies en la T.R.

Los cálculos de esfuerzos uniaxiales indican que presionar la T.R. al límite de la presión interna provocará rompimiento antes que separarse por tensión, también las cargas biaxiales debido a los cambios de presión y temperatura originan esfuerzos por encima de los cálculos empleados en un diseño normal.

Reportes basados en cambios de presiones y de temperaturas (promedio de -44°F) resultado de la inyección de un fluido frio, demostraron que la carga por tensión fue de 648,000 lb^{(1-2)*}, pero bajo una máxima carga de presión interna el esfuerzo real por tensión es de 625,000 a 700,000 -

*Referencias al final.

1b, dependiendo del espesor y eficiencia de la tubería (rosca), aún cuando la resistencia teórica de la T.R. de 7 5/8 pg es de 772,000 lb (basado en el cálculo de máximo esfuerzo a la tensión)⁽³⁾.

La misma T.R. fue pandeada a 8,000 pies (cima del cemento) durante la perforación del intervalo de 14,000 a 14,700 pies, originando probablemente pandeo en algunos cientos de pies arriba del punto libre (5,400 pies).

Caso 2. Una T.R. superficial de 13 3/8 pg, 68 lb/pie, - K-55, LT & C fue cementada a 5,000 pies con lechadas de 15.8 y 11.0 lb/gal a 4,000 y 10,000 pies respectivamente, las cuales fueron desplazadas con lodo de 9.5 lb/gal. Por pérdidas de -- circulación no se logro que el cemento llegara a la superficie, siendo necesario usar una tubería de 1 pg. en el espacio anular para cementar los 150 pies faltantes.

Durante la perforación de 16,500 a 17,000 pies (donde una T.R. intermedia debería ser colocada), la T.R. de 13 3/8 pg. fallo y fue imposible repararla, provocando con esto la perforación de otro pozo. En este pozo se coloco una T.R. de 20 pg a 1,500 pies, la que fue cementada hasta la superficie para evitar problemas durante la perforación.

La T.R. original (13 3/8 pg.) habría quedado bajo los -

efectos de pandeo debido a las altas temperaturas de circulación, aún cuando la tubería se mantuviera fija y en tensión durante el fragurado del cemento. Este tipo de fallas es típica de T.R. superficiales en donde el cemento no cubre la totalidad de la tubería.

Caso 3. Una T.R. de 9 5/8 pg. 53.5 lb/pie, P-110 buttress, se cementó a 12,000 pies con una carga de anclaje de 770,000 lb, teniéndose en la sección libre de la T.R. (parte de la tubería no cementada) un promedio de temperatura de 35°F entre las condiciones estáticas y de circulación. Cuando se perforaron 21,000 pies, se colocó a 17,500 pies una tubería corta, donde la T.R. de 9 5/8 pg falló a 8,600 pies originando problemas de pegaduras a 6,200 pies y otros puntos del pozo.

Se ha demostrado^(1,2) que segmentos cortos de T.R. bajo condiciones de incrementos de temperatura y densidad de lodo, traen pandeo e inestabilidad de la tubería, en otros casos al aumentar rápidamente la densidad del lodo el pandeo se presenta a medida que la torsión desarrollada por la perforación se incrementa.

I.2. PANDEO DE T.R.

Muchas de las fallas inexplicables de las T.R. se deben a que estas no son cementadas en su totalidad, es decir, el

pandeo puede conducir a fallas en la T.R. debido al desgaste y fatiga, resultado del movimiento de la tubería de perforación en los intervalos pandeados.

En los casos anteriores, las fallas pueden atribuirse al pandeo de la T.R. o a las fuerzas que tienden a causar este pandeo. Pero por motivo de los problemas que prevalecen, a -- los diseñadores de pozos les podría ser familiar:

- . las condiciones bajo las que el pandeo puede ocurrir.
- . variación del pandeo con el control de ciertos parámetros
- . efectos de las T.R. pandeadas
- . medidas que pueden ser tomadas para reducir o corregir - el problema.

Factores responsables del pandeo y del grado de pandeamiento:

- . longitud de la T.R. no cementada
- . diámetro del pozo y grado de derrumbamiento.
- . carga de tensión en la T.R.
- . incrementos en la densidad del lodo o presiones de otras fuentes que aumentan la presión interna en la T.R.
- . cambios de temperaturas en el fondo del pozo.

Todos estos factores están interrelacionados, siendo -- considerados los tres primeros como los que controlan el grado de pandeo, mientras que los cambios de temperatura y presión son mecanismos primarios que causan pandeo.

Las figuras 1 a 6 ilustran los efectos de estos parámetros en tuberías pandeadas. Estas curvas fueron construidas basandose en numerosos ejemplos de algunas condiciones del pozo y una variedad de diámetros de tuberías, empleándose para los cálculos T.R. de grandes longitudes.

La figura 1 indica como la diferencia de temperatura se incrementa en la sección libre de la tubería, aumentando la tendencia al pandeo. Mientras N' se incrementa linealmente, en tanto P se reduce repentinamente y F_t declina con la expansión de la tubería. Siendo el resultado una sección de tubería pandeada con una pronunciada espiral en el fondo.

La figura 2 muestra el efecto del incremento de la sección libre de la tubería bajo condiciones estáticas (sin circulación). Como la sección libre de la tubería favorece a la larga, N' se incrementa linealmente y P decrece repentinamente, originando una deformación de la tubería en el fondo de la sección.

La figura 3 ilustra que a medida que se incrementa la --

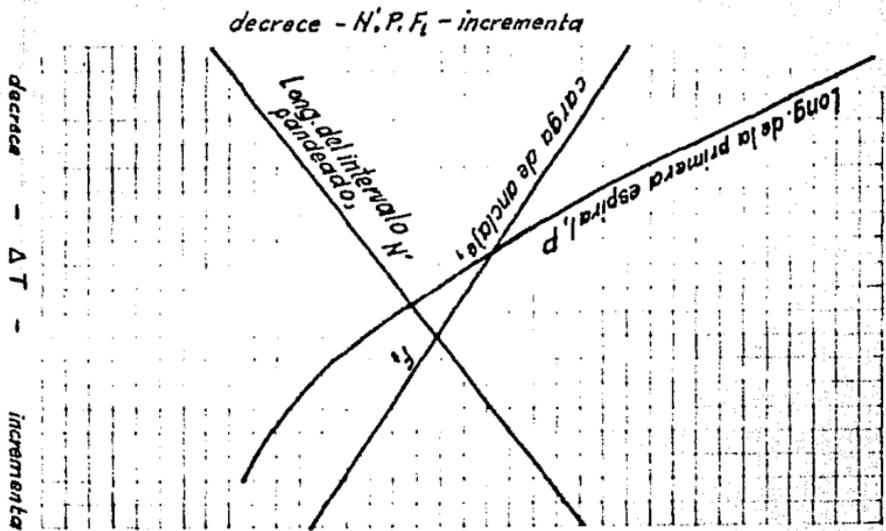


fig. 1

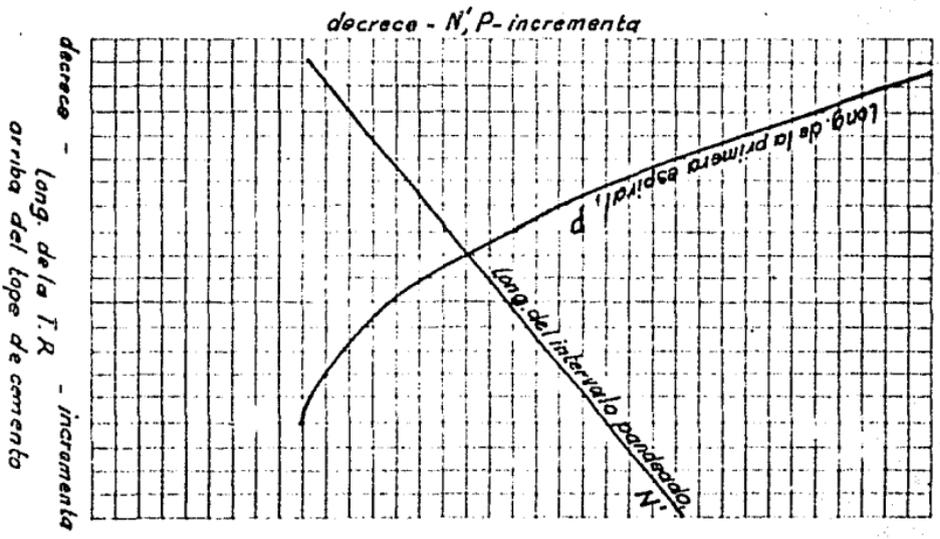


fig. 2

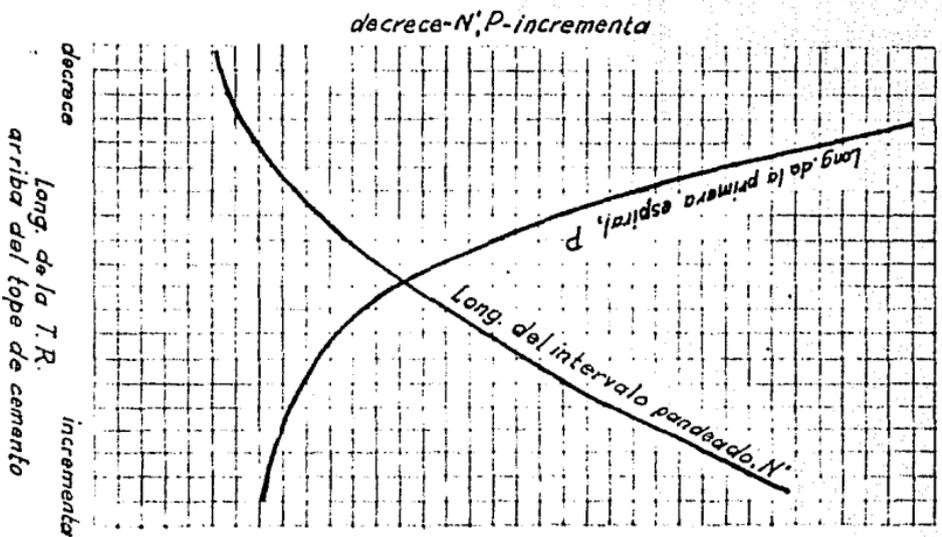


fig. 3

longitud de la tubería libre, y al circular con un lodo de alta densidad origina que aumente N' y se incremente el pandeo (P decrece). En este caso, el problema se compone por aumento en la densidad del lodo y un incremento en la diferencia de temperatura, provocado al circular fluido frío. Los cálculos muestran que muchas de las T.R. pueden ser pandeadas, si la densidad del lodo aumenta considerablemente, y toda la tubería estará bajo pandeo durante la circulación, independientemente de un aumento en la densidad del fluido.

La figura 4 ilustra los efectos perjudiciales al incrementarse la presión interna de la tubería, causado por un aumento en la densidad del fluido y otras fuentes de presiones (tratamientos, tratando de matar el pozo, etc.). A medida que la presión aumenta, N' se incrementa rápidamente lográndose un estado de pandeo en el fondo del intervalo (P disminuye - bruscamente).

La figura 5 muestra como jalando la T.R. se aumenta la tensión, lo que puede ayudar a aliviar las tendencias de pandeo, causando que N' disminuya y P aumente.

Se ha determinado que la T.R. en tensión no es estable, ya que las condiciones en el pozo cambian repentinamente, alterando la estabilidad de la tubería. Actualmente la cementa

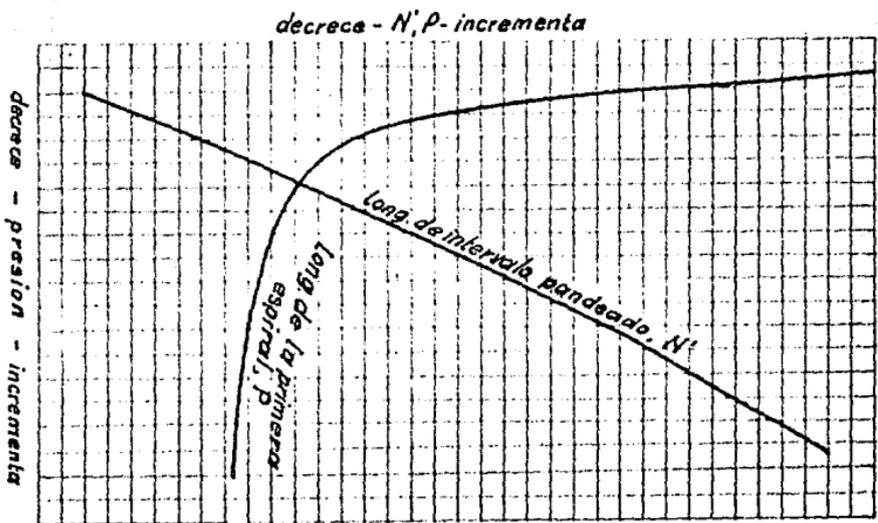


Fig. 4

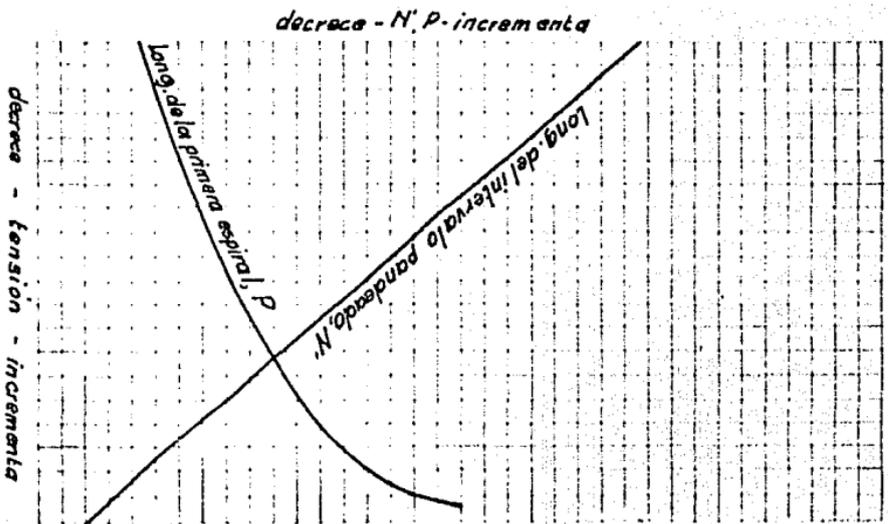


fig. 5

ción de la T.R. es el único método para asegurar que esta -- permanezca bajo condiciones estables. De hecho fallas por cúbrir la mayor parte de la T.R. superficial han conducido a - muchos problemas, donde estos no se presentan en pozos someros debido a que son terminados antes de dañarse.

Las T.R. sometidas a compresión son mas susceptibles a fallas que aquéllas que son colocadas a la tensión. Algunas veces el peso de la T.R. es soltado antes del anclaje, para - así obtener el punto neutral por tensión (calculado tomando el peso de la sección libre de la T.R. en el aire) de acuerdo a la cima del cemento (obtenida con un registro de temperatura). Más sin embargo, se ha demostrado^(1,2,4) que la compresión o tensión axial no necesariamente determinan la estabilidad de la T.R., ya que esta puede estar bajo tensión o - compresión presentando o no pandeo respectivamente.

En ocasiones se suelta el peso de la T.R. para reducir cargas en el cabezal, mientras otras veces se jala la tube--ría en un intento por eliminar el pandeo, siendo que en ambos casos se deja pasar el tiempo suficiente para permitir el fraguado del cemento y obtener una resistencia adecuada antes de anclar la tuberfa.

El tiempo mínimo requerido para el fraguado es de 3 a 4

horas o más si existe una diferencia considerable de temperatura entre la zapata y la cima del cemento. No obstante - gran parte de la tubería se llega a pegar en la sección libre antes de que el cemento alcance cierto grado de resistencia, haciendo que cualquier cálculo por soltar o jalar la tubería sea erróneo, y teniéndose que el intervalo libre bajo el punto pegado permanezca como si estuviera cementado, no afectándole los cambios de cargas que ocurran en la superficie.

La figura 6 muestra la influencia del espacio libre del pozo sobre el pandeo. Se han realizado reportes⁽⁵⁾ de fallas de T.R. por debajo de la cima del cemento debido al pandeo, y se ha demostrado que tuberías parcialmente cementadas indican que más de un tercio de esas columnas proporcionan una reducida o nula adherencia a la tubería, mientras otros estudios muestran que un desplazamiento del fluido de perforación por cemento, es difícil de realizar sobre todo en pozos agotados y/o ampliados.

La figura está basada en una T.R. de 5½ pg colocada en un pozo de 7 7/8 pg a 12,000 pies y cementada a 7,000 pies. Durante la producción de un fluido (9.0 lb/gal) por el espacio anular de T.P. - T.R. y T.P.- pared, la diferencia de temperatura fue de 65°F, causando bajo estas condiciones pandeo en la tubería.

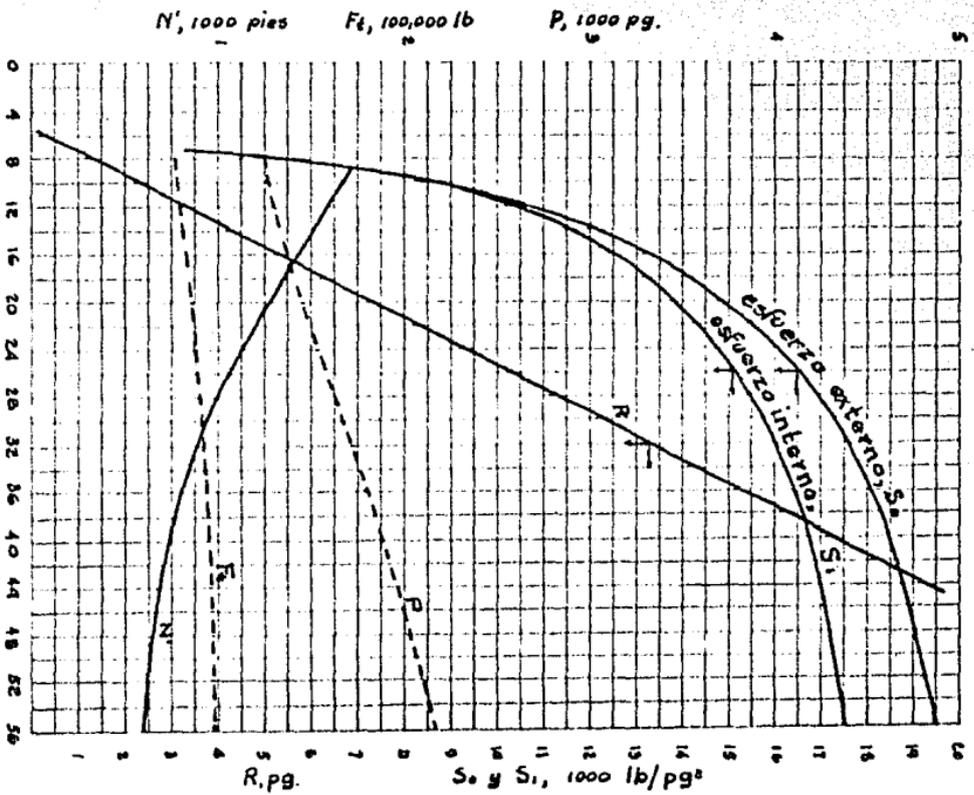


fig. 6

Las T.R. no serán pandeadas en pozos de grandes diámetros si estas se encuentran en condiciones estables. Los efectos mostrados en la figura ocurren en tuberías pandeadas, por ejemplo, P se incrementa con el diámetro del pozo al actuar esfuerzos internos y externos, más sin embargo N' decrece. -- Estos cambios se presentan a causa de un incremento en el diámetro de la espiral permitido por la ampliación del pozo.

I.3. MAS RESPECTO A LA TEMPERATURA

El pandeo de la T.R. se incrementa a medida que la diferencia de temperatura en la sección libre de la tubería aumenta, siendo anclada la T.R. cuando la temperatura de esta sección es cercana a la estática. La diferencia de temperatura se incrementa durante la perforación por el flujo continuo -- del lodo en el pozo, mientras que esta temperatura disminuye cuando se inyecta fluido frío (tratamientos, tratando de matar el pozo).

La figura 7 muestra una gráfica de temperatura contra -- profundidad bajo condiciones, estáticas, de circulación y de inyección, donde rara vez los gradientes de temperaturas son uniformes (pero para propósitos nuestros está relación es -- adecuada).

Una alta cima de cemento en el exterior de la tubería,

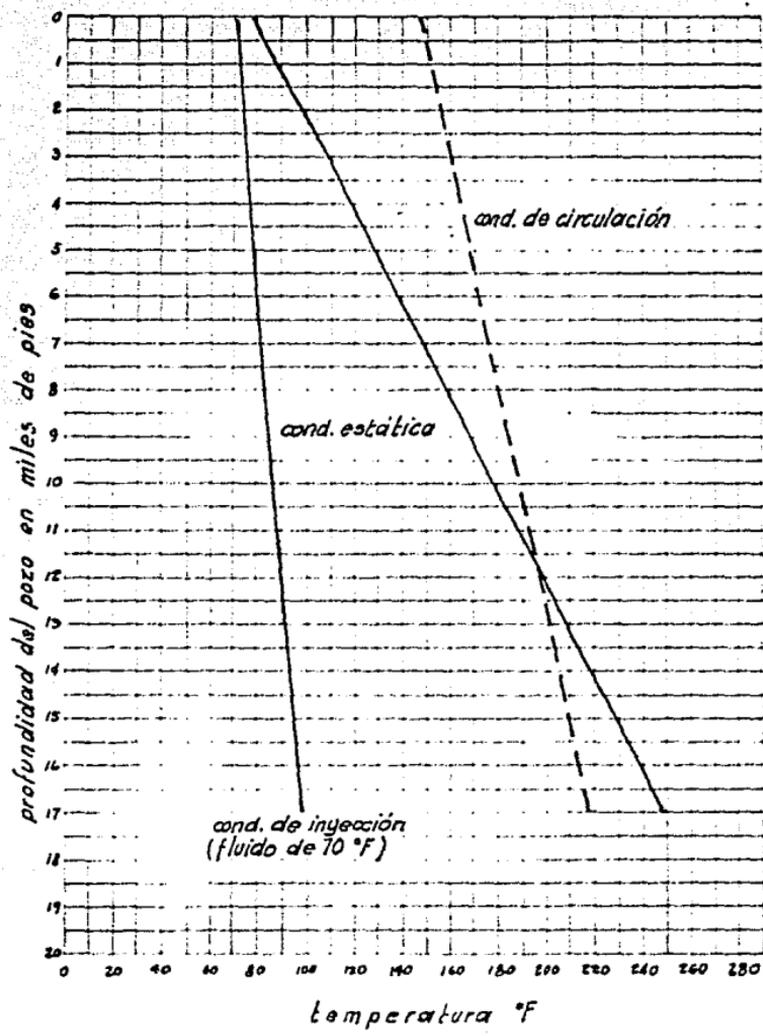


fig. 7

puede causar un aumento en la diferencia de temperatura entre las condiciones estáticas y de circulación. En la figura 7 se puede observar que la diferencia de temperatura entre - 17,000 pies y la superficie es de 20°F resultado de un enfriamiento en el fondo del pozo (ΔT de -30°F en el fondo y + 70° F en la superficie). La diferencia de temperatura disminuye - cuando se tiene una cima de cemento alta y se inyecta fluido frio.

Los cambios de cargas axiales en T.R. debido a las variaciones de temperatura son independientes de la longitud, siendo determinadas por:

$$\Delta W = 207 \Delta T A_s \quad (1)$$

donde:

$$A_s = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2)$$

I.4. ANCLADO DE LA T.R.

La figura 8 muestra como Ft puede variar en el pozo, con T.R. de 9 5/8 pg, 53.3 lb/pie colocada a 17,000 pies.

La curva 1 muestra a Ft en lodo de 9.5 lb/gal, no aplicándole presión externa a la tubería. El punto A es el peso de la T.R. en el aire, el B es el peso de la tubería flotante.

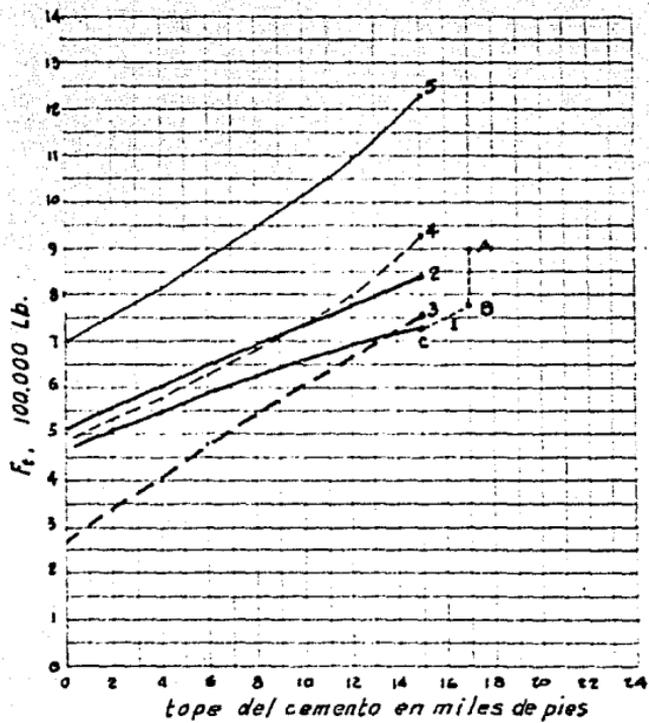


fig. 8

do en lodo de 9.5 lb/gal y C es el mismo peso de la tubería flotando después de cementar con lechadas de 15.8 y 13.0 lb/gal de 17,000 a 15,000 pies y de 15,000 a 9,000 pies (cima del cemento), respectivamente, teniéndose de este punto a la superficie lodo de 9.5 lb/gal.

La curva 2 muestra a Ft cuando la tubería es llenada con un fluido de 17.0 lb/gal, sin aplicar presión.

La curva 3 muestra lo que sucede durante la circulación del fluido, no aplicándole presión.

La curva 4 es el resultado que se tiene durante la circulación del fluido, aplicándole una presión de 5,000 lb/pg² sobre la T.R.

La curva 5 muestra lo que pasa al bombear en el pozo el fluido con 5,000 lb/pg² de presión.

Esta familia de curvas ilustra los efectos no lineales sobre las condiciones del pandeo, debido a las variaciones de la cima del cemento y ΔT , durante la circulación o inyección de fluido. También indica la reducción de Ft como resultado del incremento de la columna de cemento en el exterior de la tubería, agregado al efecto de flotación en el cemento, dado que este es más pesado que el fluido desplazado.

Si se alternan densidades de cemento, con valores rea-

les de Ft y pendientes de las curvas, no se afectará la posición relativa de las curvas.

La figura 9 está basada en datos de la figura 8, donde la cima del cemento esta a 9,000 pies (excepto la última barra de la figura que es calculada para una cima de 4,000 - - pies). Esta figura muestra la variación de Ft como resultado de los cambios de condiciones del pozo. Por ejemplo, el simple cambio de condiciones estáticas a de circulación reduce a Ft en 140,000 lb. Un cambio de carga de esta magnitud ocurrirá cada vez que se realice un viaje de la tuberfa (es decir, cuando en el pozo se saque e introduzca la T.R.).

.Normalmente los grandes cambios de cargas en el cabezal del pozo, ocurren cuando se incrementa considerablemente la densidad del fluido, al aplicarle presión a la T.R. (operación de matar el pozo) y cuando un volumen grande de fluido frío es inyectado para un trabajo de estimulación.

Los cambios de temperatura y presión debido a las operaciones de perforación, terminación y producción pueden variar las cargas sobre los cabezales cuando mucho en 50,000 lb.

C A P I T U L O I I

COMO EVITAR EL PANDEO EN T.R.

Generalmente la T.R. al cementarse sufre grandes compresiones que ocasionan pandeo, más sin embargo, la solución podía ser, conservar el diámetro del pozo, eliminar la compresión y realizar un buen trabajo de cementación. Algunos estudios realizados han mostrado que la gran mayoría de las fallas se presentan en la T.R. intermedios y superficiales.

II.1. EFECTO DE FLOTACION SOBRE LA COMPRESION Y EL PANDEO.

Es normal que la lechada usada en la cementación de la T.R. sea de mayor densidad que el fluido empleado para desplazarla a la zapata, resultando que la presión hidrostática en el exterior de la T.R. sea mayor que en su interior, sobre todo cuando el tapón desplazante llega al fondo del pozo. En la práctica es común que se tenga un exceso de presión sobre la tubería para asegurar que el tapón llegue a la zapata, teniendo en cuenta que la presión diferencial resultante de las diferentes densidades de los fluidos será mantenida por la zapata flotadora.

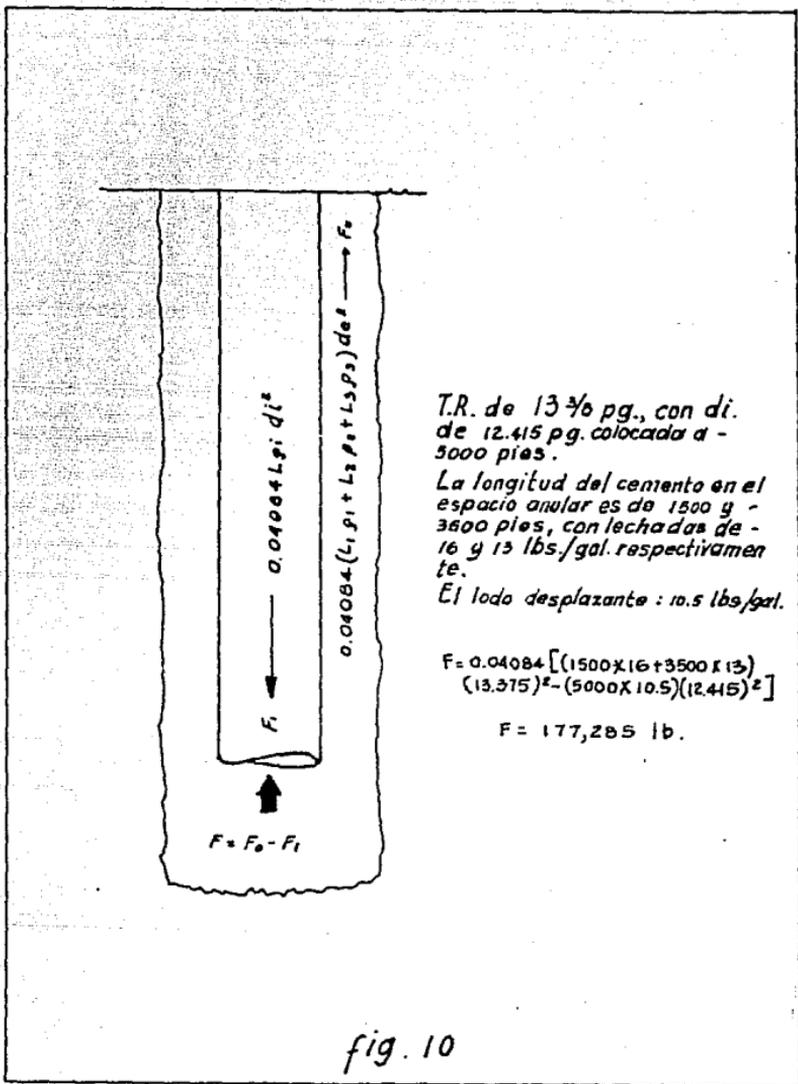
No obstante, la presión hidrostática ejercida en el espacio anular sobre el extremo inferior de la T.R. causa una - -

cará una fuerza de tensión o descendente. Como la presión hidrostática externa es casi siempre mayor o igual que la presión hidrostática interna, se tiene que la diferencia entre estas fuerzas por lo general producen compresión en la parte inferior de la T.R. Y Si el promedio de las densidades del lodo y cemento en el espacio anular es mayor que la del fluido desplazante, la fuerza compresiva sobre la tubería puede ser grande, siendo esta fuerza compensada por el peso de la T.R., donde la compresión va disminuyendo hacia la superficie, resultando que una tercera a una mitad de la longitud de la -- T.R. estará en compresión longitudinal.

En algunos pozos someros y de grandes diámetros, la T.R. puede de hecho flotar al cementarla, por lo que se requiere que esta sea fijada en su sitio hasta que el cemento fragüe.

A medida que el cemento permanece líquido, el pandeo en la T.R. es relativamente estable⁽²⁾, pero al fraguar y alcanzar su estado de equilibrio, el pandeo generalmente se presenta en la cima del cemento y en secciones ampliadas del pozo con mala cementación.

La fuerza ascendente debido a la fuerza de flotación de la lechada de cemento, puede ser definida como (figura 10):



T.R. de 13 3/8 pg., con di.
de 12.415 pg. colocada a -
5000 pies.

La longitud del cemento en el
espacio anular es de 1500 y -
3500 pies, con lechadas de -
16 y 13 lbs./gal. respectivamen
te.

El lodo desplazante : 10.5 lbs./gal.

$$F = 0.04084 [(1500 \times 16 + 3500 \times 13) \\ (13.375)^2 - (5000 \times 10.5)(12.415)^2]$$

$$F = 177,285 \text{ lb.}$$

fig. 10

$$F = [0.052(L_1 \rho_1 + L_2 \rho_2 + L_3 \rho_3) (\frac{\pi}{4} de^2)] - [0.052 L_i \frac{\pi}{4} di^2]$$

simplificando:

$$F = 0.04084 [(L_1 \rho_1 + L_2 \rho_2 + L_3 \rho_3) de^2 - L_i \rho_i di^2] \quad (2)$$

Muchos de los cálculos a la tensión están basados en el peso de la T.R. en el aire, otros en todo, y ninguno da importancia al efecto de flotación en el cemento (figura 11). Generalmente las condiciones de colapso son especificadas sin tomar en cuenta la flotación, es decir, se suponen las condiciones de tensión en el aire. Más sin embargo, la resistencia al colapso es reducida por el efecto de tensión y por segmentos colapsados que están en compresión. Teniéndose que los cálculos a la tensión cuando la T.R. es bajada al pozo de 1 1/3 a 3 veces mayores que la carga real de anclado.

La figura 11 es una representación gráfica de la carga longitudinal de una T.R. de 13 3/8 pg, cd lb/pie cementada a 5,000 pies, con lechadas de 16.0 y 10.5 lb/gal de 5,000 a -- 3,500 pies y de 3,500 pies a la superficie respectivamente.

Investigaciones⁽²⁾ realizadas para estabilizar la fuerza de pandeo, han discutido el punto neutro de pandeo y la relación de presiones hidrostáticas en el interior y exterior de la tubería. También se han mostrado⁽⁶⁾ presiones anulares iguales con la presión de formación, de ahí, que se suponga

* Factor de conversión lb/pg² gal/lb.pie.

que está presión es igual a la presión hidrostática ejercida por el fluido usado.

Esta figura muestra los puntos neutros de pandeo E(2,889 pies) y F(1,650 pies) donde el fluido desplazante es de 10.5 y 8.33 lb/gal respectivamente, teniéndose que el intervalo -- abajo del punto neutro causará inestabilidad en la tubería, - llegando a pandearla si no esta soportada por el cemento.

Suponiendo de que el fluido desplazante fue agua al cementar la tubería, y que debido a un ensanchamiento del pozo a 30 pg, se presentó mala cementación de 2,500 a 3,500 pies, se tiene que al continuar la perforación hasta 14,000 pies y al incrementarse la densidad del fluido a 12.5 lb/gal, la tubería se pandeo antes de lograr perforar 5,000 pies, causando que el pandeo se incrementará conforme se perforaban los - - 14,000 pies, y teniéndose a esta profundidad una fuerza de - pandeo de 232,000 lb⁽¹⁾ que definirá una primera espiral cuya longitud es de 169 pies. Esto origina una fuerza lateral de - 4,270 lb y una presión de contacto de 420 lb/pg², causando -- que una cuarta parte de la pared de la T.R. se desgaste en su interior.

II.2. LA AMPLIACION DEL POZO CONTRIBUYE AL PANDEO.

A pesar de todos los esfuerzos por mantener calibrado el

diámetro del pozo, se encuentran deslaves provocados por la presión de poro, fuerzas tectónicas, propiedades de los fluidos, altas velocidades de circulación y efectos mecánicos.

El grado de pandeo y los resultados de la severidad de la pata de perro en la primera espiral, son generalmente dependientes del diámetro del pozo, es decir, ambos dependen del claro radial entre la tubería y el pozo. Numerosos estudios han mostrado que es casi imposible desplazar lodo en aquellos pozos con intervalos agrandados causados por la mala cementación.

II.3. CONTROL DE LA COMPRESION CON BUENOS TRABAJOS DE CEMENTACION.

Los problemas de pandeo y compresión pueden disminuir si la presión se mantiene sobre la T.R. (menor a 100 lb/pg^2) hasta que el cemento en la zapata fragüe, previniendo movimientos en la tubería.

Una investigación⁽⁷⁾ realizada indicó, que el cemento -- con una resistencia a la tensión de 8 lb/pg^2 , es adecuada para prevenir movimientos en la T.R., siendo esto equivalente a menos de 100 lb/pg^2 de la resistencia a la compresión.

Las compresiones longitudinales pueden causar pandeo en

la tubería, y el nivel de compresión que puede ser tolerado es desconocido, teniéndose que gran parte de la T.R. que se encuentra en compresión, en mas del 50% de su longitud no tiene problemas. Más sin embargo, la carga de compresión hidráulica en T.R. de longitudes cortas y grandes es un factor para justificar muchas de las fallas de la tubería anclada.

Debido a las condiciones que prevalecen en los pozos, es difícil de evaluar la severidad del pandeo, que es la causa de numerosas fallas y serios desgastes que reducen el espesor de la tubería.

Se han demostrado que bajo condiciones normales de perforación casi todas las T.R. y muchas T.P. son pandeados, incluyendo aquellas que son cementadas en toda su longitud. También se ha observado que la perforación no elimina el problema de pandeo, no obstante, cualquier cosa que se haga reduce el grado de pandeo, lo cual disminuye la probabilidad del desgaste y falla. Es necesario eliminar o reducir las ampliaciones que se hagan en los pozos, ya que si la tubería es pandeada en pozos de diámetro normal, la relación diámetro del pozo - T.R. provocará un desplazamiento lateral insuficiente para causar un serio desgaste de la tubería.

En algunos casos el uso de tuberías de grandes espesores

es beneficiosa, ya que se podrían tolerar mayores pérdidas de metal manteniendo la resistencia aceptable, más sin embargo, el área de contacto se incrementa con la perforación, por lo que hace que se reduzca la carga.

Si en la tubería se aplica tensión suficiente, no se presenta el pandeo, pero en algunas ocasiones las cargas pueden exceder la resistencia a la tensión de la T.R.

Neutralizar la compresión de la fuerza de flotación causada por el fluido desplazante, a veces es adecuada y en otros casos es conveniente lograr una carga longitudinal nula en la zapata, donde cualquiera de las dos se puede realizar - manteniendo la presión sobre la T.R. después de haber bombeado el tapón. Siendo la primera condición producida, si la presión necesaria para bombear el tapón es mantenida en la tubería hasta que el cemento en la zapata fragüe, la otra condición será si la presión que produce una carga longitudinal nula en la zapata puede ser calculada por:

$$Pr = 0.052 [(de/di)^2 (L_1 \rho_1 + L_2 \rho_2 + L_3 \rho_3) - L \rho_i] \quad (3)$$

Las fuerzas de pandeo pueden ser reducidas en la T.R. parcialmente cementadas, al adicionarse peso a la tubería anclada (cuando esta es cementada).

11.4. DESGASTE EN T.R.

El pandeo en la T.R. puede presentar problemas de desgaste y fatiga causado por la tubería de perforación. El siguiente ejemplo muestra como la T.R. fue pandeada cuando se pensaba que estaba bien cementada, teniéndose como resultado de la perforación un desgaste interno en la T.R.

Ejemplo. La figura 12 muestra una parte de un registro de calibración tomado en T.R. de 9 5/8 pg. a 16,900 pies, el cual indica un desgaste en un intervalo sin cementar (entre dos segmentos cementados). El cemento fue circulado desde la zapata hasta cerca de los 7,000 pies, posteriormente en una segunda etapa se inyectó en la superficie cemento por el espacio anular con el fin de que está lechada alcanzará la cima de cemento de la primera etapa, más sin embargo, sólo se alcanzó a cementar más abajo de la T.R. superficial de 13 3/8 pg. colocada a 5,135 pies, resultando aproximadamente 2,000 pies de la T.R. de 9 5/8 pg. no cementados (intervalo desgastado). Al continuar la perforación se incrementó la densidad del fluido, obteniéndose durante la circulación una diferencia de temperatura de 40 a 50°F en la sección libre de la tubería (los 2,000 pies no cementados). La colocación de la segunda lechada de cemento produjo un aplastamiento de la sección libre de la tubería, reduciéndose en este intervalo la resistencia a la tensión y a la presión, donde la presión disminuyó -

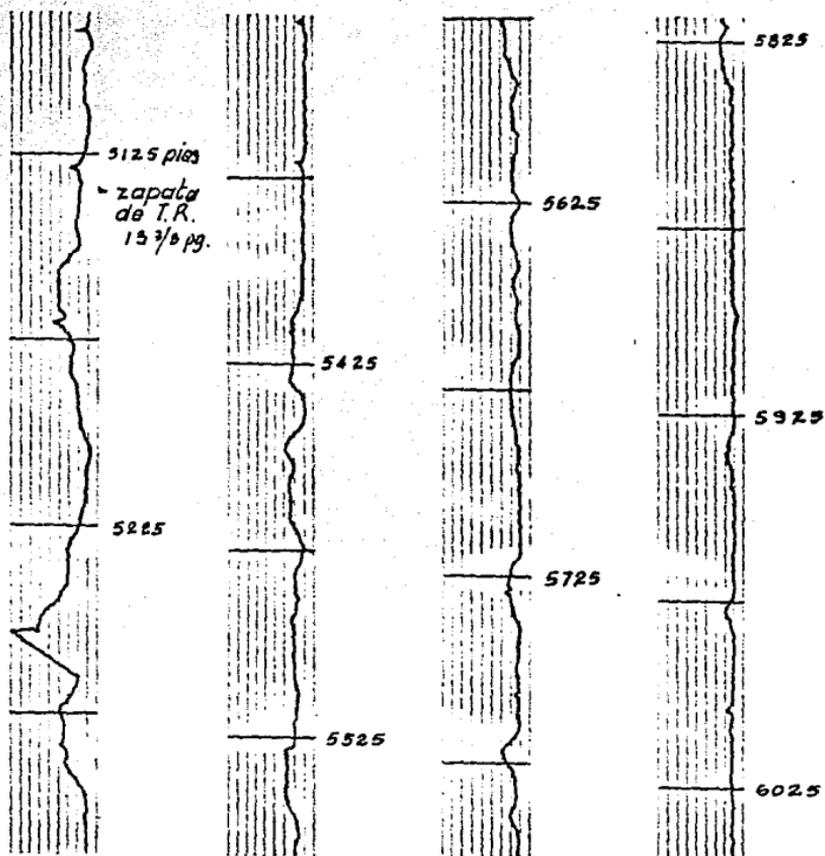


fig. 12

hasta equilibrarse con la presión de poro⁽⁶⁾. Los resultados de estos cambios produjeron en los 2,000 pies de tubería pandeada un desgaste al seguirse perforando.

Como los diámetros de los pozos varían mucho, sólo es posible estimar los gradientes de temperaturas. Teniéndose que los mejores cálculos de pandeo son cualitativos, ya que cuando se presentan problemas en las T.R., rara vez se dispone de datos que indiquen la existencia de pandeo.

Más sin embargo, "el ángulo de inclinación" o "la severidad de la pata de perro" pueden ser calculados de la curvatura de la espiral. El ángulo de inclinación fue usado para el estudio⁽⁸⁾ del arrastre de los lastrarbarrenas (drill collars) pandeados sobre las juntas del fondo de la T.R. y empleado para investigaciones⁽⁹⁾ de la tubería pandeada.

SEVERIDAD DE LA PATA DE PERRO. Usando el método⁽¹⁾ para la curvatura de la espiral:

$$C = 4\pi^2 \frac{R}{P^2} + 4\pi^2 R^2$$

estando en esta ecuación: C (radian/pg), P (pg), R (pg) y teniendo:

$$P^2 \gg 4\pi^2 R^2$$

Despreciando el segundo término:

$$C = 4\pi^2 \frac{R}{P^2} \quad (4)$$

Pero convirtiendo:

P (pies) y C (grados/100 pies)

Tenemos:

$$C \left(\frac{\text{Radfan}}{\text{Pé}} \right) = C' \left(\frac{\text{gradós}}{100 \text{ píes}} \right) \times \left(\frac{\text{Radfan}}{57.295 \text{ gradós}} \right) \times \left(\frac{\text{pié}}{12 \text{ pé}} \right)$$

$$C = \frac{C'}{68754} \quad (A)$$

$$P (\text{Pé}) = P' (\text{píes}) \times \left(\frac{12 \text{ pé}}{\text{pié}} \right)$$

$$P' = 12 P' \quad (B)$$

Sustituyendo (A) y (B) en la ecuación (4)

$$\frac{C'}{68754} = \frac{4\pi^2 R}{(12 P')^2}$$

Despejando C' :

$$C' = \frac{4\pi^2 (68754)R}{144 P'^2}$$

$$C' = 1.89 \times 10^4 \frac{R}{P'^2}$$

Por lo tanto:

$$DLS = 1.89 \times 10^4 \frac{R}{P^2} \quad (5)$$

Una vez determinada la severidad de la pata de perro, es relacionada a la desviación de la tubería pandeada, siendo --

que los resultados de estos cálculos no podrán ser usados en forma inversa, excepto cuando ocurran pandeos en el intervalo cementado (antes de que el cemento haya fraguado).

La máxima fuerza lateral así, estará limitada por la fuerza lateral debido al pandeo, encontrándose⁽⁸⁾:

$$F_L = \frac{2N L_c}{p}$$

para L_c y P en pg

donde:

$$N = 2 F \tan \theta$$

$$\tan \theta = \frac{2\pi R}{p}$$

Así tenemos:

$$F_L = 8 L_c F \frac{\pi R}{p^2} \quad (6)$$

convirtiendo:

P y L_c a (pies)

$$L_c (p\dot{d}) = L_c' (p\dot{d}s) \times \left(\frac{12 p\dot{d}}{p\dot{d}s} \right)$$

$$L_c = 12 L_c' \quad (C)$$

Sustituyendo (B) y (C) en la ecuación (6)

$$FL = 8 (12 Lc) \frac{F_T R}{(12 p)^2}$$

Donde la ecuación de la fuerza lateral de pandeo de la T.R. - será:

$$FL = 2.1 \frac{Lc F_T R}{p^2} \quad (7)$$

También la fuerza lateral sobre la junta es:

$$FH = F_T \text{ sen } \theta$$

pero para ángulos pequeños:

$$\text{Sen } \theta \approx \text{Tan } \theta$$

$$\text{Tan } \theta = 2 \frac{F_T R}{P}$$

donde P está en pg

convirtiendo:

$$P \text{ (pies)}$$

Tenemos:

$$\text{Tan } \theta = 0.523 \frac{R}{P}$$

Por lo tanto:

$$F_H = 0.523 \frac{R}{P} F_T \quad (8)$$

Los siguientes rangos de valores pueden ocurrir en T.R. pandeadas:

longitud del intervalo pandeado, pies	500 - 4,000
longitud de la primera espiral, pies	100 - 300
claro radial, pg	2 - 6
fuerza de pandeo, lb	40,000 - 200,000
tensión de la tubería de perforación, lb	50,000 - 150,000
longitud de contacto, pies	30

La F_H en la tubería de perforación será en orden de magnitud mayor que F_L en la T.R. pandeada, así la máxima fuerza lateral que puede ser encontrada para la T.R. es F_L

Se ha determinado⁽¹⁰⁾ que una presión de contacto de 250 lb/pg² es suficiente para causar un desgaste en la tubería, - también se ha llegado a suponer una longitud de contacto de 3 pg. por conexión.

Los cálculos de las cargas laterales muestran que probablemente se presente desgaste en la T.R., si esta se encuentra libre de movimientos, no obstante, la fatiga de la T.R. puede ocurrir por la rotación de la tubería de perforación. Los - - cálculos del esfuerzo medio en T.R. pandeadas generalmente se encuentran en rangos de 20,000 a 60,000 lb/pg².

II.5. EFECTO DEL ANCLAJE DE LA T.R. SOBRE LA RESISTENCIA A LA PRESION INTERNA.

Otro de los problemas que se presentan en la T.R. superficial es en su anclaje (además del pandeo). Cuando la T.R. superficial tiene que sostener el anclaje de la T.R. intermedia y/o la T.P., la resistencia a la presión interna se reduce (la carga no puede ser transferida del cabezal del pozo a la estructura de perforación o al terreno), teniéndose, que a medida que la carga de colapso es reducida por una carga de tensión, la resistencia a la presión interna disminuye por la compresión.

Por ejemplo, si un pozo con T.R. de 13 3/8 pg, 68 lb/pie, K-55, ST&C y lodo de 9.5 lb/gal a 5,000 pies y cementada en 1,000 y 4,000 pies con lechadas de 15.8 y 12.0 lb/gal respectivamente. Suponiendo que se pueden desalojar de la tubería las 2/3 partes de la longitud fraguada.

Bajo estas condiciones tenemos:

$$\begin{aligned}
 \text{Carga por colapso} &= 0.052 \times \text{Densidad del fluido} \times \text{profundidad} \times 2/3 \\
 &= 0.052 \times 9.5 \times 5,000 \times 0.667 \\
 &= 1,647 \text{ lb/pg}^2
 \end{aligned}$$

donde la resistencia al colapso de la tubería = $1,950 \text{ lb/pg}^2$

Por lo que, el factor de diseño al colapso = $\frac{1,950}{1,647} = 1.18$

Carga por tensión = Peso por pie de tubería x profundidad x -
factor de flotación.

$$= (68 \text{ lb/pie}) \times (5,000 \text{ pies}) \times (0.85)$$

$$= 289,000 \text{ lb}$$

donde la resistencia a la tensión es = $718,000 \text{ lb}$

Por lo que, el factor de diseño a la tensión = $\frac{718,000}{289,000} = 2.48$

Finalmente, la máxima carga por presión interna de la tubería es obtenida del gradiente de fractura que es de $3,000 \text{ lb/pg}^2$, siendo la resistencia de la T.R. a la presión interna de $3,450 \text{ lb/pg}^2$. Por lo que, el factor de diseño a la presión interna = $\frac{3,450}{3,000} = 1.15$

Si una T.R. de $9 \frac{5}{8} \text{ pg}$, 53.5 lb/pg a es corrida hasta --
 $17,000$ pies con un fluido de 9.5 lb/gal , se tiene que al llegar la tubería al fondo del pozo, la máxima carga en el malacate puede ser de $773,000 \text{ lb}$, y cuando son cementados $2,000$ y $5,000$ pies con lechadas de 15.8 y 12.0 lb/gal respectivamente, la carga puede llegar a $586,000 \text{ lb}$. La resistencia de la T.R. superficial ($13 \frac{3}{8} \text{ pg}$) es de $1,069,000 \text{ lb}$, así la carga comprensiva arriba de las juntas es un porcentaje de la resistencia producida, es decir $586,000/1,069,000 = 54.8\%$ y de la elipse

de esfuerzos biaxiales (figura 13), la resistencia a la presión interna de la T.R. se reduce un 60% del valor nominal - $(2,070 \text{ lb/pg}^2)$.

Si un exceso de tensión es aplicado sobre la T.R. de -- $9 \frac{5}{8}$ pg. para reducir los efectos del pandeo, o si el cemento no logró alcanzar los 10,000 pies planeados, la resistencia a la presión interna de la T.R. superficial puede reducirse.

II.6. PREVENCIÓN DEL PANDEO.

Generalmente se creía que las T.R. en tensión eran estables cuando realmente no lo estaban. Como las condiciones de un pozo varían continuamente los cambios de operaciones pueden hacer estable o inestable la T.R., siendo la cementación de la tubería el único método disponible para mantenerla en condiciones estables. Una mala cementación en la T.R. superficial causará fallas, agravando el problema en pozos profundos y en algunos pozos someros.

Es recomendable que la columna de la T.R. superficial sea llenada con cemento desde la zapata hasta la superficie, no dejando tramos sin cementar, más sin embargo, algunos pozos son cementados con métodos que no pueden evitar dejar estos

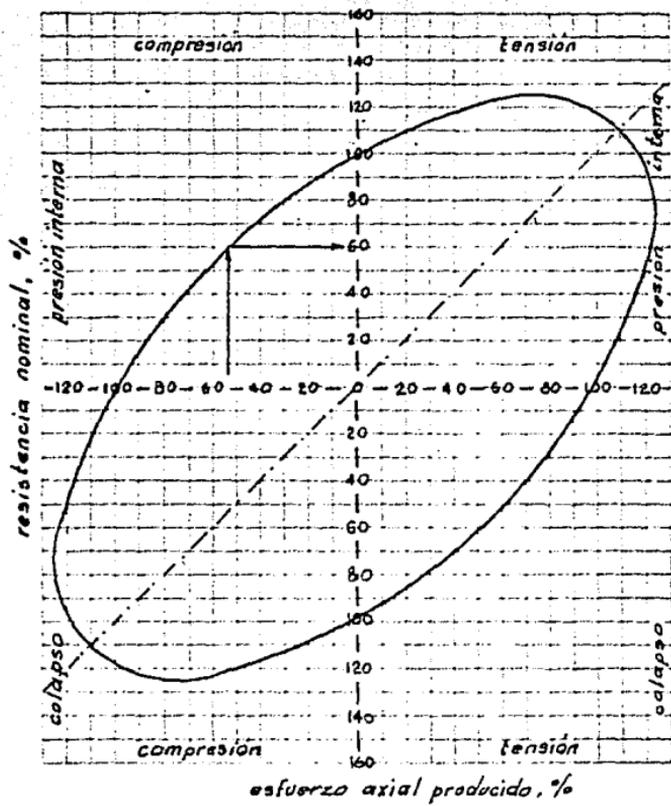


fig. 13

intervalos.

Además de la cementación convencional de etapas múltiples, diversos métodos nos pueden ayudar a obtener buenas cementaciones. Al permitir usar cemento de baja densidad, este puede prepararse con bentonita prehidratada de baja densidad o nitrógeno, pero si este cemento no puede emplearse, frecuentemente es posible terminar el trabajo de cementación llenando el espacio anular desde la superficie, siendo iniciado este llenado inmediatamente después de bombear el tapón y teniendo que el fluido en el pozo se ira hasta el punto en donde la circulación se pierde, por lo que se obtiene una columna continua de cemento.

Las herramientas que se utilizan en las cementaciones por etapas tienen sus limitaciones, provocando que su uso en las operaciones de cementación causen mal funcionamiento, especialmente a grandes presiones y profundidades de los pozos. Al usar estas herramientas se deberá tener el cuidado adecuado en las operaciones de colocación, para no dejar espacios entre las herramientas y bajo la cima del cemento, ya que si existen se producirá una situación similar a la de la figura 12.

Al no obtenerse una columna continua de cemento, no deberá permitirse que la cima del cemento permanezca arriba de la

zapata anterior, asegurando que el espacio anular entre las T.R. no este sellado.

La resistencia a la presión interna de la T.R. superficial es menor que en las T.R. intermedias, debido al desgaste y a que tiene que soportar mayores cargas de anclado (ocasionando pandeo, compresión), produciendo efectos perjudiciales cerca de la cima del cemento. Las T.R. son diseñadas para minimizar los riesgos de fallas, más sin embargo cuando una falla llega a ocurrir es más probable que está se presente en el fondo del pozo.

Se debe de evitar el alivio de presión entre el espacio anular de las T.R. (superficial e intermedia), siendo mejor llenar completamente este espacio anular con cemento, ya que fallas de este tipo llegan a ser mayores conforme se profundiza el pozo, debido a que la T.R. tiene mayor tiempo de exposición a la rotación de la tubería de perforación.

El máximo impedimento para realizar un buen trabajo de cementación es ampliar el diámetro del pozo, ya que provocaría grandes efectos de pandeo. Númerosos estudios han mostrado que un desplazamiento completo de un fluido de perforación por cemento es difícil de realizar, siendo casi imposible en pozos lavados (por altos gastos de circulación) y/o agrandados (por

derrumbes o erosión), también gran esfuerzo es mantener el pozo en su diámetro, sobre todo en la profundidad media del pozo.

Se ha recomendado⁽⁵⁾ la aplicación de presión interna en la T.R., antes de que el cemento adquiera su fase de fraguado, como también el aprovechar la tensión de la tubería cuando esta es anclada, siendo que ambos mejoran la estabilidad de la T.R. No obstante, adicionar tensión en T.R. de grandes espesores requiere cuidado, ya que hay que considerar los - efectos internos de las cargas triaxiales.

Por ejemplo⁽⁶⁾, si la presión hidrostática es reducida - hasta igualarse con la presión de poro de los intervalos no cementados, es difícil mantener la T.R. estable bajo la mayo ría de las condiciones de perforación.

Generalmente la mayor parte de las fallas se presentan en T.R. de grandes longitudes, arriba de los intervalos cemen tados con altas densidades. Donde es normal que el desplazamiento del cemento se realice con agua o lodo de baja densidad y de inmediato descargar la presión. En muchos casos, el resultado es que más de la mitad de la T.R. está en compresión y el resto esta bajo tensión.

El temor expresado en cuanto a la formación de vacíos - en el espacio anular (micro anulares), es injustificable, ya que si la presión después de fraguar el cemento alcanza la -- presión de poro, cualquier micro anular no tiene consecuen- cía, además si llegará a presentarse algún daño en el sello, lo más probable es que se deberá a la interface del cemento y la pared del pozo.

II.7. REPARACIÓN DE FALLAS

Cuando la T.R. falla, varios caminos pueden seguirse. Si una T.R. superficial falla al ser cementada desde la superfi cie usando una tubería de 1 pg, el primer intento de repara- ción sería la cementación forzada, mas sin embargo, la rela- ción de éxito de la recementación para mantener la presión de operación es despreciable, encontrándose que la mayor parte de las fallas están en los intervalos de 1,000 a 1,500 pies.

Se ha demostrado que los diseños de T.R. superficiales requieren una resistencia a la presión interna alrededor de - 3,000 lb/pg² en intervalos de 4,000 a 6,000 pies. Es raro que después de reperforar, la cementación forzada proporcione un se llo que pueda ser probado a 1,000 lb/pg², teniéndose que la recementación y la perforación generalmente producen daño en el área fallada causando la pérdida del pozo. Aún si la cemen

tación forzada puede ser probada a $1,500 \text{ lb/pg}^2$, tan pronto como la zapata es perforada, al continuarse perforando esta debilitaría al cemento y cualquier intento para controlar la presión puede conducir a una comunicación directa hacia la superficie. La mayoría de los procedimientos de fallas en T. R., han sido recuperarla en el punto de la falla y substituir las juntas dañadas.

C A P I T U L O III

PRACTICAS RECOMENDADAS EN EL ANCLAJE DE LA T.R.

III.1.- DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

Los cálculos realizados (11 a 14) durante el anclaje de la -- T.R. coinciden en lo siguiente:

- . están relacionados a la sección libre de la T.R.
- . la sección libre de la T.R. es considerada como un tirante rígido, fijado en ambos extremos (el extremo superior en la cabeza del pozo y el inferior en la cima del cemento).
- . el objetivo de anclar la tubería es asegurar la estabilidad elástica de la sección libre de la T.R. y eliminar el pandeo.
- . se supone que la temperatura en la sección libre de la T.R. sigue los cambios del gradiente geotérmico, y que la relación que existe entre la temperatura y la profundidad es lineal (se puede considerar de 1 a 1.5° por cada 100 pies)

Estos cálculos muestran algunas diferencias con respecto a las condiciones de referencia de los dos factores bási-

cos: variaciones de presión y temperatura.

Algunos métodos⁽¹²⁾ hacen los cálculos del fraguado de la lechada de cemento y de los cambios para el tiempo de anclado⁽¹¹⁾, sin dar condiciones de presión, más sin embargo, otros⁽¹³⁾ no consideran dichos niveles de referencia.

Hay cálculos⁽¹²⁾ que muestran que la T.R. está expuesta a condiciones hidrostáticas, en contraste con otros métodos⁽¹³⁾ que sugieren condiciones atmosféricas.

Además:

- Algunos métodos consideran las variaciones de la presión y temperatura como los factores influyentes más importantes, no obstante, hay cálculos que desprecian los cambios de la presión exterior y los efectos de flotación.
- Otros⁽¹²⁾ calculan separadamente en cada operación las fuerzas reactivas generadas en la sección libre de la T.R., así las cargas del anclaje total, en contraste a los cálculos que no se realizan por separado, hacen algunos cálculos de producción.

Para ilustrar lo anterior, las cargas durante el anclaje de una T.R. de 5½ pg. fueron determinadas con los mismos datos, tomando en cuenta los diferentes métodos y recomenda-

ciones prácticas:

RECOMENDACION O METODO	CARGA DE ANCLAJE, lb
1. Peso de la sección libre de la T.R. en el lodo de perforación.	71,036
2. Peso de la sección libre de la T.R. en el aire	83,625.
3. Peso de la T.R. al final de la cementación.	102,733
4. Método ⁽¹²⁾	110,600
5. Método ⁽¹³⁾	123,415
6. Método ⁽¹¹⁾	133,080
7. Método ⁽¹⁴⁾	149,492

III.2. MEDICIONES EXPERIMENTALES EN CAMPO.

Los experimentos de campo fueron realizados sobre algunos principios básicos en donde los cambios de las condiciones esfuerzo-deformación y las fuerzas provocadas en la sección libre de la tubería durante las operaciones de anclaje, se determinaron por los registros y las mediciones hechas.

El método seleccionado está basado en la ley general de Hooke, que describe la relación entre las fuerzas mecánicas y las deformaciones relativas como⁽¹⁵⁾:

$$\begin{aligned}
 G_{ax} &= \frac{10^{-6} E_D}{1 - \mu^2} [E_{ax} + \mu(E_r + E_{\theta})] \\
 G_{\theta} &= \frac{10^{-6} E_D}{1 - \mu^2} [E_{\theta} + \mu(E_{ax} + E_r)]
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

III.3.- METODO PARA EL CALCULO DE LA CARGA DE ANCLADO DE LA T.R. Y LA OPERACION DE ANCLAJE.

1. Propósito en la selección de la carga de anclado:

Otra de las intenciones de anclar la tubería es asegurar la tensión en la sección libre de la T.R., es decir:

$$G_{ax} > 0$$

La selección de la carga de anclaje, debido a la resistencia a la tensión y a la presión exterior crítica de la T.R., deberán ser controladas tomando en cuenta las condiciones de los esfuerzos biaxiales.

2. Condiciones límites de los cálculos:

Datos medidos han confirmado que el extremo inferior de la sección libre de la tubería no se fija con el cemento, es decir, no existen puntos fijos en la cima del cemento como se supuso, por lo que se determinó que en la cima existen algunas "zonas de transición" debido a la mezcla del cemento y el fluido de perforación, causando que la sección cementada de la T.R. tome parte en los movimientos de deformación de la sección libre,

La parte superior de la tuberfa que se encuentra fija - es determinada por medio de "estirónes" en la sarta, donde el resultado es corregido por un factor n, derivado empíricamente de las mediciones magnéticas, y encontrándose que el valor de n entre los espacios anulares de las T.R's y T.R- pozo descubierto fueron de 1.05 a 1.06 y 1.08 a 1.10 respectivamente.

Es posible encontrar en la sección libre de la T.R. algunas deformaciones relativas en las tres direcciones:

$$\Delta E_r \neq 0, \quad \Delta E_\theta \neq 0, \quad \Delta E_{ax} \neq 0$$

Teniéndose que entre los dos puntos fijos de la tuberfa existe una limitación de movimientos dada por:

$$\Delta l = 10^{-6} \int_0^l E_{ax} dx = 0 \quad (10)$$

3. Condiciones de presión y temperatura durante el anclaje de la T.R.:

Durante el tiempo que tarda en fraguar el cemento la --

presión exterior que actúa sobre la T.R. decrece rápidamente (especialmente en la sección cementada), llegando a estabilizarse alrededor de los extremos de la tubería con un valor correspondiente a la presión de formación.

Se ha determinado que la temperatura del pozo es alterada durante la circulación y el fraguado del cemento.

Después de que el cemento ha fraguado se supone que la temperatura en el pozo llega gradualmente a la temperatura estática de la formación, durante este proceso la parte superior de la T.R. esta fría y la inferior empieza a calentarse teniendo en estas dos zonas una "sección termalmente neutra" que se podrá demostrar por mediciones de temperatura, y que la duración del proceso de reestabilización es menor de tres veces al tiempo de circulación.

Si el tiempo que tarda el cemento en fraguar es menor a 48 hrs. y si en este tiempo la temperatura original de la formación no se ha reestablecido, la temperatura de la sección libre de la tubería será calculada por el modelo relacionado a las condiciones no estáticas.

4. Efectos en los cambios de presión:

Después de haber terminado de anclar la tubería los cam

bios de presión que se presentarán afectarán la sección libre de la tubería, siendo generadas⁽¹¹⁾ algunas fuerzas reactivas axiales debido a la limitación de movimiento. Donde -- las fuerzas reactivas pueden ser expresadas como:

extremo cerrado:

$$F_{bp} = \pm (\pi \times 10^{-3}) [(\Delta P_i r_i^2 - \Delta P_{re}^2)(1 - 2\mu)] \quad (11)$$

extremo abierto:

$$F_b = \mp (2\pi \times 10^{-3}) \mu (\Delta P_i r_i^2 - \Delta P_{re}^2) \quad (12)$$

Se deberán realizar mediciones especiales para examinar el caso cuando la presión interna actúa sobre el anclado.

La interpretación de los datos medidos y su comparación con el modelo de cálculo, representado por las ecuaciones -- (11) y (12) muestran que los cálculos de la fuerza axial es generada por el efecto de la presión interna en la sección libre de la T.R., siendo realizada la combinación del efecto de "pistón" y "expansión" por la siguiente ecuación:

$$F_{bp} = - (\pi \times 10^{-3})(1 - 2\mu) r_i^2 \Delta P_{is} \quad (13)$$

donde

$$\mu = 0.27 \text{ (acero)}^{(11)}$$

y

$$2 r_i = d_i$$

entonces

$$F_{bp} = -3.611 \times 10^{-4} d_i^2 \Delta P_{is} \quad (14)$$

donde F_{bp} es una reducción del esfuerzo de compresión axial presente en el esfuerzo tensional original, $\Delta P_{is}=0$, es decir, la carga sobre la cabeza del pozo.

5. Efectos en los cambios de temperatura:

Debido a las condiciones geotérmicas anormales encontradas^(16,17) la selección de la carga de anclado es influenciada por los cambios de temperatura presentes después del anclaje de la T.R., especialmente en aquellos campos con altas relaciones de gas natural.

6. Procedimiento de anclado:

Dos formas diferentes de anclado fueron elaboradas utilizando los resultados de las mediciones realizadas, siendo una de ellas desarrollada en áreas de explotación, donde no se tienen datos básicos para el diseño, por lo que, en este caso la carga de anclado será determinada con respecto a las

condiciones de las altas producciones de gas natural.

En los casos en donde las áreas de producción son conocidas y se dispone de datos seguros para el diseño, la carga de anclado es determinada separadamente para cada operación sobre el siguiente criterio:

$$F_t \geq F_r + \min \Delta R \quad (15)$$

La práctica del anclado es una parte integral del diseño de la T.R., siendo la carga de anclado calculada por algunos datos anteriores al diseño de la tecnología de perforación, tal como: la cima de cemento deseada.

Cuando la T.R. es corrida y cementada, la longitud real de la sección libre es determinada al tensionar la sarta, mas sin embargo, si la longitud es obtenida de esta manera, los cálculos se deberán de repetir para determinar la carga final de anclado (los cálculos pueden realizarse por programas de cómputo o un nomograma).

Las mediciones realizadas estarán determinadas por las condiciones de producción del gas natural, siendo que si los cálculos de la carga de anclado no satisfacen los requerimientos de la resistencia de la T.R., entonces:

- . la T.R. deberá ser rediseñada.
 - . algún dispositivo para absorber la dilatación de la T. R. deberá de ser instalado en la sección libre.
 - . La T.R. deberá de ser cementada hasta la superficie.
7. Tiempo de Anclado de la T.R.:

Mediciones realizadas indicaron que la resistencia inicial del cemento al fraguar es suficiente para eliminar cualquier movimiento en la sección libre de la T.R. por lo que, el anclaje de la tubería puede ser realizado una o dos horas después de haber terminado la cementación.

Si al probarse el aislamiento con presión, inmediatamente después del anclaje de la T.R. donde el cemento es aún lo suficientemente elástico para permitir movimiento de expansión, se llegará a prevenir la formación de pequeños poros en la cementación (microanulares), manteniendo un sello hermético para el gas natural.

C A P I T U L O I V

COMO DISMINUIR LOS COSTOS DE CEMENTACION EN LA T.R. QUE SE -
CONSIDERAN TRABAJANDO BAJO EL EFECTO DE PANDEO.

Anualmente en la industria petrolera hay un gran incremento en los materiales y en los servicios de cementación, (18) así, los costos directos e indirectos aumentan a medida que la perforación se realiza en lugares alejados, donde los costos por la transportación de los materiales es parte importante en los costos de la cementación. No obstante el continuo desarrollo de los procesos, formulaciones y mecanismos de cementación ayudan a disminuir los costos en la terminación de pozos.

Experimentos realizados en donde la tubería fue sometida a esfuerzos de compresiones axiales más allá de su límite elástico han evaluado los efectos de los diferentes tipos de cemento. Esta tubería en la región de carga elástica y dentro de la plástica (máximo esfuerzo axial de 0.7%) no se pandeo al ser soportada por el cemento, más, sin embargo, experimentó un acortamiento irreversible uniforme.

Se ha encontrado que para las condiciones de campo el módulo real de elasticidad del medio cementado necesario para eliminar el pandeo de la T.R. es generalmente menor de lo es-

perado, por lo que, las operaciones de cementación resultan a costos mas bajos.

IV.1. MECANISMOS DE PANDEO.

Si bien, los criterios de pandeo en la T.R. son conocidos⁽¹⁹⁾, los dos casos mostrados en la figura 14 ilustran los conceptos más importantes del pandeo axial en tuberías no apoyadas lateralmente.

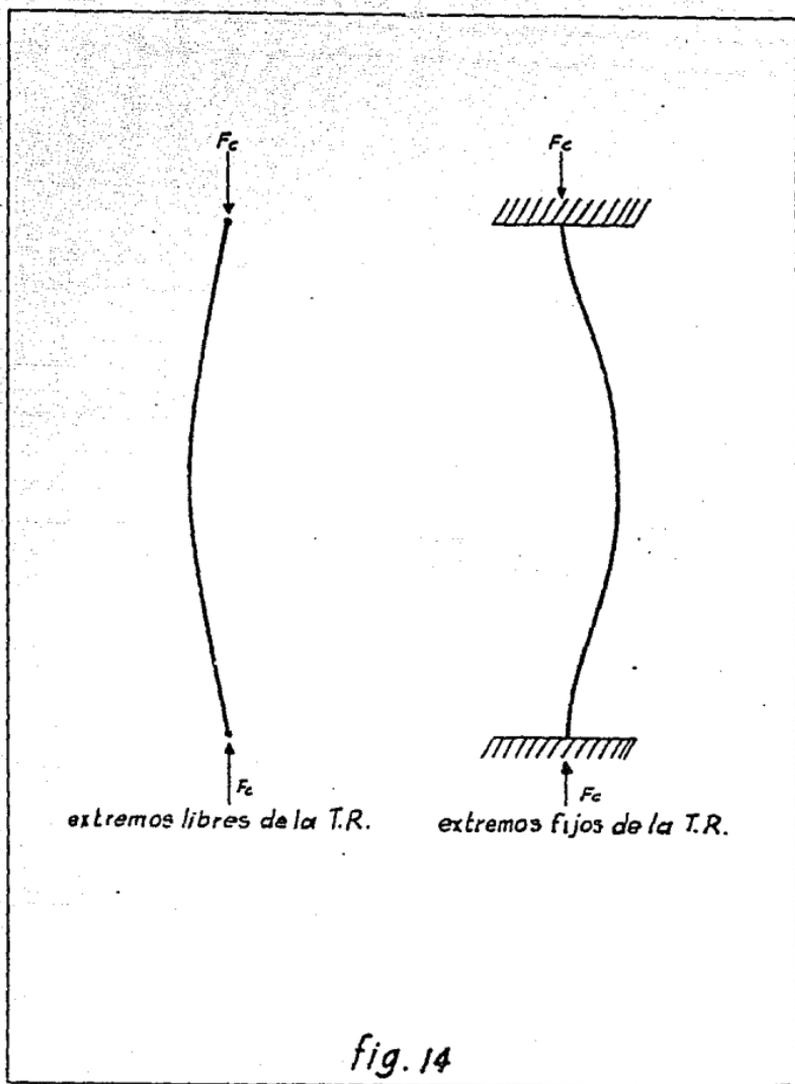
Si se tiene que los extremos de la tubería están libres (es decir, libres para girar, pero no hay movimiento lateral), la carga crítica sobre esta causará pandeo y estará dada por:

$$F_{C1} = \frac{\pi^2 E_p I}{144 L_p^2} \quad (16)$$

Cuando los extremos de la tubería están fijos (sin rotación libre ni movimiento lateral), la carga crítica sobre la tubería puede ser incrementada como lo muestra la ecuación:

$$F_{C2} = \frac{\pi^2 E_p I}{36 L_p^2} \quad (17)$$

Al ser la T.R. cubierta por el cemento o por derrumbes de sólidos dentro del pozo, el medio que rodea a la tubería ofrecerá restricciones a medida que está empieza a desviarse lateralmente, causando un incremento en la fuerza axial de



pandeo.

La fuerza crítica de pandeo puede ser representada gráficamente como se muestra en la figura 15⁽²⁰⁾, siendo esta solución teórica que para valores menores de la relación:

$$\frac{20736 L_p^4 B}{\pi^4 E_p I} \quad (18)$$

en secciones cortas de T.R. cementadas, la mínima fuerza de pandeo se presenta cuando la tubería es pandeada como una media onda senoidal. A medida que la relación (18) se incrementa, la fuerza mínima de pandeo puede ser manifestada cuando la tubería cementada es pandeada con múltiples medias ondas senoidales (figura 16).

Si la longitud de la tubería se incrementa más allá de su límite elástico, la fuerza de pandeo crítica asintótica es aproximada al mínimo valor por:

$$F_d = 2 \sqrt{E_p I B} \quad (19)$$

Ejemplo:

Considere el comportamiento elástico de una T.R. N-80, 13 3/8 pg, 72 lb/pie, con un módulo elástico del cemento de, $E_s = 20,000 \text{ lb/pg}^2$.

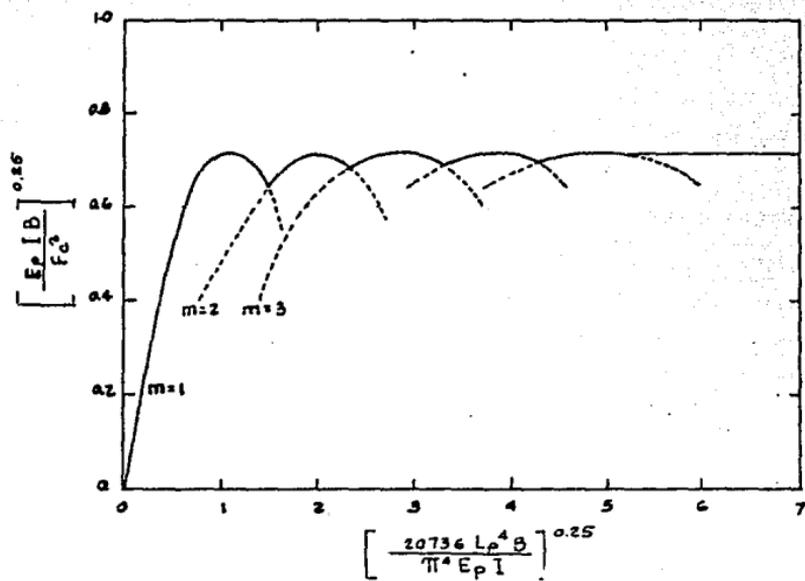
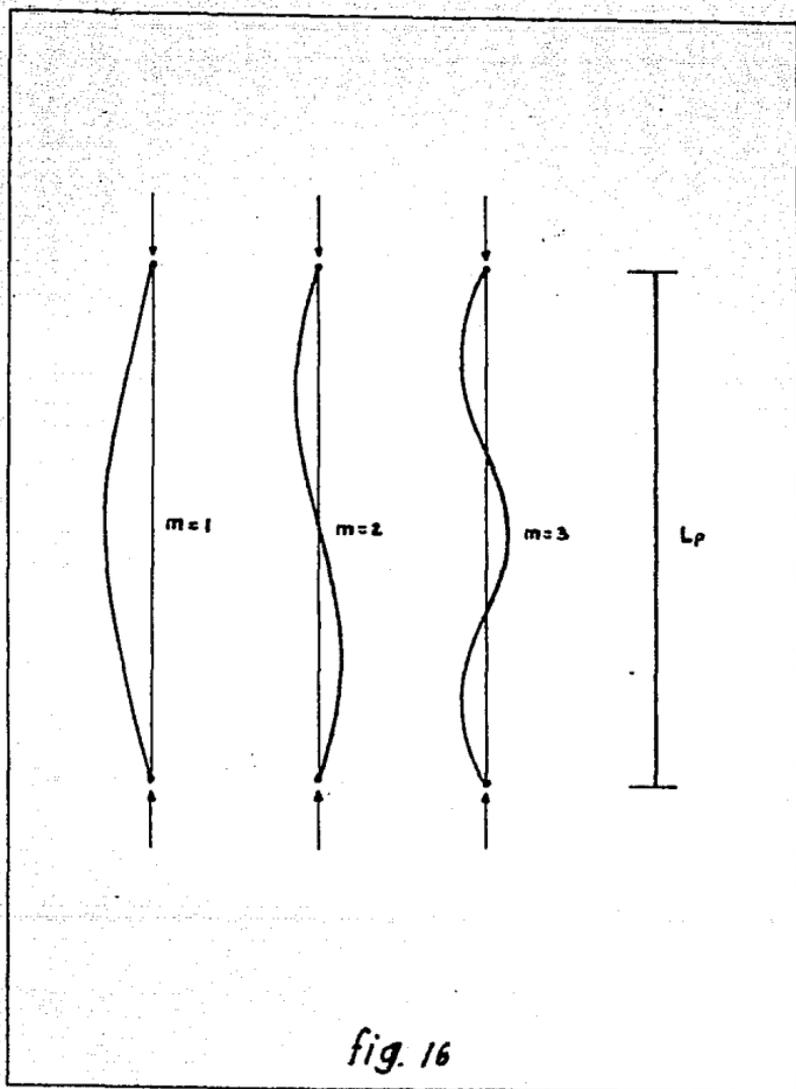


fig. 15

*fig. 16*

Se tiene que el momento de inercia para una sección transversal de la tubería es:

$$I = \frac{\pi}{4} (r_e^4 - r_i^4)$$

Siendo (ver las características físicas de la T.R.)

$$r_i = 6.173 \text{ pg. y } r_e = 6.687 \text{ pg.}$$

Sustituyendo:

$$I = \frac{\pi}{4} [(6.687)^4 - (6.173)^4]$$

$$I = 430 \text{ pg}^4$$

Por lo que:

$$\frac{\text{rigidez de la tubería}}{\text{rigidez media que rodea la T.R.}} = \frac{4 E_p I}{\pi r_e^4 E_s}$$

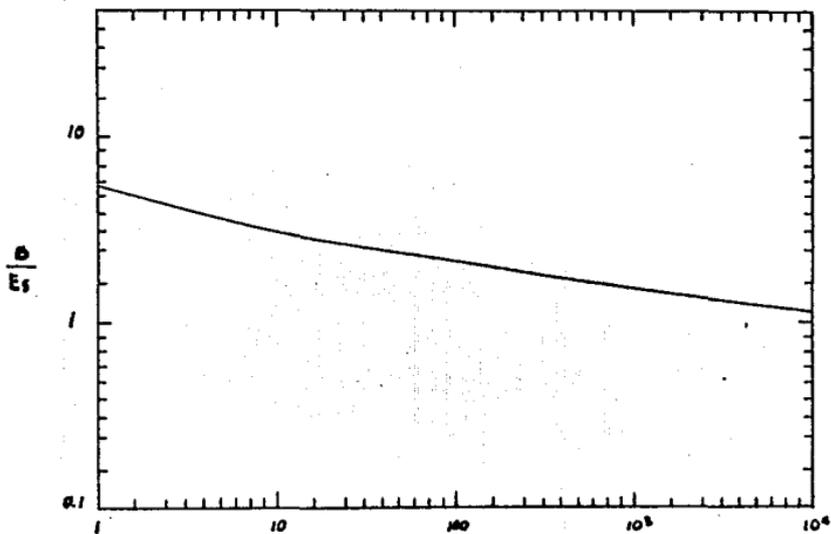
y donde el módulo de elasticidad de la tubería (E_p) es de $30 \times 10^6 \text{ lb/pg}^2$.

Sustituyendo:

$$\frac{4 (30 \times 10^6)(430)}{\pi (6.687)^4 (20,000)} = 410$$

Así mismo de la figura 17.

$$\frac{B}{E_s} = 2.1$$



$$\frac{\text{rigidez de la tubería}}{\text{rigidez media que rodea la T.R.}} = \frac{4 E_p I}{77 e^4 E_s}$$

fig. 17

Despejando B

$$B = (2.1)(20 \times 10^3) = 4.2 \times 10^4 \text{ lb/pg}^2$$

y de la ecuación (19)

$$F_d = 2\sqrt{E_p I B} = 2\sqrt{(30 \times 10^6)(430)(4.2 \times 10^4)}$$

$$F_d = 4.655 \times 10^7 \text{ lb}$$

donde este valor puede ser ajustado considerando los efectos de las presiones internas y externas (: 1,22).

$$F_d = 2\sqrt{E_p I B} + \frac{\pi}{4} (P_{de}^2 - P_{di}^2) \quad (20)$$

$$F_d = 4.654 \times 10^7 \text{ lb}$$

Esta fuerza del pandeo axial crítica, calculada del comportamiento elástico excede al esfuerzo de cedencia del acero N-80⁽²³⁾. El diagrama de esfuerzo - deformación del acero N-80 muestra que un esfuerzo axial de 0.70% causará que el espesor de la tubería entre a la región plástica (figura 18).

Estudios⁽¹⁹⁾ realizados han mostrado que el módulo reducido puede ser determinado del módulo elástico y el comportamiento no elástico del diagrama esfuerzo-deformación, donde el módulo reducido está situado entre los valores medios del módulo elástico y la pendiente de una línea tangente en la par

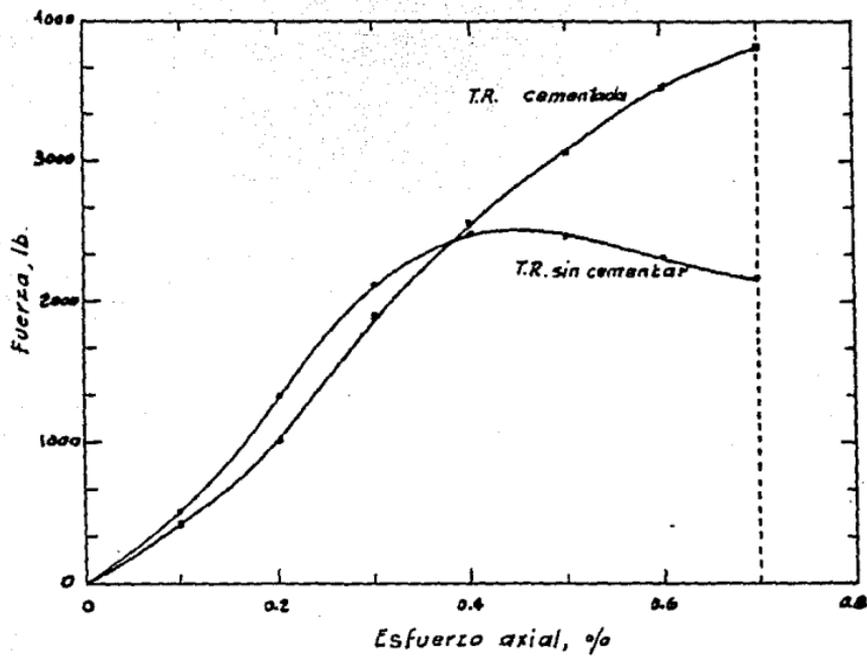


fig. 18

te no elástica del diagrama esfuerzo - deformación.

$$E_{\text{elástico}} \geq E_{\text{reducido}} \geq E_{\text{plástico}}$$

Así, otra limitación podría ser que el pandeo presente un módulo reducido igual a la de una línea tangente del diagrama esfuerzo-deformación, es decir, módulo plástico.

IV. 2. DESARROLLO MATEMATICO

Investigaciones⁽¹⁹⁾ realizadas han mostrado que la fuerza crítica de pandeo está dada por:

$$F_c = \frac{\pi^2 E_p I}{144 L_p^2} \left(m^2 + \frac{20736 B L_p^4}{m^2 \pi^4 E_p I} \right) \quad (21)$$

Donde los valores de m dependen de la relación (18) y dan la mínima fuerza de pandeo.

El valor que limita la relación (18) en la cual la primera sección de la T.R. pandeada tendrá un punto de inflexión a la mitad, será obtenido por la notación F en la ecuación (21), siendo la misma ecuación para $m=1$ y $m=2$:

Sustituyendo e igualando en (21).

$$1 + \frac{20736 B L_p^4}{\pi^4 E_p I} = 4 + \frac{5184 B L_p^4}{\pi^4 E_p I}$$

se tiene:

$$\frac{20736 \text{ BL}_p^4}{\pi^4 \text{ Ep I}} = 4 \quad (22)$$

Para una T.R. con muchas secciones pandeada la ecuación es obtenida de manera similar a la ecuación (22).

Por lo que:

$$m^2 + \frac{20736 \text{ BL}_p^4}{m^2 \pi^4 \text{ Ep I}} = (m+1)^2 + \frac{20736 \text{ BL}_p^4}{(m+1)^2 \pi^4 \text{ Ep I}}$$

se tiene:

$$\frac{20736 \text{ BL}_p^4}{\pi^4 \text{ Ep I}} = m^2 (m+1)^2 \quad (23)$$

A medida que la longitud de la tubería se incrementa, se tiene que a m le pasa lo mismo, por lo que, la ecuación -- (23) se reduce a:

$$\left(\frac{L_p}{m} \right)_1 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{\text{Ep I}}{B}} \quad (24)$$

Algunos estudios⁽²⁴⁾ llevados a cabo han mostrado las condiciones de pandeo para una varilla de longitud infinitamente elástica, donde los resultados están basados generalmente en términos de la derivación del momento de inercia y del área de la sección transversal. Además el término (ϵ^*) está relacionado a la longitud de la onda media pandeada (L_p/m), --

mostrada por:

$$\left(\frac{L_p}{m}\right)_1 = \frac{\pi r e}{12 \epsilon^*} \quad (25)$$

Otra forma de representar a la fuerza crítica del pandeo está dada por:

$$F_c = A_s E_p \delta^* \quad (26)$$

De estudios⁽²⁴⁾ realizados se tuvo que:

$$n = \frac{\epsilon^2}{4} - \Xi \frac{\psi_0 + \mu_0}{(1 + \mu) D} \quad (27)$$

dónde:

$$\epsilon = K r e$$

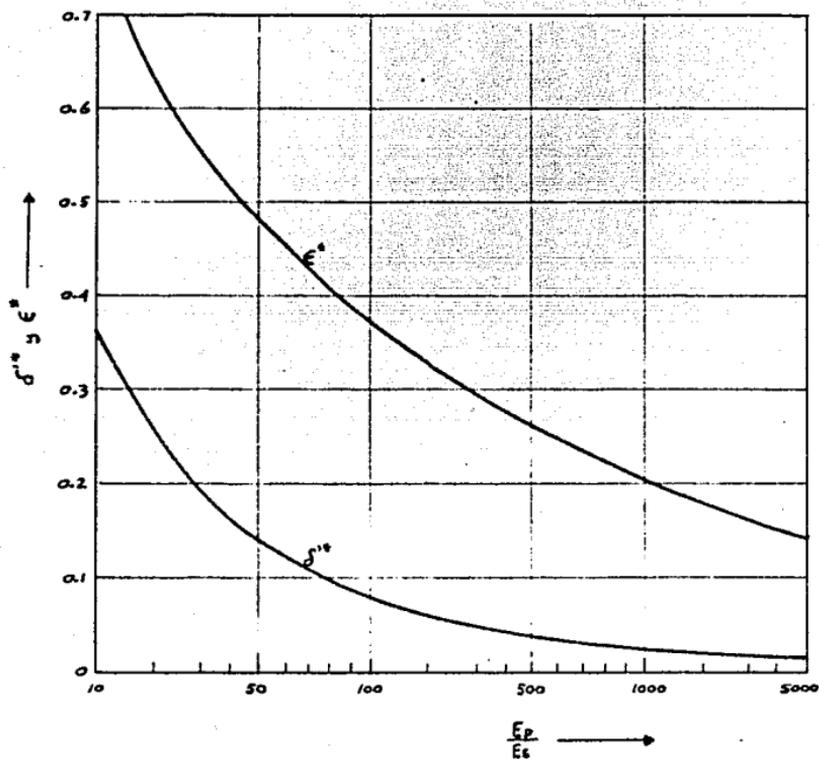
$$E_s = 2 G (1 + \mu)$$

$$\Xi = \frac{E_s \pi r e^4}{4 E_p I} \quad (28)$$

$$n = \frac{A_s r e^2 \delta^2}{4 I}$$

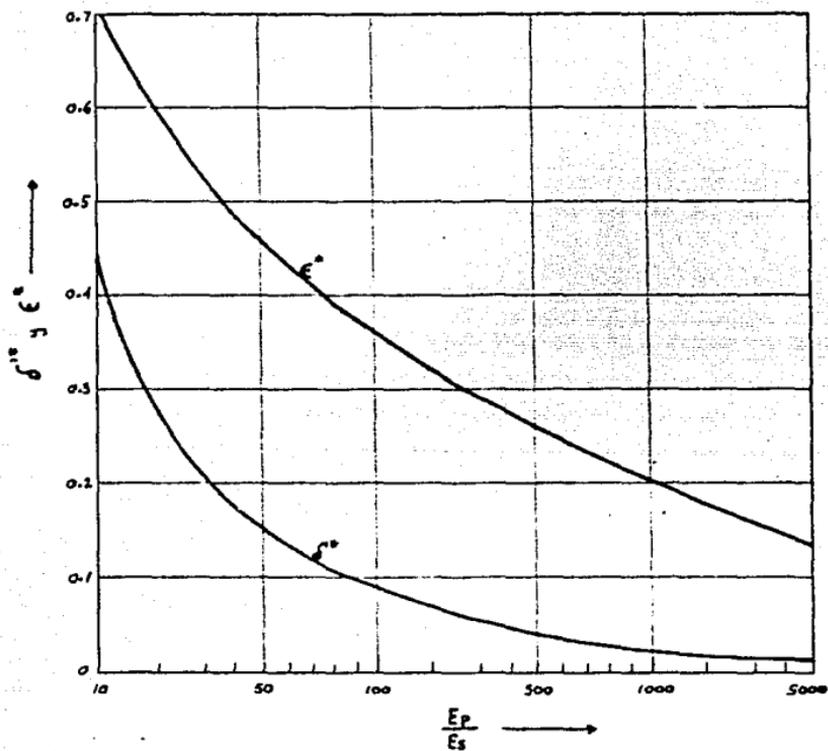
Teniéndose los valores críticos de pandeo (ϵ^* y n^*) -- evaluados numéricamente⁽²⁴⁾ (es decir, el mínimo valor de n con respecto a ϵ).

Los resultados mostrados en las figuras (19) y (20) son



Para $\mu = 0.4$ y $\beta = 0$

fig. 19



Para $\mu = 0.4$ y $B = 1$

fig. 20

válidos para la generalización de los casos si:

$$\frac{4 E_p I}{\pi r e^4 E_s} \quad \text{y} \quad \frac{1}{F}$$

son substituidos por el término (E_p/E_s) mostrado sobre las abscisas y si n^* se substituye por δ'^* .

Igualando F_c de las ecuaciones (21) y (26) y substituyendo en la ecuación (19) se tiene:

$$\frac{B}{E_s} = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\epsilon^{*4}}{E} \left(\frac{4n^*}{\epsilon^{*2}} - 1 \right) \right] \quad (29)$$

Donde esta ecuación se evaluó usando los resultados -- mostrados en la figura (20). La relación B/E_s es obtenida gráficamente de la figura (17).

C O N C L U S I O N E S

El efecto de pandeo en tuberías de revestimiento apoyadas en sus extremos, deberá evitarse empleando una fuerza de tensión de igual magnitud a la fuerza axial que por compresión originó dicho fenómeno.

Otra forma de evitarlo es cementando a la tubería de revestimiento en toda su longitud y si por efecto de densidades esta queda sujeta a compresión, deberá calcularse aquella presión que en equivalente de densidad iguale la fuerza de compresión para que la tubería quede rígida.

N O M E N C L A T U R A

As	Area de la sección transversal de la tubería, pg^2
B	Coefficiente de soporte lateral o fuerza de restricción lateral producida en un medio cementado por unidad de longitud de tubería por unidad de deflexión, lb/pg^2 .
C	Curvatura de la espiral, radian/pg
de	Diámetro exterior de la T.R., pg
di	Diámetro interior de la T.R., pg
DLS	Severidad de la pata de perro, grados/100 pies
Eax	Unidad de deformación axial, adm
Ep	Módulo de Young o de elasticidad de la tubería, lb/pg^2 .
Er	Unidad de deformación radial, adm
Es	Módulo de Young o de elasticidad del medio que rodea la T.R., lb/pg^2
E θ	Unidad de deformación tangencial, adm
F	Fuerza longitudinal (compresión +), lb
Fb	Fuerza axial debido al efecto de "expansión", lb

F _{bp}	Fuerza axial debido a la combinación de efectos de "expansión" y "pistón" (tensión -, compresión +), lb.
F _c	Fuerza crítica de pandeo, lb
F _{c₁}	Fuerza crítica de pandeo en tuberías no apoyadas lateralmente, con los extremos de la tubería libres para girar, lb.
F _{c₂}	Fuerza crítica de pandeo en tuberías no apoyadas lateralmente, con los extremos de la tubería fijos (sin rotación), lb.
F _d	Fuerza crítica de pandeo asintótica, lb.
F _H	Fuerza lateral sobre la junta, lb
F _L	Fuerza lateral sobre la T.R., lb.
F _r	Carga axial de la T.R. en la superficie en el momento de anclaje, lb.
F _t	Carga de anclado de la T.R., lb.
F _T	Fuerza de tensión en la tubería de perforación, lb.
G	Módulo de rigidez, lb/pg ²
G _{ax}	Esfuerzo en dirección axial, lb/pg ²
G _r	Esfuerzo en dirección radial, lb/pg ²

G_0	Esfuerzo en dirección tangencial, lb/pg^2
I	Momento de inercia de la tubería, pg^4
K	Constante de separación ⁽²⁴⁾ , adm'
L	Longitud de la T.R., pies
L_c	Longitud de contacto, pies
$\left(\frac{L}{m}\right)_1$	Longitud de onda media pandeada, en una tubería de longitud infinita, pies.
l_f	Longitud de la sección libre de la T.R., pies.
L_p	Longitud de ondas de pandeo, pies
L_1, L_2, L_3	Longitud de los fluidos en el anular de densidades ρ_1, ρ_2, ρ_3 , pies.
m	Número de secciones pandeadas en la T.R., adm.
$\min \Delta R$	Mínima fuerza de reacción debido a los cambios de presión y temperatura, después de anclar la tubería (tensión -, compresión +), lb.
N	Fuerza normal a la T.R. medida entre la línea de contacto de los lastrabarrenas y la T.R., lb.
N'	Longitud del intervalo pandeado, pies.
P	Longitud de la primera espiral en la sección pandeada, pies.

Pe	Presión exterior de la T.R., $1b/pg^2$
Pes	Presión exterior de la T.R. en la superficie, $1b/pg^2$
Pi	Presión en el interior de la T.R., $1b/pg^2$
Pis	Presión interior de la T.R. en la superficie, $\frac{1b}{pg^2}$
Pr	Presión requerida para producir una carga longitudinal nula en la zapata flotadora, $1b/pg^2$.
Ps	Presión en la superficie, $1b/pg^2$
R	Claro radial, pg.
re	Radio exterior de la T.R., pg
ri	Radio interior de la T.R., pg.
T.P.	Tubería de Producción.
T.R.	Tubería de Revestimiento
Δl	Elongación total en dirección axial, pies
ΔPe	Promedio de la presión exterior en la T.R. después del anclado, $1b/pg^2$.
ΔPi	Promedio de la presión interior en la T.R. después del anclado, $1b/pg^2$.
ΔPis	Promedio de la presión interior de la T.R. en la superficie, $1b/pg^2$.

ΔT	Diferencia de temperaturas, °F
ΔW	Diferencia de la carga por tensión, lb.
δ'	Contracción relativa de la tubería ⁽²⁴⁾ , adm
δ'^*	Valor crítico de δ' , adm
δ^*	Deformación crítica del pandeo axial, adm.
ϵ^*	Valor crítico de ϵ que reduce al mínimo δ' ⁽²⁴⁾ , adm
ρ_1	Densidad del fluido desplazado, lb/gal
ρ_1, ρ_2, ρ_3	Densidad de los fluidos en el anular, lb/gal
μ	Relación de Poisson, adm
η, ξ	Funciones potenciales ⁽²⁴⁾
μ, D, ν, η	Ver referencia ⁽²⁴⁾

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

- 1) Lubinski, A., Althouse, W.S. and Logan, J.L., "Helical Buckling of tubing Sealed in Packers", JPT, June 1962, pp. 665-670.
- 2) Goins, W.C., Jr, "Better Understanding Prevents Tubular Buckling Problems" World Oil, January 1980, pp.110-106, Feb. 1, 1980, pp. 35-40.
- 3) Stair, M.A. and McInturff, T.L., "Casing and Tubing Design Consideration for Deep Sour Gas Wells", IADC/SPE 11392, Drilling Conference, New Orleans, La., Feb. 20-23, 1983, pp. 287-300.
- 4) Hammerlindl, D.J., "Basic Fluid and Pressure Forces on Oil Well Tubulars", 53rd Annual Fall Meeting SPE, Houston, 1978.
- 5) Dellinger, Thomas B., "Preventing Instability in Partially Cemented Intermediate Casing Strings", 48 th Annual Fall Meeting SPE, Las Vegas, Nev., 1973.
- 6) Cook, C.E., Jr Klusk, M.P. and Medrano, R., "Annular pressure and temperature measurements diagnose cementing operations", IADC/SPE paper 11416, Feb. 20-23,

1983, pp. 465-470.

- 7) Farris, R.F., "Method for determining waiting on cement time", Trans. AIME, 165, 1946, pp. 175-188.
- 8) Shuh, F.J., Author's reply to Vladimir Edelberg, JPT, 1970 pp. 105-106 in reference "Failures in the bottom joints of surface and intermediate casing strings", JPT, January 1968, pp. 93.
- 9) Lindsey, H.E., Jr., McLarnan, C.W. and Nickel, J.A., "Determining clearance in helically buckled tubing", World Oil, June 1980, pp. 195-198.
- 10) Williamson, J.S., "Casing wear: The effect of contact pressure", JPT, December 1981, pp. 2382-2388.
- 11) DeHetre, J.P. Casing Landing Practice API Drilling and Production Practice, 1946.
- 12) Cox, W.R.: Key factors affecting landing of casing API Drilling and Production Practice, 1957, pp. 225-237.
- 13) Instrukcia po rescketo obsadnüh Jolonn dlfa neftiannüh i gazovük Skvazing, Kujbuskev, 1976, VNIIT neft. USSR.

- 14) Solov'yev, E.M.: Zakanchivanie Skvazcn, Izd-vo "Nedra" 1979, Moscow.
- 15) Arpási M: A BÉléscsooszlop feszültségi állá potának meghatározása mérésekkel, Koolaj - es Foldgáz. 14/114/ No. 8, 1981, Budapest.
- 16) Timoskenko, S.: Theory of Elastic Stability. Engineering Societies Monograph, McGraw Hill Book Company, 1936.
- 17) Alliquander, Ö: Rotary fűrás, Moszaki, 1968. Bp.
- 18) Report of the Cost Study Committee. Independent Petroleum Association of America. May. 6-8, 1979.
- 19) Timoshenko, S.P. and Gere. J.M. Theory of Elastic Stability Second Edition. Mc Graw-Hill. Book Co. Inc. New York (1961), 94.
- 20) Toakley, A. Raymond. "Buckling loads for elastically supported Strain". Journal of the Mechanics Division. proce., ASCE, 91. No. EM3 (June 1965) 205-231.
- 22) Chrisman, S.A. "Casing stresses caused by buckling of concentric pipes" SPE-AIME. 51st Annual Fall Technical

Conference and Exhibition. New Orleans. La. Oct. 3-6.
1976.

23) Weiner, P.D., Wooley G.R. J. Pet. Tech. 28, November
1976.

24) Sadowsky, M.A., Pu. SI, and Hussain, M.A. "Buckling of
microfibers" Journal of Applied Mechanics. AIME (Decem
ber 1967) 1011-1014.