

XIII Congreso Latinoamericano de Perforación  
11 al 14 de Noviembre de 2002 – Caracas, Venezuela

**Titulo :**        **Alternativas para Mitigar Roturas de Casing por Esfuerzos  
Tectónicos en el Yacimiento El Guadal - Argentina**

**Autores:**        Humberto Carrizo – Repsol-YPF Argentina.-  
Daniel Ghidina - Siderca S.A.I.C. Argentina.-  
Fabián Benedetto - Siderca S.A.I.C. Argentina.-

XIII Congreso Latinoamericano de Perforación  
11 al 14 de Noviembre de 2002 – Caracas, Venezuela

**Título : Alternativas para Mitigar Roturas de Casing por Esfuerzos Tectónicos en el Yacimiento El Guadal - Argentina**

Autores: Humberto Carrizo – Repsol-YPF  
Daniel Ghidina - Siderca S.A.I.C.  
Fabián Benedetto - Siderca S.A.I.C.

**I. Introducción**

El presente trabajo presenta un modelo de análisis para los posibles mecanismos de falla en tubulares sujetos a esfuerzos tectónicos, los cuales provienen del movimiento relativo entre diferentes capas litológicas del Yacimiento El Guadal.

La metodología de análisis aporta una herramienta de cálculo de fácil aplicación que permite comparar alternativas para la búsqueda de la mejor solución técnico – económica al problema.

Como hipótesis para evaluar en forma preliminar, se conoce de la literatura que la rotura de un elemento tubular por causas inherentes al terreno puede resultar de: a) Compactación del terreno, b) Terremotos o temblores, c) Domos de sal, d) Deslizamiento entre capas adyacentes.

Cualquiera fuera la causa, el mecanismo de falla, por lo general, resulta de una serie compuesta de numerosos factores, de todos modos, podemos distinguir (en forma general) 2 tipos diferentes de eventos: 1) Fallas debido a inestabilidad estructural del tubo (Pandeo) o, 2) Fallas por superar la resistencia del tubo (Colapso, Carga Axial, etc.).

De acuerdo a la información relevada en estudios previos de terreno, el problema en el Yacimiento El Guadal se origina debido al movimiento relativo entre capas de dos diferentes niveles, lo que genera un esfuerzo lateral de corte, provocando el aplastamiento del Casing con la rotura final del mismo.

En este trabajo se brinda un modelo de cálculo de manera de poder cuantificar los esfuerzos resultantes de la interacción que tenga la columna tubular con la formación, y se presentan para el análisis dos alternativas para la completación del pozo: Remediación con Casing “Heavy Wall” y Remediación con Casing Cementados concéntricamente

## **II.- Desarrollo**

La rotura de una tubería (casing) por causas inherentes al terreno puede resultar de:

- Compactación del terreno
- Terremotos o temblores
- Domos de sal
- Deslizamiento entre capas adyacentes

Cualquiera fuera la causa siempre es muy difícil determinar el mecanismo puro de falla dado que, por lo general, se trata de una serie compuesta de numerosos factores, pero podemos clasificar en forma generalizada en 2 tipos diferentes de eventos:

- Fallas debido a inestabilidad estructural del tubo (Pandeo) o,
- Fallas por superar la resistencia del tubo (Colapso, Carga Axial, etc.)

El problema en el Yacimiento El Guadal de Repsol-YPF se originaría debido al movimiento relativo entre capas, lo que genera un esfuerzo lateral de corte, provocando el aplastamiento del Casing y la rotura final del mismo. Tal como se imagina este fenómeno, a medida que la magnitud del desplazamiento se incrementa, el Casing tiende a penetrar o “indentar” a la formación en ambos lados de las capas adyacentes que se desplazan.

De acuerdo con esta hipótesis, gran parte del mecanismo de la falla va a depender del tipo de interacción que tenga la columna tubular con la formación, por lo que las características del terreno, la geometría del pozo, las condiciones del anular, etc., van a ser determinantes en el proceso.

De acuerdo a los datos obtenidos, las fallas se dan en una profundidad bien establecida, y ocurren en un período de tiempo que va desde lo 2 a los 4 años después de comenzar la inyección secundaria, también se ha observado que las fallas ocurren tanto en las uniones como en el cuerpo de la tubería y se han dado en intervalos con y sin cemento sobre la tubería.

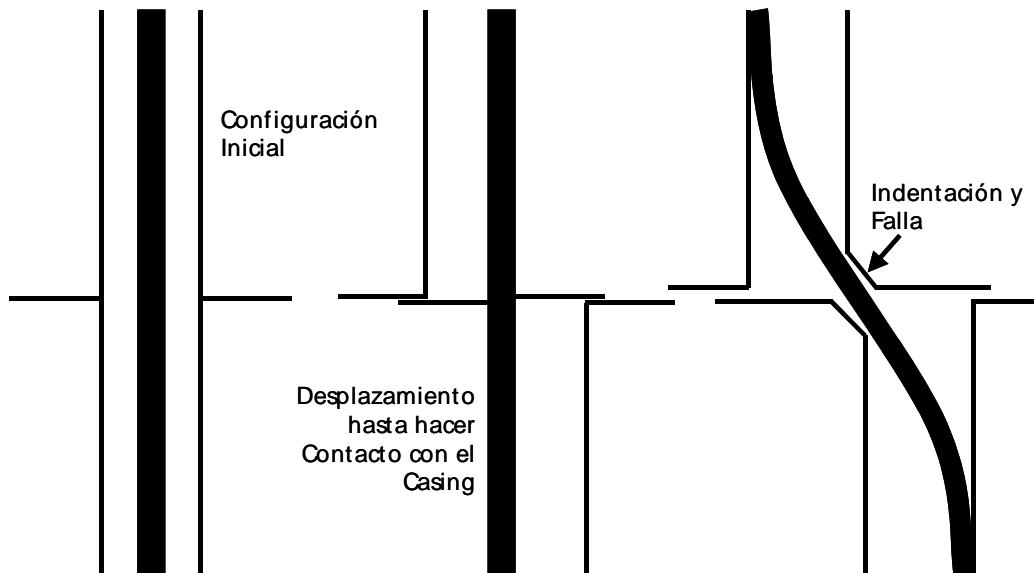
Una teoría es la existencia de altos esfuerzos en la zona de rotura. En un pozo nuevo se realizo perfil a pozo abierto para medir “breakout”, los valores medidos de esfuerzos horizontales no son altos, estimándose en una determinada profundidad que los esfuerzos horizontales máximos cambian de valor en aproximadamente un 40%. Otra teoría sobre el origen del movimiento relativo entre capas es que parte del fluido de recuperación secundaria haya influido en estas capas.

### **II.1. Hipótesis de Carga**

De acuerdo a la idealización que se presenta en el párrafo anterior, cuando la formación se mueve hacia la tubería, una parte de este desplazamiento va a ser requerida para establecer contacto con la misma, hasta este punto una fuerza casi despreciable se desarrolla sobre la tubería.

Una vez que la formación ha hecho contacto, la misma ejercerá una deformación elástica, luego plástica hasta la rotura, en cualquiera de los dos modos indicados anteriormente.

La **Figura 1** ilustra la situación física sobre la que se basa la hipótesis de carga. En la misma se puede apreciar al pozo en su configuración inicial, seguido de dos etapas en el desplazamiento de la formación. En este caso se supone que no hay cemento en el exterior de la tubería.



**Figura 1**

La configuración final idealiza la posición del Casing una vez que el mismo ha sido deformado, en donde la longitud afectada se extiende desde el plano de “deslizamiento de las formaciones hasta que el tubo retoma contacto con las paredes del pozo.

En la **Figura 2** se pueden apreciar los diagramas de carga con los que se modela la hipótesis planteada. Como se observa, se asume que la distribución de carga lateral en las inmediaciones del plano de corte es lineal, estos se simplifica en un esquema de carga representado por dos fuerzas opuestas generadoras del momento y el corte, siendo ésta una de las simplificaciones mayores de las hipótesis planteadas.

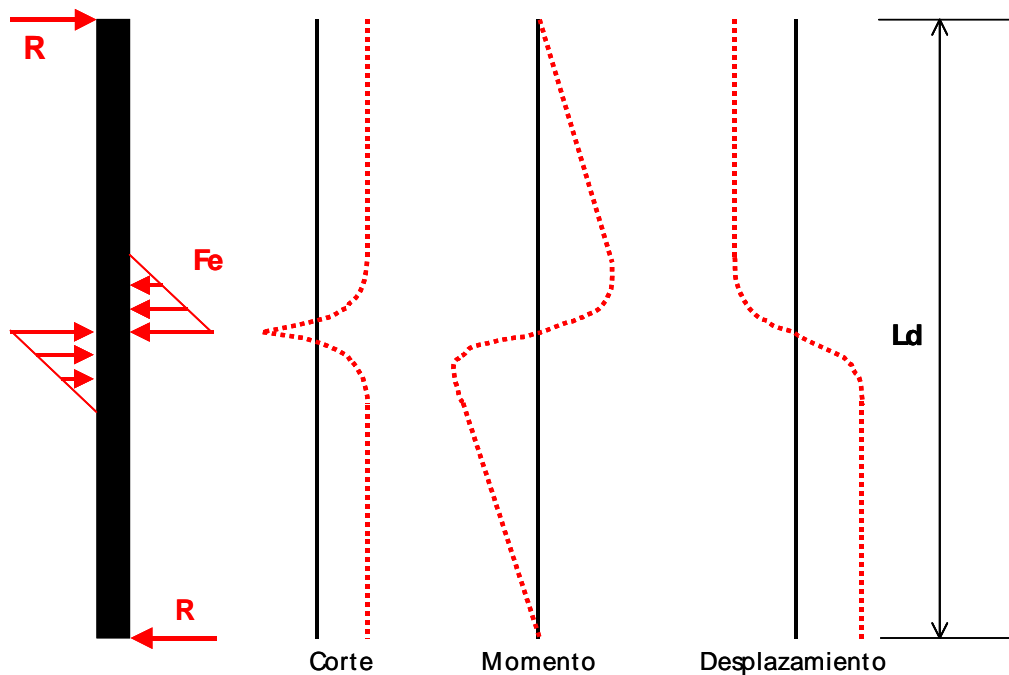


Figura 2

Esta representación es simplemente el caso de dos vigas unidas en el plano de desplazamiento, sujetas a un momento en el centro que va a reaccionar en los extremos, esto es en los puntos en los cuales la tubería se “recuesta” contra las paredes del pozo. La simplificación de las fuerzas aplicadas se observa en la **Figura 3**.

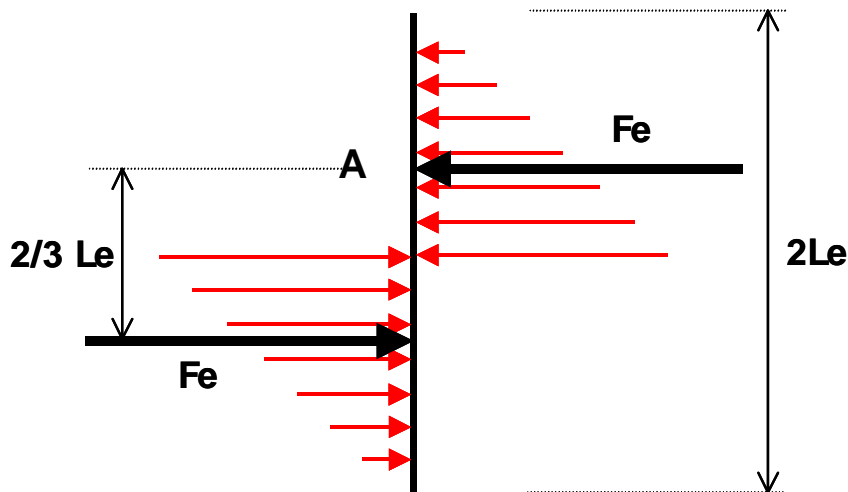


Figura 3

## II. 2. Hipótesis de Cálculo:

En el análisis realizado de acuerdo a las Fórmulas clásicas de Resistencia de Materiales, se consideran las variables (tales como  $P_i$ ,  $P_e$ , etc.) en la profundidad a la cual sucede la falla, llamada “ $L_c$ ”.

Como ya se ha mencionado, en primer lugar se plantea un caso más detallado el cual luego es idealizado con cargas puntuales para simplificar los cálculos.

Una vez simplificado el sistema, reemplazando la carga distribuida por dos cargas puntuales iguales y opuestas "Fe". Se realizan los siguientes cálculos:

$$F_e = P_{\text{formación}} * A$$

Donde:

$$A = L_e \times D_e$$

**Le** = Longitud afectada de la tubería

**De** = Diámetro externo de la tubería

**Di** = Diámetro interior de la tubería

**P formación** = Presión ejercida por la formación en la longitud afectada

Se puede ver en la **Figura 3**, que el máximo esfuerzo de corte y momento flector se da en el punto identificado como A, en dicha figura.

Análisis del **punto A**:

$$Mf_A = \frac{F_e * L_e}{3} - \frac{2 * F_e * L_e^2}{9 * L_d}$$

Donde:

**Ld** = Longitud en la cual el tubo no contacta con las paredes del pozo

Si se analiza la sección del tubo en el punto A de la columna se tendrá una sección anular. Si de esta sección anular se toman dos puntos a estudiar, ambos con el momento flector máximo pero uno en la fibra interior y el otro en la fibra más externa:

**Fibra externa:**

$$\sigma_x = \sigma_{F.\text{axial}} + \sigma_{Mf}$$

Donde:

$$\sigma_{F.\text{axial}} = \frac{4 * F.\text{axial}}{\pi * (D_e^2 - D_i^2)}$$

$$\sigma_{Mf} = \frac{Mf * D_e}{2 * I}$$

$$I = \frac{\pi * (D_e^4 - D_i^4)}{64}$$

F axial = Fuerza axial que soporta la tubería en la sección considerada

$$\sigma_y = \frac{2 * P_i * D_i^2 - P_e * (D_e^2 + D_i^2)}{(D_e^2 - D_i^2)}$$

Donde:

**P<sub>i</sub>** = Presión interna a la cual está sometido el tubo en la sección comprometida

**P<sub>e</sub>** = Presión externa isostática a la cual está sometido el tubo en la sección comprometida

$$\sigma_z = -P_e$$

$$\tau_{zx} = \frac{4 * F_e}{\pi * (D_e^2 - D_i^2)}$$

**Fibra interna:**

$$\sigma_x = \sigma_{F.axial} + \sigma_{Mf}$$

Donde:

$$\sigma_{F.axial} = \frac{4 * F.axial}{\pi * (D_e^2 - D_i^2)}$$

$$\sigma_{Mf} = \frac{Mf * Di}{2 * I}$$

$$I = \frac{\pi * (D_e^4 - D_i^4)}{64}$$

**F axial** = Fuerza axial que soporta la tubería en la sección considerada

$$\sigma_y = \frac{P_i * (D_e^2 + D_i^2) - 2 * P_e * D_e^2}{(D_e^2 - D_i^2)}$$

Donde:

**P<sub>i</sub>** = Presión interna a la cual está sometido el tubo en la sección comprometida

**P<sub>e</sub>** = Presión externa isostática a la cual está sometido el tubo en la sección comprometida

$$\sigma_z = -P_i$$

$$\tau_{zx} = \frac{4 * Fe}{\pi * (De^2 - Di^2)}$$

Con estos valores de esfuerzos en las direcciones principales x, y, z, y en la dirección del esfuerzo de corte; calcularemos dos tensiones equivalentes (una para la fibra exterior y otra para la fibra interior).

La formula de la tensión equivalente es la siguiente:

$$\sigma_{equiv.} = \sqrt{0.5 * ((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 * \tau_{zx}^2)}$$

Luego se comparan con el limite de fluencia. “Si la tensión equivalente en la fibra externa o interna es mayor o igual al limite de fluencia, la tubería fallará”. En el Anexo se observa un Ejemplo de Cálculo y se adjunta una planilla electrónica para Facilitar los mismos.

### II.3. Alternativas para el Análisis Técnico:

Con el objetivo de analizar y comparar diferentes alternativas que permitan mitigar el problema que propone El Guadal, se presentan a continuación los tópicos que, a nuestro entender, conducen a encontrar la mejor configuración para los pozos futuros.

#### II.3.1. Modos de falla:

De acuerdo a la revisión bibliográfica y las ecuaciones básicas de Resistencia de Materiales, el Colapso de la tubería ocurre antes que cualquier otro modo de falla, por lo tanto, para estos casos la capacidad del pozo de sustentar a la formación va a estar dada por la resistencia al colapso de las tuberías.

##### II.3.1.1. Efecto de Cementar (o no) el Espacio Anular entre Pozo y Casing:

Uno de los punto relevantes que merece ser profundizado es la evaluación de la estructura tubular cementada o no, esto es: provee el cemento resistencia adicional al Casing frente a cargas tan importantes? o por el contrario el cemento acopla el tubo a la formación, forzándolo a recibir la carga de las capas mas anticipadamente? La ventaja de cementar o no a la tubería es uno de los puntos interesantes.

En caso de ser necesario cementar se debe usar un cemento que sea capaz de absorber los esfuerzos planteados, los cementos que cumplen con estas características tienen alta resistencia a la compresion y bajo modulo de Young.

$$\sigma = E.\varepsilon$$



$E$  = Modulo de elasticidad de Young

$\sigma$  = Tensión generada por deformacion relativa

$\varepsilon$  = Deformación relativa

Estos cementos son mas “elasticos” ya que con su bajo modulo de Young soportan mayor deformacion para generar una misma tension que un cemento estandard.

### **II.3.1.2. Efecto de Incrementar el Diámetro del Pozo:**

Análogamente a la cuestión planteada anteriormente, se deberá evaluar la ventaja de incrementar el diámetro del pozo ya que: si la tubería se cementa el anillo de cemento sería mas grande y, por el contrario, si la tubería no se cementa existe un mayor “gap” para que la formación se desplace antes de alcanzar al tubo.

El incremento del anular y el uso de lechadas cementadoras como la planteada anteriormente, mejoran la durabilidad del sistema tubería-cemento. Como se mencionó, para este tipo de cementos la deformacion relativa que soportan es mayor para alcanzar la tension de rotura. Despues de la rotura del cemento la formacion comienza a actuar sobre la tubería.

### **II.3.1.3. Incrementar la Tensión de Fluencia del Acero:**

Uno de los puntos beneficiosos es contar con una tubería cuyo límite de fluencia para el material sea lo mas grande posible. En ese mismo sentido una acero con gran tenacidad también sería beneficioso.

### **II.3.1.4. Incrementar el diámetro y la sección de la tubería:**

Dado que la resistencia al esfuerzo se va a ver directamente influenciada por el Momento de Inercia de la columna, es pertinente evaluar el beneficio de incrementar el diámetro y la sección de la tubería.

## **II.4. Ejemplo de Aplicación (Ver Anexo 1)**

Datos:

**Ld** = longitud de no contacto con el pozo(m): 10

**Le** = longitud de contacto y deformación (m): 1

**Pf** = presión ejercida por la formación en movimiento (Kg/mm<sup>2</sup>): 0.5

**De** = Diametro externo (mm): 139.7

**Di** = Diametro interno (mm): 125.7

**Fa** = Carga axial en la profundidad Lc (Kg): 12000

**Pi** = Presión interna en la profundidad Lc (Kg/mm<sup>2</sup>): 0

**Pe** = Presión externa en la profundidad Lc (Kg/mm<sup>2</sup>): 0.5

(**Lc** es la profundidad del pozo a la cual se manifiesta el problema)

Con estos resultados la tensión generada en la fibra interna del Casing 5 ½" es de **223 Kg/mm<sup>2</sup>**, es decir 6.36 veces mas que la Fluencia mínima del tubo asumiendo acero K55.

#### **II.4.1. Posibles soluciones**

##### **II.4.1.1.- Alternativa de Casing y Liner cementados concéntricamente:**

Para la misma hipótesis de carga anterior, con Casing 7" 32# y Liner 5" 18# cementados concéntricamente, la tensión generada en la fibra interna del Casing interno se reduce a 60.4 Kg/mm<sup>2</sup>.

##### **II.4.1.2.- Alternativa de Casing "Heavy Wall" 6 5/8" x 0.875":**

En este caso de tubería simple de pared gruesa, la tensión en la fibra interna de la misma será de 62 Kg/mm<sup>2</sup>

#### **III. Conclusiones**

Las dos alternativas evaluadas técnicamente disminuyen las tensiones generadas sobre la tubería aproximadamente en tres veces con respecto al tubo de 5.1/2" 15.5#, además se observa que las tensiones generadas en las dos alternativas analizadas, en la fibra interna son bastante similares. Teniendo en cuenta esto y para no cambiar el diseño de pozo la alternativa del uso de tubería "Heavy Wall" en la zona del pozo con problemas, tiene las siguientes ventajas:

- Construcción del pozo: Los pozos de la zona poseen un diseño de tubería guía de 9.5/8" y tubería de producción de 5.1/2". El uso de "Heavy Wall" de 6.5/8" modificaría levemente la forma de construir el pozo, ensanchando la zona. Este aumento del anular también ayuda a soportar mejor los esfuerzos de corte. Todo esto sin cambiar los diámetros de la tubería guía y solamente ensanchando la zona de problemas después del perfil de pozo abierto.
- Forma del Pozo: El pozo perforado no produce un cambio que afecte a los sistemas de extracción e inyección, ya que el ID del "Heavy Wall" de 6.5/8" es similar al de 5.1/2" usado actualmente.
- Realizado el análisis de costos en la etapa de perforación, se observó que este cambio representa un aumento del aproximadamente el 20% en el costo total, sin afectar los costos de terminación y equipamiento del pozo.

## Anexo 1:

### Planillas de Cálculo

#### Cálculo de la tensión equivalente para Tubo Simple

Debe ser comparada con la tensión de fluencia del material del tubo.

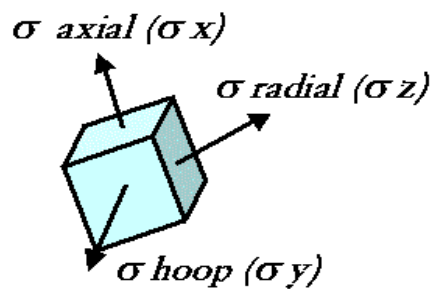
| Datos  |       |
|--|-------|
| Ld = longitud de no contacto con el pozo(m)                                | 10    |
| Le = longitud de contacto y deformación (m)                                | 1     |
| Pf = presión ejercida por la formación en movimiento (Kg/mm <sup>2</sup> ) | 0.5   |
| De = Diametro externo (mm)   | 139.7 |
| Di = Diametro interno (mm)   | 125.7 |
| Fa = Carga axial en la profundidad Lc (Kg).                                | 12000 |
| Pi = Presión interna en la profundidad Lc (Kg/mm <sup>2</sup> )            | 0     |
| Pe = Presión externa en la profundidad Lc (Kg/mm <sup>2</sup> )            | 0.5   |

Lc es la profundidad del pozo a la cual se manifiesta el problema

| Resultados en la fibra externa del Tubo |           |
|---|-----------|
| A(mm <sup>2</sup> )=                    | 139700.00 |
| Fe(Kg)=                                 | 69850.00  |
| Mf(Kgm)=                                | 21731.11  |
| sx(Kg/mm <sup>2</sup> )=                | 239.76    |
| sz(Kg/mm <sup>2</sup> )=                | -0.50     |
| sy(Kg/mm <sup>2</sup> )=                | -4.75     |
| txz(Kg/mm <sup>2</sup> )=               | 23.94     |
| svm2(Kg/mm <sup>2</sup> )=              | 60485.32  |
| svm(Kg/mm <sup>2</sup> )=               | 245.94    |

| Resultados en la fibra interna del Tubo |           |
|---|-----------|
| A(mm <sup>2</sup> )=                    | 139700.00 |
| Fe(Kg)=                                 | 69850.00  |
| Mf(Kgm)=                                | 21731.11  |
| sx(Kg/mm <sup>2</sup> )=                | 216.15    |
| sz(Kg/mm <sup>2</sup> )=                | 0.00      |
| sy(Kg/mm <sup>2</sup> )=                | -5.25     |
| txz(Kg/mm <sup>2</sup> )=               | 23.94     |
| svm2(Kg/mm <sup>2</sup> )=              | 49601.69  |
| svm(Kg/mm <sup>2</sup> )=               | 222.71    |

Para ver referencias de los cálculos realizados ver archivo adjunto.



### Cálculo de la tensión equivalente para Tubos Concentricos

Debe ser comparada con la tensión de fluencia del material del tubo.

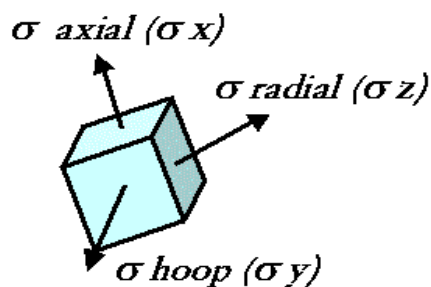
| Datos  |       |
|--|-------|
| Ld = longitud de no contacto con el pozo (m)                               | 10    |
| Le = longitud de contacto y deformación (m)                                | 1     |
| Pf = presión ejercida por la formación en movimiento (Kg/mm <sup>2</sup> ) | 0.5   |
| Dee = Diametro externo del tubo externo (mm)                               | 177.8 |
| Die = Diametro interno del tubo externo (mm)                               | 154.8 |
| Dei = Diametro externo del tubo interno (mm)                               | 127   |
| Dii = Diametro interno del tubo interno (mm).                              | 108.6 |
| Fa = Carga axial en la profundidad Lc (Kg).                                | 12000 |
| Pi = Presión interna en la profundidad Lc (Kg/mm <sup>2</sup> )            | 0     |
| Pe = Presión externa en la profundidad Lc (Kg/mm <sup>2</sup> )            | 0.5   |

(Lc es la profundidad del pozo a la cual se manifiesta el problema)

| Resultados en la fibra externa del tubo externo |           |
|---|-----------|
| A (mm <sup>2</sup> ) =                          | 177800.00 |
| Fe (Kg) =                                       | 88900.00  |
| Mf (Kgm) =                                      | 27657.78  |
| sx (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                      | 92.98     |
| sz (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                      | -0.50     |
| sy (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                      | -1.10     |
| txz (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                     | 9.44      |
| svm2 (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                    | 9062.50   |
| svm (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                     | 95.20     |

| Resultados en la fibra interna del tubo interno |           |
|---|-----------|
| A (mm <sup>2</sup> ) =                          | 177800.00 |
| Fe (Kg) =                                       | 88900.00  |
| Mf (Kgm) =                                      | 27657.78  |
| sx (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                      | 57.29     |
| sz (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                      | 0.00      |
| sy (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                      | -1.60     |
| txz (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                     | 9.44      |
| svm2 (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                    | 3643.62   |
| svm (Kg/mm <sup>2</sup> ) =                     | 60.36     |

En este cálculo se consideran dos tubos concéntricos unidos por cemento, el cual se considera solo como posicionador, es decir se ignora su presencia como elemento resistente con el fin de hacer los cálculos más conservativos.



## Anexo 2

### Teoría de la viga sometida flexión

Para obtener los diagramas de “Mf” (momento flector) y de “Q” (esfuerzo de corte) de la columna tubular en la zona crítica, consideramos a la misma como una viga y evaluaremos un caso de carga que represente los esfuerzos que toman magnitud en este problema.

En este caso la viga tiene una sección anular, donde su momento de inercia respecto a los ejes transversales es:

$$I_x = I_y = \frac{\pi * (\phi_e^4 - \phi_i^4)}{64}$$

La teoría de la viga desarrollada en la bibliografía [1], y en otras consultadas, llegan a la siguiente conclusión: “...la fuerza cortante es, en efecto, la derivada del momento flector respecto a la longitud de la viga. La derivada de la fuerza cortante es igual a la intensidad de la carga distribuida exterior. ...”. Es decir:

$$\frac{dQ}{dx} = q \quad ; \quad \frac{dMf}{dx} = Q$$

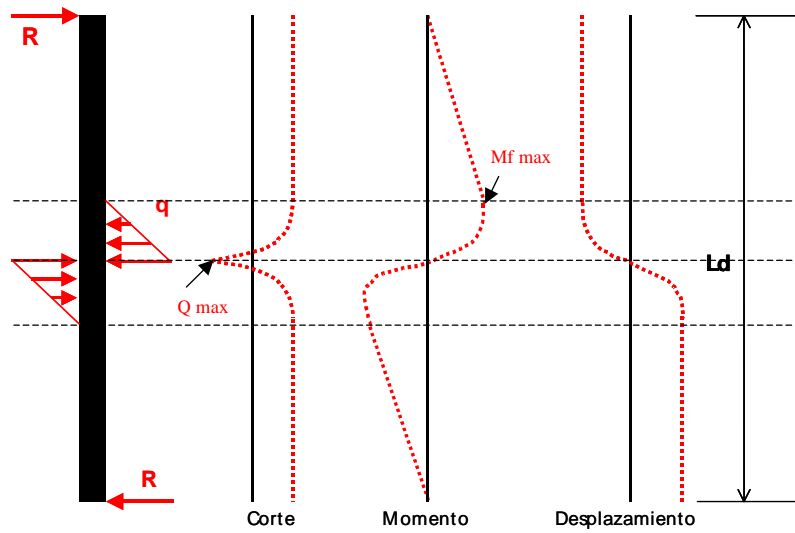
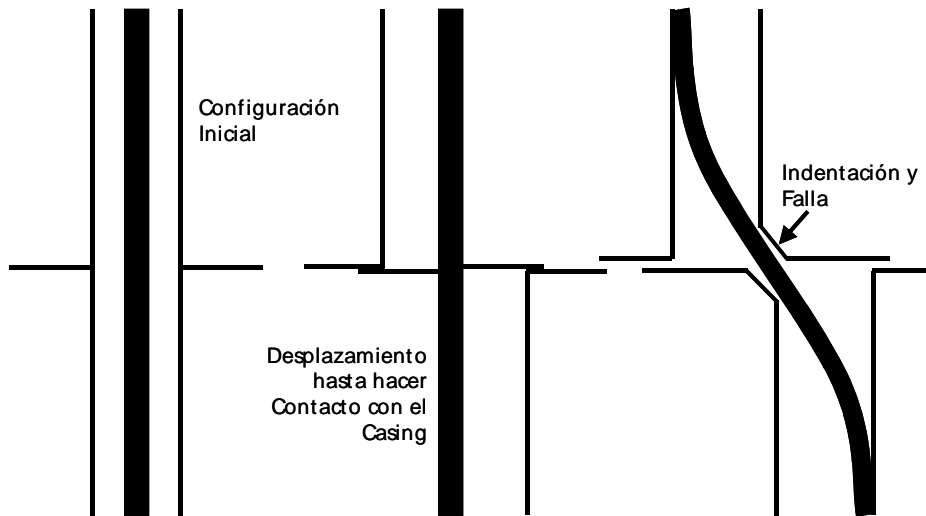
Donde:

q = Carga distribuida.

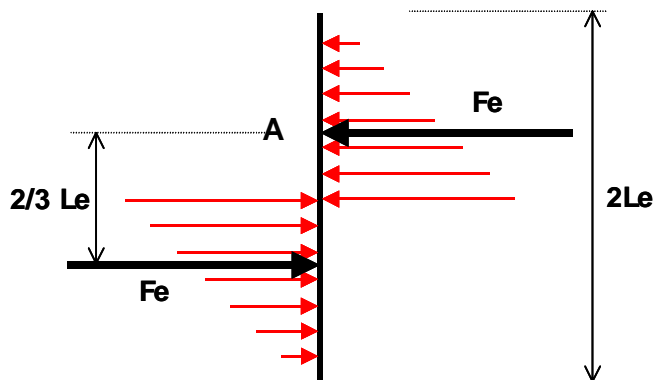
Q = Esfuerzo de corte.

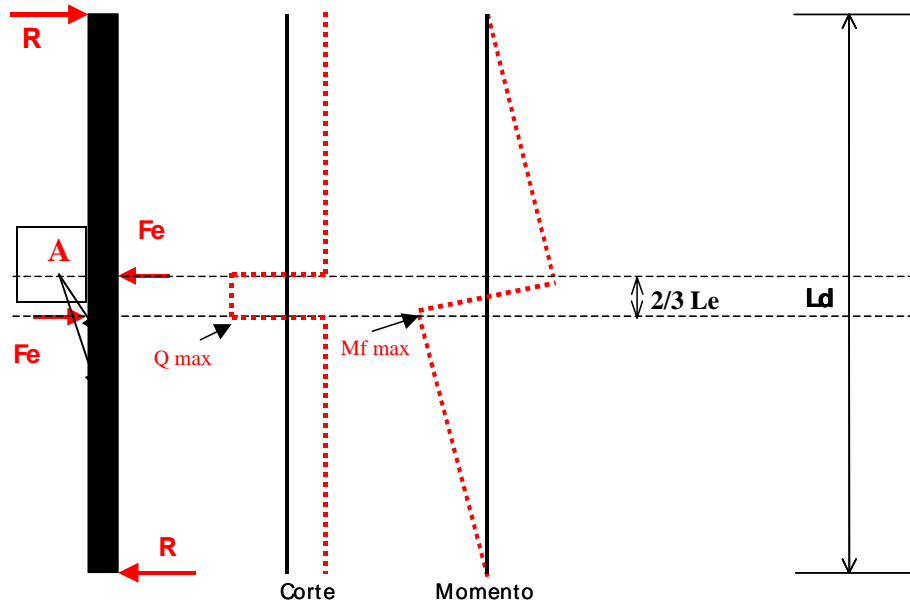
Mf = Momento flector.

Así pues, si consideramos nuestro problema de corte de tubulares, analizando la deformación del tubo y la acción contra él de la formación, podemos estudiar un caso de carga que tenga dos cargas distribuidas opuestas. El análisis es el que a continuación se detalla:



Con el objeto de simplificar el problema reemplazamos la carga distribuida por dos cargas puntuales “Fe”, llegando los siguientes diagramas:





Con esta simplificación, se puede observar que los puntos A de la última figura, son aquellas zonas de la viga sometidas a máximos esfuerzos de corte y máximos momentos flectores. Es debido a esto que el estudio de tensiones a las cuales está sometido el tubo se realizará en dichos puntos que son simétricos, es decir, están sometidos a iguales esfuerzos.

Bibliografía:

1. Resistencia de Materiales; V. I. Feodosiev; Editorial Mir 1972.
2. Deformation and Fracture of Solids; R. M. Caddell; Prentice-Hall. Inc. 1980.
3. Geomechanical Analysis and Decision Analysis for Mitigating Compaction Related Casing Damage; SPE 71695
4. Casing Shear: Causes, Cases, Cures; SPE 72060