

**DISEÑO MECÁNICO DE REVESTIDOR SUPERFICIAL,
REVESTIDOR INTERMEDIO, CAMISA Y TIE BACK
INTERMEDIOS.**

a) Máximas cargas de estallido:

Para sartas superficiales e intermedias se toman en cuenta dos posibles casos de máxima carga de estallido: *Prueba de presión* y *arremetida de gas*. Por lo general, las cargas de la prueba de presión son más severas que las cargas de la arremetida de gas, además, estas últimas son más difíciles de generar y por lo tanto se pueden omitir en la mayoría de los pozos. Sin embargo, en los pozos críticos sí se deberían considerar las cargas de las arremetidas de gas. A continuación se describen ambos casos.

- **Prueba de Presión de la sarta de tubería de revestimiento cementada.**

Las cargas para la prueba de presión de los revestidores superficial e intermedio se determinan de la misma manera que las del conductor.

NOTA: Si una sarta tiene una o más camisas colgando de ella, se generan múltiples casos de prueba de presión: uno para la profundidad de la zapata de la sarta de tubería de revestimiento y los demás para las profundidades de las zapatas de cada camisa.

Perfil de Presión Interna

Profundidad (pies)	Presión (lpc)	
Superficie (0)	$P_{\text{sup}} = P_{\text{fondo}} - 0,052 \cdot D_{\text{L baj}} \cdot \text{Prof}_T$	
Fondo (Prof_T)	$P_{\text{fondo}} = P_{\text{frac}} + (0,052 \cdot 0,2 \cdot \text{Prof}_T)$	Para pozos en desarrollo.
	$P_{\text{fondo}} = P_{\text{frac}} + (0,052 \cdot 0,5 \cdot \text{Prof}_T)$	Para pozos exploratorios.

Perfil de Presión Externa

Profundidad (pies)	Presión (lpc)
Superficie (0)	$P_{\text{sup}} = 0$
Fondo (Prof_T)	$P_{\text{fondo}} = P_{\text{poro}}$

Posteriormente, se calculan los perfiles resultante y de diseño para cada profundidad de interés:

Perfil de Presión Resultante ($P_{\text{int}} - P_{\text{ext}}$)

Profundidad (pies)	Presión (lpc)
Superficie (0)	$P_{R \text{ sup}} = P_{\text{int sup}} - P_{\text{ext sup}}$
Fondo (Prof_T)	$P_{R \text{ fondo}} = P_{\text{int fondo}} - P_{\text{ext fondo}}$

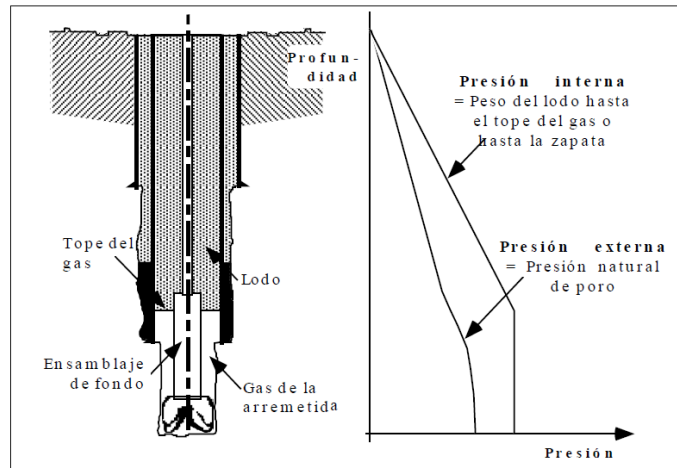
Perfil de Presión de Diseño ($\text{FD} = 1,1$)

Profundidad (pies)	Presión (lpc)
Superficie (0)	$P_{D \text{ sup}} = P_{R \text{ sup}} * 1,1$
Fondo (Prof_T)	$P_{D \text{ fondo}} = P_{R \text{ fondo}} * 1,1$

A continuación, se representan los valores de presión de diseño, a nivel de superficie y fondo, en una gráfica de Prof. vs. Presión y se unen dichos puntos para formar una línea recta.

- **Arremetida de gas.**

Para los pozos en desarrollo se considera una arremetida de gas de 50 bbl. a 0,5 lpg. y para los pozos exploratorios de 100 bbl. a 1 lpg., teniendo lugar cuando la perforación ha alcanzado la profundidad de asentamiento del próximo revestidor.



Esta arremetida, junto con el lodo de perforación utilizado para perforar el siguiente hoyo, genera el perfil de presión interna. Por otro lado, el perfil de presión externa está dado por la presión natural de poro.

NOTA: Se pueden generar múltiples casos de arremetida de gas cuando la sarta o sartas siguientes son camisas intermedias.

Para generar el perfil de presión interna de este caso de carga hay que verificar dos puntos críticos: i) la posibilidad de que haya fractura de la formación en la zapata y ii) la altura del tope de gas. A continuación se explica cómo se calculan estos valores.

La altura de la arremetida de gas depende del programa del revestidor, del tamaño del hoyo, del ensamblaje de fondo y la sarta de perforación.

La información acerca del ensamblaje de fondo y la sarta de perforación puede estimarse utilizando las siguientes tablas:

Tamaño del hoyo (pulg)	Diámetro externo de los portamechas (pulg)	Longitud del ensamble de fondo (pies)	
		En tierra	Costa afuera
$H < 3,750$	No se usa	-	-
$3,750 \leq H \leq 4,750$	3,5	800	400
$4,750 < H \leq 5,875$	4,125	800	400
$5,875 < H \leq 7,000$	4,75	800	400
$7,000 < H \leq 8,750$	6,75	600	300
$8,750 < H \leq 10,625$	8	600	300
$10,625 < H \leq 12,250$	9	500	300
$12,250 < H \leq 17,500$	9,5	500	300
$17,500 < H$	10	300	100

Diámetros externos de portamechas y longitud del ensamble de fondo usuales en función del tamaño de hoyo.

Tamaño hoyo (H) (pulg)	Diámetro externo de tubería perforación. (pulg)
$H \leq 2,875$	2,375
$2,875 < H \leq 4,750$	2,875
$4,750 < H \leq 7,625$	3,5
$7,625 < H \leq 12,250$	4,5
$12,250 < H$	5

Diámetros externos de tuberías de perforación usuales en función del tamaño de hoyo.

Para determinar el perfil de presión interna de las arremetidas de gas se deben efectuar los siguientes pasos:

Determinar el volumen de gas en pies cúbicos:

$Vol_{gas} = 561,46 \text{ pie}^3$ (100 bbl, pozo exploratorio).

$Vol_{gas} = 280,73 \text{ pie}^3$ (50 bbl, pozo de desarrollo).

Calcular el volumen anular alrededor de los portamechas en hoyo abierto:

$$Vol_{anular \text{ } pm} = \frac{0,7854 * (d_h^2 - d_{ext \text{ } pm}^2) * L_{pm}}{144}$$

Donde:

d_h : Diámetro del hoyo (pulg.).

$d_{ext\ pm}$: Diámetro externo de los portamechas (pulg.).

L_{pm} : Longitud total de los portamechas (pie).

Calcular el volumen anular alrededor de la tubería de perforación en hoyo abierto:

$$Vol_{anular\ tp} = \frac{0,7854 * (d_h^2 - d_{ext\ tp}^2) * (Prof_T - L_{pm} - Prof_Z)}{144}$$

Donde:

$d_{ext\ tp}$: Diámetro externo de la tubería de perforación (pulg.).

$Prof_T - L_{pm} - Prof_Z = L_{tp}$: Longitud de la tubería de perforación en hoyo abierto (pie).

Calcular la altura de la arremetida de gas:

✓ Si $Vol_{gas} \leq Vol_{anular\ pm}$

$$H_{gas} = \frac{144 * Vol_{gas}}{0,7854 * (d_h^2 - d_{ext\ pm}^2)}$$

✓ Si $Vol_{anular\ pm} + Vol_{anular\ tp} \geq Vol_{gas} > Vol_{anular\ pm}$

$$H_{gas} = L_{pm} + \frac{144 * (Vol_{gas} - Vol_{anular\ pm})}{0,7854 * (d_h^2 - d_{ext\ tp}^2)}$$

✓ Si **Vol_{gas}** > Vol_{anular pm} + Vol_{anular tp}

$$H_{gas} = L_{pm} + L_{tp} + \frac{144 * (Vol_{gas} - Vol_{anular pm} - Vol_{anular tp})}{0,7854 * (d_{int rev}^2 - d_{ext tp}^2)}$$

Donde:

$d_{int rev}$: Diámetro interno del revestidor estudiado (pulg.).

Calcular la profundidad del tope de gas:

$$Prof_{tope gas} = Prof_T - H_{gas}$$

Calcular la presión del gas:

$$P_{gas} = 0,052 * (D_L + 0,5 lpg) * Prof_T \text{ (para pozos de desarrollo).}$$

$$P_{gas} = 0,052 * (D_L + 1,0 lpg) * Prof_T \text{ (para pozos exploratorios).}$$

NOTA: Se asume 0 lpg. de gas, en consecuencia, las presiones en el tope del gas y en el fondo son iguales a P_{gas} .

Calcular la presión actuante en la zapata:

✓ Si $Prof_{tope\ gas} > Prof_Z$

$$P_{act\ zap} = P_{gas} - 0,052 * D_L * (Prof_T - H_{gas} - Prof_Z)$$

✓ Si $Prof_{tope\ gas} \leq Prof_Z$

$$P_{act\ zap} = P_{gas}$$

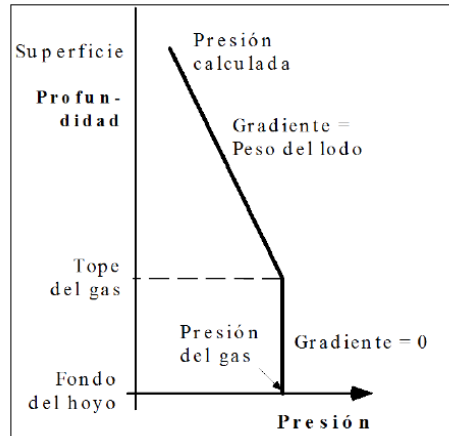
Calcular la presión de fractura de seguridad en la zapata.

$$P_{frac\ seg} = P_{frac} + 0,052 * 0,2\ lpg * Prof_Z \text{ (para pozos de desarrollo)}$$

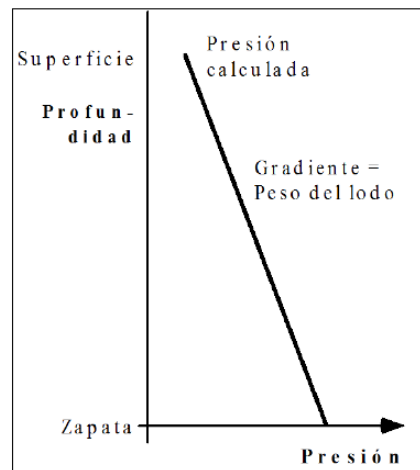
$$P_{frac\ seg} = P_{frac} + 0,052 * 0,5\ lpg * Prof_Z \text{ (para pozos exploratorios)}$$

Determinar la presión que será considerada en el perfil interno a nivel de la zapata.

En conclusión, la menor presión entre $P_{act\ zap}$ y $P_{frac\ seg}$ será considerada como la presión en la zapata P_{zap} , y los perfiles de presión interna correspondientes a cada una se muestran en las figuras de abajo.



Perfil de presión interna para una arremetida de gas.



Perfil de presión interna para una arremetida en el caso que la formación cede a la presión

En resumen, el perfil de presión interna puede expresarse como se muestra en la siguiente tabla:

Perfil de Presión Interna

Profundidad (pies)	Presión (lpc.)	
Superficie (0')	$P_{sup} = P_{zap} - 0,052 \cdot D_L \cdot Prof_Z$	Si $P_{zap} = P_{frac\ seg}$
	$P_{sup} = P_{gas} - 0,052 \cdot D_L \cdot Prof_{tope\ gas}$	Si $P_{zap} = P_{act\ zap}$
Zapata ($Prof_Z$)	$P_{zap} = P_{frac\ seg}$	Si $P_{frac\ seg} < P_{act\ zap}$
	$P_{zap} = P_{act\ zap}$	Si $P_{frac\ seg} > P_{act\ zap}$
Fondo ($Prof_T$)	$P_{gas} = 0,052 \cdot (D_L + 0,5\ lpg) \cdot Prof_T$	Para pozos de desarrollo.
	$P_{gas} = 0,052 \cdot (D_L + 1,0\ lpg) \cdot Prof_T$	Para pozos exploratorios.

La presión de poro natural genera el perfil de presión externa.

Perfil de Presión Externa

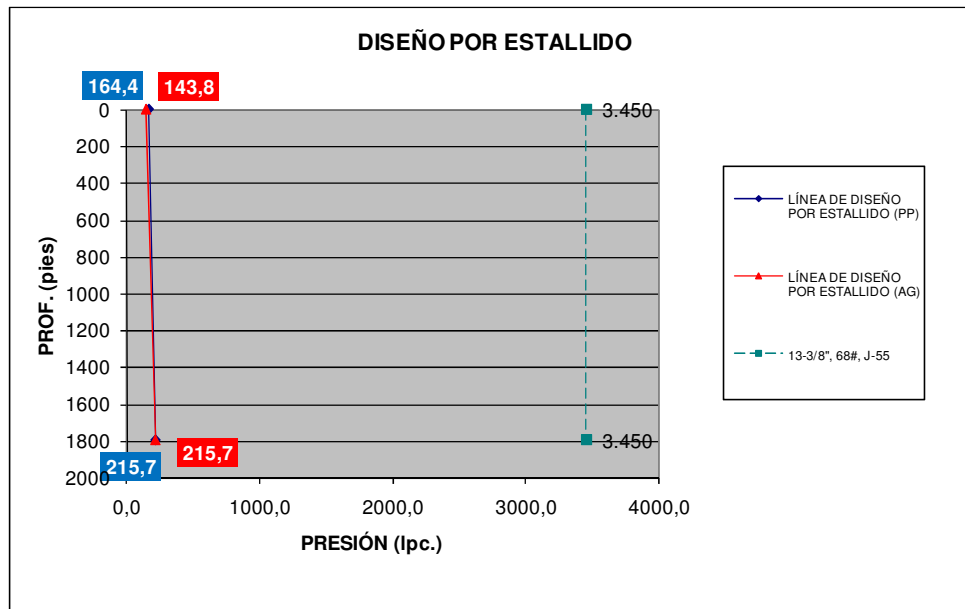
Profundidad (pies)	Presión (lpc)
Superficie (0')	$P_{sup} = 0$
Zapata ($Prof_Z$)	$P_{zap} = P_{poro}$

Se construyen los perfiles de presión resultante y de diseño para este caso, de la misma forma que en el caso de prueba de presión, y se representa este nuevo perfil de diseño en la misma gráfica de Prof. vs. Presión.

- **Selección del caso con la máxima carga de estallido:**

Se comparan los perfiles de diseño de ambos casos de carga por estallido y se selecciona el de valores más altos, para así asegurarse de tomar el caso más crítico.

Finalmente, se selecciona un revestidor cuya resistencia al estallido sea mayor a los valores de diseño seleccionados y se representa en la misma gráfica como una línea vertical punteada a la derecha de la línea de diseño definitiva.



b) Máxima carga de colapso: 1/3 Vacío.

Los casos de 1/3 vacío para el revestidor de superficie o intermedio son los mismos que los del conductor, salvo que se generan múltiples casos de 1/3 vacío cuando la o las sartas siguientes son camisas intermedias, tomando como perfil de diseño definitivo aquel que resulte mayor.

Perfil de Presión Interna

Profundidad (pies)	Presión (lpc)	
Superficie (0)	$P_{sup} = 0$	
Tope de Cemento (TTC)	$P_{ttc} = 0$	Si el tope del lodo está por debajo del tope de cemento ($Prof_{tope\ lodo} \geq TTC$).
	$P_{ttc} = 0,052 * D_{L\ prox\ hoyo} * (TTC - Prof_{tope\ lodo})$.	Si el tope del lodo está por encima del tope de cemento ($Prof_{tope\ lodo} < TTC$).
Zapata ($Prof_z$)	$P_{zap} = 0$	Si el tope del lodo está por debajo de la zapata ($Prof_{tope\ lodo} \geq Prof_z$).
	$P_{zap} = 0,052 * D_{L\ prox\ hoyo} * (Prof_z - Prof_{tope\ lodo})$.	Si el tope del lodo está por encima de la zapata ($Prof_{tope\ lodo} < Prof_z$).

Donde:

$$Prof_{tope\ lodo} = \frac{Prof_T}{3}$$

NOTA: Si el revestidor está cementado hasta superficie, se omiten todos los cálculos relacionados con el “tope de cemento”.

La presión externa está dada por el peso del lodo donde se corrió el revestidor estudiado (superficial o intermedio), y el cemento.

Perfil de Presión Externa

Profundidad (pies)	Presión (lpc)	
Superficie (0)	$P_{sup} = 0$	
Tope de Cemento (TTC)	$P_{ttc} = 0,052 \cdot D_{L\ baj} \cdot TTC$	
Zapata ($Prof_z$)	$P_{zap} = P_{ttc} + 0,052 \cdot D_{cem} \cdot (Prof_z - TTC)$	Si está cementado hasta TTC.
	$P_{zap} = 0,052 \cdot D_{cem} \cdot Prof_z$	Si está cementado hasta superficie.

Se calculan los perfiles resultante y de diseño:

Perfil de Presión Resultante ($P_{ext} - P_{int}$)

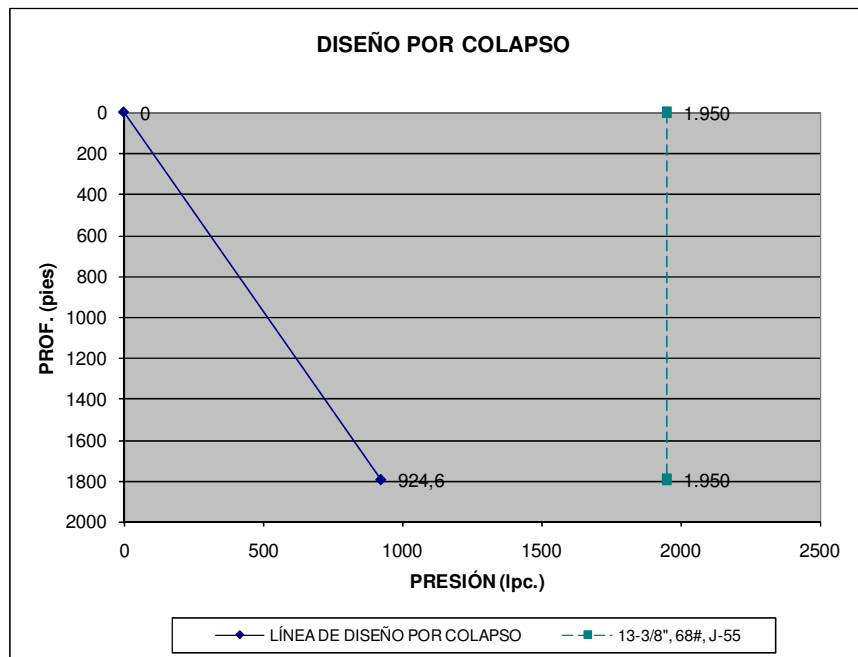
Profundidad (pies)	Presión (lpc)
Superficie (0')	$P_{R\ sup} = P_{ext\ sup} - P_{int\ sup}$
Tope de Cemento (TTC).	$P_{R\ ttc} = P_{ext\ ttc} - P_{int\ ttc}$
Zapata ($Prof_z$)	$P_{R\ zap} = P_{ext\ zap} - P_{int\ zap}$

Perfil de Presión de Diseño ($P_D = P_R * 1,0$)

Profundidad (pies)	Presión (lpc.)
Superficie (0')	$P_{D \text{ sup}} = P_{R \text{ sup}} * 1,0$
Tope de Cemento (TTC).	$P_{D \text{ ttc}} = P_{R \text{ ttc}} * 1,0$
Zapata (Prof _z)	$P_{D \text{ zap}} = P_{R \text{ zap}} * 1,0$

Luego, se representan los valores de presión de diseño, de superficie, tope de cemento (si aplica) y zapata, en una gráfica de Prof. vs. Presión y se unen dichos puntos para formar una línea recta.

Por último, se observa el valor de resistencia al colapso del revestidor que se seleccionó en el análisis por estallido y se representa en esta nueva gráfica como una línea vertical punteada. Verificar que dicho valor soporte las cargas de diseño definidas, en caso contrario, seleccionar otro revestidor con mayor resistencia al colapso.



c) Máxima Carga de Tensión:

Al igual que para el revestidor conductor, se realizan los mismos análisis de D.C.L. y se construyen los perfiles de tensión.

Perfil de Tensión

Profundidad (pies)	Tensión (lbf)
Superficie (0)	$F_{a \text{ sup}} = W + P_i A_i - P_o A_o$
Tope de Cemento (TTC)	$F_{a \text{ ttc}} = W + P_i A_i - P_o A_o$
Fondo (Prof _T)	$F_{a \text{ fondo}} = P_i A_i - P_o A_o$

Para revestidores superficiales e intermedios, sí existe un factor de diseño a tomar en cuenta, a parte del overpull de 100 klbs.

Perfil de Tensión de Diseño (2 consideraciones: Overpull = 100 lbf. y F.D. = 1,6)

Profundidad (pies)	Tensión de Diseño por overpull (lbf)	Tensión de Diseño por factor (lbf)
Superficie (0')	$F_{aD \text{ sup}} = F_{a \text{ sup}} + 100.000$	$F_{aD \text{ sup}} = F_{a \text{ sup}} * 1,6$
Tope de Cemento (TTC)	$F_{aD \text{ ttc}} = F_{a \text{ ttc}} + 100.000$	No aplica (Solo se calcula en superficie).
Fondo (Prof _T)	$F_{aD \text{ fondo}} = F_{a \text{ fondo}} + 100.000$	No aplica (Solo se calcula en superficie).

Se representan los valores de tensión real en una gráfica de Prof. vs. Tensión y se unen dichos puntos para formar una línea recta. El punto donde la línea de tensión real intercepta al eje Y (Tensión = 0) será la profundidad del punto neutro en la sarta de revestidores.

Luego, se representan los valores de tensión de diseño por overpull y se unen dichos puntos para formar una segunda línea recta, paralela a la graficada en el paso anterior.

Posteriormente, se representa en la misma gráfica el valor de diseño por factor en superficie y se une con el punto neutro para formar una tercera línea, esto servirá para visualizar cuál línea de diseño domina a cada profundidad.

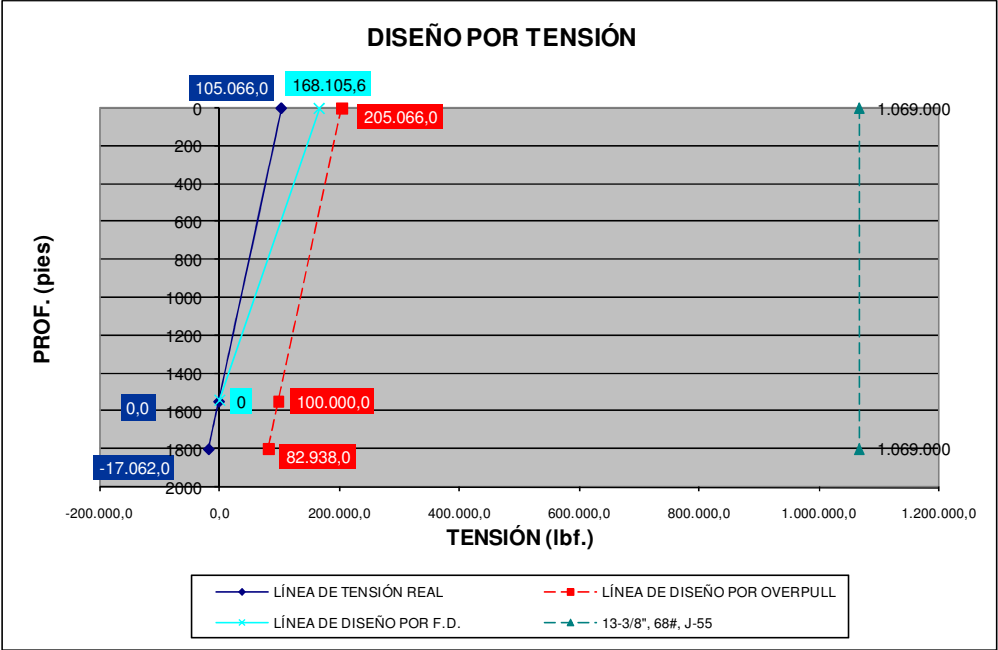
Se calcula el valor de resistencia a la fluencia o tensión del revestidor que se seleccionó luego de los análisis previos por estallido y colapso. La resistencia a la fluencia del cuerpo de una tubería es el producto de su resistencia a la fluencia mínima (valor observado en el grado de la tubería multiplicado por mil) por su área transversal:

$$R_f = R_{f \text{ mín}} * (A_o - A_i)$$

También puede obtenerse este valor directamente de las tablas disponibles para tal fin.

NOTA: Si es posible, observar el valor de resistencia de la conexión escogida y tomar el menor entre el cuerpo del tubo y la conexión.

Se representa en la misma gráfica el valor de resistencia a la fluencia o tensión calculado (u observado en tabla) como una línea vertical punteada. Verificar que dicho valor soporte las cargas de diseño definidas, en caso contrario, seleccionar otro revestidor con mayor resistencia a la tensión.



a) Corrección Biaxial:

Las fuerzas de tensión a las que está sometida la sarta de revestimiento dan origen a esfuerzos de tensión, los cuales tienen un efecto de incremento o reducción (según se encuentre en tensión o compresión) sobre los valores de resistencia al estallido y colapso de la tubería. No se tomará en cuenta la profundidad del tope de cemento, si es que existiera.

Primero se calculan los esfuerzos en superficie y fondo:

$$\sigma_{a\ sup} = \frac{F_{a\ sup}}{A_{transversal}}$$

$$\sigma_{a\ fondo} = \frac{F_{a\ fondo}}{A_{transversal}}$$

Donde:

$F_{a\ sup}$ y $F_{a\ fondo}$ son las cargas axiales reales, sin tomar en cuenta overpull ni factor de diseño.

Por supuesto, los esfuerzos tendrán los mismos signos de las cargas axiales con las cuales fueron calculados, y por ende el mismo tipo de efecto sobre la sarta:

Si $\sigma_a > 0$, el revestidor está en tensión a la profundidad estudiada.

Si $\sigma_a < 0$, el revestidor está en compresión a la profundidad estudiada.

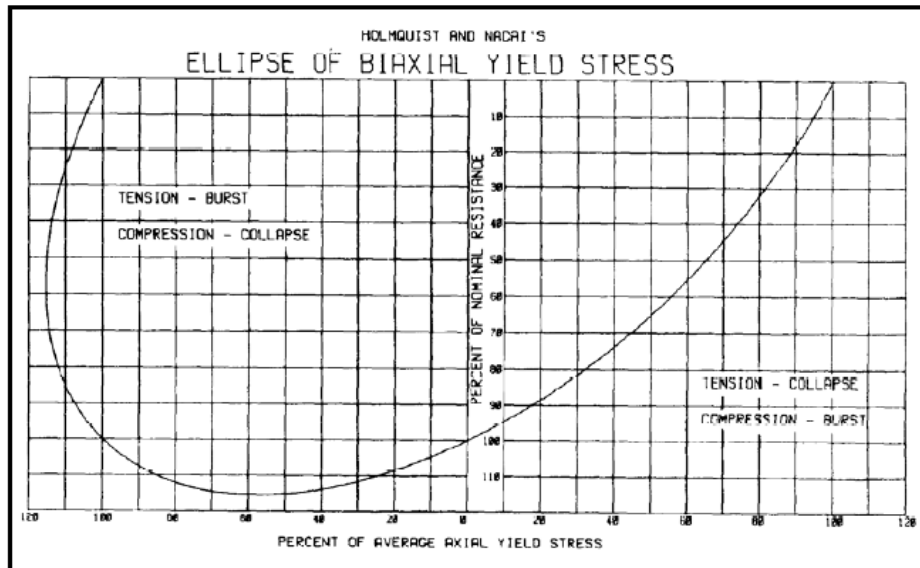
Luego, se calcula la relación entre los esfuerzos de tensión y la resistencia a la fluencia mínima ($R_{f\ min}$) de la tubería en superficie y fondo.

$$\%_{sup} = \frac{\sigma_{a\ sup}}{R_{f\ min}} * 100$$

$$\%_{fondo} = \frac{\sigma_{a\ fondo}}{R_{f\ min}} * 100$$

NOTA: Se utilizan los valores absolutos de los esfuerzos.

Estos porcentajes se utilizan con la elipse de plasticidad de HOLMQUIST y NACAI, abajo mostrada, para determinar los efectos biaxiales:



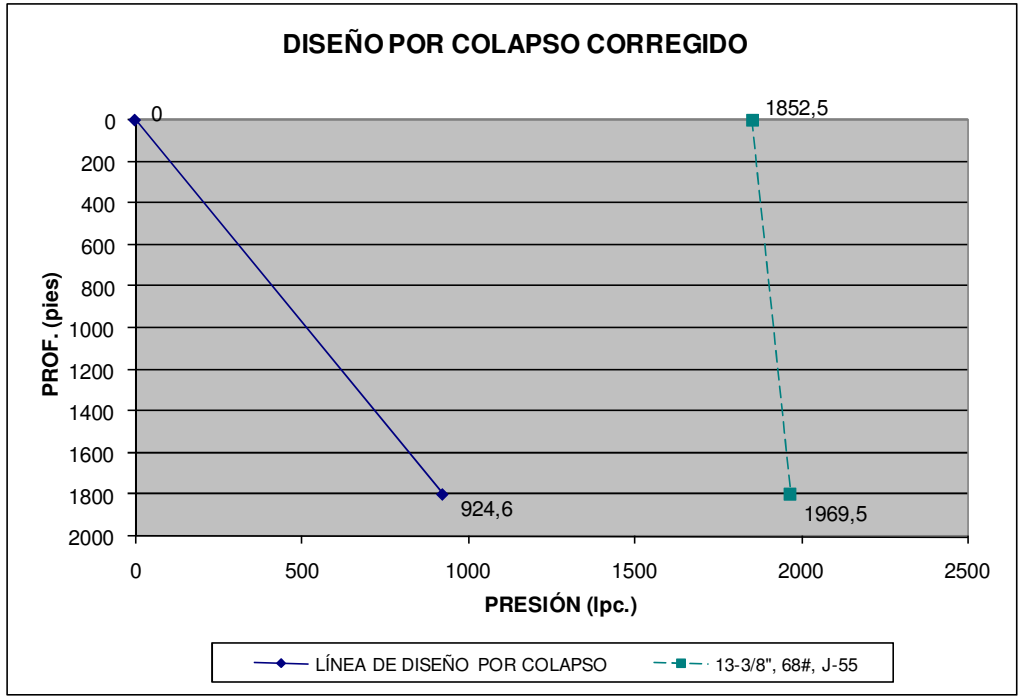
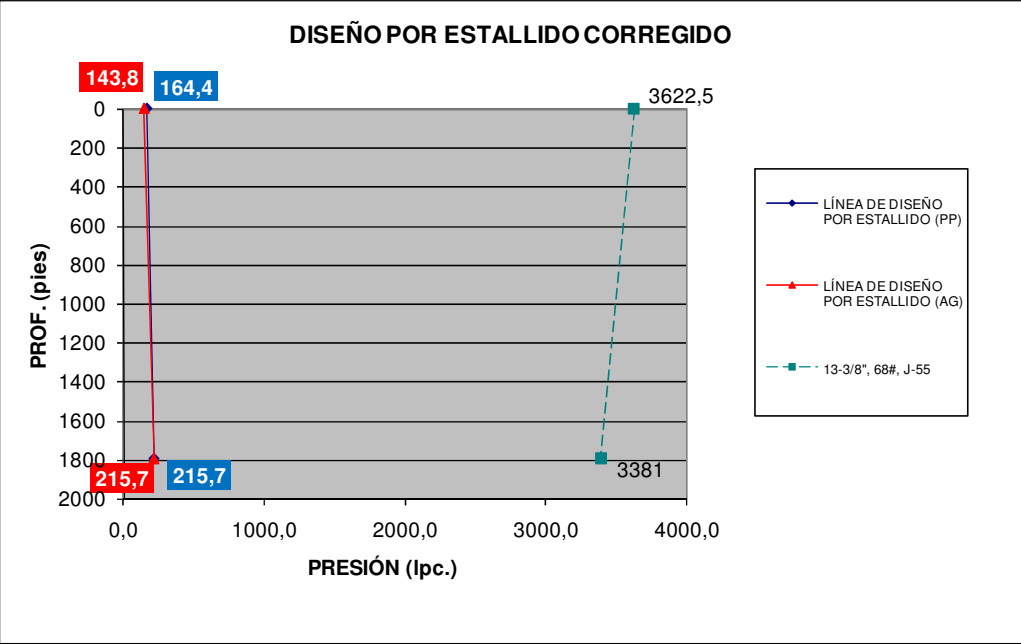
Entrar verticalmente en el eje "X" de la izquierda con el valor de porcentaje obtenido e interceptar la elipse de plasticidad, leer el valor de porcentaje correspondiente a dicha intercepción en el eje "Y". El valor leído en el eje "Y" representará:

- Porcentaje de aumento de la Resistencia al Estallido, si el % en "X" está asociado a un esfuerzo de tensión.
- Porcentaje de aumento de la Resistencia al Colapso, si el % en "X" está asociado a un esfuerzo de compresión.

Entrar verticalmente en el eje "X" de la derecha con el valor de porcentaje obtenido e interceptar la elipse de plasticidad, leer el valor de porcentaje correspondiente a dicha intercepción en el eje "Y". El valor leído en el eje "Y" representará:

- Porcentaje de disminución de la Resistencia al Estallido, si el % en "X" está asociado a un esfuerzo de compresión.
- Porcentaje de disminución de la Resistencia al Colapso, si el % en "X" está asociado a un esfuerzo de tensión.

A continuación, se le aplican los porcentajes de aumento o disminución a los valores de colapso y estallido del revestidor seleccionado, y se modifican dichas líneas en las gráficas correspondientes, para verificar que aún cumplan con los requerimientos. En caso contrario, seleccionar otro revestidor con mayor resistencia.



b) Factores de Diseño:

Finalmente, se calculan los factores de diseño para Estallido, Colapso y Tensión en superficie y fondo. No se tomará en cuenta la profundidad del tope de cemento, si es que existiera:

$$F.D._{estallido} = \frac{\textit{Presión interna de fluencia}}{\textit{Diferencial de presión interna}}$$

Donde el numerador representa las resistencias al estallido corregido biaxialmente y el denominador el valor de presión diferencial de diseño.

$$F.D._{colapso} = \frac{\textit{Resistencia al colapso de la tubería}}{\textit{Presión de colapso equivalente}}$$

El numerador representa las resistencias al colapso corregidos biaxialmente y el denominador el valor de presión diferencial de diseño.

$$F.D._{tensión} = \frac{\textit{Resistencia a tensión de la junta}}{\textit{Carga máxima a tensión}}$$

El numerador representa la resistencia a la tensión (la menor entre cuerpo del tubo y conexión) y el denominador el valor de tensión de diseño que corresponda.

Se representan en una tabla como la mostrada a continuación:

Profundidad (pies)	Estallido	Colapso	Tensión
Superficie (0)			
Fondo ($Prof_T$)			