



Fracturamiento Hidráulico

Agentes Sustentantes

Ing. Juan Carlos Sabido Alcántara

Ingeniero Petrolero

Facultad de Ingeniería UNAM



Agentes Sustentantes



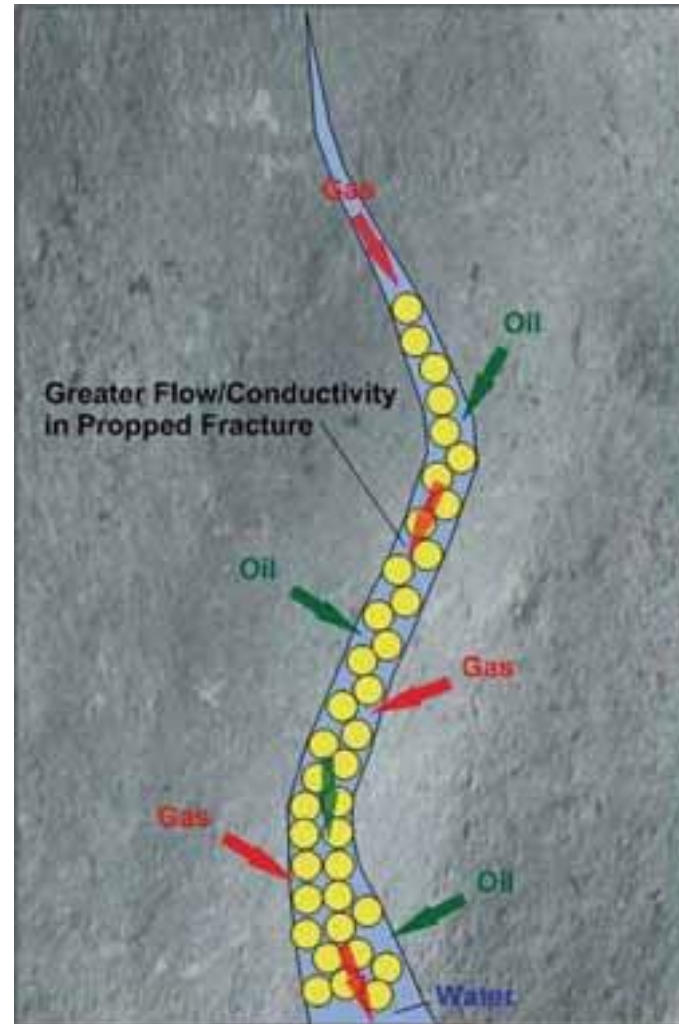


Agentes Sustentantes

- La función de un agente apuntalante o sustentante es la de mantener abierta la fractura después de que el fluido de inyección (fluido fracturante) es dejado de bombear y dicho fluido es removido del yacimiento. Los fluidos del yacimiento pueden así fluir a través de los canales conductivos creados por la fractura en el yacimiento.



Agentes Sustentantes





Agentes Sustentantes



- La arena de Silice es uno de los apuntalantes más usados en los fracturamientos hidráulicos.
- La disponibilidad y bajos costos hacen de esta un sustentante de gran calidad que puede crear una buena conductividad en la fractura con un amplio intervalo de condiciones especiales la hacen muy atractiva.



Agentes Sustentantes



- El API ha establecido especificaciones de la calidad de los apuntalantes asociados en los tratamientos por fracturamiento. Estas especificaciones son: tamaño, esfericidad, redondez, solubilidad en ácido, contenido de limo, arcilla y por supuesto la resistencia.



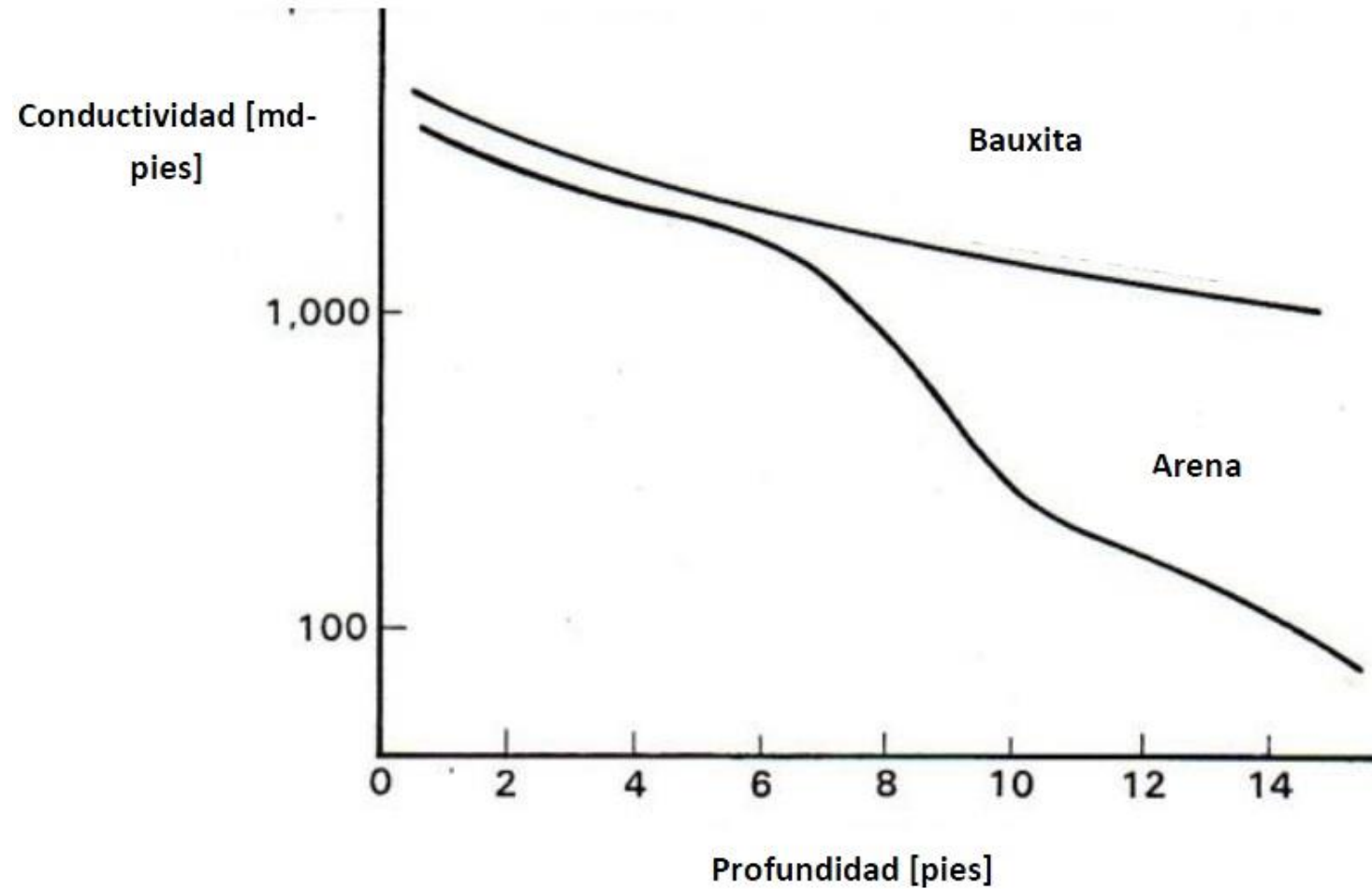
Agentes Sustentantes



- Otro apuntalante sintético común es la bauxita, es significativamente más resistente que la arena común y es usado en formaciones profundas donde existen grandes presiones de cierre y donde los esfuerzos de sobrecarga son mayores.



Agentes Sustentantes





Agentes Sustentantes



- Gran variedad de materiales como aluminio, cordierita, mullita, carburo de silicio y algunos otros materiales cerámicos se han utilizado como apuntalantes buscando tener una gama intermedia en la arena de sílice y la bauxita.



Agentes Sustentantes



- Existen apuntalantes con recubrimiento de resina, el objetivo es reducir los grandes esfuerzos y la degradación causada por el contacto grano a grano y así mejorar su empacamiento. Otro propósito es consolidar o mantener el empacamiento entre granos debido a la adherencia que existe uno a otro.



Agentes Sustentantes

- Especificaciones API.
 - Redondez
 - Esfericidad
 - Gravedad Específica
 - Densidad Bulk
 - Tamaño de Grano (tamiz)
- Solubilidad en Ácido
- Contenido de Limo y Arcilla
- Resistencia a la compresión
- Agrupamiento



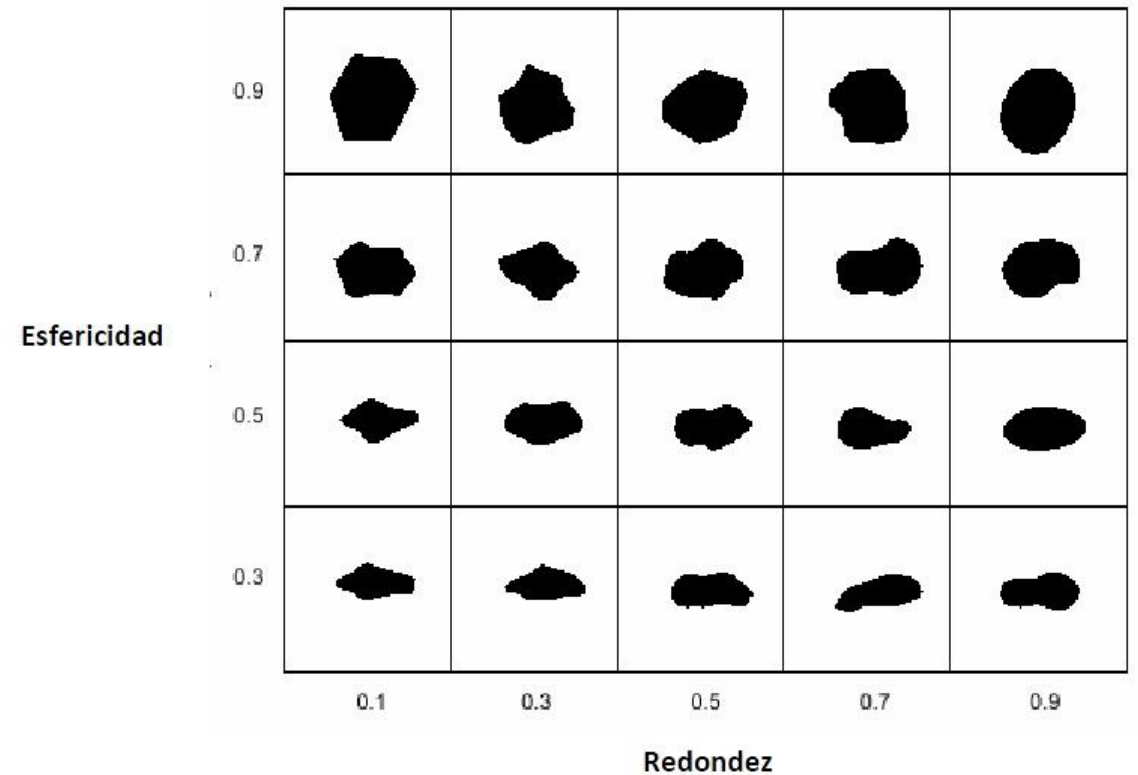
Agentes Sustentantes

- ***Redondez y Esfericidad.***
- Ambas propiedades son factores que influyen en el empacamiento y en la capacidad de transporte del fluido fracturante. La ***redondez*** es la medición relativa de la agudeza de las esquinas de los granos o la curvatura de dichos granos.



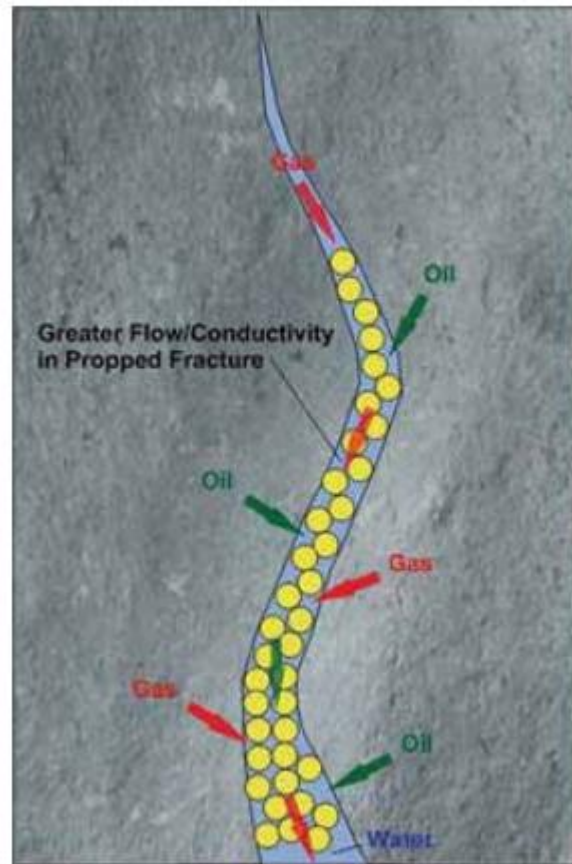
Agentes Sustentantes

- **Redondez** y **Esfericidad.**
- La **esfericidad** es la medición de que tanto una partícula se aproxima a la forma de una esfera.

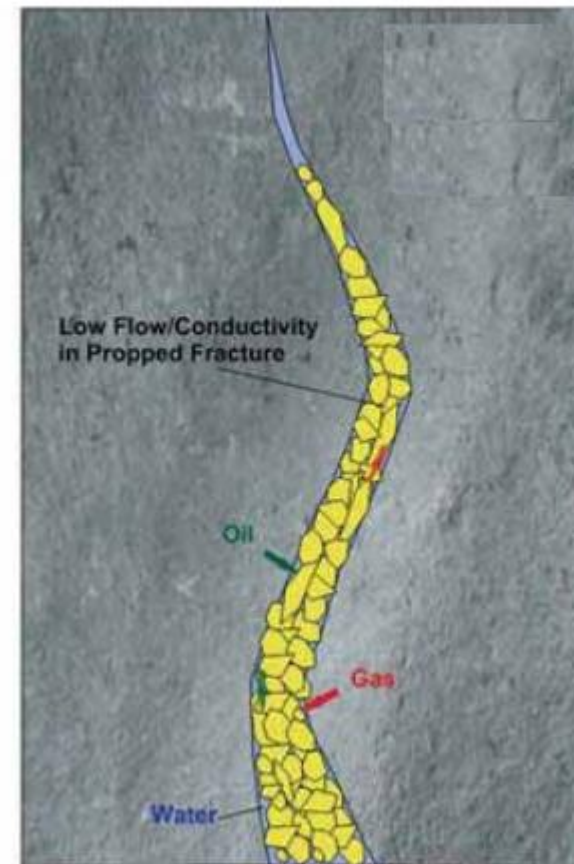




Agentes Sustentantes



a. Well Rounded Ceramic Proppant



b. Poorly Sorted Angular Proppant Sand



Agentes Sustentantes



- ***Redondez y Esfericidad.***
- Ambas propiedades únicamente se pueden estimar de manera aproximada observando una gran cantidad de muestras para hacer la comparación correcta.



Agentes Sustentantes



- ***Gravedad Específica.***
- Se trata de la densidad absoluta de la partícula con relación al agua. El API recomienda 2.65 como límite máximo de la gravedad específica



Agentes Sustentantes

- ***Densidad Bulk.***
- Es el volumen ocupado por una unidad de masa de apuntalante. Las unidades para la densidad son $[lb/ft^3]$ o $[gr/cm^3]$. La recomendación máxima del API es de 105 $[lb/ft^3]$ o 8.55 $[gr/cm^3]$.



Agentes Sustentantes



- ***Solubilidad en Ácido.***
- La solubilidad de apuntalante en ácido clorhídrico al 12 % es un indicador de la cantidad de contaminantes presentes y de la estabilidad relativa del apuntalante en el ácido. También esta puede ser un indicador de la tendencia del apuntalante para disolverse en ambientes con temperaturas muy elevadas.



Agentes Sustentantes



- ***Solubilidad en Ácido.***
- El API recomienda un máximo para arena del 2 % mientras que para arenas cubiertas con resinas el límite de solubilidad es del 7%.



Agentes Sustentantes



- ***Limo y Partículas Finas.***
- Esta medición indica la cantidad de arcilla y limo o de otras partículas finas presentes. Con lavar o procesar el apuntalante, este no tendrá un exceso en el contenido de estas partículas. El API recomienda un límite máximo de 250 unidades de turbidez.



Agentes Sustentantes



- ***Resistencia a la Compresión.***
- La resistencia al aplastamiento indica la fuerza relativa del apuntalante medido por la cantidad de material aplastado bajo una carga dada. Esta medición es expresada en porcentaje de partículas finas.



Agentes Sustentantes

- ***Resistencia a la Compresión.***
- El API recomienda que los límites máximos para arena sean:
 - Para tamaño de malla 12/20 – 16 % a 3000 psi
 - Para tamaño de malla 20/40 – 14 % a 4000 psi



Agentes Sustentantes

- ***Resistencia a la Compresión.***
- El API recomienda que los límites máximos para apuntalantes de alta resistencia sean:
 - Para tamaño de malla 12/20 – 25 % a 7500 psi
 - Para tamaño de malla 16/20 – 25 % a 10000 psi
 - Para tamaño de malla 20/40 – 10 % a 12500 psi
 - Para tamaño de malla 40/70 – 8 % a 15000 psi



Agentes Sustentantes

- Tarea #10 1ª Parte 80% de la calificación de la Tarea #10
 - Investigar “Tipos de Apuntalantes”.
 - La investigación debe de ser amplia, a mano, con letra legible y buena ortografía, deberá incluir imágenes (estas pueden ser impresas, recortadas y pegadas de manera limpia, o en su defecto dibujadas), realizar presentación en PowerPoint aplicando lo aprendido en el artículo How To Talk, enviar a más tardar el viernes antes de las 22:00 horas, el nombre del archivo deberá llevar el siguiente formato:
apellidopaterno_apellidomaterno_nombre1_nombre2_Tarea10TiposdeApuntalantes
- Tarea #10 2ª Parte 20% de la calificación de la Tarea #10
 - Ve la película “Whiplash” del año 2014 escrita y dirigida por Damien Chazelle.
 - Realiza una reseña que incluya todas las nominaciones y premios obtenidos por la película (festivales y premios Oscar). Incluye tus propios comentarios en donde hables acerca del mensaje que te dejó la película. Todo a mano mínimo dos cuartillas.



Agentes Sustentantes



- ***Comportamiento Mecánico.***
- ***Trituración.*** Ocurre cuando bajo el esfuerzo de confinamiento y formaciones duras el sustentante se rompe por su menor resistencia.



Agentes Sustentantes



- ***Comportamiento Mecánico.***
- ***Incrustación en la Formación.*** Esto se representa cuando la formación es suave y el sustentante tiene mayor resistencia bajo el esfuerzo confinante.



Agentes Sustentantes

- ***Comportamiento Mecánico.***
- ***Incrustación en la Formación.*** Valores de Presión de Incrustación:
 - $P_i < 100$ Propensión al incrustamiento (pobre conductividad)
 - $100 < P_i < 180$ Agente sustentante recomendable
 - $P_i > 180$ Propensión al trituramiento (no recomendable)



Agentes Sustentantes



- ***Comportamiento Mecánico.***
- ***Deformación.*** Este caso sólo se presenta en los sustentantes elasto plásticos, mismos que no se utilizan en la actualidad.



Agentes Sustentantes



- ***Conductividad de la Fractura.***
- Como ya se definió, el objetivo de fracturar la formación es incrementar el área de flujo de los fluidos del yacimiento hacia el pozo obteniendo así un incremento en la producción. Por lo que el éxito del mismo depende de la conductividad del empaque de sustentante a condiciones de la formación.



Agentes Sustentantes



- ***Conductividad de la Fractura.***
- Es en esta propiedad donde se manifiestan todas las características de la formación y el sustentante interactuando con las condiciones de la fractura y el esfuerzo de cierre de la formación.



Agentes Sustentantes

- ***Conductividad de la Fractura.***
- La conductividad va a estar en función de:
 1. Tipo de Apuntalante.
 2. Tamaño.
 3. Concentración del apuntalante en la fractura.
 4. El esfuerzo de carga.
 5. Características de incrustación de la formación.
 6. Degradación bajo condiciones y ambientes in-situ.
 7. Posible taponamiento por los residuos del fluido de fracturamiento.



Agentes Sustentantes

- ***Conductividad de la Fractura.***
- Si el sustentante tiene deficiencia en su redondez hay mayor posibilidad de fragmentación, estos fragmentos sumados a un alto contenido de finos, mala selección del tamaño del apuntalante con contenido de partículas más pequeñas pueden propiciar una disminución del espacio poroso, con la consecuencia drástica de reducción de permeabilidad del empaque.



Agentes Sustentantes

- ***Conductividad de la Fractura.***
- La conductividad de la fractura se define por el producto de la amplitud de la fractura w por la permeabilidad del empaque de apuntalante en la fractura K_f .
 - *Conductividad = wk_f*



Agentes Sustentantes

- ***Conductividad de la Fractura.***
- La conductividad es un parámetro fundamental durante el diseño de un fracturamiento para seleccionar el sustentante, pero mucho más importante que eso sirve para decidir si se realiza o no el fracturamiento.



Agentes Sustentantes

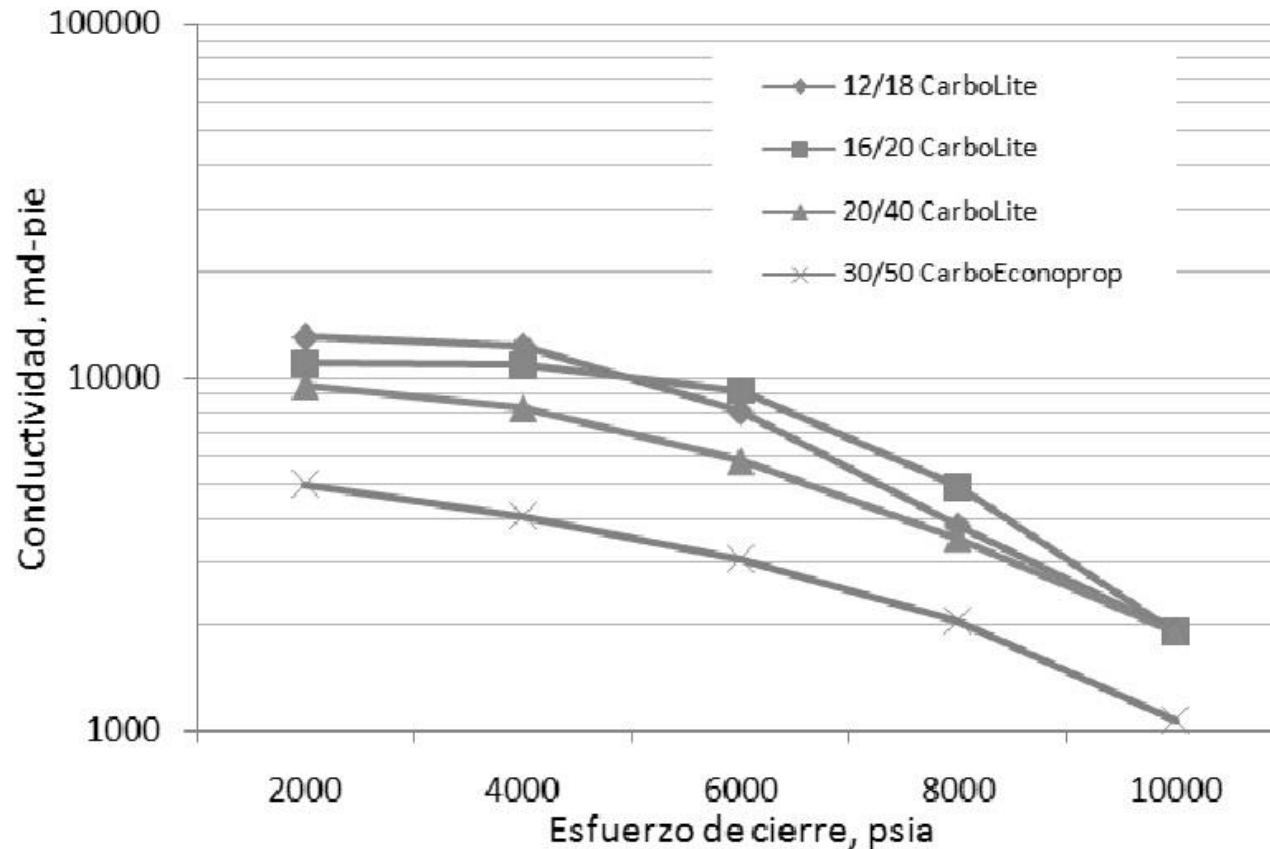


- Tarea #11 100% de la calificación de la Tarea #11
 - Leer el artículo técnico “Multiple Hydraulic Fracture Stimulation in a Deep, Horizontal Tight-Gas Well”.
 - Realizar resumen del mismo e incluir opinión personal, al azar pasaran dos o tres personas a exponer acerca del mismo.



Agentes Sustentantes

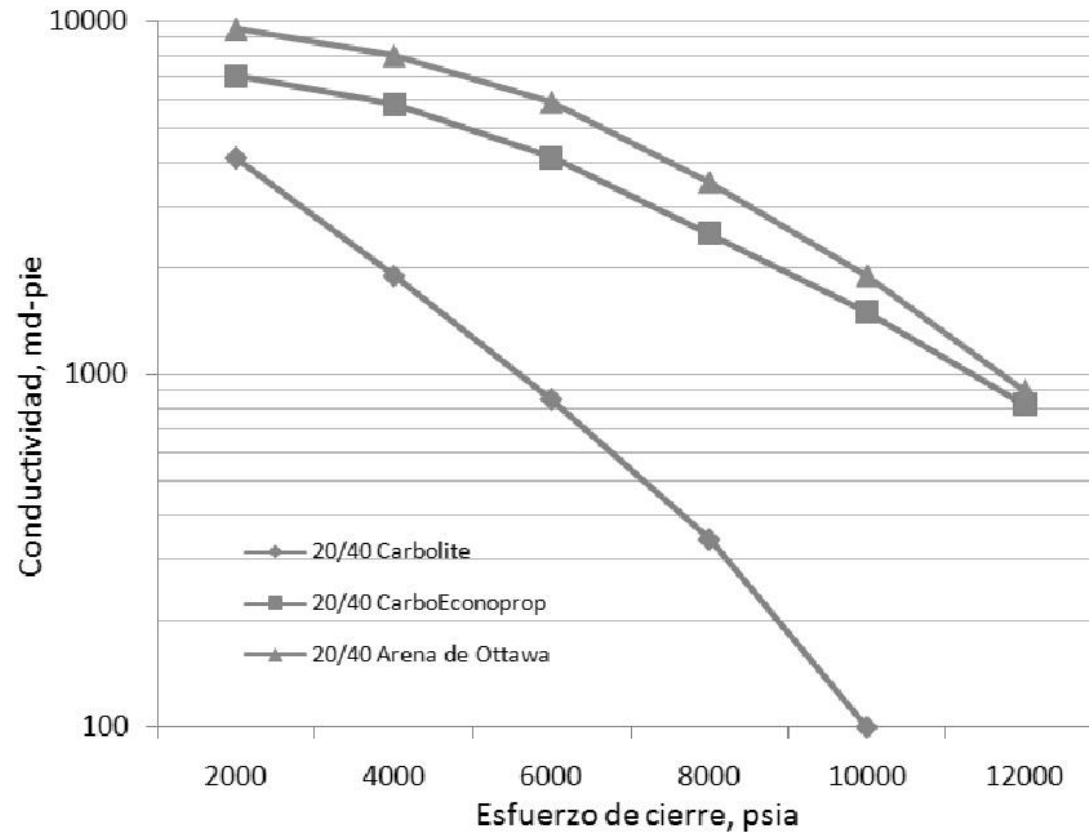
• *Conductividad vs Esfuerzo de Cierre.*





Agentes Sustentantes

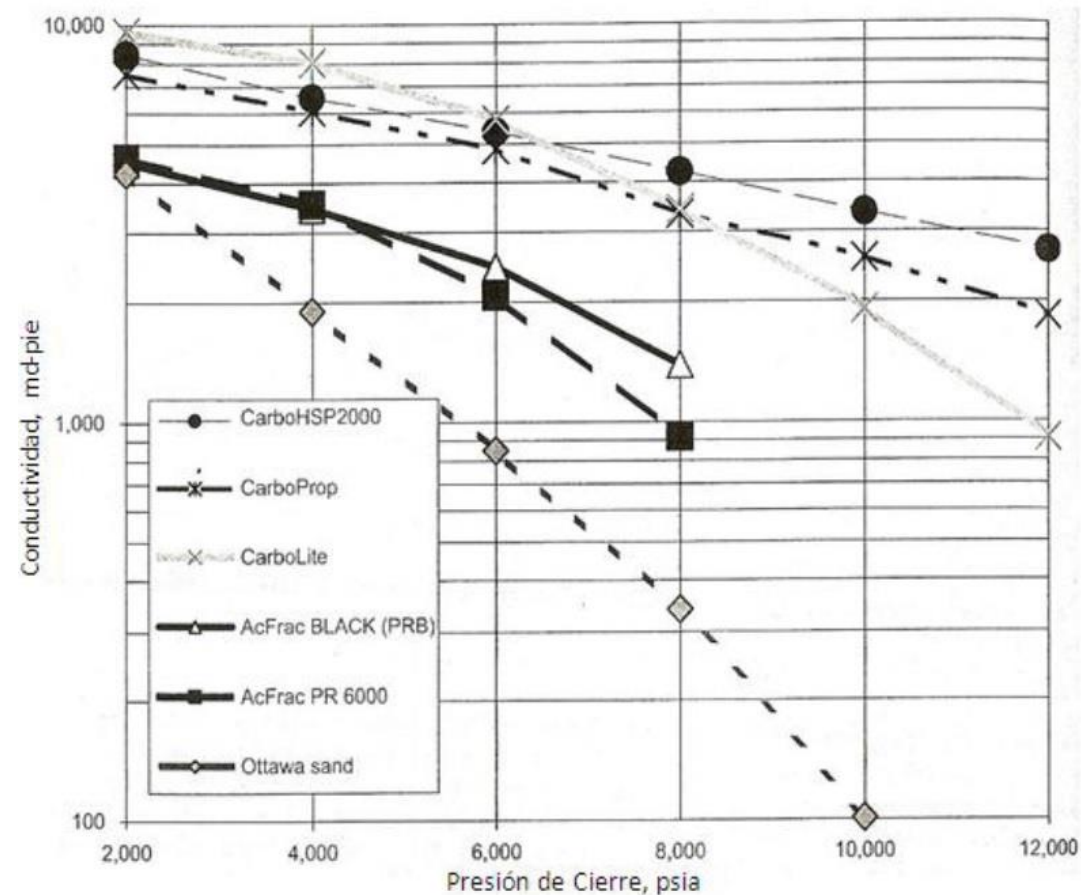
• *Conductividad vs Esfuerzo de Cierre.*





Agentes Sustentantes

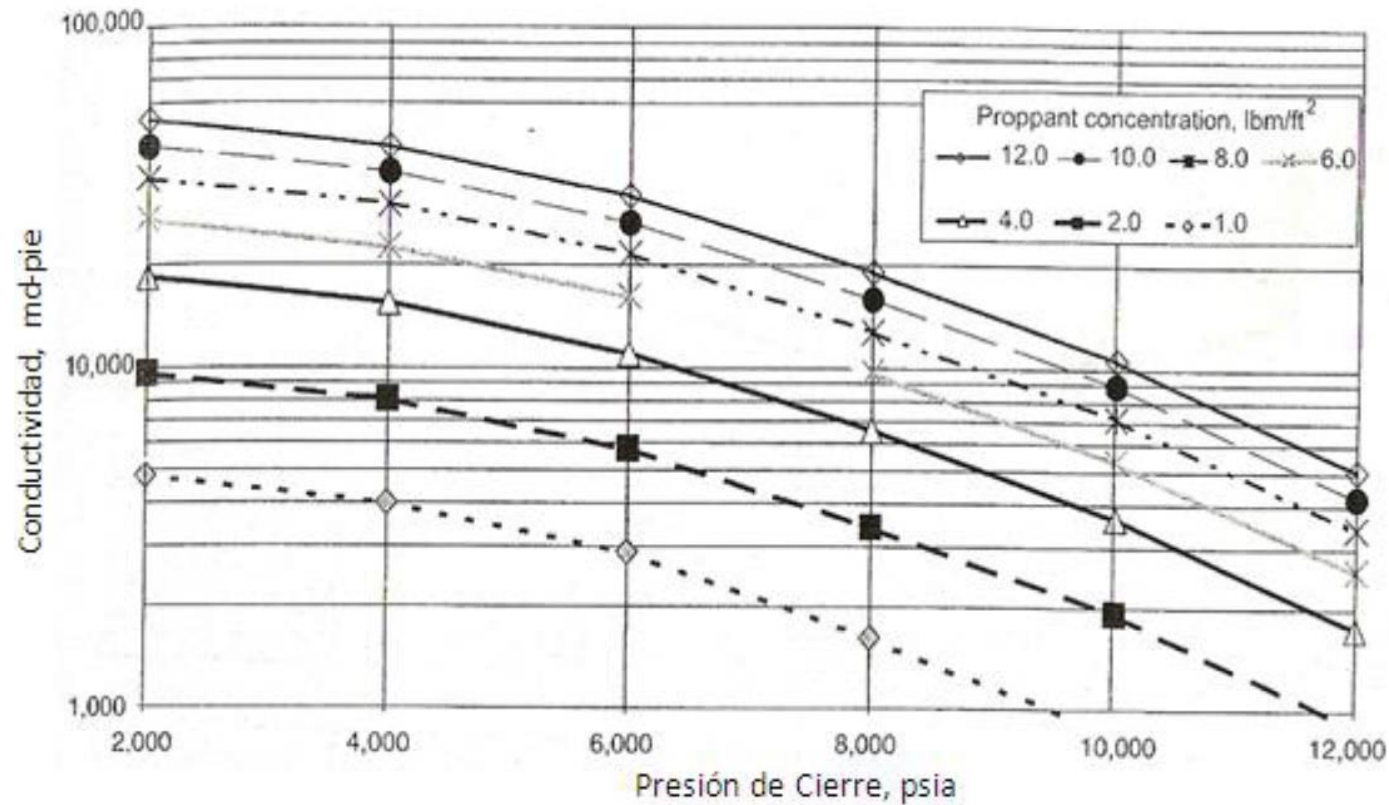
• *Conductividad vs Presión de Cierre.*





Agentes Sustentantes

- **Conductividad vs Presión de Cierre Diferentes Concentraciones.**





Agentes Sustentantes

- ***Daño Después del Fracturamiento.***

- ***Reducción de la Permeabilidad del Agente Sustentante:***
Se tiene como resultado del aplastamiento del apuntalante y del uso de polímeros en el fluido fracturante.
- El aplastamiento del apuntalante se evita utilizando materiales altamente resistentes, esto puede incrementar el costo del tratamiento, sin embargo a largo plazo esto representara una enorme ventaja pues la disminución de la conductividad será mínima.



Agentes Sustentantes

- ***Daño Después del Fracturamiento.***

- ***Reducción de la Permeabilidad del Agente Sustentante:***
Los problemas por polímeros se pueden resolver usando fluidos de baja carga y nitrogenados, o utilizando químicos de nueva generación que permiten una mejor degradación de los polímeros.



Agentes Sustentantes

- ***Daño Después del Fracturamiento.***

- ***Daño por Obturamiento Parcial de la Fractura:*** El daño por obturamiento parcial se crea causas como la migración de finos durante la producción y su acumulación cerca del pozo. Por uso excesivo de agente sustentante al final de la operación (concentración [lb/gal]) y por una mala comunicación de los disparos del pozo con las fracturas.



Agentes Sustentantes

- ***Daño Después del Fracturamiento.***
 - ***Daño por Obturamiento Parcial de la Fractura:*** Los Doctores Cinco Ley y Samaniego publicaron en 1981 sus estudios en los que definen el obturamiento parcial como un daño dentro de la fractura. Además lo representaron matemáticamente.



Agentes Sustentantes

- ***Daño Después del Fracturamiento.***

- ***Daño por Obturamiento Parcial de la Fractura:***

Considerando flujo estacionario dentro de la zona dañada se define el factor de daño por obturamiento parcial como:

- $$(S_{fs})_{op} = \frac{\pi x_s K}{b_{fs} K_{fs}}$$



Agentes Sustentantes

- ***Daño Después del Fracturamiento.***
- ***Daño por Obturamiento Parcial de la Fractura:***

$$\bullet \left(S_{fs} \right)_{op} = \frac{\pi x_s K}{b_{fs} K_{fs}}$$

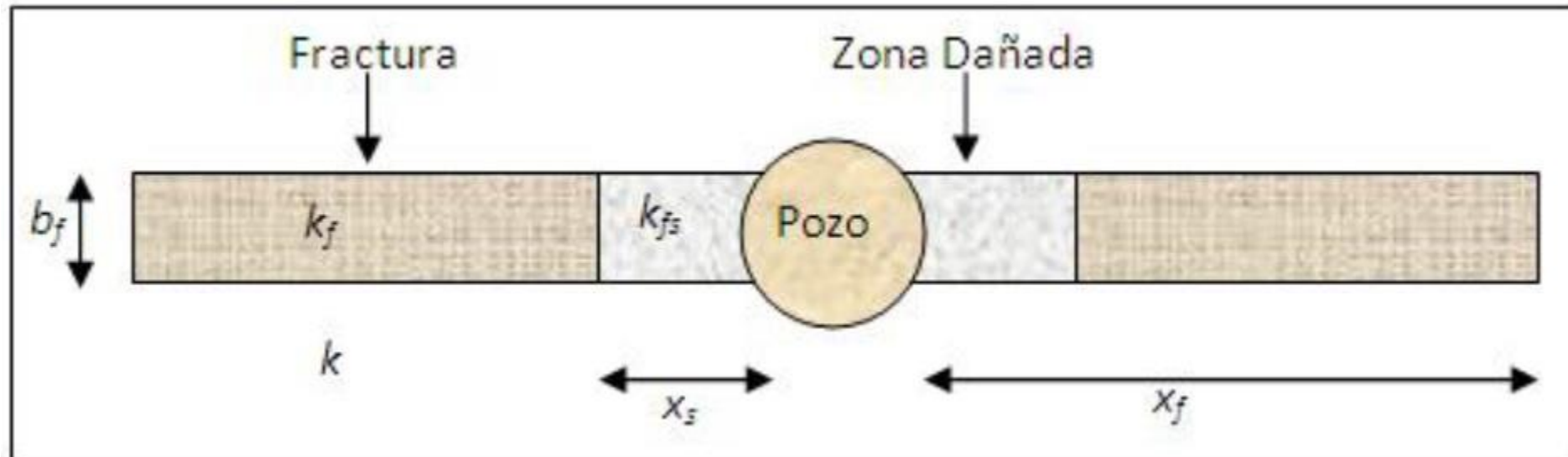
- $\left(S_{fs} \right)_{op}$ es el factor de daño por obturamiento parcial de la fractura.
- x_s, b_{fs}, K_{fs} son la longitud, el ancho y la permeabilidad de la zona dañada.



Agentes Sustentantes

• ***Daño Después del Fracturamiento.***

- ***Daño por Obturamiento Parcial de la Fractura:*** Calcular el daño con los siguientes datos $b_{fs} = 0.44[pg]$, $x_s = 20[m]$, $k = 1.8[mD]$, $k_f = 1590[mD]$, $k_{fs} = 1200[mD]$





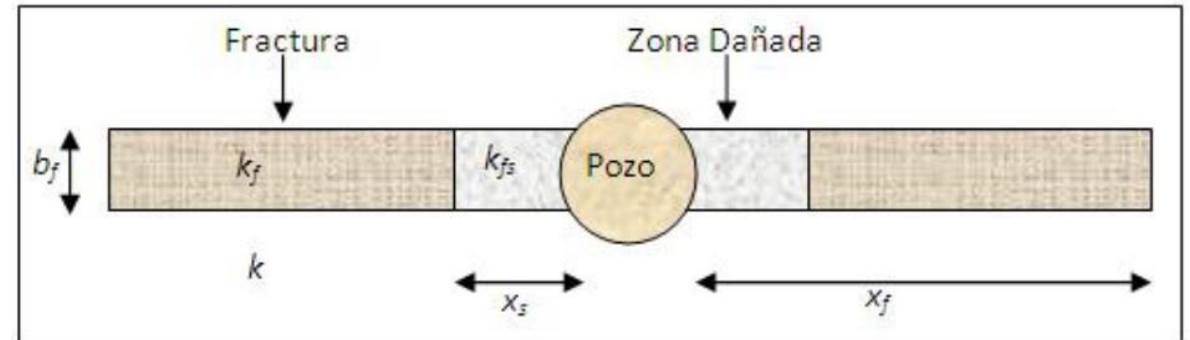
Agentes Sustentantes

- ***Daño por Obturamiento Parcial de la Fractura:***

- $$(S_{fs})_{op} = \frac{\pi x_s K}{b_{fs} K_{fs}}$$

- $$(S_{fs})_{op} = \frac{\pi * 20[m] * 1.8[mD]}{0.011[m] * 1200[mD]}$$

- $$(S_{fs})_{op} = 8.43$$





Agentes Sustentantes

- ***Daño Después del Fracturamiento.***

- ***Daño en la Cara de la Fractura:*** Es el resultado de la pérdida de fluido fracturante, y causa el deterioro de la permeabilidad en la superficie alrededor de la fractura. En el mismo artículo los Doctores Cinco Ley y Samaniego obtuvieron la ecuación para calcular el daño:

$$• S_{fs} = \frac{\pi b_s}{2xf} \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right)$$

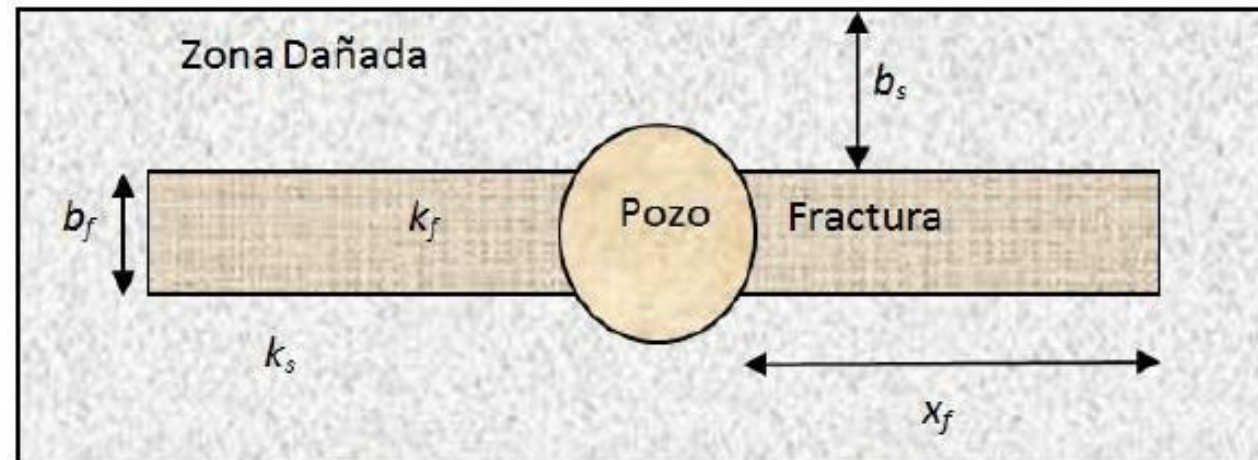


Agentes Sustentantes

- ***Daño Después del Fracturamiento.***

- ***Daño en la Cara de la Fractura:*** S_{fs} es el factor de daño en la cara de la fractura, b_s es la penetración del daño en la cara de la fractura y k_s es la permeabilidad en la zona dañada.

- $$S_{fs} = \frac{\pi b_s}{2x_f} \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right)$$

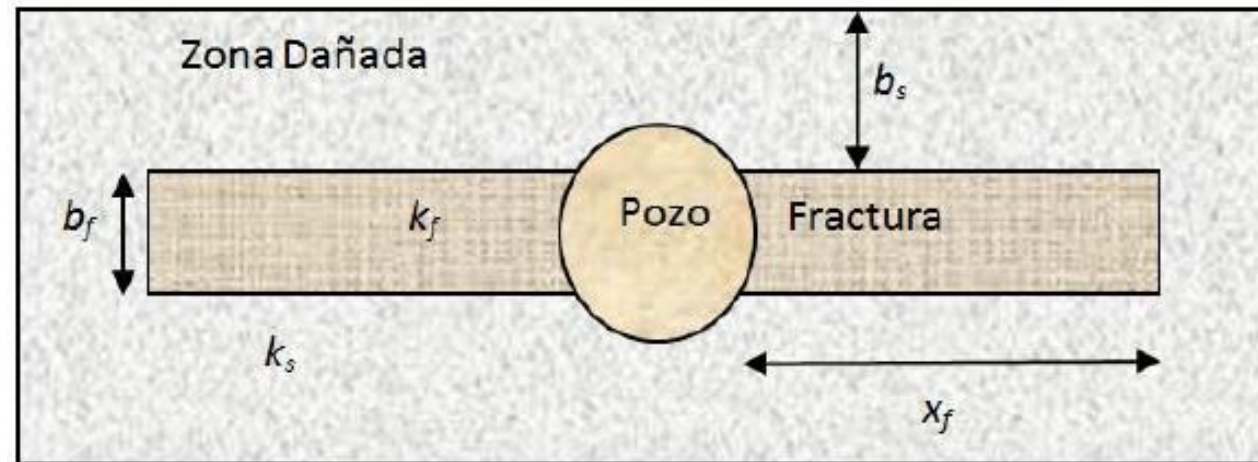




Agentes Sustentantes

- **Daño en la Cara de la Fractura:** Con los siguientes datos calcule el daño en la cara de la fractura, $b_s = 10[m]$, $x_f = 150[m]$, $k_s = 1.0[mD]$, $k = 1.8[mD]$.

$$S_{fs} = \frac{\pi b_s}{2x_f} \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right)$$





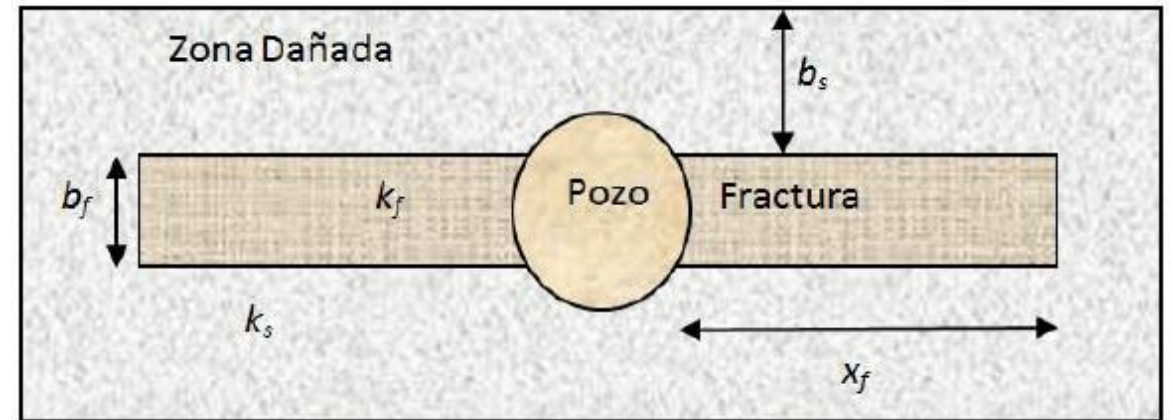
Agentes Sustentantes

- ***Daño en la Cara de la Fractura:***

- $$S_{fs} = \frac{\pi b_s}{2x_f} \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right)$$

- $$S_{fs} = \frac{\pi * 10[m]}{2 * 150[m]} \left(\frac{1.8[mD]}{1.0[mD]} - 1 \right)$$

- $$S_{fs} = 0.08$$





Agentes Sustentantes

- Tarea #12 100% de la calificación de la Tarea #12
- Daño en la Cara de la Fractura.
 - Con los siguientes datos calcule el daño en la cara de la fractura, $b_s = 15[m]$, $x_f = 170[m]$, $k_s = 1.2[mD]$, $k = 1.9[mD]$.
 - Con los siguientes datos calcule $x_f = ? [m]$, $b_s = 12[m]$, $k_s = 0.9[mD]$, $k = 1.9[mD]$, $S_{f_s} = 0.1047$.
 - Con los siguientes datos calcule $k_s = ? [mD]$, $x_f = 175[m]$, $b_s = 10[m]$, $k = 2.1[mD]$, $S_{f_s} = 0.0359$.
- Daño por Obturamiento Parcial de la Fractura.
 - Calcular el daño con los siguientes datos $b_{f_s} = 0.54[pg]$, $x_s = 23[m]$, $k = 1.9[mD]$, $k_f = 1290[mD]$, $k_{f_s} = 1000[mD]$.
 - Calcular $x_s = ? [m]$ con los siguientes datos $S_{f_s} = 10.1029$ $b_{f_s} = 0.48[pg]$, $k = 1.8[mD]$, $k_f = 1310[mD]$, $k_{f_s} = 1010[mD]$.



Agentes Sustentantes



- ***Pruebas de Incremento.***
- Se analizan para conocer las propiedades del yacimiento y las condiciones del pozo, tienen la desventaja de que para realizarlas se tiene que cerrar el pozo, afectando directamente a la producción, adicionalmente existe dificultad para mantener gasto constante antes del cierre.



Agentes Sustentantes

- ***Pruebas de Incremento.***

- A partir de la siguiente ecuación:

$$P_{ws} = P_i - 162.6 \frac{q\mu B}{kh} \log \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$$

- Reescribiendo esta ecuación:

$$P_{ws} = P_i - m \log \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$$

$$m = \frac{162.6qB\mu}{kh}$$

$$k = \frac{162.6qB\mu}{mh}$$



Agentes Sustentantes

• *Pruebas de Incremento.*

- La gráfica de la ecuación es una línea recta con intersección P_i y pendiente $-m$.

$$P_{ws} = P_i - m \log \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$$

$$m = \frac{162.6qB\mu}{kh}$$

$$k = \frac{162.6qB\mu}{mh}$$



Agentes Sustentantes

- ***Método de Horner.***

- La gráfica de P_{ws} vs $\left(\frac{tp + \Delta t}{\Delta t}\right)$ en escala semilogarítmica, se conoce como gráfica de Horner; y al método involucrado se le conoce como método de Horner. Para efectos numéricos se puede graficar P_{ws} vs $\log\left[\left(\frac{tp + \Delta t}{\Delta t}\right)\right]$ en escala normal. Una vez que se grafican los puntos, se ajusta una línea recta, para esto se deben despreciar los puntos que representan el efecto de almacenamiento.

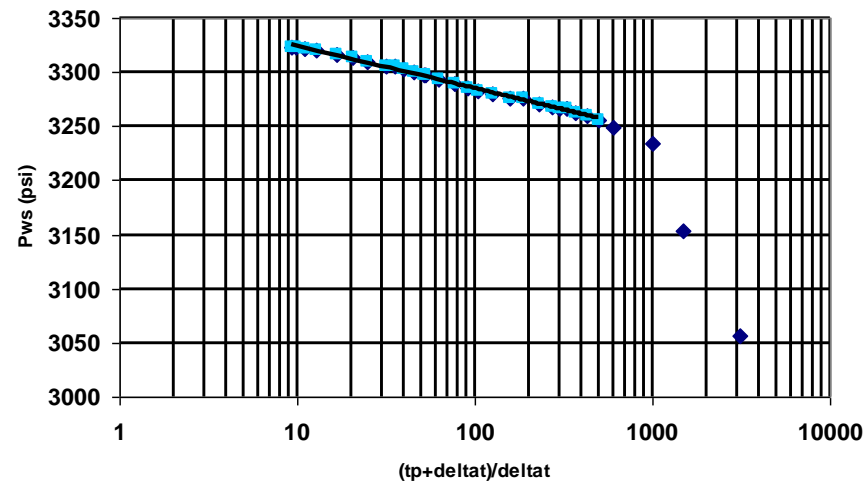


Agentes Sustentantes

- ***Método de Horner.***

- En la siguiente figura se muestra la sección de la línea recta. Esta puede ser extrapolada a $\left(\frac{tp + \Delta t}{\Delta t}\right) = 1 \log \left[\left(\frac{tp + \Delta t}{\Delta t}\right)\right] = 0$, esto equivale a un tiempo de cierre infinito, para obtener una estimación de P_i .

Grafica de Horner





Agentes Sustentantes

- ***Método de Horner.***
- El factor de daño se calcula con la siguiente expresión:

$$S = 1.1513 \left[\frac{P_{1hr} - P_{wf(\Delta t=0)}}{m} - \log \frac{k}{\phi \mu c r_w^2} + 3.2275 \right]$$



Agentes Sustentantes

- Tarea #13 100% de la calificación de la Tarea #13
 - Realizar el calculo de la permeabilidad y el daño haciendo uso del método de Horner. La información necesaria la encontraras en el archivo de Excel que te llegará vía correo.
 - Para realizar las tablas y gráficas utiliza EXCEL, para el ajuste de la recta deberás utilizar el método de regresión lineal, **NO UTILICES LA OPCIÓN DE EXCEL PARA AJUSTAR LA RECTA**. Los cálculos de permeabilidad y daño los deberás realizar sustituyendo todos los datos en las ecuaciones pertinentes y entregar junto con un reporte de todos tus resultados y gráficas obtenidos, puedes hacerlo en Word y entregarlo impreso.
 - En caso de dudas apoyate en la Tesis que te envíe en donde viene detallado el método y con un ejemplo que solo va a variar con algunos datos del ejercicio que tu tendrás que hacer.



Agentes Apuntalantes



- **Referencias.**

- Fracturamiento Hidráulico Multietapas, Tesis presentada por Blanca Ingrid Álvarez López, Director de Tesis M.I. Tomás Eduardo Pérez García.
- Curso Fluidos de Fractura Convencionales, Impartido por ABAdvisors, Poza Rica Veracruz 2010.
- “Apuntes de Estimulación de Pozos”, Garaicochea, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 1980 .



GRACIAS

Ing. Juan Carlos Sabido Alcántara

Ingeniero Petrolero

Facultad de Ingeniería UNAM