

**DESARROLLO DE SOFTWARE PARA COMPLETAMIENTO DE CONTROL DE
ARENAS**

OSCAR LOSADA ALMONACID

EDISON REINEL RODRIGUEZ OBREGON

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
NEIVA
2013**

**DESARROLLO DE SOFTWARE PARA COMPLETAMIENTO DE CONTROL DE
ARENAS**

**OSCAR LOSADA ALMONACID
EDISON REINEL RODRÍGUEZ OBREGÓN**

**Presentado ante la Universidad
Surcolombiana para optar al título
de Ingeniero de Petróleos.**

**DIRECTOR: JEYSON MANUEL CAMPO DAZA
ING. DE COMPLETAMIENTO Y WORKOVER
PETROMINERALES LTD.**

**CODIRECTOR: LUIS HUMBERTO ORDUZ PEREZ
ING. DE PETROLEOS
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ING. DE PETRÓLEOS
NEIVA
2013**

Nota de Aceptación

Firma del Director

Firma del Evaluador

Firma del Evaluador

Neiva, 15 de Agosto de 2013.

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y brindarme toda la paz espiritual necesaria para alcanzar todas mis metas...

Muy especialmente a mis abuelos Carlos, Saúl, Rosa y Hortencia; a ti papá y a ti mamá; porque han sido la guía de mi vida, por darme toda su sabiduría y su amor, por enseñarme el valor de la vida, la importancia de la paciencia, la tolerancia y la perseverancia; principios que me permitieron llegar hasta donde estoy y ser lo que soy... ESTE LOGRO ES PARA USTÉDES!

A mis hermanos por acompañarme, y quererme en todo momento y a Natalia Tovar por brindarme apoyo en los momentos difíciles y una sonrisa en los momentos felices...

EDISON RODRIGUEZ OBREGON

A mi familia, en especial a mis padres Octavio Losada y Ana Belen Almonacid, que siempre me han apoyado en mis decisiones y han hecho de mi lo que soy, como hijo y como persona; a Dios que de la mano de mis padres, me dio la vida y me ha salvado de múltiples peligros en las carreteras; a mi primo Orlando Sepúlveda, quién siendo colega, me impulso para estudiar esta carrera y me explico la importancia de alcanzar nuestras metas sin importar la edad. La culminación de esta meta es por ustedes y de todos.

OSCAR LOSADA ALMONACID

AGRADECIMIENTOS

A PETROMINERALES LTDA., por darnos la oportunidad de aplicar cada uno de los conocimientos adquiridos en la universidad; al Ingeniero JOSÉ JOSÉ ROMERO SOLANO por hacer posible nuestro vínculo con la empresa y brindarnos la posibilidad de aprender junto a ella; al Ingeniero JEYSON MANUEL CAMPO por su valioso aporte para el desarrollo de este proyecto de grado, por su apoyo, orientación y por compartirnos sus conocimientos;

A la UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA; a los profesores de el programa de Ingeniería de Petróleos por depositar sus conocimientos en nosotros; a los Ingenieros ERVIN ARANDA ARANDA y JAVIER MARTÍNEZ PÉREZ por su tiempo y gran ayuda prestada para la finalización del proyecto; al Ingeniero LUIS HUMBERTO ORDUZ por el apoyo, asesoría y colaboración prestada en el desarrollo de el proyecto

A la secretaria y madre, del programa de Ingeniería de Petróleos ELCY OBREGON TAMAYO, promotora de este proyecto; por depositar su confianza en nosotros y apoyarnos hasta el final.

A Dios por llevarme de la mano y guiar mis pasos; Él no me habría dado la capacidad de soñar, sin darme también la posibilidad de convertir mis sueños realidad.

A mi abuelo Saúl por ser mi ángel y junto a mi abuela con amor cultivar la persona que soy; a ustedes les debo lo que soy... A mi papá por guiarme y enseñarme a ser fuerte en los momentos difíciles... A mi mamá por estar conmigo siempre, aconsejándome y enseñándome el amor hacia la vida... A mis hermanos por comprenderme y apoyarme...

Al ingeniero Ervin Aranda Aranda y a la ingeniera Luz Marina Botero Rojas, elementos fundamentales en mi formación como profesional y en la culminación de este trabajo; por sus consejos, amistad y confianza.

A Natalia, a mis amigos y todas las personas que alguna vez pasaron por mi vida dejando huella y haciendo posible este proyecto, los recuerdo intactos. Ustedes supieron brindarme su mano cálida en los momentos apropiados, sin el apoyo de ustedes yo no estaría aquí!

EDISON RODRIGUEZ OBREGON

A mis padres Octavio Losada y Ana Belén Almonacid, que siempre me han apoyado en mis decisiones y han hecho de mí lo que soy; a mi hermano Andrés Acero, quien me enseñó a no rendirme ante las dificultades y a alcanzar mis metas por mérito propio; a mi gemelo Alex, quien me enseñó a acercarme con exactitud al conocimiento y a cambiar con el mundo, para crecer constantemente; a mi hermana Ana, quien con sus palabras de aliento, me levantó el ánimo y me apoyó, cuando creía estar perdido y sin opción de lucha; a COOCENTRAL, por la beca que me asignaron y que me permitió culminar mi carrera; a los profesores de la Facultad de Ingeniería, quienes con su labor, me enseñaron que nada es imposible de aprender. A ellos, y a todas las personas que conozco, que me enseñaron la importancia de escuchar y aprender de diversos temas, para forjar vastos conocimientos que serán de utilidad en mi desarrollo profesional y personal, a todos y todas gracias por el apoyo.

“Una caída es el comienzo de un nuevo camino”

OSCAR LOSADA ALMONACID

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1. PRINCIPIOS TEÓRICOS

1.1. PRODUCCIÓN DE ARENA

1.2. ORIGEN DE LA PRODUCCIÓN

1.3. FACTORES QUE CAUSAN LA PRODUCCIÓN DE
ARENA

1.3.1. Tasas de producción de hidrocarburos

1.3.2. Factores Geomecánicos

1.3.2.1. Circulo de MOHR

1.3.2.2. Cohesión

1.3.2.3. Tensión

1.3.2.4. Colapso de poro

1.3.2.5. Corte o cizallamiento

1.3.3. Factores operacionales

1.3.3.1. Perforación de pozos

1.3.3.2. Cementación primaria

1.3.3.3. Cañoneo

2. CONTROL DE ARENAS

2.1. CÓMO PREDECIR LA PRODUCCIÓN DE ARENA

2.2. INFLUENCIAS OPERATIVAS Y ECONÓMICAS

2.3. TÉCNICAS PARA EL CONTROL DE ARENAS

2.3.1. Criterios de selección

2.3.2. Métodos para control de arena

2.3.2.1. Mantenimiento y rehabilitación de pozos

2.3.2.2. Modificaciones de la tasa de flujo

2.3.2.3. Métodos químicos

2.3.2.3.1. Separación de Fases

2.3.2.3.2. Sobreflujo

2.3.2.3.3. Microesferas de vidrio

2.3.2.3.4. Bauxita Sintetizada

2.3.2.4. Métodos Mecánicos

2.3.2.4.1. Liners ranurados

2.3.2.4.2. Pre- Pack Screens

2.3.2.4.3. Gravel Pack

2.3.2.4.4. Wire Wrapped Screen

2.3.3. Otras consideraciones

2.3.3.1. Selección de la grava

2.3.3.2. Análisis granulométrico

3. SOFTWARE

3.1. FUNDAMENTOS

3.2. MANUAL DEL USUARIO

3.2.1. Requisitos técnicos e instalación

3.2.2. Diseño de completamiento para control de arenas

3.2.2.1. Selección de parámetros a evaluar

3.2.2.2. Datos de entrada análisis Siever

3.2.2.3. Datos de entrada análisis erosión

3.2.2.4. Datos de entrada cálculo de daño

3.2.3. Resultados

3.2.3.1. Guardar e imprimir resultados

4. CONCLUSIONES

5. RECOMENDACIONES

6. BIBLIOGRAFIA

7. ANEXOS

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Envolvente de falla.

Figura 2. Cargas presentes en la roca yacimiento.

Figura 3. Arco estable alrededor de una perforación.

Figura 4. Caída de presión a través de las perforaciones.

Figura 5. Liner Ranurado.

Figura 6. Rejilla sola para empaque con grava.

Figura 7. Rejilla Pre-Empacada.

Figura 8. Tabla estándar de redondez y esfericidad por Krumbein y Sloss.

Figura 9. Index Sand Control.

Figura 10. Ventana advertencia Index.

Figura 11. Análisis Sieve Sand Control.

Figura 12. Análisis Erosión Sand Control.

Figura 13. Análisis Producción Sand Control.

Figura 14. Hoja de resultados.

Figura 15. Ventana de verificación datos ingresados.

Figura 16. Ventana inicio EXCEL.

Figura 17. Ventana Guardar EXCEL.

Figura 18. Gráfico análisis Sieve.

Figura 29. Tabla Tamices.

Figura 20. Gravas Comerciales Gravel Pack.

Figura 21. Mallas Comerciales.

RESUMEN

Se presenta un software que soporta el diseño del completamiento con control de arenas para optimizar la producción usando el método de exclusión de arena.

Los resultados del completamiento y posteriormente la producción de pozos son a veces desalentadores, muchos de los mecanismos usados para completar a menudo no proveen los beneficios económicos o los incrementos de producción esperados, debido a la presencia de arena que se producen en el pozo.

Cuando se opta por completar un pozo, en ocasiones parámetros importantes de producción de arenas, no son tenidos en cuenta para la selección del diseño a usar.

A partir de los factores más influyentes en la producción de arena, acopiamos información de los diferentes criterios de selección de control y se desarrolló un software, que permite la correcta selección del mecanismo de control de arena a aplicar en el completamiento que cooperarán a la maximización de la vida productiva de los nuevos pozos y de aquellos que se vayan a intervenir.

INTRODUCCIÓN

Los pozos durante su etapa de producción presentan problemas y/o situaciones que pueden afectar su productividad. Uno de los problemas que más afecta la vida de un pozo y se presenta con alta frecuencia es la producción de arena

La historia de la producción de arena se remonta a la década de 1900 con la realización de pozos de agua con instalaciones de control de arena. Los problemas de arena se asocian normalmente con formaciones geológicas poco profundas que tienen poca cementación natural para mantener los granos de arena individuales juntos, pero en algunos casos los problemas de arena se pueden encontrar a altas profundidades.

Los granos de arena sueltos son movilizados ante ciertos niveles de caída de presión, velocidades y viscosidades de fluido; una vez producidas en el interior del pozo, estas partículas pueden provocar estragos aguas abajo. Generados en condiciones de flujo rápido o en grandes cantidades, los granos de arena erosionan los tubulares y pueden convertirse en obstrucciones fijas o móviles que causan fallas catastróficas en los pozos. La capacidad de erosión de la arena producida depende de varios factores, incluyendo el volumen de arena producida, la velocidad de las partículas de arena y el ángulo de impacto.¹

La producción de arena en campos petroleros ha sido un problema desde el comienzo de la historia de la explotación de petróleo, y a pesar de los mecanismos implementados, no se ha logrado eliminar ni controlar eficientemente. Es importante resaltar que para contar con un completamiento exitoso que evite los problemas de producción de arena, se requiere que cada uno de los procedimientos que se lleven a cabo, sean diseñados y ejecutados adecuadamente.

En el desarrollo de este trabajo se enfatizó en la importancia que tienen los ensayos de granulometría, control de calidad durante la selección de la grava adecuada o material de soporte a utilizarse con el mecanismo de control de arena seleccionado y el tiempo de vida de este.

1. PRINCIPIOS TEÓRICOS^{2, 3}

1.1. Producción de Arena

La producción de arena ocurre cuando parte del material perteneciente a la formación viaja del yacimiento al pozo y posteriormente a la superficie, junto con los fluidos producidos. Este material comúnmente denominado arena, se define como toda partícula con un rango de tamaño entre 2 y 0,0625 mm de diámetro.

1.2. Origen de la producción de arena

Las condiciones que pueden originar la producción de arena y el estado en que probablemente se encuentra la formación detrás de la tubería de revestimiento, una vez producida dicha arena, se determinan en base a varios factores. Estos factores deben describir tanto la naturaleza del material de la formación que se produce, como las fuerzas que ocasionan la falla en la estructura de la misma, siendo ellos principalmente los siguientes:

- Cantidad y tipo de cemento que mantiene la cohesión entre los granos.
- Fuerzas de fricción existentes entre los granos.
- Presión del fluido en los poros de la roca.
- Fuerzas de presión capilar.
- Factores geológicos y geográficos.
- Factores térmicos.

1.3. Factores que causan la producción de arena

Los esfuerzos desestabilizadores y la resistencia mecánica de la formación pueden ser afectados sustancialmente por las operaciones tradicionales de pozos, tales como perforación, completamiento, producción y estimulación. Por lo tanto, para poder analizar el fenómeno de producción de arena en toda su amplitud, se deben analizar todas aquellas operaciones que puedan incidir sobre los esfuerzos desestabilizadores y la resistencia mecánica de la formación. En tal sentido, dichas operaciones pueden disminuir sustancialmente la resistencia mecánica de la formación, y/o aumentar las velocidades de los fluidos, generando esfuerzos de arrastre excesivos.

Las actividades de producción quizás sean las más perjudiciales desde el punto de vista de la producción de arena. Si un pozo se produce con una tasa de producción indiscriminadamente elevada, ello puede generar graves problemas de producción de arena, ya que probablemente se sobrepase la tasa crítica de la formación y se generen fuerzas de arrastre excesivas. Dicho problema se complica en aquellos pozos que sufren bruscas variaciones de tasas en cortos períodos de tiempo, bien sea por aperturas y cierres, o por cambios de reductores o equipos de superficie.

El problema de producción de arena es radicalmente distinto al problema de migración de finos, desde el punto de vista del mecanismo que causa el desprendimiento de las partículas, aunque ambos están relacionados con el transporte de partículas desde la formación hacia el pozo. Mientras el desprendimiento de partículas en

la producción de arena es causado por una interacción física entre los fluidos y sólidos de la formación, debido a las fuerzas de arrastre y gradientes de presión que actúan sobre el esqueleto mineral; la migración de finos es causada, principalmente, por una interacción química entre los fluidos y sólidos de la formación, como consecuencia de cambios químicos que ocurren en los fluidos originando el desprendimiento de partículas de arcillas; caso distinto es el de los limos, los cuales no se separan de la formación, debido a que los mismos no reaccionan con los fluidos y sólidos de la formación. Las partículas de arcillas migran y pueden causar taponamiento de los poros, aumentando considerablemente el daño a la formación. Muchas veces la migración de finos y la producción de arena están relacionados, ya que al moverse las partículas de finos se pueden crear espacios lo suficientemente grandes, como para permitir que se muevan partículas de arena.

Dentro de los factores fundamentales que causan producción de arena en un pozo, claramente asociadas a situaciones de poca o total no consolidación de la roca se pueden nombrar las siguientes:

1.3.1. Tasas de producción de hidrocarburos

Los fluidos que se mueven a través de un yacimiento generan esfuerzos sobre los granos de arena; dichos esfuerzos tienden a mover los granos hacia el pozo, junto con los fluidos producidos.

Los esfuerzos sobre los granos de arena son causados por la diferencia de presión en el yacimiento, por la sobrecarga geológica y

por las fuerzas de fricción causadas por el movimiento de los fluidos; Estas últimas constituyen el mayor esfuerzo que tiende a causar los problemas de producción de arena en un pozo. Así, cuando la suma de todos estos esfuerzos excede la resistencia de la formación, se tendrá producción de arena desde la formación.

Para evitar los problemas de producción de arena en pozo, se necesita que la tasa a la cual el yacimiento produce hidrocarburos esté por debajo del valor crítico en la cual el pozo empieza a tener problemas. Sin embargo, es muy frecuente que las tasas de producción de hidrocarburos por debajo del valor crítico sean poco económicas; para evitar ese problema se debe pensar en un control de arena desde antes del completamiento del pozo. La tendencia a producir arena se puede reducir incrementando el área expuesta a producción, lo cual se consigue manteniendo los túneles de cañoneo limpios, o bien, aumentando la longitud del intervalo cañoneado.

1.3.2. Factores geomecánicos.

La mayoría de los yacimientos del período terciario están propensos a producir arena, ya que estos yacimientos son geológicamente jóvenes; generalmente, estos yacimientos se encuentran a poca profundidad y están moderadamente consolidados, con una resistencia a la compresión de más o menos 100 psi. Los yacimientos anteriores al periodo terciario, generalmente están más consolidados y los problemas de producción de arena en estas formaciones no son muy graves. Sin embargo, La magnitud de la tasa de producción de los fluidos y las fuerzas de fricción originadas por estos, pueden ser lo

suficientemente altas y causar problemas de producción de arena en formaciones con resistencia a la compresión mayores a 1000 psi.

En la mayoría de las formaciones de areniscas, los granos de arena se encuentran unidos por varias clases de material cementante, tales como: carbonatos, sílice, calcita y arcilla. Si a la formación se le hace un trabajo de inyección con ácido, el material cementante se disuelve y por lo tanto habrá producción de arena en el pozo.

Algunas areniscas petrolíferas están formadas por arena poco cementada, la cual se mueve con los fluidos producidos hacia el pozo cuando las fuerzas originadas por estos fluidos llegan a ser mayores que las fuerzas de sostén de los granos de arena.

1.3.2.1. Círculo de Mohr y las causas del arenamiento

Por medio de la Ley de Mohr-Coulomb sabemos que la resistencia mecánica de la formación es función directa de los esfuerzos efectivos, por lo que se deben determinar los esfuerzos totales y las presiones de poro en la vecindad del pozo, pues son necesarios, conjuntamente con los resultados de los ensayos de laboratorio para estimar la resistencia al corte de la formación. Ésta representa la resistencia de la formación en su estado virgen si está basada en información de núcleos tomados durante la etapa de perforación. Cualquier daño mecánico ocurrido por las actividades de completamiento, producción y estimulación; no será reflejado en los resultados de los ensayos geo-mecánicos y, por lo tanto, se deben evaluar sus efectos sobre la formación adicionalmente.

La teoría del círculo de Mohr, asume un campo de esfuerzo bidimensional, donde los esfuerzos principales actúan en un plano horizontal; uno de estos esfuerzos tiene dirección radial y el otro dirección tangencial. La técnica asume que los esfuerzos verticales son despreciables y que la roca se comporta elásticamente al ser sometida a los esfuerzos contenidos en un plano horizontal.

Para un material elástico, la relación entre los esfuerzos de corte y los esfuerzos principales puede ser descrita a través de un círculo graficado en coordenadas cartesianas con los esfuerzos normales en el eje de las abscisas y los esfuerzos de corte en el eje de las ordenadas.

El criterio de falla de Mohr establece que para cada material existe una envolvente de ruptura, a partir de la cual el material falla. Para obtener la envolvente de falla de un tipo de roca en particular, se deben realizar una serie de ensayos tri-axiales bajo condiciones de confinamiento diferentes hasta que ocurra la falla de la misma. Cada ensayo puede ser graficado usando el esfuerzo efectivo como un círculo de Mohr limitante de diámetro, igual a la diferencia entre la resistencia máxima de la muestra y la de confinamiento (**Figura 1**). La envolvente de falla es un lugar que separa las condiciones estables de las inestables.

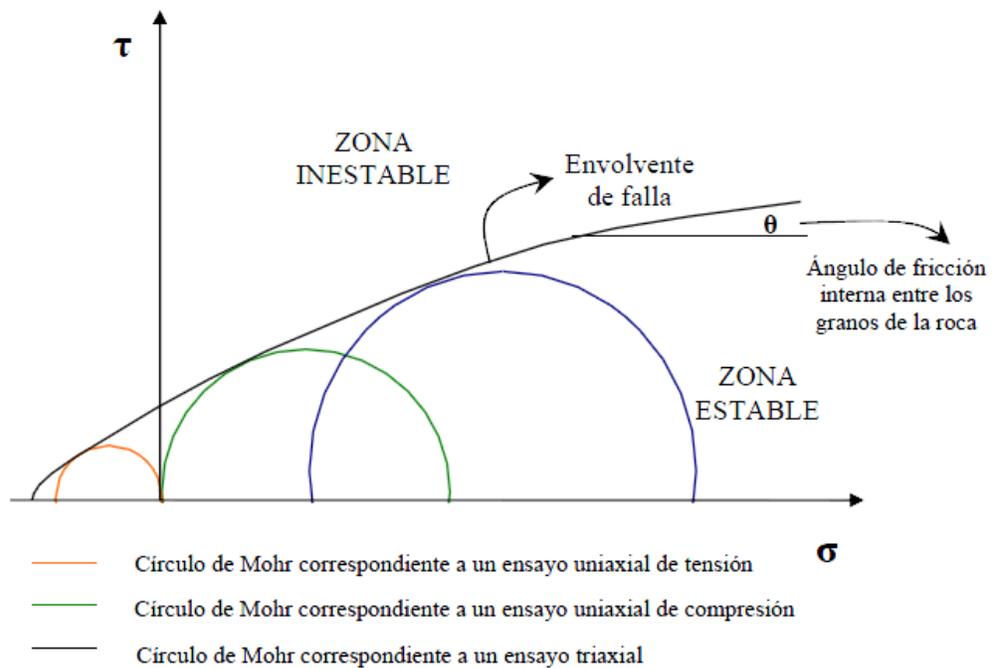


Figura 1. Envolvente de falla.

El ensayo uni-axial de compresión es aquel donde se comprime un cilindro de roca en una celda tri-axial y a medida que aumenta la presión axial se aumenta la presión de confinamiento, de manera que la deformación ocurre sólo axialmente. Lo mismo sucede en los ensayos uni-axiales de tensión pero con la diferencia que el cilindro de roca se somete a tensión.

El círculo de Mohr contiene toda la información necesaria para determinar el estado de esfuerzos a cualquier orientación de la muestra. El eje horizontal de la gráfica, llamado σ , representa el esfuerzo normal efectivo; el eje vertical, llamado τ , representa el esfuerzo de corte. Las intersecciones de este círculo con el eje horizontal determinan los valores máximos y mínimos del esfuerzo normal.

1.3.2.2. Cohesión

Se refiere a las fuerzas que mantienen unidos los granos de la formación y que impiden su flujo libre. La roca adquiere su cohesión a través de procesos diagenéticos (compactación, cementación, recristalización y solución de minerales). Mientras mayor sea el grado de diagénesis mayor será el grado de cohesión de la roca.

Otro factor que contribuye a la cohesión de las rocas son las fuerzas capilares que se producen entre los granos de la roca y el fluido humectante, debido a la tensión interfacial presente entre los granos; la cual crea una fuerza cohesiva en la matriz de la roca. Esto sucede porque entre los puntos de contacto de los granos se encuentra agua, formándose un menisco que toca la superficie de los granos, donde se pone de manifiesto la tensión superficial, que generará una fuerza de adherencia entre los granos. Esta fuerza produce la cohesión aparente de la arena, originando una resistencia a la compresión y a la tracción.

Las fallas por cohesión ocurren cuando el esfuerzo normal es igual a cero, mientras que la producción de arena ocurre cuando las fuerzas de arrastre causadas por los fluidos, exceden el esfuerzo de cohesión del material. Los granos de rocas son separados y arrastrados hacia los perforados y por ende al pozo.

1.3.2.3. Tensión

Las fallas por tensión ocurren cuando la envolvente de falla intercepta el eje de las abscisas en un valor de esfuerzos de corte igual a cero.

Las fallas por tensión pueden ocurrir, cuando los esfuerzos por tensión son mayores al diferencial de presión generado alrededor del pozo.

$$P_{wf} \geq P + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_t$$

Donde:

P_{wf} = Presión de fondo fluuyente (en el fondo del hoyo).

P = Presión de poro.

$\sigma_{\theta\theta}$ = Esfuerzo efectivo tangencial al hoyo.

σ_t = Esfuerzo de Tensión.

Esto sucede cuando la tasa de producción es muy alta, creando un diferencial de presión alto alrededor del pozo, produciéndose la ruptura de la formación.

1.3.2.4. Colapso de poro

La presión de sobrecarga a la cual está sometida la formación es soportada por los granos que constituyen el esqueleto mineral del sistema, así como también por los fluidos contenidos dentro del espacio poroso.

El esfuerzo al cual es sometido el esqueleto mineral, es una fracción del esfuerzo total aplicado. El esfuerzo efectivo a que está sometido el material se incrementa a medida que se reduce la presión de poro.

El esfuerzo efectivo puede ser expresado analíticamente, de la siguiente manera:

$$\sigma' = \sigma + \alpha p$$

donde:

σ' = Esfuerzo efectivo.

σ = Esfuerzo total debido a la presión de sobrecarga.

α = Constante de Biot.

P = Presión de poro.

El coeficiente de Biot describe la eficiencia de la presión de los fluidos para contrarrestar los esfuerzos totales aplicados. Este parámetro oscila entre 0 y 1.

1.3.2.5. Corte o cizallamiento

Ocurre cuando la roca es sometida a un campo de esfuerzos de tal forma que se alcanza la resistencia al corte del material. Las fallas por corte ocurren cuando la combinación de esfuerzos intercepta la envolvente de ruptura. La resistencia de los materiales porosos es variable y aumenta con los esfuerzos de compresión.

En la **Figura 2** se muestra una representación de las fuerzas de corte a las cuales se encuentra sometida la roca.

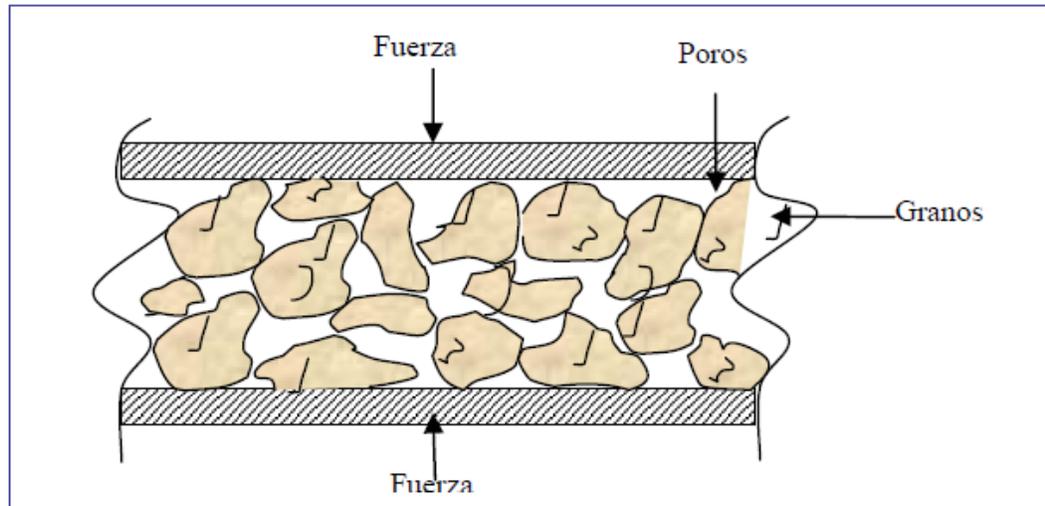


Figura 2. Cargas presentes en la roca yacimiento.

1.3.3. Factores operacionales

La producción de arena es un fenómeno que depende de esfuerzos de la formación, espesor de éstas, rata de producción de fluido y tipos de fluidos, además de la dirección de los esfuerzos orientados hacia las perforaciones.

Para el éxito de la aplicación de las técnicas de control de arena en el pozo, se requiere que cada etapa de trabajo en el pozo sea efectuada apropiadamente. La producción de arena en un pozo reduce la producción de los fluidos del yacimiento, daña los equipos de producción y puede colapsar el revestimiento. Por lo tanto, es importante planear y diseñar el control de la producción de arena antes de empezar la perforación de un pozo. Después de la perforación, es necesario que la cementación y el completamiento del pozo sean diseñados y realizados correctamente. Dentro de la etapa de

completamiento de un pozo, el cañoneo y los fluidos utilizados para el completamiento del mismo; son determinantes en la efectividad de los métodos de control instalados.

1.3.3.1. Perforación de pozos

El daño que causa la actividad de perforación a la resistencia mecánica de la formación, es proporcional a la tasa de penetración. Adicionalmente, los fluidos de perforación pueden ocasionar daño, por pesos demasiado altos que causan rompimiento mecánico de la formación (fractura hidráulica no planificada) y problemas de invasión de lodo, originándose daño a la formación en las inmediaciones del pozo ("skin damage") y reduciendo además la permeabilidad en esa zona. Aunque la perforación siempre ocasionará algún daño a la formación, estas operaciones deben optimizarse para minimizar sus efectos.

Durante la etapa de perforación de un pozo, el lodo de perforación utilizado debe ser diseñado de tal forma que permita la formación de una torta estable alrededor del hueco que evite los derrumbes, los cuales son la causa de la disminución de la productividad de los pozos. Al lodo de perforación generalmente se le agregan materiales de mediana a alta densidad, como arcillas y otros sólidos, los cuales pueden taponar los poros de la formación, disminuyendo así su permeabilidad y perjudicando el tratamiento de control de arena que se vaya a realizar posteriormente. El uso de los lodos de perforación no compatibles con las formaciones ocasiona un hinchamiento y

dispersión de las arcillas que producen daños irreversibles en las formaciones.

Por esto, para evitar problemas en la vida productiva de un pozo, se deben diseñar como lineamientos básicos, lodos con bajo contenido de sólidos para reducir el taponamiento de los poros en la formación y lodos compatibles con las formaciones perforadas.

1.3.3.2. Cementación primaria

Las actividades de cementación pueden fomentar problemas de producción de arena, especialmente si quedan canales entre la formación y el revestimiento, pues estos se volverán canales preferenciales de flujo con velocidades excesivas y, por lo tanto, se originarán mayores fuerzas de arrastre. Adicionalmente, si el cemento no hace buen contacto con la formación, entonces, ésta no tendrá el confinamiento óptimo y los esfuerzos efectivos serán muy bajos. Como los esfuerzos efectivos bajos producen resistencias al corte bajas, una mala cementación crearía zonas de baja resistencia alrededor del pozo, provocando un escenario propicio para la producción de arenas.

Durante la cementación primaria, la permeabilidad de la formación en la vecindad del pozo se puede afectar seriamente por los sólidos contenidos en el cemento y al ser afectada la permeabilidad se dará lugar a una alteración en los patrones de flujo una vez se ponga a producir el pozo ocasionando problemas. Además, los aditivos químicos mezclados con el cemento pueden producir el hinchamiento de las arcillas que dan como consecuencia la situación antes descrita.

Los sistemas de consolidación química requieren de un buen trabajo de cementación primaria para evitar que la grava inyectada en la formación se canalice en la capa de cemento. En los sistemas de empaquetamiento con grava, una mala cementación primaria acelera el deterioro del empaque de grava con el tiempo.

1.3.3.3. Cañoneo

Los cañoneos deben ser planificados y ejecutados para producir cavidades estables a largo plazo. Los parámetros de diseño de dichos cañoneos, tales como diámetro, longitud, penetración, densidad, ángulo de fase, etc., deberán ser especificados en función de las propiedades mecánicas de la formación, para evitar condiciones inestables en la formación que propicien la producción de arena.

El principio básico es no cañonear en formaciones débiles poco consolidadas y producir únicamente a través de un completamiento continuo entre la formación- liner ranurado, y la grava fina pre-ubicada y pozo. Numerosas pruebas de simple y múltiples disparos han demostrado que esto no siempre se cumple; además se muestra que la definición de las formaciones en arenas débiles depende de los esfuerzos sobre la roca, entre otros factores como los esfuerzos efectivos, el bajo balance sometido, distancia entre perforaciones adyacentes y los fluidos en los espacios de la zona.

Después que se inicia la producción de arena, en ocasiones se forma un arco (**Figura 3**) en la zona que rodea los cañoneos, el cual debe

poseer resistencia suficiente como para sustentar y soportar las cargas generadas por el efecto de los esfuerzos verticales. En determinadas condiciones, puede tolerarse la producción de una cantidad limitada de arena, permitiéndose el desarrollo de un arco de arena, tras lo cual cesaría la producción de arena de formación, debido a que se crearía un filtro natural en la cara de las perforaciones que evitaría el paso de los granos a través de él.

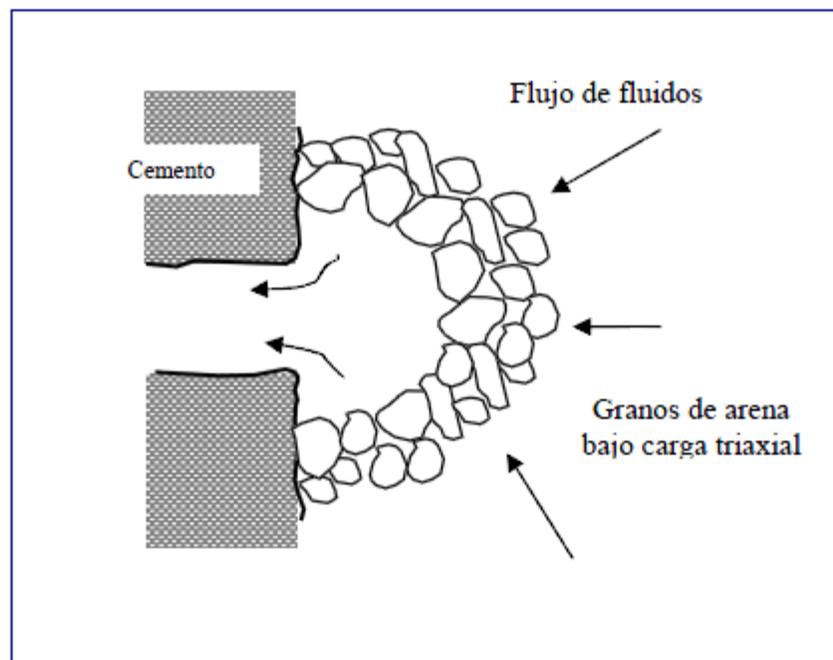


Figura 3. Arco estable alrededor de una perforación.

El arco adquiere mayor estabilidad cuando están presentes fuerzas de cohesión entre los granos. Sin embargo, la estabilidad del arco es limitada en el tiempo, ya que el estado de esfuerzo existente alrededor de los cañoneos se transforma constantemente, debido a los cambios que registran la tasa de flujo, la presión del yacimiento, el corte de

agua, etc., provocando el rompimiento del arco, que luego se formará en reiteradas oportunidades a lo largo de la vida del pozo.

Cabe resaltar que el objetivo de un buen procedimiento de cañoneo, además de elaborar una buena comunicación pozo-formación, es prevenir la producción de arena al máximo y crear la menor caída de presión (Δp) a través del conducto perforación.

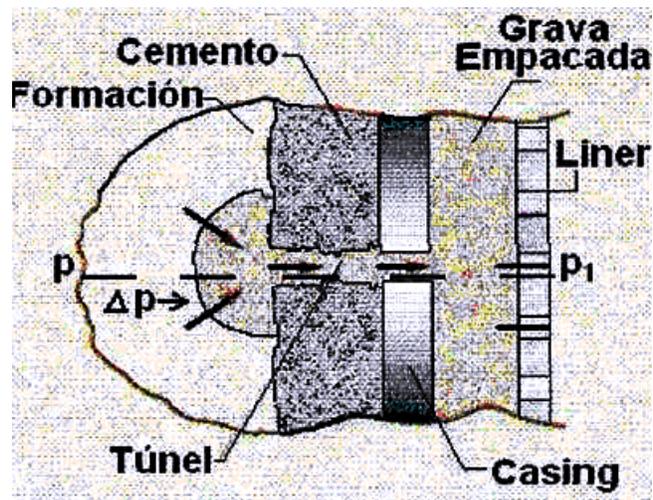


Figura 4. Caída de presión a través de las perforaciones.

En las perforaciones efecto del cañoneo, la caída de presión a través de la sección cañoneada es regida por el área total, que es el área de un hueco individual por el número de disparos realizados. Para producir un método óptimo de control de arena posterior al disparo, el daño producido por el disparo y la formación de finos deben ser removidos. Una buena opción para reducir estos efectos es el cañoneo bajo balance.

2. CONTROL DE ARENA

Es el conjunto de técnicas mediante las cuales se maneja total o parcialmente, la producción de sólidos provenientes de la formación productora los cuales se producen conjuntamente con los fluidos, restringiendo en lo menor posible la productividad del pozo.⁴

El flujo de arena con aceite y gas de los yacimientos hacia los pozos productores ha sido siempre uno de los principales problemas en la industria petrolera. Por ello el control de arena es un término que describe el estudio del porque los pozos producen sólidos, a la vez que el desarrollo de mecanismos y métodos químicos que prevengan la producción de arena.

Sin embargo, uno de los puntos principales a tomar en cuenta es la forma en la que el pozo es completado, lo que puede incrementar o disminuir la tendencia a la producción de arenas. Por lo que la planeación del mismo involucra a un equipo seleccionado de trabajo compuesto por geólogos, ingenieros, personal de perforación quienes coordinan esfuerzos con perforadores y personal de producción para cumplir con los objetivos de manera eficiente.

En décadas recientes, los problemas de control de arena en pozos productores de petróleo y gas han incrementado significativamente, por lo que muchos campos alrededor del mundo no son económicamente factibles sin un buen sistema de control de sólidos que evite estos problemas, que a la final se reflejan en factores económicos.⁵

2.1. Como predecir la producción de arena

Para poder predecir si un pozo producirá fluidos sin producir arena o si se requerirá algún tipo de control de arena, se ha constituido la meta de muchos ingenieros de completamiento y proyectos de investigación. A pesar de que existen algunas técnicas de análisis y pautas que han diseñado para ayudar a determinar si el control de arena es necesario, ninguna ha demostrado ser universalmente aceptada o completamente precisa.

Actualmente, predecir si una formación producirá o no arena no constituye una ciencia exacta, por lo que se necesita mejorar los métodos. En tanto no se disponga de técnicas de predicción más exactas, la mejor manera de definir si se requiere controlar la producción de arena en un pozo en particular consiste en efectuar una extensa prueba de producción con un completamiento convencional y observar si se produce arena. Los pozos referenciales que producen en la misma formación, en el mismo campo y en condiciones similares son un buen indicador.

2.2. Influencias operativas y económicas

La dificultad que implica determinar si un pozo requiere o no control de arena se incrementa cuando el mismo se perfora en un área donde existe poca o ninguna experiencia de producción y donde los diversos factores de yacimiento son ligeramente distintos de los que se manifestaron en regiones explotadas con anterioridad. Incluso cuando las propiedades del yacimiento y la formación son prácticamente idénticas a otras explotaciones, las condiciones operativas y los

riesgos podrían exigir la utilización de estrategias distintas. La decisión de utilizar una técnica de control de arena es de naturaleza tanto económica como operativa y se tiene que tomar con base en una información limitada.⁶

2.3. Técnicas para el control de arenas⁷

Existen muchas técnicas para controlar la producción de arena en pozos, las cuales van desde simples cambios en las prácticas de operación hasta costosos completamientos, tales como consolidación de arena y empaque con grava. El método de control seleccionado depende de las condiciones específicas del sitio, las prácticas operativas y factores económicos.

2.3.1. Criterios de selección⁸

Identificada la necesidad del pozo, para la aplicabilidad de un método de exclusión de arena, la misma debe hacerse considerando los siguientes criterios:

- **Económico:** Considerar el costo inicial del tratamiento y este efecto sobre la producción.
- **Antecedentes históricos:** Análisis de la vida productiva del yacimiento y del pozo.
- **Aplicabilidad:** Grado de dificultad en la aplicación del tratamiento.
- **Duración del servicio:** Estimación de producción libre de arena y tasa de frecuencia para la repetición del tratamiento.

2.3.2. Métodos para control de arena⁹

En la actualidad diversos estudios publicados han desarrollado sistemas de control de arena donde se describen técnicas apropiadas para la aplicación de las mismas, aunque a pesar del progreso en la resolución de dichos problemas, existen controversias en cuanto al tipo de método que debe ser aplicado en alguna situación en particular. Ciertamente, esto es causa de debates, aunque los autores proponen guías establecidas en base a la experiencia durante el uso de los sistemas.

Aunque comúnmente existan variaciones entre cada uno de estos métodos, siguen incluyendo características típicas o normales para la mayoría de las condiciones a combatir; por lo que cada uno independientemente del tipo seleccionado, debe ser correctamente diseñado y aplicado para evitar pérdidas en la productividad de los pozos, ya que en algunas áreas es tal el índice de aportación de arena que por taponamiento se abate la misma.

Estos métodos pueden ir desde simples cambios en las rutinas de operación, hasta costosas terminaciones por lo que el método seleccionado dependerá de las condiciones específicas del lugar, del tipo de operaciones y también de las consideraciones económicas.

2.3.2.1. Mantenimiento y rehabilitación de pozos¹⁰

La técnica de mantenimiento y rehabilitación de pozos constituye un enfoque pasivo del control de arena. Este método consiste básicamente en permitir la producción de arena y controlar sus efectos

cuando y como sea necesario. Para emplear la técnica se debe achicar, lavar y limpiar diariamente las instalaciones de superficie, con el fin de mantener la productividad del pozo. Este enfoque puede dar resultado en ambientes específicos de formación y operación.

Este método se utiliza principalmente en aquellos casos en los que la producción de arena es limitada, cuando las tasas de producción son bajas y el riesgo de realizar algún servicio también es reducido y económicamente factible, o en pozos marginales en los que no se pueda justificar el gasto en otras técnicas de control de arena.

2.3.2.2. Modificaciones de la tasa de flujo¹¹

Se fundamenta en una reducción de la velocidad en el área cercana a la boca del pozo (en la cara de la arena) mediante la restricción de las tasas de producción, disminuyendo la caída de presión en la cara de la formación. Se reduce o aumenta la tasa de flujo paulatinamente hasta que la producción de arena sea operativamente manejable. Es una técnica de ensayo y error, la cual se basa en la formación de arcos estables en la formación. Es necesario repetir eventualmente el procedimiento, a medida que cambia la presión del yacimiento, la tasa de flujo y el corte de agua. La desventaja de esta técnica es que la tasa requerida para mantener un arco estable en la formación suele ser menor al potencial de flujo del pozo y esto representa una pérdida significativa desde el punto de vista de la productividad.

2.3.2.3. Métodos químicos¹²

Para los ingenieros y científicos fue natural para tratar de mejorar el control de arenas, considerar la consolidación artificial de los granos de arenas de la formación. Con ello se eliminará la necesidad de colocar liner ranurado en el hueco perforado, haciendo posible un mejor control de inyección de fluidos para estimular o aplicar la recuperación secundaria, y facilitar los trabajos de reparación. Además, si la formación se puede consolidar en el sitio, antes de que sus estados naturales sean alterados, se puede obtener una productividad natural máxima y habrá muy poco o ningún movimiento de partículas finas.

2.3.2.3.1. Separación de Fases

Este proceso incluye soluciones de resina relativamente diluidas en solventes de hidrocarburos. Combinando con un activador (catalizador), la fase líquida de la resina se separa del solvente, después de un período de tiempo, y se solidifica. Después de la separación, pero aún en estado líquido, la resina es atraída por las fuerzas capilares hacia los puntos de contacto grano a grano. Otros sistemas combinan la operación de fases con un sobreflujo.

2.3.2.3.2. Sobreflujo

Este proceso utiliza una solución de resina de punto cedente elevado. La permeabilidad se establece bombeando un fluido de sobreflujo dentro de la formación, desplazando la resina y dejando una saturación residual en los puntos de contacto grano a grano. El sobreflujo se diseña para controlar el espesor de la película plástica y por consiguiente, controla la resistencia corrosiva y la permeabilidad.

2.3.2.3.3. Microesferas de vidrio

El uso de microesferas de vidrio como material de empaque ha sido estudiado recientemente. Los resultados de esta investigación arrojan resultados satisfactorios, colocando a este método como una alternativa para el control de arena, en pozos donde la grava no tiene efectividad; específicamente en pozos con inyección de vapor.

2.3.2.3.4. Bauxita Sintetizada

El uso de la bauxita sintetizada, como material de empaque, ha sido objeto de muchos estudios. Estas evaluaciones se están dirigiendo específicamente a los pozos que producen petróleo con alto contenido de arena, y que fueran sometidos a inyección de vapor.

2.3.2.4. Métodos Mecánicos¹²

Estos métodos tratan de controlar la arena de formación por el puenteo de los granos en las ranuras de las tuberías, rejillas pre-empacadas, mallas y empaquetamiento con grava. Es obvio que un control de arena exitoso usando métodos mecánicos se basa en la selección correcta de la ranura de la tubería y del diámetro de los granos de grava a utilizarse, esto significa que muestras de la arena de formación representativas deben ser obtenidas y analizadas correctamente.

2.3.2.4.1. Liners ranurados

Constituyen la manera más sencilla de controlar la producción de arena en pozos dependiendo lógicamente del grado de consolidación de la arena a producir. Este mecanismo debe emplearse, sólo si se

tiene una arena bien distribuida y limpia, con un tamaño de grano grande, porque de lo contrario terminará taponándose.

Los liners actúan como filtros de superficie entre la formación y el pozo, puesto que el material de la formación se puentea a la entrada del liner. Los liners ranurados previenen la producción de arena basados en el ancho de las ranuras o aperturas para el flujo, denominado también calibre, creando así un filtro que permite la producción de petróleo.



Figura 5. Liner Ranurado

Una de las limitaciones más rápidamente identificables de los liners ranurados como una técnica de control de arena, es la corrosión de las ranuras antes de que ocurra el puenteo.

Si los puentes que se han formado no son estables, pueden romperse cuando cambie la tasa de producción o cuando se cierre el pozo. Ahora bien, debido a que los puentes pueden romperse, es posible que la arena de la formación se reorganice, lo cual, con el tiempo, tiende a ocasionar la obstrucción de la rejilla o liner. Por tanto, cuando se utilice esta técnica para controlar arena de Formación, el diámetro de la rejilla o liner debe ser lo más grande posible, con el fin de minimizar la magnitud de la reorganización de los granos que pueda ocurrir.

Para que un liner ranurado sea eficaz, deberá utilizarse exclusivamente en formaciones de permeabilidad relativamente elevada, que contengan poca o ninguna arcilla y cuyos granos de arena sean grandes y estén bien distribuidos. Si la formación presenta suficiente arcilla, los puentes de arena que se forman en la rejilla o en el liner podrían obstruirse. Si el rango de tamaño de las partículas de arena es amplio y/o diverso, es posible que el liner se obstruya con granos de arena.

Los pozos de petróleo y/o gas con arenas bastantes sucias y con tamaños de granos pequeños, son normalmente formaciones no-uniforme. Esto no permitirá un apropiado puenteo de la arena de la formación sobre el liner. Cuando el liner ranurado viene acompañado de una malla, en la mayoría de los casos algún puenteo ocurrirá, pero con una reducción de la producción debido a la invasión de las partículas más pequeñas en las aberturas de las rejillas de alambre enrollado.

Otro factor sería el tipo de formación (friable, parcialmente consolidada o no consolidada). Las Formaciones friables posiblemente nunca colapsaran alrededor del liner, pero producirán cantidades pequeñas de arena durante la producción del fluido. Las arenas parcialmente consolidadas y las arena no consolidadas se derrumbarán y llenaran las perforaciones y el espacio entre el revestimiento y la rejilla con la subsecuente reducción de la permeabilidad en las perforaciones y en el espacio del revestimiento-rejilla.

La experiencia indica que en los completamientos con liner ranurado solo en hoyo abierto, la formación rara vez colapsa totalmente sobre el liner, lo que pueda permitir el transporte de material que impide el paso de fluido, a la superficie de la misma.

Los liner ranurados suelen no ser muy exitosos en muchos pozos consecuencia del taponamiento de las ranuras del liner y posterior declinación de la producción.

La selección entre liner ranurado solo o con malla se basa fundamentalmente en factores económicos. El liner ranurado solo es menos costoso, pero presenta limitaciones de anchura de las ranuras y, por lo general, tiene menos área de flujo disponible. Por su parte, el liner ranurado con mallas pueden tener aberturas mucho más grandes y un área de flujo mayor, pero resultan más costosas.

2.3.2.4.2. Pre-Pack Screen

Es básicamente un filtro de dos etapas con envolturas externas e internas que entrapan el medio filtrante. El medio filtrante actúa como agente puenteante cuando se produce arena de formación. Por su naturaleza, la grava recubierta de resina y consolidada (medio filtrante) constituye un filtro sumamente eficiente para detener la producción de arena de la formación; por tal motivo es muy usada en completamientos con empaque con grava a hueco abierto como medida de seguridad en caso de no quedar empackado completamente el espacio anular entre la rejilla y la formación.

En la actualidad las rejillas pre-empacadas actúan como un empaque armado, que puede bajarse sin necesidad de realizar el trabajo de empaque con grava. Esta rejilla está limitada para casos especiales, donde el empaque no se justifique técnica o económicamente como por ejemplos en yacimientos con arena fina o intervalos cortos de producción (menor de 10 pies).



Figura 7. Rejilla Pre-Empacada.

Existen diferentes diseños de rejillas pre-empacadas, entre las más comunes se incluyen las siguientes:

- **Pre-empacadas de rejilla doble**

Consiste en una rejilla estándar y una camisa adicional sobre la primera camisa; el espacio anular entre ambas camisas se llena con grava revestida con resina. Todo el ensamblaje de la rejilla se coloca en un horno y se calienta para permitir que la grava se consolide.

- **Pre-empacada de rejilla sencilla**

Posee, en primer lugar, una rejilla estándar. En este caso se instala un tubo perforador especial sobre la camisa. Este tubo está envuelto en un papel especial para sellar los orificios de salida y la región anular entre la camisa y el tubo perforado se llena con grava revestida con resina.

El ensamblaje se cura en un horno y se saca el papel que está alrededor del tubo exterior. El diámetro exterior del tubo perforado es menos susceptible al daño que la rejilla y esto tiene sus ventajas cuando el producto debe ser corrido a través de patas de perro muy pronunciados, ventanas fresadas en la tubería revestidora o zapatas guías.

Las principales ventajas que podemos encontrar son:

- Relativamente fáciles de instalar, pero debe tomarse la precaución de desplazar el lodo cargado de sólidos del hoyo antes de correr la rejilla, para así evitar el taponamiento.
- Ofrecen un control excelente de la arena.

Las principales desventajas son:

- Muy propensas al taponamiento a medida que va pasando el tiempo. El taponamiento puede ocurrir en los túneles de perforación, en la cara de la rejilla, en la recubierta de resina entre las rejillas, así causando al final, una boca de pozo restringida.
- Resultan costosas en comparación con los liners ranurados y los liners con mallas solas.
- Son adecuadas solo para formaciones de granos de arenas grandes y bien distribuidos, con elevada permeabilidad y poco o ningún contenido de arcilla u otros finos.

El método ampliamente usado para el control de arena es un forro ranurado rodeado por un empaque con grava. El forro provee el camino libre al fluido producido del yacimiento, mientras retiene la grava. El componente principal de éste método es la grava y se diseña para detener cualquier migración de arena de la formación combinando una acción de soporte mecánico (para resistencia) con la teoría de puenteo (para productividad).

- **Mallas Pre-Empacadas**

Las mallas pre-empacadas se desarrollaron hace algunos años y representan un punto medio entre las mallas ranuradas y las Wire Wrapped Screen con grava. Consisten en agregados de tamaños exactos unidos a otros por un agente de pegamiento no plástico.

Dependiendo del fabricante, puede incluir o no una tubería desnuda. Viene más frecuentemente en un cilindro de espesor variable cuyo tamaño se escoge para deslizarse sobre tuberías de revestimiento comunes.

La efectividad de las mallas pre-empacadas para retener la arena de la formación no se ha demostrado totalmente. En hoyos entubados con tuberías de revestimiento cañoneadas, permiten que la arena de la formación invada las perforaciones y la tubería de revestimiento. Si la malla pre-empacada no es cortada por la mezcla de arena de la formación y los fluidos que salen a presión de las perforaciones, el empaque propio de arena de la formación en los túneles de las perforaciones restringe la producción muy significativamente.

Es muy conocido, que la vida del material pegante en las mallas preempacadas está muy lejos de ser comparable con una Wire Wrapped Screen con grava diseñada apropiadamente, ya que dicho material es erosionado por los fluidos que fluyen a través de ella. Por esta razón, no se recomienda el uso de mallas pre-empacadas para control de arena en pozos productores, en los cuales puedan utilizarse métodos convencionales.

2.3.2.4.3. Gravel pack

El principio del empaque con grava es el de colocar arena gruesa o grava de un tamaño apropiado, en frente de una formación no

consolidada, para evitar movimiento de los granos de arena y permitir el flujo de petróleo libre de arena en el hoyo. Se denomina grava a las rocas de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, aunque no existe homogeneidad de criterio para el límite superior.

El empaque con gravas es la técnica de control de arenas comúnmente más utilizada por la industria petrolera actualmente. Este método de control de arena utiliza una combinación de malla y grava para establecer un proceso de filtración en el fondo del pozo. La malla es colocada a lo largo de las perforaciones y un empaque de grava con una distribución adecuada de arenas es colocada alrededor de la malla y en las perforaciones. Después de esto la arena del empaque de grava en las perforaciones filtra la arena de la formación y en el espacio anular la malla que funciona como revestimiento, filtra la arena del empaque con grava.

El éxito de un empaquetamiento de grava depende de la selección correcta del tamaño de grava y su colocación adecuada alrededor de la tubería ranurada. Si el tamaño de la grava a emplearse no es seleccionado correctamente, la arena de formación no será controlada y migrará al empaque de grava, por lo cual la reducirá la permeabilidad efectiva y restringirá la producción.

Las principales ventajas de esta técnica son:

- Es efectivo en intervalos largos
- Generalmente inefectivo para altos contenidos de arcilla o finos.
- Utiliza materiales no tóxicos y simples
- No sufre degradación química
- Mas fácil de aplicar en zonas con permeabilidad variante
- Bajo riesgo
- Alta productividad

Entre sus principales desventajas tenemos:

- Se restringe la boca del pozo debido a la necesidad de dejar la rejilla en el hoyo.
- Taponamiento debido a la formación de escamas cuando el agua de inyección se mezcla con el fluido de completamiento a base calcio usado durante el empaque con grava.
- El uso de un taladro requiere que el pozo sea matado con la salmuera para equilibrar la presión de formación.
- Subsecuentes pérdidas de fluido al usar una salmuera de alto peso para matar el pozo.
- Requiere una inversión sustancial para el taladro, fluido de completamiento, el equipo de fondo de pozo, el equipo de superficie, bombeo y materiales.
- Pérdida de fluidos durante la completación podría causar daños a la formación.
- Erosión-corrosión de la rejilla debido a la arena que choca contra cualquier superficie expuesta.

- Dificultad de colocar fluidos de estimulación a través del intervalo.

Tenemos diferentes empaques con grava según características y necesidades; entre los diferentes tipos existe el empaque de grava según, el tipo de completamiento al cual está asociado, se puede denominar como:

- **Empaque con grava en hoyo entubado**

Con este tipo de completamiento se obtiene la flexibilidad necesaria para producir las arenas de manera selectiva.

- **Empaque con grava en hoyo entubado y cañoneado**

Se utiliza principalmente en yacimientos con empuje muy activo de agua o gas, arenas intermedias en contacto con zonas de agua o gas y en arenas de poco espesor.

- **Empaque con grava en hoyo abierto**

Los empaques con grava a hoyo abierto son usados principalmente donde las características de la formación permiten completar el hoyo abierto y donde la instalación del control de arena debe permitir la producción máxima.

Sus ventajas principales estriban en la restitución total o aún mejor, de las condiciones iniciales de la formación y en el uso de la camisa o forros rasurados de tamaño grande, los cuales permiten instalar las bombas dentro del intervalo productor, en

las etapas de agotamiento avanzado del yacimiento. También proporciona mayor flexibilidad en la inyección selectiva de vapor.

2.3.2.4.3. Wire Wrapped Screen

Wire Wrapped Screen consiste en tubería ranurada, un forro exterior de alambre envuelto fabricado por separado del tubo base. El forro está montado sobre el tubo ranurado y soldado a la tubería en cada extremo para proporcionar un soporte estructural para cargas mecánicas elevadas. Estas mallas proporcionan un área más abierta, aumentando el flujo y la productividad.

Sus principales ventajas son:

- Resistente a la corrosión y larga vida útil en las aplicaciones.
- Alta resistencia mecánica.
- Mayor área, permitiendo así una mayor tasa de producción.

Adecuadamente diseñado para estar solo y pozo entubado, pozo abierto y terminación de empaque de grava.

2.3.3. Otras consideraciones¹³

2.3.3.1. Selección de la grava

Para asegurar la productividad del pozo es necesario revisar la calidad de la grava, pues de ésta dependen muchos factores, como lo es la permeabilidad de la grava y su capacidad de controlar el movimiento de la arena, para así permitir una productividad total de la formación.

Durante muchos años la selección de la grava se basaba en los tamaños más grandes por su permeabilidad. Actualmente la norma API RP58 presenta las propiedades que debe cumplir un empaque de grava. Siguiendo estas especificaciones se garantiza la longevidad de la grava en condiciones típicas de producción y tratamiento.

A continuación se mencionan las características que deben ser consideradas para la evaluación de la calidad de la grava:

- Análisis de tamizado, el procedimiento es igual al análisis granulométrico de la arena de formación, pero con la variante de que los tamices a utilizar serán únicamente los indicados por las especificaciones de la grava, por ejemplo si la grava es 20-40 U.S. mesh, se colocará el # 20 arriba y el #40 abajo, con una bandeja. Luego se calculará el % en peso retenido. Si el % retenido en el tamiz de menor diámetro (#40) es menor del 96%, o lo retenido en el tamiz de mayor diámetro (#20) excede el 2% o si en la bandeja hay más de 2% entonces no es de buena calidad, ya que no está dentro de especificaciones. Una cantidad mayor de finos reduciría la permeabilidad, restringiendo la capacidad de flujo, mientras que demasiados granos grandes no controlan el movimiento de arena, permitiendo la mezcla de la grava y la arena, reduciéndose la permeabilidad.
- Esfericidad, es la medida de la forma de los granos que más se asemejen a una esfera. El valor de una esfera perfecta es "1". La esfericidad se determina mediante la comparación visual de la grava con dibujos que van desde una esfera perfecta hasta

partículas de menor esfericidad que poseen ratas de dicha esfera ideal ya estandarizadas. La esfericidad ideal debe ser de 0,6 ó más, si es menor la grava tenderá a romperse al ser bombeada al hoyo, lo que creará un empaque de menor permeabilidad.

- Redondez, es la medida de la uniformidad y la curvatura de la grava. El valor óptimo de redondez de una grava debe ser de 0,6 ó más, ya que si es más angular, tendrá más bordes y puntas que se desgastan al ser bombeada al pozo. Al igual que la anterior se mide por comparación visual con una tabla estándar de redondez.

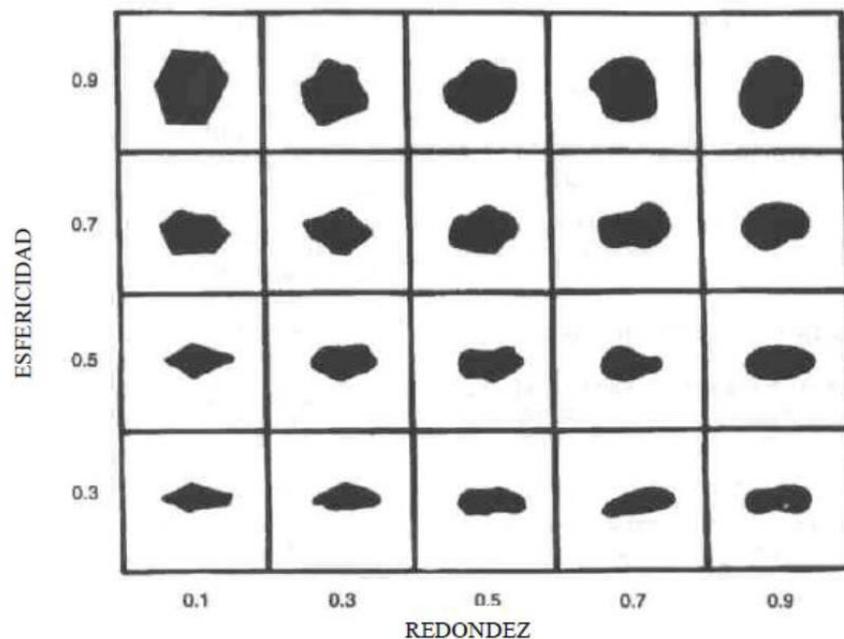


Figura 8. Tabla estándar de redondez y esfericidad por Krumbein y Sloss

- Resistencia a la trituración, una muestra de grava sin finos sometida a la prueba de confinación no debería producir más del

2% en peso de finos, ya que esto indicaría que la grava sería más débil y podría romperse y triturarse con más facilidad. Si es una grava de tamaño grande (Malla 12 - 20) no debería sobrepasar el 4% y el 8% para Mallas 8 - 12.

- Solubilidad en ácido, debe ser determinada antes de su uso para mostrar el efecto que tendría un tratamiento de ácido futuro en ella. No debe existir una solubilidad en ácido clorhídrico mayor a 1%, ya que esto causaría un movimiento en el empaque de grava que ocasionaría fallas del empaque, además de indicar que existen impurezas que reducirán la fuerza de la grava, creando finos al ser bombeada al pozo.
- Contenido de impurezas, las impurezas indicarán que la grava puede ser más soluble en vapor y aún en agua, lo cual puede ser una consideración importante si el empaque con grava es utilizado en un pozo de agua o de inyección de vapor. La cantidad de impurezas se mide determinando la turbidez en una suspensión de agua y grava de empaque, la cual debería ser de 250 NTU o menos.

2.3.3.2. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico consiste en colocar una muestra encima de una serie de rejillas cuyos tamaños de malla son progresivamente más pequeños. Los granos de arena de la muestra original del pozo atravesarán la rejilla hasta encontrar una a través de la cual ese tamaño de granos no pueda pasar, porque las aberturas son demasiado pequeñas. Al pasar la rejilla antes y después del tamizado,

podrá determinarse el peso de nuestra formación que cada tamaño de rejilla ha retenido.

Luego de haberse realizado el análisis descrito anteriormente; se prosigue a la selección de la grava, para ello se utilizan dos métodos, los cuales se diferencian por la producción diaria del pozo. Ellos son:

- Método de Saucier o de máxima productividad: define la relación grava-arena como la razón existente entre la grava de 50 percentil y la arena de 50 percentil. Sus trabajos de investigación fueron enfocados hacia el efecto de la relación grava- arena en la permeabilidad del empaque.
- Método de Schwartz: este método es utilizable en yacimientos de alta presión y producción de fluidos (un pozo productor de 1000 BPD o más). Schwartz recomendó usar un tamaño crítico de los granos de formación. Considera que una relación grava-arena mayor o igual a cinco produciría un empaque estable, un valor de seis es usado como óptimo y uno de ocho es considerado máximo. Para estudios Schwartz consideró la velocidad de flujo y la uniformidad de la formación.

3. SOFTWARE

3.1. FUNDAMENTOS

El software para completamiento de control de arenas fue desarrollado en Visual Basic con el fin de ofrecer una herramienta a otros investigadores y a la industria de fácil manejo dando soluciones eficientes al problema de la producción de arenas.

El programa consta de 6 formularios divididos de la siguiente manera:

- Selección de parámetros a evaluar. Dependiendo de los requerimientos de análisis, puede seleccionar las opciones que desee. Es de vital importancia, saber que sólo puede seleccionar uno de los métodos Tiffin, bien sea el de ingreso de datos en Pulgadas o en Micrones.
- Datos de entrada método Tiffin con valores en micrones.
- Datos de entrada método Tiffin con valores en pulgadas.
- Datos de entrada análisis Siever.
- Datos de entrada análisis erosión.
- Datos de entrada cálculo de daño.

Para el desarrollo del software y la obtención de resultados eficientes se tuvo en cuenta lo siguiente:

- El Análisis Siever, utiliza el peso total de la muestra, el peso retenido en cada una de las malla US Sieve, obteniendo como resultado, el d50 (Diámetro promedio retenido al 50% de la muestra acumulada), único dato calculado con precisión.
- El método tiffin me calcula el tipo de empaque, usando los resultados obtenidos en el análisis Siever (d50, dato exacto; los otros datos se extraen de la gráfica obtenida en el Análisis Siever de este programa, o de otro de los que se disponga); utiliza el caudal de producción del pozo en BPD, el área de flujo (zona cañoneada) o la velocidad del fluido (zona cañoneada), dando como resultado 4 opciones de empaquetamiento que son: GRAVEL PACK, WWS, SAS o PREMIUM/PPS. Adicionalmente, posee algunos criterios específicos para cada tipo de empaque,

en los que se selecciona el tamaño de la grava o malla a usar en pulgadas.

- El análisis de la Erosión, utiliza el caudal de producción del pozo que fue ingresado para el desarrollo del método Tiffin, $M_{losslimit}$, SE (erosión específica), (dependiente del tipo de empaque y tamaño de malla a usar, datos dados por el fabricante), longitud de la malla, área cañoneada, ksf (factor de forma de la partícula erosiva: Redondeado: 0.2; Semiredondeado: 0.53; Angular: ingrese 1.0), ps (Gravedad Específica de la Partícula Erosiva) (g/cc), N (partículas erosivas en el fluido) (ppm), dperf (diámetro de hueco perforado). Con esos datos, obtenemos la V_s (velocidad de salida del fluido) y Tiempo de vida de la malla (años).
- El cálculo de daño, utiliza datos más específicos del yacimiento, incluyendo el diámetro del empaque a utilizar, obtenido en el método de tiffin, y evaluado por la persona que utilice el programa. Con esto, se obtiene el IP y la producción real al usar ese tipo y tamaño de empaque obtenido con el método de Tiffin.

Por esto, los resultados del análisis Siever, se entregan de manera independiente, luego, cada uno de los métodos serán entregados en una sola hoja, por lo que el ingeniero deberá decidir que opciones del programa va a utilizar.

3.2. MANUAL DEL USUARIO

3.2.1. Requisitos técnicos e instalación

Puede instalar y ejecutar el software en ordenadores que usen plataformas Windows, que tengan las especificaciones listadas a continuación:

- Windows 95 SE, Windows 98, Windows NT 4.0, Windows Me, Windows 2000 o Windows XP instalar Martus.
- 50 MB de espacio en su disco duro.
- 32 MB de memoria RAM (le recomendamos 64 MB o más).
- Microsoft office (Excel).
- Unidad lectora de USB.

Para instalar el software:

1. Insertar la memoria USB en la ranura de la unidad para USB.
2. Dar click derecho en la carpeta "SOFTWARE SAND CONTROL" contenida en la memoria y seleccionamos la opción "Copiar".
3. Dirigirse al menú "Inicio" y damos click en "Equipo" o en su defecto "Mi pc".
4. Abrimos la carpeta de Disco Duro "C" y damos click derecho y seleccionamos la opción "pegar".
5. Ingresar a la carpeta que se copió en "C" y damos doble click sobre la carpeta "Instalador, luego en Debug y setup", y esperamos mientras se ejecuta el archivo.

Nota: Como el software fue diseñado en Visual Basic, necesita de la instalación de un componente integral de Windows que admite la compilación y ejecución de aplicaciones. Esto lo hace directamente el setup.

6. Van al panel de control y buscan "Configuración regional y de Idioma", damos clic y luego en personalizar o configuración adicional, cambiamos el punto por la coma, y la coma por el punto.
7. Al terminar de ejecutarse el "setup", aparecerá en el escritorio un .exe llamado "SAND CONTROL"
8. Finalmente, damos doble click al ejecutable "SAND CONTROL" y verificamos que nos inicie la aplicación

3.2.2. Diseño de completamiento para control de arenas

Después de su instalación, el software es ejecutable desde la memoria USB o desde el escritorio. Para dar inicio al software, ubique la aplicación “Sand Control” y haga doble click para ejecutarla.

3.2.2.1. Selección de parámetros a evaluar (Index)



The screenshot shows the 'Sand Control' software window. The title bar reads 'Sand Control'. The main window has a title 'SAND CONTROL' in large bold letters. Below the title, there are three buttons stacked vertically: 'Análisis Siever', 'Análisis Erosion', and 'Calculo Daño'. To the right of these buttons, there are three input fields: 'FECHA (dd/mm/año)', 'CAMPO', and 'POZO'. Below the 'FECHA' field is a 'Cargar Fecha' button. At the bottom left, there are two input fields: 'Caudal Q (BPD)' and 'ID Tubería (Inches)'. At the bottom left corner, there is a checkbox labeled 'Resultados'.

FIGURA 9. Index Sand Control

NOTA:

- La casilla “Cargar Fecha”, sirve para ingresar la información del Campo, del Pozo, la fecha, caudal y diámetro de liner de

producción. Este se debe presionar, una vez ingresada dicha información.

- Si hemos utilizado todas las opciones que me permite, y deseamos los resultados en un mismo archivo, damos click en la casilla “Resultados” y aparecerá la siguiente ventana:

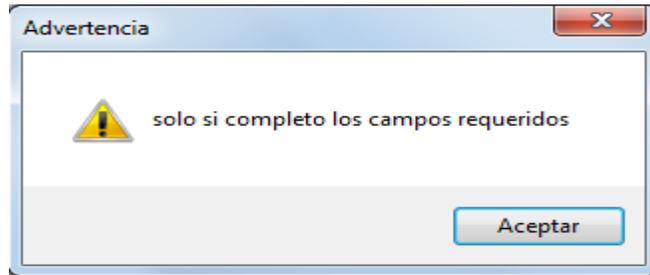
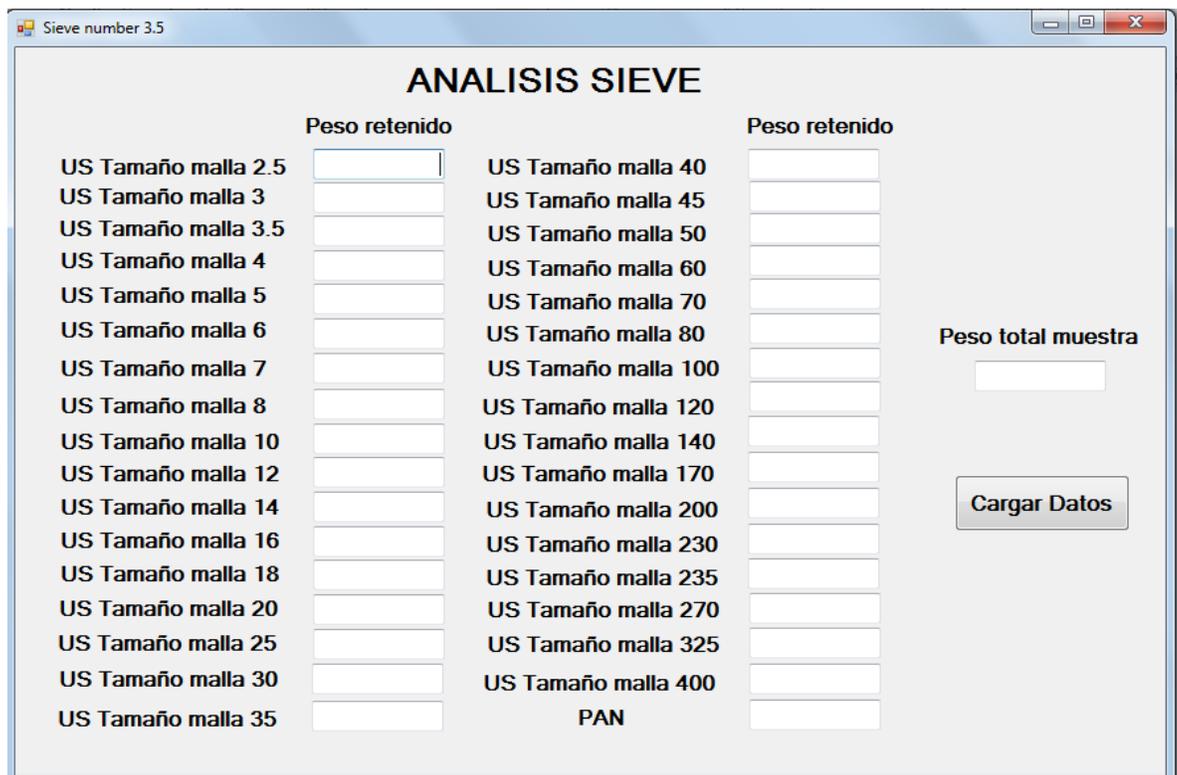


FIGURA 10. Ventana advertencia Index

3.2.2.2. Datos de entrada análisis Sieve



ANALISIS SIEVE			
Peso retenido	Peso retenido		
US Tamaño malla 2.5	<input type="text"/>	US Tamaño malla 40	<input type="text"/>
US Tamaño malla 3	<input type="text"/>	US Tamaño malla 45	<input type="text"/>
US Tamaño malla 3.5	<input type="text"/>	US Tamaño malla 50	<input type="text"/>
US Tamaño malla 4	<input type="text"/>	US Tamaño malla 60	<input type="text"/>
US Tamaño malla 5	<input type="text"/>	US Tamaño malla 70	<input type="text"/>
US Tamaño malla 6	<input type="text"/>	US Tamaño malla 80	<input type="text"/>
US Tamaño malla 7	<input type="text"/>	US Tamaño malla 100	<input type="text"/>
US Tamaño malla 8	<input type="text"/>	US Tamaño malla 120	<input type="text"/>
US Tamaño malla 10	<input type="text"/>	US Tamaño malla 140	<input type="text"/>
US Tamaño malla 12	<input type="text"/>	US Tamaño malla 170	<input type="text"/>
US Tamaño malla 14	<input type="text"/>	US Tamaño malla 200	<input type="text"/>
US Tamaño malla 16	<input type="text"/>	US Tamaño malla 230	<input type="text"/>
US Tamaño malla 18	<input type="text"/>	US Tamaño malla 235	<input type="text"/>
US Tamaño malla 20	<input type="text"/>	US Tamaño malla 270	<input type="text"/>
US Tamaño malla 25	<input type="text"/>	US Tamaño malla 325	<input type="text"/>
US Tamaño malla 30	<input type="text"/>	US Tamaño malla 400	<input type="text"/>
US Tamaño malla 35	<input type="text"/>	PAN	<input type="text"/>

Peso total muestra

FIGURA 11. Análisis Sieve Sand Control

3.2.2.3. Datos de entrada análisis erosión

ANALISIS EROSION

Grado Tubería

SE (Erosión Específica)

Longitud del Liner (ft)

Area Cañoneo (pulg2/ft)

ps (Arena) (g/cc)

N (Arena) (ppm)

dperf (Diámetro hueco perforado) (Inches)

Ksf (Factor de forma) ?

FIGURA 12. Análisis Erosión Sand Control

3.2.2.4. Datos de entrada cálculo de daño

CALCULO DAÑO

Permeabilidad (Darcy) OD Screen

Espesor Neto Arena Productora (ft) Densidad Disparo

Intervalo Cañoneado (ft) IP (bbl/psi)

Entry Hole Perforado (in) Presión del Yacimiento (psi)

Permeabilidad Grava (Darcy) Drawdown (%)

Penetración Cañoneo Viscosidad Crudo (API)

ID Casing (in)

FIGURA 13. Análisis Producción Sand Control

3.2.3. Resultados

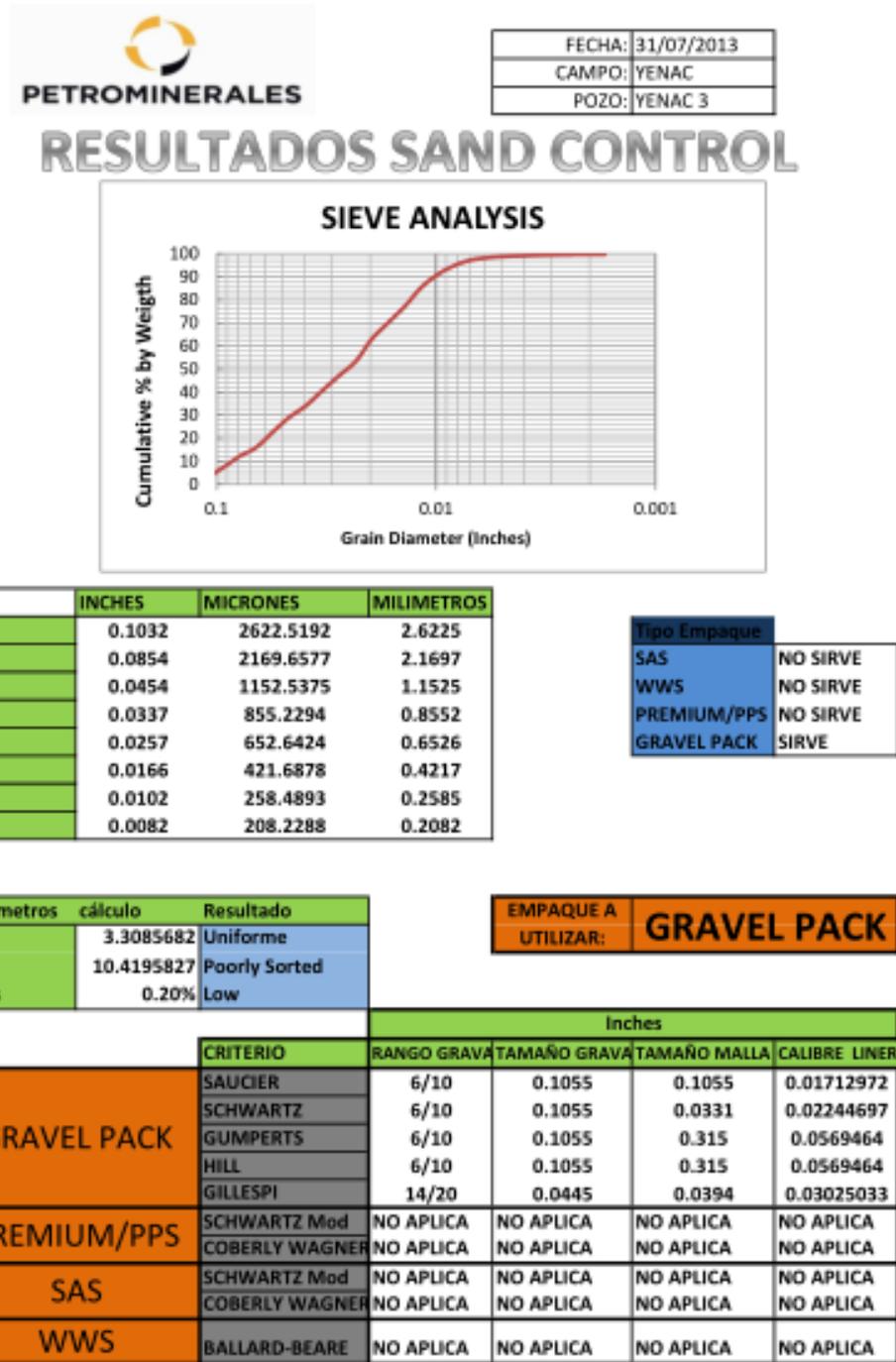


FIGURA 14. Hoja de Resultados.

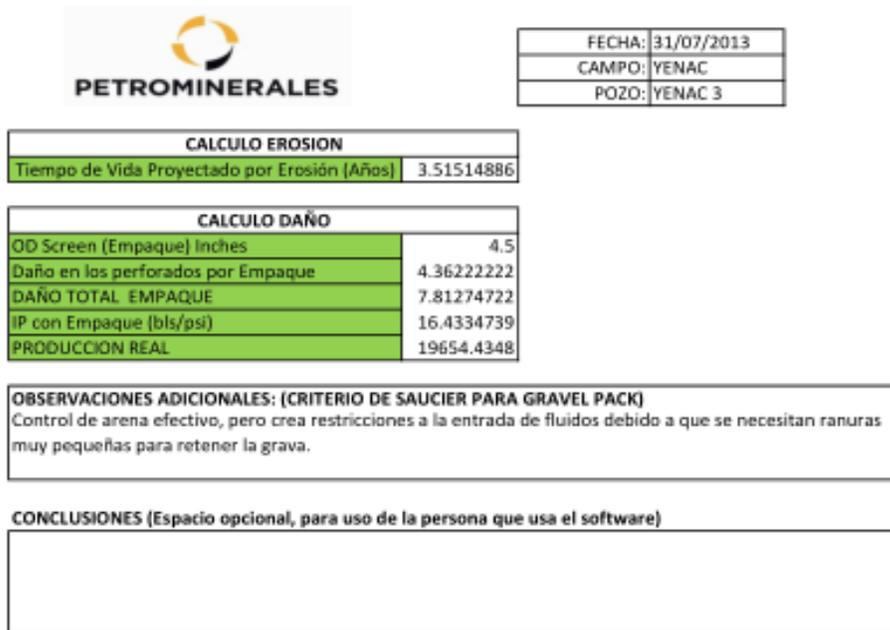


FIGURA 14. Hoja de Resultados.

3.2.3.1. Guardar e imprimir resultados

Cada parámetro, cuenta con la opción de imprimir los resultados de manera individual. A continuación, se muestra de forma general, como se realiza la visualización y posterior impresión en .pdf:

- Luego de dar click en el botón “Cargar Datos” se visualizará la siguiente ventana:

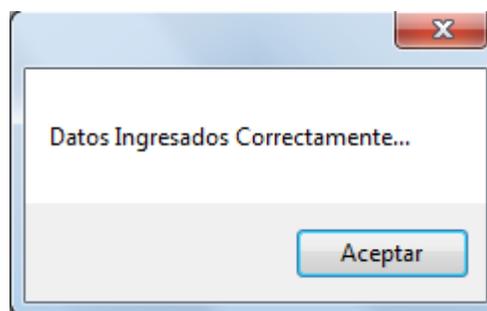


FIGURA 15. Ventana de verificación datos ingresados

- Damos click en “Aceptar” y aparecerá lo siguiente:

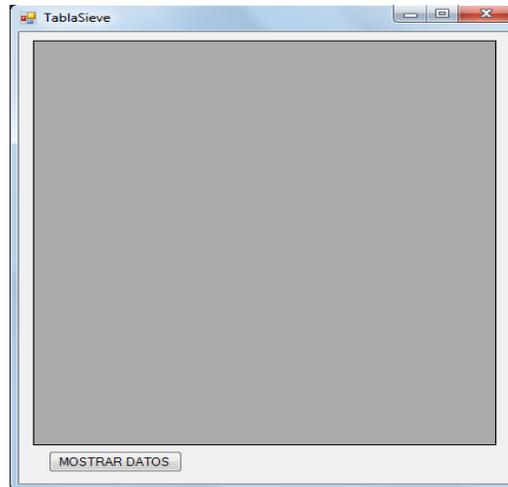


FIGURA 16. Ventana de resultados

- Al dar click en “Mostrar Datos”, podemos visualizar los datos que hemos ingresado.
- Si deseamos ver los resultados del Método que elegimos, damos click en “Imprimir Resultados”. Esta acción nos abrirá un documento de EXCEL.

NOTA: Si deseamos los resultados en formato .PDF, guardamos el archivo como PDF. Esto se realiza de la siguiente manera:

1. Damos click en “archivo”

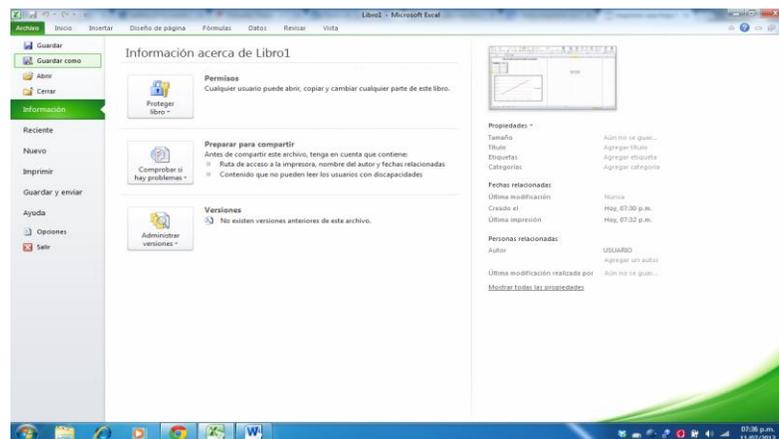


FIGURA 17. Ventana inicio EXCEL

2. Abrimos la opción “guardar como” y en la ventana modificamos la opción tipo y ponemos pdf:

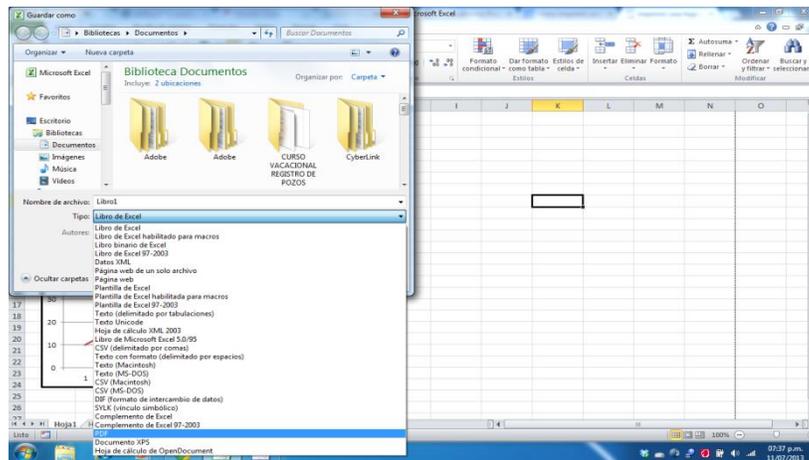


FIGURA 18. Ventana Guardar EXCEL

4. CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar e implementar el software “SAND CONTROL”, que permite hacer análisis granulométrico de una muestra de pozo, selección del tipo de completamiento a utilizar, calcular la erosión a la que estaría expuesta dicha malla y el daño mecánico que podría ocasionar problemas de producción del pozo, estos últimos como opciones adicionales.
- La distribución del tamaño de los granos, es el factor más influyente para la selección del completamiento para control de arenas.
- El tiempo de servicio de completamiento utilizado se ve afectado principalmente por el caudal de producción.
- Las metodologías utilizadas en el desarrollo del software me realizan el análisis granulométrico, me indican que tipo de empaque a usar y el tamaño de grava, y el calibre de la ranura de el liner según el caso. Se le agrega además una metodología para calcular el tiempo de vida aproximado del completamiento afectado por la erosión y calcular la producción aproximada del pozo después de instalar el mecanismo.
- Las metodologías usadas en el desarrollo del software para el cálculo del tamaño de grava a utilizar en los empaques, toman en consideración el grado de uniformidad de la formación y la distribución total de los granos.

5. RECOMENDACIONES

- Para el funcionamiento correcto del software, se deben seguir las instrucciones del manual al pie de la letra, evitando así problemas de aplicación generados por mal manejo e instalación.
- Es importante la caracterización granulométrica de la formación productora, ya que es importante conocer la distribución de tamaños de los granos de la formación y así seleccionar el mecanismo adecuado.
- Si cuenta con análisis granulométrico, puede utilizar dichos datos para la aplicación del Método Tiffin, presente en el software; si no, puede utilizar el aplicativo “Método Siever”, presente en el software y obtener resultados similares para el análisis granulométrico.
- Es importante la validación y verificación de los resultados del software, con datos de campo y software normalmente utilizado en la industria.
- Para mayor exactitud en los resultados, es importante que se haga una actualización futura del software, con nuevos métodos de selección que se desarrollen.
- Se debe implementar la opción de exportar datos seleccionados desde un archivo de Excel.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Selfridge F, Munday M, Kvernfold O y Gordon B: "Safely Improving Production through Improved Sand Management", artículo de la SPE 83979, presentado en la Conferencia del Área Marina de Europa 2003 de la SPE, Aberdeen, Escocia, 2 al 5 de septiembre de 2003.
2. DÍAZ, Cristien E. y DÍAZ, Yoslery C., "Diagnóstico del problema de producción de arena y desarrollo de una metodología para la selección del método más adecuado para su control en el área Mayor de Socorro.", Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Abril 2002. p. 3-21
3. CASTRO, Antonio. "Últimos avances en control de arena para pozos horizontales en operaciones costa – fuera.", Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2005. p. 40-55
4. Disponible en Internet: <<http://es.scribd.com/doc/66095831/Control-de-Arena>> [Citado el 20 de Julio de 2013].
5. RUIZ, Jorge., "Control de arena en la terminación de pozos terciarios del campo Ita", Santo Domingo Tehuantepec: Universidad del Istmo, 2010. p. 12-13.
6. ROMERO, Policarpa y ORTEGA, Josimar., "Diseño y operación de empaquetamientos con grava para el control de arenas en pozos horizontales de alta productividad en campos de crudos pesados", Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2010. p. 50-51.
7. ROMERO, Policarpa y ORTEGA, Josimar., "Diseño y operación de empaquetamientos con grava para el control de arenas en pozos horizontales de alta productividad en campos de crudos pesados", Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2010. p. 54.
8. Disponible en Internet: <<http://www.slideshare.net/pecasu/exclusin-y-control-de-arena>> [Citado el 20 de Julio de 2013].

9. RUIZ, Jorge., "Control de arena en la terminación de pozos terciarios del campo Ita", Santo Domingo Tehuantepec: Universidad del Istmo, 2010. p. 13-14.
10. ROMERO, Policarpa y ORTEGA, Josimar., "Diseño y operación de empaquetamientos con grava para el control de arenas en pozos horizontales de alta productividad en campos de crudos pesados", Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2010. p. 55.
11. DÍAZ, Cristien E. y DÍAZ, Yoslery C., "Diagnóstico del problema de producción de arena y desarrollo de una metodología para la selección del método más adecuado para su control en el área Mayor de Socorro.", Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Abril 2002. p. 23
12. Disponible en Internet: <<http://es.scribd.com/doc/111390272/66095831-Control-de-Arena>> [Citado el 20 de Julio de 2013].
13. DÍAZ, Cristien E. y DÍAZ, Yoslery C., "Diagnóstico del problema de producción de arena y desarrollo de una metodología para la selección del método más adecuado para su control en el área Mayor de Socorro.", Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Abril 2002. p. 43-45.
14. Ibid., p. 73-89.

7. ANEXOS¹⁴

ANEXO A. CRITERIOS ANALISIS GRANULOMETRICO

- Para este análisis, se hace uso de una muestra de arena del pozo a evaluar. Esta muestra, a la que se le conoce su peso, se hace pasar por una serie de tamices que presentan una numeración específica, reteniendo por cada tamiz, una cantidad de arena de la muestra que representa a través de cálculos, el porcentaje de muestra retenida. Este porcentaje se calcula para cada tamiz, con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso Retenido Tamiz}}{\text{Peso Total Muestra}} * 100$$

- Luego de realizar el anterior cálculo para cada Tamiz, se calcula el % Acumulado en los tamices, con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Acumulado} = \% \text{ Retenido}_n + \% \text{ Retenido}_{n+1}$$

- La sumatoria de los % Acumulados, debe dar 100%. Con esto y el tamaño de los granos que retiene cada malla se realiza una gráfica (*Diámetro de Grano vs % Acumulado*).

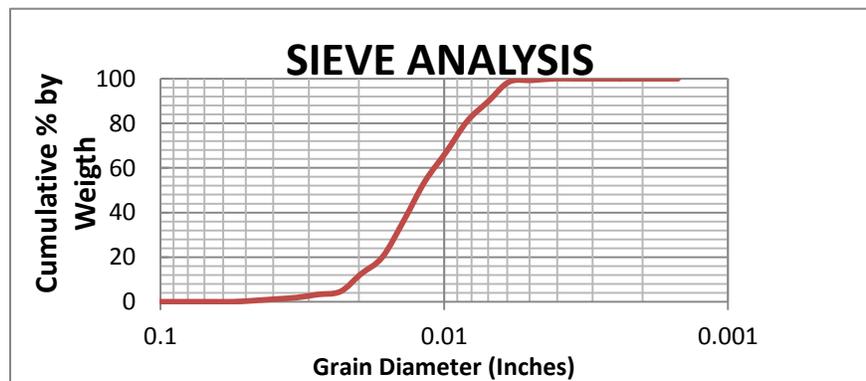


FIGURA 19. Gráfico análisis Sieve

- La siguiente tabla resume los Tamices utilizados y el tamaño de grano que retienen:

US Sieve number	Grain Diameter (Inches)
2.5	0.3150
3	0.2650
3.5	0.2230
4	0.1870
5	0.1570
6	0.1320
7	0.1110
8	0.0937
10	0.0787
12	0.0661
14	0.0555
16	0.0469
18	0.0394
20	0.0331
25	0.0280
30	0.0232
35	0.0197
40	0.0165
45	0.0138
50	0.0117
60	0.0098
70	0.0083
80	0.0070
100	0.0059
120	0.0049
140	0.0041
170	0.0035
200	0.0029
230	0.0024
235	0.0024
270	0.0021
400	0.0015
PAN	MAYORIA

FIGURA 20. Tabla Tamices

ANEXO B. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA GRAVA

- **INTRODUCCION A LOS METODOS**

El método de Tiffin es el más utilizado para determinar el tipo de empaque a utilizar.

Se han publicado diversas técnicas que permiten seleccionar el tamaño de malla y de arena de empaque con grava para controlar la producción de arena de formación. La técnica que más se emplea en la actualidad fue desarrollada por Saucier, sin embargo, existe una serie de criterios desarrollados por otros investigadores para la selección del tamaño de grava para el empaque, como son: método de Saucier, Schwartz, Schwartz modificado, Coberly y Wagner, Gumpertz, Hill, Gillespi, Ballard y Beare.

- **B.1. Método de Tiffin:**

Este es el método con el que se selecciona el tipo de empaque, haciendo uso de los datos obtenidos en el análisis granulométrico (**Anexo A**). Para esto se siguen los siguientes parámetros:

- $C_s < 10 \rightarrow$ SAS
- $C_u < 3$ & Fines $< 2\% \rightarrow$ WWS
- $3 < C_u < 5$ & $2\% < \text{Fines} < 5\% \rightarrow$ Premium/PPS
- $C_s > 10$ or $C_u > 5$ or Fines $> 5\% \rightarrow$ Gravel Pack

Dónde:

Cu (Coeficiente de Uniformidad) se calcula con la siguiente ecuación:

$$Cu = \frac{D_{40}}{D_{90}}$$

Cs (Coeficiente de Ordenamiento) se calcula con la siguiente ecuación:

$$Cs = \frac{D_{10}}{D_{95}}$$

Ahora, relacionando estos coeficientes con los criterios descritos anteriormente, obtenemos el tipo de empaque a utilizar en el completamiento del pozo.

- **B.2. Método de Saucier:**

Este es el método más usado para obtener el tamaño de grava a usar en los empaquetamientos.

El trabajo de Saucier parte de la premisa básica de que el control óptimo de la arena se logra cuando el tamaño medio de arena del empaque no es más de seis (6) veces mayor que el tamaño medio de los granos de arena de formación D50 percentil; él se basó en una serie de experimentos con flujo a través de núcleos, donde la mitad del núcleo estaba constituido por grava de empaque y la otra mitad era arena de formación. Luego modificó el rango comprendido entre

dos (2) y diez (10), para determinar con exactitud cuál era el control óptimo de arena.

El procedimiento experimental consistió en establecer una tasa de flujo estabilizada y una caída de presión iniciales a través del núcleo y calcular la permeabilidad inicial efectiva (K_i). Se incrementó la tasa de flujo y se mantuvo así hasta que se estabilizó la caída de presión, después de lo cual se produjo una disminución de la tasa de flujo para regresar a su valor inicial. Una vez más, se permitió que la caída de presión se estabilizara y se calculó la permeabilidad final efectiva (k_f) del núcleo. Si la permeabilidad final resultaba ser la misma que la inicial, se concluía que se había logrado un control de arena eficaz sin menoscabo de la productividad. Por otra parte, si la permeabilidad final era menor que la inicial, se establecía que la arena de formación estaba invadiendo y taponando la arena de empaque con grava. En este caso, podría lograrse el control de arena, pero a expensas de la productividad del pozo.

A continuación, se muestra una tabla con las gravas comerciales que se utilizan para Gravel Pack:

Resieved Sand (Max/min)	Min (inches)	Max (inches)
6/10	0.0790	0.1320
8/12	0.0470	0.0940
10/14	0.0560	0.0790
10/16	0.0470	0.0790
10/20	0.0330	0.0790
12/16	0.0470	0.0660
12/18	0.0390	0.0660
12/20	0.0660	0.0330
14/20	0.0330	0.0560
16/20	0.0660	0.0470
16/25	0.0280	0.0470
16/30	0.0230	0.0470
20/40	0.0165	0.0330
30/50	0.0120	0.0230
40/60	0.0098	0.0165
40/70	0.0080	0.0170
40/100	0.0060	0.0170
50/70	0.0080	0.0120

FIGURA 21. Gravas Comerciales Gravel Pack

- **B.3. Método de Schwartz:**

Este es uno de los métodos más usados para obtener el tamaño de grava a usar en los empaquetamientos.

Primero se utiliza el coeficiente de uniformidad “Cu”; si el coeficiente (Cu) es menor de tres (3) la arena será uniforme, pero si el factor Cu está entre cinco (5) y diez (10) no es arena uniforme, y si es mayor o igual a diez (10) entonces es extremadamente no uniforme. Schwartz recomienda un factor de 0.615 para un mínimo y 1.384 como una consideración máxima, por el 10 percentil (D10) de la arena si esta es uniforme, por el 40 percentil (D40)

para arenas no uniformes y por el 70 percentil (D70) si es demasiado no uniforme.

Malla (Tamices)	Diám (in)
2.5	0.315
3	0.265
3.5	0.223
4	0.187
5	0.157
6	0.132
7	0.111
8	0.0937
10	0.0787
12	0.0661
14	0.0555
16	0.0469
18	0.0394
20	0.0331
25	0.028
30	0.0232
35	0.0197
40	0.0165
45	0.0138
50	0.0117
60	0.0098
70	0.0083
80	0.0070
100	0.0059
120	0.0049
140	0.0041
170	0.0035
200	0.0029
230	0.0024
235	0.0024
270	0.0021
325	0.0017
400	0.0015
pan	MAYORIA

FIGURA 22. Mallas Comerciales

Esta tabla es utilizada para este y todos los siguientes métodos.

- **B.4. Método de Schwartz modificado:**

Este es uno de los métodos más usados para obtener el tamaño de la malla a usar en empaques tipo SAS y PREMIUM/PPS.

Primero se utiliza el coeficiente de uniformidad “Cu” y la Velocidad de entrada del fluido al empaque “V”:

Si $Cu < 3$ y $V < 0.05$ pie/seg, el tamaño crítico es igual al D10, el cual indica que la arena es uniforme.

Si $Cu > 5$ o $V > 0.05$ pie/seg, el tamaño crítico es igual al D40, el cual indica que la arena es no uniforme.

Si $Cu > 10$ y $V > 0.1$ pie/seg, el tamaño crítico es igual al D70, el cual indica que la arena es completamente no uniforme.

Schwartz recomienda un factor de seis (6) para un diseño óptimo, por el 10 percentil de la arena si esta es uniforme, por el 40 percentil (D40) para arenas no uniformes y por el 70 percentil (D70) si es demasiado no uniforme.

- **B.5. Método de Coberly y Wagner:**

Este es uno de los métodos más usados para obtener el tamaño de la malla a usar en empaques tipo SAS y PREMIUM/PPS.

Coberly a partir de sus investigaciones demostró que el tamaño de grava debe ser menor que un diámetro comprendido entre diez (10) veces y trece (13) veces el 10

percentil (D10) de la arena de formación. Además recomienda este método para arenas uniformes ya que si es utilizado en arenas no uniformes los finos invadirían la grava y restringirían la permeabilidad.

- **B.6. Método de Gumpertz:**

Este es uno de los métodos más usados para obtener el tamaño de grava a usar con empaques tipo GRAVEL PACK.

Inicialmente concluyó lo mismo que Coberly, luego sugirió utilizar una grava once (11) veces el 10 percentil del diámetro de la arena.

- **B.7. Método de Hill:**

Este es uno de los métodos más usados para obtener el tamaño de grava a usar con empaque tipo GRAVEL PACK.

Este autor recomienda la utilización de un diámetro de grava menor que un factor de 8 veces el 10 percentil (D10) de arena de formación, aunque antes había presentado evidencias en contra del D10.

- **B.8. Método de Gillespi:**

Este es uno de los métodos más usados para obtener el tamaño de arena a usar con empaque tipo GRAVEL PACK.

Primero se utiliza el coeficiente de uniformidad "Cu";
Si $Cu < 2$, el tamaño crítico es igual al D50; si $Cu = 2$, el tamaño crítico es igual al D40; si $Cu > 2$, el tamaño crítico es igual al D30.

- **B.9. Método de Ballard y Beare:**

Este es uno de los métodos más usados para obtener el tamaño de grava a usar con empaques tipo WWS.
Utiliza un rango que consiste en el D5 como mínimo, y el D10 como máximo.

ANEXO C. CRITERIOS DE ANALISIS DE EROSION

- **C.1. Caudal "Q" (BPD):** Producción promedio del pozo a completar.
- **C.2. Mlosslimit (pérdida límite de masa por erosión de la malla) (g):** Dato correspondiente al tipo de malla a utilizar.
- **C.3. SE (Erosión Específica):**
- **C.4. Longitud de la Malla (ft):** Longitud de la malla a colocar.
- **C.5. Área Abierta de los Agujeros del tubo base (pulg²/ft):** Área cañoneada.
- **C.6. Ksf (Factor de Forma de la Partícula Erosiva):** para Redondeado $Ksf = 0.2$; Semiredondeado $Ksf = 0.53$; Angular $Ksf = 1.0$.

- **C.7. ρ_s (Gravedad Específica de la Partícula Erosiva) (g/cc)**
- **C.8. N (Fracción de Partículas Erosivas en el Fluido en Volumen (ppm):** Cantidad de partículas presentes en el fluido proveniente del pozo.
- **C.9. d_{perf} (Diámetro del Hueco Perforado) (pulg):** Cuando se encuentra entubado, se utiliza el diámetro interno del casing.
- **C.10. V_s (Velocidad de Salida del Fluido Desde el Perforado) (ft/seg):** Hace parte de los resultados obtenidos y se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{0.000065 * Q}{0.0069 * (\text{Área cañoneada})} * (\text{Longitud de la malla})$$

- **C.11. Tiempo de Vida proyectado por Erosión (Años):** Hace parte de los resultados obtenidos y se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_{vida} = \frac{M_{losslimit}}{(0.00035315 * \pi) * ((0.0833 * d_{perf})^2) * V_s * K_{sf} * \rho_s * N * SE} * \frac{1}{31536000}$$

ANEXO D. CRITERIOS DE ANALISIS DE DAÑO

- **D.1. Datos básicos del yacimiento y del pozo:**
Permeabilidad del Yacimiento (K), Espesor Neto Arena Productora (ft), Longitud Intervalo Cañoneado (ft), Diámetro de Hueco perforado (pulg), Permeabilidad de la Grava

(Kgrava), Penetración del cañoneo, ID Casing (pulg), OD Screen (Empaque) pulg, Densidad de disparo, IP (bls/psi), Presión del Yacimiento (psi), Drowdawn (%), Viscosidad del crudo.

- **D.2. Variables calculadas:**

Factor Volumétrico del crudo:

$$F_{Volcrudo} = \frac{K * Espesor Neto}{IP * 141.2 * 7.75 * \mu}$$

Producción Estimada (bfpd):

$$Prod_{Estimada} = \frac{\% Drowdawn}{100} * P_{yac}$$

Daño por Empaque:

Daño Pack

$$= \frac{D * Espesor Neto * ((ID_{casing} - OD_{screen} + Penetración_{cañoneo})/12)}{2 * Densidad_{disparo} * Long_{cañoneo} * K_{grava} * (Diam Hueco)^2/144}$$

IP con Empaque (bls/psi):

$$IP_{Pack} = \frac{K * Espesor Neto}{141.2 * F_{Volcrudo} * \mu * (7.75 + Daño Empaque)}$$

Producción con Empaque (bfpd):

$$Prod_{con Pack} = IP_{Pack} * (P_{yac} * \frac{\% Drowdawn}{100})$$

Delta P de la malla (psi):

$$\nabla P = \frac{3800 * 141.2 * 0.000034 * 32 * (7.7 * Daño_{Pack})}{18}$$

- **D.3 Resultados Obtenidos:**

Daño en los perforados por Empaque:

$$Daño_{Perf Pack} = \frac{96 * K * Espesor Neto * (Penetración_{cañoneo}/12)}{K_{grava} * (Diam Hueco)^2 * Long_{cañoneo} * Densidad_{disparo}}$$

DAÑO TOTAL EMPAQUE:

$$DAÑO = Daño Pack + Daño_{Perf Pack}$$

IP con Empaque final (bls/psi):

$$IP_{Pack} = \frac{K * Espesor Neto}{141.2 * F_{Volcrudo} * \mu * (7.75 + DAÑO)}$$

PRODUCCION REAL:

$$Q_{real} = IP_{Pack} * (P_{yac} * (\% Drowdown/100))$$