



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

OPTIMIZACIÓN DE LA CEMENTACIÓN DE TUBERÍAS DE
REVESTIMIENTO EN ZONAS DE BAJO GRADIENTE DE
PRESIÓN MEDIANTE EL EMPLEO DE CEMENTO
ULTRALIGERO Y LA TÉCNICA DE CEMENTACIÓN
DESCOLGADA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

PRESENTA

RAÚL ANTONIO ROBLEDO LÓPEZ

DIRECTOR: ING. AGUSTÍN VELAZCO ESQUIVEL



CIUDAD UNIVERSITARIA

2011

AGRADECIMIENTOS

A mi madre

Por darme la vida, un hogar, educación, por el amor que me ha dado y por haberme enseñado a amar. Le agradezco la paciencia, las interminables oportunidades, los cuidados, las miles de plegarias que por mi alzó al cielo, la fe que me ha mantenido siempre fuerte...

¡GRACIAS TOTALES!

A mi padre

Por el ejemplo: honestidad, lealtad, sinceridad, por enseñarme que lo importante no es traer los zapatos nuevos sino limpios, por mantenerme siempre sensato en un mundo cada vez más insensato.

A mi familia

Por la amistad, la felicidad, la compañía, el apoyo, el sentido de pertenencia, por todas esas experiencias y enseñanzas que de manera fortuita me entregaron.

PENSAMIENTOS

Aunque supiera que el mundo se iba a acabar mañana, yo igual plantaría hoy mi manzano.

MARTIN LUTHER KING

Dios mío, dame fuerza para cambiar las cosas que puedo cambiar, dame paciencia para aceptar las cosas que no puedo cambiar... y dame inteligencia para distinguir unas de otras.

MANUEL CRIADO DE VAL

OPTIMIZACIÓN DE LA CEMENTACIÓN DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO EN ZONAS DE BAJO GRADIENTE DE PRESIÓN MEDIANTE EL EMPLEO DE CEMENTO ULTRALIGERO Y LA TÉCNICA DE CEMENTACIÓN DESCOLGADA.

INDICE

I. Antecedentes

II. Conceptos Básicos

II.1. Presión de Poro

II.1.1 Presión Anormal

II.1.1.1 Origen de las zonas de presión anormales

II.1.1.2 Presión anormal alta

II.1.1.3 Presión anormal baja

II.1.2. Métodos para calcular la presión de poro

II.1.2.1 Análisis areal a partir de los datos sísmicos

II.1.2.2 Determinación de la presión de formación a partir de datos de pozos cercanos

II.1.2.3 Evaluación en tiempo real

II.2. Presión de Fractura

II.2.1. Métodos para calcular la presión de Fractura

II.3. Ventana de Operación

II.4. Tuberías de Revestimiento

II.4.1 Tipos de tuberías de revestimiento

II.5. Cementación

III. Cementos Ultraligeros de Alto Esfuerzo a la Compresibilidad

III.1 Diseño de las lechadas ULAEC

III.2 Pruebas de laboratorio

III.3 Pruebas de Patio

III.4 Análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y de patio

III.5 Evaluación de la cementación

III.5.1 Consideraciones para evaluar cementaciones realizadas con cementos ultraligeros de alto esfuerzo a la compresión

IV. Cementación descolgada

IV.1 Cálculo del volumen de la lechada y del volumen del bache para desplazar

IV.1.1 Programa de Computo para el cálculo del volumen de la lechada y del bache para desplazar

IV.1.1.1 Algoritmo

IV.1.1.2 Diagrama de Flujo

IV.1.1.3 Pseudocódigo

IV.1.1.4 Programa

IV.2 Metodología de la operación de cementación descolgada

V. Casos Reales

V.1 Casos de la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos, División Marina

V.2 Otros casos en el mundo

VI. Conclusiones y Recomendaciones

Referencias

OBJETIVOS

- El objetivo de este trabajo es presentar una solución que se ha implementado para optimizar la cementación de tuberías de revestimiento mediante el empleo de cementos ultraligeros en formaciones que presentan un bajo gradiente de presión y en las cuales se presentan pérdidas de circulación.
- Analizar los problemas que se presentan al cementar tuberías de revestimiento en zonas de bajo gradiente de presión, así como las consecuencias de una mala cementación.
- Analizar las soluciones que se han implantado para tratar de resolver dicha problemática, mencionar y comparar los resultados obtenidos con cada solución.
- Analizar los objetivos de la cementación ultraligera, su factibilidad técnica, el procedimiento de diseño del cemento y el diseño de la operación de cementación.
- Generar un programa de cómputo que calcule los volúmenes de lechada de cemento y de fluido para desplazar.
- Presentar pozos en los que se han cementado utilizando Cementos Ultraligeros de Alto Esfuerzo a la Compresión y la metodología de cementación descolgada, analizar los resultados obtenidos.
- Mencionar cualitativamente las diversas características de una lechada de cemento y la importancia de estos para que la operación de cementación se exitosa.
- Mencionar cualitativamente los mecanismos que generan presiones anormales y la importancia de conocerlos para poder hacer un buen diseño de la cementación.
- Revisar otras opciones existentes para cementar una tubería, es decir las metodologías de cementación y los distintos tipos de cementos. Para poder tener una visión más amplia de porque la combinación de cemento ultraligero con la cementación descolgada es la mejor opción cuando se tiene una zona de bajo gradiente de presión.

RESUMEN

El objetivo de la Sarta de tuberías de revestimiento tiene por objetivo: aislar la zona productora de otras formaciones; comunicar el yacimiento con la superficie; contener y proteger el aparejo de producción.

La cementación de las tuberías de revestimiento tiene por objetivo: proteger la tubería de revestimiento, evitando su corrosión prematura; dar soporte a la tubería de revestimiento, eliminando la posibilidad de que desenrosquen los tubos; aislar las zonas presión anormal para evitar la migración de fluidos a través del espacio anular; proteger las zonas productoras y los acuíferos de agua dulce.

La pérdida de circulación es el flujo de fluido de control o de lechadas de cemento desde el pozo hacia el interior de las formaciones que se atraviesan durante las etapas de perforación y cementación.

Las pérdidas de circulación pueden provocar varios problemas durante y después de las operaciones de cementación. Estos problemas pueden ser: pérdida de control del pozo; mala calidad de la cementación; necesidad de una cementación secundaria; contaminación del yacimiento y/o acuíferos de agua dulce; aumento en los costos de la construcción del pozo.

Una solución que ha dado buenos resultados en varios yacimientos alrededor del mundo en los cuales se presentan problemas por pérdida de circulación es la implementación de Cementos Ultraligeros de Alto Esfuerzo a la Compresión, los cuales han optimizado la cementación al disminuir ó eliminar las pérdidas de circulación y aumentar el volumen de cemento en el espacio anular y la calidad de la unión del cemento con la tubería y con la formación.

Aunado a la tecnología antes mencionada se ha venido utilizando una técnica de cementación llamada “Cementación Descolgada” la cual ha ayudado optimizar las cementaciones en las zonas de bajo gradiente de presión, ya que esta metodología de cementación considera la presión de las formaciones para calcular el volumen de cemento.

Los Cementos Ultraligeros de Alto Esfuerzo a la Compresión (ULAEC) han sido utilizados en medio oriente en zonas que presentaban bajo gradiente de presión. En México se ha implementado la tecnología en áreas de Cantarell que presentan bajo gradiente de presión y que en combinación con las características del yacimiento (altamente fracturado y altamente permeable) generan grandes pérdidas de circulación. Los cementos ULAEC también han sido utilizados en los Estados Unidos de América en las aguas profundas del Golfo de México y en el sur de Texas.

Los resultados obtenidos han sido satisfactorios en todos los casos, se ha logrado optimizar las operaciones de cementación al utilizar esta tecnología, y en la mayoría de

estos yacimientos se ha establecido la cementación ultraligera como la opción predeterminada para realizar las cementaciones.

La base de una buena cementación es una correcta determinación de los gradientes de presión de poro y presión de fractura, lo cual nos lleva a determinar la ventana de operación en la cual debemos trabajar. A partir de la ventana operacional se diseña la lechada de cemento.

Es importante es conocer las características de las formaciones en las que se va a cementar la sarta de revestimiento, propiedades como: nivel de consolidación de la roca; porosidad; permeabilidad; entre otras. También es importante determinar las propiedades que debe tener un cemento ya que de estas depende que la factibilidad técnica de la operación de cementación.

Las propiedades de la lechada de cemento se determinan mediante dos tipos de pruebas: las pruebas de laboratorio y la prueba de patio.

Los problemas de pérdida de circulación en zonas de bajo gradiente de presión aún no han sido solucionados, solo se han ido optimizando los resultados, se debe seguir trabajando para eliminar por completo esta problemática y obtener cementaciones efectivas

INTRODUCCIÓN

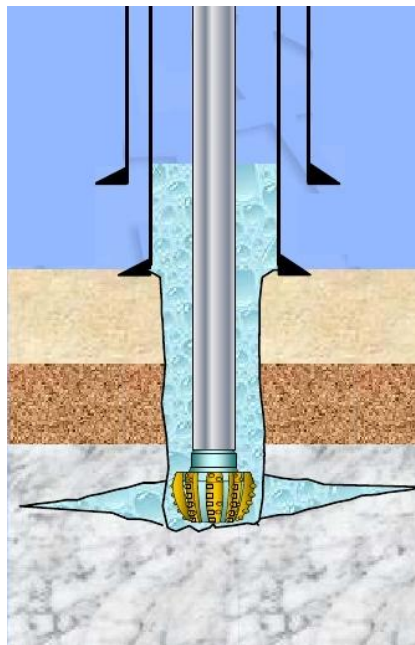
Yacimientos de hidrocarburos con grandes volúmenes originales -como Chicontepec y Cantarell- tienen una vida de explotación muy larga, y a medida que son explotados la presión del yacimiento declina, y aún cuando ya llevan muchos años en explotación siguen teniendo una considerable cantidad de hidrocarburos, por lo que sigue siendo necesaria la construcción de nuevos pozos para continuar con la explotación.

Las condiciones originales de estos yacimientos han variado tanto que muchos de los nuevos pozos que se deben perforar están programados en áreas del yacimiento que están sumamente depresionadas, en tal grado que se consideran zonas de presión anormalmente bajas, aún cuando originalmente no hubiesen presentado esta condición.

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan los ingenieros de perforación durante la construcción de un pozo en una zona de bajo gradiente de presión, es sin duda la pérdida de circulación en las operaciones de perforación y cementación.

Se define como pérdida de circulación al flujo de fluido de control o de lechadas de cemento desde el pozo hacia el interior de las formaciones que se atraviesan durante las etapas de perforación y cementación. La pérdida puede ser parcial o total.

El problema de la pérdida de circulación se amplifica en aquellas formaciones que además de presentar un bajo gradiente de presión tienen alta permeabilidad y/o alta porosidad y/o deleznableidad, el peor escenario es cuando a las condiciones anteriores se agrega un gradiente de presión de fractura cercano a la presión de formación, es decir una ventana de operación muy cerrada.



Perdida de Circulación durante la construcción de un pozo.

Es por eso que en los últimos 10 años se han implementado distintas metodologías para perforar los pozos en zonas de bajo gradiente de presión, tales como:

- El bombeo continuo de lodo de baja densidad ($0.89 \text{ [gr/cm}^3\text{]})$ y baches del mismo fluido con alta viscosidad (viscosidad Marsh de aproximadamente 250 segundos) para limpiar el agujero, hasta llegar a la profundidad deseada.
- Otra práctica operativa, cuando no se tienen cuerpos arcillosos, es utilizar agua de mar como fluido de control y el bombeo de baches de lodo para limpiar y estabilizar el agujero, esta opción es la más económica.
- Además, Cuando se atraviesa el casquete de gas, se bombea continuamente fluido de control con secuestrantes de H_2S a través del espacio anular y se emplean un preventor rotatorio y sistemas de seguridad adicional (Equipo de respiración autónoma y detectores de gas).

Las reservas probadas y las reservas probables de México se encuentran en yacimientos en los que se presentan problemas de pérdidas de circulación, ocasionados por gradientes anormales de baja presión y condiciones de los yacimientos como: mala consolidación y/o alto grado de fracturamiento. Es por eso que resulta de vital importancia encontrar metodologías que proporcionen una buena cementación cuando las condiciones antes mencionadas se presenten.

I. ANTECEDENTES

En un intento por resolver la problemática ocasionada por la pérdida de circulación durante las operaciones de cementación de tuberías de revestimiento de explotación en zonas de bajo gradiente de presión y fracturadas, se ha recurrido a prácticas como el empleo de empacadores (como dispositivo mecánico de aislamiento) y a realizar la cementación mediante una técnica denominada “Cementación Descolgada”, con la intención de asegurar el llenado total del espacio anular entre la formación y la tubería.

La diferencia entre la cementación descolgada y la cementación convencional radica en la forma en que se calcula el volumen de desplazamiento, ya que en la primera se calcula el volumen requerido para desplazar el cemento en base al nivel de fluido de que hay en el pozo, el cual se determina a través de registros en el pozo, este nivel corresponde a la columna hidrostática que es equivalente a la presión del el yacimiento, dado que el sistema se encuentra en equilibrio. En base a dicho nivel de fluido es posible determinar el volumen de desplazamiento necesario para colocar la mayor cantidad de cemento en el espacio anular.

Aunado a la técnica de cementación descolgada se ha implementado de manera conjunta la tecnología de cementación ultraligera, esta última como su nombre lo indica utiliza cementos de muy baja densidad, pero con un alto esfuerzo a la compresión y que una vez fraguado presenta baja permeabilidad.

Debido a los altos costos involucrados en realizar trabajos de cementación secundaria, los operadores se dieron cuenta de que es crítico obtener una cementación primaria eficiente, de tal forma que las compañías de servicio de cementación comenzaron a ofrecer cementos ultraligeros a partir de los 80's, se realizaron varios trabajos en el medio oriente. La siguiente tabla (tabla I.1) muestra los trabajos pioneros de cementación ultraligera con esferas de alta compresibilidad.

Fecha	ϕ de TR [pg]	Densidad de la Lechada [ppg]	Volumen [bbl]
abr-81	9 5/8	9.5	356
may-81	9 5/8	9.5	143
jun-81	13 3/8	10.5	712
jul-81	9 5/8	8.95	232
sep-81	13 3/8	9.43	445
dic-81	13 3/8	11.46	445
ene-82	13 3/8	10	891
feb-81	24	10	712
feb-81	13 3/8	8.18	392

Tabla I.1 Trabajos pioneros de Cementación ultraligera con esferas de alta compresibilidad.

La compañía Schlumberger también desarrollo una tecnología de cementos ultraligeros de alto esfuerzo a la compresión, cementos con densidades en el rango de 1.26 – 1.10 [gr/cm³] con una resistencia a la compresión entre 1200 a 2000 [psi] desarrollada a las 24 hrs. La siguiente tabla (Tabla I.2) muestra los resultados que Schlumberger ha obtenido al implementar la tecnología en varios países.

Estos cementos ya eran de alto esfuerzo a la compresión y con ellos se comenzaron a observar mejores resultados en las cementaciones, alcanzando a cubrir hasta 350 metros en el espacio anular.

País	Cliente	φ de TR [pg]	Densidad de la Lechada [ppg]	Volumen [bls]
Kuwait	KOO	9 5/8	8.2	330
Kuwait	KOC	9 5/8	8.2	50
Colombia	HOCOL	7	9.2	75
US	SLB	7	8.7	75
Venezuela	Chevron	5	9.3	40
Venezuela	PRISA		9.1	30
Francia	COPAREX	7	9.2	21
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	545
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	545
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	550
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	535
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	520
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	320
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	590
Abu Dhabi	ADCO	LC Plug	8.5	200
Abu Dhabi	ADCO	13 3/8	8.5	780

Tabla I.2 Trabajos realizados con lechadas ultraligeras en el mundo por Schlumberger.

Las características de este cemento: baja densidad, alta viscosidad y alto esfuerzo a la compresión lo hacen ideal para una formación de bajo gradiente de presión, alta permeabilidad y altamente fracturado.

II. CONCEPTOS BÁSICOS

A continuación se describen cualitativamente conceptos y metodologías que son de vital importancia para diseñar y realizar la cementación de una sarta de revestimiento. La calidad de la cementación está en función de que la información obtenida de los conceptos y las metodologías aquí mencionadas sea lo más acertada posible.

II.1. PRESIÓN DE FORMACIÓN

La presión de poro o presión de formación (P_p) es la presión actuando sobre los fluidos que se encuentran en el espacio poroso de la formación. Estos fluidos son generalmente aceite, agua y gas. En condiciones normales la presión de poro es igual a la presión hidrostática ejercida por la columna de fluidos que está por encima de la formación.

El esfuerzo de sobrecarga es (σ_{SC}) es creado por los pesos combinados de la matriz sólida y los fluidos dentro de los poros de las rocas que se encuentran por encima de la formación. El esfuerzo de la matriz de roca (σ_{MR}) es el esfuerzo de sobrecarga menos la presión de formación.

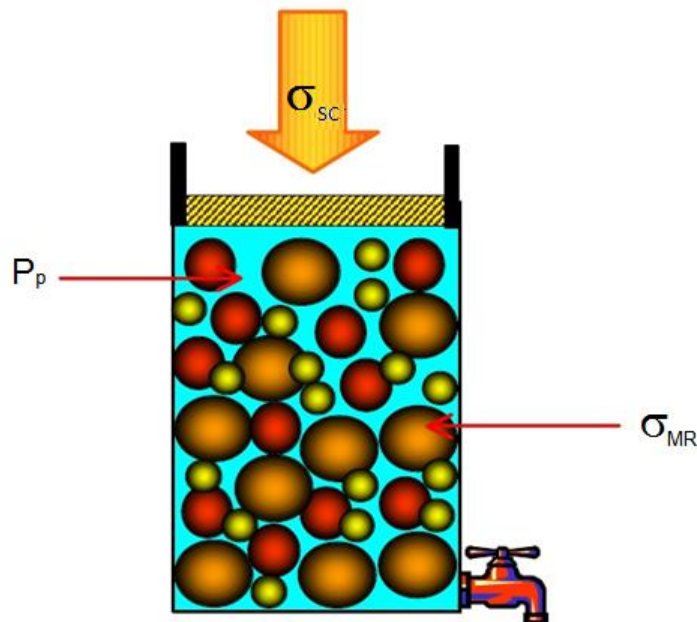


Figura II.1 Presiones actuando en el subsuelo.

Cuando se tienen condiciones normales de compactación y no se han presentado fenómenos geológicos que pudiesen haber alterado el equilibrio hidráulico en las formaciones, la presión de poro varía de forma lineal con respecto a la profundidad, y dicha tendencia está en función de los fluidos nativos de la formación. Bajo estas circunstancias el esfuerzo de sobrecarga, el esfuerzo de la matriz de la roca, y la presión de poro se expresan matemáticamente de la siguiente forma:

$$P_p = \gamma_f * D$$

$$\sigma_{SC} = D * [(1 - \phi) * \gamma_{MR} + \phi * \gamma_f]$$

$$\sigma_{MR} = D * [(1 - \phi) * \gamma_{MR} + \phi * \gamma_f - \gamma_f]$$

Donde

P_p = presión de poro, [lb/pie²]

D = profundidad de interés, [pies]

σ_{RM} = esfuerzo de la matriz de roca a la profundidad de interés, [lb/pie²]

σ_{RM} = esfuerzo de Sobrecarga, [lb/pie²]

γ_{RM} = peso específico de la matriz de la roca, [lb/pie³]

γ_f = peso específico del fluido en el espacio poroso, [lb/pie³]

La presión de poro es el principal factor a considerar cuando se diseña un pozo, la profundidad de asentamiento de las tuberías de revestimiento se determina en función de la presión de poro y la presión de fractura.

Por otra parte, si la presión de formación no es evaluada correctamente, se pueden presentar problemas durante las operaciones como descontrol, tuberías atoradas, inestabilidad del agujero, y costos excesivos. Desafortunadamente, la presión de formación puede ser difícil de evaluar con precisión en zonas de presión anormal.

Cuando se diseña la construcción de un pozo los ingenieros deben de estimar con la mayor aproximación posible las presiones que van a encontrar en el subsuelo, además del tipo y características de las formaciones que van a atravesar.

La planeación de la construcción de un pozo está basada casi por completo en el gradiente de presión de formación. Si las predicciones de la presión de formación son incorrectas, otras partes del plan del pozo se ven directamente afectadas. La Figura II.2 muestra el proceso de planeación para la construcción de un pozo.

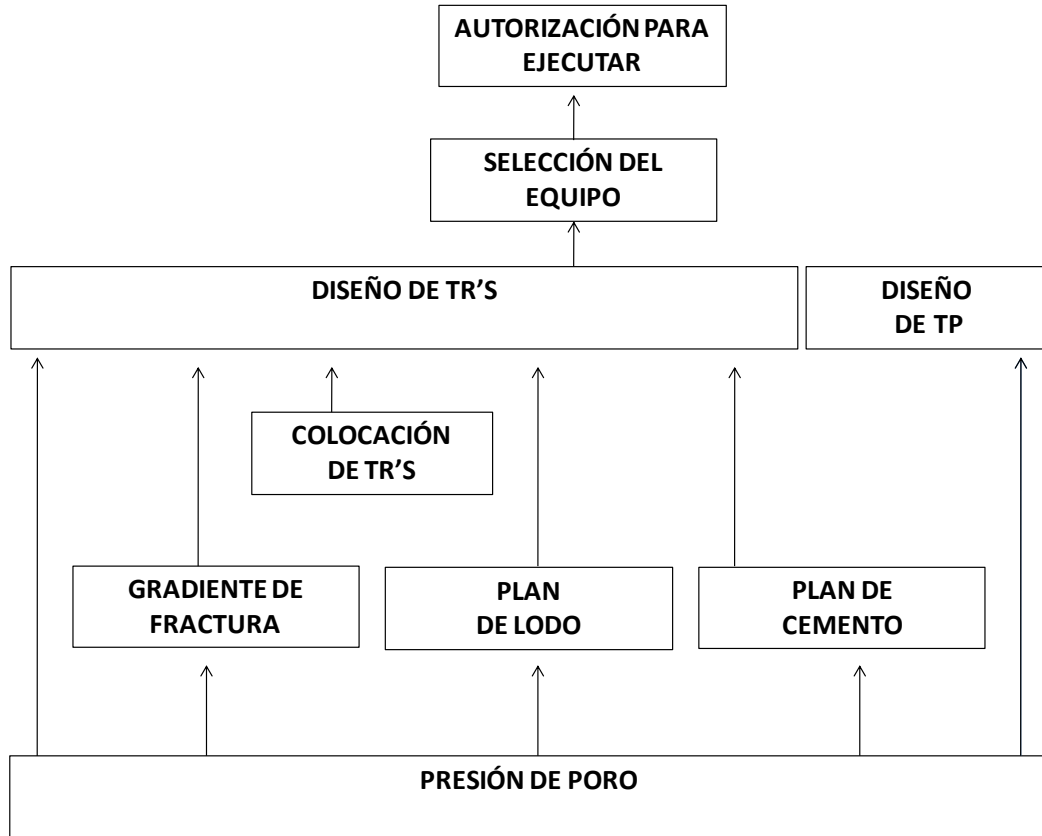


Figura II.2 Planeación de un Pozo.

II.1.1 PRESIÓN ANORMAL

Cualquier presión que esté por encima o por debajo de la presión hidrostática correspondiente a los fluidos nativos de la formación, se considera anormal. Se pueden presentar dos casos: presión anormalmente baja y presión anormalmente alta. Diversos mecanismos pueden dar origen a las zonas de presión anormal, a continuación se describen dichos procesos.

Es importante que el ingeniero a cargo de diseñar el pozo sepa si va encontrar presiones anormales durante las operaciones de perforación y cementación del pozo, de no ser así se pueden generar incidentes y/o accidentes durante la perforación que pueden llegar a provocar desde atrasos en la construcción y pérdidas económicas hasta la pérdida del pozo, y en el peor de los casos la pérdida de vidas humanas.

II.1.1.1 ORIGEN DE LAS ZONAS DE PRESIÓN ANORMALES

Las presiones anormales pueden originarse debido a uno o más de los siguientes procesos: compactación de las formaciones; migración de fluidos; efectos genéticos de las rocas; y diferencia de densidades entre los fluidos.

En condiciones normales a medida que los materiales se van sedimentando, comienzan a compactarse debido al peso de los materiales que se siguen depositando por encima de los sedimentos iniciales.

La compactación está en función del esfuerzo de sobrecarga que se ejerce sobre la roca, como ya se vio anteriormente el esfuerzo de sobrecarga depende de la presión de los fluidos en los poros y de el esfuerzo de la matriz sólida de la roca. La porosidad depende a su vez de la compactación.

A medida que se depositan más sedimentos en la superficie y que el esfuerzo de sobrecarga de la roca aumenta, las capas inferiores deben soportar la carga adicional, es por eso que en condiciones normales el esfuerzo de la matriz de roca aumenta para dar soporte a la carga extra, para que esto suceda debe aumentar el contacto entre los granos de la matriz, esto implica que la porosidad disminuye con respecto a la profundidad. La siguiente Figura muestra la dependencia de la Porosidad con respecto al esfuerzo de sobrecarga.

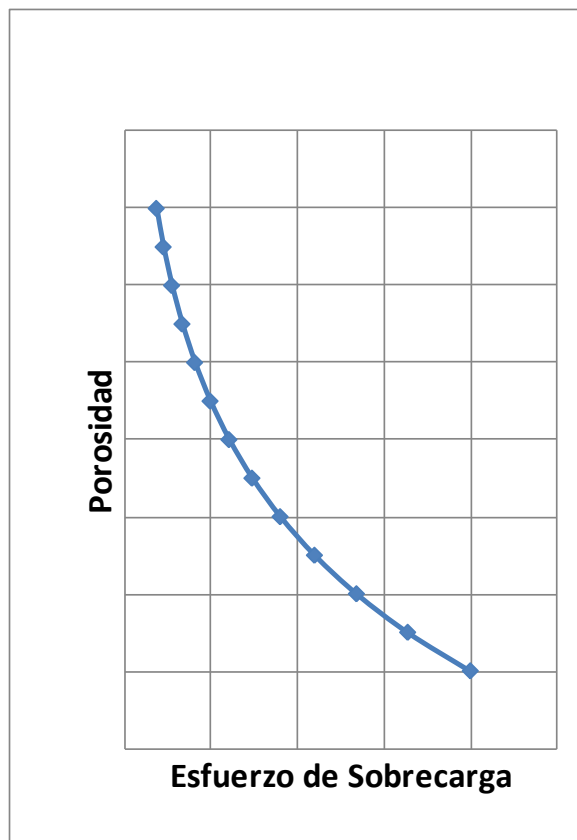


Figura II.3 Efecto del Esfuerzo de sobrecarga en la porosidad de la formación.

Sin embargo, si el proceso de compactación normal es restringido por alguna razón, es decir, los fluidos dentro de los poros de la matriz de roca no son capaces de escapar al ser afectados por un esfuerzo de sobrecarga adicional, la matriz de roca no puede incrementar el contacto entre los granos y por ende no aumenta su capacidad de soportar el esfuerzo de sobrecarga, pero este último sigue aumentando, así que son los fluidos en el espacio poroso los que comienzan a soportar parte del esfuerzo de sobrecarga, lo que ocasiona que las presiones sean mayores a lo normal.

Para que estas presiones anormales se mantengan debe existir un sello que evite la migración de fluidos, los sellos más comunes son capas de roca de baja permeabilidad como las lutitas limpias, pero también pueden ser fallas impermeables o formaciones salinas.

La génesis de la roca también genera presiones anormales ya que en ciertos tipos de formaciones las variaciones de presión y temperatura pueden provocar una alteración en la constitución de la roca y/o la precipitación de ciertos materiales que generan barreras impermeables.

Algunas formaciones pueden sufrir una alteración en la compactación y en la cementación. Un aumento en la compactación suele ser resultado de una disminución del espacio poroso y la pérdida de agua intersticial -la cual es mucho más densa que el agua en el espacio poroso- al ser afectados por la presión de las capas superiores. Bajo estas condiciones el volumen de agua en los poros aumenta así como la presión que es ejercida sobre ella, si el agua no encuentra una ruta de escape, es decir, la formación está sellada, la presión en el espacio poroso será anormalmente alta.

Existen diversos eventos geológicos y efectos de la propia explotación de los fluidos en el subsuelo (agua, hidrocarburos y nitrógeno, entre otros) que generan presiones anormales. A continuación se mencionan algunos de estos procesos:

Sistema Artesiano

Este tipo de estructura crea una presión anormalmente alta, ya que consta de un acuífero comunicado, el cual está contenido en una estructura que se encuentra a distintas profundidades, de tal forma que la presión de la columna hidrostática se transmite hasta el fondo de la formación.

Este tipo de presión anormal no se puede detectar por técnicas convencionales, debido a que dichos métodos utilizan la compactación para poder detectar las zonas de presión anormal, pero en este caso la tendencia de compactación es normal.

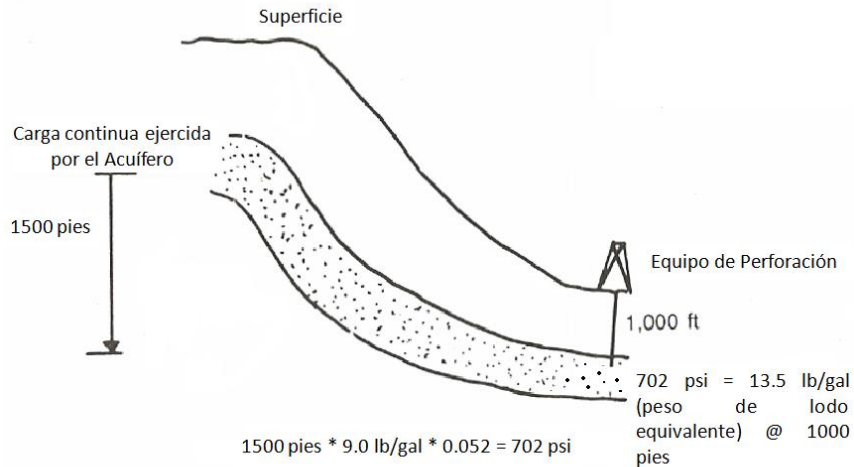


Figura II.4 Presión Anormal generada por Sistema Artesiano

Fallas

Los eventos tectónicos pueden generar fallas en las formaciones, las fallas a su vez provocan el desplazamiento de las formaciones ya sea hacia arriba (Levantamiento) o hacia abajo (Colgamiento), y si dichas formaciones quedan selladas -después del desplazamiento- la presión contenida en ellas será no podrá regresar a la condición de equilibrio hidráulico, por lo que las formaciones tendrán una presión anormal con respecto a la presión de las formaciones adyacentes.

a) Levantamiento

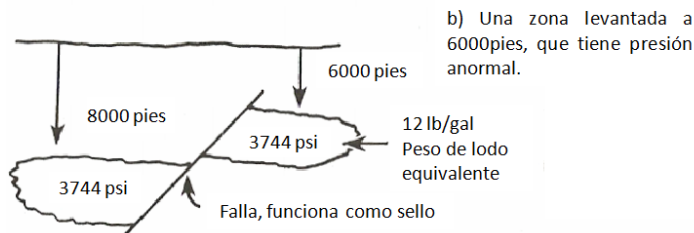
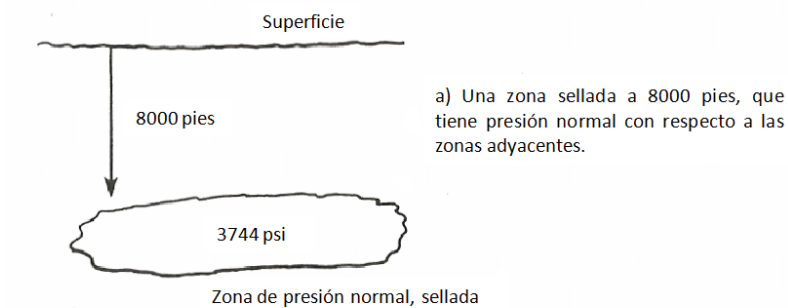


Figura II.5 Presión Anormal generada por Levantamiento

b) Colgamiento

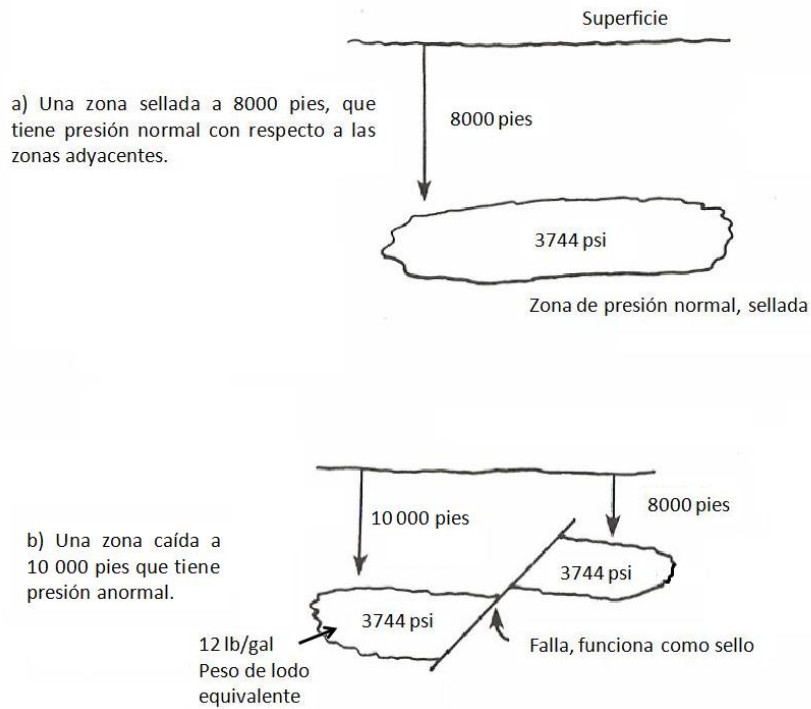


Figura II.6 Presión Anormal generada por Colgamiento.

Lechos salinos

Los lechos salinos son completamente impermeables, además se comportan de manera plástica, este comportamiento provoca que el esfuerzo de sobrecarga que es ejercido por el lecho salino sea transmitido por completo hacia las formaciones que se encuentran por debajo de él.

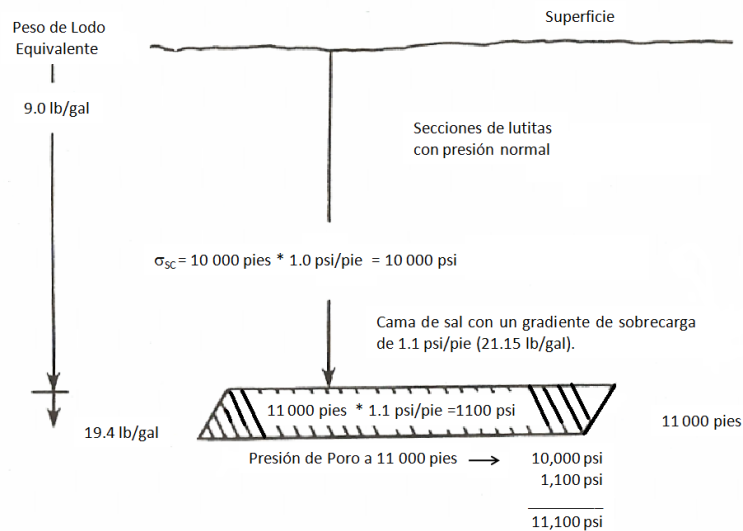


Figura II.7 Presión Anormal generada por un Lecho Salino.

Domos salinos

La intrusión de un domo salino en una formación con bajo esfuerzo de corte genera una presión anormalmente alta cuando existe una barrera impermeable que previene la migración de los fluidos.

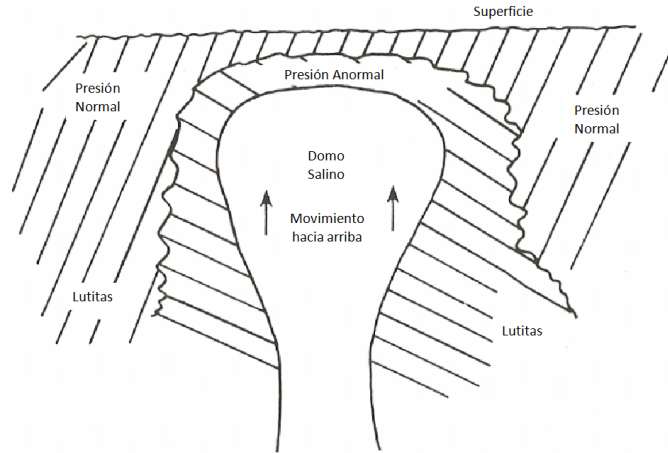


Figura II.8 Presión Anormal debida a la intrusión de un Domo Salino.

Diferencias de densidades

Cuando en una formación que esta hidráulicamente comunicada existen fluidos que tienen densidades diferentes-como por ejemplo el gas y el agua de formación- y además existe un sello impermeable en la parte alta de la formación mientras que en la parte inferior hay comunicación con las formaciones adyacentes, se genera una presión anormal, dado que el fluido de más baja densidad intenta contrabalancear la presión ejercida en el contacto agua/gas para llegar a una condición de equilibrio.

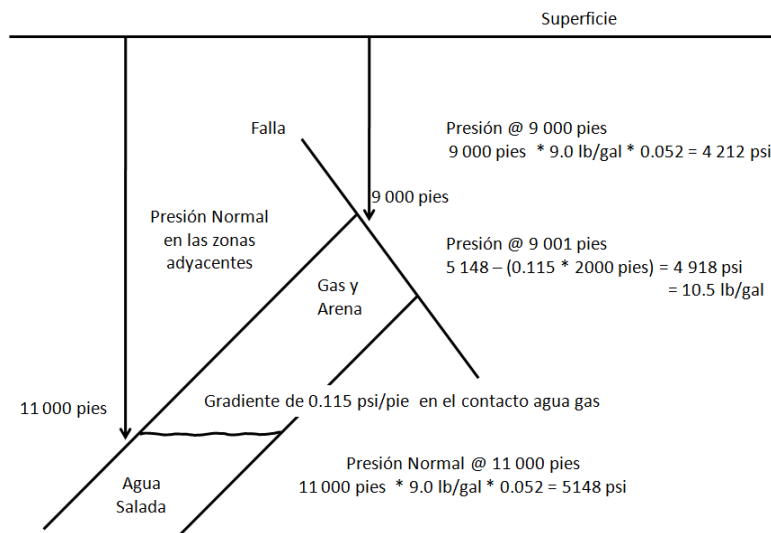


Figura II.9 Presión Anormal debida a la diferencia de densidades de los fluidos.

Efectos de la migración de los fluidos

El flujo de fluidos entre formaciones profundas hacia formaciones más someras genera una condición de presión anormal. Esto es debido a que la formación más somera que se encontraba en equilibrio hidráulico comienza a recibir un volumen extra de fluidos lo que ocasiona una represión de los fluidos en el espacio poroso, dado que el volumen de poros permanece constante.

Este fenómeno se puede dar de forma natural, como es el caso de el flujo de fluidos de una formación a otra a través de una falla, pero también puede ser debido a la acción del hombre como es el caso de el flujo de fluidos de una formación a otra a través de un pozo.

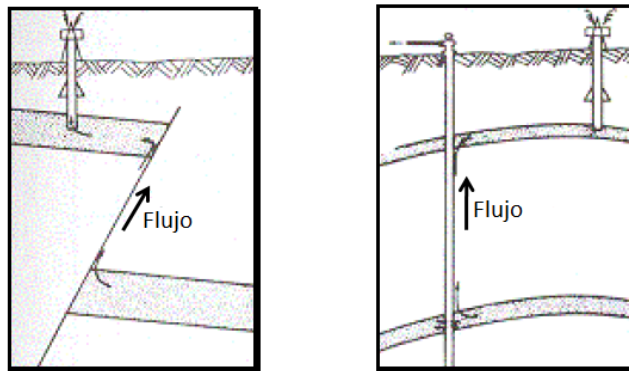


Figura II.10 Presión Anormal debida a la migración de fluidos.

Explotación de los yacimientos

A medida que se explota un yacimiento la presión del mismo va declinando, siempre y cuando no exista ningún mecanismo de mantenimiento de presión, por tal motivo en yacimientos con grandes volúmenes de hidrocarburos, los cuales son explotados durante largos periodos de tiempo, la presión de formación original disminuye de tal forma que se convierte en una zona de baja presión, este proceso puede provocar que incluso una zona que una vez fue de presión anormal alta se transforme en una zona de presión anormal baja.

Este fenómeno es común en varios yacimientos en el mundo, muchos de los cuales son de gran importancia, tal es el caso de Cantarell y Chicontepec, en México, y otros yacimientos que se encuentran en el Golfo de México. Este fenómeno también ocurre en yacimientos importantes de Medio Oriente.

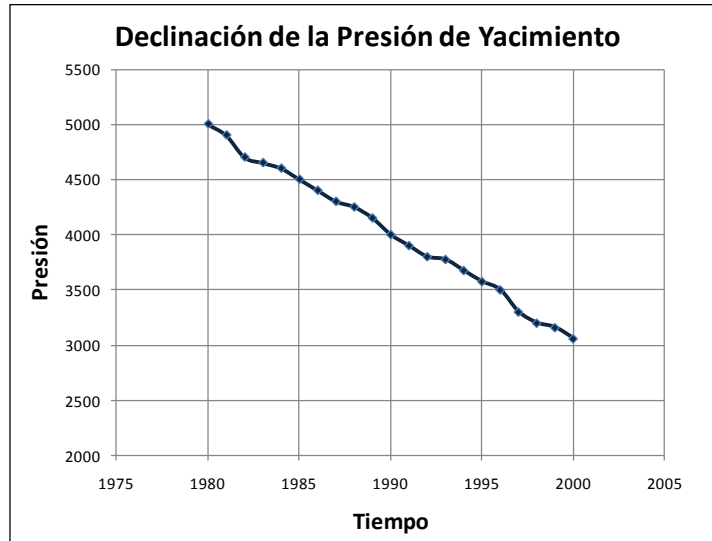


Figura II.11 Declinación de la presión de una formación productora al ser explotada.

II.1.1.2 PRESIÓN ANORMAL ALTA

Este es el caso en que la presión que se encuentra en el subsuelo está por encima de la tendencia normal para una determinada área y profundidad. Si no se identifican y evalúan estas zonas de forma correcta se pueden presentar graves problemas durante la perforación de un pozo.

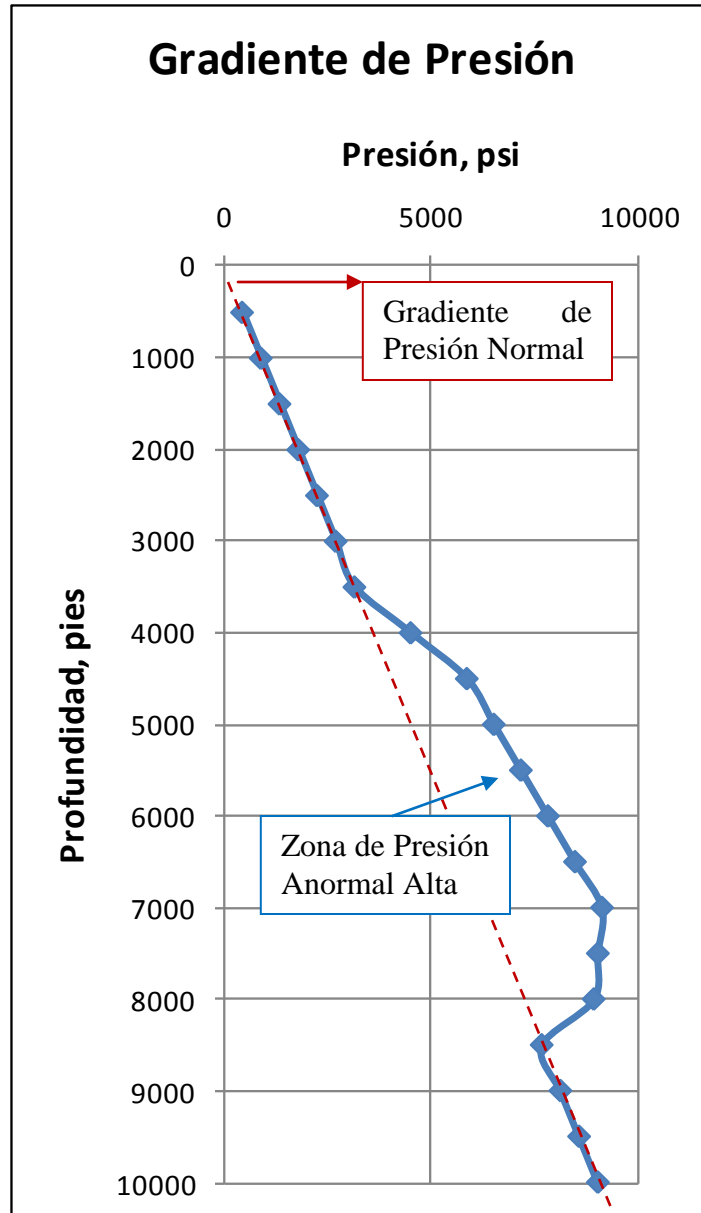


Figura II.12 Gradiente de Presión con una zona de presión anormalmente alta

II. 1. 1.3 PRESIÓN ANORMAL BAJA

Cuando en una zona y profundidad determinadas el gradiente de presión está por debajo del gradiente característico de los fluidos nativos de dicha área, se dice que es una zona de bajo gradiente de presión. Es importante identificar y evaluar de forma correcta las zonas de bajo gradiente de presión para evitar complicaciones durante la construcción de un pozo.

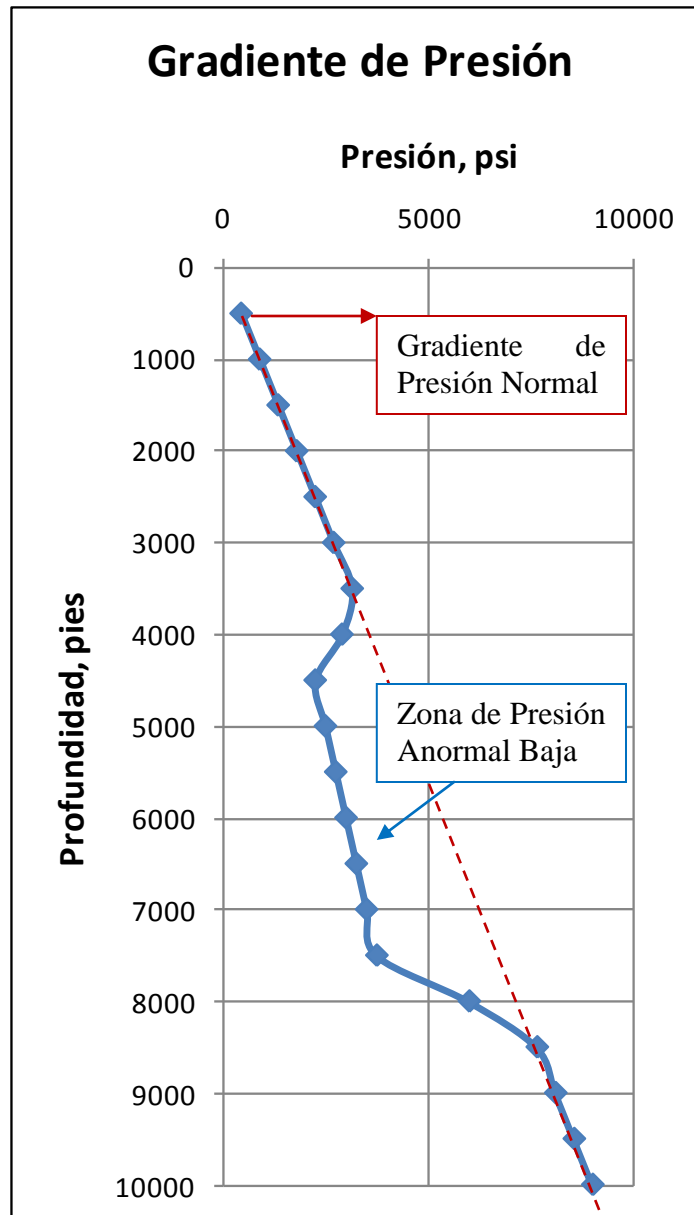


Figura II.13 Gradiente de Presión con una zona de Presión Anormalmente baja.

II.1.2. MÉTODOS PARA CALCULAR LA PRESIÓN DE PORO

Existen muchos métodos para predecir la presión de poro, estos métodos se pueden agrupar en tres grupos de la siguiente forma:

- 1) Análisis areal de Datos Sísmicos
- 2) Correlación de datos de Pozos cercanos
 - a) Datos de registros geofísicos
 - b) Datos de parámetros de la perforación
- 3) Evaluación en tiempo real.

Estas técnicas deben dar al ingeniero de perforación las herramientas necesarias para evaluar las presiones de formación adecuadamente. El peor escenario es cuando no tienen datos de otros pozos, en este caso se debe utilizar la información de la sísmica. Se recomienda que de ser posible se utilicen todas las técnicas para una mayor confiabilidad de los resultados.

II.1.2.1 ANÁLISIS AREAL A PARTIR DE LOS DATOS SÍSMICOS

Varios métodos geofísicos como el análisis sísmico pueden ser utilizados para evaluar la magnitud de las presiones en el subsuelo y para detectar las zonas con presiones anormales.

El análisis de datos sísmicos está basado en el análisis elemental de reflexión. Si suponemos que SS representa la superficie de la tierra (Figura II.14) y que además el punto O representa el lugar donde se va a disparar una carga en la superficie, cuando los explosivos son detonados, energía acústica es generada en forma de ondas compresivas, dicha energía se transmite en todas direcciones, la energía viajando de forma vertical golpea la superficie del subsuelo RR y es reflejada de vuelta a través de la línea vertical OPO. La energía también se propaga diagonalmente hacia la superficie RR a través de distintas direcciones (i.e., la línea OT) y también es reflejada de vuelta hacia la superficie siguiendo la dirección TW.

El tiempo requerido por las ondas de energía para viajar a través de ambas direcciones es medido por geófonos en los puntos O y W, los cuales están separados horizontalmente por la distancia X. La velocidad promedio puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$V = X^2 * (t_x^2 - t_o^2)$$

La profundidad de la superficie del subsuelo que está reflejando las ondas puede ser determinada con la ecuación:

$$Z = V * \left(\frac{t_o}{2}\right)$$

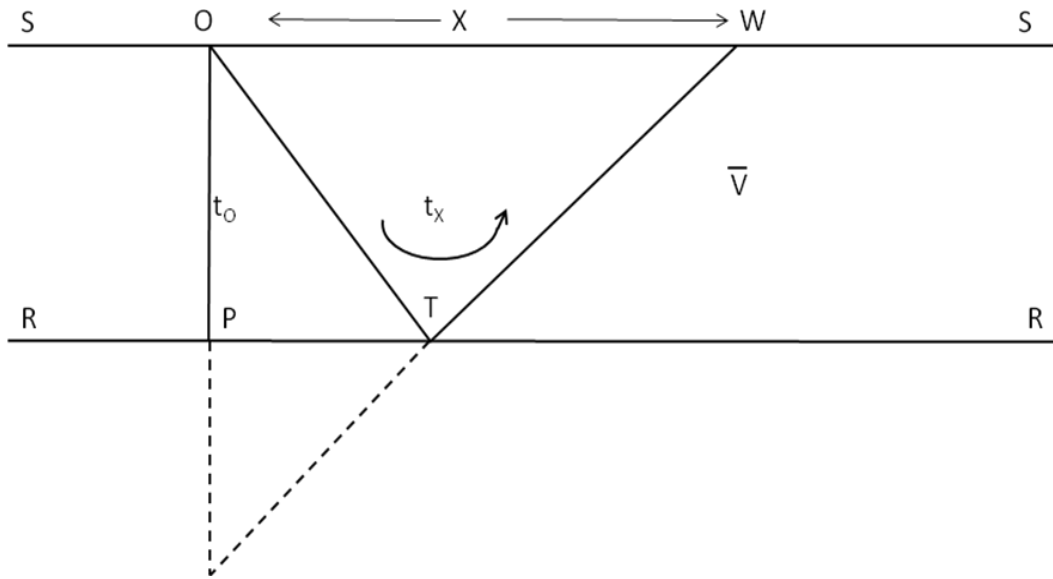


Figura II.14 Concepto de reflexión elemental.

Si se grafica el recíproco de los valores obtenidos de velocidad de los intervalos contra la profundidad se pueden detectar las zonas de presión anormal. Esto es debido a que en un ambiente normal la porosidad disminuye al ir profundizando, porque aumenta a la compactación, sin embargo, en una zona de presión anormal la porosidad se desvía de la tendencia normal, lo que provoca una variación en el tiempo de tránsito con respecto a lo esperado.

La siguiente gráfica muestra la variación del tiempo de tránsito con respecto a la profundidad, nótese que a partir de los 5 500 [pies] muestra una desviación de la tendencia normal. Dicha variación indica una zona de presión anormalmente alta.

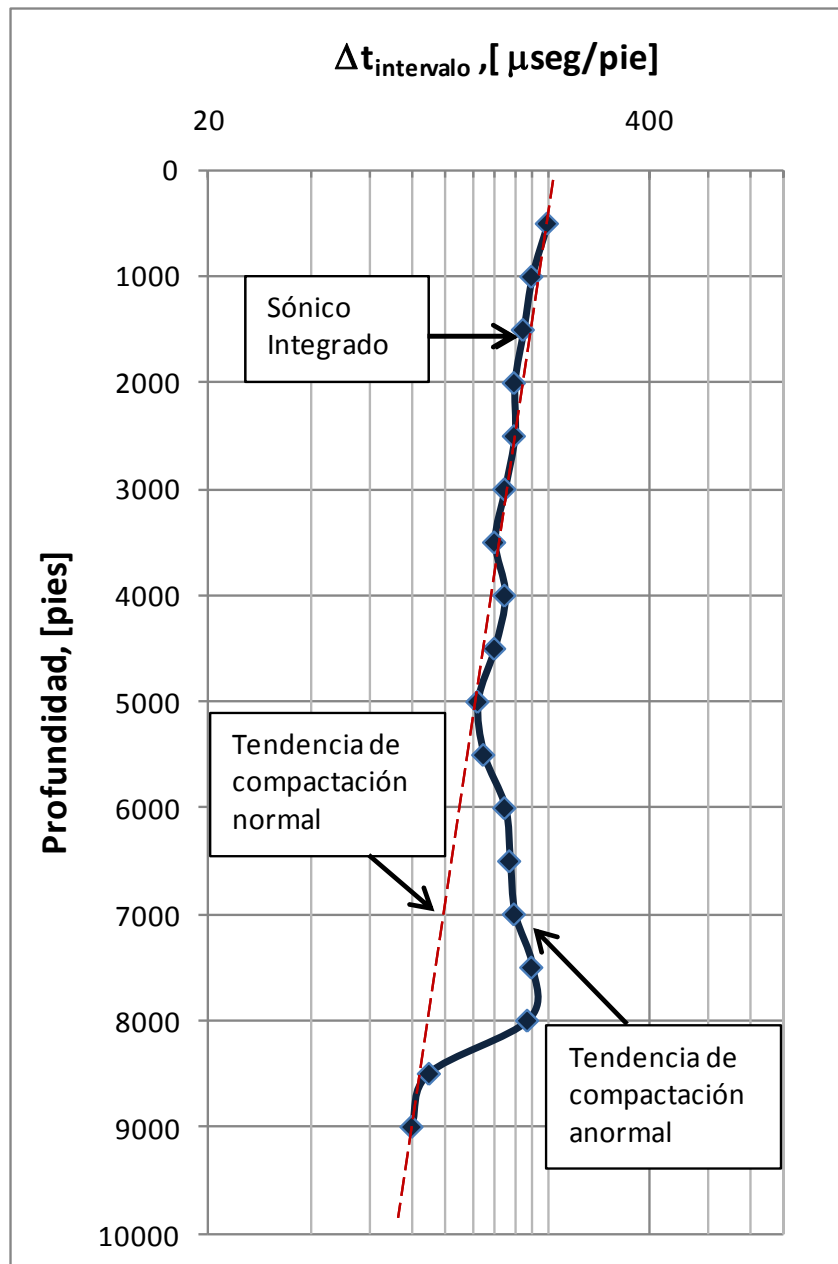


Figura II.15 Tiempo de transit vs Profundidad muestra una zona de presión anormalmente alta.

II.1.2.2 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE FORMACIÓN A PARTIR DE DATOS DE POZOS CERCANOS

- **Análisis de registros de pozo**

El análisis de registros es un procedimiento común para estimar la presión de poro, las técnicas de análisis se basan en el efecto que tiene la porosidad de la roca sobre otras propiedades de la roca como la resistividad, la densidad, y el tiempo de tránsito.

Las principales técnicas de análisis emplean ya sea el registro de **resistividad o el sísmico**, sin embargo es importante hacer notar que cualquier registro que sea principalmente dependiente de la porosidad puede servir para evaluar las presiones de la formación.

Los datos obtenidos en distintos pozos de una misma zona pueden ser correlacionados para caracterizar el yacimiento, tanto para conocer la distribución de presiones en el mismo, como para saber la distribución de otras propiedades.

A medida que se perforan más pozos y se obtiene información de lo mismo, se va enriqueciendo la caracterización del yacimiento con dichos datos. Este es un proceso de mejora continua, por lo que nunca se debe dejar de adquirir información de los pozos nuevos.

Registro de resistividad

Originalmente se empleó el registro de resistividad para la estimación de las presiones, este registro detecta la resistividad total de una muestra la cual está conformada por la matriz de la roca y los fluidos en el espacio poroso de la misma.

Dado que la resistividad varía en función de la litología, la porosidad, la cantidad y el tipo de fluidos en el espacio poroso, es posible notar a partir del registro de resistividad donde hay desviaciones de la tendencia normal de la presión y evaluar la magnitud de las presiones en el subsuelo mediante correlaciones empíricas.

Para que este análisis funcione correctamente solo se debe considerar la resistividad de las lutitas limpias para determinar la tendencia normal, dado que si consideramos formaciones impregnadas de hidrocarburos o de otros gases los valores de resistividad nos darían una interpretación incorrecta.

La siguiente imagen muestra un registro de resistividad en el cual solo están consideradas las lutitas limpias, en la gráfica se muestra la tendencia normal de la resistividad y se aprecia además una zona donde la resistividad es anormal.

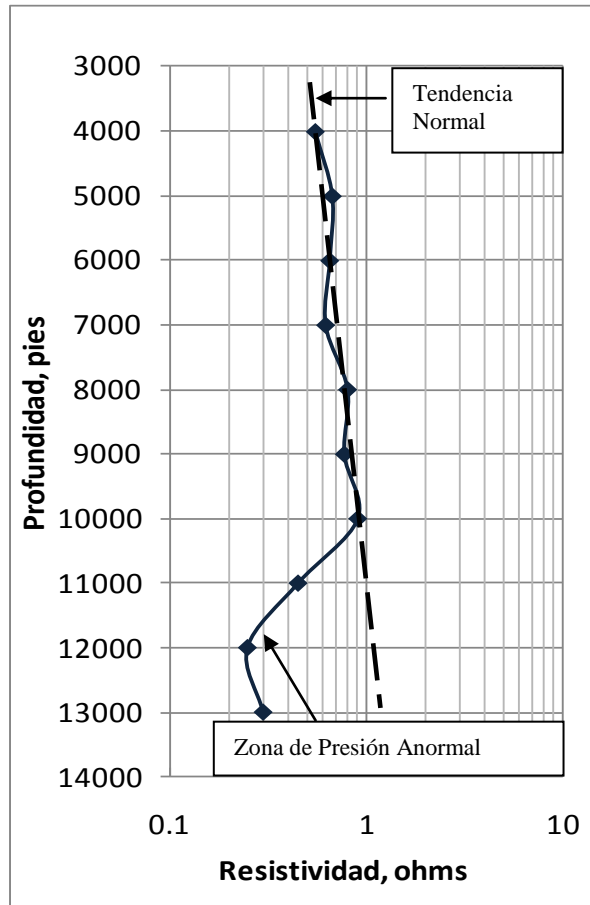


Figura II.16 Registro de resistividad de las lutitas limpias.

Existen varios métodos empíricos para determinar la presión de formación a partir del registro de resistividad, como: Hotman & Johnson, Sobre posición, Foster & Whalen, entre otros.

Registro Sónico

El registro sónico ha sido utilizado exitosamente para evaluar las presiones de formación, la técnica utiliza las diferencias existentes en el tiempo de tránsito entre distintas zonas para identificar zonas de presión anormal y para poder evaluar dichas presiones.

El registro sónico nos permite predecir la presión de las formaciones ya que el tiempo de tránsito está en función de la compactación, la cual como ya se mencionó antes está en función de la presión.

Hotman & Johnson desarrollaron una correlación empírica entre el gradiente de presión de formación y la diferencia existente entre el tiempo de tránsito observado en el registro sónico y el tiempo de tránsito correspondiente a una tendencia normal.

- **Evaluación de parámetros de perforación**

Existen varios parámetros que pueden ser evaluados ya sea cualitativa o cuantitativamente con el fin de evaluar las presiones en el subsuelo y/o detectar zonas de presión anormal durante la perforación de un pozo.

Para llevar a cabo dicho objetivo se han desarrollado distintas técnicas las cuales emplean uno o más de los parámetros de perforación. Los principales métodos son: el análisis de la variación de la densidad de la roca; registro de “patadas”; la ecuación de Bingham; y Exponente dc.

Estos métodos consideran parámetros como: el ritmo de penetración de la barrena; la velocidad de la mesa rotaria; el peso de la barrena; el diámetro de la barrena; y el peso equivalente del lodo, para determinar modelos matemáticos a partir de los cuales se puede estimar la presión de las formaciones.

- **Datos de pruebas de pozos**

Para conocer las presiones de formación en campos que ya están en desarrollo, también se utilizan datos de pruebas de presión los cuales registran el perfil de presiones y de temperaturas de pozo, estas mediciones se pueden hacer cuando el pozo esta fluyendo o cuando el pozo está cerrado, siendo el primer caso el más frecuente por motivos económicos.

El registro de presión de fondo fluyendo nos da el gradiente dinámico del pozo, mientras que el registro de presión de fondo cerrado nos proporciona el gradiente estático del pozo.

Con la información obtenida con estas pruebas podemos terminar de definir cuál es la distribución de presiones en el subsuelo para una determinada zona del yacimiento e incluso si la información es suficiente, se puede estimar la distribución en todo el yacimiento.

II.1.2.3 EVALUACIÓN EN TIEMPO REAL

El avance de las herramientas computacionales y los dispositivos electrónicos han permitido que se desarrollen instrumentos para tomar mediciones mientras se llevan a cabo las operaciones de perforación.

Estos sistemas de medición le permiten al ingeniero de perforación tener una mayor capacidad de reacción en caso de imprevistos, a la vez que proveen una forma para validar o mejorar el perfil de presión previamente estimado.

II.2. PRESIÓN DE FRACTURA

Otro factor de gran importancia en la planeación de un pozo es el gradiente de presión de fractura -tal como se puede observar en la Figura II.2-. La presión de fractura es la presión requerida para que se inicie una fractura en la formación.

El gradiente de presión de fractura es importante para evitar problemas durante la construcción de un pozo, tales como pérdida de circulación, contaminación de acuíferos de agua dulce, daño a la formación productora. Además, la presión de fractura es imprescindible para diseñar la profundidad de asentamiento y cementación de las tuberías de revestimiento.

Se han desarrollado muchos métodos para estimar el gradiente de presión de fractura, existen métodos de aplicación directa en el campo (para áreas específicas), mientras que otros requieren un procesamiento de información obtenida mediante registros de pozo.

Es importante señalar que los procedimientos comunes para determinar los gradientes de fractura asumen que las cuencas están tectónicamente relajadas y que además están formadas por materiales plásticos como las lutitas intercaladas con areniscas. Estos métodos generales no son aplicables en zonas naturalmente fracturadas y/o con alta vugularidad.

En zonas naturalmente fracturadas y/o con vugulos los procedimientos para estimar los gradientes de fractura han sido desarrollados de forma particular para cada área a partir de la estructura geológica del campo o mediante pruebas en el campo como prueba de admisión y/o registros de pozo.

II.2.1. MÉTODOS PARA CALCULAR LA PRESIÓN DE FRACTURA

Existen varios métodos empíricos para determinar la presión de formación a partir de varios parámetros de la formación como: la presión de formación, el esfuerzo de sobrecarga; la profundidad; la compactación de la roca; la cohesividad de la roca; la relación de Poisson; la profundidad del tirante de agua (para el caso de pozos costa afuera).

Los métodos más comúnmente utilizados son: Hubbert y Willis, Matthews y Kelly, Eaton, Christman, entre otros. No todos los métodos consideran todos los parámetros anteriormente mencionados. El más completo para pozos terrestre es Eaton, mientras que para pozos costa afuera es Christman.

Otra forma de determinar el gradiente de fractura es mediante pruebas de admisión realizadas en el campo, para realizar esta prueba se cierran los preventores y se aplica presión (hidrostática) en el pozo, dicha presión se va incrementando hasta que finalmente la presión declina debido a la admisión de fluido por parte de la formación.

II.3. VENTANA DE OPERACIÓN

Una vez que se han determinado los gradientes de presión de poro y de presión de fractura, es tiempo de determinar la profundidad a la que se van a asentar y cementar las tuberías de revestimiento, para hacer esto es necesario generar la ventana de operación.

Determinar la ventana de operación es simple, se debe afectar los gradientes de presión de formación y de fractura por un factor de seguridad, es decir tomar en cuenta que ambos gradientes fueron estimados y que no se conocen los valores reales, por lo que se debe reducir la posibilidad de tener problemas durante la construcción de pozo al considerar un gradiente de presión de formación ligeramente mayor y un gradiente de presión de fractura ligeramente menor.

Es práctica común utilizar un factor de 0.2 a 0.3 [g/cc] para determinar la ventana de operación, de tal forma que una presión de formación de 1 [g/cc] será por efectos de seguridad considerada como 1.2 [g/cc], mientras que si la presión de fractura correspondiente fuese de 2 [g/cc] una vez afectado por el factor de seguridad sería de 1.8 [g/cc].

Es muy importante mencionar una vez más la importancia que tienen la ventana de operación en la construcción de un pozo, a partir de esta información se comienza a planificar la perforación (ver figura II.2).

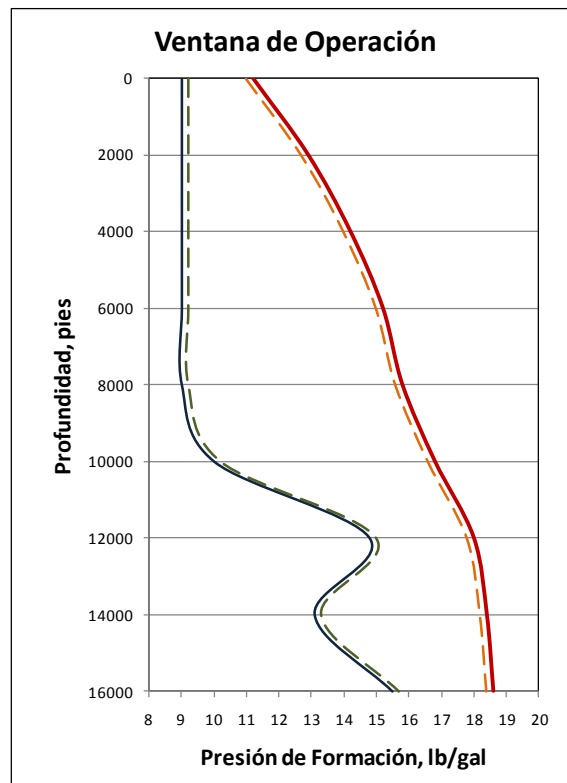


Figura II. 40 Ventana de Operación

II.4. TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

Es un tubería que se utiliza para aislar las formaciones que han sido a travesadas durante la perforación de un pozo, proveyendo un conducto para el flujo de fluidos desde la profundidad de asentamiento de la tubería hasta la superficie, de esta forma se logra evitar problemas como derrumbes dentro del pozo, aislar zonas de presión anormal, proteger el aparejo de producción, entre otros. Las tuberías de revestimiento están clasificadas en distintos tipos según la etapa de perforación en las que son utilizadas, ya que en cada etapa la tubería de revestimiento persigue objetivos particulares además de los que son comunes en todas las etapas.

II.4.1 TIPOS DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

Conductora

Esta es usualmente la primera tubería en ser colocada, la profundidad de asentamiento va de los 100 a los 300 pies. En formaciones suaves esta tubería es “piloteada”, mientras que en formaciones duras es necesario perforar un agujero y luego colocar la tubería.

El principal objetivo de esta sección de tubería es proporcionar un conducto que permita el flujo desde la barrena hasta la superficie, y evitar problemas que se pueden presentar en las formaciones someras como: evitar pérdidas de circulación; evitar derrumbes en el agujero.

En pozos costa afuera las conductoras son “jeteadas”, este procedimiento consiste en remover el lecho marino con un chorro a alta presión de agua y colocar la tubería, para que esta quede atrapada una vez que el lecho vuelva a su sitio y a su condición de equilibrio natural.

Superficial

Es el segundo segmento de tubería, el cual tiene el por objetivos: aislar los acuíferos de agua dulce; mantener la integridad del pozo; minimizar los problemas de pérdida de circulación; aislar zonas que no soportarían las densidades de lodo necesarias para controlar zonas más profundas; colocar los preventores; soportar el peso de todas las tuberías subsecuentes (con excepción de los liners).

Intermedias

Puede haber una o más tuberías intermedias, estas tuberías se colocan principalmente para evitar problemas que pueden generar las zonas de presión anormal alta como: pérdidas de circulación, atrapamientos de tubería.

Explotación

Así se le llama a la tubería de revestimiento en la que se instala el aparejo de producción. Esta suele ser la última etapa de las tuberías de revestimiento, aunque a veces el cambio de zona de explotación provoca un cambio de tubería de explotación.

Los objetivos de la TR de explotación son:

- Aislar la zona productora de otras formaciones
- Comunicar el yacimiento con la superficie
- Contener y proteger el aparejo de producción

Liner de explotación

Este liner de explotación es una tubería de explotación corta, cumple los mismos objetivos que la tubería de explotación pero con la ventaja -desde el punto de vista económico- de que no es instalado desde la superficie hasta la zona de interés sino a partir de cierta profundidad en el interior del pozo.

Hoy en día por seguridad y control ambiental siempre se colocan las tuberías de explotación ya sea convencional o corta hasta el fondo del pozo, los Liners han tenido mayor uso en años recientes.

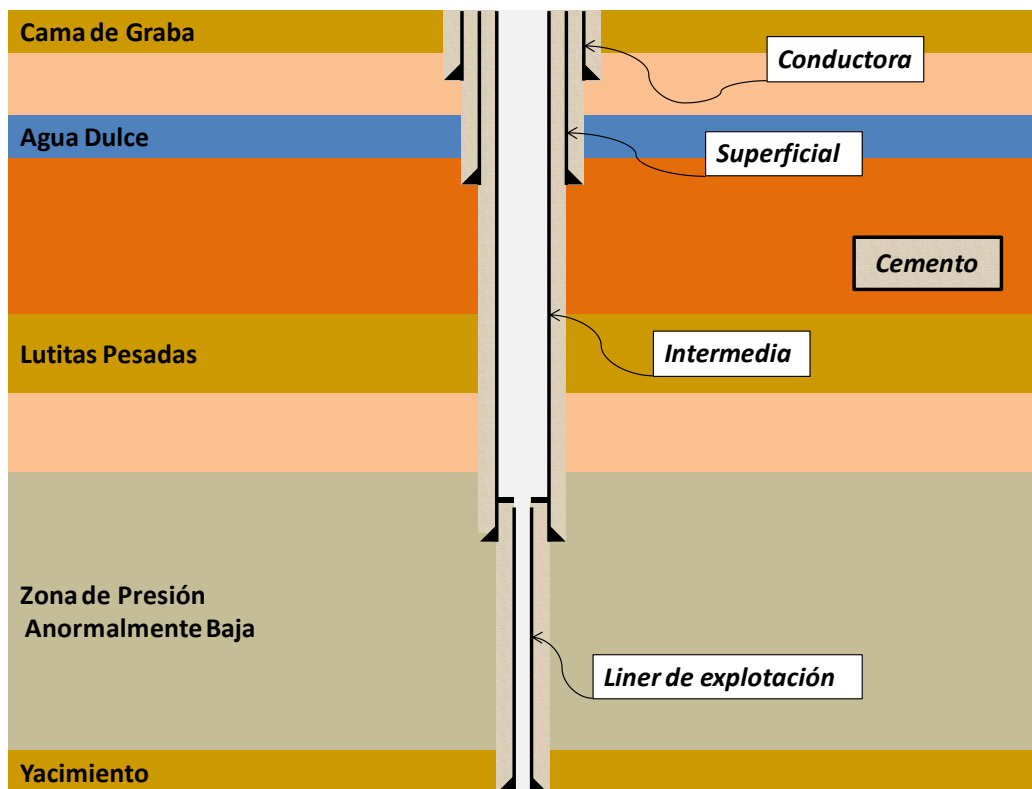


Figura II.42 Configuración típica de tuberías de revestimiento

II.5. CEMENTACIÓN

Cementación Primaria

Es el proceso mediante el cual se coloca una lechada de cemento en el espacio existente entre la formación y la tubería de revestimiento (espacio anular), los objetivos de esta operación son:

- Proteger la tubería de revestimiento, evitando su corrosión prematura.
- Dar soporte a la tubería de revestimiento, eliminando la posibilidad de que desenrosquen los tubos.
- Aislar las zonas presión anormal para evitar la migración de fluidos a través del espacio anular.
- Proteger las zonas productoras y los acuíferos de agua dulce.

Cementación Secundaria

Se llama cementación secundaria o remedial a aquellas operaciones de cementación adicionales que se realizan después de la cementación primaria, se pueden perseguir uno o más objetivos, como pueden ser:

- Sellar fugas en el espacio anular entre el agujero y la tubería de revestimiento.
- Forzar la Zapata de revestimiento.
- Sellado de perforaciones.
- Colocar Tapones.

Factores que repercuten en el diseño del cemento.

Para diseñar una operación de cementación es necesario tener bien determinados los gradientes de presión y temperatura del pozo, además de conocer las condiciones del agujero (geometría, estabilidad, cama de recortes, entre otros) y condiciones de las formaciones sobre las que se va a cementar (permeabilidad, competencia, porosidad, etc.).

En base a estos parámetros se debe diseñar el lodo para que soporte las condiciones a las que será expuesto y para calcular el volumen y posicionamiento de la lechada, también se debe determinar qué equipo será necesario para realizar la operación.

Si no se analizan bien los parámetros antes mencionados se pueden presentar problemas durante las operaciones de cementación como la pérdida de circulación ó una cementación deficiente, entre otros problemas.

Tipos de Cemento

Para la API existen 9 clases de cementos (de la A a la H y otra clase en la que se agrupan cementos peculiares), éstas clases han sido definidas según la proporción de los cuatro principales componentes químicos fundamentales de los cementos (Calcio, Silicato, Aluminato y Fluoruro). Cada una de estas clases es utilizada para diferentes condiciones como se puede observar en la siguiente tabla:

Clases API	Agua de Mezcla [gal/saco]	Lechada (peso total) [ppg]	Profundidad [pies]	BHST°F
A (Portland)	5.2	15.6	0-6000	80-170
B (Portland)	5.2	15.6	0-6000	80-170
C (Alta Temprana)	6.3	14.8	0-6000	80-170
D (Retardada)	4.3	16.4	6000-10000	170-230
E (Retardada)	4.3	16.4	6000-10000	170-230
F (Retardada)	4.3	16.4	10000-16000	230-320
G (California Básico)	5.0	15.8	0-8000	80-200
H (Costa del Golfo Básico)	4.3	16.4	0-8000	80-200
Otras variantes	-	-	-	-

Tabla II.1 Clases de Cemento

Propiedades del Cemento

1. Rendimiento.- Es el volumen que será ocupado por el cemento, el agua de mezclado y los aditivos, una vez que la lechada este mezclada.
2. Densidad de la lechada.- Esta propiedad depende de la clase de cemento, además puede ser ajustada variando el agua de mezclado y/o con el uso de aditivos. La densidad de la mayoría de las lechadas esta en un rango de 11 a 18.5 [ppg].

3. Tiempo de Fraguado.- Es el tiempo disponible para la lechada sea bombeada y desplazada dentro del espacio anular antes de que comience a fraguar. Este tiempo depende de la clase del cemento, los aditivos y de las condiciones a las que será expuesto el cemento dentro del pozo.
4. Esfuerzo a la Compresión.- Este parámetro nos indica la capacidad que tiene un cemento ya fraguado para poder soportar la siguiente sarta de revestimiento y las presiones a las que queda expuesto. Se llama WOC (waiting on cementation) al periodo de tiempo que se debe esperar para que el cemento desarrolle su fuerza de compresión por completo.
5. Pérdida de agua.- Durante la operación de cementación el cemento se deshidrata, por tal motivo es importante tener cuantificado la pérdida de agua, para que nuestro cemento pueda ser bombeado y desplazado conforme a lo planeado.
6. Permeabilidad.- Es la permeabilidad que tiene el cemento una vez asentado, generalmente menor a 0.1 [milidarcies]. Sin embargo, es importante señalar que disturbios durante la cementación pueden provocar fuertes incrementos en la permeabilidad.

Aditivos del Cemento

A los cementos se le pueden agregar ciertos aditivos para que algunas de sus propiedades varíen, por ejemplo:

1. Aceleradores.- Reduce el tiempo en que el cemento logra desarrollar su esfuerzo a la compresión. Los aceleradores se utilizan en pozos someros donde las temperaturas son bajas.
2. Retardadores.- Reduce el tiempo de fraguado del cemento. Estos aditivos se utilizan en pozos profundos donde existen altas temperaturas que aceleran el tiempo de fraguado.
3. Reductores de densidad.- Se utilizan para disminuir el peso de la lechada, para evitar problemas de pérdida de circulación, además, tienen el efecto de disminuir la fuerza de compresión y aumentar el tiempo de fraguado.
4. Aumentadores de densidad.- Se utilizan para aumentar el peso de la lechada, para controlar zonas de presión anormal alta.
5. Controladores de filtrado.- Se utilizan para prevenir la deshidratación de la lechada y el fraguado prematuro, también reducen el contenido de agua libre.

6. Dispersantes (Reductores de Fricción).- Se utilizan para mejorar las propiedades de flujo, principalmente reducen la viscosidad, permitiendo el flujo turbulento a una presión de circulación menor.

La siguiente tabla muestra los tipos de aditivos y las sustancias que utilizan:

Tipo de Aditivo	Ejemplo
Acelerador	CaCl ₂ NaCl
Retardador	Calcio Lingosulfanato CMHEC Solución Salina Saturada
Aumentador de densidad	Baritina Hematites
Reductor de densidad	Bentonita Diatomeas Pozolan
Reductor de Fricción	Polímeros Calcio Lingosulfanato
Controladores de filtrado	Polímeros Orgánicos CMHEC

Tabla II.2 Tipos de aditivos para el cemento

Métodos de Cementación

A. Cementación convencional

El objetivo de una cementación convencional es colocar la lechada de cemento en el espacio anular, es decir entre la formación y la tubería de revestimiento. En muchos casos esto puede hacerse en una operación simple, la cual consiste en bombear cemento por debajo de la tubería de revestimiento a través de la “zapata”, rellenando de esta forma el espacio anular.

El proceso de cementación convencional consta de los siguientes pasos:

- 1) Realizar una circulación de limpieza del interior de la sarta de perforación y del espacio anular comprendido entre la TP y la TR.
- 2) Liberar el tapón inferior (el cual tiene un diafragma que se rompe al llegar al collar flotador para permitir el flujo de los fluidos).
- 3) Bombear el fluido espaciador.
- 4) Bombear la lechada de cemento.

- 5) Liberar el tapón superior (Sólido).
- 6) Desplazar el fluido desplazador hasta que el tapón superior se aloje sobre el tapón inferior, el cual a su vez debe encontrarse alojado en el collar flotador.
- 7) Probar a presión la sarta de tuberías de revestimiento (manteniendo la presión de 5 a 10 minutos)
- 8) Desfogar y observar el funcionamiento del equipo de flotación, cerrar el pozo y esperar el fraguado.

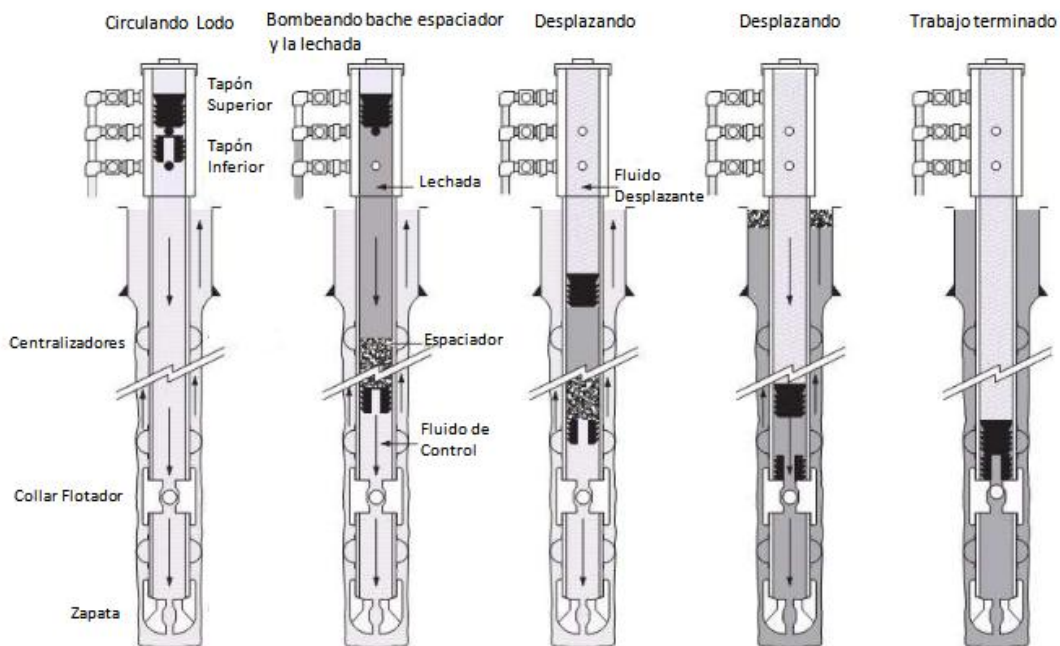


Figura II.43 Cementación Convencional.

B. Cementación por etapas

Cuando las sarta de tuberías de revestimiento son muy largas a veces es necesario dividir el volumen de la lechada necesaria para rellenar el espacio anular en dos, de tal forma que primero se coloca una cantidad de cemento desde la zapata hasta alguna profundidad por encima de esta, y posteriormente se bombea un segundo volumen que cubre la totalidad del espacio anular. Los motivos para realizar una cementación en etapas son:

- Formaciones con un gradiente de presión de fractura bajo, las cuales no pueden soportar la presión hidrostática generada por la lechada de cemento y el fluido desplazador que se requieren para la operación de cementación.
- Se tienen tiempos de bombeo demasiado largos en relación con el tiempo de bombeabilidad de la lechada.
- Se requieren presiones de bombeo demasiado altas, en relación con las capacidades del equipo de bombeo.

La primera etapa se realiza de forma similar a la cementación convencional, con algunas diferencias: la lechada de cemento no llena todo el espacio anular, solamente llega a una determinada altura por encima de la zapata; no se utiliza el tapón inferior, solamente se bombea fluido espaciador delante de la lechada de cemento; el tapón superior convencional es reemplazado por un tapón tipo dardo el cual es más flexible, este tapón debe pasar a través del collar doble etapa.

La segunda etapa se realiza con ayuda de un dispositivo especial que se coloca en la sarta de tuberías de revestimiento el cuál puede abrirse mecánicamente para permitir el bombeo de cemento desde el interior de la tubería hacia el espacio anular, una vez terminada la segunda etapa el dispositivo de cementación “multi-etapa” se cierra.

El dispositivo para la cementación “multi-etapa” ó “Collar de Doble Etapa” debe ser colocado con anterioridad como parte de la sarta de revestimiento, por lo que se debe tener planeado de antemano la profundidad de la sarta a partir de la cual se va a realizar la segunda etapa de la cementación.

Los pasos a seguir para la cementación de la primera etapa son los mismos que en la cementación convencional (con las diferencias antes citadas). El proceso de cementación de la segunda etapa consta de los siguientes pasos:

- 1) Dejar caer el dardo de apertura.
- 2) Levantar la presión para romper los tornillos del Collar de Doble Etapa.
- 3) Circular mientras la primera etapa es colocada en su posición.
- 4) Bombear el fluido espaciador.
- 5) Bombear la segunda etapa de la lechada de cemento.
- 6) Libera el tapón dardo de cierre.
- 7) Desplazar el tapón dardo de cierre y la lechada con el fluido desplazador.

- 8) Aplicar presión sobre el tapón de cierre para cerrar los puertos dentro del Collar de Doble Etapa.
- 9) Realizar una prueba de presión a la sarta de tuberías de revestimiento.

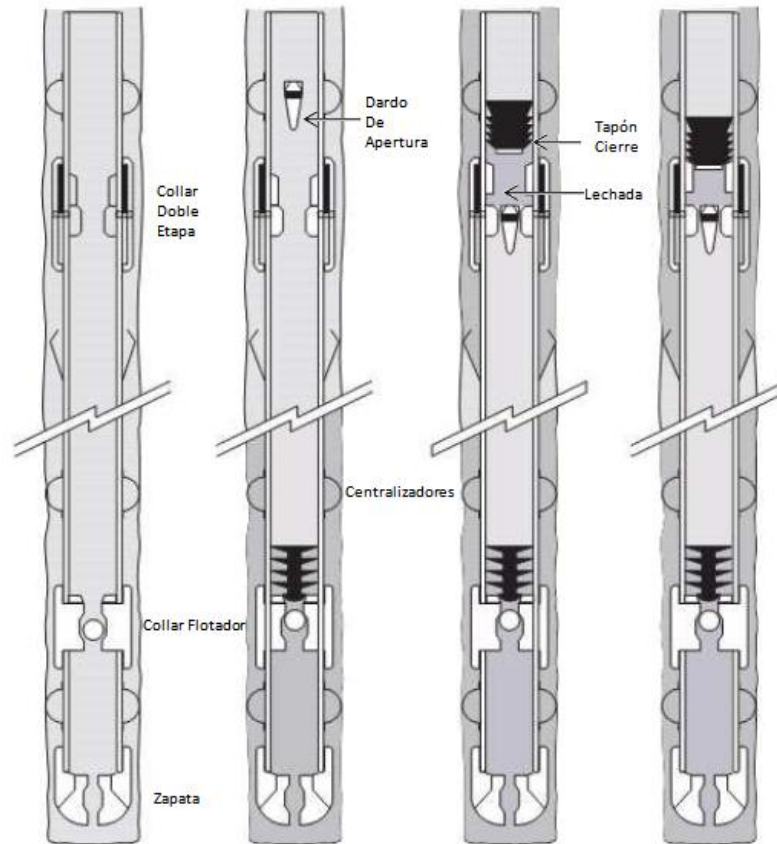


Figura II.44 Cementación por etapas.

C. Cementación con tubería interna

Una técnica alternativa, conocida como cementación con “aguijón”, consiste en realizar la cementación de la tubería de revestimiento utilizando una tubería de producción o una tubería de perforación.

Esta técnica es utilizada cuando el diámetro de la tubería de revestimiento es muy grande, generalmente este es el caso de las tuberías superficial y conductora, si se cementan tuberías de grandes diámetros empleando la cementación convencional se pueden presentar los siguientes problemas:

- Grandes volúmenes de desplazamiento.
- Tiempos de bombeo largos.
- Una potencial contaminación del cemento durante su bombeo y desplazamiento.
- Grandes volúmenes de cemento alojados entre el collar flotador y la zapata.
- Aumenta el riesgo de que la lechada fragüe dentro de la tubería de revestimiento.

Para realizar la cementación con “agujón” se utiliza una zapata flotadora especial colocado de antemano en la sarta de tuberías de revestimiento en vez de la zapata y el collar flotador convencional. Además se coloca un adaptador de sello especial en la punta de la sarta de perforación o producción con la que se va a realizar la operación, este elemento se acopla cerca del sello de la zapata flotador.

Esta configuración permite tener un sello hidráulico que aísla el interior de la sarta de tuberías de revestimiento, pero permite el flujo a través de la sarta de perforación ó producción y el espacio anular existente entre la sarta de revestimiento y la formación. En este procedimiento no se utilizan tapones de cementación ya que el diámetro de la tubería que se utiliza es demasiado pequeño para que se contamine el lodo, de tal forma que solo se colocan dos baches espaciadores, uno por delante y otro por detrás de la lechada. La cementación con agujón se realiza de la siguiente forma:

- 1) Bajar la sarta de revestimiento con la zapata flotadora.
- 2) Introducir la sarta de perforación ó producción con el adaptador y acoplar con la zapata flotadora.
- 3) Circular fluido de control para asegurar que el “agujón” y el espacio anular estén limpios.
- 4) Comenzar el bombeo de la lechada con los baches espaciadores, uno por delante y otro por detrás.
- 5) Bombear el fluido desplazador para colocar la lechada.
- 6) Asegurarse de que la zapata flotadora esta conteniendo la presión diferencial.
- 7) Retirar la sarta de perforación ó producción.
- 8) Realizar una prueba de presión a la sarta de tuberías de revestimiento.

Se necesita tener cuidado al diseñar una cementación con esta técnica, ya que el riesgo de que la sarta de tuberías de revestimiento colapse se incrementa significativamente.

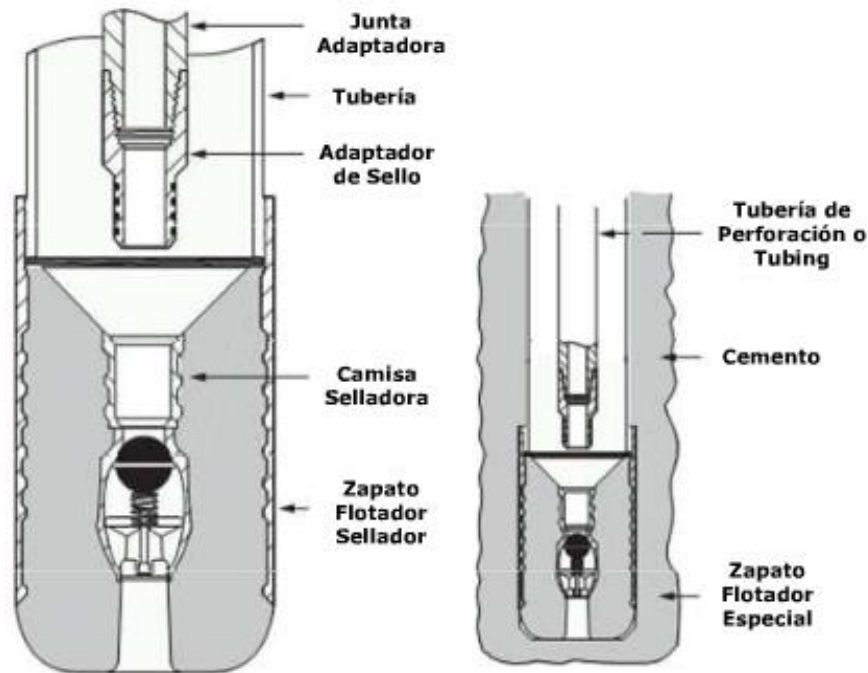


Figura II.45 Diagrama de elementos para la Cementación con tubería interna.

D. Cementación de Tubería corta de revestimiento ó “Liner”

La tubería corta de revestimiento se introduce en el pozo con ayuda de la sarta de perforación, esto con ayuda de una herramienta para asentar tuberías (“Setting Tool”), a dicha sarta se le coloca un tapón de limpieza en punta y un sello por encima del tapón.

En la tubería de revestimiento anterior -es decir aquella dentro de la cual se va a quedar el Liner- debe colocarse un colgador a la profundidad en la que se desea colocar la tubería corta de revestimiento (se recomienda que dicha profundidad sean unos 300 a 500 pies dentro de la tubería de revestimiento anterior).

Al igual que las sarts de tubería de revestimiento completas, los Liners llevan instalados una zapata y un collar flotador, además se les coloca un collar de asentamiento cerca de las juntas de las tuberías por encima del collar flotador.

Una vez asentado el Liner y antes de comenzar la operación de cementación se debe circular fluido de control para asegurar una vía libre de obstrucciones para el cemento, también se debe liberar la herramienta para asentar tuberías (“Setting Tool”) para asegurar que la sarta de perforación se pueda recuperar. El procedimiento de cementación es el siguiente:

- 1) Bombear el colchón espaciador.
- 2) Bombear la lechada.
- 3) Liberar el tapón dardo.
- 4) Desplazar la lechada de cemento hasta que llegue al espacio anular.
- 5) Continuar bombeando hasta que el dardo se aloje sobre el tapón de limpieza.
- 6) Aplicar presión para liberar el tapón de limpieza mediante la ruptura de los pines de sujeción, esto libera también al dardo asentado en el tapón.
- 7) Ambos tapones son desplazados por el interior del Liner hasta llegar al collar de asentamiento.
- 8) Presurizar los tapones con 1000 [psi].
- 9) Purgar la presión y checar si existe contraflujo.
- 10) Retirar la sarta de perforación y esperar fraguado.

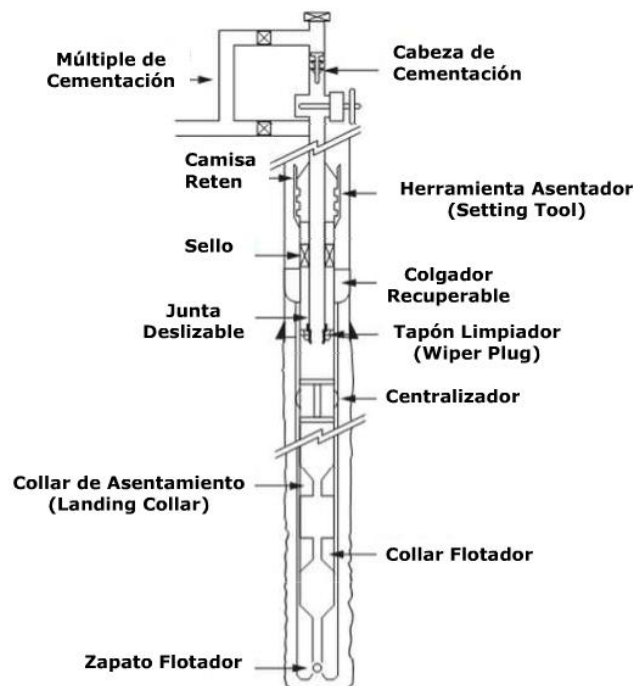


Figura II.46 Cementación de Liner.

E. Cementación Descolgada

Esta técnica consiste en calcular los volúmenes de lechada y de bache desplazante a partir de la presión de formación, se bombean los volúmenes de bache lavador, espaceador, lechada y bache desplazante, y se espera a que los fluidos caigan por su propio peso, esto con la intención de no superar la presión de la formación y evitar así la pérdida de fluidos desde el pozo hacia la formación. A cerca de esta metodología de cementación se hablara ampliamente en el capítulo IV.

III. CEMENTOS ULTRALIGEROS DE ALTO ESFUERZO A LA COMPRESIBILIDAD

Como ya se ha visto las condiciones de presión y temperatura a las que se va a someter un cemento, así como las propiedades de las formaciones sobre las cuales se pretende cementar la tubería son de vital importancia para el diseño de la cementación y para obtener buenos resultados.

Las zonas de bajo gradiente de presión representan un gran reto para lograr una cementación eficiente, esto debido a los problemas de pérdida de circulación, el problema se agrava aún más si las formaciones son altamente permeables y están mal consolidadas, tal es el caso en algunas áreas del Golfo de México y Medio Oriente.

Las lechadas de cemento son demasiado costosas como para que se pierden grandes volúmenes hacia las formaciones. Además, el alto costo resultante de los trabajos de cementación secundaria ó colocar “Tie-back liners” ha convencido a muchos operadores de que es necesario lograr una cementación primaria exitosa.

De tal forma que se desarrolló un sistema de cemento ultraligero para obtener cementaciones satisfactorias en zonas con pérdida de circulación. El sistema involucra el uso de un gas inerte para reducir la densidad de la lechada, el gas se encapsula en esferas de alto esfuerzo las cuales se utilizan como aditivo para la lechada.

Para evitar la pérdida de circulación durante la cementación se debe procurar -en medida de lo posible- mantener la presión en el espacio anular dentro de la ventana de operación, es decir que el lodo de desplazamiento, la lechada y los baches espaciadores deben generar una presión mayor a la presión de poro y menor a la presión de fractura.

La densidad de la lechada es el parámetro que puede ser variado con mayor facilidad durante las etapas de diseño y operación de la cementación para modificar la presión hidrostática que genera la lechada. También es útil hacer que la lechada sea viscosa para que disminuya la facilidad con que esta podría llegar a filtrarse hacia la formación.

El límite inferior de densidad de los cementos ligeros convencionales es de 11 [lb/gal], este peso es alcanzado al aumentar el porcentaje de agua del cemento, pero esto implica una reducción en el material cementante, lo que afecta negativamente las propiedades físicas resultantes del cemento.

En general cuando se diseña una lechada convencional se tienen en cuenta los siguientes puntos:

- A medida que el peso de la lechada disminuye el porcentaje de agua aumenta.
- A medida que el peso de la lechada aumenta la cedencia de la lechada disminuye.

- A medida que el porcentaje de agua incrementa el tiempo de fraguado aumenta (a las mismas condiciones de presión y temperatura).
- A medida que el tiempo de fraguado aumenta el esfuerzo a la compresión desarrollado a las 24 hrs disminuye.
- A medida que el peso de la lechada disminuye su esfuerzo a la compresión disminuye.
- A medida que el peso de la lechada disminuye su permeabilidad final aumenta.
- A medida que la temperatura aumenta el esfuerzo a la compresión aumenta (excepto para lechadas que experimentan esfuerzo retrógrada arriba de los 230°F).

Si se analizan los puntos anteriores es evidente que al reducir la densidad de los cementos convencionales se degradan las propiedades físicas deseadas en el cemento, lo cual genera cementaciones deficientes que generalmente requieren cementaciones remediales, esto eleva significativamente los costos de la construcción del pozo.

Para las lechadas ultraligeras de alto esfuerzo a la compresión también aplican los siete puntos explicados anteriormente, sin embargo, la degradación de las propiedades físicas deseadas en el cemento ocurren a densidades mucho menores que en el caso de las lechadas convencionales. Esto se debe a que en las lechadas ultraligeras el agua no es el principal medio utilizado para disminuir su densidad.

Es importante mencionar que un aumento en el peso de las lechadas ultraligeras de alto esfuerzo a la compresión, incrementa dramáticamente en el esfuerzo a la compresibilidad desarrollado por la lechada.

Otra tecnología que tenía por objetivo solventar los problemas de pérdida de circulación en zonas de bajo gradiente de presión es la utilización de cementos espumados, la cual fue desarrollada en los años 80's, esta tecnología consiste en inyectar aire o gas a las lechadas de cemento para disminuir su densidad, también se agrega un surfactante para generar y estabilizar la espuma hasta que el cemento se coloca.

Los cementos espumados han sido empleados con densidades de 0.42 a 1.8 [gr/cm³], sin embargo, con densidades menores a 1.08 [gr/cm³] o con calidades de espuma mayores al 30% desarrollan una resistencia a la compresión baja y una alta permeabilidad, ambas condiciones son indeseables.

Por las características antes mencionadas los cementos convencionales de baja densidad y los cementos espumados no constituyen una opción técnica factible para la correcta cementación de tuberías en zonas de bajo gradiente de presión.

De tal forma que las lechadas ultraligeras de alto esfuerzo a la compresión (ULAEC) son hasta el momento la mejor opción para cementar tuberías de revestimiento en zonas de bajo gradiente de presión.

La baja densidad y el alto esfuerzo a la compresión en estos cementos son logrados gracias a que la mezcla de cemento emplea esferas sólidas huecas con gas inerte en su interior y/o partículas sólidas de baja densidad, las cuales son de diferentes tamaños y pesos específicos, lo que resulta en una optimización de sólidos en la matriz de la lechada, dando como resultado una lechada reológicamente estable. En las lechadas ULAEC las partículas más pequeñas ocupan los espacios entre las partículas más grandes, disminuyendo la cantidad de agua necesaria en la lechada.

La optimización de la distribución del tamaño de las partículas (Figura III.1) y el empleo de materiales de bajo peso específico -menor a la densidad del agua $1.0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$ - permite ajustar las propiedades de la lechada en forma independiente a la cantidad de agua, de tal forma que es posible desarrollar lechadas con densidades menores a $1.0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$.

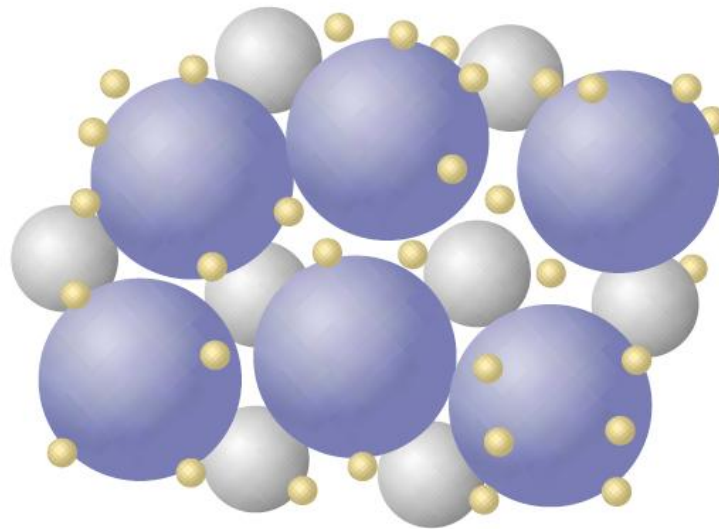


Figura III.1 Distribución óptima de partículas de distinto tamaño y pesos específicos.

A pesar de que las esferas huecas ligeras han sido utilizadas desde hace mucho tiempo, es ahora que los avances tecnológicos han permitido a las compañías ofrecer esferas ultraligeras que exhiben una excelente resistencia a la compresión.

3M ha desarrollado unas esferas de cristal hechas de “soda lime borosilicate” (3M Scotchlite Glass Bubbles HSG series) las cuales han demostrado ser indeformables e insolubles en agua, además de haber tenido consistentemente un desempeño excelente, ya que han optimizado las operaciones de cementación en aguas profundas al disminuir la densidad de las lechadas y aumentar su viscosidad.

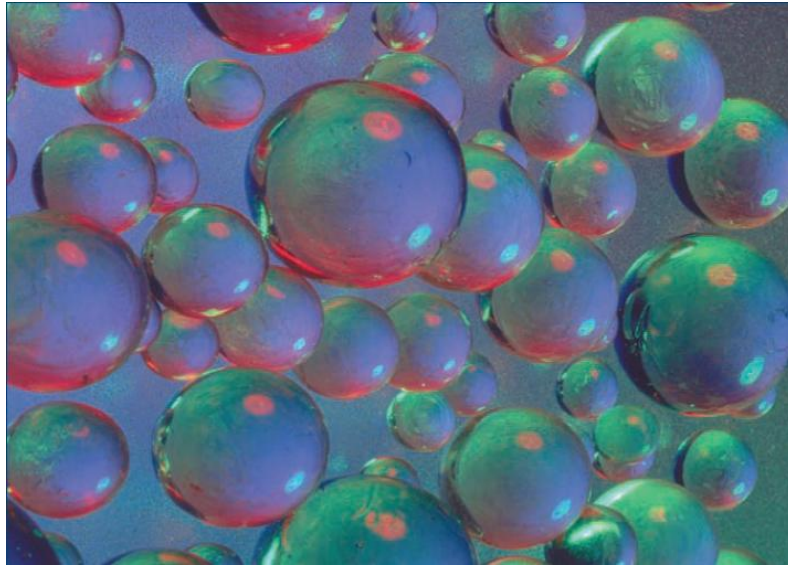


Figura III. 2 Esferas de cristal 3M-HSG.

Las esferas HSG pueden generar lechadas con pesos específicos en el rango de 0.32 a 0.6 las cuales resisten presiones en el pozo entre 2000 a 18000 [psi]. A diferencia de las esferas hechas con cerámica que aún cuando son capaces de generar lechadas con bajo peso específico, no son capaces de resistir altas presiones.

Como resultado de la óptima distribución de las partículas y la utilización de materiales con diferentes pesos específicos, las esferas sólidas utilizadas en las lechadas ULAEC ofrecen las siguientes ventajas:

- Las esferas son fácilmente mojadas por agua.
- Se mezcla con facilidad.
- A casi cualquier presión las esferas tienen una menor gravedad específica que el agua.
- Las esferas crean una unión en la mezcla que reduce la facilidad con que el cemento se filtra desde el espacio anular hacia las formaciones, es decir promueven que la lechada permanezca unida.
- Compatibilidad con los cementos comúnmente utilizados y sus aditivos.
- Las lechadas resultantes tienen una densidad menor que la del agua.
- Promueve que la lechada desarrolle un buen esfuerzo a la compresión tempranamente.

- Aumenta la cedencia de la lechada.
- Ayudan a que permeabilidad del cemento sea baja.

A pesar de su baja densidad las lechadas ULAEC contienen aproximadamente 60% de sólidos y 40% de agua cuando son bombeadas, por lo que una vez fraguado el cemento tiene muy baja permeabilidad y alto esfuerzo a la compresión en comparación con las lechadas convencionales y espumadas, como se puede observar en las siguientes graficas:

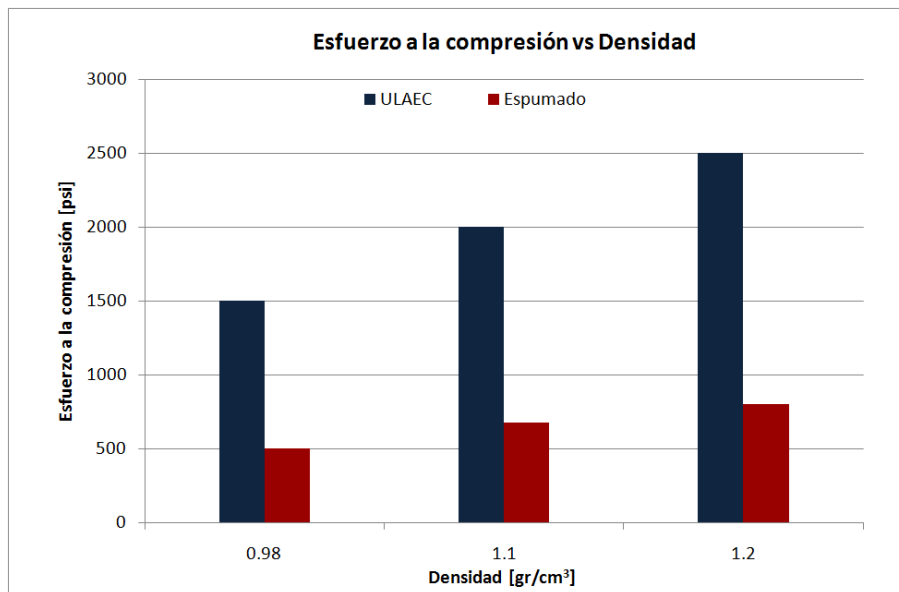


Figura III.3 Comparación de esfuerzos a la compresibilidad entre lechadas ULAEC y espumadas

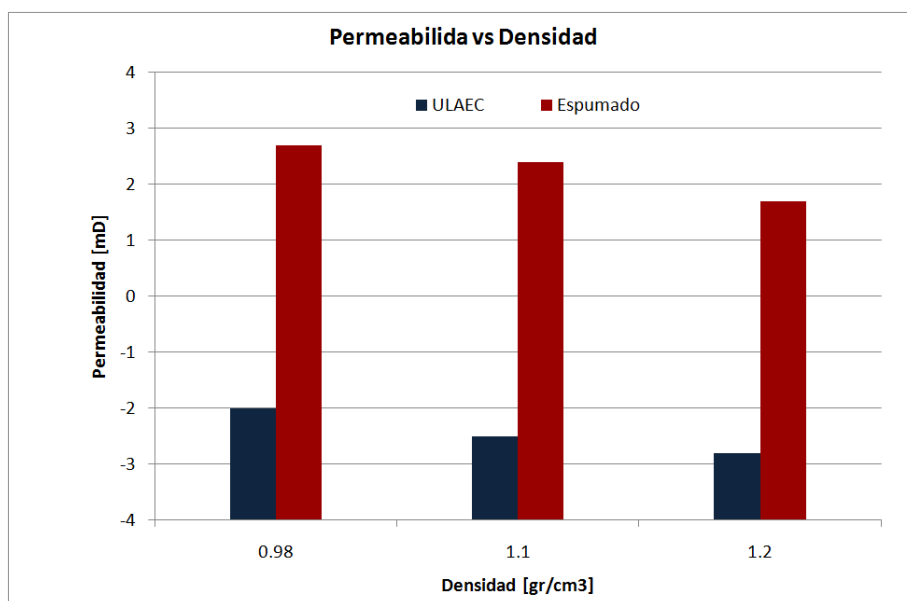


Figura III.4 Comparación de esfuerzos a la compresibilidad entre lechadas ULAEC y espumadas

Los datos muestran que una vez fraguado 10 pies de cemento ULAEC es capaz de soportar hasta 200 pies de tubería de revestimiento (considerando una lechada de 8.5 [lb/gal] fraguado a bajas temperaturas y tuberías de revestimiento ligeras) incluso en condiciones de unión pobre entre el cemento y la TR.

De tal forma que aún cuando el objetivo siempre es dejar el espacio anular completamente lleno de cemento con una buena unión entre el cemento y la tubería, las lechadas ULAEC otorgan cierta flexibilidad dado que es suficiente con colocar una capa de cemento competente arriba de la zapata (i.ej. en medio oriente se acostumbra colocar de 200 a 500 pies) para soportar toda la sarta de tuberías de revestimiento.

Es por eso que las lechadas ultraligeras de alto esfuerzo a la compresión han sido aceptadas en todo el mundo para resolver los problemas de pérdida de circulación aún cuando el cemento no sea competente en todo el espacio anular.

Para preparar una lechada ultraligera de alto esfuerzo a la compresión es necesario contar con equipo especial y seguir procedimientos modificados, también son distintos los métodos de prueba y el equipo requerido.

El mezclado en seco de los componentes de las lechadas ULAEC debe ser preciso, tanto en las cantidades como en la calidad de los componentes. Durante el mezclado de la lechada en campo se debe monitorear el contenido de sólidos debido a que el peso específico de la mezcla en seco es muy similar al peso específico del agua de mezcla, por lo que con sistemas convencionales (Densímetro y balanzas convencionales) no se podría tener la certeza de que se está bombeando una mezcla con pocos o muchos sólidos, lo que por supuesto afecta las propiedades resultantes del cemento (esfuerzo a la compresión y permeabilidad). Las lechadas son generalmente espesas y cremosas.

El esfuerzo de corte que experimentan las esferas en las mezcladoras de laboratorio, debido a altas velocidades, puede despedazar las esferas (el esfuerzo de corte que se genera en las mezcladoras de campo no ha mostrado tener efecto perjudicial sobre las esferas), así que cuando las lechadas ULAEC son preparadas en el laboratorio se debe utilizar un mezclador orbital ó la mezcla debe ser manual.

III.1 DISEÑO DE LAS LECHADAS ULAEC

Cada compañía ha diseñado distintas composiciones de cementos ultraligeros de alto esfuerzo a la compresión, a continuación se muestran algunas composiciones disponibles en el mercado.

- UltraCampLite de Halliburton

Aditivo	% / (lt/saco)
ULTRACAMPLI TE	100
D-AIR 300L	0.15
HALAD- 344LXP	0.9
GAS STOP LXP	0.3
CFR-2L	1.5
SCR-100 L	0.9

Tabla III.1 Composición del cemento UltraCampLite.

- LiteCrete de Schlumberger

Aditivo	Concentración	Descripción	Cantidad	Unidad
		LiteCrete	220	sacos
D162	0.18 lt/saco	Antisedimentante	10.5	galones
D175	0.45 lt/saco	Antiespumante	26.2	galones
D600	4.5 lt/saco	Control de Gas	26.15	galones
D135	0.4 lt/saco	Estabilizador de Gas	23.2	galones
D075	0.35 lt/saco	Extendedor	20.3	galones
D080	0.7 lt/saco	Dispersante	40.7	Galones
D150	0.7 lt/saco	Retardador	40.7	Galones

Tabla III.2 Composición del cemento LiteCrete.

- Composiciones utilizadas en el medio Oriente

Cemento *	Esféras de alto esfuerzo	Tierra diatomacea	Extendedor	Silica Fluor	Limo	CaCl ₂	Polimeros	Agente Tixotrópico A	Agente Tixotrópico B
Clase H	72%	32%	2%	-	-	-	0.50%	-	-
Clase H	140%	11%	1%	11%	3%	2%	-	-	-
Clase G	76.40%	-	-	6.20%	12.50%	5%	-	-	-
Clase G	45.80%	-	-	-	-	5%	-	-	-
Clase G	22.50%	-	6 gal/bbl	-	-	10.60%	-	0.50%	0.13%
Clase G	1000%	-	6 gal/bbl	200%	-	-	-	-	-

Tabla III.3 Composiciones utilizadas en el Medio Oriente. * El cemento es el 100% de referencia.

III.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

Para verificar las propiedades reológicas y los parámetros de esfuerzo a la compresión de las lechadas ULAEC, se instrumentaron una serie de pruebas de laboratorio, estas pruebas observan las normas API vigentes.

Para determinar la resistencia a la compresión del cemento se realizan dos tipos de pruebas: Destructivas y No destructivas.

Las pruebas destructivas consisten en tomar una muestra de cemento ya fraguado y colocarla en una prensa hidráulica para ser comprimida hasta que falle, las muestras suelen ser de 5x5 [cm], por lo que el área sobre la que se aplica el peso es de 25 [cm²] se toman las lecturas a medida que la muestra se va comprimiendo para poder determinar el esfuerzo, por ejemplo, una muestra que resiste 2800 [kg] en un área de 25 [cm²], tiene un esfuerzo compresivo de 1593 [psi].



Figura III.5 Prueba Destructiva utilizando una Prensa hidráulica.

Las pruebas no destructivas consisten en colocar una muestra preparada de acuerdo a la norma API 10B en un Analizador de Cemento Ultrasónico (UCA), sobre el cemento se ejerce una presión 3000 [psi] a una temperatura de 240 °F y sometido a una señal sónica constante por un tiempo de 49:49 hrs, obteniéndose así el esfuerzo compresivo.



Figura III.6 Analizador Ultrasónico de Cemento.

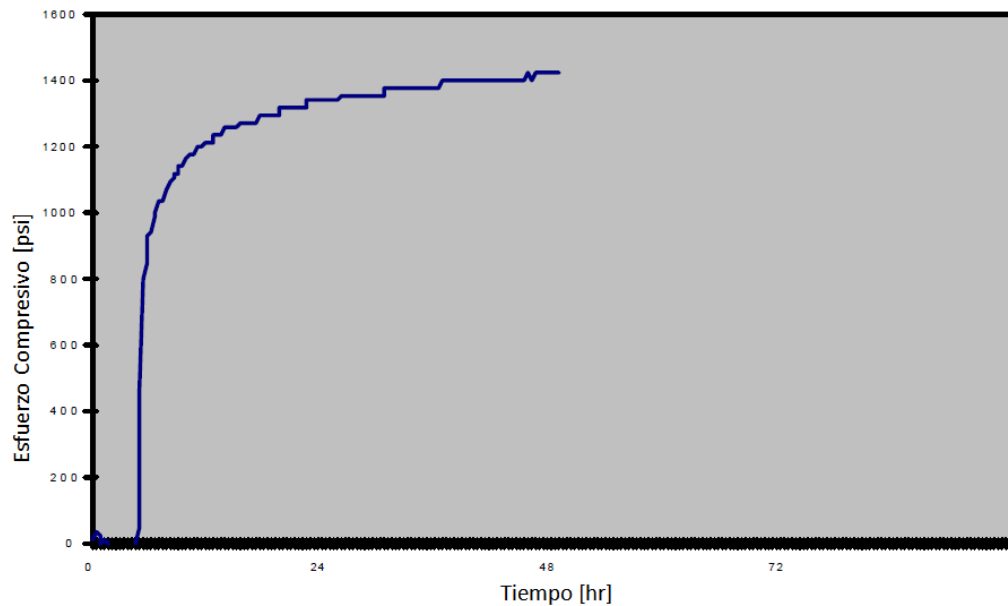


Figura III.7 Grafica de la Prueba no destructiva.

Las pruebas se deben realizar considerando la información de los pozos pertenecientes al campo en el cual se pretende aplicar la tecnología de lechadas ULAEC. A continuación se muestran los resultados de las pruebas a las que se sometieron dos marcas de cementos ultraligeros de dos distintas compañías:

- LiteCrete (Schlumberger)

Densidad de la Lechada	
1.10 [gr/cm ³]	

Temperatura	
131 [°F] (BHCT), 179 [°F] (BHST)	

Reologías @ 131 [°F]	
RPM	Lectura
300	120
200	92
100	45
6	11
3	8
Punto de cedencia (Yp)	11.4
Viscosidad plástica	112.6

Pérdida de Filtrado @ 131 [°F]	
28 [cm ³ /30 min]	

Agua Libre @ 131 [°F]	
0%	

Rendimiento	Esfuerzo a la compresión (UCA)	Esfuerzo a la compresión (Prensa)
80.75 [lt/saco]	1490 [psi]	N/D

- UltraCampLite (Halliburton)

Densidad de la Lechada
1.10 [gr/cm ³]

Temperatura
180 [°F] (BHST)

Reologías @ 180 [°F]	
RPM	Lectura
300	67
200	52
100	33.5
Punto de cedencia (Yp)	17.85
Viscosidad plástica	50.25

Pérdida de Filtrado @ 180 [°F]
84.51 [cm ³ /30 min]

Agua Libre @ 180 [°F]
0%

Rendimiento	Esfuerzo a la compresión (UCA)	Esfuerzo a la compresión (Prensa)
290.48 [lt/saco]	1451 [psi]	1593

III.3 PRUEBAS DE PATIO

Esta prueba consiste en tratar de reproducir una cementación a las condiciones de presión y temperatura que se van a tener en el pozo, con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica de la aplicación de estos cementos en el campo.

Se realiza la mezcla, se pesa y después se bombea simulando las condiciones reales, todas las operaciones se llevan a cabo con el equipo con el que se haría la cementación en campo. En todas las etapas del proceso se monitorea y registra el comportamiento de la lechada en tiempo real, así como se evalúa el funcionamiento del equipo.

Mediante la prueba de patio se evalúan propiedades como: el Rendimiento, Densidad de la lechada, Tiempo de Fraguado, Esfuerzo a la compresión, Pérdida de Agua, Permeabilidad.



Figura III.8 Prueba de Patio.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de patio realizadas a las marcas LiteCrete y UltraCampLite.

- LiteCrete (Schlumberger)

Para llevar a cabo esta prueba se utilizó el siguiente equipo:

- 1) Recirculador convencional.
- 2) Equipo de monitoreo Solid Fraction Monitoring (SFM).
- 3) Balanza presurizada.

Se programo una lechada con densidad de 1.10 [gr/cm³] y contenido de sólidos de 53%. Al terminar la prueba de patio se observo:

- 1) La lechada alcanzó la densidad programada.
- 2) El equipo de monitoreo de la fracción sólida (SFM) mostro lecturas en el rango de 51 a 55 %, esta variación no afectó la densidad.
- 3) La lechada fue homogénea y estable, durante su bombeo estuvo fluida y no se observaron grumos.
- 4) Al colocar la mezcla en la zona determinada para el fraguado, no se observo precipitación de sólidos.

- UltraCampLite (Halliburton)

Para llevar a cabo esta prueba se utilizó el siguiente equipo:

- 1) Recirculador ACD II.
- 2) Silo de surgencia.
- 3) HallTanks.
- 4) Equipo de monitoreo convencional (Compupac).
- 5) Balanza presurizada.

La prueba consistió en mezclar una tonelada de cemento con el recirculador y depositar la mezcla en un área previamente determinada. La densidad programada de la mezcla fue de 1.01 [gr/cm³]. En esta prueba se observo:

- 1) Tomo 6 minutos obtener la densidad programada y estabilidad en la mezcla.
- 2) Una vez que se obtuvo la densidad programada la mezcla permaneció homogénea y estable.
- 3) La densidad de la mezcla observada con la balanza presurizada fue de 1.01 [gr/cm³].
- 4) La lechada fue homogénea y estable, durante su bombeo estuvo fluida y no se observaron grumos.
- 5) Una vez depositada la mezcla no se observó agua libre ni precipitación de sólidos.

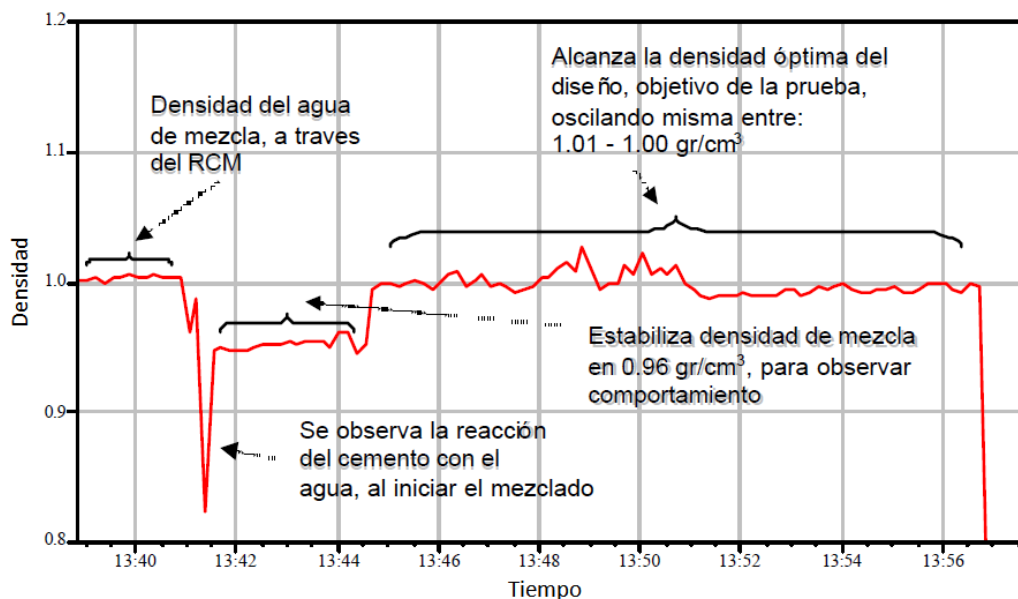


Figura III.9 Gráfica de la Prueba de Patio.

III.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE LABORATORIO Y DE PATIO

El rango de aplicación de los cementos ULAEC, depende del diseño de los mismos, cada compañía tiene uno o más diseños distintos. En México, las compañías que ofrecen las cementaciones ultraligeras son Schlumberger y Halliburton. Aunque, por supuesto nuevas compañías pueden ofertar sus servicios, haciendo el mercado más competitivo, lo que a su vez beneficiaría a la industria petrolera nacional.

Al analizar los resultados de las pruebas de laboratorio y de patio que se realizaron a las marcas LiteCrete de la compañía Schlumberger y a la UltraCampLite de Halliburton, se puede concluir que las lechadas hechas con ambos cementos están listas para ser implementadas en campo, ya que son técnica y económicamente factibles, y representan una posibilidad para solventar los problemas que se presentan en la cementación de tuberías en zonas de bajo gradiente de presión.

El rango de aplicación de los cementos ULAEC en sus inicios (principios de los 80's) era de los 27 a los 232 [°C] y con una presión de fondo de hasta 8000 [psi]. Se generan lechadas de los 0.98 a 1.5 [gr/cm³]. Sin embargo, a medida que la tecnología ha ido avanzando y en vista del éxito de las primeras cementaciones ultraligeras, se han desarrollado nuevos diseños de cementos ULAEC, con los cuales se han ampliado los rangos de aplicación de los mismos.

Con la tecnología de 3M Scotchlite Glass Bubble se logran lechadas cuya gravedad específica va de 0.32 a 0.67, soportan una presión de entre 2000 y 18000 [psi]. La

optimización de la composición de los cementos se generara mejores resultados en las cementaciones ultraligeras en un futuro.

III.5 EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN

Se considera que una cementación es deficiente cuando se presentan una ó más de las siguientes condiciones:

- El cemento no ha alcanzado la altura preestablecida en el diseño de la cementación.

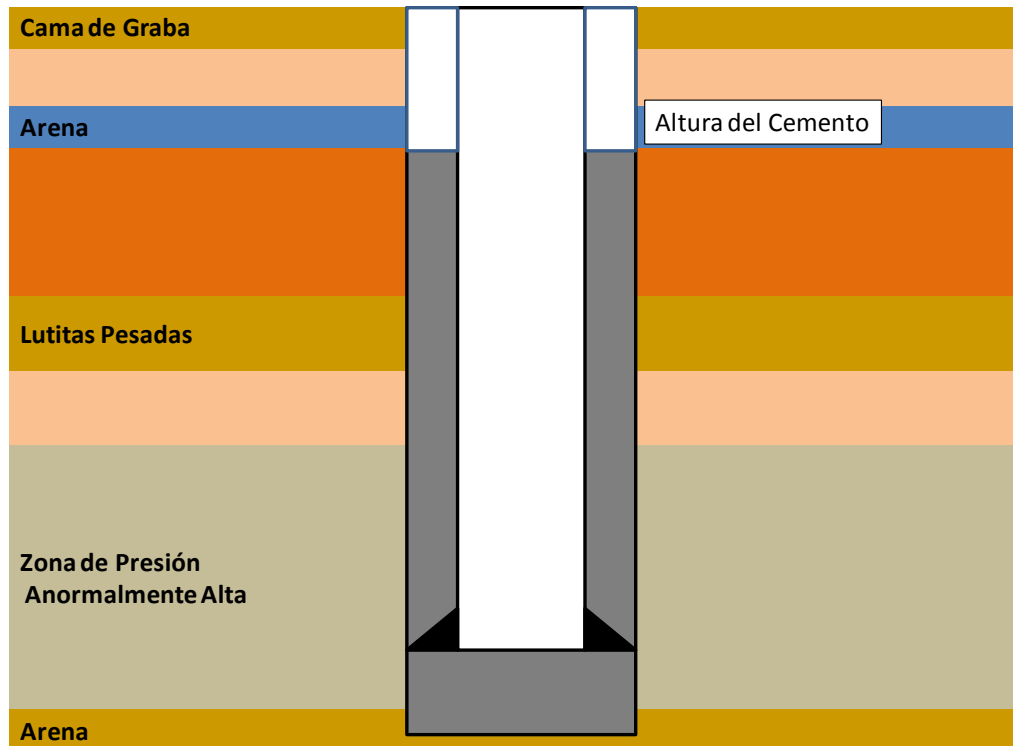


Figura III.10 Altura de Cemento deficiente.

- El cemento no ha proporcionado un sello efectivo en la zapata.

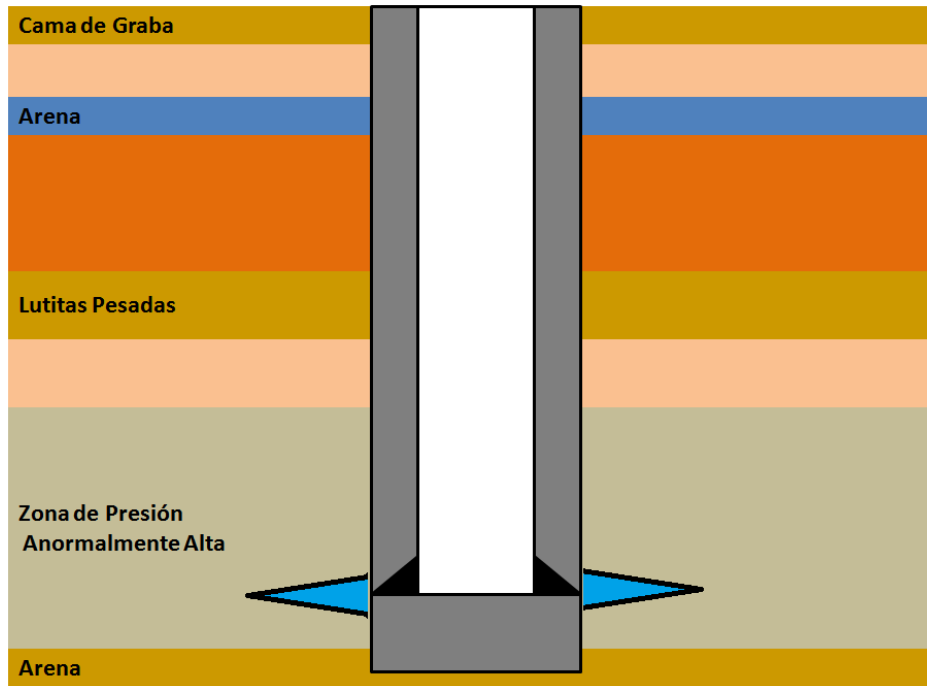


Figura III.11 Sello ineficiente en la zapata.

- El cemento no evita la migración de fluidos entre las formaciones.

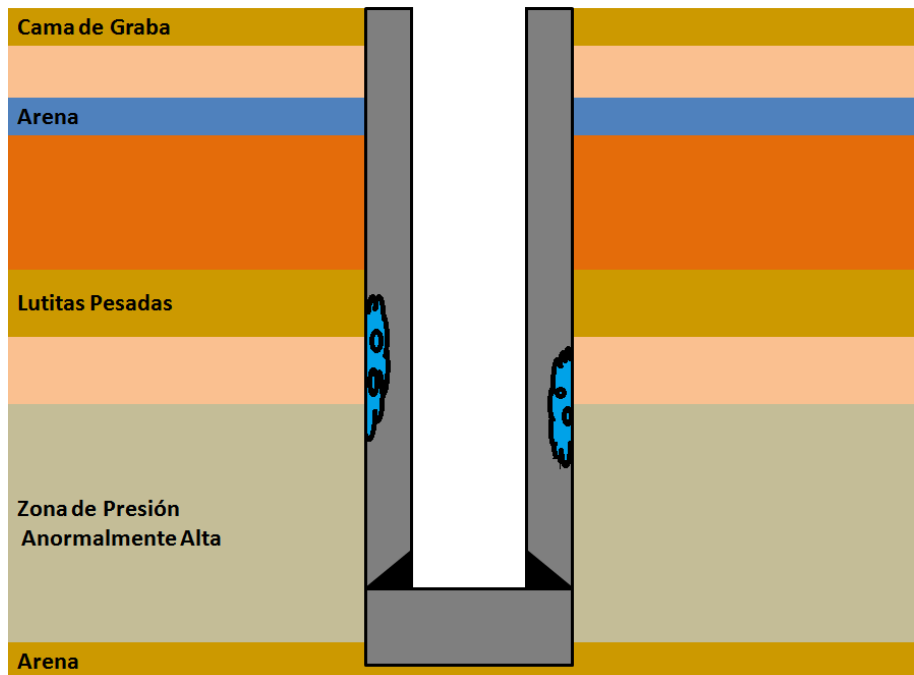


Figura III.12 Cementación ineficiente en la cara de las formaciones.

Existen distintos métodos para determinar que tan eficiente ha sido un trabajo de cementación, a continuación se explican los de mayor aplicación.

Registro de unión del cemento (CBL-Casing Boundary log)

Este es un registro sónico capaz de detectar el tope del cemento y determinar la calidad de la unión del cemento con la tubería y la formación. El registro es corrido con línea de acero, la sonda tiene un emisor de señales sónicas y un receptor de las mismas localizado a tres pies de distancia, la sonda debe ser centralizada con ayuda de unos patines.

Debido a que la velocidad en que viaja el sonido dentro de los distintos medios físicos que se encuentran en el pozo (tubería de revestimiento, formación, cemento, fluido de control) es posible determinar que tan buena es la cementación. Las primeras señales acústicas captadas por el receptor son las que provienen de la tubería de revestimiento. Si la amplitud de esta señal es grande, esto indica que la tubería está libre, es decir, la cementación ha sido deficiente. Cuando el cemento está firmemente unido a la tubería de revestimiento y a la formación, la señal es atenuada.

Registro Ultrasónico

Este registro consiste en correr un dispositivo que genera ondas de sonido superiores al límite auditivo del ser humano (mayor a 20000 [Hz]) a través del pozo y registrar la respuesta de la formación, un software interpreta la señal que regresa al dispositivo y genera una imagen que nos permite observar la calidad de la cementación.

III.5.1. CONSIDERACIONES PARA EVALUAR CEMENTACIONES REALIZADAS CON CEMENTOS ULTRALIGEROS DE ALTO ESFUERZO A LA COMPRESIÓN

La cementación persigue varios objetivos entre los que destacan: dar soporte a las tuberías de revestimiento, aislar las distintas formaciones para evitar la migración de fluidos entre ellas y de las mismas hacia el espacio anular, prolongar la vida útil de las tuberías de revestimiento.

Para corroborar que las operaciones de cementación han sido exitosas se realizan pruebas distintas pruebas hidráulicas -Pruebas de presión en la zapata, aligeramiento de columnas, entre otras- estas pruebas se complementan con la información obtenida mediante registros acústicos que se realizan en el pozo.

Estos registros miden las propiedades acústicas del cemento, registran la propagación del sonido en la cercanía del pozo, con esta información podemos evaluar la calidad de la cementación. Para realizar la evaluación de los cementos ultraligeros se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- a) La constitución de los cementos ultraligeros difiere mucho de la constitución de los cementos convencionales, de tal forma que los cementos ultraligeros tienen una impedancia acústica menor que los cementos convencionales de la misma densidad.
- b) Es más obtener el registro acústico de las lechadas ultraligeras, debido a que el rango de impedancias acústicas es entre los sólidos y los líquidos es menor que en las lechadas convencionales.

Si no se tienen en cuenta los dos aspectos antes mencionados se puede evaluar incorrectamente una cementación ultraligera.

La configuración predeterminada de las herramientas utilizadas para realizar el registro acústico es para lechadas convencionales (densidad de 1.90 [gr/cc]), de tal forma que si se quiere evaluar una lechada ultraligera de alto esfuerzo a la compresión se debe considerar la impedancia acústica con los datos generados por un analizador ultrasónico de Cemento (UCA), parámetro que es vital en la calibración de la herramienta de registro.

IV. CEMENTACIÓN DESCOLGADA

La cementación descolgada varia respecto a una convencional básicamente en el cálculo del volumen de desplazamiento, en esta técnica se calcula el desplazamiento basándose en el nivel del fluido que hay en el pozo, cuando el pozo se encuentra en equilibrio hidrostático, dicho nivel se determina mediante la corrida de registros y corresponde a la presión hidrostática que soporta la formación, en otras palabras, la presión hidrostática que genera la columna de fluido en el pozo es equivalente a la presión de poro de la formación, con este dato es posible determinar el volumen a desplazar para colocar la mayor cantidad de cemento en el espacio anular.

Se debe determinar el volumen de cemento para cubrir en su totalidad el espacio anular, además, se acostumbra dejar una pequeña cantidad de cemento en el interior de la tubería. El cemento, al ser descolgado en la tubería, solamente se va a ubicar en el interior de la misma, por lo que hace falta agregar peso utilizando fluido desplazante, el cual también se descuelga.

Se calcula el volumen del bache desplazante considerando que la suma de la columna hidrostática generada por el volumen de cemento que se desea dejar en el interior de la tubería y la columna hidrostática generada por el volumen del bache desplazador debe ser igual a la presión de la formación. Esto implica que el cemento va a fluir desde el interior de la tubería hacia el espacio anular, haciendo que las pérdidas hacia la formación sean mínimas.

IV.1. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA LECHADA Y DEL VOLUMEN DEL BACHE PARA DESPLAZAR

El proceso para diseñar la operación de cementación descolgada consiste de los siguientes pasos:

- 1) Calcular la capacidad de las distintas geometrías en el pozo

En este paso se determina la capacidad de contener líquidos (en litros por metro) de las distintas geometrías que se encuentran en el pozo, correspondientes a la etapa que se va a cementar. Esto se hace con los datos del estado mecánico del pozo.

En el espacio anular la capacidad se calcula de la siguiente forma:

$$Capacidad_{\text{espacio anular}} = [\phi_{\text{interno de la tubería en el exterior}}^2 [pg] - \phi_{\text{externo de la tubería en el interior}}^2 [pg]] * 0.5067$$

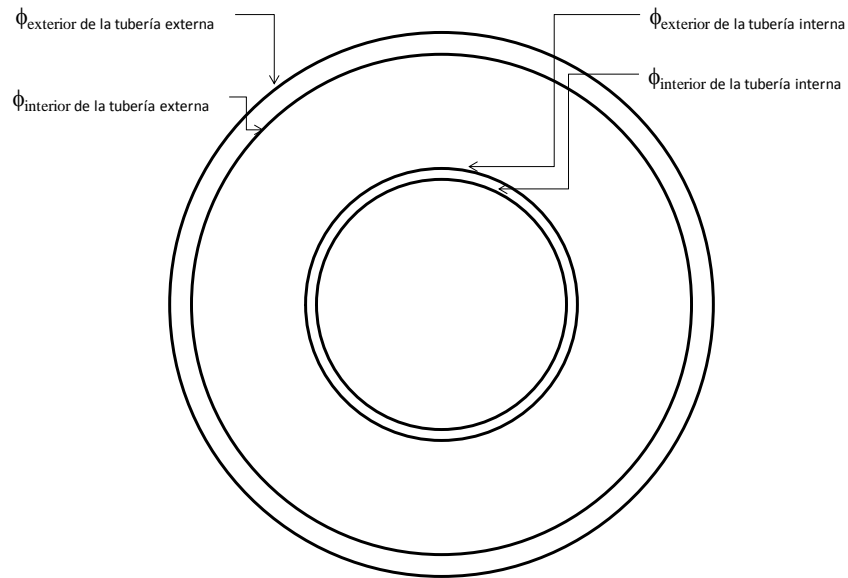


Figura IV.2 Cálculo de Capacidades en el espacio anular.

En el interior de una tubería la capacidad se calcula de la siguiente manera:

$$Capacidad_{\text{interior de una tubería}} = [\phi_{\text{interno de la tubería en el exterior}}^2 [pg]] * 0.5067$$

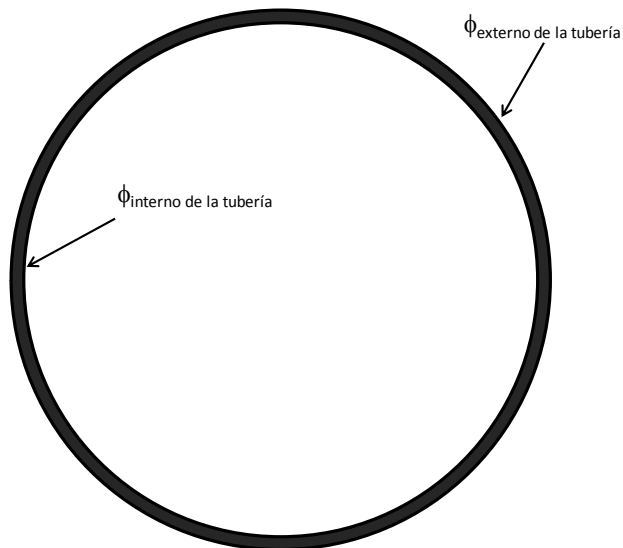


Figura IV.2 Cálculo de Capacidades en el interior de una tubería.

De tal forma que con los datos del estado mecánico del pozo se obtienen las capacidades del pozo, para las geometrías involucradas en la etapa que se va a cementar.

Por ejemplo:

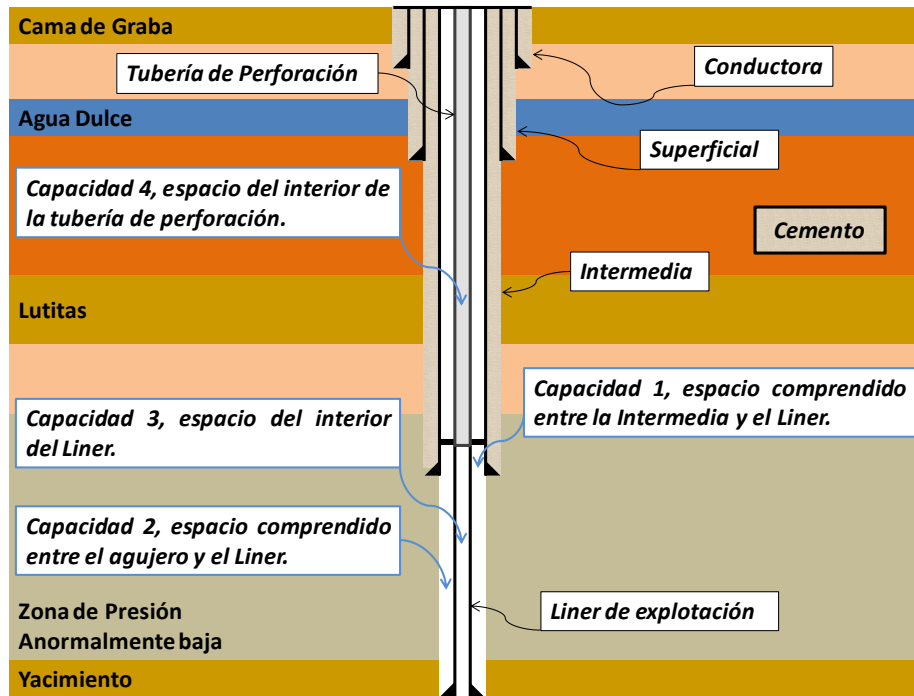


Figura IV.3 Cálculo de Capacidades en el pozo.

$$\text{Capacidad 1 } \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{int. \text{ de la TR}}^2 [pg] - \phi_{ext. \text{ del liner}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 2 } \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{del \text{ agujero}}^2 [pg] - \phi_{ext. \text{ del liner}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 3 } \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{int. \text{ del liner}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 4 } \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{int. \text{ de la TP}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

2) Cálculo del volumen de cemento

En este paso se calcula el volumen total de cemento que se va a requerir para cementar la tubería de revestimiento, cubriendo el espacio existente entre: la tubería de revestimiento que se va a cementar y la tubería de revestimiento anterior, el agujero y la

tubería, y el volumen de cemento que se desea dejar dentro de la tubería de revestimiento, esto se hace considerando las capacidades de las distintas geometrías y las profundidades de las mismas que van a quedar cubiertas de cemento.

Por ejemplo:

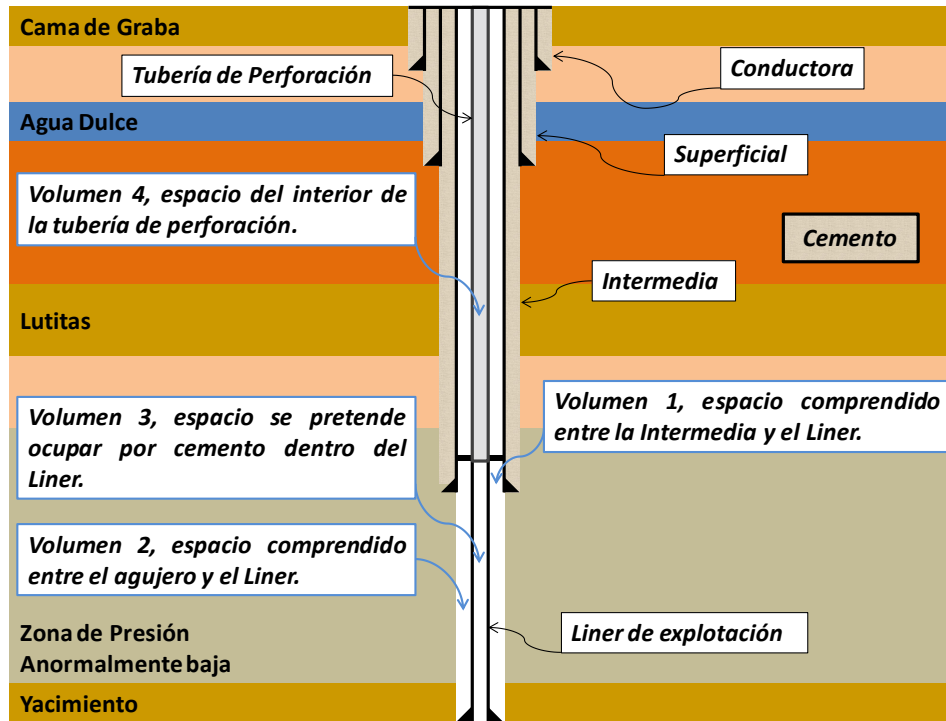


Figura IV.4 Cálculo de Volúmenes en el pozo.

$$Volumen 1 [lt] = Capacidad 1 * Profundidad_{TR-Liner}$$

$$Volumen 2 [lt] = Capacidad 2 * Profundidad_{Liner-Agujero}$$

$$Volumen 3 [lt] = Capacidad 3 * Profundidad_{del\ cemento\ dentro\ del\ Liner}$$

Finalmente se calcula el volumen total de cemento:

$$Volumen\ Total\ [lt] = Volumen\ 1\ [lt] + Volumen\ 2\ [lt] + Volumen\ 3\ [lt]$$

3) Cálculo del volumen del bache desplazador

Para calcular el volumen del bache con el que se va a desplazar el cemento hasta su posición final, se parte del concepto de equilibrio hidrostático, ya que la presión

hidrostática generada por la columna del bache desplazador y por la columna de cemento debe ser igual a la presión de la formación:

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} + P_{columna\ de\ cemento} = P_{formación}$$

La presión de la formación es conocida, al igual que la presión generada por la columna del cemento, ya que se define la altura a la que quedara el nivel de cemento dentro del liner, también se conoce la densidad del cemento. De tal forma que es posible determinar cuál es la presión necesaria para desplazar el cemento:

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = P_{formación} - P_{columna\ de\ cemento}$$

Ahora bien, conociendo la presión hidrostática que debe generar el bache desplazador, es posible determinar la altura de la columna del bache desplazador:

$$P = \rho * g * h$$

Por lo tanto

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazador} = \frac{P_{columna\ del\ bache\ desplazador}}{\rho_{del\ bache\ desplazador} * g}$$

Finalmente, se calcula el volumen del bache desplazador considerando la capacidad en el interior del Liner y la altura de la columna del bache desplazador requerida para generar la presión hidrostática necesaria para desplazar el cemento hasta la posición deseada.

$$Volumen_{bache\ desplazador} = h_{columna\ del\ bache\ desplazador} * Capacidad\ 3$$

En ocasiones también es necesario que la columna de fluido desplazante este por encima de la boca del Liner, en este caso también se considera la capacidad en el interior de la tubería de perforación con la que se realice la cementación y la altura de la columna del bache desplazante dentro de la misma.

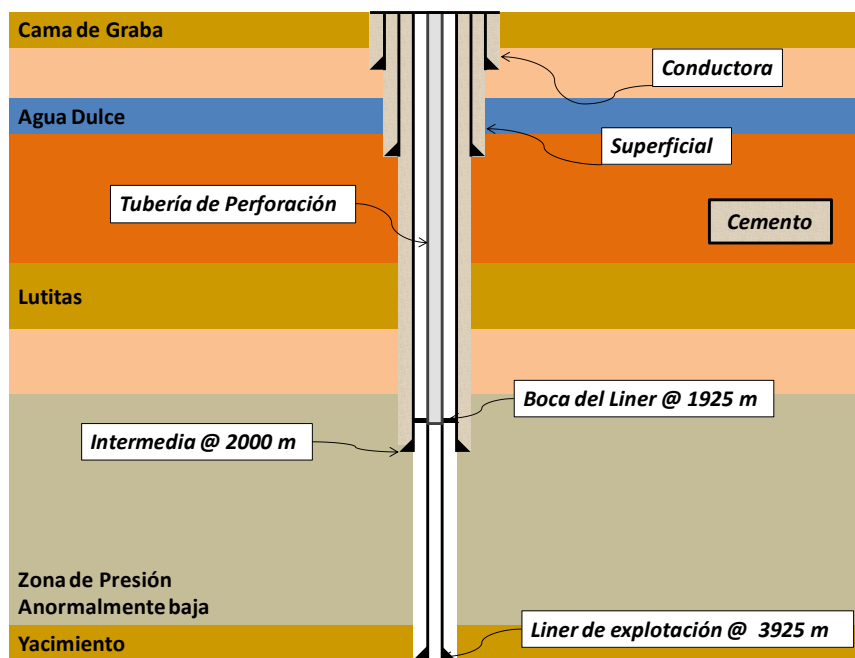
$$Volumen_{bache\ desplazador} = h_{Liner} * Capacidad\ 3 + h_{columna\ del\ bache\ desplazador\ en\ la\ TP} * Capacidad\ 4$$

Ejemplos

Caso 1) Cementación descolgada de un Liner

Determinar el volumen de cemento y del bache desplazador para cementar un liner de producción de 7 5/8 [pg] de 2000 metros de longitud, dejando 30 metros de cemento dentro del liner. Utilizando un cemento ultraligero de 0.86 [gr/cm³] y un Fluido desplazante de 1.1 [gr/cm³]. Se tiene un agujero de 8.5 [pg], una presión de formación de 1500 [psi], la TR dentro de la cual se encuentra el liner es de 9 5/8 [pg], la TP con la que se va a realizar la cementación es de 5 [pg].

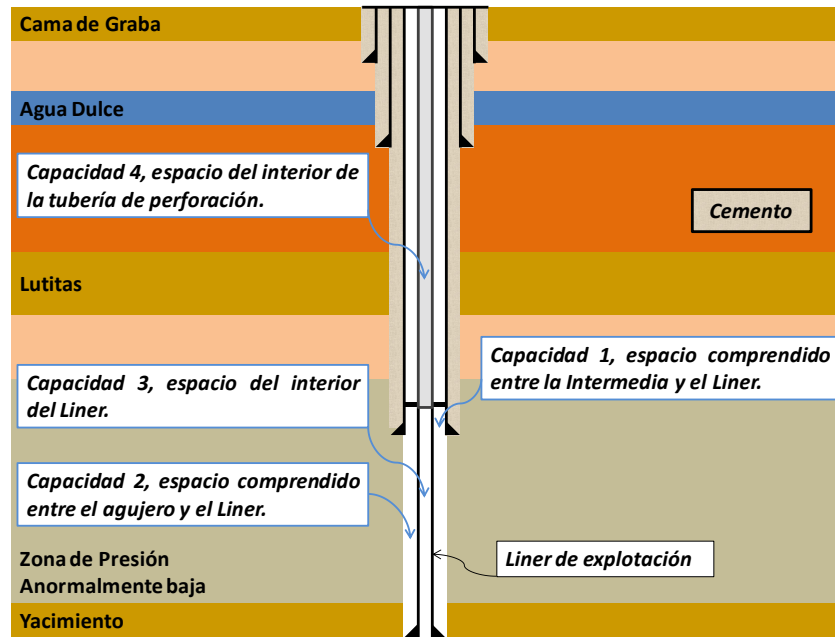
Estado Mecánico del Pozo:



Datos:

Tubería	D.I. [pg]	D.E. [pg]	Peso Unitario [lb/pie]	Intervalo [m]	Longitud Total [m]
TP 5"	4	5	25.6	de 0 a 1925	1925
TR 9 5/8 "	8.535	9.625	53.5	de 0 a 2000	2000
Liner 7 5/8"	6.435	7.625	45.3	de 1925 a 3925	2000
Agujero 8.5"	8.5	-	-	de 2000 a 3925	1925

1) Calcular la capacidad de las distintas geometrías en el pozo:



$$\text{Capacidad 1} \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right] = \left[\phi_{\text{int. de la TR}}^2 [\text{pg}] - \phi_{\text{ext. del liner}}^2 [\text{pg}] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 1} = [8.535([\text{pg})]^2 - (7.625[\text{pg})]^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 1} = 7.45133 \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right]$$

$$\text{Capacidad 2} \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right] = \left[\phi_{\text{del agujero}}^2 [\text{pg}] - \phi_{\text{ext. del liner}}^2 [\text{pg}] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 2} = [8.5([\text{pg})]^2 - 7.625([\text{pg})]^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 2} = 7.14922 \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right]$$

$$\text{Capacidad 3} \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right] = \left[\phi_{\text{int. del liner}}^2 [\text{pg}] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 3} = [6.435([\text{pg})]^2] * 0.5067$$

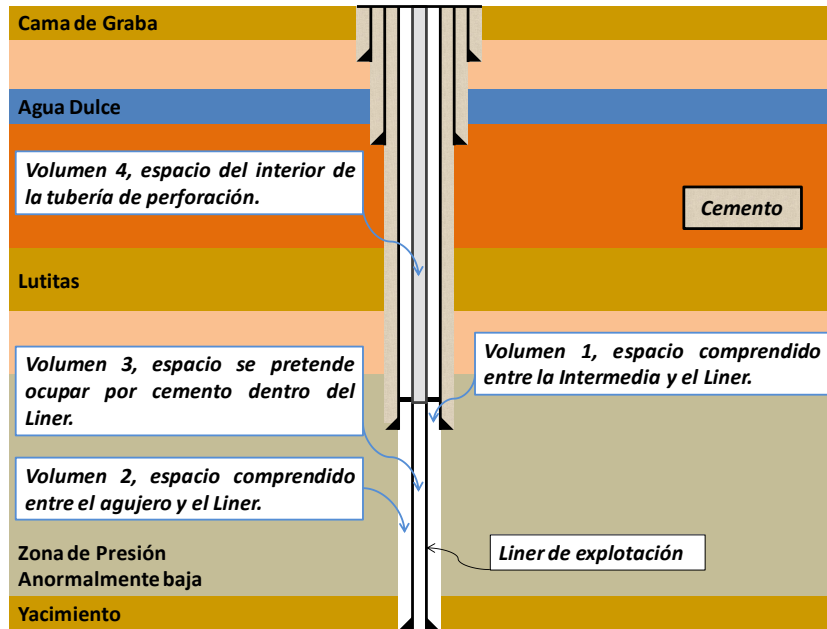
$$\text{Capacidad 3} = 20.98205 \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right]$$

$$\text{Capacidad 4} \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right] = \left[\phi_{\text{int. de la TP}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 4} = [4([pg])^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 4} = 8.1072 \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right]$$

2) Cálculo del volumen de cemento:



$$\text{Volumen 1 [lt]} = \text{Capacidad 1} * \text{Profundidad}_{\text{TR-Liner}}$$

$$\text{Volumen 1 [lt]} = 7.45133 \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right] * 75[\text{m}]$$

$$\text{Volumen 1} = 558.85 [\text{lt}]$$

$$\text{Volumen 2 [lt]} = \text{Capacidad 2} * \text{Profundidad}_{\text{Liner-Agujero}}$$

$$\text{Volumen 2 [lt]} = 7.14922 \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right] * 1925[\text{m}]$$

$$\text{Volumen 2} = 13762.2491 [\text{lt}]$$

$$\text{Volumen 3 [lt]} = \text{Capacidad 3} * \text{Profundidad}_{\text{del cemento dentro del Liner}}$$

$$Volumen\ 3\ [lt] = 20.98205 \left[\frac{lt}{m} \right] * 30\ [m]$$

$$Volumen\ 3 = 629.46163\ [lt]$$

$$Volumen\ Total\ [lt] = Volumen\ 1\ [lt] + Volumen\ 2\ [lt] + Volumen\ 3\ [lt]$$

$$Volumen\ Total\ [lt] = 14950.5603\ [lt]$$

3) Cálculo del volumen del bache desplazador:

a) Primero se calcula la presión que debe generar el bache desplazante

$$P_{formación} = 1500\ [psi]$$

$$P_{columna\ de\ cemento} = 30[m] * 0.86 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 1.4223$$

$$P_{columna\ de\ cemento} = 36.695\ [psi]$$

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = P_{formación} - P_{columna\ de\ cemento}$$

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = 1500\ [psi] - 36.695\ [psi]$$

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = 1463.3047[psi]$$

b) Se determina la altura de la columna del fluido desplazante necesaria para generar la presión hidrostática obtenida en el inciso anterior

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazante}\ [m] = \frac{P_{columna\ del\ bache\ desplazante}\ [psi]}{\rho_{del\ bache\ desplazante}\ [gr/cm^3] * 1.4223}$$

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazante} = \frac{1463.3047[psi]}{1.1[gr/cm^3] * 1.4223}$$

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazante} = 935.3[m]$$

c) Considerando esta altura se calcula el volumen del bache desplazador

Dado que la altura del fluido desplazante necesaria para que el cemento fluya desde el interior del Liner hacia el espacio anular y hasta la boca del liner es menor que la longitud total del liner, para calcular el volumen del bache desplazante solamente se considera la capacidad en el interior del liner.

$$Volumen_{bache\ desplazador} = h_{columna\ del\ bache\ desplazador} * Capacidad\ 3$$

$$Volumen_{bache\ desplazador} = 935.3 [m] * 20.98205 \left[\frac{lt}{m} \right]$$

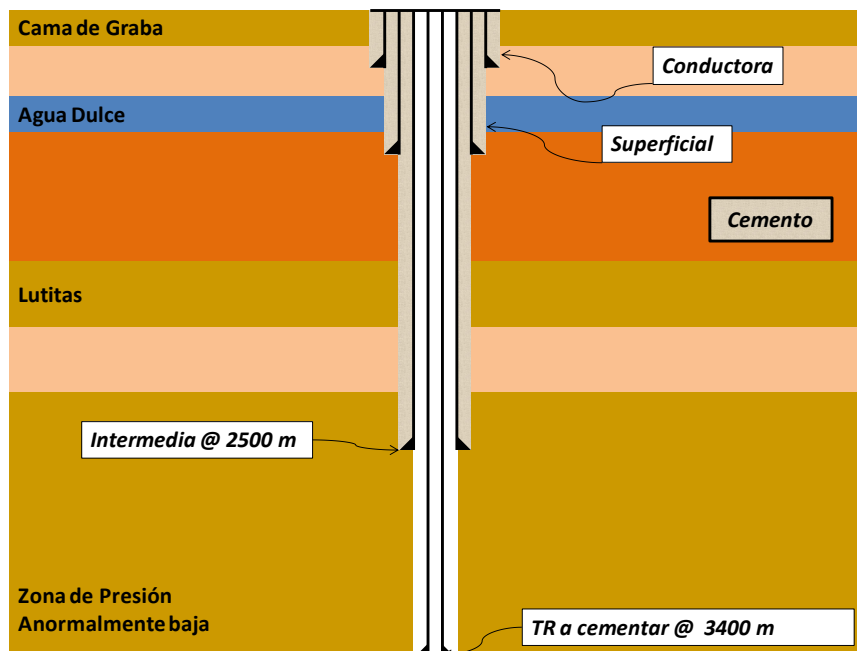
$$Volumen_{bache\ desplazador} = 19624.5121 [lt]$$

Para realizar esta cementación serían necesarios 14,951 [lt] de cemento de 0.86 [g/cm³] y 19,625 [lt] de fluido desplazante de 1.1 [g/cm³].

Caso 1) Cementación descolgada de una TR sin utilizar TP

Determinar el volumen de cemento y del bache desplazador para cementar una TR de producción de 3 1/2 [pg] de 3350 metros de longitud, dejando 30 metros de cemento dentro del la TR. Utilizando un cemento ultraligero de 0.86 [gr/cm³] y un Fluido desplazante de 1.1 [gr/cm³]. Se tiene un agujero de 5 1/8 [pg], una presión de formación de 2000 [psi], la TR de la etapa anterior es de 7 [pg], el cemento será circulado y colocado con la misma TR.

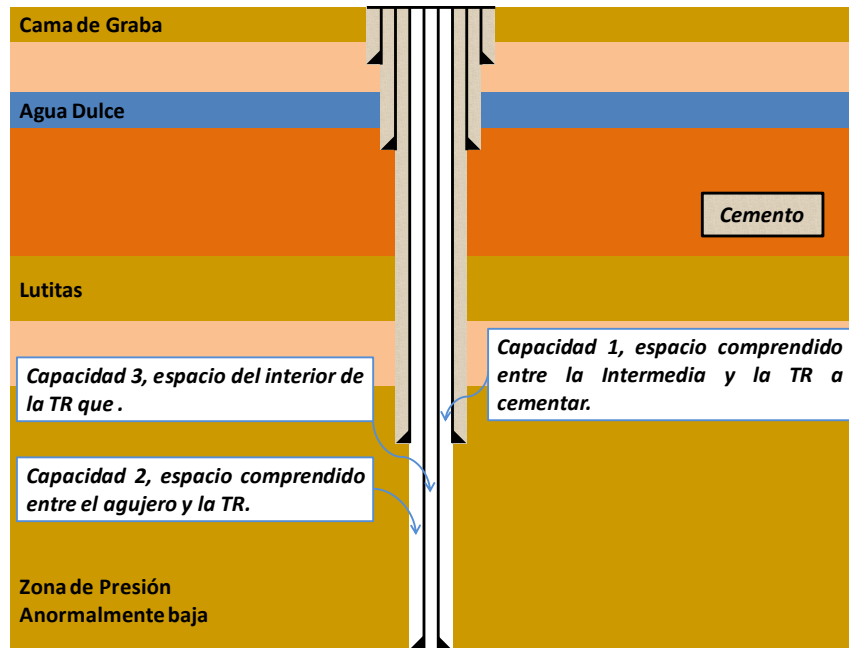
Estado Mecánico del Pozo:



Datos:

Tubería	D.I. [pg]	D.E. [pg]	Peso Unitario [lb/pie]	Intervalo [m]	Longitud Total [m]
TR 7 "	6.184	7	29	0	2500
TR 3 1/2 "	2.992	3.5	9.3	0	3400
Agujero 5 1/8"	5.125	-	-	de 2500 a 3400	900

1) Calcular la capacidad de las distintas geometrías en el pozo:



$$\text{Capacidad 1} \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{int. \text{ de la TR anterior}}^2 [pg] - \phi_{ext. \text{ de la TR a cementar}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 1} = [6.184([pg])^2 - (3.5[pg])^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 1} = 13.17 \left[\frac{lt}{m} \right]$$

$$\text{Capacidad 2} \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{del \text{ agujero}}^2 [pg] - \phi_{ext. \text{ de la TR a cementar}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 2} = [5([pg])^2 - 3.5([pg])^2] * 0.5067$$

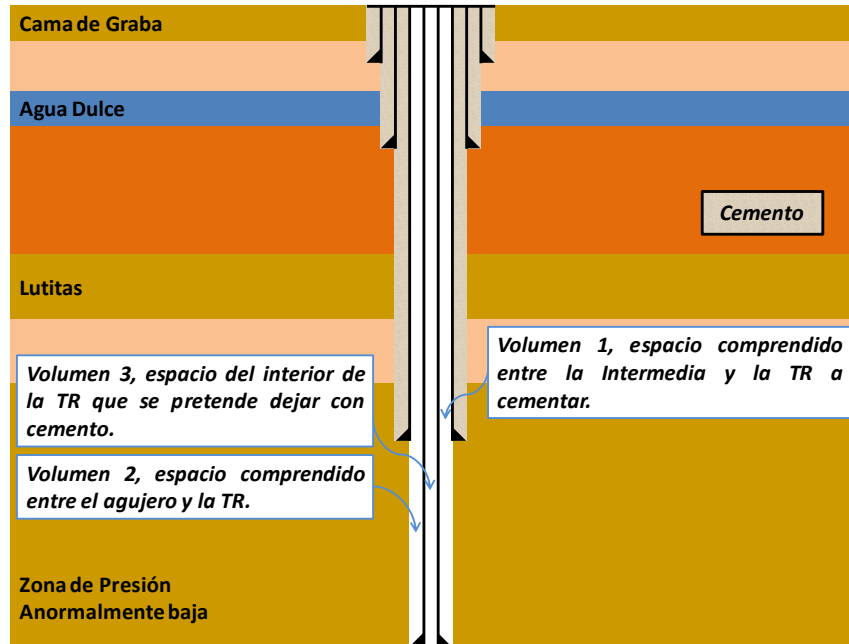
$$\text{Capacidad 2} = 7.1 \left[\frac{lt}{m} \right]$$

$$\text{Capacidad 3} \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{int. \text{ de la TR a cementar}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 3} = [2.992([pg])^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 3} = 4.54 \left[\frac{lt}{m} \right]$$

2) Cálculo del volumen de cemento:



$$\text{Volumen 1 [lt]} = \text{Capacidad 1} * \text{Profundidad}_{TR-TR}$$

$$\text{Volumen 1 [lt]} = 13.17 \left[\frac{lt}{m} \right] * 2500 [m]$$

$$\text{Volumen 1} = 32925.2 [lt]$$

$$\text{Volumen 2 [lt]} = \text{Capacidad 2} * \text{Profundidad}_{TR-Agujero}$$

$$\text{Volumen 2 [lt]} = 7.1 \left[\frac{lt}{m} \right] * 900 [m]$$

$$\text{Volumen 2} = 6391.6 [lt]$$

$$\text{Volumen 3 [lt]} = \text{Capacidad 3} * \text{Profundidad}_{\text{del cemento dentro de la TR}}$$

$$\text{Volumen 3 [lt]} = 4.54 \left[\frac{lt}{m} \right] * 30 [m]$$

$$\text{Volumen 3} = 136.1 [lt]$$

$$Volumen\ Total\ [lt] = Volumen\ 1\ [lt] + Volumen\ 2\ [lt] + Volumen\ 3\ [lt]$$

$$Volumen\ Total\ [lt] = 39453\ [lt]$$

3) Cálculo del volumen del bache desplazador:

a) Primero se calcula la presión que debe generar el bache desplazante

$$P_{formación} = 2000\ [psi]$$

$$P_{columna\ de\ cemento} = 30[m] * 0.86 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 1.4223$$

$$P_{columna\ de\ cemento} = 36.695\ [psi]$$

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = P_{formación} - P_{columna\ de\ cemento}$$

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = 2000\ [psi] - 36.695\ [psi]$$

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = 1963.31\ [psi]$$

b) Se determina la altura de la columna del fluido desplazante necesaria para generar la presión hidrostática obtenida en el inciso anterior

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazante}\ [m] = \frac{P_{columna\ del\ bache\ desplazante}\ [psi]}{\rho_{del\ bache\ desplazante}\ [gr/cm^3] * 1.4223}$$

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazante} = \frac{1963.31\ [psi]}{1.1\ [gr/cm^3] * 1.4223}$$

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazante} = 1255\ [m]$$

c) Considerando esta altura se calcula el volumen del bache desplazador

$$Volumen_{bache\ desplazador} = h_{columna\ del\ bache\ desplazador} * Capacidad\ 3$$

$$Volumen_{bache\ desplazador} = 1255\ [m] * 4.54 \left[\frac{lt}{m} \right]$$

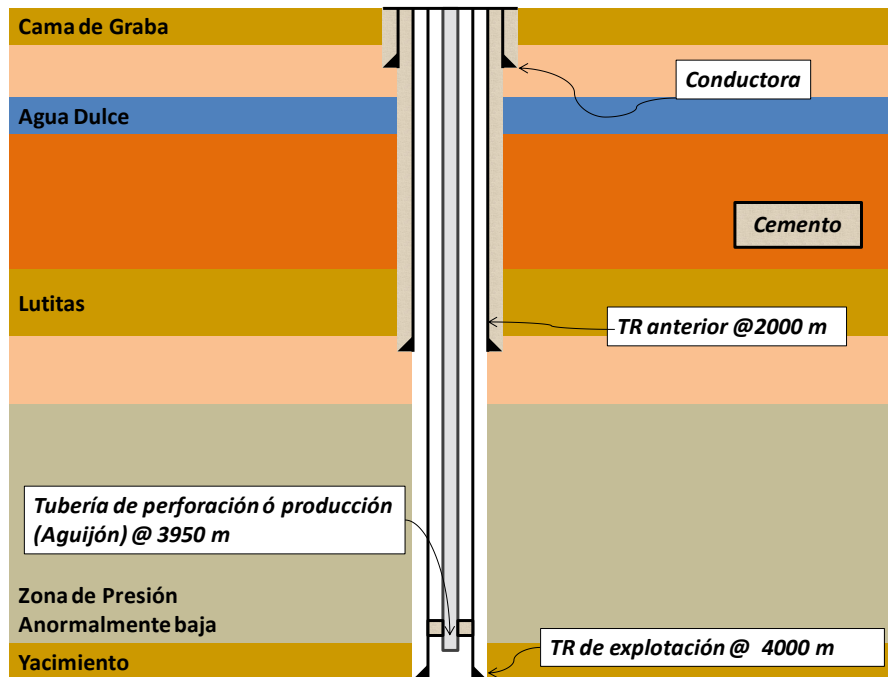
$$\text{Volumen}_{\text{bache desplazador}} = 5692.2 \text{ [lt]}$$

Para realizar esta cementación serían necesarios 39,453 [lt] de cemento de 0.86 [g/cm³] y 5,692.2 [lt] de fluido desplazante de 1.1 [g/cm³].

Caso 1) Cementación descolgada de una TR utilizando TP

Determinar el volumen de cemento y del bache desplazador para cementar una TR de explotación de 7 5/8 [pg] de 4000 metros de longitud, dejando 30 metros de cemento dentro de la TR. Utilizando un cemento ultraligero de 0.86 [gr/cm³] y un Fluido desplazante de 1.1 [gr/cm³]. Se tiene un agujero de 8.5 [pg], una presión de formación de 2000 [psi], la TR de la etapa anterior es de 9 5/8 [pg], la TP con la que se va a realizar la cementación es de 5 [pg].

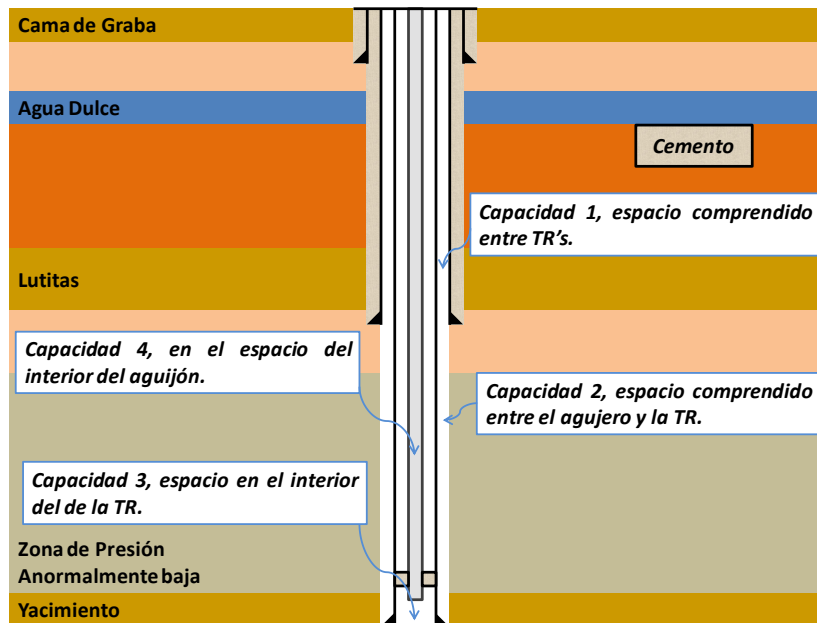
Estado Mecánico del Pozo:



Datos:

Tubería	D.I. [pg]	D.E. [pg]	Peso Unitario [lb/pie]	Intervalo [m]	Longitud Total [m]
TP 5"	4	5	25.6	de 0 a 3950	3950
TR 9 5/8 "	8.535	9.625	53.5	de 0 a 2000	2000
TR 7 5/8"	6.435	7.625	45.3	de 0 a 4000	4000
Agujero 8.5"	8.5	-	-	de 2000 a 4000	2000

1) Calcular la capacidad de las distintas geometrías en el pozo:



$$\text{Capacidad 1} \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{int. \text{ de la TR anterior}}^2 [pg] - \phi_{ext. \text{ de la TR a cementar}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 1} = [8.535([pg])^2 - (7.625[pg])^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 1} = 7.45 \left[\frac{lt}{m} \right]$$

$$\text{Capacidad 2} \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{del \text{ agujero}}^2 [pg] - \phi_{ext. \text{ de la TR a cementar}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 2} = [8.5([pg])^2 - 7.625([pg])^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 2} = 7.15 \left[\frac{lt}{m} \right]$$

$$\text{Capacidad 3} \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{int. \text{ de la TR a cementar}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 3} = [6.435([pg])^2] * 0.5067$$

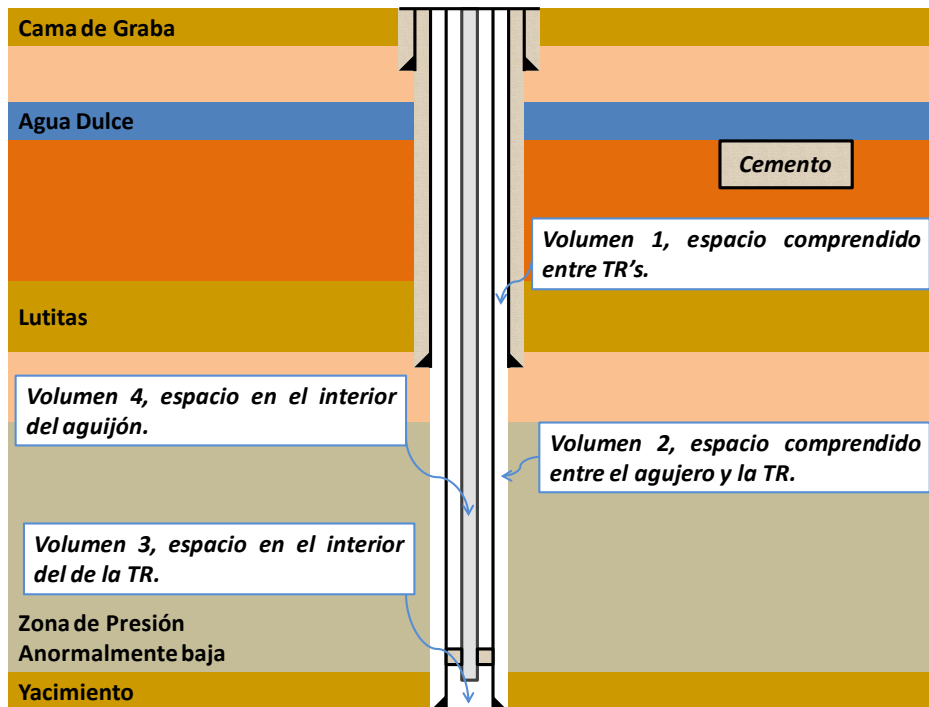
$$\text{Capacidad 3} = 21 \left[\frac{lt}{m} \right]$$

$$\text{Capacidad 4} \left[\frac{lt}{m} \right] = \left[\phi_{int. \text{ del agujón}}^2 [pg] \right] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 4} = [4([pg])^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 4} = 8.1 \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right]$$

2) Cálculo del volumen de cemento:



$$\text{Volumen 1 [lt]} = \text{Capacidad 1} * \text{Profundidad}_{TR-TR}$$

$$\text{Volumen 1 [lt]} = 7.45 \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right] * 2000 \text{ [m]}$$

$$\text{Volumen 1} = 14903 \text{ [lt]}$$

$$\text{Volumen 2 [lt]} = \text{Capacidad 2} * \text{Profundidad}_{TR-Agujero}$$

$$\text{Volumen 2 [lt]} = 7.15 \left[\frac{\text{lt}}{\text{m}} \right] * 2000 \text{ [m]}$$

$$\text{Volumen 2} = 14298.4 \text{ [lt]}$$

$$\text{Volumen 3 [lt]} = \text{Capacidad 3} * \text{Profundidad}_{\text{del cemento dentro de la TR}}$$

$$Volumen\ 3\ [lt] = 21 \left[\frac{lt}{m} \right] * 30\ [m]$$

$$Volumen\ 3 = 629.5\ [lt]$$

$$Volumen\ Total\ [lt] = Volumen\ 1\ [lt] + Volumen\ 2\ [lt] + Volumen\ 3\ [lt]$$

$$Volumen\ Total\ [lt] = 29,831\ [lt]$$

3) Cálculo del volumen del bache desplazador:

a) Primero se calcula la presión que debe generar el bache desplazante

$$P_{formación} = 2000\ [psi]$$

$$P_{columna\ de\ cemento} = 30[m] * 0.86 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 1.4223$$

$$P_{columna\ de\ cemento} = 36.695\ [psi]$$

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = P_{formación} - P_{columna\ de\ cemento}$$

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = 2000\ [psi] - 36.695\ [psi]$$

$$P_{columna\ del\ bache\ desplazante} = 1963.31\ [psi]$$

b) Se determina la altura de la columna del fluido desplazante necesaria para generar la presión hidrostática obtenida en el inciso anterior

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazante}\ [m] = \frac{P_{columna\ del\ bache\ desplazante}\ [psi]}{\rho_{del\ bache\ desplazante}\ [gr/cm^3] * 1.4223}$$

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazante} = \frac{1963.31\ [psi]}{1.1\ [gr/cm^3] * 1.4223}$$

$$h_{columna\ del\ bache\ desplazante} = 1255\ [m]$$

c) Considerando esta altura se calcula el volumen del bache desplazador

20 metros de la columna de bache desplazante (BD) quedarán dentro de la tubería de revestimiento, mientras que el resto estarán dentro del agujijón.

$$\text{Volumen}_{\text{bache desplazador}} = h_{\text{col.del BD en de la TR}} * \text{Cap.3} + h_{\text{columna del BD en de la TP}} * \text{Cap.4}$$

$$\text{Volumen}_{\text{bache desplazador}} = 20[m] * 21 \left[\frac{lt}{m} \right] + 8.1[m] * 1235 \left[\frac{lt}{m} \right]$$

$$\text{Volumen}_{\text{bache desplazador}} = 10,431 [lt]$$

Para realizar esta cementación serían necesarios 29,831 [lt] de cemento de 0.86 [g/cm³] y 10,431 [lt] de fluido desplazante de 1.1 [g/cm³].

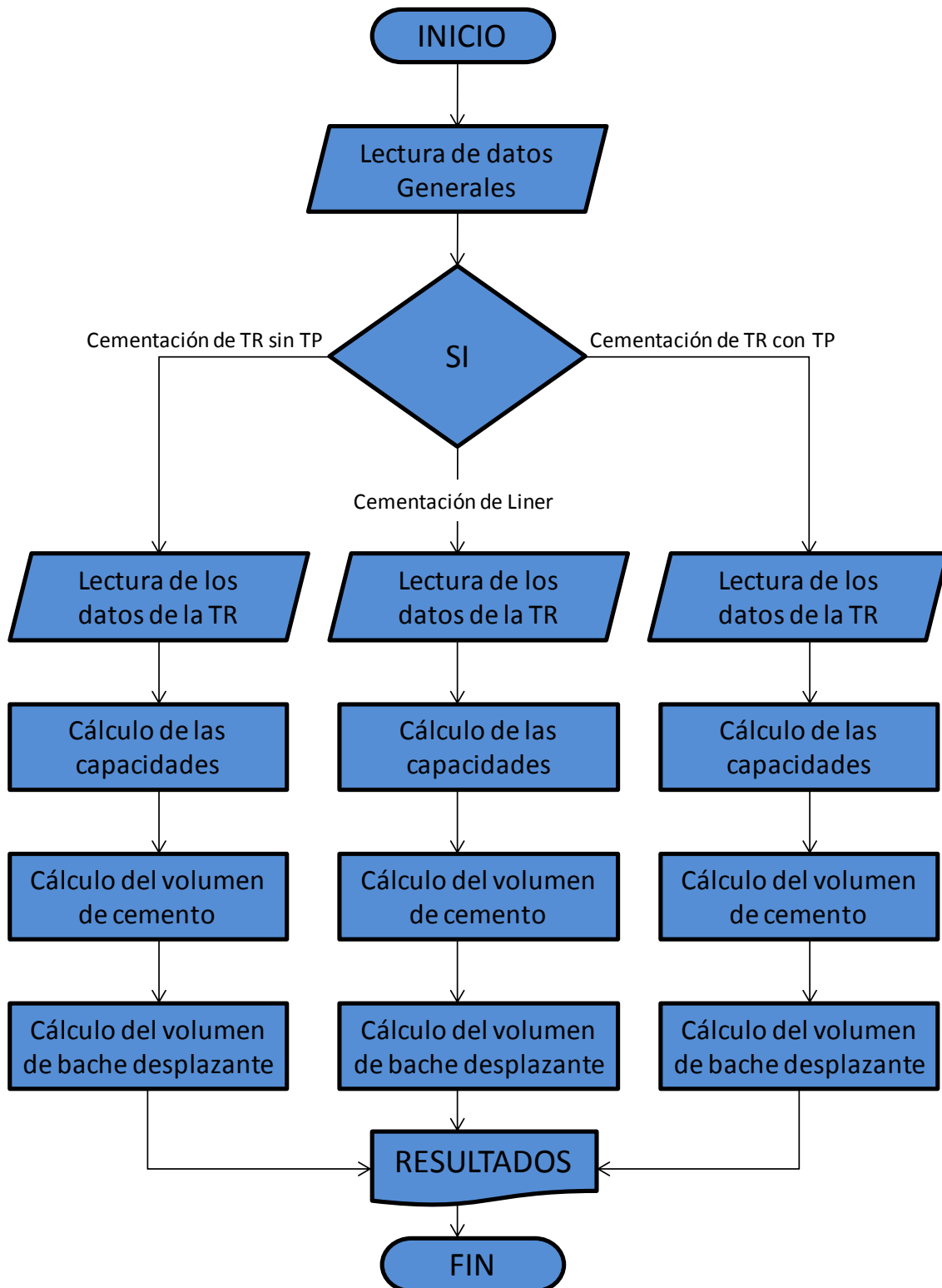
IV.1.1 PROGRAMA DE COMPUTO PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA LECHADA Y DEL BACHE PARA DESPLAZAR

Se elaboró un programa de cómputo -en visual Basic- para el cálculo de los volúmenes de cemento y fluido para desplazar requeridos para realizar una cementación descolgada. A continuación se presenta el desarrollo de dicho programa.

IV.1.1.1 ALGORITMO

1. Leer los datos.
2. Seleccionar que caso de cementación descolgada se va realizar.
3. Calcular las capacidades de las distintas geometrías del pozo.
4. Calcular el volumen de cemento.
5. Calcular el volumen del bache desplazador.
6. Presentar los resultados.

IV.1.1.2 DIAGRAMA DE FLUJO



IV.1.1.3 PSEUDOCÓDIGO

Lectura de los datos generales:

Leer ρ_{cemento}

Leer ρ_{BD}

Leer $P_{\text{formación}}$

Leer Φ_{agujero}

Leer $h_{\text{cemento en el interior de la TR}}$

Leer $\Phi_{\text{int. de la TR anterior}}$

Leer $\Phi_{\text{ext. de la TR anterior}}$

Leer $P_{\text{inicial de la TR anterior}}$

Leer $P_{\text{final de la TR anterior}}$

Si se va a cementar un liner:

Leer $\Phi_{\text{int. de la TR}}$

Leer $\Phi_{\text{ext. de la TR}}$

Leer $P_{\text{inicial de la TR}}$

Leer $P_{\text{final de la TR}}$

Leer $\Phi_{\text{int. de la TP}}$

Leer $\Phi_{\text{ext. de la TP}}$

Leer $P_{\text{inicial de la TP}}$

Leer $P_{\text{final de la TP}}$

$$\text{Capacidad 1} = [\Phi_{\text{int. de la TR anterior}}^2 - \Phi_{\text{ext. de la TR}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 2} = [\Phi_{\text{del agujero}}^2 - \Phi_{\text{ext. de la TR}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 3} = [\Phi_{\text{int. de la TR}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 4} = [\phi_{\text{int. de la TP}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Volumen 1} = \text{Capacidad 1} * (P_{\text{final de la TR anterior}} - P_{\text{inicial de la TR}})$$

$$\text{Volumen 2} = \text{Capacidad 2} * (P_{\text{final de la TR}} - P_{\text{inicial de la TR anterior}})$$

$$\text{Volumen 3} = \text{Capacidad 3} * h_{\text{cemento en el interior de la TR}}$$

$$\text{Volumen de cemento} = \text{Volumen 1} + \text{Volumen 2} + \text{Volumen 3}$$

$$P_{\text{generada por el cemento}} = h_{\text{cemento en el interior de la TR}} * \rho_{\text{cemento}} * 1.4223$$

$$P_{\text{generada por el BD}} = P_{\text{formación}} - P_{\text{generada por el cemento}}$$

$$h_{\text{del BD}} = \frac{P_{\text{generada por el BD}}}{(\rho_{\text{BD}} * 1.4223)}$$

$$\text{Si } h_{\text{del BD}} < P_{\text{final de la TP}} - P_{\text{inicial de la TP}}$$

$$\text{Volumen del B.D.} = h_{\text{del BD}} * \text{Capacidad 3}$$

sino

$$\text{Volumen del B.D.} = \text{Capacidad 3} * (P_{\text{final de la TP}} - P_{\text{inicial de la TP}}) + \text{Capacidad 4} * [h_{\text{del BD}} - (P_{\text{final de la TP}} - P_{\text{inicial de la TP}})]$$

Presentación de los resultados obtenidos:

Imprimir Volumen de cemento

Imprimir Volumen de B.D.

Si se va a cementar una TR sin TP:

Leer $\phi_{\text{int. de la TR}}$

Leer $\phi_{\text{ext. de la TR}}$

Leer $P_{\text{inicial de la TR}}$

Leer $P_{\text{final de la TR}}$

$$\text{Capacidad 1} = [\phi_{\text{int. de la TR anterior}}^2 - \phi_{\text{ext. de la TR}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 2} = [\Phi_{\text{del agujero}}^2 - \Phi_{\text{ext. de la TR}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 3} = [\Phi_{\text{int. de la TR}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Volumen 1} = \text{Capacidad 1} * (P_{\text{final de la TR anterior}})$$

$$\text{Volumen 2} = \text{Capacidad 2} * (P_{\text{final de la TR}} - P_{\text{final de la TR anterior}})$$

$$\text{Volumen 3} = \text{Capacidad 3} * h_{\text{cemento en el interior de la TR}}$$

$$\text{Volumen de cemento} = \text{Volumen 1} + \text{Volumen 2} + \text{Volumen 3}$$

$$P_{\text{generada por el cemento}} = h_{\text{cemento en el interior de la TR}} * \rho_{\text{cemento}} * 1.4223$$

$$P_{\text{generada por el BD}} = P_{\text{formación}} - P_{\text{generada por el cemento}}$$

$$h_{\text{del BD}} = \frac{P_{\text{generada por el BD}}}{(\rho_{\text{BD}} * 1.4223)}$$

$$\text{Volumen del B.D.} = h_{\text{del BD}} * \text{Capacidad 3}$$

Presentación de los resultados obtenidos:

Imprimir Volumen de cemento

Imprimir Volumen de B.D.

Si se va a cementar una TR con TP:

Leer $\Phi_{\text{int. de la TR}}$

Leer $\Phi_{\text{ext. de la TR}}$

Leer $P_{\text{inicial de la TR}}$

Leer $P_{\text{final de la TR}}$

Leer $\Phi_{\text{int. de la TP}}$

Leer $\Phi_{\text{ext. de la TP}}$

Leer $P_{\text{inicial de la TP}}$

Leer $P_{\text{final de la TP}}$

$$\text{Capacidad 1} = [\phi_{\text{int. de la TR anterior}}^2 - \phi_{\text{ext. de la TR}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 2} = [\phi_{\text{del agujero}}^2 - \phi_{\text{ext. de la TR}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 3} = [\phi_{\text{int. de la TR}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Capacidad 4} = [\phi_{\text{int. de la TP}}^2] * 0.5067$$

$$\text{Volumen 1} = \text{Capacidad 1} * (P_{\text{final de la TR anterior}})$$

$$\text{Volumen 2} = \text{Capacidad 2} * (P_{\text{final de la TR}} - P_{\text{final de la TR anterior}})$$

$$\text{Volumen 3} = \text{Capacidad 3} * h_{\text{cemento en el interior de la TR}}$$

$$\text{Volumen de cemento} = \text{Volumen 1} + \text{Volumen 2} + \text{Volumen 3}$$

$$P_{\text{generada por el cemento}} = h_{\text{cemento en el interior de la TR}} * \rho_{\text{cemento}} * 1.4223$$

$$P_{\text{generada por el BD}} = P_{\text{formación}} - P_{\text{generada por el cemento}}$$

$$h_{\text{del BD}} = \frac{P_{\text{generada por el BD}}}{(\rho_{\text{BD}} * 1.4223)}$$

$$\text{Volumen del B. D.} =$$

$$\begin{aligned} & [\text{Capacidad 3} * (P_{\text{final de la TR}} - P_{\text{final de la TP}} - h_{\text{cemento en el interior de la TR}})] \\ & + [\text{Capacidad 4} * (h_{\text{del BD}} - (P_{\text{final de la TR}} - P_{\text{final de la TP}} - h_{\text{cemento en el interior de la TR}}))] \end{aligned}$$

Presentación de los resultados obtenidos

Imprimir Volumen de cemento

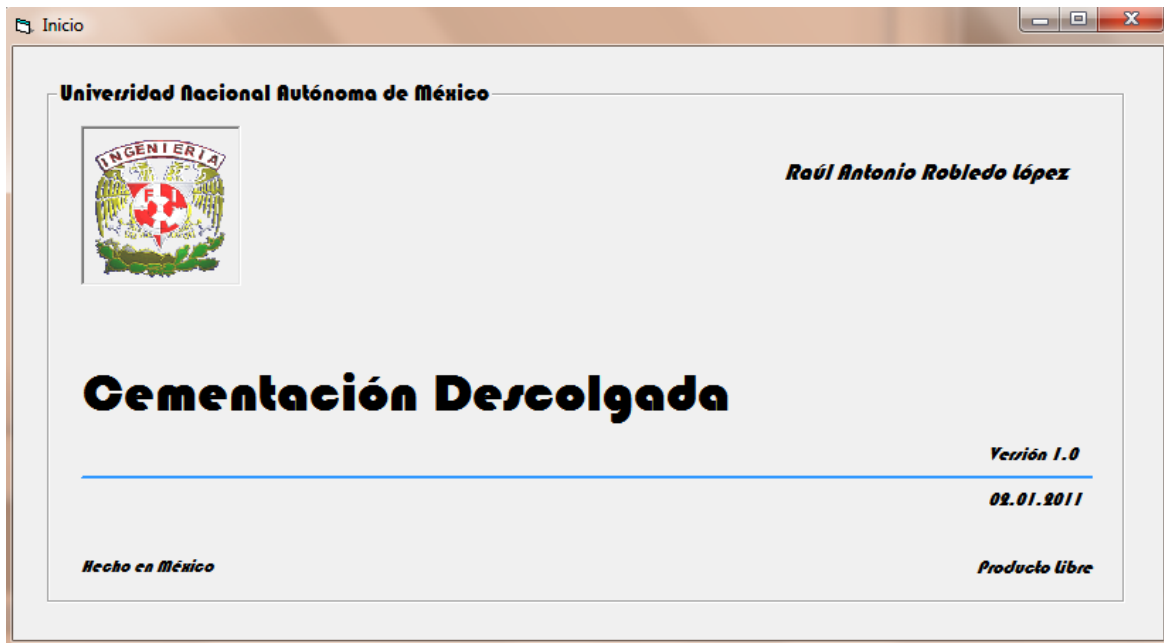
Imprimir Volumen de B. D.

IV.1.1.4 PROGRAMA

Este programa está compuesto por tres formas (pantallas de Visual Basic), las formas son:

- Inicio: Esta forma presenta el programa.
- Datos: En esta pantalla se capturan los datos para realizar el proceso.
- Resultados: En esta pantalla se presentan los resultados.

Pantalla de Inicio



Esta pantalla presenta datos generales del programa: autor, versión, institución, país, título, fecha.

Código de la pantalla de Inicio:

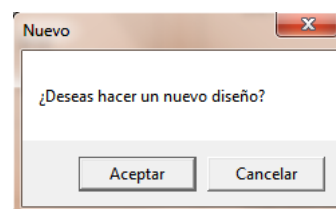
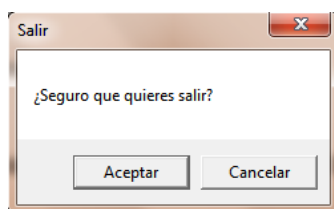
```
Private Sub Timer1_Timer()  
Unload Me  
FrmDatos.Show  
End Sub
```

Pantalla de Datos

The screenshot shows a Windows-style application window titled 'Datos'. It has a menu bar with 'Nuevo' and 'Salir'. The main area is divided into several sections:

- Datos generales:** Contains five input fields: 'Densidad del Cemento' (0.86 gr/cc), 'Densidad del desplazante' (1.1 gr/cc), 'Presión de la formación' (1500 psi), 'Diámetro del agujero' (8.5 pg), and 'Altura del cemento en TR' (30 pg).
- Datos de la TP con la que se va a Cementar:** Contains three input fields: 'Diámetro Interior' (4 pg), 'Diámetro Exterior' (5 pg), and 'De los' (0) 'a los' (1925) [m].
- Datos de la TR anterior:** Contains three input fields: 'Diámetro Interior' (8.535 pg), 'Diámetro Exterior' (9.625 pg), and 'De los' (0) 'a los' (2000) [m].
- Datos de la TR a Cementar:** Contains three input fields: 'Diámetro Interior' (6.435 pg), 'Diámetro Exterior' (7.625 pg), and 'De los' (1925) 'a los' (3925) [m]. It also has three radio buttons: 'Liner', 'Cementación con TR', and 'Cementación con TP'.
- Buttons:** At the bottom right, there are three buttons: 'Calcular', 'Limpiar', and 'Salir'.

Esta pantalla tiene tres botones, cada uno de los cuales tiene un nombre en el código, siendo así que: Calcular es el Command1; Limpiar es el Command2; y Salir es el Command3. Además la forma un menú en la parte superior que presenta dos opciones: Nuevo y Salir, ambos comandos conservan su nombre en el código.



Código de la pantalla de Datos:

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
'Datos generales  
dens_cem = Val(Text16.Text)  
dens_bd = Val(Text17.Text)  
pf = Val(Text18.Text)
```

```

Dagujero = Val(Text19.Text)
hcemin = Val(Text20.Text)
'Datos de la TR anterior
DintTRa = Val(Text10.Text)
DextTRa = Val(Text9.Text)
PinTRa = Val(Text7.Text)
PfinTRa = Val(Text6.Text)
If Option2 = True Then ' si es liner
'Datos del Liner
DintTR = Val(Text1.Text)
DextTR = Val(Text2.Text)
PinTR = Val(Text4.Text)
PfinTR = Val(Text5.Text)
'Datos de la TP
DintTP = Val(Text15.Text)
DextTP = Val(Text14.Text)
PinTP = Val(Text12.Text)
PfinTP = Val(Text11.Text)
'Calculo de las Capacidades
Cap1 = ((DintTRa ^ 2) - (DextTR ^ 2)) * 0.5067
Cap2 = ((Dagujero ^ 2) - (DextTR ^ 2)) * 0.5067
Cap3 = (DintTR ^ 2) * 0.5067
Cap4 = (DintTP ^ 2) * 0.5067
'Calculo del Volumen de Cemento
Vol1 = Cap1 * (PfinTRa - PinTR)
Vol2 = Cap2 * (PfinTR - PfinTRa)
Vol3 = Cap3 * hcemin
Volcem = Vol1 + Vol2 + Vol3
'Calculo del Volumen de fluido desplazador
P_cem = hcemin * dens_cem * 1.4223
P_bd = pf - P_cem
h_bd = P_bd / (dens_bd * 1.4223)
If h_bd < (PfinTR - PinTR) Then
    Vol_bd = h_bd * Cap3
Else
    Vol_bd = Cap3 * (PfinTR - PinTR) + Cap4 * (h_bd - (PfinTR - PinTR))
End If
FrmResultados.Label19.Caption = "Cementación de un Liner, utilizando TP"
FrmResultados.Label1.Caption = "Volumen de Cemento: " & Str(Volcem)
FrmResultados.Label2.Caption = "Volumen de B.D.: " & Str(Vol_bd)
FrmResultados.Show
End If
If Option1 = True Then
'Cementación por TR
DintTR = Val(Text1.Text)
DextTR = Val(Text2.Text)
PinTR = Val(Text4.Text)
PfinTR = Val(Text5.Text)
'Calculo de las Capacidades
Cap1 = ((DintTRa ^ 2) - (DextTR ^ 2)) * 0.5067
Cap2 = ((Dagujero ^ 2) - (DextTR ^ 2)) * 0.5067

```



```

    Cap3 = (DintTR ^ 2) * 0.5067
' Calculo del Volumen de Cemento
    Vol1 = Cap1 * PfinTRa
    Vol2 = Cap2 * (PfinTR - PfinTRa)
    Vol3 = Cap3 * hcemin
    Volcem = Vol1 + Vol2 + Vol3
' Calculo del Volumen de fluido desplazador
    P_cem = hcemin * dens_cem * 1.4223
    P_bd = pf - P_cem
    h_bd = P_bd / (dens_bd * 1.4223)
    Vol_bd = h_bd * Cap3
    FrmResultados.Label19.Caption = "Cementación de TR, sin utilizar TP"
    FrmResultados.Label1.Caption = "Volumen de Cemento: " & Str(Volcem)
    FrmResultados.Label2.Caption = "Volumen de B.D.: " & Str(Vol_bd)
    FrmResultados.Show
End If
If Option4 = True Then
'Es TR convencional y considerando cementación con stinger
    'Datos de la TR
    DintTR = Val(Text1.Text)
    DextTR = Val(Text2.Text)
    PinTR = Val(Text4.Text)
    PfinTR = Val(Text5.Text)
    'Datos de la TP
    DintTP = Val(Text15.Text)
    DextTP = Val(Text14.Text)
    PinTP = Val(Text12.Text)
    PfinTP = Val(Text11.Text)
'Calculo de las Capacidades
    Cap1 = ((DintTRa ^ 2) - (DextTR ^ 2)) * 0.5067
    Cap2 = ((Dagujero ^ 2) - (DextTR ^ 2)) * 0.5067
    Cap3 = (DintTR ^ 2) * 0.5067
    Cap4 = (DintTP ^ 2) * 0.5067
'Calculo del Volumen de Cemento
    Vol1 = Cap1 * PfinTRa
    Vol2 = Cap2 * (PfinTR - PfinTRa)
    Vol3 = Cap3 * hcemin
    Volcem = Vol1 + Vol2 + Vol3
'Calculo del Volumen de fluido desplazador
    P_cem = hcemin * dens_cem * 1.4223
    P_bd = pf - P_cem
    h_bd = P_bd / (dens_bd * 1.4223)
    Vol_bd = Cap3 * (PfinTR - PfinTP - hcemin) + Cap4 * (h_bd - (PfinTR - PfinTP - hcemin))
    FrmResultados.Label1.Caption = "Volumen de Cemento: " & Str(Volcem)
    FrmResultados.Label2.Caption = "Volumen de B.D.: " & Str(Vol_bd)
    FrmResultados.Label19.Caption = "Cementación de TR, utilizando TP"
    FrmResultados.Show
End If
End Sub

Private Sub Command2_Click()

```

```

Text1.Text = ""
Text2.Text = ""
Text4.Text = ""
Text5.Text = ""
Text6.Text = ""
Text7.Text = ""
Text9.Text = ""
Text10.Text = ""
Text11.Text = ""
Text12.Text = ""
Text14.Text = ""
Text15.Text = ""
Text16.Text = ""
Text17.Text = ""
Text18.Text = ""
Text19.Text = ""
Text20.Text = ""
Text16.SetFocus
End Sub

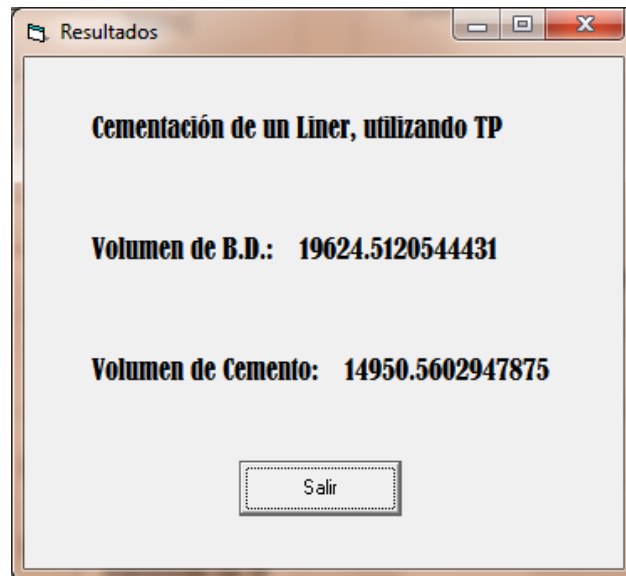
Private Sub Command3_Click()
If MsgBox("¿Seguro que quieres salir?", vbOKCancel, "Salir") = vbOK Then End
End Sub

Private Sub Nuevo_Click(Index As Integer)
If MsgBox("¿Deseas hacer un nuevo diseño?", vbOKCancel, "Nuevo") = vbOK Then
Text1.Text = ""
Text2.Text = ""
Text4.Text = ""
Text5.Text = ""
Text6.Text = ""
Text7.Text = ""
Text9.Text = ""
Text10.Text = ""
Text11.Text = ""
Text12.Text = ""
Text14.Text = ""
Text15.Text = ""
Text16.Text = ""
Text17.Text = ""
Text18.Text = ""
Text19.Text = ""
Text20.Text = ""
End If
Text16.SetFocus
End Sub

Private Sub Salida_Click(Index As Integer)
If MsgBox("¿Seguro que quieres salir?", vbOKCancel, "Salir") = vbOK Then End
End Sub

```

Pantalla de Resultados



Esta pantalla presenta los resultados obtenidos: el volumen de la lechada; el volumen del bache para desplazar; también nos indica que tipo de operación fue la que se considero para hacer los cálculos.

IV.2. METODOLOGÍA DE LA OPERACIÓN DE CEMENTACIÓN DESCOLGADA

La operación de cementación descolgada se realiza de la siguiente forma:

- a) Probar la línea de cementación @ 3500 [psi]
- b) Bombear bache lavador @ 3 [bpm] y 200 [psi]
- c) Bombear bache espaciador @ 3 [bpm] y 200 [psi]
- d) Bombear la lechada @ 3 [bpm] y 150 [psi]
- e) Soltar el dardo inicial de desplazamiento
- f) Bombear bache desplazador @ 3 [bpm] y 500 [psi]
- g) Cerrar la válvula de la cabeza
- h) Desconectar la línea de cementación
- i) Abrir la válvula de la cabeza
- j) Caída libre de los fluidos bombeados
- k) Esperar fraguado

V. CASOS REALES

A continuación se presentan algunos casos de trabajos de cementación en los que se utilizaron cementos ultraligeros de alto esfuerzo a la compresión. Los casos que se presentan son de pozos de la Región Marina de PEMEX. Las cementaciones se realizaron en la zona productora “Brecha Paleoceno-Cretácico Superior” por la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de pozos, División Marina.

La “Brecha Paleoceno-Cretácico Superior” es una formación naturalmente fracturada altamente permeable, la cual ha sido explotada durante un largo periodo de tiempo, debido a esto la presión de la formación ha declinado considerablemente (la BP-KS tiene una densidad equivalente a $0.55 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$).

Las condiciones antes mencionadas hacen que la formación sea considerada de presión anormalmente baja, en la cual se presentan serios problemas de pérdidas de circulación durante la perforación y terminación de los pozos. En la BP-KS los pozos se terminan con liners de producción, en ocasiones se profundiza en los pozos con el objetivo de cambiar el intervalo productor, dejando instalado un nuevo liner de producción.

No todas las cementaciones que se analizan en el presente fueron realizadas mediante la metodología de cementación descolgada, sin embargo, en todas se utilizaron cementos ULAEC.

La evaluación de los trabajos de cementación con cementos ULAEC se realizó teniendo en cuenta las consideraciones que se mencionan en el capítulo III. No en todos los pozos se les realizaron las mismas pruebas ni se corrieron los mismos registros, sin embargo, en cada caso se cuenta con suficiente información para realizar una evaluación de la cementación.

Cabe mencionar que la información con la que se contó para realizar este trabajo es limitada, por lo que el presente no está basado en un estudio especializado de los resultados obtenidos en diversos campos en el mundo, sino que se desarrollo a partir de artículos e informes que simplemente pretenden dar a conocer esta nueva tecnología, los cuales solo muestran someramente los resultados que se han obtenido al utilizar cementos ULAEC.

De tal forma que datos como la composición exacta de los cementantes y la localización exacta de los pozos es información clasificada a la que no se tuvo acceso.

También se mencionan cualitativamente los resultados obtenidos en otras partes del mundo. La eficiencia de cada cementación varió dado que los cementos ULAEC que se utilizaron en cada trabajo fueron de distinto diseño, densidad, en zonas productoras distintas lo que implica que las características de la formación no fueron iguales para todos los casos, además, las operaciones fueron realizadas por diferentes compañías.

V.1 CASOS DE LA GERENCIA DE PERFORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE POZOS, DIVISIÓN MARINA

1) Cantarell-2091

Este pozo se encontraba produciendo un intervalo disparado de los 2485 a 2510 metros por un Liner de producción de 7 5/8 [pg]. Se programó una operación el 29 de Enero de 2001, con el objetivo de profundizar el intervalo productor.

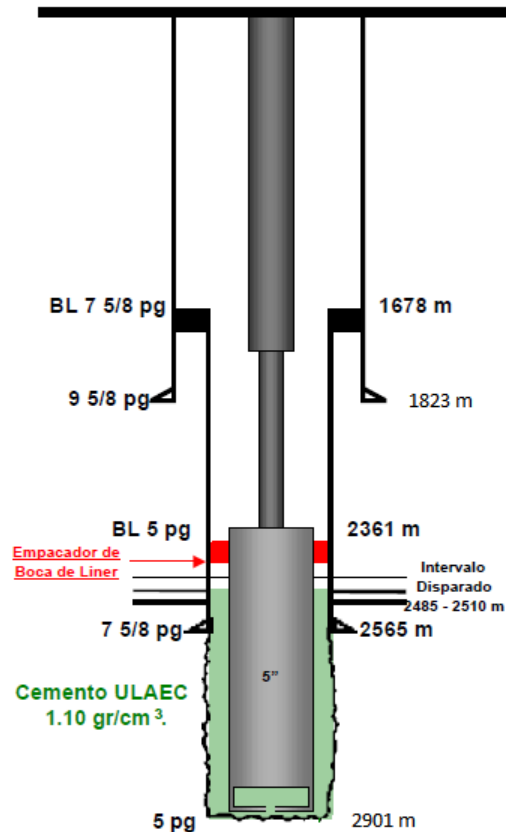


Figura V.1 Estado mecánico del Pozo Cantarell 2091.

Resumen de la Operación

Se perforaron 336 metros con una barrena de 5 7/8 a partir de la zapata del liner de 7 5/8 [pg] @ 2565 [mD], llegando a una profundidad de 2901 [mD], se utilizó un fluido de control de 0.89 [gr/cm³], observando pérdida de circulación parcial de 17 [m³/hr], presentándose pérdida total en los intervalos 2737-2740 y 2753-2760 [mD]. Una vez concluida la perforación se realizó un viaje de reconocimiento, mediante el cual se determinó que el agujero estaba libre y se podía introducir el liner de 5 [pg] para su explotación, por lo que se introdujo el liner y se ancló a los 2901 [mD]. El liner fue llenado

durante su introducción con fluido de control, llenando la capacidad total de la tubería. Después se procedió a la cementación del liner.

Cementación

Esta cementación fue realizada por la compañía Schlumberger, se programó el bombeo de:

- 10 [bls] de bache lavador (CW8) de 1.0 [gr/cm³]
- 20 [bls] bache espaciador (XLO) de 1.01 [gr/cm³]
- 4.1 Toneladas de LiteCrete de 1.1 [gr/cm³], con un punto cedente de 11.4 [lb_f/100pie²], una viscosidad plástica de 112.6 [cp], filtrado de 28 [cc/30 min], Agua libre de 0 [% / 2 hrs] y un tiempo de bombeo de 2 horas con 50 minutos.

Código	Descripción	Concentración [lt/s]
D175	Antiespumante	0.45
D162	Antisedimentante	0.16
D600	Controlador de gas	4.50
D135	Estabilizador de D134	0.40
D080	Dispersante	0.70
D075	Extendedor	0.35
D150	Retardador	0.47

- 100 [bls] de bache desplazante de 0.89 [gr/cm³], con un punto cedente de 42 [lb_f/100pie²], una viscosidad plástica de 54 [cp]

La operación de cementación fue realizada de la siguiente forma:

- a) Se instaló el cabezal de cementación y las líneas superficiales
- b) Se probó la línea de cementación @ 3500 [psi]
- c) Se bombearon 10 [bls] de bache lavador @ 3 [bpm] y 200 [psi]
- d) Se bombearon 20 [bls] de bache espaciador @ 3 [bpm] y 200 [psi]
- e) Se bombearon 6.6 [m³] de lechada @ 3 [bpm] y 150 [psi]
- f) Se soltó el dardo de desplazamiento

- g) Se bombearon 100 [bls] de bache para desplazar @ 3 [bpm] y 200 [psi], la presión se fue incrementando hasta alcanzar 500 [psi]
- h) Se prosiguió a cerrar la válvula de la línea de cementación.
- i) Se desconectó la línea de cementación
- j) Se abrió la válvula de la cabeza
- k) Se esperó por la caída libre de los fluidos bombeados, sin embargo esto no sucedió.
- l) Se volvió a conectar la línea de cementación
- m) Se abrió la válvula de la línea de cementación
- n) Se reinició el bombeo de fluido para desplazar @ 3 [bpm] y 200 [psi]
- o) Se continuó bombeando el bache desplazante hasta acumular 131 [bls] y una presión de 731 [psi]
- p) Se detecto el acoplamiento de tapones al alcanzar una presión total -la presión de bombeo más la presión generada por la columna de fluido- alcanzó 1500 [psi]
- q) Se activó el empacador de la boca del liner
- r) Se esperó por fraguado (12 hrs.)

Evaluación de la cementación

Una vez concluido el tiempo de fraguado se probó la integridad del cemento, también se midió su adherencia y la cima, esto se hizo de dos formas:

- i. Se llenó el pozo con 17.5 [m³] de agua de mar (1.03 [gr/cm³]) sin aplicar presión adicional, esta columna ejerce una presión de 2490 [psi], la cual fue 990 [psi] más grande que la presión que podía soportar la formación, esto confirmo la integridad del cemento. La zapata se probó a 500 [psi] durante 15 minutos.
- ii. También se corrió un registro CBL/VDL-GR-CCL, la herramienta con la que se corrió el registro no pudo bajar más allá de los 2686 [m], esto debido a la desviación del pozo (56°), sin embargo, se detecto la cima del cemento a los 2490 [m], 70 [m] arriba de la zapata del Liner de 7 5/8 [pg], también se puede apreciar una buena adherencia del cemento.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la cementación ha sido eficiente, por lo que se considera que la operación fue un éxito.

2) Cantarell-53D

Resumen de la Operación

La operación de perforación y terminación del pozo Cantarell 53-D fue llevada a cabo el 25 de marzo del 2001, se perforó el agujero con una barrena de 10 5/8 [pg], para dejar cementada una TR de 9 5/8 [pg], la formación en la que se realizó la operación fue la “Brecha del Paleoceno, Cretácico Superior”. Durante las operaciones de perforación se observó pérdida parcial y total de circulación, esto sucedió de los 2308 a 2870 [mD], se perdieron 7100 [bls] de fluido de control de 0.89 [gr/cm³].

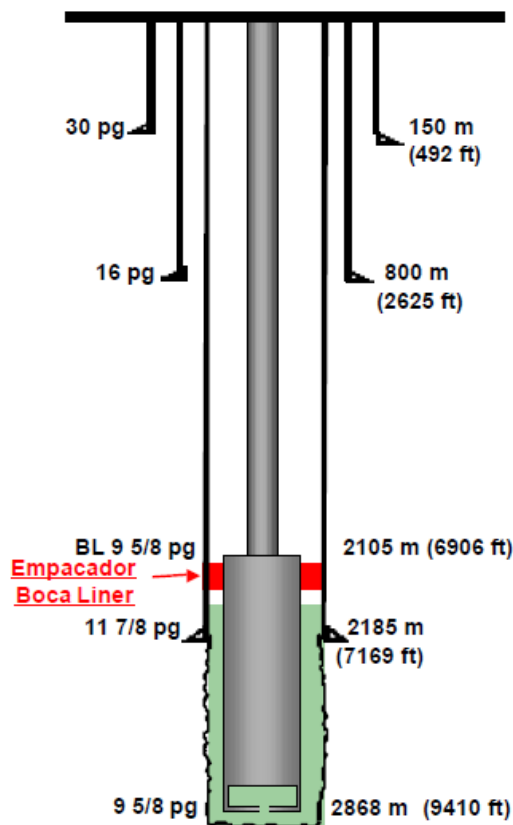


Figura V.2 Pozo Cantarell 53-D.

Cementación

Debido a los problemas de pérdida de circulación que se presentaron durante la perforación se decidió cementar el pozo con un cemento ultraligero, se eligió el LiteCrete de Schlumberger, con una densidad de 1.1 [gr/cm³].

Programa de la Cementación:

- 30 [bls] de Espaciador Mud push XLO de 1.0 [gr/cm³]
- 13 Toneladas de LiteCrete de 1.1 [gr/cm³], con un punto cedente de 13.9 [lb_f/100pie²], una viscosidad plástica de 100.5 [cp], filtrado de 27 [cc/30 min], Agua libre de 0 [% / 2 hrs] y un tiempo de bombeo de 3 horas con 35 minutos.

Código	Descripción	Concentración [lt/s]
D175	Antiespumante	0.45
D162	Antisedimentante	0.14
D600	Controlador de gas	4.50
D135	Estabilizador de gas	0.4
D080	Dispersante	0.70
D075	Extendedor	0.35
D150	Retardador	0.36

- 277 [bls] de bache desplazante de 0.89 [gr/cm³], con un punto cedente de 21 [lb_f/100pie²], una viscosidad plástica de 23 [cp]

Esta cementación no fue realizada mediante la técnica de descolgamiento de los fluidos, la operación fue realizada de la siguiente forma:

- b) Se instaló el cabezal de cementación y las líneas superficiales
- b) Se probó la línea de cementación @ 4000 [psi]
- c) Se bombearon 30 [bls] de bache espaciador @ 2 [bpm] y 383 [psi]
- d) Se bombearon 137 [bls] de lechada @ 3.5 [bpm] y 300 [psi]
- e) Se liberó el dardo de desplazamiento
- f) Se bombearon 277 [bls] de bache para desplazar el gasto inicial fue de 4 [bpm], el cual se fue disminuyendo hasta llegar a 0.8 [bpm], la presión inicial de bombeo fue de 200 [psi], la presión se fue incrementando hasta alcanzar 1800 [psi]. Se observó el acoplamiento de los tapones con 107 [bls] y 550 [psi].
- g) Se revisó la presión final estabilizada (1600 [psi]) y el equipo de flotación.
- h) Se liberó el conjunto colgador y se levanto la TP, se cerró el pozo y se esperó fraguado.

- i) Se activo el empacador de boca del liner.

Nota: Durante la operación se observó pérdida parcial de circulación, se contabilizaron 12 [m³] de lodo perdido durante las 2.5 horas.

Evaluación de la cementación

Después de rebajar accesorios se probó la zapata con 1000 [psi] durante 15 minutos, la prueba fue satisfactoria, no se encontró cemento en la boca del liner. Posteriormente, se corrió el registro CBL/VDL/USI.

Con la información recabada por el registro se puede concluir que la cima del cemento cubrió por completo el espacio anular, que era el objetivo de la operación, sin embargo, la adherencia del cemento es del 85 al 90 % hasta los 2580 [mD], mientras que de dicha profundidad en adelante la adherencia fue de 90%.

El intervalo a disparar en esta zona esta por debajo de los 2700 [mD] por lo que se puede concluir que hay un buen sello por encima y por debajo la zona productora.

Durante la operación se observo una variación en la concentración de sólidos de 10 puntos, de 48 a 58 %, sin embargo, al pesar la lechada en una balanza se pudo verificar que el peso no variaba en más de dos puntos. De acuerdo con el personal de la compañía Schlumberger el porcentaje de contenido de sólidos puede variar en un rango de 43 a 63% sin que la densidad varíe demasiado.

3) Cantarell-80

Resumen de la Operación

La operación de perforación y terminación del pozo Cantarell 80 fue llevada a cabo el 06 de junio del 2001, se perforó el agujero con una barrena de 10 5/8 [pg], para dejar cementada una TR de 9 5/8 [pg], la formación en la que se realizó la operación fue la “Brecha del Paleoceno, Cretácico Superior”. Al final de la operación se reportó un volumen de lodo perdido de 15,102 [m³] ó 94,992 [bls], hecho que evidencia cuan grave es la pérdida de circulación en este pozo. La densidad del lodo empleado durante la perforación fue de 0.89 [gr/cm³], la pérdida de circulación fue total.

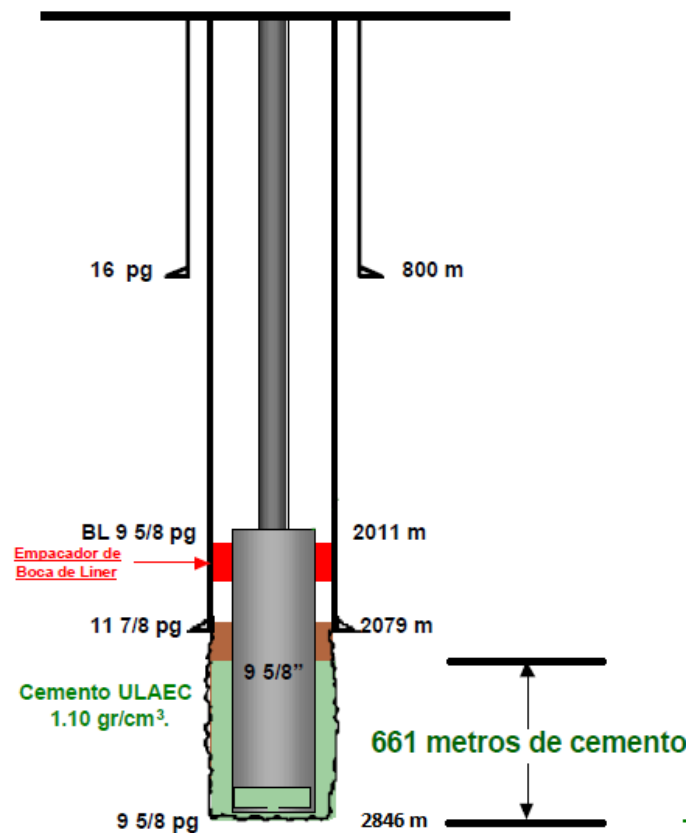


Figura V.3 Pozo Cantarell 80.

Cementación

Debido al grave problema de pérdida de circulación se decidió realizar una cementación ultraligera, se eligió el cemento LiteCrete de Schlumberger, con una densidad de 1.1 [gr/cm³].

Programa de la Cementación:

- 20 [bls] de Bache lavador CW-8 de 1.01 [gr/cm³]
- 10 [bls] de Espaciador Mud push XLO de 1.01 [gr/cm³]
- 11 Toneladas de cemento, con las que se prepararon 17.8 [m³] de lechada LiteCrete de 1.1 [gr/cm³], con un tiempo de bombeo de 3 horas 21 minutos.

Código	Descripción	Concentración
	Cemento Apasco H	220 [sacos]
D175	Antisedimentante	10.5 [lt/s]
D162	Antiespumante	26.2 [lt/s]
D600	Controlador de gas	261.5 [lt/s]
D135	Estabilizador de gasblock	23.2 [lt/s]
D080	Extendedor	20.3 [lt/s]
D075	Dispersante	40.7 [lt/s]
D150	Retardador	40.7 [lt/s]

- 282 [bls] de bache desplazante de 0.88 [gr/cm³], con un punto cedente de 21 [lb_f/100pie²], una viscosidad plástica de 34 [cp]

Esta cementación fue realizada mediante la técnica de descolgamiento de los fluidos, la operación fue realizada de la siguiente forma:

- c) Se instaló el cabezal de cementación y las líneas superficiales
- d) Se probó la línea de cementación @ 5000 [psi]
- e) Se bombearon 20 [bls] de bache lavador @ 3 [bpm] y 200 [psi]
- f) Se bombearon 10 [bls] de bache espaciador @ 3 [bpm] y 200 [psi]
- g) Se bombearon 17.8 [m³] de lechada @ 2.5 [bpm] y 80 [psi]
- h) Se soltó el dardo de desplazamiento
- i) Se bombearon 282 [bls] de bache para desplazar, la presión y gasto variaron para cada etapa del bombeo del bache desplazante, en la siguiente tabla se muestra el programa de bombeo de dicho bache.

Gasto [bpm]	Presión [psi]	Volumen [bls]	Volumen acumulado
1.5	42	50	50
2.0	45	35	85
3.0	85	115	200
2.5	42	25	225
1.5	50	57	282

- j) No se detectó acoplamiento de tapones.
- k) Se prosiguió a cerrar la válvula de la línea de cementación.
- l) Se desconectó la línea de cementación
- m) Se abrió la válvula de la cabeza
- n) Se observó el descolgamiento de los fluidos.
- o) Se activo el empacador de boca del liner y se retiro la TP.

Nota: Durante toda la operación no se observo circulación de lodo a superficie.

Evaluación de la Cementación

Se probó la zapata durante 15 minutos, la presión se mantuvo constante durante toda la prueba. Posteriormente se probó el empacador de la boca del liner con un empacador dentro del liner, esta prueba también fue satisfactoria.

El objetivo de cubrir la totalidad del espacio anular con cemento no fue alcanzado, esto se debe a las grandes pérdidas de circulación que se presentaron durante la operación. Sin embargo, de acuerdo con el registro CBL/VDL/USI se logró cubrir una longitud de 661 metros (2846-2185 mD) en una zona donde las cementaciones convencionales no suelen cubrir más de 350 metros.

Del análisis del registro se determinó que la adherencia de los 2840 a los 2510 mD oscila entre un 90 y 95 %, con excepción del intervalo 2765 - 2715 mD en donde se observa la presencia de fluido y una adherencia de 60-70%.

El intervalo productor seleccionado se encuentra entre los 2750 y 2700 mD, por lo que se puede concluir que se tiene un buen sello hidráulico por encima y por debajo de dicho intervalo.

La siguiente imagen es un procesado tridimensional de la información recabada por el registro, en esta imagen se puede apreciar en donde hay cemento.

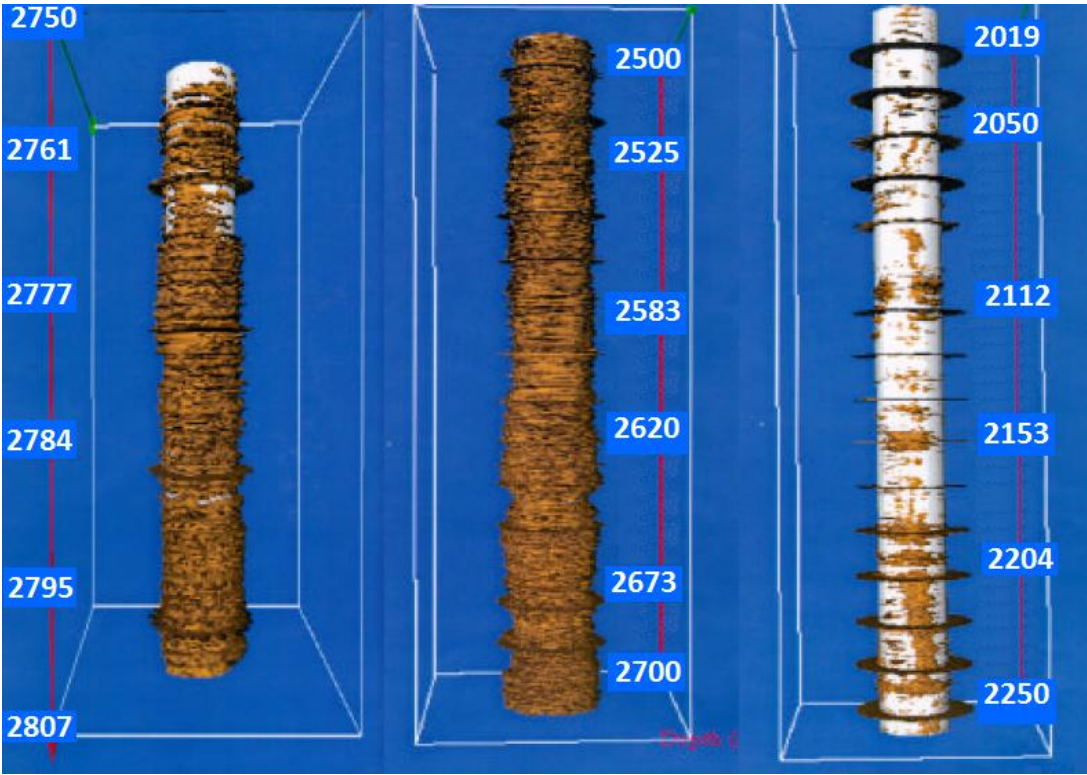


Figura V.4 Imagen tridimensional del cemento en el Pozo Cantarell 80.

4) Cantarell-28

Este pozo se encontraba produciendo un intervalo disparado de los 2165 a 2535 metros por un Liner de producción de 7 [pg]. Se programó una operación el 02 de Noviembre de 2001, con el objetivo de profundizar el intervalo productor.

Resumen de la Operación

Se perforaron 535 metros con una barrena de 5 7/8 a partir de la zapata del liner de 7 5/8 [pg] @ 2198 [mD], llegando a una profundidad de 2733 [mD], se utilizó un fluido de control de 0.9 [gr/cm³], no hubo circulación durante la profundización, se perdieron total de 8,175 [m³] de lodo.

Una vez concluida la perforación se realizó un viaje de reconocimiento, mediante el cual se determinó que el agujero estaba libre y se podía introducir el liner de 5 [pg] para su explotación, por lo que se introdujo el liner y se ancló a los 2733 [mD]. Después se procedió a la cementación del liner.

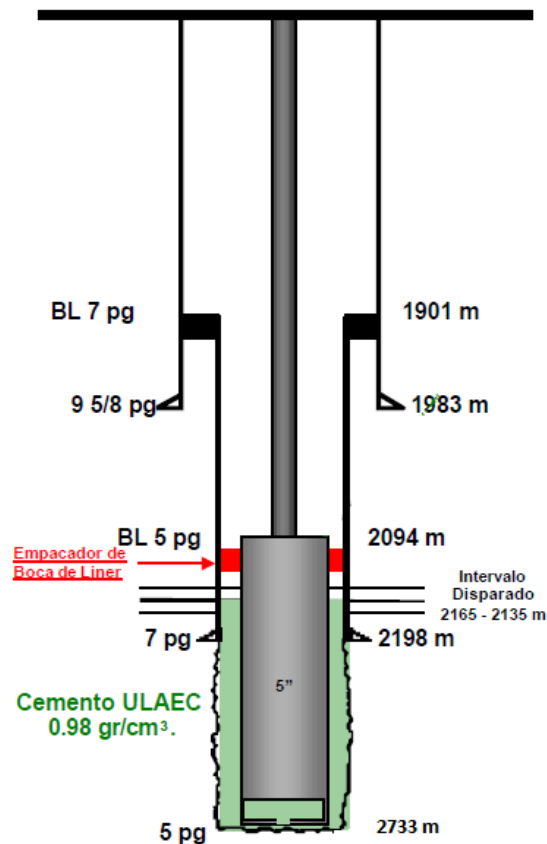


Figura V.5 Pozo Cantarell 28.

Cementación

Debido a los problemas de pérdida de circulación total y a que se atravesó el casquete de gas durante la perforación de este pozo, se decidió cementar el pozo con un cemento ultraligero con una densidad menor a la del agua, eligiendo el LiteCrete de Schlumberger con una densidad de 0.98 [gr/cm³].

Debido a las dos condiciones anteriormente mencionadas, se intento llenar el pozo con lodo de baja densidad, el nivel de fluido llego hasta aproximadamente los 1100 [m]. Además, se programó bombear fluido de control por el espacio anular durante la cementación

Programa de la Cementación:

- 8 [bls] de Diesel con surfactante
- 20 [bls] de Espaciador
- 47.7 [bls] de lechada LiteCrete de 0.9 [gr/cm³]
- 83.6 [bls] de bache desplazante de 0.9 [gr/cm³]

Esta cementación no fue realizada mediante la técnica de descolgamiento de los fluidos, la operación fue realizada de la siguiente forma:

- a) Se instaló el cabezal de cementación y las líneas superficiales
- b) Se probó la línea de cementación @ 4000 [psi]
- c) Se llenó el pozo con 27 [bls] de lodo de baja densidad 0.9 [gr/cm³]
- d) Se bombearon 8 [bls] de bache lavador @ 2 [bpm] y 45 [psi]
- e) Se bombearon 20 [bls] de bache espaciador @ 2 [bpm] y 45 [psi]
- f) Se bombearon 47.7 [bls] de lechada @ 3 - 3.5 [bpm] y 135 [psi]
- g) Se soltó el dardo de desplazamiento

- h) Se bombearon 83.6 [bls] de bache para desplazar, el gasto varió en un rango entre 1.3 y 3 [bpm] con el objetivo de no inducir una mayor pérdida de circulación durante la operación. La presión al finalizar el bombeo del bache desplazante fue de 1000 [psi]. Se observó el acoplamiento de los tapones a los 48.35 [bls] y 230 [psi].
- i) Se revisó el equipo de flotación.
- j) Se liberó el conjunto colgador y se levanto la TP, se cerró el pozo y se esperó fraguado.
- k) Se activo el empacador de boca del liner.

Nota: Durante el desarrollo de la operación se observó pérdida total de circulación.

Evaluación de la Cementación

Una vez fraguado del cemento, se bajo para detectar si había cemento en la boca del liner, se encontró cemento 7 metros arriba del liner de explotación, el cual fue rebajado con el molino. Después, se molieron el tapón, el cople de retención y cemento compacto que se detecto entre los 2688 - 2717 [mD].

Se realizó una prueba de presión con 1000 [psi] durante 30 minutos, el resultado fue satisfactorio. El registro CBT/USI muestra que el mejor índice de adherencia se encuentra desde los 2405 [mD] hasta la zapata del liner de 5", en el intervalo de interés (2655 a 2705 [mD]) se obtuvo una adherencia del 80 al 90%.

En la zona en que hubo pérdida total de circulación durante la perforación (2234 a 2409 [mD]), el registro mostró una adherencia del 25 al 50 %. Sin embargo, el registro también muestra micro anillos de cemento en esta zona.

Este fue el primer trabajo de cementación en el que se encontró cemento arriba de la boca del liner en el campo Cantarell, el pozo Cantarell 28 fue el cuarto trabajo de cementación con cementos ultraligeros de alto esfuerzo a la compresión.

5) Cantarell-447

Resumen de la Operación

La operación de perforación y terminación del pozo Cantarell 80 fue llevada a cabo el 08 de diciembre del 2001, se perforó el agujero con una barrena de 10 5/8[pg] hasta los 2754 [mD] utilizando un lodo bentonítico de baja densidad 0.97 [gr/cm³]. El objetivo fue dejar cementada una TR de 9 5/8 [pg] en la “Brecha del Paleoceno, Cretácico Superior”. Se presento pérdida total de circulación a los 2028 [mD].

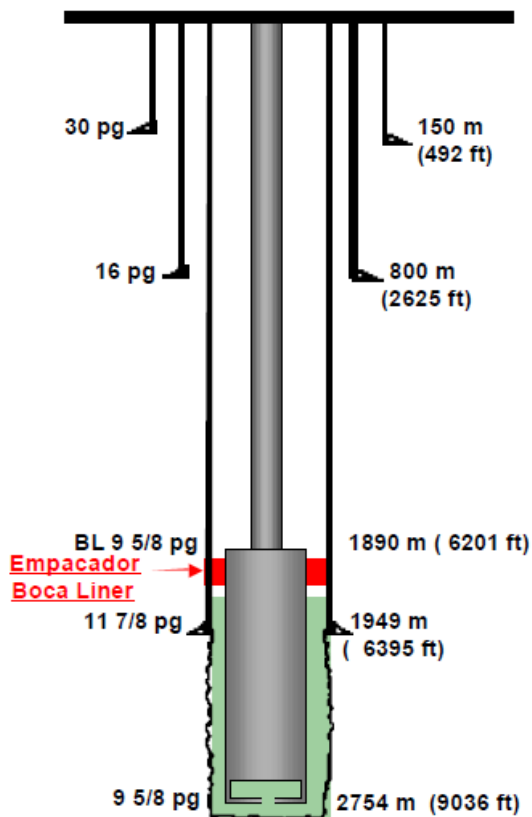


Figura V.5 Pozo Cantarell 447.

Cementación

Debido al grave problema de pérdida de circulación se decidió realizar una cementación ultraligera, se eligió el cemento UltraCampLite de Halliburton, con una densidad de 1.01 [gr/cm³].

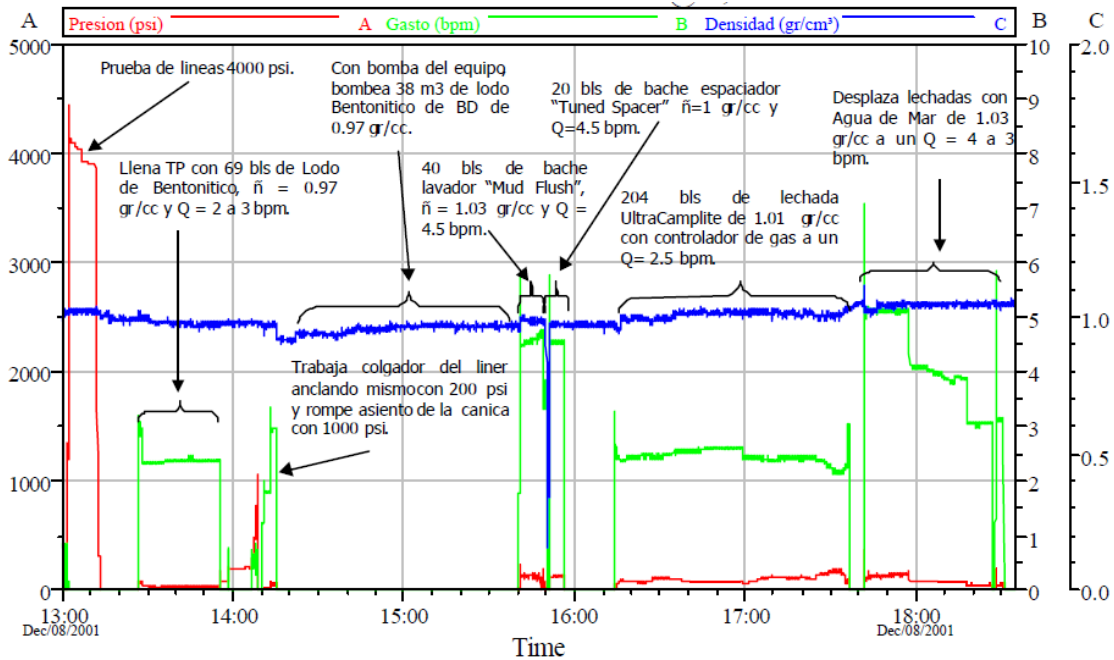
Programa de la Cementación:

- 40 [bls] de lavador “Mud-Flush” con una densidad de 1.03 [gr/cm³]
- 20 [bls] de espaciador “Tuned-Spacer” con una densidad de 1.0 [gr/cm³]
- 204 [bls] de lechada UltraCampLite de 1.01 [gr/cm³]
- 200 [bls] de agua de mar 1.3 [gr/cm³]

Una vez anclado el liner, se inicio la cementación, la cual se desarrolló de la siguiente forma:

- a) Se instaló el cabezal de cementación y las líneas superficiales
- b) Se probó la línea de cementación @ 4000 [psi]
- c) Se bombearon 40 [bls] de bache lavador @ 4 - 4.5 [bpm] y 100 - 125 [psi]
- d) Se bombearon 20 [bls] de bache espaciador @ 4 - 4.5 [bpm] y 100 - 125 [psi]
- e) Se bombearon 204 [bls] de lechada @ 2.5 [bpm] y 57 - 180 [psi]
- f) Se soltó el dardo de desplazamiento
- g) Se bombearon 200 [bls] de agua de mar @ 3 - 5 [bpm] y 47 - 145 [psi].
- h) Se revisó el equipo de flotación.
- i) Se liberó el conjunto colgador y se levanto la TP, se cerró el pozo y se esperó fraguado.
- j) Se activo el empacador de boca del liner.

Nota: Durante la cementación se bombeó lodo bentonítico por el espacio anular y se suspendió cuando el bache lavador comenzó a salir por el espacio anular.



Evaluación de la Cementación

Una vez fraguado el cemento (18 horas) se realizó una prueba con el Ultra Cement Analyzer (UCA), dicha prueba mostró que el cemento había desarrollado un esfuerzo a la compresión de 1380 [psi].

También, se realizó una prueba de presión con 1000 [psi] durante 30 minutos, el resultado fue satisfactorio. Después, se bajo para registrar la cima del cemento, la cual se detectó a los 2725 [mD], el cemento fue rebajado con el molino hasta los 2736 [mD].

El registro CBL / CAST-V mostró una adherencia de 95 – 100 % en el intervalo de 2726 a 2626 [mD], de 85 – 95% en el intervalo de 2625 a 2450 [mD], de 75 – 85% en el intervalo de 2450 a 2190 [mD] y de 60 – 75% en el intervalo de 2190 a 2120 [mD]. La adherencia promedio de los 2726 a los 2190 [mD] es de 85 %.

Las pruebas y los registros realizados para verificar la calidad de la cementación muestran resultados satisfactorios, por lo que se puede concluir que fue un trabajo de cementación eficiente.

V.2 OTROS CASOS EN EL MUNDO

Trabajos realizados por Schlumberger

La siguiente tabla muestra los resultados de operaciones cementación que se realizaron con cementos ultraligeros de alto esfuerzo a la compresión obtenidos por la compañía Schlumberger en varios yacimientos en alrededor del mundo. La línea de cementos ultraligeros de esta compañía se denomina LiteCrete, los resultados obtenidos con este cemento en México ya se han comentado.

País	Cliente	φ de TR [pg]	Densidad de la Lechada [ppg]	Volumen [bls]
Kuwait	KOO	9 5/8	8.2	330
Kuwait	KOC	9 5/8	8.2	50
Colombia	HOCOL	7	9.2	75
US	SLB	7	8.7	75
Venezuela	Chevron	5	9.3	40
Venezuela	PRISA		9.1	30
Francia	COPAREX	7	9.2	21
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	545
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	545
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	550
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	535
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	520
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	320
Abu Dhabi	ADCO	9 5/8	8.5	590
Abu Dhabi	ADCO	LC Plug	8.5	200
Abu Dhabi	ADCO	13 3/8	8.5	780

Tabla I.2 Trabajos realizados con lechadas ultraligeras en el mundo por Schlumberger.

Trabajos realizados en medio oriente

En muchas zonas del medio oriente, sobre todo en el norte del Golfo, se presentan problemas de pérdida de circulación, el problema es tan grave que se suelen perforar los pozos utilizando agua como fluido de control, previendo una pérdida total de circulación.

La implementación de los cementos ultraligeros de alto esfuerzo a la compresión al inicio de los años 80 ha optimizado la calidad de los trabajos de cementación en el área, la cima del cemento en el espacio anular ha alcanzado alturas que no alcanzaban los cementos convencionales, en algunos casos la circulación ha sido de 100%, la adherencia mostrada en el CBL ha sido buena.

Los resultados obtenidos en las operaciones de cementación primaria utilizando cementos ULAEC han reducido la necesidad de cementaciones secundarias, lo que a su vez ha disminuido los costos de la perforación de los pozos en el medio oriente. La siguiente tabla muestra algunos de los trabajos realizados en el norte del Golfo.

Fecha	ϕ de TR [pg]	Densidad de la Lechada [ppg]	Volumen [bbl]
abr-81	9 5/8	9.5	356
may-81	9 5/8	9.5	143
jun-81	13 3/8	10.5	712
jul-81	9 5/8	8.95	232
sep-81	13 3/8	9.43	445
dic-81	13 3/8	11.46	445
ene-82	13 3/8	10	891
feb-81	24	10	712
feb-81	13 3/8	8.18	392

Tabla I.1 Trabajos pioneros de Cementación ultraligera con esferas de alta compresibilidad.

Resultados en EUA

Muchas formaciones someras que se atraviesan durante la perforación de los pozos en las aguas profundas del Golfo de México están mal consolidadas y tienen gradientes de presión anormales.

Se realizaron dos pruebas de campo en el sur de Texas, en formaciones que presentan condiciones similares a las que se encuentran en las aguas profundas del Golfo de México, las compañías que realizaron las cementaciones fueron CONOCO y DOE, el cemento que se probó fue el “Scotchlite Glass Bubble” de la compañía 3M. Este cemento está hecho con esferas vacías de vidrio, las cuales son extremadamente ligeras y tienen un alto esfuerzo a la compresión.

La primera prueba la realizó CONOCO en el sur de Texas, esta prueba fue diseñada para asegurar que la lechada fuese fácil de mezclar y bombear en la locación. Se programó cementar un segmento de tubería revestimiento (763 [m]) intermedia de 7” en un agujero de 8.75” de los 2743 [m] 1980 [m] con un cemento ultraligero de 1.08 [gr/cm³].

Los resultados obtenidos fueron positivos ya que la lechada fue de fácil mezclado en el sitio y se bombeo sin problemas.

La segunda prueba fue realizada por la compañía DOE en la región de Rocky Mountain, Wyoming en los E.U.A. en un pozo que también presentaba condiciones similares a las de los pozos de las aguas profundas del Golfo de México. Se programó cementar un segmento de tubería revestimiento de 7" en un agujero de 8.75" con un cemento ultraligero de 1.2 [gr/cm³]. El pozo tenía una profundidad de 1768 [m].

Se mezclaron y bombearon 100 [bls] de cemento ultraligero sin que se presentaran pérdidas de circulación ni algún otro problema. El registro ultrasónico que se corrió una vez cementado el pozo mostró una buena colocación del cemento, buena adherencia y un alto esfuerzo a la compresión desarrollado por el cemento.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Utilizar Cementos Ultraligeros de Alto Esfuerzo a la Compresión y la técnica de Cementación Descolgada, es la mejor opción para cementar tuberías de revestimiento en zonas de bajo gradiente de presión en las que se presentan problemas de pérdida de circulación.

Estas metodologías disminuyen y en algunos casos eliminan las pérdidas de circulación, lo cual evita la contaminación de acuíferos de agua dulce y de las zonas productoras, esto es de vital importancia hoy en día debido a la escases de agua dulce y de hidrocarburos, además, es importante obtener una cementación eficiente para dar soporte a la sarta de revestimiento y para protegerla de la corrosión.

En la medida en que los valores aproximados de los gradientes de presión de formación y de fractura y las características de las formaciones se aproximen más a las condiciones reales, el diseño y las operaciones de cementación serán más eficientes.

La técnica de Cementación Descolgada debe ser mejorada tanto en el diseño como en la parte operativa, ya que como se vio en algunos de los casos reales analizados, el cemento no se “colgó” es decir que no cayó por su propio peso, como se suponía que debía suceder.

Las cementaciones con cementos convencionales y con cementos espumados no son la opción indicada para zonas de bajo gradiente de presión en las que se presentan problemas de pérdida de circulación. Ya que pueden generar la pérdida de control del pozo, elevar los costos por la pérdida de lechada y la necesidad de cementaciones secundarias, contaminar las zonas productoras y los acuíferos de agua dulce.

Recomendaciones

Distintas compañías han desarrollado Cementos Ultraligeros de Alto Esfuerzo a la Compresión, esto es bueno porque genera competitividad, es importante conocer todas las opciones y determinar cuál es la mejor, aunque claro que para cada yacimiento se obtienen resultados distintos, así que no se puede determinar cuál es el mejor producto por si mismo sino que hay que determinar cuál es el mejor producto para cada yacimiento.

REFERENCIAS

- LIGERO COMO UNA PLUMA, DURO COMO UNA ROCA

Abdullah Al-Swaidi
Christian hun
José Luis Bustillos
Dominique Guillot
Joel Rondeau
Pierre Vigheaux
Husam Helou
José Antonio Martínez Ramírez
José Luis Reséndiz Robles

OIL FIELD REVIEW – Otoño del 2001

- ULTRALIGHT HOLLOW GLASS SPHERES IMPROVE CEMENT SLURRY PERFORMANCE

Fred Sabins

JPT – Febrero del 2003

- UNIQUE ULTRA LIGHT-WEIGHT CEMENT SLURRY COMPOSITIONS FOR USE IN UNIQUE WELL CONTROL CONDITIONS, LABORATORY EVALUATION, AND FIELD PERFORMANCE

C.H. Tanner and W.M. Harms

SPE 11486

- WELL CONTROL PROBLEMS AND SOLUTIONS

Neal Adams

PENN WELL 1980

- Información proporcionada por la GERENCIA DE PERFORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE POZOS, DIVISIÓN MARINA.