

**NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE AISLAMIENTOS SELECTIVOS POR
SQUEEZE PARA OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN EN POZOS DE PETRÓLEO.**

**SERGIO ANDRES PARRA NIÑO
HENRY CASTELLANOS VELASQUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2011**

**NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE AISLAMIENTOS SELECTIVOS POR
SQUEEZE PARA OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN EN POZOS DE PETRÓLEO**

**SERGIO ANDRES PARRA NIÑO
HENRY CASTELLANOS VELASQUEZ**

**Monografía para optar al título de
Especialista en Producción de Hidrocarburos**

**Director:
Ing. JAIME RAFAEL ARCINIEGAS.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2011**

AGRADECIMIENTOS HENRY

Doy gracias al todo poderoso por su amor infinito, guía, protección y misericordia.
a mi familia por su amor, respaldo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS SERGIO

A Dios por su todo amor, guía y esperanza en todos los momentos de mi vida; a mi abuelita Cándida por todas las enseñanzas, amor y protección que desde el cielo me envías; a mis papas Raquel y Gilberto por su amor, ejemplo, consejos y apoyo incondicional; a Blanquita por su amor, comprensión y compañía; a mi hermanos Juan Carlos, Tito y Diego por su compañía en momentos difíciles y felices de mi vida, a Jaime y Henry por su gran amistad y numerosas enseñanzas.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. TEORIA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE AISLAMIENTO ZONAL POR CEMENTACIÓN	19
1.1 CONCEPTOS BÁSICOS	19
1.1.1 Cementación	19
1.1.2 Clasificación API y ASTM de los cementos	19
1.1.3 Propiedades físicas de los cementos	20
1.1.4 Aditivos para las lechadas de cemento	20
1.1.5 Cementación forzada	21
1.1.6 Clasificación de las cementaciones forzadas	22
1.1.7 Cementaciones forzadas de acuerdo al trabajo a realizar	22
1.1.8 Cementaciones de acuerdo a la presión impuesta a la lechada de cemento	22
1.1.9 Cementaciones de acuerdo a la técnica de colocación de la lechada de cemento	23
2. VARIABLES Y PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS OPERACIONES DE AISLAMIENTO ZONAL POR CEMENTACION	25
2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y PRESIÓN DE FORZAMIENTO DEL CEMENTO	26
2.2 CAPACIDAD DE LOS EQUIPOS	26
2.3 VOLUMEN DE FORZAMIENTO DE LA LECHADA CEMENTO	27
2.4 ANCLAJE DE LOS EMPAQUES	27

3. NUEVA METODOLOGIA DE DISEÑO DE OPERACIONES DE AISLAMIENTO ZONAL POR CEMENTACION PARA OPTIMIZAR LA PRODUCCION EN POZOS DE PETROLEO Y OBTENER EL ÉXITO DEL TRABAJO	28
3.1 ANTECEDENTES	28
3.2 DEFINICIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE OPERACIONES DE CEMENTACIÓN PARA AISLAMIENTO ZONAL	32
3.2.1 Consideraciones de la nueva metodología de diseño de aislamientos selectivos por squeeze	33
3.2.2 Base conceptual	34
3.2.3 Modelo matemático de cálculo del volumen de la arena de producción	37
3.2.4 Esquema de aplicación de la nueva metodología de diseño de aislamientos selectivos por squeeze para optimizar la producción en pozos de petróleo	39
4. APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGIA EN LOS TRABAJOS REALIZADOS	44
4.1 CONSIDERACIONES ESPECIALES DE EXPERIENCIA OPERACIONAL PARA LA APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO	44
4.2 PROCEDIMIENTOS PARA LA EJECUCIÓN DE OPERACIONES DE AISLAMIENTO DE ZONAL POR CEMENTACIÓN	45
4.2.1 Procedimiento para aislamiento zonal por cementación forzada con juego de empaques.	45
4.2.2 Procedimiento para aislamiento zonal por cementación forzada bradenhead	48

4.2.3 Procedimiento para aislamiento zonal por cementación balanceada contra la presión de formación	51
4.3 TRABAJOS REALIZADOS	53
5. EVALUACION TECNICO ECONOMICA DE LA APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGIA DE DISEÑO	62
5.1 EVALUACIÓN TÉCNICA	62
5.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA	69
5.2.1 Consideraciones de la evaluación económica	70
5.2.2 Evaluación económica de la ejecución del trabajo de aislamiento zonal por cementación con la implementación de cada una de las metodologías de diseño.	71
6. CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFIA	77

LISTA DE GRAFICAS.

	pág.
Grafica 1. Desempeño histórico de las operaciones de aislamiento zonal por squeeze ¡Error! Marcador no definido.	
Grafica 2. Porcentaje de éxito histórico de las operaciones de aislamiento zonal	29
Grafica 3. Metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal con base en modelos estadísticos	32
Grafica 4. Balance de masa del volumen de lechada de cemento	35
Grafica 5. Normalización de los datos de concentración de arena para cada punto de prueba de producción de fluidos	38
Grafica 6. Cálculo del volumen total de la arena de producción	38
Grafica 7. Espesor de aislamiento en operaciones exitosas y mínimo para diseño	40
Grafica 8. Volumen de lechada de cemento requerido para formar anillos de aislamiento en pozos con casing de producción de 7"	40
Grafica 9. Árbol de decisión de la aplicación de la nueva metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal mediante cementaciones balanceadas y forzadas	42
Grafica 10. Aislamiento zonal por cementación forzada con juego de empaques	47
Grafica 11. Aislamiento zonal por cementación forzada bradenhead	49
Grafica 12. Aislamiento zonal por cementación balanceada contra la presión de formación.	51

Grafica 13. Curva de producción del pozo 1 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación	52
Grafica 14. Curva de producción del pozo 2 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación	53
Grafica 15. Curva de producción del pozo 3 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación	54
Grafica 16. Curva de producción del pozo 4 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación	¡Error! Marcador no definido.
Grafica 17. Curva de producción del pozo 5 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación	56
Grafica 18. Curva de producción del pozo 6 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación	58
Grafica 19. Curva de producción del pozo 7 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación	59
Grafica 20. Curva de producción del pozo 8 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación	60
Grafica 21. Tipos de operaciones de aislamiento zonal por cementación	64
Grafica 22. Presiones efectivas de squeeze o balanceo de las operaciones de aislamiento zonal por cementación	64

Grafica 23. Presiones efectivas de prueba de las operaciones de aislamiento zonal por cementación	65
Grafica 24. Relación del volumen de lechada de cemento por diseño y el volumen real dejado detrás del casing	66
Grafica 25. Desempeño histórico de las operaciones de aislamiento zonal por squeeze con los datos de la aplicación de la nueva metodología en 2010	66
Grafica 26. Porcentaje de éxito histórico de las operaciones de aislamiento zonal por tipo de metodología de diseño	67

LISTA DE TABLAS.

	pág.
Tabla 1. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 1	52
Tabla 2. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 2	53
Tabla 3. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 3	54
Tabla 4. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 4	55
Tabla 5. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 5	56
Tabla 6. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 6	57
Tabla 7. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 7	58
Tabla 8. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 8	59
Tabla 9. Balance de ahorro / ganancia total de las 8 operaciones	60
Tabla 10. Balance de ahorro / ganancia total por pozo	60
Tabla 11. Parámetros de aplicación de la metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal por cementación	61
Tabla 12. Parámetros de aplicación de la metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal por cementación	62
Tabla 13. Resultados de desempeño de la metodología de diseño	63
Tabla 14. Resultados de desempeño de la metodología de diseño	63
Tabla 15. Costo promedio de la operación de aislamiento zonal selectivo por cementación	68
Tabla 16. Analisis de costos de la implementación de la metodología de diseño propuesta	69

Tabla 17. Balance global de beneficio económico de la implementación de la nueva metodología de diseño propuesta	70
Tabla 18. Balance global de beneficio económico de la implementación de la nueva metodología de diseño propuesta	70
Tabla 19. Parámetros de entrada para la evaluación económica de la metodología de diseño anterior	72
Tabla 20. Parámetros de entrada para la evaluación económica de la nueva metodología de diseño propuesta	72
Tabla 21. Comparativo indicadores evaluación económica del trabajo de aislamiento zonal por cementación	73

RESUMEN

TÍTULO: NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE AISLAMIENTOS SELECTIVOS POR SQUEEZE PARA OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN EN POZOS DE PETRÓLEO*.

AUTORES: SERGIO ANDRES PARRA NIÑO**
HENRY CASTELLANOS VELASQUEZ

PALABRAS CLAVES:

Pozos de Petróleo, Aislamientos Selectivos Zonales, Cementación Forzada, Squeeze, Optimización de Producción.

DESCRIPCIÓN:

En la producción de pozos de petróleo el principal objetivo es producir el petróleo de la forma más eficiente desde el punto de vista técnico, ambiental y económico. Es por esto que se han desarrollado diferentes técnicas para optimizar la producción de petróleo y sobre todo en campos maduros donde se cuenta con la mayor producción de petróleo actualmente.

Dentro de las técnicas para optimizar la producción de petróleo está el aislamiento zonal selectivo por cementación, el cual busca aislar hidráulicamente zonas productoras con alta producción de agua, gas o que ya se encuentran depletadas.

En la búsqueda de ser más eficientes se desarrolló el presente proyecto con el fin de refinar y lograr una metodología que permitiera alcanzar el 100% de éxito en las operaciones de aislamiento zonal por cementación, como herramienta para la optimización de la producción de petróleo en un campo maduro.

Para esto se revisaron las diferentes técnicas de cementación forzada, los conceptos básicos, las metodologías existentes y aplicadas en el campo, los índices de éxito de ejecución histórica de este tipo de operaciones y las variables de mayor impacto sobre el diseño y éxito de la operación.

Con detalle se explica la base conceptual que se tuvo en cuenta para llegar a formular una nueva metodología que permitiera alcanzar el 100% de éxito. Por último se exponen los trabajos donde aplicando la nueva metodología se obtuvo 100% de éxito y que permitió optimizar la producción y adicionalmente mejorar los índices de gastos operacionales por trabajo realizado.

* Monografía

** Especialización en Producción de Hidrocarburos, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Director: JAIME RAFAEL ARCINIEGAS

ABSTRACT

TITLE: NEW DESIGN METHODOLOGY USING SELECTIVE ISOLATION TECHNIQUE "SQUEEZE" TO ENHANCE THE PRODUCTION OF OIL WELLS*.

AUTHORS: SERGIO ANDRES PARRA NIÑO**
HENRY CASTELLANOS VELASQUEZ

KEYWORDS:

Oil Wells, Selective Zonal Isolation, Cementation Forced, Squeeze, Production Optimization.

DESCRIPTION:

Among the techniques to optimize oil production is selective zonal isolation cementing, which seeks to isolate hydraulically producing areas with high water production, gas or that are already depleted.

In the quest to be more efficient this project was developed to refine and achieve a methodology to achieve 100% success in the operations of cement zonal isolation as a tool for the optimization of oil production in a mature field.

For this, we reviewed the various techniques of forced cement, the basic concepts, methodologies and applications in the field, the success rates of historical execution of such operations and the variables with the greatest impact on the design and successful operation.

It explains in detail the conceptual basis was taken into consideration before making a new methodology that would achieve 100% success. Finally, we set the work in which, applying the new methodology, we obtained 100% success and helped to optimize the production and further improve operational expenditure rates for work performed.

* Monograph

** Specialization in Management of Hydrocarbons, Petroleum Engineering School. Industrial University of Santander. Director: JAIME RAFAEL ARCINIEGAS

INTRODUCCIÓN

El proceso de extracción de petróleo en yacimientos convencionales en cualquier campo del mundo pasa por diferentes etapas durante su vida productiva de acuerdo a las características específicas del comportamiento del yacimiento; estas pueden ir desde su inicio con la implementación de estrategias de producción con pozos en flujo natural, pozos con sistemas de levantamiento artificial, intervención de pozos para trabajos de optimización de producción con base en el rediseño e implementación de nuevas tecnologías en los sistemas de levantamiento artificial y mejoramiento de la capacidad de flujo de las zonas productoras mediante la trabajos de estimulación, trabajos de reacondicionamiento para maximizar el drenaje de petróleo en el yacimiento y finalmente una etapa de implementación de tecnología de recobro mejorado con el objetivo de extraer el mayor porcentaje posible de petróleo original del yacimiento.

En general los trabajos de reacondicionamiento tienen como objetivo principal maximizar el drenaje de petróleo en el yacimiento, permitiendo un mejor comportamiento del flujo de petróleo y la optimización de todo el sistema de producción; para lograr este objetivo existen numerosas opciones de operaciones de reacondicionamiento dependiendo de la condición específica del pozo; para el caso en particular el cual es tema de estudio en este proyecto, es la operación de reacondicionamiento para aislamientos selectivos por squeeze en pozos donde arenas productoras superiores tienen alto corte de agua y deben ser aisladas para optimizar la producción o donde estas arenas deben ser aisladas para abrir a producción un prospecto inferior.

Durante la vida productiva de un campo petrolero se realizan trabajos de aislamientos zonales con cementaciones forzadas bajo la modalidad de squeeze convencional presurizado con empaques retenedores, los cuales en la mayoría de los casos presentaban problemas y fallas tanto en la fase de ejecución de la operación como en el aseguramiento de la integridad y estabilidad en el tiempo del sistema de aislamiento selectivo, causando con esto que los indicadores de éxito de este tipo de operación estuvieran por debajo del 50%, lo cual se ve reflejado en altos sobre costos operacionales y pérdidas de producción que impactan negativamente los balances económicos de la compañía.

A lo largo de los años se han realizado estudios encaminados a definir los parámetros de diseño críticos que determina el éxito o fracaso en el desarrollo de un trabajo aislamiento zonal selectivo por squeeze; una de las metodologías de diseño que se han propuesto y que a impactado positivamente los indicadores de éxito, está basada en una descripción y clasificación del tipo de operación de squeeze a realizar en un pozo específico teniendo en cuenta modelos estadísticos de aplicación de la ecuación de regresión logística e información historia de las condiciones de producción del cada pozo, sin embargo, aunque la implementación de esta metodología de diseño permitió incrementar el indicador de éxito de la operación de squeeze a un 65%, esta todavía no era totalmente efectiva y tenía vacíos conceptuales que daban cabida una gran incertidumbre en los parámetros de diseño críticos lo cual conllevaba a problemas y fallas de las operaciones de squeeze.

Con el objetivo de incrementar el porcentaje de éxito al 100% de este tipo de operación se plantea realizar una descripción teórica del trabajo de aislamiento selectivo por squeeze o cementación forzada e identificar los parámetros específicos de diseño y ejecución críticos para generar una formulación conceptual que conlleve a definir una metodología de diseño que permita realizar operaciones de squeeze eficientemente.

1. TEORÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE AISLAMIENTO ZONAL POR CEMENTACIÓN

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

1.1.1 Cementación. La cementación se define como un proceso dinámico que consiste en preparar una lechada (mezcla de agua y cemento) con equipos especiales de mezclado para luego bombearla y desplazarla hasta el hoyo abierto, hacia una zona preestablecida o punto específico en el pozo. Existen dos tipos principales de cementaciones: Primarias y secundarias

Cementación primaria: la cementación primaria es la técnica utilizada para colocar lechadas de cemento en el espacio anular entre el casing y las paredes del hoyo; el cemento, entonces se endurece y forma un sello hidráulico en el hoyo, evitando la migración de fluidos de la formación hacia el espacio anular, hacia yacimientos de menor presión o hacia la superficie; el cemento debe anclar, soportar la tubería de revestimiento, (evitando derrumbe de las paredes o la formación de cavernas dentro del hoyo) y protegerlo contra la corrosión de los fluidos de la formación.

Cementación secundaria: la cementación secundaria se define como toda operación en donde se bombea una lechada de cemento en un punto específico del pozo a una presión dada después de realizada la operación de cementación primaria; este tipo de operación se realiza con el objetivo de reparar cementaciones primarias defectuosas, reparación de rupturas en el casing o liner de producción y para realizar operaciones de aislamiento zonales selectivos en los intervalos productores³.

1.1.2 Clasificación API y ASTM de los cementos. Las normas API se refieren a la clase de cemento y las normas ASTM se refieren al tipo de cemento, estos están clasificados en:

➤ **Cemento clase A o tipo 1:**

Esta diseñado para emplearse hasta 1830 m de profundidad como máximo, con una temperatura de 77 °C y donde no se requieran propiedades especiales.

➤ **Cemento clase B o tipo 2:**

Está diseñado para emplearse hasta 1830 m de profundidad como máximo, con una temperatura de 77 °C y donde se requiere moderada resistencia a los sulfatos.

➤ **Cemento clase C o tipo 3:**

Está diseñado para emplearse hasta 1830 m de profundidad como máximo, con una temperatura de 77 °C y donde se requiere alta resistencia a la compresión temprana.

³ Ingeniería de cementaciones, tomo 7, (México 2005).

➤ **Cemento clase E:**

Este cemento se usa de los 1830 m hasta los 4270 m de profundidad con una temperatura de 143°C y alta presión. Se fabrica en alta y moderada resistencia a los sulfatos.

➤ **Cemento clase F:**

Este cemento se usa de 3050 m hasta 4880 m de profundidad con una temperatura de 160 °C, en donde exista alta presión. Se fabrica en alta y moderada resistencia a los sulfatos.

➤ **Cementos clase G y H:**

Comúnmente conocidos como los cementos petroleros, generalmente se emplean desde superficie hasta los 2240 m y dependiendo de la preparación específica, pueden modificarse con aceleradores y retardadores para ser usados en un amplio rango de presiones y temperaturas.

➤ **Cemento clase J:**

Este tipo de cemento fue diseñado para usarse hasta temperaturas estáticas de 177 °C y desde 3660 m hasta 4880 m de profundidad, sin necesidad del empleo de harina sílica, que evite la regresión de la resistencia a la compresión.

1.1.3 Propiedades físicas de los cementos. Los cementos de clasificación API presentan una gran variedad de propiedades físicas que permiten definir las características y determinar las aplicaciones particulares de cada tipo y clase bajo condiciones específicas⁴.

- Gravedad específica.
- Peso volumétrico
- Fineza de los granos del cemento.
- Distribución del tamaño de partícula.
- Tamaño promedio de partícula.
- Requerimiento de agua normal.
- Requerimiento de agua mínimo
- Densidad de la lechada.
- Resistencia a la compresión.
- Tiempo de bombeabilidad.

1.1.4 Aditivos para las lechadas de cemento. Los aditivos son compuestos químicos utilizados para modificar las características, propiedades físicas y desempeño del cemento para aplicaciones y/o requerimientos especiales, estos se clasifican dependiendo de la propiedad del cemento que modifican:

- **Aceleradores:** Son productos químicos que disminuyen el tiempo de fraguado e incrementan la velocidad de desarrollo de resistencia a la compresión.
- **Retardadores:** Son productos que incrementan el tiempo de fraguado.

⁴ Ingeniería de cementaciones, tomo 7, (México 2005).

- **Extendedores:** Son materiales que disminuyen la densidad del cemento y/o reducen la cantidad cemento por unidad de volumen del producto fraguado.
- **Densificantes:** Son materiales que incrementan la densidad del cemento.
- **Dispersantes:** Son productos químicos que disminuyen la viscosidad de las lechadas de cemento.
- **Controladores de filtrado:** Son materiales que controlan la pérdida de la fase acuosa en sistemas de cemento frente a zonas permeables.
- **Controlador de pérdida de circulación:** Son materiales que controlan la pérdida de cemento hacia zonas débiles en la formación o fracturas.

1.1.5 Cementación forzada. La cementación forzada se define como cualquier operación de cementación en la cual una lechada de cemento es forzada con presión en un punto específico en el pozo, después de la cementación primaria o inicial; esta operación es realizada para reparar una cementación primaria defectuosa o con presencia de canales, reparar fallas o rupturas en el casing o liner de producción y para controlar el movimiento de fluidos como agua, gas y petróleo dentro y/o alrededor del wellbore para proporcionar aislamientos selectivos en las formaciones productoras; además de la reparación de un trabajo de cementación primaria fallido, también se hacen cementaciones para eliminar o disminuir la entrada de agua dentro de una zona productora de hidrocarburos, reducir la relación de gas-aceite por aislamiento de una zona de gas, reparar una fuga en la tubería de revestimiento debido a problemas de corrosión, abandonar una zona superior depletada o no productora, taponar todo o una parte de una o más zonas de un pozo inyector, de tal forma que la dirección de los fluidos inyectados sea la deseada, sellar zonas de pérdida de circulación. Evitar la migración y/o comunicación entre zonas productoras y no productoras de hidrocarburos⁵.

La cementación forzada es necesaria por muchas razones, pero tal vez la más importante es la de aislar selectivamente la producción indeseada de fluidos del yacimiento permitiendo con esto optimizar la producción de petróleo; el elemento clave de una cementación forzada es la colocación del cemento en el punto deseado o en los puntos necesarios para lograr el objetivo. Puede ser descrita como el proceso de forzar la lechada de cemento dentro de los agujeros en la tubería de revestimiento y las cavidades detrás del mismo.

A menudo es difícil determinar por qué en algunos pozos se pueden ejecutar operaciones de cementación forzada exitosamente con un solo intento, mientras que en otros pozos del mismo campo, con condiciones mecánicas, variables y parámetros de producción similares se requiere repetir la operación en varias ocasiones hasta obtener el aseguramiento del objetivo principal del trabajo. Existen fundamentos teóricos que se deben tener en cuenta para una adecuada comprensión y aplicación de los principios de la cementación forzada.

⁵ Ingeniería de cementaciones, tomo 7, (México 2005).

1.1.6 Clasificación de las cementaciones forzadas. Las cementaciones forzadas se clasifican de acuerdo al tipo de trabajo a realizar en el pozo, de acuerdo al nivel de presión con la que se realizara el trabajo y de acuerdo a la técnica a usar.

1.1.7 Cementaciones forzadas de acuerdo al trabajo a realizar.

- Reparación de la cara de la formación: esta categoría de cementación forzada o squeeze se caracteriza básicamente por la reparación de trabajos de cementación primaria defectuosos o con presencia de canales y micro anulares que permiten el movimiento de fluidos no deseados de las zonas adyacentes a la zona productora.
- Reparación del pozo: este tipo de cementación forzada se caracteriza por el llenado con volúmenes pequeños de lechada de cemento en los túneles de las perforaciones y de la caverna detrás del casing causada por la producción de arena, seguido por un forzamiento contra la matriz de la formación hasta alcanzar la deshidratación y la generación de costra de cemento para obtener un aislamiento hidráulico efectivo.
- Reparación de la formación: este tipo de cementación forzada se caracteriza por el llenado con volúmenes grandes de lechada de cemento en los túneles de las perforaciones y de la caverna detrás del casing causada por la producción de arena, en este tipo de operación se puede presentar forzamiento de la lechada de cemento contra la matriz de la formación o simplemente la colocación de la lechada de cemento contra la presión del yacimiento; la ejecución de esta operación presenta muchas complicaciones desde el punto de vista operacional y no asegura el éxito de la operación debido a la gran incertidumbre de las variables que afectan el desempeño de esta⁶.

1.1.8 Cementaciones de acuerdo a la presión impuesta a la lechada de cemento.

- Cementación de alta presión: durante las cementaciones forzadas con alta presión se confina la zona objetivo con el fin de mantener la presión en un punto específico dentro del pozo, esto se logra con la instalación de un juego de empaques tipo Bridge Plug y Retenedor, luego se realiza una prueba de inyektividad en la formación bombeando agua a diferentes tasas para determinar las presiones durante el bombeo principal y posteriormente se bombea la lechada de cemento con agua de desplazamiento y forzamiento.

Conforme se avanza en el bombeo la presión empieza a incrementarse hasta alcanzar la presión máxima permitida por diseño para forzar contra la matriz formación, este punto de presión máxima es llamado usualmente presión de squeeze; la presión se mantiene momentáneamente contra la formación para verificar las condiciones estáticas y llenado completo de los túneles de las perforaciones y de la caverna detrás del casing hasta que

⁶ Remedial cementing practices document, pagina 10 a 52.

se obtenga la estabilización de la presión de squeeze, seguidamente se desconecta la sarta de trabajo del empaque retenedor para dejar confinada la presión de squeeze entre los empaques durante todo el tiempo de fragüe del cemento y de esta forma realizar el aislamiento exitosamente.

La operación de cementación forzada con alta presión puede igualmente ejecutarse solo con la instalación de un empaque Bridge Plug en fondo; esta variante operativa depende de las características particulares de la colocación de la lechada de cemento en el punto específico necesario dentro del pozo y del nivel de control de los volúmenes de los fluidos y presiones requeridos para el desarrollo del trabajo.

- Cementación a baja presión: durante las cementaciones a baja presión o cementaciones balanceadas contra la presión de formación, se requiere la utilización de un juego de empaques Bridge Plug y Retenedor para mantener el control de los volúmenes de los fluidos bombeados y de las presiones, posteriormente se bombea la lechada de cemento con agua de desplazamiento equivalente a la presión de estabilización de las columnas de fluidos con la presión estática del yacimiento; una vez se alcanza la estabilización de las columnas de los fluidos, se desconecta la sarta de trabajo del empaque retenedor para dejar confinada la presión del yacimiento entre los empaques durante todo el tiempo de fragüe del cemento.

La ejecución de una operación de cementación a baja presión solamente con el uso de un empaque Bridge Plug como base, presenta alto riesgo de fracaso operacional debido al poco control de los volúmenes de los fluidos bombeados y a la incertidumbre de las presiones efectivas en la zona objetivo.

1.1.9 Cementaciones de acuerdo a la técnica de colocación de la lechada de cemento.

- Cementación tipo bradenhead: es el método o técnica original para la realización de cementaciones forzadas o "squeeze", el cual es realizado con tubería de producción o tubería de perforación sin la utilización de empaques; una cantidad predeterminada de lechada es mezclada y bombeada a una profundidad determinada dentro del pozo empezando a descargar desde el fondo de la zona de interés hasta terminar en el tope, con el anular generalmente abierto.

La tubería es entonces retirada fuera de la lechada y se llena el pozo bombeando fluido de desplazamiento a través de la tubería hasta alcanzar presión de squeeze o hasta que se haya bombeado una cantidad predeterminada de fluido; de no ser alcanzada la presión de squeeze, se deja el tapón de cemento en la profundidad deseada forzándolo con una presión estabilizada en superficie o simple con la presión hidrostática de la columna del fluido de desplazamiento hasta alcanzar el tiempo de fragüe de la lechada de cemento, posteriormente se retira la sarta para correr tubería de trabajo con BHA para la perforación del tapón de cemento⁷.

⁷ Remedial cementing practices document, pagina 10 a 52.

Esta técnica es ampliamente usada para aislar zonas donde la producción de arena es baja y presentan volúmenes pequeños de cavernas detrás del casing.

La aplicabilidad de la técnica Bradenhead debe tener en cuenta en su diseño las especificaciones técnicas, características y condición de la tubería de revestimiento, debido a que durante el forzamiento de la lechada de cemento, estará sometida a las presiones de forzamiento las cuales pueden ser mayores que la presión de estallido.

- Cementación tipo Bullhead: esta técnica es la más sencilla pero es en la que se tiene menor control de los volúmenes y presiones de fluidos bombeados, es muy parecida a la técnica Bradenhead; el cemento es bombeado hasta el fondo de la tubería de trabajo que se ubicara cerca del tope de la zona de interés; durante toda la operación el anular permanece cerrado para que el cemento no pueda reversarse.

Uno de los inconvenientes más grandes de esta técnica es la contaminación que sufre el cemento con los fluidos de pozo antes de llegar a su punto de colocación, adicionalmente esta técnica no se puede aplicar en formaciones de baja presión en las cuales la presión de yacimiento es menor que la presión hidrostática del fluido de producción del pozo. El forzamiento de la lechada se realiza de la misma forma de la técnica Bradenhead, bombeando fluido de desplazamiento hasta alcanzar la presión de squeeze o forzar toda la lechada cemento en las cavernas detrás del casing.

- Cementación con el método de empaques: este método utiliza un juego de empaques Bridge Plug y Retenedor recuperable o permanente que es ubicado encima y debajo respectivamente de la zona objetivo, aislando hidráulicamente y mecánicamente el pozo del punto específico que se requiere aislar; esta técnica es la mas usada para el ejecución de trabajos de aislamiento zonal selectivo y en condiciones de incertidumbre de información del pozo debido a que se tiene un mayor control sobre el bombeo principal y adicionalmente la presión de squeeze queda confinada durante todo el tiempo de fragüe de la lechada de cemento entre el juego de empaques Bridge Plug y Retenedor; después del forzamiento, la sarta de trabajo es retirada para correrla nuevamente con un BHA para la molienda del juego de empaques y el tapón de cemento (en el caso de utilizar empaques permanentes), una vez el pozo quede sin ninguna restricción mecánica después de la molienda, se realiza una prueba hidrostática para verificar el correcto aislamiento hidráulico de la zona objetivo.

2. VARIABLES Y PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS OPERACIONES DE AISLAMIENTO ZONAL POR CEMENTACIÓN

No obstante la técnica usada durante un trabajo de aislamiento zonal por cementación, existen variables que deben ser consideradas antes de hacer un diseño; teniendo en cuenta que la lechada de cemento es sometida a presión diferencial contra una roca permeable, los fenómenos resultantes de esta condición son la filtración, la generación una capa maciza de cemento y en algunos casos el fracturamiento de la formación. La lechada de cemento que es sometida a una presión diferencial pierde parte de su agua en el medio poroso y se forma la capa de cemento parcialmente deshidratado.

La capa de cemento formada contra una formación permeable tiene una permeabilidad inicial alta, pero a medida que las partículas de cemento se acumulan, el espesor de la capa de cemento y la resistencia hidráulica se incrementan; como resultado, la velocidad de filtración decrece y la presión requerida para deshidratar la lechada de cemento se incrementa.

La velocidad de construcción de la capa deshidratada de cemento es una función de los siguientes parámetros⁸:

- ✓ Permeabilidad de la formación.
- ✓ Diferencial de presión aplicada.
- ✓ Tiempo de aplicación del diferencial de presión.
- ✓ Capacidad de la lechada de perder fluido a condiciones de fondo.

Cuando se realiza forzamiento de la lechada de cemento contra una formación de permeabilidad dada, la velocidad a la que decrece la deshidratación de la lechada esta directamente relacionada con la velocidad de perdida de agua.

Cuando es inyectada contra una formación de baja permeabilidad, la lechada con baja velocidad de filtrado se deshidrata lentamente, lo cual causa que el tiempo requerido para alcanzar la presión de forzamiento estabilizada sea mas alto que en formaciones de alta permeabilidad.

La lechada de cemento ideal para una operación de aislamiento zonal por cementación deberá ser diseñada para controlar la velocidad de construcción de la capa de cemento deshidratada y permitir la construcción de una capa uniforme con un filtrado proporcional sobre toda la superficie permeable.

La viscosidad juega un papel importante y debe controlarse para realizar el forzamiento apropiado de la lechada de cemento dentro de los espacios vacíos o cavernas detrás del casing. El tiempo de fraguado debe ser suficiente para preparar la lechada, bombearla al pozo, dejara posicionada en la profundidad deseada, efectuar la operación de forzamiento

⁸ RIKE, J.L., and Erick, Squeeze cementing: state of the art, Rike Service Inc. 1982.

hasta alcanzar la presión deseada acorde a la técnica empleada, descargar la presión y circular en reverso para eliminar la lechada sobrante.

Para lograr el objetivo de la ejecución de una operación exitosa se deben tener en cuenta los fundamentos básicos de las operaciones de aislamiento zonal por cementación:

1. El cemento no se introduce a la matriz de la formación.
2. Una lechada tiene en su composición básica partículas de cemento y agua.
3. Las partículas de cemento son demasiado grandes para introducirse a la formación por lo tanto se separa del agua cuando es sometida a una presión diferencial contra un medio permeable.
4. Debido a la presión diferencial, el filtrado se introduce en la formación y las partículas del cemento forman una capa en las paredes del medio permeable.
5. Durante el proceso de formación de la capa de cemento deshidratada, la presión de bombeo aumenta hasta alcanzar la presión de forzamiento máximo o presión de squeeze, la cual por diseño debe ser menor que la presión de fractura.

2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y PRESIÓN DE FORZAMIENTO DEL CEMENTO

La resistencia compresiva adecuada para obtener un trabajo exitoso de aislamiento zonal por cementación debe estar sobredimensionada, esta debe tener en cuenta desde las presiones de confinamiento de la lechada de cemento y las pruebas hidrostáticas de verificación del aislamiento hidráulico realizadas durante el desarrollo y ejecución de la operación, hasta las presiones estáticas y dinámicas que se presentan en el pozo después de realizada de la operación.

Aunque la contaminación del cemento con el fluido del pozo o el fluido de completamiento puede reducir la resistencia a la compresión del cemento, esta reducción puede ser considerada insignificante, por lo cual puede ejecutarse la operación sin fallas asociadas a la resistencia a la compresión.⁹

2.2 CAPACIDAD DE LOS EQUIPOS

Tenga en cuenta las capacidades de los equipos de superficie y las características de las tuberías para conocer la presión máxima de forzamiento. Este análisis rara vez se pasa por alto, sin embargo, el volumen de lechada y su relación con la presión nunca debe ser descuidada. Se debe diseñar el trabajo de manera que la presión de forzamiento de la lechada de cemento durante el trabajo no debe exceder la capacidad de los equipos, del rating de presión de la cabeza de pozo o limitaciones de presión que existan en el casing.

⁹ RIKE, J.L., and Erick, Squeeze cementing: state of the art, Rike Service Inc. 1982.

Tenga en cuenta la resistencia gel de la lechada pues de esta dependerá la presión para que la lechada inicie su movimiento.

2.3 VOLUMEN DE FORZAMIENTO DE LA LECHADA CEMENTO

El volumen de lechada de cemento es otro parámetro importante pues este no debe tener un volumen de exceso tal que atrape la tubería de trabajo o producción dado el caso en donde se alcance una presión de squeeze antes de lo planeado teniendo la tubería llena de lechada y poco tiempo de bombeo disponible.

2.4 ANCLAJE DE LOS EMPAQUES

Los empaques requeridos para realizar la operación, dado el caso del método de empaques, deben fijarse, tan cerca como sea posible y conveniente operacionalmente del objetivo; esto permite que una cantidad mínima de fluido del pozo sea forzado en la formación delante de la lechada de cemento. Para lograr esto se realiza el asentamiento de los empaques Bridge Plug y Retenedor con línea eléctrica correlacionando en profundidad con el registro Gamma Ray.¹⁰

¹⁰ RIKE, J.L., and Erick, Squeeze cementing: state of the art, Rike Service Inc. 1982.

3. NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE OPERACIONES DE AISLAMIENTO ZONAL POR CEMENTACIÓN PARA OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN EN POZOS DE PETRÓLEO Y OBTENER EL ÉXITO DEL TRABAJO

La metodología de diseño de aislamientos selectivos con cementaciones por squeeze para optimizar la producción en los pozos, mejorar la eficiencia del levantamiento artificial, maximizar los indicadores de éxito operacional, costos y tiempos de ejecución, se implementara en operaciones de reacondicionamiento con los pozos candidatos que cumplen con los siguientes criterios y características:

1. Pozo que alcanza su límite económico en su zona actual de producción.
2. Pozo que su presión de yacimiento no permite una producción continua para que sea viable económicamente su operación.
3. Pozo con alto corte de agua.
4. Pozo con baja eficiencia del levantamiento artificial.
5. Pozo con prospectos de producción de petróleo en zonas inferiores.
6. Pozo sin problemas mecánicos desde la zona interés de la operación hasta superficie.

3.1 ANTECEDENTES

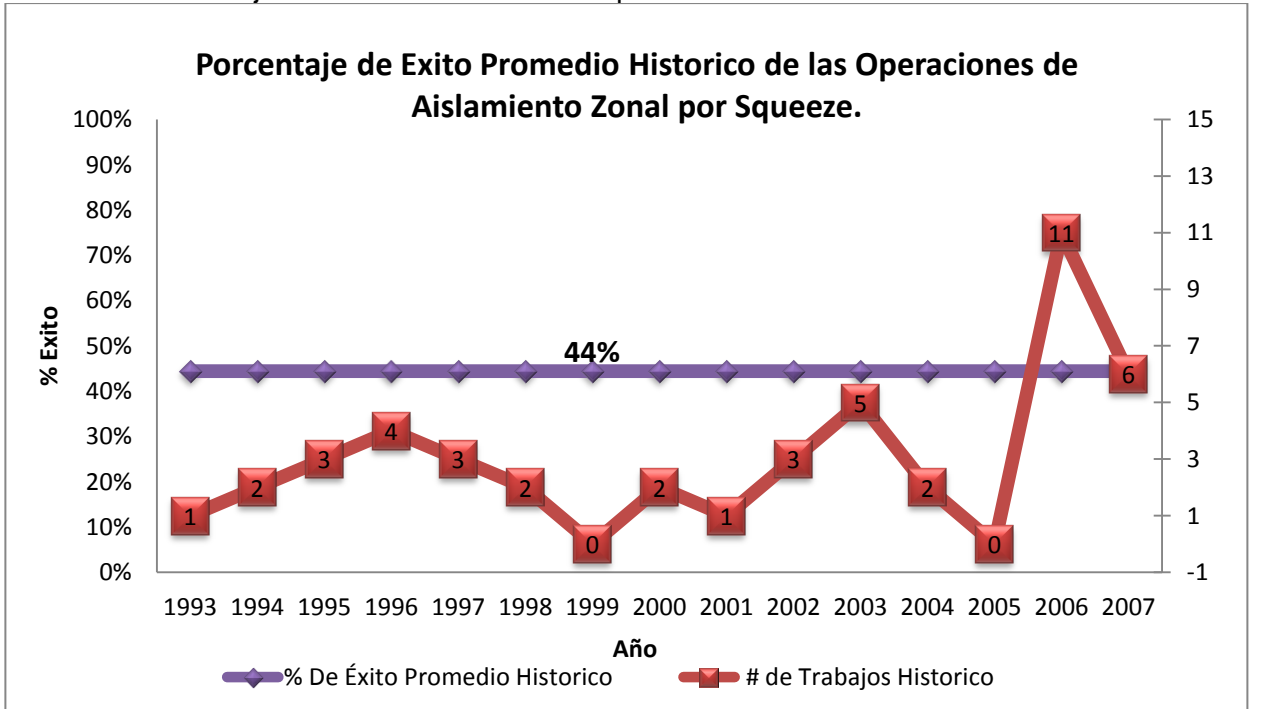
Los trabajos de aislamiento zonal por cementación forzada realizados en la historia operacional se realizaban con el método convencional de empaques, haciendo la prueba de inyectividad y de acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de inyectividad en otros trabajos similares y mediante analogías se definía que tipo de pre flujos y tipo de lechada a utilizar (Convencional o Tixotrópica) durante la ejecución de las operaciones. Posteriormente se bombeaban fluidos espaciadores seguido por la lechada de cemento; en el evento en el que se decidiera utilizar lechada convencional se bombeaba hasta alcanzar presión de forzamiento, si esta presión no era alcanzada se sobre desplazaba con agua hasta obtener retornos limpios en superficie y se repetía nuevamente el mismo procedimiento, hasta que se tuviera éxito o hasta que fuera económicamente viable. En el evento en el que se determinara utilizar lechada tixotrópica, se bombeaban los pre flujos seguido de la lechada de cemento realizando hesitaciones al cemento, luego se desplazaba con agua hasta alcanzar presión de forzamiento; el uso de este esquema de diseño dejaba muchas variables sin análisis y permitía que la incertidumbre de los datos actuara en contra de resultados de operaciones exitosas.

Grafica 1. Desempeño histórico de las operaciones de aislamiento zonal por squeeze.



Fuente: Autores.

Grafica 2. Porcentaje de éxito histórico de las operaciones de aislamiento zonal.



Fuente: Autores.

El porcentaje de éxito promedio histórico que se obtuvo realizando las operaciones sin ningún estándar de diseño alcanza el 44% de efectividad, esto conllevaba a gastos operacionales mucho mayores a los planeados y por consiguiente impacta directamente los rendimientos económicos de la compañía.

En el año 2007 el Ing. Daniel Higuera Roa realizó su práctica en la empresa Occidental de Colombia y desarrollo como proyecto de grado la evaluación de las prácticas de aislamiento de zona por squeeze con el fin de incrementar el porcentaje de éxito de estos trabajos, en esa oportunidad se realizó una recopilación de toda la información y datos relacionados con cada pozo en particular:

- Información petrofísica.
- Historia de producción.
- Información de las condiciones mecánicas del pozo.
- Historia de las intervenciones al pozo.

Una vez realizada la recopilación, se identifica estadísticamente las variables que más impactaban el desarrollo y el resultado de los trabajos de cementación forzada, la clasificación inicial que se determina para definir el modelo estadístico de correlación de éxito o fracaso con las variables del pozo fue la siguiente:

1. Éxito (Incluye todas la operaciones con resultado exitoso en uno o en varios intentos dentro de la misma intervención del pozo).
2. Fracaso (Incluye todas las operaciones no exitosas y aquellas que inicialmente fueron exitosas pero fallaron después de un tiempo).

En el análisis de las variables del modelo estadístico se especifica aquellas que de acuerdo con el modelo de correlación impactan en gran medida el resultado de éxito o fracaso de una operación de cementación forzada, estas variables son:

- Días de completamiento de la zona a aislar.
- Formación productora.
- Espesor del intervalo a aislar.
- Permeabilidad de la formación productora.
- Porosidad de la formación productora.
- Producción acumulada de fluido.
- Tasa de producción.
- Concentración de arena de producción.

Adicionalmente el modelo incluyo datos de diseño de la lechada de cemento, información y condiciones operacionales tales como:

- Numero de intentos de cementación forzada realizados en el pozo.
- Resultados de la prueba de inyektividad.
- Densidad de la lechada de cemento.
- Volumen de lechada de cemento finalmente colocado.

Después del análisis estadístico se encontró en su momento que el evento en el cual las operaciones de cementación forzada fracasaron era cuando convergían las siguientes condiciones de las variables: el intervalo a aislar tenía mayor espesor, altas tasas de producción de fluido y arena lo que generaba la creación de cavernas detrás del casing, lo que hacía que se necesitara mayores volúmenes de lechada de cemento para realizar la operación de aislamiento zonal.

Después de validar el modelo estadístico se elaboró la metodología, como resultado de los análisis realizados se estableció la primera metodología de diseño con base estadística para las cementaciones forzadas debido a que el método anterior (Método convencional de aislamiento zonal desplazando la lechada de cemento hasta alcanzar la presión de squeeze) no obtenía buenos resultados ya que se necesitaba de varios intentos para alcanzar el éxito, causando con esto altos costos operacionales.

La metodología estadística definió tres categorías principales, en las cuales aplicaban los grupos de pozos que cumplieran con los parámetros especificados para cada categoría:

- Tipo I: Aplica a formaciones depletadas, con “altas” permeabilidades, altas tasas de producción, grandes volúmenes producidos, alta producción de arena (grandes cavernas).
- Tipo II: Aplica a formaciones depletadas, con “medianas” permeabilidades, medianos volúmenes producidos, mediana producción de arena (pequeñas cavernas).
- Tipo III: Aplica a formaciones depletadas con “baja” permeabilidad y sin cavernas.

La definición de la permeabilidad en la tres categorías, es subjetiva y tiene en cuenta los valores presentados en las formaciones del campo los cuales fluctúan entre 1 y 20 Darcy.

A continuación se muestra en resumen el esquema resultante desarrollado a partir de la definición de las tres categorías de la metodología de diseño estadístico para los trabajos de aislamiento zonal por cementación.¹¹

¹¹ HIGUERA, Daniel. “Evaluación de las prácticas de aislamiento de zonas intermedias mediante trabajos de cementación remedial en la zona de llanos norte”. UIS. 2007.

Grafica 3. Metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal con base en modelos estadísticos.



Fuente: Higuera D. "Evaluación de las prácticas de aislamiento de zonas intermedias mediante trabajos de cementación remedial en la zona de llanos norte".

3.2 DEFINICIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE OPERACIONES DE CEMENTACIÓN PARA AISLAMIENTO ZONAL

La primera metodología de diseño de cementaciones forzadas, la cual fue descrita anteriormente está basada en una definición y clasificación del tipo de operación de squeeze a realizar en un pozo, teniendo en cuenta correlaciones y modelos estadísticos, en consecuencia se presentaba gran incertidumbre en los parámetros de diseño específicos para cada trabajo en particular debido a que la metodología estableció lineamientos de diseño dentro de las tres categorías que definió y estas aplicaban para los grupos de pozos que cumplieran con los parámetros de las categorías pero no para cada pozo.

Uno de los grandes desafíos que presenta alcanzar el 100% de éxito y confiabilidad en la ejecución de una cementación forzada para aislamiento zonal es la especificación de una metodología que permita asegurar correctamente cada diseño de este tipo de operaciones con las variables y datos de cada pozo en particular, por lo cual la forma más acertada de definir esta metodología es teniendo en cuenta en su formulación una mezcla entre una base principal conceptual y unos lineamientos descritos a partir de la experiencia e historia operacional del campo.

A continuación se exponen las bases teóricas y lineamientos operacionales que conjuntamente definen los parámetros de diseño de la nueva metodología de aislamientos selectivos por squeeze para optimizar la producción en pozos de petróleo.

3.2.1 Consideraciones de la nueva metodología de diseño de aislamientos selectivos por squeeze. Las siguientes son las consideraciones que se tuvieron en cuenta para la formulación de la metodología de diseño.

- ✓ El objetivo principal de una operación de aislamiento zonal por cementación es proporcionar integridad y estabilidad del sello hidráulico en el tiempo, llenando de cemento o posicionando una pared aislamiento en los túneles de las perforaciones y las cavernas detrás del casing causadas por la producción de arena.
- ✓ De acuerdo con la pruebas de laboratorio realizadas por la empresa de servicios encargada de las operaciones de cementación, la lechada de cemento clase G con una densidad de 15,8 lb/gal, no puede entrar en formaciones con permeabilidades menores a 20 Darcy; este parámetro es determinante en la clasificación del árbol de decisión de la metodología de diseño para definir el tipo general de la operación de cementación a realizar.
- ✓ Una vez especificada la permeabilidad de la formación en valores menores a 20 Darcy, la definición de utilizar una pared de aislamiento o cementación balanceada contra la presión de formación para ejecutar las operaciones de aislamiento zonal dependerá del volumen equivalente calculado de los túneles de las perforaciones y de la caverna detrás del casing.

- ✓ La clasificación que se realiza para las operaciones de aislamiento zonal aplicables a la metodología de diseño, contempla dos tipos generales de cementación.

- 1. Cementación Forzada o Squeeze.**

- 2. Cementación Balanceada Contra la Presión de Formación.**

- ✓ La cementación forzada o squeeze realiza un forzamiento de la lechada de cemento contra las paredes o superficie del volumen de los túneles de las perforaciones y de la caverna detrás del casing, alcanzando presiones efectivas en profundidad máximas equivalentes al 80% de la presión de fractura.
- ✓ La cementación balanceada realiza una estabilización de la columna de lechada de cemento y agua de desplazamiento, con la presión estática del yacimiento.
- ✓ Durante la historia operacional del campo se han realizado la mayoría de las operaciones de aislamiento zonal por medio de cementaciones forzadas con empaques, obteniendo indicadores de éxito operacional inferiores al 65%; el planteamiento de una metodología de diseño con una formulación conceptual permitirá un aseguramiento en el diseño y en los resultados del desarrollo de estas operaciones.

3.2.2 Base Conceptual. Durante la vida productiva de un pozo en una formación específica, las condiciones de presión y tasa en condiciones dinámicas pueden lograr afectar el equilibrio de las fuerzas inter granulares de la arena de la formación y originar con esto una desestabilización y posterior movimiento de los granos de arena hacia el pozo, esta situación se presenta básicamente porque la sumatoria de fuerzas que favorecen el movimiento de los granos de arena, dentro de las cuales se encuentran los esfuerzos mecánicos causados por las presiones de sobrecarga y los esfuerzos de arrastre ocasionados por la velocidad de flujo y viscosidad asociadas a la producción misma del pozo exceden las fuerzas de cohesión inter granular asociadas a la resistencia de la roca, presión capilar y resistencia de la cementación inter granular.

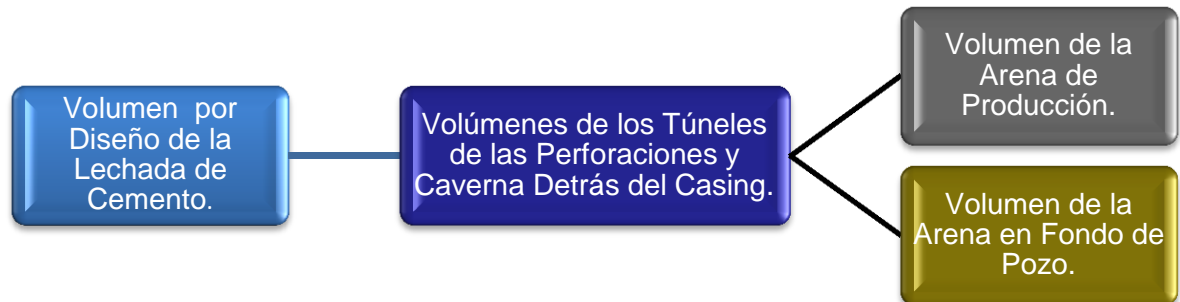
Adicional a la arena que sale inicialmente hacia el pozo causada por las perforaciones, los efectos mencionados de las condiciones dinámicas de producción generan movimiento de los granos de arena hacia el pozo, causando con esto que el volumen de arena producido sea equivalente a espacios detrás del casing ocupados solamente por los fluidos del yacimiento, estos espacios son normalmente llamados cavernas y su forma dependerá de los esfuerzos geomecánicos, de la forma inicial y estabilidad mecánica de los túneles de las perforaciones, del perfil radial de la velocidad de flujo y de la anisotropía de las fuerzas cementantes de los granos de arena y fuerzas capilares. Regularmente y debido al término de caverna utilizado para la designación de los espacios que deja la arena de producción, se puede pensar que tiene literalmente una forma de caverna detrás del casing, pero en realidad la tendencia de la forma es una serie de espacios distribuidos preferencialmente en las direcciones de los túneles de las perforaciones entrando en la formación en forma de digitación.

El aislamiento selectivo zonal en pozos de petróleo propuesto para las operaciones de squeeze se obtiene llenando de cemento o posicionando una pared de aislamiento en

forma de anillo en los volúmenes de los túneles de las perforaciones y las cavernas detrás del casing causadas por la producción de arena, de esta forma se obtiene un aislamiento hidráulico efectivo en la zona objetivo; por esta razón el cálculo de los volúmenes de la lechada de cemento para la ejecución de cada operación es la variable más importante que se requiere determinar en el proceso de diseño de la operación de squeeze.

El cálculo del volumen de las cavidades de las perforaciones y la caverna detrás del casing, o en otras palabras el volumen de cemento requerido para llenar estos espacios, se realiza mediante un modelo de balance de masa en el pozo para la arena de producción, el cual se especifica a continuación:

Grafica 4. Balance de masa del volumen de lechada de cemento.



Fuente: Autores.

La definición del volumen de la lechada de cemento a utilizar durante una operación en un pozo específico se centra en la obtención de las siguientes variables de diseño de acuerdo con el balance de masa descrito:

1. Volumen de arena de producción.
 2. Volumen de arena en el fondo de pozo.
- **Volumen de la arena de producción.** Este valor se obtiene utilizando modelos matemáticos que tienen en cuenta todas las variables de producción de arena, para que este volumen represente el volumen de la caverna detrás del casing se requiere multiplicarlo por el factor de porosidad:

Ecuación 1. Factor de porosidad aplicable al volumen de arena de producción.

$$\text{Factor de Porosidad} = \left[\frac{1}{1 - \theta} \right]$$

Donde θ es la porosidad de la formación que esta en producción.

Ecuación 2. Volumen total dejado por la arena de producción detrás del casing.

$$\text{Volumen Total de la Arena de Producción} = \frac{\text{Volumen Calculado de Arena de Producción}}{1 - \theta}$$

El volumen calculado de la arena de producción se obtiene mediante la aplicación de un modelo matemático descrito mas adelante que incluye todos los datos de la producción de arena relacionados con el pozo.

- **Volumen de la arena en fondo de pozo.** Este valor se obtiene calculando el volumen de arena depositado en fondo de pozo con las datos de las capacidades del casing y la longitud del tapón de arena encontrado mediante tocada de fondo con los equipos de línea de acero o línea eléctrica, sin embargo se recomienda realizar esta operación con los equipos de línea eléctrica para tener mayor exactitud en el dato de la longitud del tapón de arena debido a la correlación en profundidad que se realiza con el registro gamma ray.

Ecuación 3. Volumen de arena en fondo de pozo.

$$\text{Volumen de Arena en Fondo de Pozo} = \text{Cap Casing} \times \text{Long Tapon de Arena}$$

Donde:

Volumen de arena en fondo de pozo (Bls)

Capacidad del casing de producción (Bls/ft).

Longitud del tapón de arena dentro del casing de producción (ft).

Para que el volumen de arena en fondo de pozo represente el volumen de la caverna detrás del casing se requiere multiplicarlo por un factor de porosidad combinado entre la porosidad de la formación y la porosidad de la depositación del tapón de arena.

Ecuación 4. Factor de porosidad combinado aplicable al volumen de arena de fondo de pozo.

$$\text{Factor de Porosidad Combinado} = \left[\frac{1 - \theta_2}{1 - \theta_1} \right]$$

Ecuación 5. Volumen total dejado por la arena de fondo de pozo detrás del casing.

$$\begin{aligned} & \text{Volumen Total de Arena en fondo de pozo} \\ & = \text{Volumen Calculado de Arena en fondo de pozo} \times \left[\frac{1 - \theta_2}{1 - \theta_1} \right] \end{aligned}$$

Donde:

θ_1 Es la porosidad de la formación que esta en producción.

θ_2 Es la porosidad del tapón de arena en fondo de pozo.

Para una mayor practicidad en la aplicación de la ecuación 5, el factor de porosidad combinado puede obviarse y en su lugar se puede utilizar el factor de porosidad descrito en la ecuación 1 sin incurrir en mayores variaciones de los resultados.

3.2.3 Modelo matemático de cálculo del volumen de la arena de producción.

Después de un análisis detallado de las variables que determinan el volumen total de la arena producida del pozo, se definieron las siguientes variables principales que impactan directamente los resultados y pueden ser medidos durante el monitoreo del pozo:

1. Producción acumulada total. (BF).
2. Concentración de arena (PPM Volumen).

Durante el análisis realizado teniendo en cuenta la base conceptual de la producción de arena, se descartaron variables que en el anterior modelo de diseño estadístico de cementaciones forzadas eran tenidas en cuenta para determinar el volumen de cemento en la formación, tales como:

- Espesor de la arena
- Días de producción
- Tasa de producción
- Permeabilidad, como parámetro estadístico.

Estas variables se descartaron porque no impactaban directamente ni permitían determinar cuantitativamente cual es el volumen requerido de lechada de cemento por diseño para realizar un trabajo de aislamiento zonal.

El modelo matemático propuesto tiene como datos de entrada la producción acumulada total, el factor de porosidad y la concentración de arena para obtener el volumen total de la arena de producción; los cálculos se realizan para cada día de prueba de producción del pozo; la descripción del modelo de cálculo es la siguiente.

- ✓ Cálculo del volumen de la lechada de cemento con la concentración de arena normalizada a cada punto de prueba de producción de fluidos.

Debido a que el modelo de cálculo requiere un resultado para cada punto de prueba de producción, en algunas ocasiones se presentan inconvenientes por falta de información relacionada con las mediciones de concentración de arena en cada punto, por esta razón

se plantea una normalización de los datos de concentración de arena para todos los datos de pruebas de producción teniendo en cuenta que en los puntos donde no se tenga medición de arena se deja la última medición de arena validada para estos puntos de prueba; de esta forma se logra una mejor aproximación al volumen de producción de arena real.

Grafica 5. Normalización de los datos de concentración de arena para cada punto de prueba de producción de fluidos.

Fecha de la Prueba de Producción	Concentración de Arena - PPM	Producción Acumulada - BF
08/12/2005 00:00	20	1183
09/12/2005 00:00	20	5091
10/12/2005 00:00	200	8724
11/12/2005 00:00	200	12288
12/12/2005 00:00	200	15819
13/12/2005 00:00	10	19369
14/12/2005 00:00	10	22783
15/12/2005 00:00	30	26217
16/12/2005 00:00	30	29632
17/12/2005 00:00	30	33022
18/12/2005 00:00	10	36411
19/12/2005 00:00	15	40005
20/12/2005 00:00	5	44018
21/12/2005 00:00	80	48366

Puntos de concentración de arena normalizada, se coloca el valor del último dato de medición de arena.

Puntos medición de arena.

Fuente: Autores.

Una vez realizada la normalización de los datos de concentración de arena, se calcula el volumen de arena producida en cada punto de monitoreo con la corrección del factor de porosidad.

Grafica 6. Calculo del volumen total de la arena de producción.

FACTOR DE POROSIDAD		0,7244					
Fecha de la Prueba de Producción	Concentración de Arena - PPM	Producción Acumulada - BF	LB A/BBL F	BBL A/BBL F	BBL A	BBL A - CUM	BBL C
08/12/2005	20	1183	0,007015	0,000008	0,008929	0,008929	0,012326
20/12/2008	3	5575234	0,001052	0,000001	0,005771	10,420508	14,385019
21/12/2008	3	5580327	0,001052	0,000001	0,005766	10,426274	14,392979
22/12/2008	3	5585416	0,001052	0,000001	0,005762	10,432036	14,400933
23/12/2008	3	5589714	0,001052	0,000001	0,004866	10,436902	14,407650
24/12/2008	3	5590647	0,001052	0,000001	0,001056	10,437958	14,409108

Fuente: Autores.

Donde:

LB A: Libras de arena de producción.

BBL F: Barriles de fluido acumulado.

BBL A: Barriles de arena de producción

BBL A CUM: Barriles de arena de producción acumulados

BBL C: Barriles de arena con el factor de porosidad o barriles de los túneles de las perforaciones y de la caverna detrás del casing causado por la arena de producción.

Una vez obtenido el valor del volumen de los túneles de las perforaciones y de la caverna detrás del casing causado por la arena de producción, se aplica un 30% adicional como factor de seguridad, el cual esta soportado en la falta de exactitud de los datos del muestreo de arena del laboratorio y en la pérdida de volumen de la lechada de cemento durante el forzamiento contra la cara de la formación causado por la deshidratación.

- ✓ Volumen total de arena de producción con el factor de incertidumbre: 18,73 Bls.

Este procedimiento de cálculo se repite para cada formación en la cual se tengan datos de producción por separado y para los cuales se tenga planeado la ejecución del trabajo de aislamiento zonal por squeeze.

3.2.4 Esquema de aplicación de la nueva metodología de diseño de aislamientos selectivos por squeeze para optimizar la producción en pozos de petróleo.

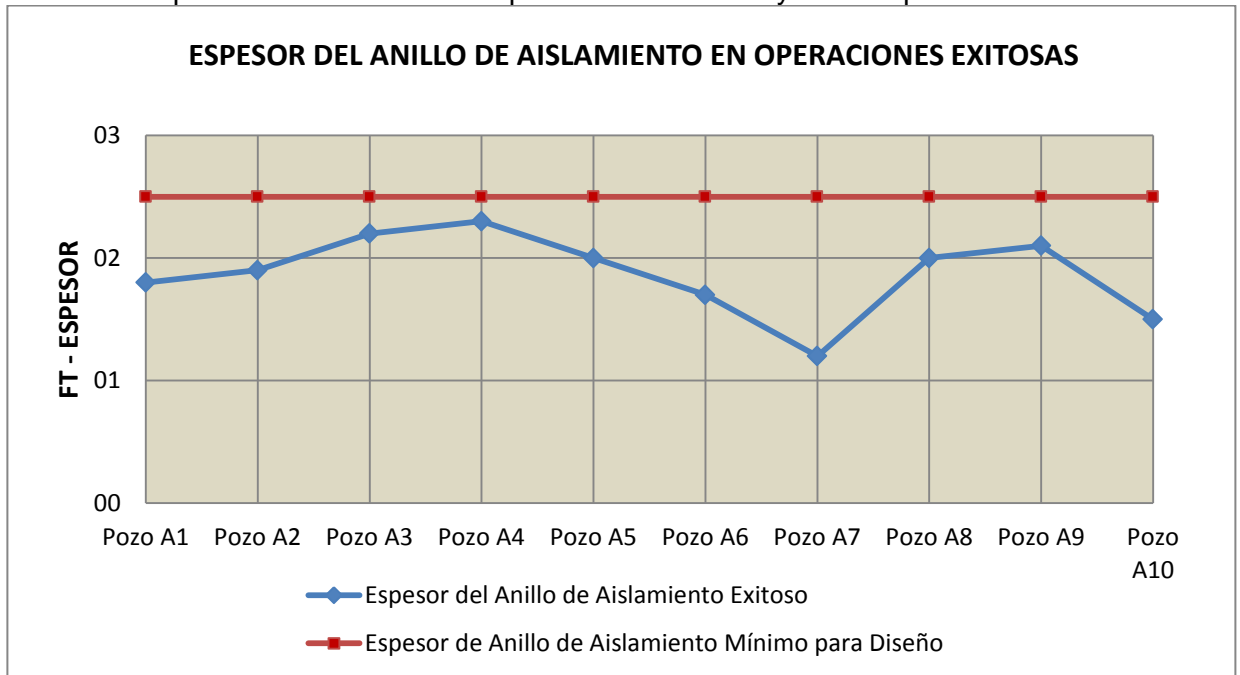
Teóricamente toda cementación de aislamiento zonal se puede realizar hasta el punto de forzamiento o punto de presión de squeeze dadas las siguientes condiciones:

- ✓ La permeabilidad de la formación que se requiere aislar es menor a 20 Darcy.
- ✓ Se ejecuta la operación de bombeo de lechada de cemento con suficiente volumen para llenar los espacios de los túneles de las perforaciones y las cavernas detrás del casing.

De esta forma y bajo cualquier condición de producción del pozo se logra un forzamiento de la lechada de cemento contra las paredes y la superficie dada por el volumen de las perforaciones y de la cavernas detrás del casing, por consiguiente realizar operaciones de aislamiento zonal teniendo únicamente en cuenta el valor total del volumen de la lechada de cemento aseguraría el éxito y la estabilidad en el tiempo del trabajo pero para trabajos en los cuales el volumen de lechada de cemento sea grande (> 150 Bls) se presentan riesgos operacionales a nivel del bombeo y colocación del cemento en profundidad.

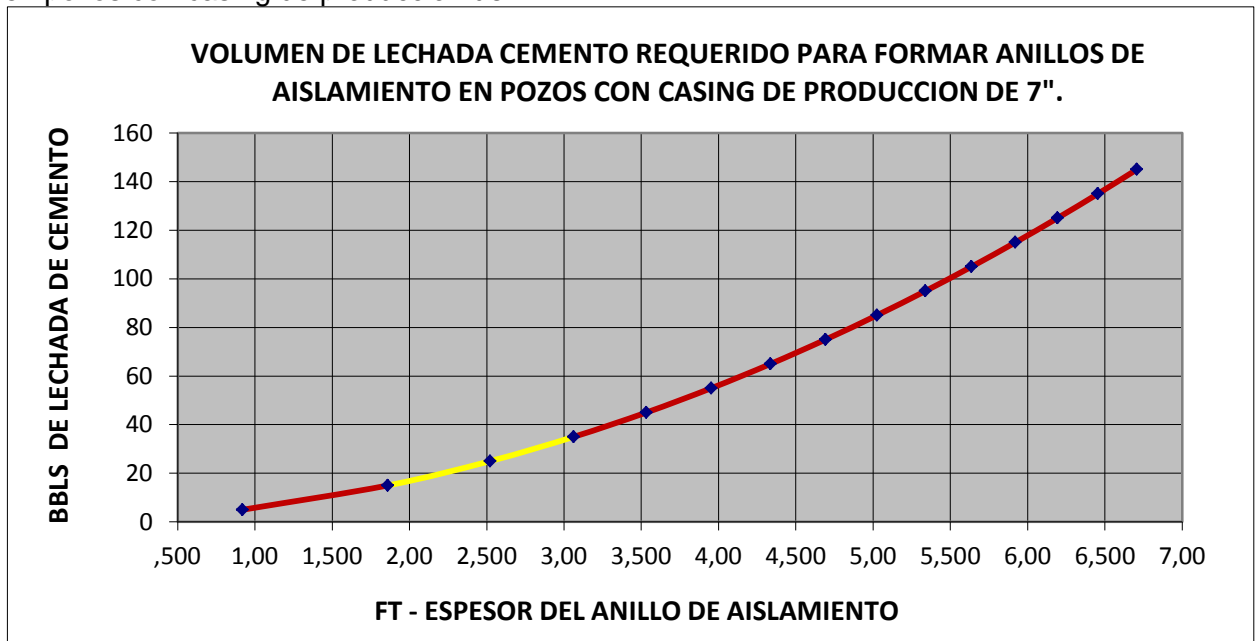
Para mitigar los riesgos asociados al bombeo de grandes volúmenes, se realizó un análisis con base en la historia de desempeño operacional para determinar la cantidad de lechada de cemento mínima que asegure el éxito de la operación, esto se determinó a partir la evaluación de los trabajos exitosos de aislamientos zonales con cementación balanceada que se realizaron durante el planteamiento de la metodología en los cuales no se logró el forzamiento de la lechada de cemento, con esta información se determinó el parámetro de espesor del anillo de aislamiento mínimo de 2,5 ft requerido para asegurar la operación.

Grafica 7. Espesor de aislamiento en operaciones exitosas y mínimo para diseño.



Fuente: Autores.

Grafica 8. Volumen de lechada de cemento requerido para formar anillos de aislamiento en pozos con casing de producción de 7".

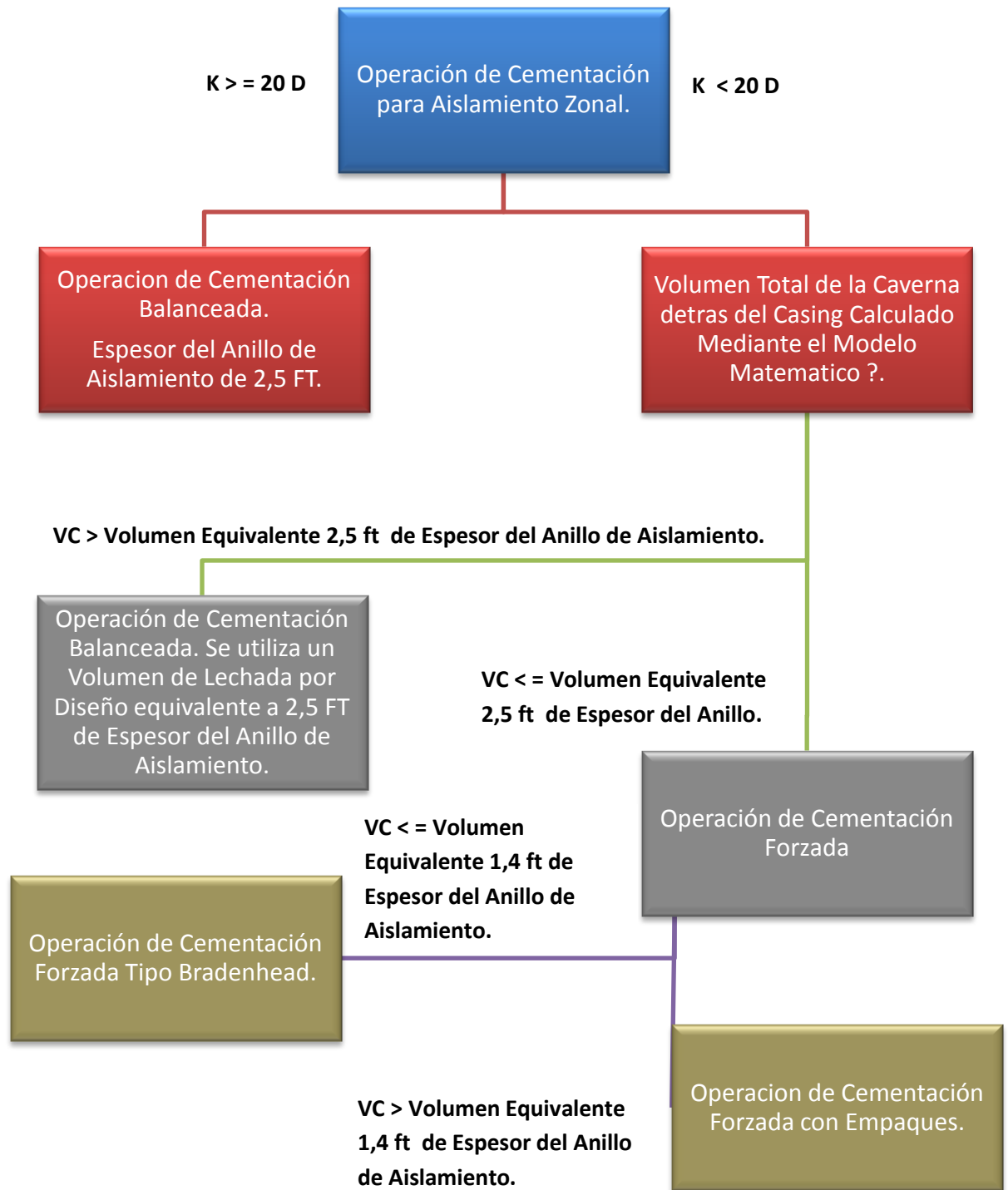


Fuente: Autores.

La evaluación de los trabajos exitosos de aislamientos zonales con cementación forzada o squeeze que se realizaron durante el planteamiento de la metodología, determino adicionalmente que en operaciones donde los pozos tenían un volumen total de lechada de cemento por diseño menor a un volumen equivalente al espesor del anillo de aislamiento de 1,4 ft, la técnica de colocación que se puede implementar en estos eventos es la técnica bradenhead en lugar de la utilización del juego de empaques bridge plug y retenedor, lo cual esta soportado en la simplicidad del control de los fluidos que se presenta durante el desarrollo del bombeo y forzamiento de la lechada bajo estas condiciones específicas.

Con base en la definición conceptual de la operación de cementación forzada, en el análisis detallado de las condiciones óptimas de ejecución operacional y teniendo en cuenta los objetivos propuestos del aseguramiento del éxito de las operaciones de aislamiento zonal para la optimización de la producción en los pozos de petróleo, se definió un árbol de decisión para el diseño de los volúmenes de lechada de cemento requeridos en la ejecución de los trabajos, que tiene como información de entrada los datos calculados para cada pozo en particular, razón por la cual su aplicación es específica y detallada a cada pozo y no se pueden generar reglas generales aplicables a un grupo de pozos que permitan incertidumbre en los datos y posteriormente en el resultado de éxito de la operación.

Grafica 9. Árbol de decisión de la aplicación de la nueva metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal mediante cementaciones balanceadas y forzadas.



Fuente: Autores.

Dónde:

VC: Es el volumen por diseño de la lechada de cemento o el volumen equivalente a los túneles de las perforaciones y de la caverna detrás del casing.

De acuerdo con la formulación de la metodología de diseño y del árbol de decisión definido para su aplicación durante el diseño de la operación, el primer parámetro a tener en cuenta es la permeabilidad de la formación, la cual si es mayor a 20 Darcy direcciona el desarrollo de la operación mediante una cementación balanceada contra la presión de formación y un volumen de lechada cemento equivalente a un espesor del anillo de aislamiento de 2,5 ft.

En el evento en el cual la permeabilidad de la formación sea menor a 20 Darcy, la formulación del diseño contempla el cálculo del volumen total de la lechada de cemento equivalente al volumen de los túneles de las perforaciones y de la caverna detrás del casing, si el resultado obtenido de este parámetro es mayor a un volumen equivalente a un espesor del anillo de aislamiento de 2,5 ft, la operación se requiere ejecutar con una cementación balanceada contra la presión de formación y un volumen de lechada cemento equivalente a un espesor del anillo de aislamiento de 2,5 ft; si el resultado del cálculo del VC esta entre un volumen equivalente de 2,5 ft y 1,4 ft de espesor del anillo de aislamiento, la operación se requiere realizar mediante una cementación forzada o squeeze con un juego de empaques Bridge Plug y Retenedor y un volumen de lechada igual al VC; si el resultado del cálculo del VC es menor a un volumen equivalente de 1,4 ft de espesor del anillo de aislamiento, la operación se requiere realizar mediante una cementación forzada o squeeze tipo bradenhead y un volumen de lechada igual al VC.

4. APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA EN LOS TRABAJOS REALIZADOS

Para la aplicación de la nueva metodología de diseño de aislamiento selectivo para la optimización de producción, se evaluaron los pozos propuestos para operaciones de reacondicionamiento que cumplieran con las siguientes condiciones y criterios:

1. Pozo que alcanza su límite económico en su zona actual de producción.
2. Pozo que su presión de yacimiento no permite una producción continua para que sea viable económicamente su operación.
3. Pozo con alto corte de agua.
4. Pozo con baja eficiencia del levantamiento artificial.
5. Pozo con prospectos de producción de petróleo en zonas inferiores.

Adicionalmente, se recopiló toda la información referente a las propiedades petrofísicas del yacimiento, historia de producción, historia de intervenciones y condiciones mecánicas de pozo; se utilizó los datos obtenidos como datos y variables de entrada en la nueva metodología de diseño y la aplicación a los pozos seleccionados.

4.1 CONSIDERACIONES ESPECIALES DE EXPERIENCIA OPERACIONAL PARA LA APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO

- ✓ En el evento en el cual se requiera aislar varios intervalos en un mismo trabajo de cementación y el resultado de la aplicación de la nueva metodología de diseño sea realizarlo con cementación balanceada, se deben revisar las presiones estáticas de yacimiento de los intervalos y verificar que no exista un diferencial de presión mayor a 10 psi para realizar la operación con éxito; en el caso en el cual se presente diferenciales de presión mayor a 10 psi se debe evaluar la posibilidad operacional de realizar un trabajo de aislamiento para cada intervalo. Esta consideración no aplica para cuando el análisis del trabajo de acuerdo a la nueva metodología de diseño verifique la ejecución de la operación tipo cementación por squeeze.
- ✓ La exactitud de los datos de presión, permeabilidad y producción de los pozos, es un factor clave de las variables de entrada en la nueva metodología de diseño para obtener el 100% de éxito en los trabajos de aislamiento zonal por cementación.
- ✓ Si existe un tope de arena por debajo de la base del intervalo de interés, se debe evaluar la conveniencia operacional de utilizar el tapón de arena presente como si fuera un empaque bridge plug durante la ejecución de la operación, de esta forma se reducirían los costos y tiempos operacionales en gran medida.
- ✓ Si durante la prueba hidráulica de sello del empaque retenedor de cemento, se presenta pérdida de presión, el procedimiento a seguir es retirar la sarta de trabajo con el stinger, perforar y empujar el empaque retenedor de cemento hasta fondo y realizar una nueva operación para la corrida y asentamiento de un nuevo empaque retenedor de cemento 5ft arriba de donde estaba sentado el primero. Esta consideración no aplica para cuando el análisis del trabajo de acuerdo a la nueva

metodología de diseño verifique la ejecución de la operación tipo cementación forzada bradenhead.

- ✓ Con el objetivo de confirmar los volúmenes de agua para el desplazamiento y balanceo de las columnas respectivamente para cada tipo de operación definida en la metodología se requiere contar con la disponibilidad de un equipo de registro de sonido (Echometer).

4.2 PROCEDIMIENTOS PARA LA EJECUCIÓN DE OPERACIONES DE AISLAMIENTO DE ZONAL POR CEMENTACIÓN

4.2.1 Procedimiento para aislamiento zonal por cementación forzada con juego de empaques. A continuación se describen los pasos generales básicos para la ejecución de la operación de aislamiento zonal por cementación forzada o squeeze con juego de empaques en pozos con casing de producción de 9 5/8", teniendo en cuenta la metodología de diseño propuesta para el aseguramiento del éxito de la operación:

1. Realizar proceso de control de pozo, retirar la sarta de producción a los racks de tubería y desarmar el equipo de levantamiento artificial.
2. Bajar con unidad de cable de acero la herramienta finder de 8 1/4" OD para revestimiento de 9 5/8" 43.5/47 PPF N-80 (Mínimo drift 8.525") hasta fondo de pozo. Informar y tomar los datos de fondo encontrado y restricciones presentadas. Retirar la sarta de la herramienta y desarmar unidad la unidad de cable de acero.
3. Armar la unidad de cable eléctrico, bajar y sentar empaque tipo bridge plug para revestimiento de 9 5/8" 47 PPF N-80 a una profundidad de 10 ft debajo de la base de la zona interés (Punto medio de los cauchos), Verificar y reportar el nivel de fluido encontrado y verificar la presión estática teórica de yacimiento. Bajar y sentar empaque tipo retenedor de cemento para revestimiento de 9 5/8" 47 PPF a una profundidad de 50 ft arriba de la zona de interés. Retirar la sarta de asentamiento y desarmar unidad de cable eléctrico.
4. Correr sarta de trabajo de 3 1/2" drill pipe, landing nipple, standing valve y BHA con herramienta stinger hasta el tope del empaque retenedor de cemento, realizar prueba hidrostática con 3000 psi efectivos a la sarta de trabajo en tres puntos distribuidos durante la corrida.
5. Armar unidad de cable de acero, correr herramienta de pesca y retirar standing valve, desarmar unidad de cable de acero.
6. Probar BOP's con 3000 psi. Realizar prueba hidrostática al sello del empaque retenedor de cemento con 500 psi en tubería y anular cerrado. Probar, marcar y verificar puntos de circulación, neutro y squeeze del stinger. Realizar prueba hidrostática al acople del empaque retenedor de cemento y stinger en punto squeeze con 500 psi en el anular. Informar todos los resultados de las pruebas realizadas.

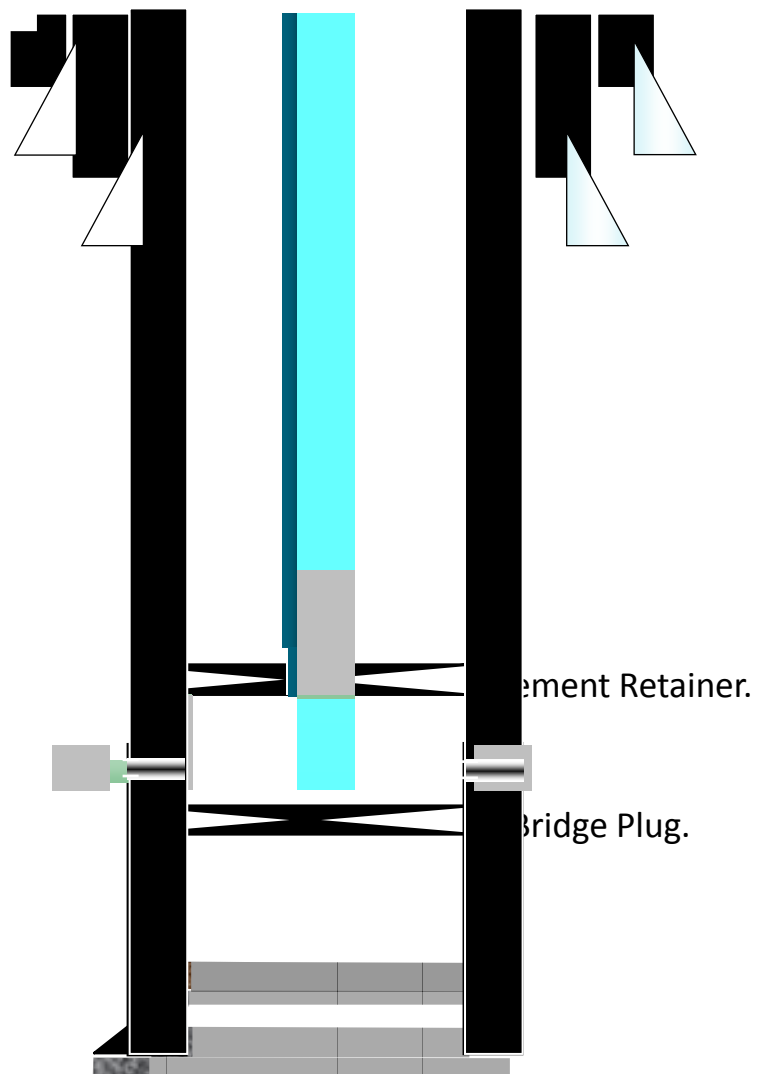
7. Realizar prueba de inyectividad en la formación, iniciar bombeando en mínima tasa, aumentar la tasa para realizar prueba en cada etapa a 1, 2, 4, 6, 8 BPM, para cada etapa esperar estabilización de presión para pasar a la siguiente; registrar volúmenes acumulados y presiones de cada etapa y totales.
8. Preparar el volumen de lechada de cemento convencional de 15.8 Lbs/gal clase G, de acuerdo con el calculo del volumen total de lechada de cemento determinado por el modelo matemático de la nueva metodología, adicionalmente calcular el volumen entre el juego de empaques y 5 BIs adicionales de exceso para la circulación en reversa de la lechada de cemento sobrante. La lechada de cemento requiere un tiempo de bombeabilidad de 5 Hrs y ajustado de acuerdo al resultado de la prueba de inyectividad. Bombear la lechada a una tasa entre 2 – 3 BPM y dependiendo de la presiones presentadas durante el bombeo, (Gradiente cemento 15.8 Lbs/gal, 0.8216 psi/ft).
9. Realizar desplazamiento con agua, con un volumen equivalente para balancear la presión de formación con las columnas de agua y cemento dejando 5 BIs de cemento en el drill pipe, tomar un nivel de fluido con el equipo de registro de sonido y verificar contra el nivel teórico.

Nota: si el nivel medido desde superficie de las columnas de fluidos en el pozo es menor al teórico, se confirma la ejecución de la operación con una cementación forzada, este paso es importante realizarlo para confirmar y realizar un control de calidad a la aplicación de la metodología en una operación específica.

10. Bombear el volumen de agua necesario para llenar la sarta de trabajo hasta superficie, presurizar en superficie hasta máximo una presión equivalente en profundidad del 80% de la presión de fractura, mantener la presión de squeeze durante 15 minutos o hasta estabilización.
11. Presurizar con 500 psi en anular manteniendo la presión de squeeze en la tubería de trabajo y retirar el stinger de empaque retenedor de cemento, realizar circulación de reversa 1.5 veces el volumen de la sarta de trabajo. Verificar el volumen de agua para reversar el cemento a superficie y realizar el balance de fluidos para confirmar el volumen de lechada de cemento dejado detrás del casing.
12. Retirar la sarta de trabajo 3 ½” drill pipe a la torre, correr herramienta moledora de 8 ½” con BHA recomendado por la empresa especialista de la molienda hasta el tope del empaque retenedor de cemento, confirmar 24 horas de fragüe de la lechada de cemento antes de empezar la operación de molienda. Perforar empaque retenedor de cemento y cemento, realizar prueba hidrostática de integridad de la cementación forzada verificando el mantenimiento del nivel de fluido en superficie y aplicando 500 psi durante 20 minutos (No superar la presión efectiva sobre el intervalo aislado de un 50% la presión de fractura).
13. Continuar perforando cemento y moler el empaque bridge plug. Verificar fondo y limpiar hasta el tope de fondo de pozo para dejar el mayor bolsillo posible, retirar sarta de trabajo con herramienta de molienda y BHA a la torre.

14. Realizar las operaciones adicionales del trabajo propuesto y completar el pozo en el sistema de levantamiento artificial diseñado.

Grafica 10. Aislamiento zonal por cementación forzada con juego de empaques.



Fuente: Autores.

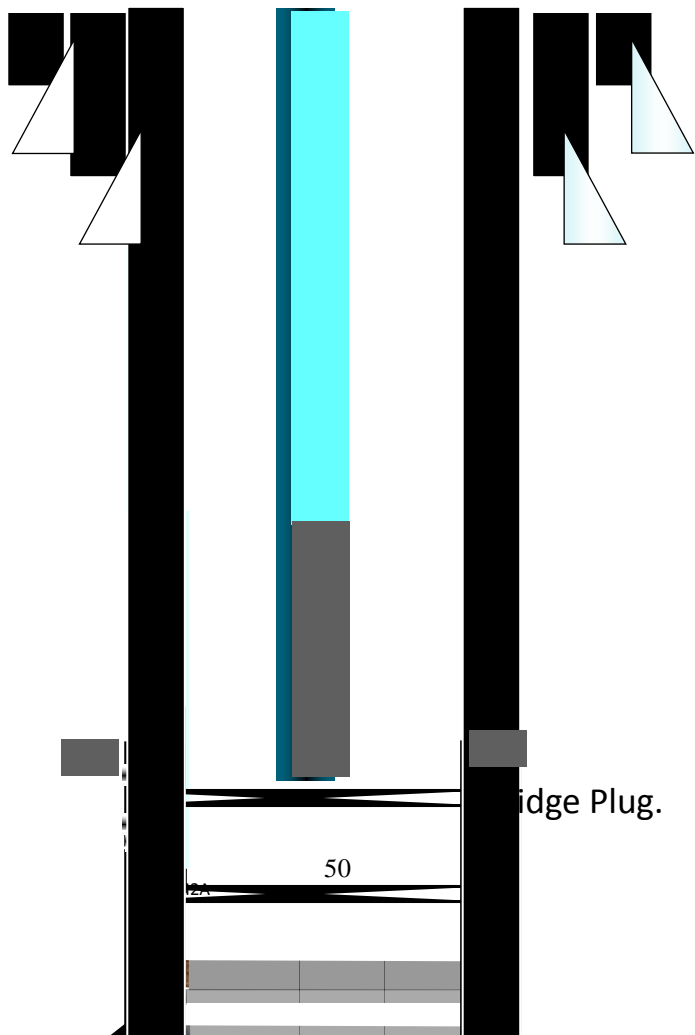
4.2.2 Procedimiento para aislamiento zonal por cementación forzada bradenhead. A continuación se describen los pasos generales básicos para la ejecución de la operación de aislamiento zonal por cementación forzada tipo bradenhead en pozos con casing de producción de 9 5/8", teniendo en cuenta la metodología de diseño propuesta para el aseguramiento del éxito de la operación:

1. Los puntos 1 y 2 del procedimiento operacional recomendado para la operación de cementación forzada con empaques aplican para la operación de cementación forzada tipo bradenhead.
2. Armar unidad de cable eléctrico, correr y sentar empaque bridge plug para revestimiento de 9 5/8" 47 PPF, 10 ft debajo de la base de la zona interés (Punto medio de los cauchos), verificar y reportar el nivel de fluido encontrado y verificar la presión estática teórica de yacimiento. Retirar la sarta de asentamiento y desarmar unidad de cable eléctrico.
3. Correr sarta de trabajo de 3 1/2" drill pipe con punta abierta hasta el tope del bridge plug, levantar la sarta de trabajo 3 ft.
4. Probar sistema de BOP's con 3000 psi.
5. Preparar el volumen de lechada de cemento convencional de 15.8 Lbs/gal clase G, de acuerdo con el calculo del volumen total de lechada de cemento determinado por el modelo matemático de la nueva metodología, adicionalmente calcular el volumen para cubrir todo el intervalo de interés y 100 ft arriba del tope del intervalo con lechada de cemento. La lechada de cemento requiere un tiempo de bombeabilidad de 3 Hrs. bombear la lechada al vuelo a una tasa entre 2 – 3 BPM y dependiendo de la presiones presentadas durante el bombeo, (Gradiente cemento 15.8 Lbs/gal, 0.8216 psi/ft).
6. Bombear agua en línea un volumen equivalente a la presión de yacimiento, esperar hasta la estabilización de las columnas de cemento y agua en el anular y drill pipe.
7. Retirar sarta de trabajo hasta una profundidad de 500 ft arriba del tope del intervalo de interés, realizar circulación de reversa 1.5 veces la capacidad del drill pipe. Verificar calidad del agua de reversa. Retirar sarta de trabajo 700 ft arriba del tope del intervalo de interés.
8. Bombear agua hasta llenar anular y sarta de trabajo hasta superficie.
9. Cerrar el anular BOP y presionar en directa en la sarta de trabajo de acuerdo con la tabla de presiones máximas (No sobrepasar el 80% de la presión fractura efectiva equivalente), mantener la presión de squeeze en directa durante 10 Hrs contadas a partir del inicio del bombeo del cemento.
10. Retirar la sarta de trabajo 3 1/2" drill pipe con punta abierta a la torre, correr herramienta moladora de 8 1/2" con BHA recomendado por la empresa especialista de la molienda hasta el tope del cemento, confirmar 24 horas de fragüe de la lechada de cemento antes de empezar la operación de molienda. Perforar cemento y realizar

prueba hidrostática de integridad de la cementación forzada bradenhead verificando el mantenimiento del nivel de fluido en superficie y aplicando 500 psi durante 20 minutos (No superar la presión efectiva sobre el intervalo aislado de un 50% la presión de fractura).

- 11.** Continuar perforando cemento y moler el empaque bridge plug. Verificar fondo y limpiar hasta el tope de fondo de pozo para dejar el mayor bolsillo posible, retirar sarta de trabajo con herramienta de molienda y BHA a la torre.
- 12.** Realizar las operaciones adicionales del trabajo propuesto y completar el pozo en el sistema de levantamiento artificial diseñado.

Grafica 11. Aislamiento zonal por cementación forzada bradenhead.



Fuente: Autores.

4.2.3 Procedimiento para aislamiento zonal por cementación balanceada contra la presión de formación. A continuación se describen los pasos generales básicos para la ejecución de la operación de aislamiento zonal por cementación balanceada contra la presión de formación con juego de empaques en pozos con casing de producción de 9 5/8", teniendo en cuenta la metodología de diseño propuesta para el aseguramiento del éxito de la operación:

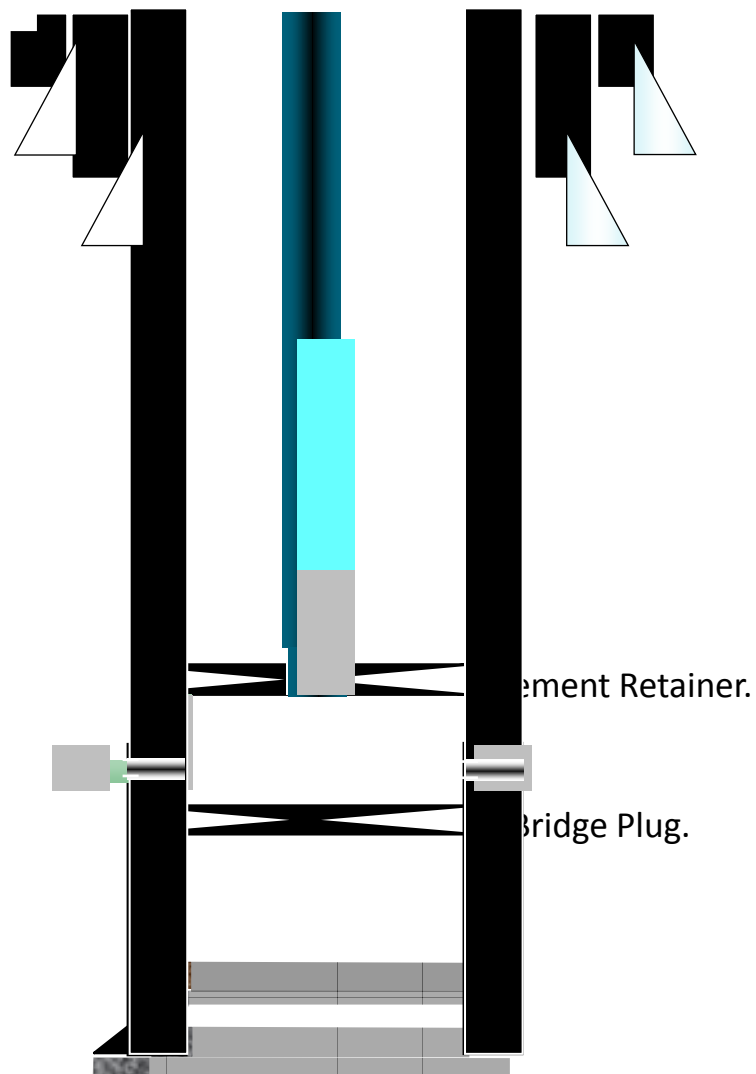
1. Los puntos **1,2,3,4,5,6 y 7** del procedimiento operacional recomendado para la operación de cementación forzada con empaques aplican para la operación de cementación balanceada.
2. Preparar el volumen de lechada de cemento convencional de 15.8 lbs/gal clase G, de acuerdo con el calculo del volumen total de lechada de cemento determinado por el modelo matemático de la nueva metodología para crear un espesor del anillo de aislamiento equivalente a 2,5 ft; adicionalmente calcular el volumen entre el juego de empaques y 5 Bls adicionales de exceso para la circulación en reversa de la lechada de cemento sobrante. La lechada de cemento requiere un tiempo de bombeabilidad de 5 Hrs y ajustado de acuerdo al resultado de la prueba de inyectividad. Bombear la lechada a una tasa entre 2 – 3 BPM y dependiendo de la presiones presentadas durante el bombeo (Gradiente cemento 15.8 lbs/gal, 0.8216 psi/ft).
3. Realizar desplazamiento con agua, con un volumen equivalente para balancear la presión de formación con las columnas de agua y cemento dejando 5 Bls de cemento en el drill pipe, tomar un nivel de fluido con el equipo de registro de sonido y verificar contra el nivel teórico.

Nota: si el nivel medido desde superficie de las columnas de fluidos en el pozo es igual al teórico, se confirma la ejecución de la operación con una cementación balanceada contra la presión de formación, este paso es importante realizarlo para confirmar y realizar un control de calidad a la aplicación de la metodología en una operación específica.

4. Presurizar con 500 psi en anular y retirar el stinger de empaque retenedor de cemento, realizar circulación de reversa 1.5 veces el volumen de la sarta de trabajo. Verificar volumen de agua para reversar el cemento a superficie, realizar balance de fluidos y confirmar el volumen de lechada de cemento dejado detrás del casing.
5. Retirar la sarta de trabajo 3 1/2" drill pipe a la torre, correr herramienta moledora de 8 1/2" con BHA recomendado por la empresa especialista de la molienda hasta el tope del empaque retenedor de cemento, confirmar 24 horas de fragüe de la lechada de cemento antes de empezar la operación de molienda. Perforar empaque retenedor de cemento y cemento, realizar prueba hidrostática de integridad de la cementación forzada verificando el mantenimiento del nivel de fluido en superficie y aplicando 500 psi durante 20 minutos (No superar la presión efectiva sobre el intervalo aislado de un 50% la presión de fractura).

6. Continuar perforando cemento y moler el empaque bridge plug. Verificar fondo y limpiar hasta el tope de fondo de pozo para dejar el mayor bolsillo posible, retirar sarta de trabajo con herramienta de molienda y BHA a la torre.
7. Realizar las operaciones adicionales del trabajo propuesto y completar el pozo en el sistema de levantamiento artificial diseñado.

Grafica 12. Aislamiento zonal por cementación balanceada contra la presión de formación.

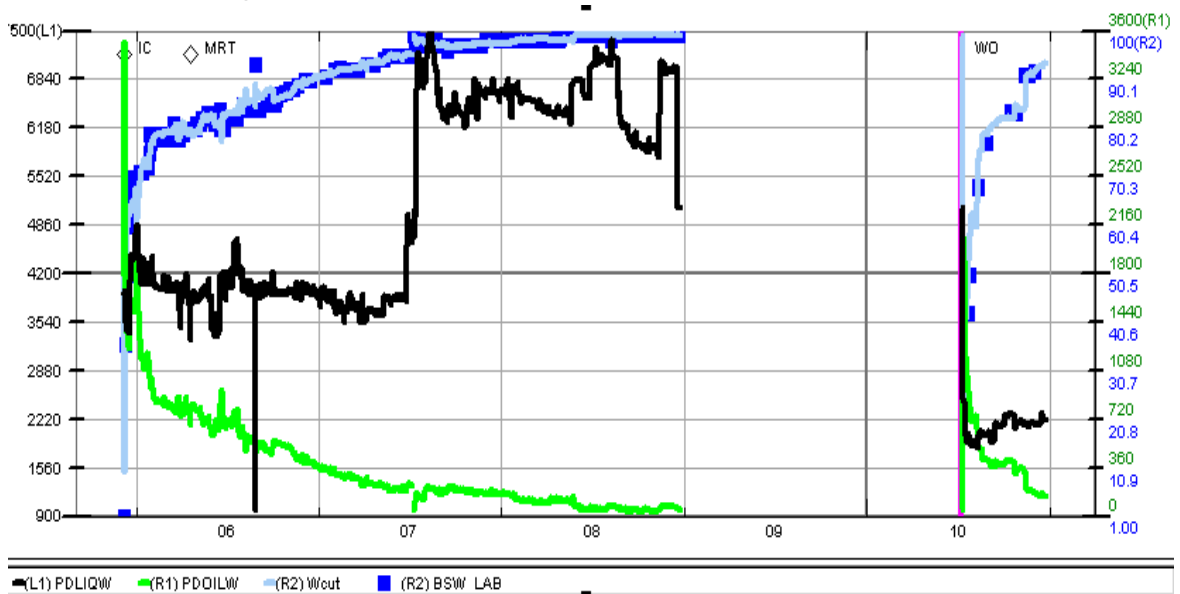


Fuente: Autores.

4.3 TRABAJOS REALIZADOS

Las curvas de producción de los pozos en los que se realizaron trabajos de aislamiento zonal selectivo por cementación, en donde se aplicó la nueva metodología de diseño con 100% de éxito, comprueban los excelentes resultados desde el punto de vista operacional y de optimización de la producción; para todos los pozos en los cuales se aplicó la nueva metodología de diseño, se corrió un registro de producción (Production Loggin Test - PLT) dos meses después de haber iniciado producción posterior a la realización del trabajo, con el objetivo de verificar la efectividad y estabilidad en el tiempo del sello hidráulico de la cementación, los resultados de los registros de producción evidencian que a nivel del aislamiento no hay ningún movimiento de fluidos hacia pozo referentes al intervalo aislado, lo cual confirma el 100% de éxito de los trabajos.

Grafica 13. Curva de producción del pozo 1 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación



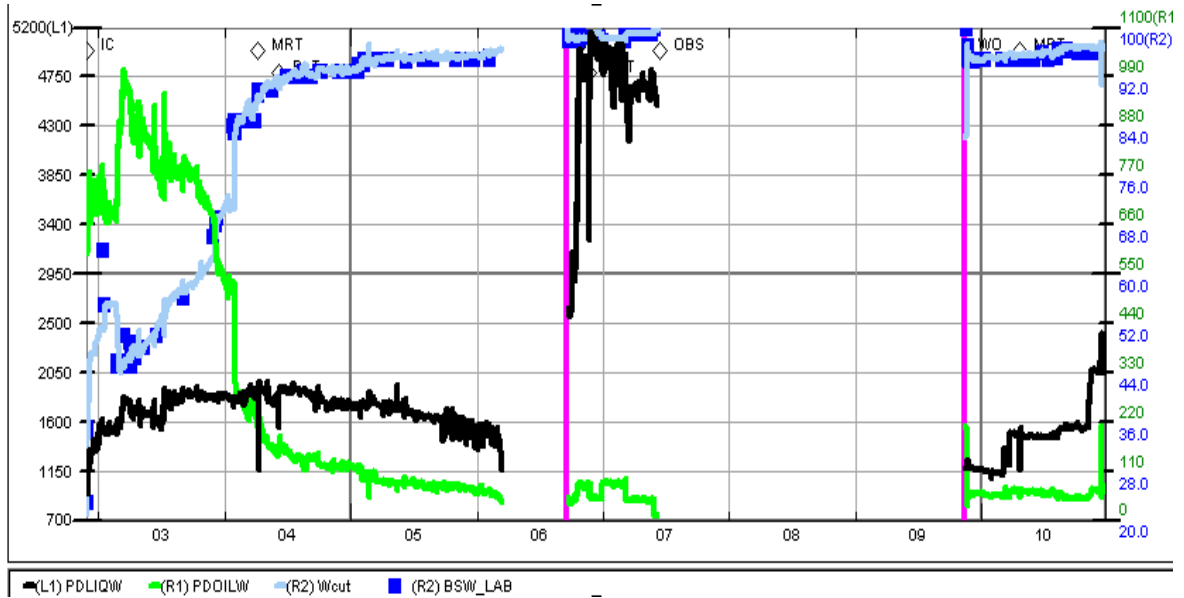
Fuentes: Autores.

Tabla 1. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 1.

Comparativo Condición Operacional Pozo 1.		
	Antes	Después
Tasa Total [BFPD].	6200	2200
Tasa de Petróleo [BOPD].	20	200
BSW [%]	99,7%	90,9%
Gastos de Energía [USD/Mes].	15840	5760
Gasto de Tratamiento Químico [USD/Mes].	242	86

Fuente: Autores.

Grafica 14. Curva de producción del pozo 2 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación.



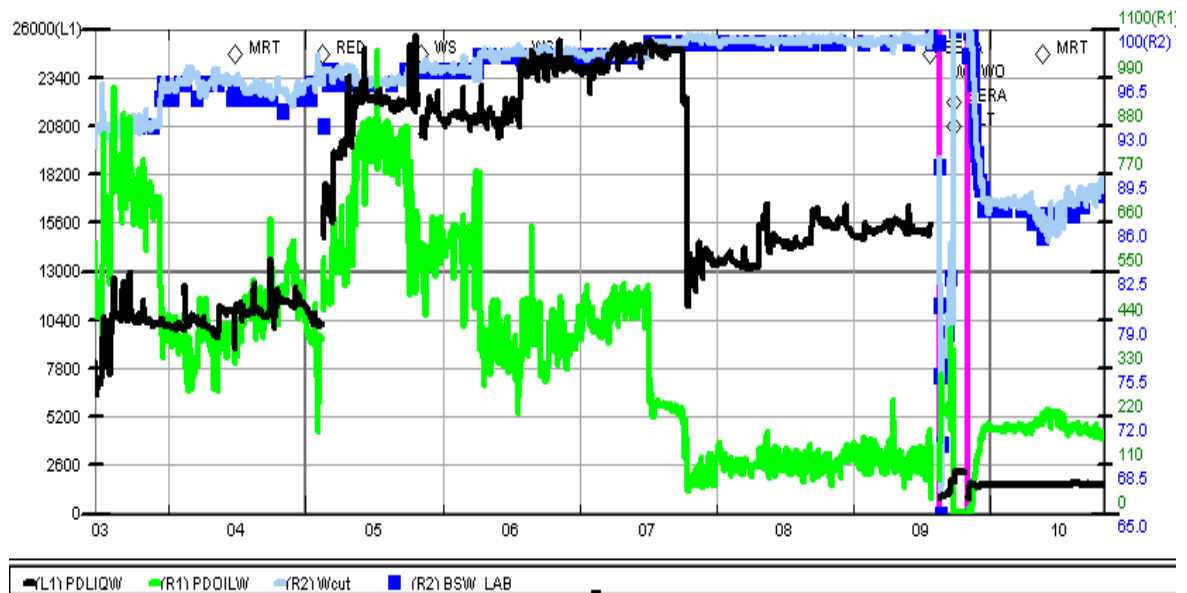
Fuentes: Autores.

Tabla 2. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 2.

Comparativo Condición Operacional Pozo 2.		
	Antes	Después
Tasa Total [BFPD].	4750	2100
Tasa de Petróleo [BOPD].	5	97
BSW [%]	99,9%	95,4%
Gastos de Energía [USD/Mes].	8640	5550
Gasto de Tratamiento Químico [USD/Mes].	185	82

Fuente: Autores.

Grafica 15. Curva de producción del pozo 3 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación.



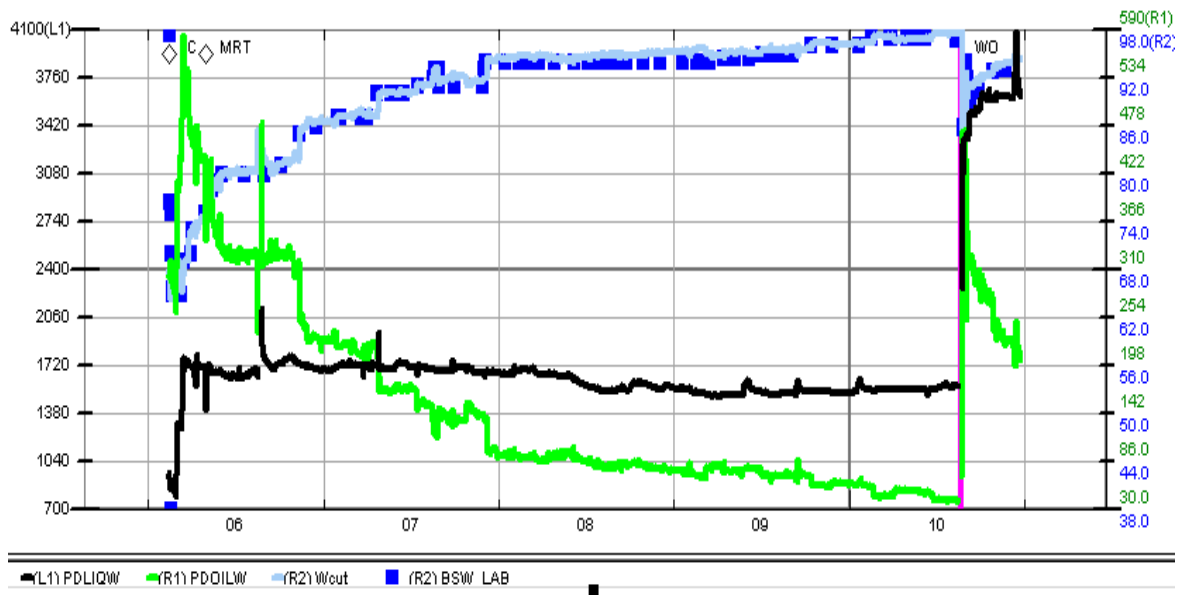
Fuente: Autores.

Tabla 3. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 3.

Comparativo Condición Operacional Pozo 3.		
	Antes	Después
Tasa Total [BFPD].	23500	1600
Tasa de Petróleo [BOPD].	190	200
BSW [%]	99,2%	87,5%
Gastos de Energía [USD/Mes].	44300	5760
Gasto de Tratamiento Químico [USD/Mes].	916	62

Fuente: Autores.

Grafica 16. Curva de producción del pozo 4 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación.



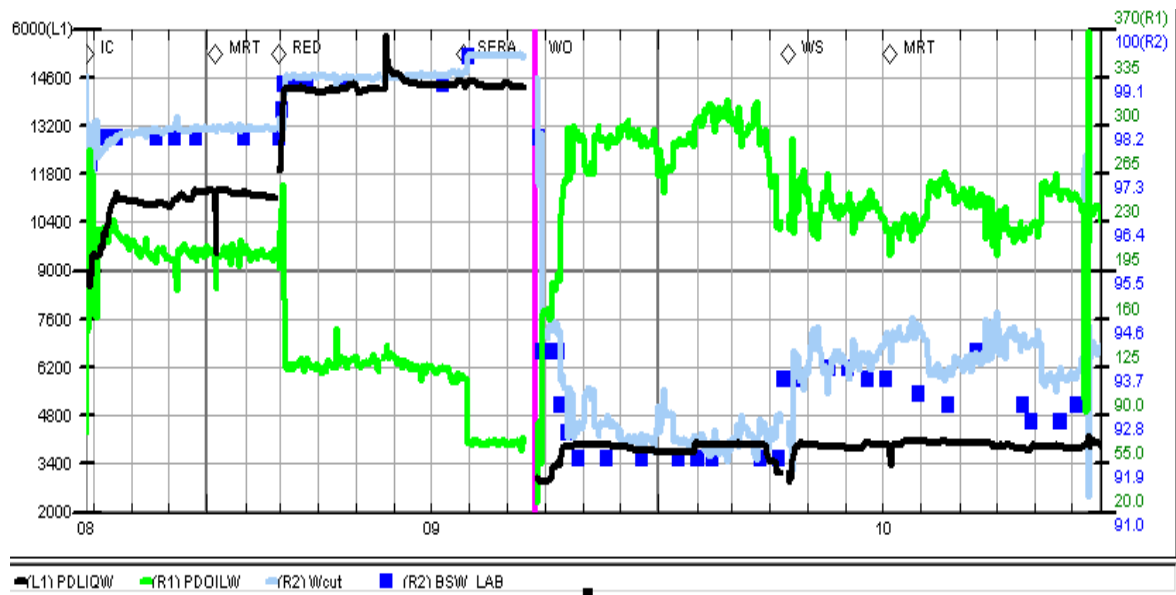
Fuente: Autores.

Tabla 4. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 4.

Comparativo Condición Operacional Pozo 4.		
	Antes	Después
Tasa Total [BFPD].	1450	3550
Tasa de Petróleo [BOPD].	35	200
BSW [%]	97,6%	94,4%
Gastos de Energía [USD/Mes].	8813	12960
Gasto de Tratamiento Químico [USD/Mes].	56	138

Fuente: Autores.

Grafica 17. Curva de producción del pozo 5 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación.



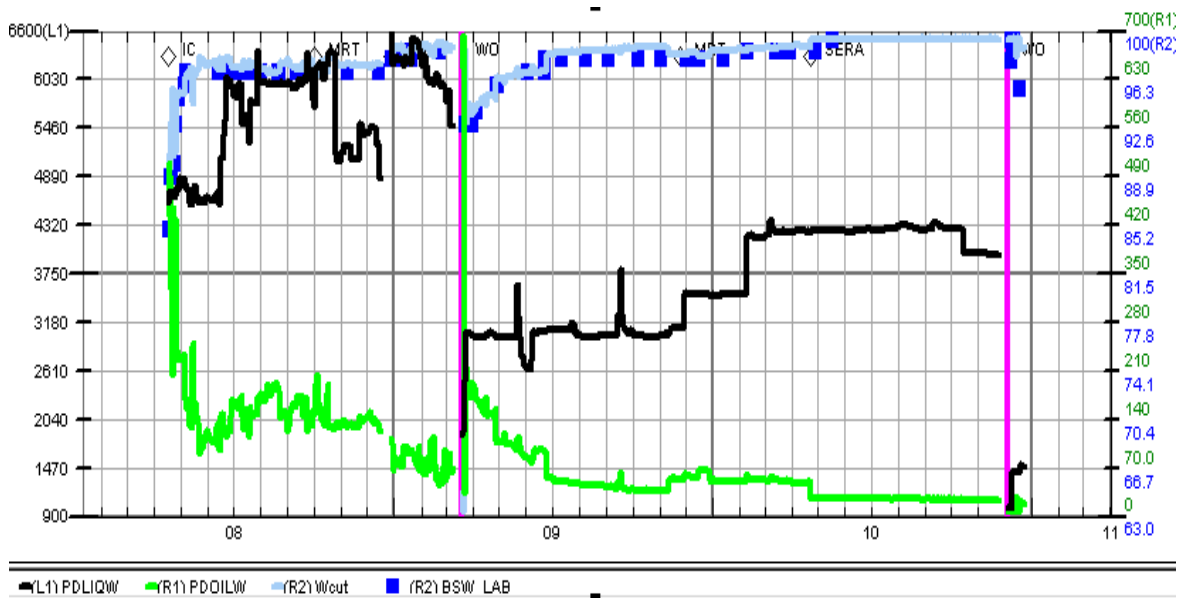
Fuente: Autores.

Tabla 5. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 5.

Comparativo Condición Operacional Pozo 5.		
	Antes	Después
Tasa Total [BFPD].	14000	4000
Tasa de Petróleo [BOPD].	70	285
BSW [%]	99,5%	92,9%
Gastos de Energía [USD/Mes].	31910	10771
Gasto de Tratamiento Químico [USD/Mes].	546	153

Fuente: Autores.

Grafica 18. Curva de producción del pozo 6 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación.



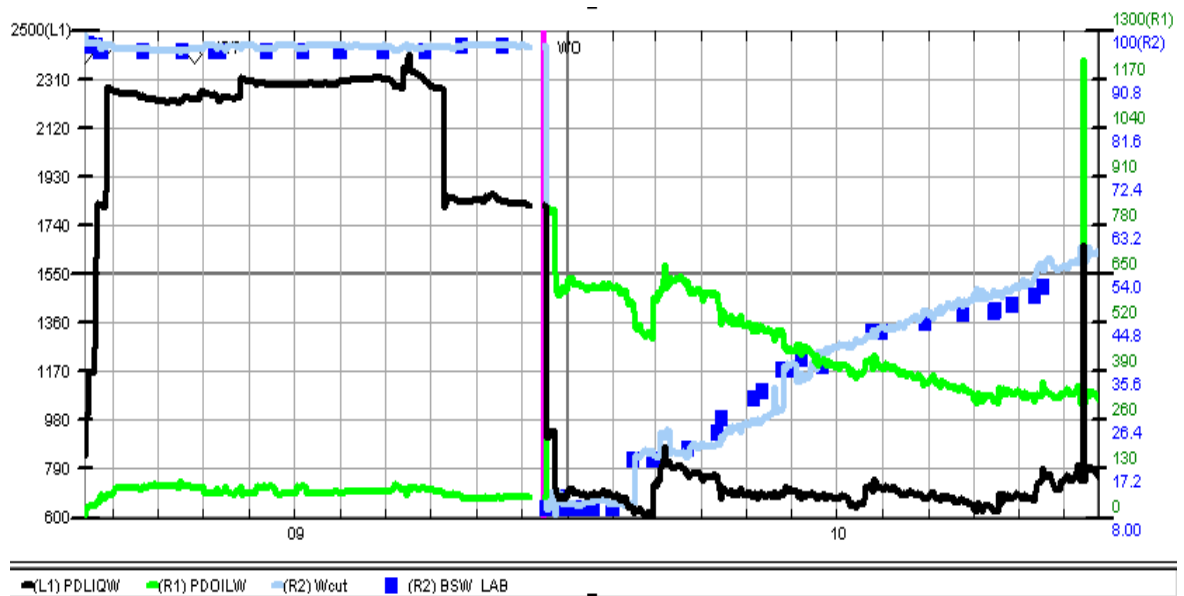
Fuente: Autores.

Tabla 6. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 6.

Comparativo Condición Operacional Pozo 6.		
	Antes	Después
Tasa Total [BFPD].	4000	1470
Tasa de Petróleo [BOPD].	5	70
BSW [%]	99,9%	95,2%
Gastos de Energía [USD/Mes].	8467	5011
Gasto de Tratamiento Químico [USD/Mes].	156	67

Fuente: Autores.

Grafica 19. Curva de producción del pozo 7 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación.



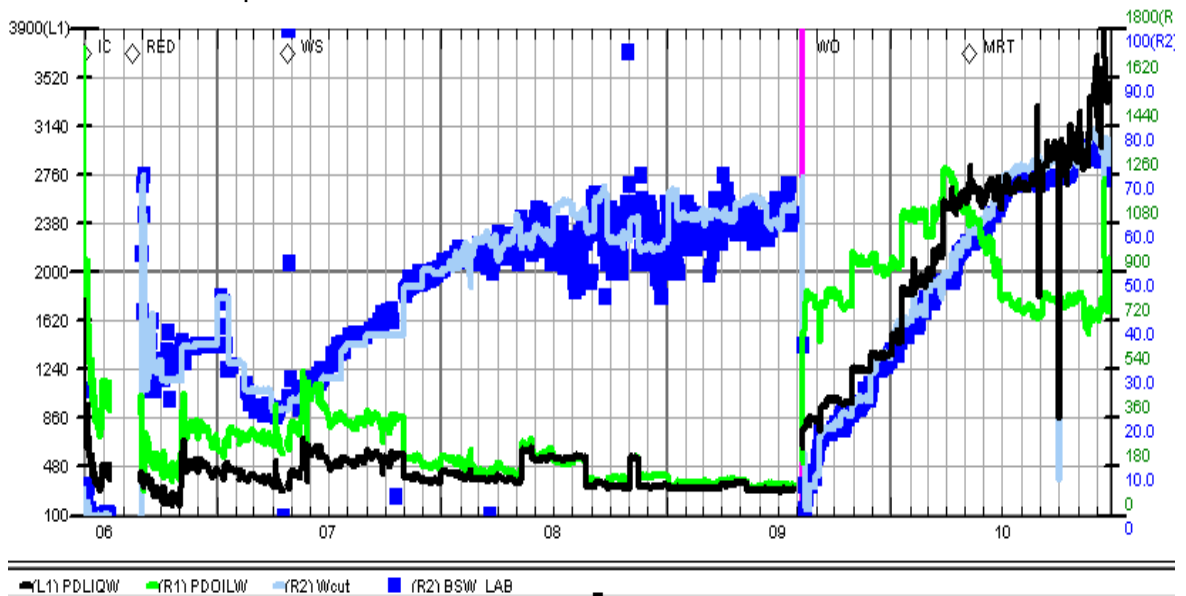
Fuente: Autores.

Tabla 7. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 7.

Comparativo Condición Operacional Pozo 7.		
	Antes	Después
Tasa Total [BFPD].	1800	820
Tasa de Petróleo [BOPD].	70	350
BSW [%]	96,1%	57,3%
Gastos de Energía [USD/Mes].	6912	3917
Gasto de Tratamiento Químico [USD/Mes].	70	32

Fuente: Autores.

Grafica 20. Curva de producción del pozo 8 antes y después de la operación de aislamiento zonal por cementación.



Fuente: Autores.

Tabla 8. Comparativo antes y después de la operación en el pozo 8.

Comparativo Condición Operacional Pozo 8.		
	Antes	Después
Tasa Total [BFPD].	350	3050
Tasa de Petróleo [BOPD].	130	950
BSW [%]	62,9%	68,9%
Gastos de Energía [USD/Mes].	3629	4435
Gasto de Tratamiento Químico [USD/Mes].	14	119

Fuente: Autores.

A continuación se muestran los totales y promedio por pozo de ahorros en gastos de energía y tratamiento químico sin tener en cuenta el ahorro en tiempos y costos operacionales que se obtuvo al tener 100% de éxito en las operaciones de aislamiento zonal selectivo por cementación.

Tabla 9. Balance de ahorro / ganancia total de las 8 operaciones.

Balance de Ahorro/Ganancia Total en las 8 Intervenciones a Pozo.	
Ganancia Total en Tasa de Petróleo [BOPD].	1827
Ahorro en Energía [USD/Mes].	74347
Ahorro en Tratamiento Químico [USD/Mes].	1446

Fuente: Autores.

Tabla 10. Balance de ahorro / ganancia total por pozo.

Balance de Ahorro/Ganancia Total por Pozo.	
Ganancia Total en Tasa de Petróleo [BOPD].	228
Ahorro en Energía [USD/Mes].	9293
Ahorro en Tratamiento Químico [USD/Mes].	181

Fuente: Autores.

El balance promedio por pozo de los ahorros y ganancia de tasa de petróleo realizado para las 8 intervenciones a pozo, muestra que la ejecución de este tipo de operaciones optimiza todas las operaciones de producción de los pozos, desde la optimización del tratamiento químico y disponibilidad de capacidad remanente en las facilidades por menor fluido tratado hasta la optimización del levantamiento artificial por diseño de equipos y menor levantamiento de agua de producción, lo cual se traduce en menores gastos operacionales de consumo de energía.

Adicionalmente a estos balances favorables, el aseguramiento del 100% de éxito de las operaciones de aislamiento zonal selectivo por cementación permite obtener un ahorro en tiempo y costos operacionales de las intervenciones en los pozos que se suman a los balances económicos hasta ahora obtenidos, optimizando con esto los indicadores de ejecución operacional de este tipo de operaciones.

5. EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO

5.1 EVALUACIÓN TÉCNICA

La aplicación de la nueva metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal por cementación, estuvo orientada en los criterios de aplicación en los pozos expuestos en el capítulo 4; adicionalmente los datos e información requerida para el análisis de la aplicación fueron validados con el objetivo de obtener la mejor información técnica posible.

Desde la definición, conceptualización y planteamiento de la metodología de diseño, hasta su evaluación técnico económica se realizaron un total de ocho operaciones de reacondicionamiento en los cuales existía una aplicación específica de la metodología de diseño; los trabajos realizados abarcan todos los planteados en la conceptualización de la metodología, los cuales son la cementación forzada o squeeze con empaques, cementación forzada Bradenhead y la cementación balanceada. Todos los datos asociados a la aplicación de la metodología de diseño en los ocho pozos se encuentran relacionados en las tablas 11-12.

Tabla 11. Parámetros de aplicación de la metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal por cementación.

PARÁMETROS DE EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS DE AISLAMIENTO			
Pozo.	Tipo de Operación de Reacondicionamiento.	Tipo de Operación de Aislamiento Zonal por Cementación.	Diámetro del Casing de Producción.
Pozo 1	Aislamiento Selectivo por Cementación y Cañoneo TCP.	Squeeze.	7"
Pozo 2	Aislamiento Selectivo por Cementación y Cañoneo Casing Guns.	Cementación Balanceada.	7"
Pozo 3	Aislamiento Selectivo por Cementación.	Cementación Forzada Bradenhead.	7"
Pozo 4	Aislamiento Selectivo por Cementación y Cañoneo TCP.	Cementación Balanceada.	9 5/8"
Pozo 5	Aislamiento Selectivo por Cementación y Cañoneo MAX-R.	Squeeze.	7"
Pozo 6	Aislamiento Selectivo por Cementación y Cañoneo Casing Guns.	Squeeze.	9 5/8"
Pozo 7	Aislamiento Selectivo por Cementación.	Cementación Forzada Bradenhead.	7"
Pozo 8	Aislamiento Selectivo por Cementación y Cañoneo TCP.	Squeeze.	7"

Fuente: Autores.

Tabla 12. Parámetros de aplicación de la metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal por cementación.

PARÁMETROS DE EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS DE AISLAMIENTO			
Pozo.	Volumen Bombeado de Lechada de Cemento - Bls.	Volumen de Lechada de Cemento entre Empaques/ En Casing de Producción. - Bls.	Volumen de Lechada de Cemento de exceso Bombeado. - Bls.
Pozo 1	55,6	5,6	5
Pozo 2	46,2	5,2	5
Pozo 3	27,0	10	5
Pozo 4	36,5	6,5	5
Pozo 5	48,7	5,7	5
Pozo 6	66,2	6,2	5
Pozo 7	21	11	5
Pozo 8	72,2	5,2	5

Fuente: Autores.

Todas las operaciones se realizaron siguiendo los lineamientos operacionales y de diseño descritos en la aplicación específica de la metodología para cada pozo; esta información es utilizada para el análisis de los resultados obtenidos con las pruebas realizadas en sitio y la confirmación de los volúmenes de lechada de cemento basados en los balances realizados en la ejecución de la operación. Los resultados operacionales obtenidos y los porcentajes de exactitud de los volúmenes de lechada de cemento propuestos por la aplicación de la metodología de diseño permiten evaluar el éxito operacional de cada aplicación.

Tabla 13. Resultados de desempeño de la metodología de diseño.

RESULTADOS DE DESEMPEÑO DE LA APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE AISLAMIENTOS ZONALES SELECTIVOS POR CEMENTACIÓN.			
Pozo.	Volumen de Lechada de Cemento de exceso Reversado/ Adicional en Casing de Producción. - Bls	Volumen Total de Lechada de Cemento Dejado Detrás del Casing. - Bls.	Volumen Total de Lechada de Cemento Calculado por Diseño mediante la metodología. - Bls.
Pozo 1	7	43	45
Pozo 2	8,2	32,8	36
Pozo 3	7,3	9,7	12
Pozo 4	7	23	25
Pozo 5	6,5	36,5	38
Pozo 6	8	52	55
Pozo 7	6	4,0	5
Pozo 8	8,5	58,5	62

Fuente: Autores.

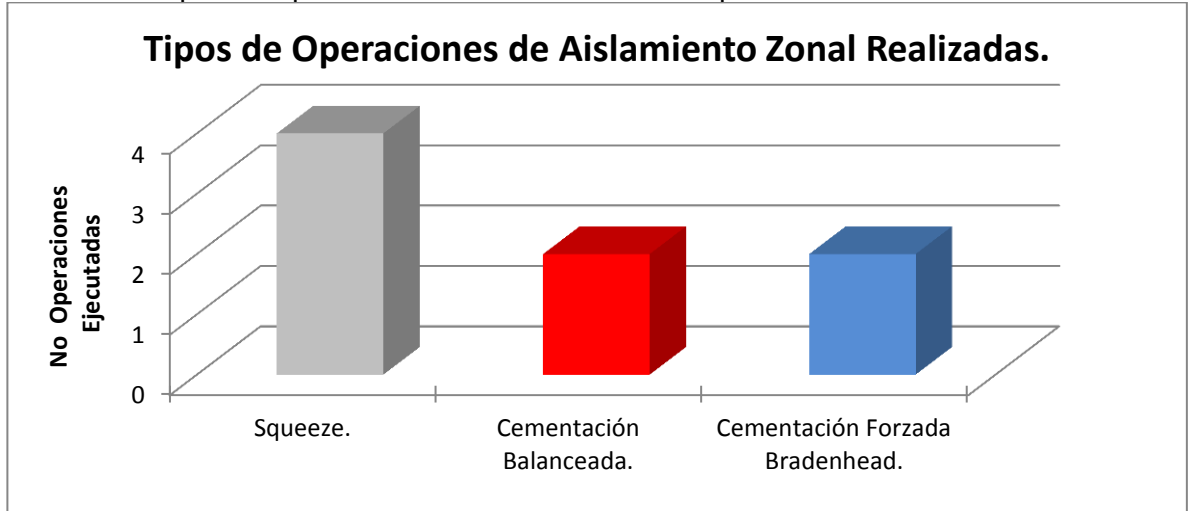
Tabla 14. Resultados de desempeño de la metodología de diseño.

RESULTADOS DE DESEMPEÑO DE LA APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE AISLAMIENTOS ZONALES SELECTIVOS POR CEMENTACIÓN.				
Pozo.	% Exactitud entre el Volumen Total de Lechada de Cemento Calculado por Diseño y el Volumen Total de Lechada de Cemento Dejado Detrás del Casing.	Presión Efectiva de Squeeze/Balanceo. - Psi.	Presión Efectiva de Prueba. Psi.	Éxito/Fracaso de la Operación.
Pozo 1	95%	4530	4100	Éxito
Pozo 2	90%	1800	3050	Éxito
Pozo 3	76%	3950	3200	Éxito
Pozo 4	91%	1540	3000	Éxito
Pozo 5	96%	4250	3650	Éxito
Pozo 6	94%	4630	3450	Éxito
Pozo 7	75%	4030	3350	Éxito
Pozo 8	94%	4720	3500	Éxito

Fuente: Autores.

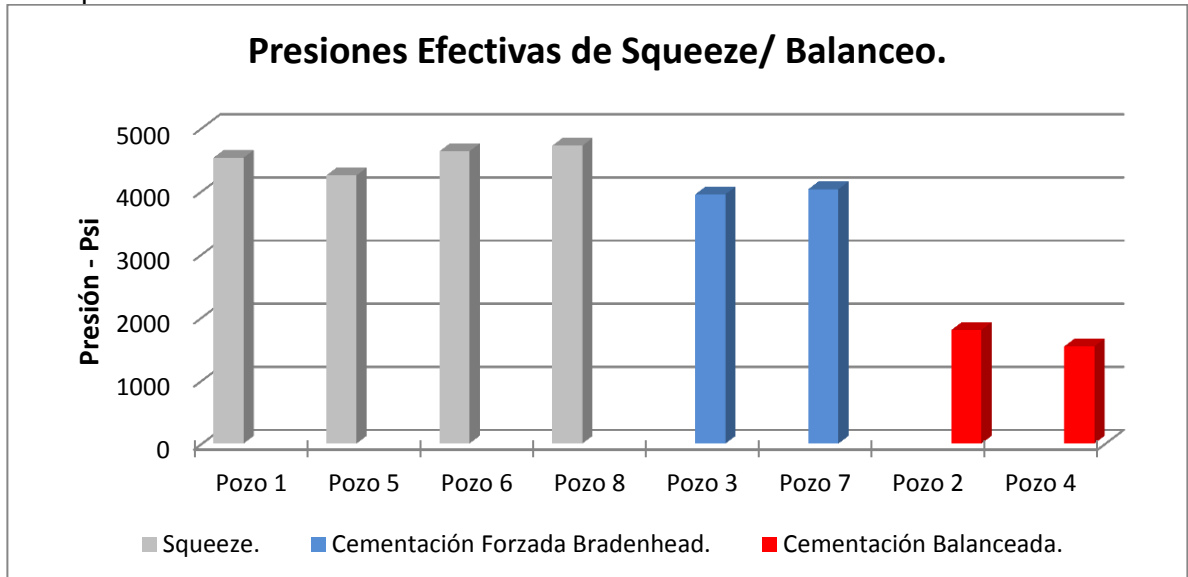
En los pozos donde la metodología determino la aplicación de una operación de cementación forzada o squeeze, ya sea por medio de empaques o tipo bradenhead, se alcanzaron presiones de forzamiento efectivas al 80% de la presión de fractura, lo cual estuvo contemplado inicialmente desde el diseño; Adicionalmente para las aplicaciones de cementación balanceada, la presión de forzamiento efectiva fue la presión de balanceo o en este caso específico la presión de formación.

Grafica 21. Tipos de operaciones de aislamiento zonal por cementación.



Fuente: Autores.

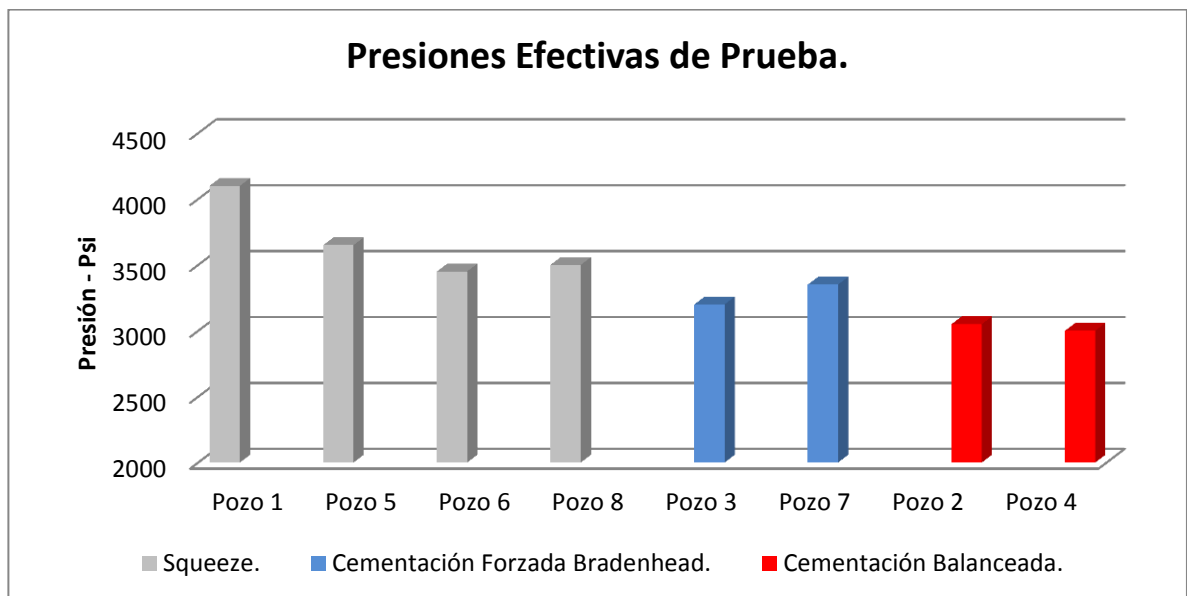
Grafica 22. Presiones efectivas de squeeze o balanceo de las operaciones de aislamiento zonal por cementación.



Fuente: Autores.

Los resultados obtenidos muestran un excelente desempeño de la aplicación de la metodología de diseño, en todos los pozos los excelentes resultados de las pruebas hidrostáticas confirman la efectividad del sello hidráulico del intervalo aislado, permitiendo con esto un aseguramiento del aislamiento con presiones efectivas por encima de 3000 psi, adicionalmente estas pruebas validan la integridad del aislamiento en condiciones dinámicas cuando cada pozo a nivel del intervalo aislado es sometido a diferenciales de presión causados por la producción.

Grafica 23. Presiones efectivas de prueba de las operaciones de aislamiento zonal por cementación.

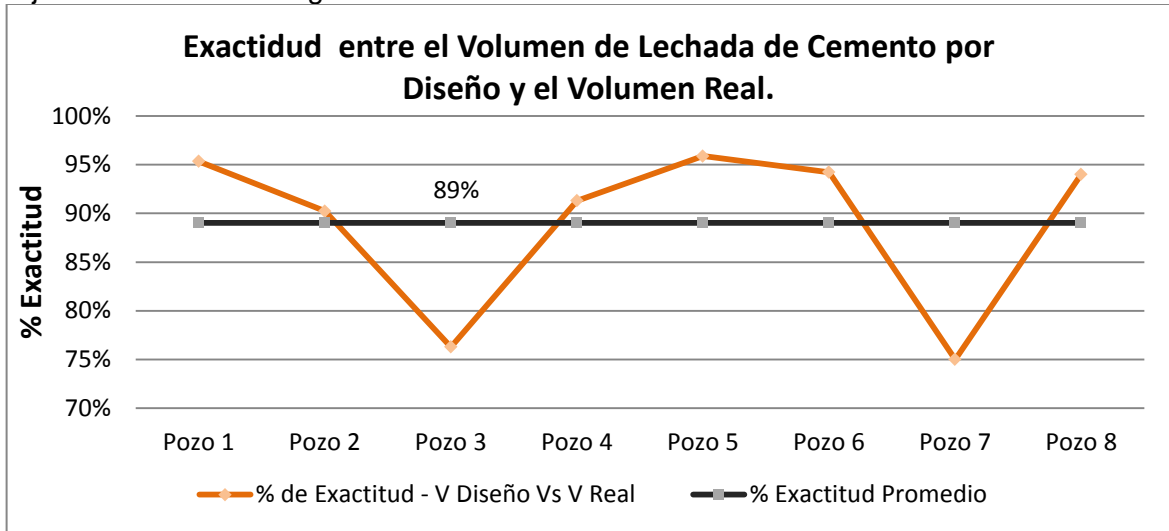


Fuente: Autores.

El éxito de la aplicación de la metodología de diseño en todos los trabajos se confirma inicialmente con las pruebas hidrostáticas y seguidamente por la corrida de registros de producción (Production logging test - PLT) dos meses después de haber iniciado producción posterior a la realización del trabajo, con el objetivo de verificar la efectividad y estabilidad en el tiempo del sello hidráulico de la cementación, verificando de esta forma que los objetivos iniciales propuestos por la metodología de diseño se lograron.

Aparte de el aseguramiento del éxito de los trabajos, el cual es ya confirmado con las pruebas de presión, un dato muy importante de verificar es el porcentaje de exactitud que se obtiene entre el volumen total de lechada de cemento por diseño dado por la metodología y el volumen real de lechada de cemento dejado detrás del casing dado por el balance realizado durante la ejecución de la operación, la correspondencia entre estos dos volúmenes nos suministra el nivel de confiabilidad de toda la conceptualización.

Grafica 24. Relación del volumen de lechada de cemento por diseño y el volumen real dejado detrás del Casing.



Fuente: Autores.

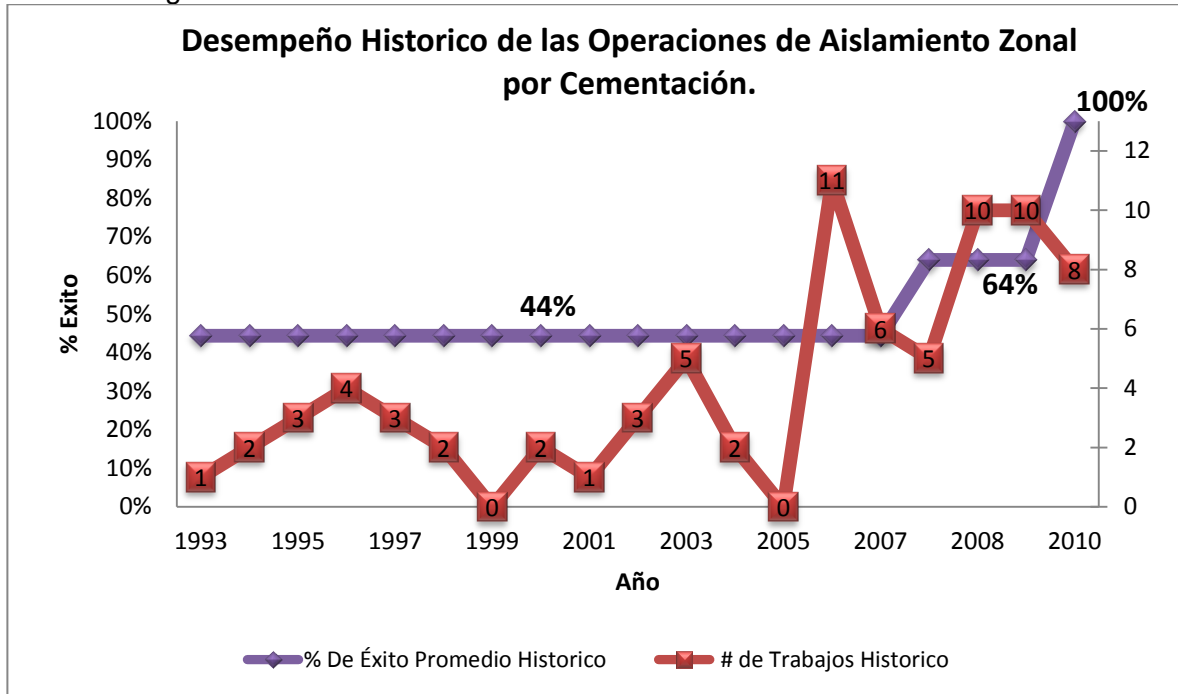
El porcentaje promedio dado para la correspondencia entre el volumen de lechada de cemento por diseño y el volumen de lechada de cemento real dejando detrás del casing es del 89%, este valor nos confirma la excelente aproximación de la metodología de diseño y permite establecer niveles de confianza altos para la aplicación de esta metodología como un estándar operativo.

Grafica 25. Desempeño histórico de las operaciones de aislamiento zonal por squeeze con los datos de la aplicación de la nueva metodología en 2010.



Fuente: Autores.

Grafica 26. Porcentaje de éxito histórico de las operaciones de aislamiento zonal por tipo de metodología de diseño.



Fuente: Autores.

La grafica 22 muestra el desempeño en toda la historia de aplicación de las metodologías de diseño para los trabajos de aislamiento zonal selectivo por cementación realizados en el campo Caño Limón, inicialmente con la aplicación netamente según experiencia operacional y a consideración del Ingeniero encargado de la operación proporcionaba porcentajes de éxito operacional alrededor del 44%, luego pasando a la aplicación de una metodología de diseño con bases estadísticas con resultados del 64% de éxito operacional y por ultimo la aplicación de una metodología de diseño con la formulación conceptual propuesta en este proyecto que alcanza un nivel de 100% de éxito operacional y un nivel de confiabilidad en la aplicación del 89%.

5.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Los costos de una operación de aislamiento zonal selectiva por cementación están especificados para cada fase operativa y se muestran a continuación:

Tabla 15. Costo promedio de la operación de aislamiento zonal selectivo por cementación.

Costo Promedio de la Operación de Aislamiento Zonal Selectivo por Cementación.					
Descripción	Costo Unitario	Cantidad	Costo Total		
Torre de Reacondicionamiento - Hr.	USD 850	90	USD 76.500		
Equipo y Accesorios de Completamiento.	USD 11.000	2	USD 22.000		
Operación Unidad de Cable Eléctrico.	USD 8.000	1	USD 8.000		
Operación Unidad de Cable de Acero.	USD 4.000	1	USD 4.000		
Operación de Bombeo Lechada de Cemento.	USD 40.000	1	USD 40.000		
Servicios Contratistas.	USD 6.000	1	USD 6.000		
Otros.	USD 5.000	1	USD 5.000		
Costo Total Promedio			USD 161.500		

Fuente: Autores.

Los costos promedio asociados solamente a la ejecución de una operación aislamiento zonal por cementación suman **USD 161,500**; el cálculo del beneficio económico de la aplicación de la nueva metodología de diseño en este tipo de operaciones desde el punto netamente operacional esta sustentado en los porcentajes de éxito obtenidos en cada una de las metodologías, es decir, su base es el comparativo entre el porcentaje de éxito obtenido con la nueva metodología y el porcentaje de éxito obtenido con la anterior metodología que estaba siendo aplicada.

La reducción de los costos operacionales son representados por el índice de costo de operación exitosa dado para cada metodología de diseño; este índice esta especificado como el numero de operaciones que se tienen que realizar a un costo total promedio determinado en la tabla 15 para obtener una operación exitosa, dando como índice ideal aquel que tenga un valor de 1.

Tabla 16. Análisis de costos de la implementación de la metodología de diseño propuesta.

Análisis de Costos de la Implementación de la Metodología de Diseño Propuesta.			
Metodología de Diseño Anterior		Metodología de Diseño Propuesta	
Indicador de Éxito	64%	Indicador de Éxito	100%
Índice de Costo/Operación.	1,5625	Índice de Costo/Operación.	1
Costo Promedio por Trabajo Exitoso USD 252.343,75		Costo Promedio por Trabajo Exitoso USD 161.500,00	
Ahorro Promedio por implementación de la nueva metodología de Diseño por Operación.			
Ahorro Total.		USD 90.843,75	

Fuente: Autores.

De acuerdo el análisis de costos operacionales, la implementación en el campo Caño Limón de la nueva metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal selectivo por cementación logra un beneficio económico promedio de **USD 90.844** por cada operación, esto para un total de ocho operaciones ya realizadas obtiene un ahorro total de **USD 726.752**.

El balance global de beneficio económico para la compañía, teniendo en cuenta la optimización de las operaciones de producción de los pozos, desde la optimización del tratamiento químico y disponibilidad de capacidad remanente en las facilidades por menor fluido tratado hasta la optimización del levantamiento artificial por diseño de equipos y menor levantamiento de agua de producción, sumado a los ahorros de costos operacionales obtenidos por la implementación de la nueva metodología de diseño, logra un beneficio económico muy importante que contribuye a los objetivos de optimización de costos requeridos dentro de una corporación; los datos de beneficio económico obtenidos se muestran en las tablas 17 y 18.

Tabla 17. Balance global de beneficio económico de la implementación de la nueva metodología de diseño propuesta.

Balance Global de Beneficio Económico de la Implementación de la Nueva Metodología de Diseño.		
Descripción	Ahorro Por Pozo	Ahorro Total de las 8 Intervenciones
Ganancia Total en Tasa de Petróleo [BOPD].	228	1824
Ahorro en Energía [USD/Mes].	USD 9.293	USD 74.344
Ahorro en Tratamiento Químico [USD/Mes].	USD 181	USD 1.448
Ahorro en Costos Operacionales [USD]	USD 90.843	USD 726.744

Fuente: Autores.

Tabla 18. Balance global de beneficio económico de la implementación de la nueva metodología de diseño propuesta.

Balance Global de Beneficio Económico de la Implementación de la Nueva Metodología de Diseño.		
Descripción	Total Beneficio Económico del Primer Mes en Operación por Pozo.	Total Beneficio Económico del Primer Mes en Operación de las 8 intervenciones.
Ganancia Total en Tasa de Petróleo – [USD].	USD 376.200	USD 3.009.600
Ahorro en Energía [USD].	USD 9.293	USD 74.344
Ahorro en Tratamiento Químico [USD].	USD 181	USD 1.446
Ahorro en Costos Operacionales [USD].	USD 90.843	USD 726.744
TOTALES	USD 476.517	USD 3.812.134

Fuente: Autores.

El beneficio económico total obtenido por pozo es de **USD 476.517** para el primer mes de operación, a su vez el beneficio económico total para las ocho internaciones realizadas en el 2010 es de **USD 3.812.134** para el primer mes de operación, estos datos son obtenidos con respecto a la condición inicial de los pozos antes de intervenirlos para realizar trabajos aislamientos zonales selectivos por cementación, por lo cual se concluye que la ejecución de este tipo de operaciones asegurando el éxito del trabajo logra un nivel de beneficio económico alto y valioso para la compañía.

Adicionalmente al análisis comparativo de costos operacionales realizado a la implementación de la nueva metodología de diseño con respecto a la aplicación de la anterior, se realizaron evaluaciones económicas para la ejecución de la operación bajo estos dos escenarios.

5.2.1 Consideraciones de la evaluación económica.

1. La empresa operadora del campo que va a realizar la inversión en el trabajo, es una empresa multinacional de capital extranjero, asociada a la empresa estatal de petróleos para este proyecto, con una participación total en el proyecto del 50%.

2. Por política y estrategia de negocio de la Compañía, la evaluación económica de los trabajos de operaciones y su posterior decisión de inversión se realiza bajo el escenario más pesimista de producción.
3. El interés de oportunidad que maneja la empresa para evaluar económicamente los proyectos de inversión es de 15% efectivo anual; los criterios de evaluación económica aplicados es el análisis conjunto de los criterios de Valor Presente Neto (VPN), Valor Anual Neto (VAN) o Valor Presente Neto Periódico evaluado mensualmente, Periodo de Recuperación de la inversión y la Tasa Interna de Retorno (TIR), evaluados a 18 meses.
4. Las ganancias obtenidas del desarrollo de este proyecto son reinvertidas en más operaciones de Workover y otros proyectos del portafolio de inversión.
5. No se tuvo en cuenta la inflación debido a que para efecto del análisis económico los gastos y costos operacionales se mantienen constantes a causa de que las empresas de servicios mantiene contratos por tres años con los mismos precios y adicionalmente se asume un precio de petróleo constante en un valor de 50 US\$/BBL (Precio conservador; 35 dólares por debajo del precio actual a Enero de 2011).
6. Debido a que es un proyecto de inversión de un trabajo de la industria petrolera, se tiene en cuenta las regalías causadas las cuales para este contrato específico de asociación son del 20% aplicable a la producción; adicionalmente también se contempla dentro del análisis el impuesto a la renta de 33% aplicable a las ganancias y el impuesto de industria y comercio de 1% aplicable a los ingresos.
7. Los datos de producción para cada uno de los periodos del análisis económico están ajustados a partir de la producción inicial con un ritmo de declinación anual continuo del 30%; este dato es tomado a partir de la experiencia de producción y de los análisis de declinación de los bloques productores durante todo la historia del campo.

5.2.2 Evaluación económica de la ejecución del trabajo de aislamiento zonal por cementación con la implementación de cada una de las metodologías de diseño.

Los datos de entrada para el análisis de los criterios de la evaluación económica, considerando la aplicación de cada una de las metodologías de diseño para la ejecución del trabajo de aislamiento zonal por cementación, tienen en cuenta los datos de producción promedio de aceite y fluido total, así como los costos operacionales del tratamiento de los fluidos de producción, el costo de energía utilizado en el levantamiento artificial y el costo de la ejecución de la trabajo dado por el indicador de éxito operacional resultado de la implementación cada metodología.

Se realiza un análisis económico para la ejecución de la operación bajo el escenario de la metodología de diseño estadística y otro bajo el escenario de la nueva metodología de diseño conceptual propuesto, con el objetivo de realizar un comparativo de todos los criterios de evaluación económica y determinar el grado de beneficio financiero total de la aplicación de la nueva metodología de diseño.

Tabla 19. Parámetros de entrada para la evaluación económica de la metodología de diseño anterior.

Parámetros de Entrada para la Evaluación Económica de la Metodología de Diseño Anterior.	
Tasa de Petróleo Inicial Promedio [BOPD].	294
Tasa de Fluido Inicial Promedio [BFPD].	2349
Costo Operacional Workover de Aislamiento Zonal por Cementación [USD].	USD 252.344
Costo de Completamiento del Pozo. [USD].	USD 80,000
Costo de Energía [USD/Bls/Mes].	2,9
Costo del Tratamiento Químico [USD/Bls/Mes].	0,4

Fuente: Autores.

Tabla 20. Parámetros de entrada para la evaluación económica de la nueva metodología de diseño propuesta.

Parámetros de Entrada para la Evaluación Económica de la Nueva Metodología de Diseño Propuesta.	
Tasa de Petróleo Inicial Promedio [BOPD].	294
Tasa de Fluido Inicial Promedio [BOPD].	2349
Costo Operacional Workover de Aislamiento Zonal por Cementación [USD].	USD 161.500
Costo de Completamiento del Pozo. [USD].	USD 80,000
Costo de Energía [USD/Bls/Mes].	2,9
Costo del Tratamiento Químico [USD/Bls/Mes].	0,4

Fuente: Autores.

Los resultados del análisis económico realizado al trabajo de aislamiento zonal por cementación aplicando la metodología de diseño con base estadística y la nueva metodología de diseño conceptual, muestran los siguientes criterios de evaluación económica:

Tabla 21. Comparativo indicadores evaluación económica del trabajo de aislamiento zonal por cementación.

Evaluación Económica del Trabajo de Aislamiento Zonal por Cementación con la Aplicación de las Dos Metodologías.			
Metodología de Diseño Anterior		Nueva Metodología de Diseño Propuesta	
VPN	USD 878.400	VPN	USD 953,480
VAN	USD 143.343	VAN	USD 155.594
TIR	300%	TIR	300%
Periodo de Restitución	3 Meses	Periodo de Restitución	2 Meses

Fuente: Autores.

La ejecución de trabajos de aislamiento zonal por cementación bajo cualquiera de las dos metodologías de diseño presenta buenos resultados económicos, esto basado principalmente en que este tipo de trabajos tienen excelentes prospectos de volumen de producción de petróleo en las zonas a abrir, lo cual permite que una variación adicional de medianas proporciones en la inversión inicial de la operación sea soportada por los altos ingresos de producción; sin embargo, la ejecución de operaciones con la aplicación de la nueva metodología de diseño permite obtener mejores resultados de los criterios de evaluación económica, que si bien tienen diferencias pequeñas con respecto a los resultados obtenidos de la evaluación económica del trabajo con la metodología con base estadística, los ahorros obtenidos en la inversión inicial representan importantes optimizaciones que sumadas a todos los trabajos ejecutados permiten obtener grandes ahorros que en algún momento podrían apalancar otros proyectos en el portafolio de inversión de la compañía.

6. CONCLUSIONES

- ✓ La implementación de la nueva metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal selectivo por medio de cementación en el campo Caño Limón ha obtenido un porcentaje de éxito operacional del **100%**, lo cual asegura la integridad y estabilidad del aislamiento en el tiempo.
- ✓ La formulación conceptual de la nueva metodología de diseño de las operaciones de aislamiento zonal permite obtener niveles de exactitud altos entre los diseños y los resultados de la ejecución de los trabajos.
- ✓ La ejecución de operaciones de aislamiento con indicadores de éxito operacional del **100%** permite proponer la metodología de diseño con bases conceptuales como un estándar de aplicación general en la industria del petróleo.
- ✓ La optimización de los indicadores de costos y tiempos operacionales como resultado de la implementación de la nueva metodología de diseño en la ejecución de operaciones de aislamiento zonal por cementación presenta ventajas y hace mas viable la ejecución de este tipo de operaciones desde el punto de vista de aplicación, tiempos, costos y riesgos operacionales con respecto a los demás sistemas de aislamiento zonal como lo son el Scab Liner y Casing Patch.
- ✓ La aplicación de la nueva metodología de diseño de operaciones de aislamiento zonal por cementación ha logrado un ahorro en ejecución de costos operacionales promedio por trabajo de **USD 90.844**.
- ✓ La ejecución de operaciones de aislamiento zonal por cementación asegurando el **100%** de éxito operacional logra optimizar los indicadores de las operaciones de producción de los pozos, desde la optimización del tratamiento químico y disponibilidad de capacidad remanente en las facilidades por menor fluido tratado hasta la optimización del levantamiento artificial por diseño de equipos y menor levantamiento de agua de producción, sumado a los ahorros de costos operacionales obtenidos por la implementación de la nueva metodología de diseño.
- ✓ El balance económico total de realizar operaciones de aislamiento zonal por cementación con la nueva metodología de diseño, con el objetivo de optimizar la producción de los pozos petroleros del campo Caño Limón genera un beneficio económico promedio de **USD 476.517** por inversión inicial del trabajo para el primer mes de operación con respecto a las condiciones iniciales de producción.

- ✓ La implementación de la nueva metodología de diseño obtiene excelentes resultados económicos, optimizando así los resultados obtenidos de la aplicación de la anterior metodología y permitiendo alcanzar ahorros importantes en la inversión inicial de las operaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- COWAN, K. M.: “Remedial cementing”, Technical progress report, BRC-102-89, Shell Development Company, (Octubre 1989).
- “Conformance technology – identification and treatment of water-control problems for improved reservoir recovery efficiency,” Halliburton energy services, (1996).
- ECONOMIDES, Michael J., WATTERS, Larry T., and Dunn-Norman, Shari: “Petroleum well construction”, (1998).
- GRAVES, W. GORDON, Ott, William K., and Woods, Joe D.: “Mature Oil & Gas Wells Downhole.
- HIGUERA, Daniel. “Evaluación de las prácticas de aislamiento de zonas intermedias mediante trabajos de cementación remedial en la zona de llanos norte”. UIS. 2007.
- Ingeniería de cementaciones, tomo 7, (México 2005).
- KENDRICK, Don D., and Townsend, STEVE C.: “A review of squeeze cementing success in the north permian basin business unit, workover and completion group”, F91-P-49, Amoco production company, (Julio 1991).
- Nelson, Erik B.: “Well cementing,” Schlumberger, (1990). “Worldwide cementing practices”, primera edición, Special book project 88-59, API (1991).
- Remedial cementing practices document, pagina 10 a 52.
- Remediation handbook – primera edición, (2004).
- RIKE, J.L., and Erick, Squeeze cementing: state of the art, Rike Service Inc. 1982.
- RIKE, J. L., “Obtaining successful squeeze-cementing results” SPE – reprint series 5A – well completions, segunda edición (1980).
- SMITH, Dwight K.: “Cementing – monograph volume 4, segunda edición, SPE (1976).

- SMITH, Dwight K.: "Cementing – monograph volume 4, edición revisada, SPE (1990).
- TOWNSEND, Steve C.: "A review of squeeze cementing techniques and guidelines," F90-P-65, Amoco production company, (Septiembre 1990).
- "Well completions," No. 5a, primera edición, SPE, (1978).