

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 23 de agosto de 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Jaime Alberto Morales Manchola, con C.C. No. 1075274030,

Juan Nicolás Trujillo Cabrera, con C.C. No. 1075279502,

Autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado “DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE ASENTAMIENTO DEL ZAPATO DEL REVESTIMIENTO DURANTE LA PERFORACIÓN, CON BASE EN LAS PRUEBAS DE INTEGRIDAD (LOT, FIT), TENIENDO EN CUENTA UN INFLUJO DE GAS” presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de INGENIERO DE PETROLEOS; autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE: JAIME ALBERTO MORALES MANCHOLA

Firma: Jaime A. Morales M.

EL AUTOR/ESTUDIANTE: JUAN NICOLÁS TRUJILLO CABRERA

Firma: Juan Nicolás Trujillo C.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: “DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE ASENTAMIENTO DEL ZAPATO DE REVESTIMIENTO DURANTE LA PERFORACIÓN CON BASE EN LAS PRUEBAS DE INTEGRIDAD (LOT-FIT), TENIENDO EN CUENTA UN INFLUJO DE GAS”

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Morales Manchola	Jaime Alberto
Trujillo Cabrera	Juan Nicolás

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Vargas Castellanos	Constanza

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero de petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería de petróleos

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2016 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 76

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 4

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías ___ Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general X Grabados ___ Láminas ___
 Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos ___ Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: El formato del documento es PDF y no requiere de ningún software para su lectura. En cuando al software resultado del proyecto se agrega con su respectivo instalador JAVA.

MATERIAL ANEXO: Software “Depthshoe” disponible para cualquier usuario.

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Zapato de revestimiento</u>	<u>Casing shoe</u>
2. <u>Pruebas de integridad</u>	<u>Integrity test</u>
3. <u>Tolerancia de influjos</u>	<u>Kick Tolerance</u>
4. <u>Perforación</u>	<u>Drilling</u>
5. <u>Diseño de pozos</u>	<u>Well desing</u>

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En este trabajo se presenta una metodología para el diseño de las profundidades de las sartas de revestimiento en un pozo de petróleo, usando el concepto de la tolerancia a un influjo de gas. Estos procedimientos se implementaron en un código escrito en la herramienta de programación de Java. Dentro de los algoritmos propuestos, se encuentran dos procedimientos. El primero es uno de tipo iterativo para definir una profundidad mínima y una máxima en la que debe estar situado el zapato del revestimiento, con base en una tolerancia al influjo definida y con la presión de fractura calculada a partir de las pruebas de integridad que se realizan previamente. El fundamento se encuentra en predecir la presión generada en el zapato del revestimiento durante la circulación de un volumen definido para un influjo de gas, encontrando una profundidad que no sobrepase la presión de fractura medida en el zapato mientras el influjo migra y se expande. El segundo método tiene en cuenta las mismas consideraciones y principios del primero, a diferencia

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 4

de que en este, el objetivo es definir el volumen máximo tolerado en un influjo con una profundidad objetivo definida previamente y que no varía. Posteriormente, se muestran dos ejemplos elaborados para demostrar la aplicación de la metodología propuesta.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This document presents a methodology for designing setting depths of casing strings in oil wells using the concept of kick tolerance. These procedures were implemented in a macro written with the Java programming tool. Within the proposed algorithms, there are two procedures. The first one is an iterative procedure to define the shallowest depth and the deepest depth for the casing shoe, based on a defined kick tolerance and with the fracture pressure calculated from the leak off test that was previously made. The focal point is the prediction of the generated pressure in the casing shoe during the circulation of a defined volume for a gas influx, finding a depth not exceeding the fracture pressure measured in the shoe while the influx migrates and expands. The second method takes into account the same considerations and principles of the first method, but its goal is to define the maximum tolerated volume in an influx with target depth previously defined and it doesn't vary. Subsequently, two examples are shown to prove the application of the proposed methodology.



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

4 de 4

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Luis Humberto Orduz

Firma:

Nombre Jurado: Luis Fernando Bonilla

Firma:

**“DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE ASENTAMIENTO DEL ZAPATO
DEL REVESTIMIENTO DURANTE LA PERFORACIÓN, CON BASE EN LAS
PRUEBAS DE INTEGRIDAD (LOT-FIT), TENIENDO EN CUENTA UN INFLUJO
DE GAS”**

**JAIME ALBERTO MORALES MANCHOLA
JUAN NICOLÁS TRUJILLO CABRERA**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA
2016**

**“DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE ASENTAMIENTO DEL ZAPATO
DEL REVESTIMIENTO DURANTE LA PERFORACIÓN, CON BASE EN LAS
PRUEBAS DE INTEGRIDAD (LOT-FIT), TENIENDO EN CUENTA UN INFLUJO
DE GAS”**

**JAIME ALBERTO MORALES MANCHOLA
JUAN NICOLÁS TRUJILLO CABRERA**

Trabajo de Tesis de grado

**Directora
Constanza Vargas Castellanos
Ingeniera de Petróleos**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA
2016**

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Neiva, 17 de Junio de 2016

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS.....	13
1. INTRODUCCIÓN A LOS PARAMETROS DEL MODELO.....	14
1.1. TOLERANCIA A LOS INFLUJOS (KICK TOLERANCE – KT).....	14
1.1.1. Tolerancia a los influjos en la industria petrolera	15
1.1.2. Calculo de la tolerancia a un influjo.....	15
1.1.3. Intensidad del influjo (kick intensity – KI).....	17
1.2. PRESION DE FORMACIÓN.....	17
1.2.1. Formaciones con presión normal	18
1.2.2. Formaciones con presión subnormal	18
1.2.3. Formaciones con presión anormal	18
1.3. PRESIÓN DE FRACTURA DE LA FORMACIÓN	19
1.3.1. Presiones de fractura en la industria del petróleo y gas.....	20
1.4. PRUEBAS DE PERDIDA DE FLUIDO (LEAK OFF TEST – LOT) Y PRUEBAS DE INTEGRIDAD DE LA FORMACIÓN (FORMATION INTEGRITY TEST – FIT).....	20
1.4.1. Prueba de perdida de fluido (Leak Off Test – LOT)	20
1.4.2. Prueba de integridad de la formación (Formation integrity test – FIT). 27	
1.5. LEY DE BOYLE	29
1.6. ZAPATO DEL REVESTIMIENTO: PUNTO MÁS DEBIL DEL POZO.....	31
1.7. OTROS CONCEPTOS	32
1.7.1. Presión de cierre de la tubería de revestimiento (SICP)	32
1.7.2. Presión de cierre de la tubería de perforación (SIDPP)	32
1.7.3. La máxima presión anular admisible en superficie (MAASP).....	32
1.7.4. Peso del lodo (MW).....	33

1.7.5. Presión hidrostática.....	33
1.7.6. Gradiente de presión.....	34
1.7.7. Capacidades volumétricas	34
2. EXPLICACIÓN PASO A PASO DEL MODELO.....	36
2.1. CONDICIONES EN LAS QUE SE DESARROLLA EL MODELO	36
2.2. CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE ASENTAMIENTO DEL ZAPATO DE REVESTIMIENTO	36
2.2.1. Cálculo de la profundidad máxima	36
2.2.2. Cálculo de la profundidad mínima	42
2.3. METODO ALTERNATIVO	48
2.3.1. Cálculo de la tolerancia al influjo (KT)	48
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	53
NOMENCLATURA.....	54
BIBLIOGRAFIA	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultado de las iteraciones para el cálculo de la profundidad máxima.....	65
Tabla 2. Resultado de las iteraciones para el cálculo de la profundidad mínima.....	69

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Subsistemas modelo Altun	21
Figura 2. Expansión del revestimiento.....	22
Figura 3. Pruebas de integridad de la formación.	26
Figura 4. Comportamiento de la presión en una prueba de integridad.	27
Figura 5. Prueba de integridad de la formación.	28
Figura 6. Ley de Boyle.....	29
Figura 7. Migración del gas dentro del pozo, parte I.	30
Figura 8. Migración del gas dentro del pozo, parte II.	30
Figura 9. Presión de cierre de tubería y revestimiento.....	32
Figura 10. Diagrama de flujo para el cálculo de la profundidad máxima.....	41
Figura 11. Diagrama de flujo para el cálculo de la profundidad mínima	47
Figura 12. Diagrama de flujo del método alternativo.....	52
Figura 13. Ventana emergente de aceptación	58
Figura 14. Proceso de instalación.....	59
Figura 15. Interfaz DepthShoe	59
Figura 16. Ingreso de datos “Nuevo cálculo de profundidades”	60
Figura 17. Profundidad mínima y máxima de asentamiento	61
Figura 18. Tolerancia al influjo admisible en fondo	62
Figura 19. Carga de datos para el cálculo de la profundidad de asentamiento	71
Figura 20. Profundidad máxima y mínima de asentamiento.	72
Figura 21. Ingreso de datos y cálculo de la tolerancia admisible en fondo.	75

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. MANUAL DEL USUARIO PARA EL MANEJO DEL SOFTWARE DEPTHSHOE.....	57
ANEXO B. APLICACIÓN DEL METODO PROPUESTO	62
ANEXO C. APLICACIÓN DEL METODO ALTERNATIVO.....	72

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para el diseño de las profundidades de las sartas de revestimiento en un pozo de petróleo, usando el concepto de la tolerancia a un influjo de gas. Estos procedimientos se implementaron en un código escrito en la herramienta de programación de Java.

Dentro de los algoritmos propuestos, se encuentran dos procedimientos. El primero es uno de tipo iterativo para definir una profundidad mínima y una máxima en la que debe estar situado el zapato del revestimiento, con base en una tolerancia al influjo definida y con la presión de fractura calculada a partir de las pruebas de integridad que se realizan previamente. El fundamento se encuentra en predecir la presión generada en el zapato del revestimiento durante la circulación de un volumen definido para un influjo de gas, encontrando una profundidad que no sobrepase la presión de fractura medida en el zapato mientras el influjo migra y se expande.

El segundo método tiene en cuenta las mismas consideraciones y principios del primero, a diferencia de que en este, el objetivo es definir el volumen máximo tolerado en un influjo con una profundidad objetivo definida previamente y que no varía.

Posteriormente, se muestran dos ejemplos elaborados para demostrar la aplicación de la metodología propuesta.

ABSTRAC

This document presents a methodology for designing setting depths of casing strings in oil wells using the concept of kick tolerance. These procedures were implemented in a macro written with the Java programming tool.

Within the proposed algorithms, there are two procedures. The first one is an iterative procedure to define the shallowest depth and the deepest depth for the casing shoe, based on a defined kick tolerance and with the fracture pressure calculated from the leak off test that was previously made. The focal point is the prediction of the generated pressure in the casing shoe during the circulation of a defined volume for a gas influx, finding a depth not exceeding the fracture pressure measured in the shoe while the influx migrates and expands.

The second method takes into account the same considerations and principles of the first method, but its goal is to define the maximum tolerated volume in an influx with target depth previously defined and it doesn't vary.

Subsequently, two examples are shown to prove the application of the proposed methodology.

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera está inmersa en un ambiente de alto riesgo en donde la seguridad debe ser parte primordial para que nadie quede expuesto. La construcción de un pozo de petróleo no es la excepción, desde el inicio de su perforación hasta el momento de su completamiento y su respectiva estimulación se debe tener en cuenta la seguridad. Todos estos riesgos están asociados a las condiciones de presiones y temperaturas extremas con las que cuentan los pozos, por lo que se deben tomar acciones que permitan mejorar cada día la planeación de un pozo de petróleo.

Durante el completamiento de un pozo, existen parámetros o factores muy importantes al momento de diseñar y correr el revestimiento del mismo. Estos parámetros se fundamentan primordialmente en tener un control de todos los riesgos que presenta el pozo para el medio ambiente, los trabajadores y los equipos.

Estos diseños son los que se relacionan con los esfuerzos inmersos a la tubería (Tensión, Colapso, Estallido). Pero teniendo en cuenta que al momento de la perforación de un pozo el riesgo máximo es controlar los influjos o patadas de pozo que se puedan registrar y que el punto más crítico en el sistema de un pozo se encuentra en el zapato de un revestimiento. Es necesario hacer un ajuste de la profundidad teniendo en cuenta los riesgos por influjos.

La tolerancia a un influjo es un factor importante en la industria, que permite a los ingenieros de perforación establecer varios parámetros en la fase de desarrollo de un pozo, como las profundidades de los revestimientos, longitudes de hueco abierto, etc. También se puede considerar un factor de seguridad muy valioso para evitar problemas de control del pozo.

Existen muchas definiciones y métodos de cálculo diferentes para tasar los volúmenes críticos en los que un influjo de gas puede llegar a afectar el zapato de un revestimiento y cuál sería la profundidad óptima para eliminar este influjo de la manera más segura. Sin embargo cuando se tiene una actividad tan dinámica y de decisiones ágiles como en la industria del petróleo y gas, es una cuestión muy importante tener una estandarización y un método rápido y claro para que no existan confusiones en los momentos determinantes.

Este trabajo presenta una metodología rápida y sencilla para calcular este factor de ajuste, que sugiere una profundidad segura de asentamiento del revestimiento.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Presentar un procedimiento para calcular paso a paso la profundidad de asentamiento de la sección del revestimiento, con base en las pruebas de integridad (LOT-FIT), teniendo en cuenta un influjo de gas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un programa con la herramienta “Visual Basic” de Excel o algún programador disponible que permita efectuar rápidamente los cálculos del procedimiento que se presentará.
- Mostrar la trascendencia que tiene un influjo de gas como factor de ajuste para la profundidad de asentamiento del revestimiento de un pozo.
- Determinar la importancia de este factor a la hora de fijar la profundidad de asentamiento del revestimiento de un pozo.

1. INTRODUCCIÓN A LOS PARAMETROS DEL MODELO

1.1. TOLERANCIA A LOS INFLUJOS (KICK TOLERANCE – KT)

La definición de este término muestra la falta de estandarización que existe en la industria sobre este concepto, lo que puede dar lugar a confusión y el mal uso de este factor como una barrera de seguridad. Algunas de las muchas diferentes definiciones usadas actualmente son:

- Es la presión de poro máximo permisible, expresada en la densidad de lodo equivalente tal que si cierto volumen de influjo se produce a una profundidad cualquiera con un fluido de perforación específica, el pozo podría ser cerrado y la patada circular con seguridad, es decir, no fracturar la formación más débil del pozo¹.
- Se puede entender como la capacidad del pozo para soportar la presión generada durante las operaciones de control de pozos (cierre del pozo y posterior proceso de circulación para expulsar el influjo) sin fracturarse la formación más débil².
- Es la altura máxima de una columna de gas que el pozo puede tolerar, es decir, sin que se produzca fractura de la formación. Esta altura se convierte en un volumen en barriles, con el área de la sección transversal y la geometría del pozo³.
- Es el mayor volumen de influjo que se puede sacar del pozo de forma segura y se basa en los resultados de una prueba de integridad⁴.

Este trabajo se desarrolla con base en la siguiente definición:

La tolerancia al influjo es un concepto que mide el volumen de las manifestaciones de gas máximas que pueden ingresar al pozo, teniendo en cuenta el aumento de la presión en el zapato de revestimiento, debido a la expansión de la

¹SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary [En línea]. <<http://www.slb.com/search>>.

²OXY, “Manual comprensión del control de pozos”. Dic. 2010. Capítulo 4.

³ACOSTA, Carla. “Model for kick tolerance”. Julio 2012, Master of petroleum Engineering. Norwegian University of Science and Technology.

⁴SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, PetroWiki [En línea]. <<http://petrowiki.org/>>.

manifestación, a medida que circula por el pozo. Básicamente es el volumen máximo de influjo con el que se puede cerrar con éxito el pozo y hacer circular el pozo sin superar la presión de fractura medida en las pruebas de integridad (Leak off test – LOT)⁵.

1.1.1. Tolerancia a los influjos en la industria petrolera

Calcular correctamente la tolerancia a un influjo es esencial para el diseño y la perforación segura de un pozo. Curiosamente, ni las publicaciones API ni el Manual IADC de perforación proporcionan un método puntual para calcular este factor. No obstante, hay numerosas directrices relacionadas con la perforación que describen mejores prácticas y recomendaciones en detalle, pero no hay ningún documento uniforme para ser utilizado por todos los operadores y contratistas de perforación. Esto debido a que este concepto no es ampliamente empleado en la toma de decisiones durante la perforación.

Sin embargo, esto no debería ser así, debido a que este factor proporciona información bastante útil como lo es, la profundidad del pozo que puede ser perforada entre cada zapata de revestimiento, entre otros.

Durante la perforación, la tolerancia a un influjo será definida por las políticas de seguridad de la compañía operadora del pozo. De acuerdo a esta determinación, se ajustarán los sensores de medición en los tanques de retorno de los fluidos del pozo, que serán los que emitirán una alarma al momento de alcanzar el volumen de influjo fijado⁶.

1.1.2. Calculo de la tolerancia a un influjo

Una de las precauciones que se deben tener cuando se cierra un pozo es no sobrepasar la máxima presión admisible en superficie por el espacio anular (MAASP), el influjo que genera mayor pérdida de presión hidrostática en el fondo del pozo son los influjos de gas, como consecuencia también se van a tener altas presiones en el espacio anular en superficie, un pequeño influjo de gas se expande a medida que se circular hacia la superficie, por lo que la columna de

⁵ TECHNICAL FORMATION CENTER, “Manual de control de pozo”, Ene. 2014, p.66.

⁶ OXY, “Manual comprensión del control de pozos”. Diciembre 2010. Capitulo 1, capítulo 4 p. 3-8, capítulo 6 p. 5-14, capítulo 8 p. 7-21.

fluido de trabajo va disminuyendo, los influjos de gas. Para no sobrepasar la MAASP se debe calcular el máximo volumen de un influjo de gas que se puede circular fuera del pozo sin causar pérdidas excesivas de fluido de perforación en la formación que está debajo del ultimo revestimiento instalado y cementado, basado en una presión de formación⁷.

Los cálculos de la tolerancia al influjo tienen en cuenta tanto la intensidad como el volumen del influjo. La tolerancia al influjo se debe calcular antes de perforar el pozo. Para cada sección del agujero, el diseño de la tolerancia al influjo (incluidas la intensidad y el volumen de influjo) se anotarán en el procedimiento de perforación y en el pronóstico y resumen de riesgos.

La tolerancia al influjo tiene en cuenta factores como:

- Longitud del ensamblaje de fondo (Bottom Hole Assembly – BHA).
- Geometría del ensamblaje de fondo (Bottom Hole Assembly geometry – BHA) y capacidades anulares del pozo.
- Densidad del influjo.
- Cambios de temperatura.
- Pérdidas por fricción.
- Factor de compresibilidad.
- El zapato del revestimiento es el punto más débil del pozo.
- Solubilidad del gas.
- Reología del lodo.
- Velocidad de migración del influjo.

Conociendo los factores anteriores, este cálculo requiere unas suposiciones, las cuales son:

- El influjo es una ‘burbuja única’ de gas.
- En la condición de cierre inicial, el influjo se encuentra en el fondo del pozo perforado al momento.
- Se ignoran los efectos de la migración de gas (excepto la expansión del mismo), la solubilidad de gas, la temperatura en el fondo del pozo y sus cambios a medida que el influjo migra y la compresibilidad de gas.

⁷ TECHNICAL FORMATION CENTER, “Manual de control de pozo”, Enero 2014, p.67.

Aunque estas presunciones son poco realistas, los métodos simples han obtenido amplia aceptación en la industria de la perforación debido a que generalmente arrojan tolerancias conservadoras (más seguras).

El procedimiento para calcular la tolerancia al influjo es el siguiente:

- Se asume una presión de cierre en la tubería que equivale al desbalance que puede existir entre la densidad del fluido de perforación y la densidad equivalente de la formación a la TVD planeada de terminación de la sección.
- Calcular la MAASP con los datos de la prueba de integridad (Leak Off Test – LOT) en la formación del último revestimiento instalado y cementado.
- Calcular la longitud de gas por debajo del zapato para que la presión de cierre en el revestimiento (SICP) sea igual a la MAASP.
- Calcular el volumen en el espacio anular por debajo del zapato equivalente a la longitud de gas calculada en el paso anterior. (V_{gz} – Volumen de gas debajo del zapato).
- Calcular el volumen de gas equivalente del volumen de gas debajo del zapato (V_{gz}), en el momento del cierre en el espacio anular a las condiciones del fondo del pozo. (V_{gc} – volumen de gas en el cierre).
- Reportar la tolerancia al influjo como el máximo volumen permitido de gas en el momento del cierre del pozo (V_{gc}).

1.1.3. Intensidad del influjo (kick intensity – KI)

Para que se presente un influjo es necesario que la presión de la formación supere la presión hidrostática ejercida por el lodo de perforación. Por lo tanto, la intensidad de un influjo es la diferencia que debe existir entre la presión de la formación y el peso del lodo utilizado en el pozo. Esta medida generalmente es reportada en términos de densidad equivalente, es decir, en Lb/Gal.

1.2. PRESION DE FORMACIÓN

Es la presión de los fluidos contenidos dentro de los espacios porosos de una roca, también se le llama presión de poro. Estas presiones de formación se clasifican en:

- Normales.

- Subnormales.
- Anormales.

La severidad de un influjo depende de varios factores, uno de los más importantes es la permeabilidad de la roca, una roca con alta permeabilidad y porosidad tendrá más posibilidad de provocar un influjo que una roca con baja permeabilidad y porosidad.

1.2.1. Formaciones con presión normal

Son aquellas que se pueden controlar con densidades del agua salada. Las densidades del fluido requerido para controlar estas presiones es el equivalente a un gradiente de 0.433 Psi/Ft.

Para conocer la “normalidad” o “anormalidad” de las presiones en cierta área, se deberá establecer el gradiente del agua congénita en las formaciones de esa región, conforme el contenido de sales disueltas.

1.2.2. Formaciones con presión subnormal

Son aquellas que se pueden controlar con una densidad menor que la de agua dulce, equivalente a un gradiente menor de 0.433 Psi/Ft.

Una posible explicación de la existencia de tales presiones en las formaciones, es considerar que el gas y otros fluidos han escapado por fallas u otras vías del yacimiento, causando su despresurización.

1.2.3. Formaciones con presión anormal

Son aquellas en que la presión de formación es mayor a la que se considera como presión normal. Las densidades de fluidos requeridos para controlar estas presiones equivalen a gradientes más altos que 0.433 Psi/Ft.

Estas presiones se generan usualmente por:

- La compresión que sufren los fluidos de la formación debido al peso de los estratos superiores, debido a la baja compactación.

- La compresión que sufren los fluidos de la formación debido a la compresibilidad de la roca, esto se presenta después de la zona de transición.

Las zonas de presión de formación anormales se originaron durante el proceso de depositación y compactación, formándose una barrera impermeable que impidió la liberación del agua de la formación por debajo de esta barrera. Esta barrera impermeable se formó debido a que el proceso de sedimentación y compactación ocurrió a un ritmo más rápido que el movimiento ascendente del agua. Consecuentemente, la porosidad de la formación debajo de esta barrera impermeable difiere de la tendencia normal⁸.

1.3. PRESIÓN DE FRACTURA DE LA FORMACIÓN

Presión de Fractura de la formación es la cantidad de presión necesaria para romper permanentemente la estructura de la roca de una formación. Solo superar la presión de formación no es suficiente para crear una fractura. Para ello hay unas consideraciones importantes:

- Las formaciones permeables y porosas permiten a la formación, dejar fluir un fluido en medio de sus poros. Por eso, los fluidos tienen que ser bombeados dentro de la formación. El flujo de fluido en el poro es limitado, pero una vez que el flujo de fluido en el poro es superado, la roca de la formación se estresa y se puede deformar y/o fracturarse.
- El Gradiente de fractura normalmente aumenta con la profundidad, debido al aumento en la presión de sobrecarga, que es la ocasionada por el peso de las capas de roca suprayacentes. Las formaciones profundas y comprimidas pueden necesitar presiones de fractura más altas para vencer la presión de formación y la resistencia estructural de la roca.
- Las formaciones menos compactadas, se fracturan con presiones más bajas.

⁸ UNAM, Conceptos generales del control de pozos, Capitulo 1, p. 6-8.

1.3.1. Presiones de fractura en la industria del petróleo y gas

Los datos generales de gradientes de fractura de las formaciones, se conocen de varias partes del mundo. Estos han sido determinados por varios tipos de pruebas que se realizan típicamente durante la perforación. Algunas pruebas son realizadas en pozos terminados y algunos durante servicios que reciben el pozo.

Los datos de estas pruebas ayudan en el cálculo de profundidad de revestimiento, opciones de control de pozo, presiones de la fractura de formación en pozos nuevos y pesos máximos de fluidos de perforación.

Por lo tanto la presión de Fractura, es la máxima presión de superficie que puede ser aplicada a un revestimiento lleno de líquido sin fracturar una formación debajo del zapato. Si se excede esta presión, puede causar una fractura.

No obstante, aunque los datos de un campo pueden existir, cada pozo es individual y debe ser tratado como tal⁹.

1.4. PRUEBAS DE PERDIDA DE FLUIDO (LEAK OFF TEST – LOT) Y PRUEBAS DE INTEGRIDAD DE LA FORMACIÓN (FORMATION INTEGRITY TEST – FIT)

Las pruebas de pérdida de fluido y las pruebas de integridad de la formación (LOT/FIT) se llevan a cabo para verificar que el revestimiento, el cemento y la formación inmediatamente debajo de la zapata de revestimiento puedan resistir las presiones predichas para el agujero requeridas para perforar de manera segura hasta el siguiente tramo planeado de revestimiento. Esta prueba determinará la resistencia real a la fractura, la tolerancia al influjo y el peso máximo de lodo para la siguiente sección del agujero.

1.4.1. Prueba de pérdida de fluido (Leak Off Test – LOT)

Se comienza a perforar utilizando un diseño de pozo con valores teóricos para presión de poro y gradiente de fractura. El LOT provee el valor real medido de la presión de fractura, las limitaciones de peso del lodo y el Peso de Lodo Equivalente (EMW), utilizado para perforar la siguiente sección del agujero. En general esta Prueba tiene como principal importancia determinar el gradiente de

⁹ WILD WELL CONTROL. Gradiente de fractura de la formación [diapositivas], 2011, 18 diapositivas, color, Imágenes.

fractura de una formación y se realiza en pozos exploratorios. En la actualidad existen muchos modelos teóricos y experimentales para calcular este parámetro, a continuación se presentan algunos:

1.4.1.1. Modelo Altun, G (LOT)

El modelo Altun fue desarrollado en 1999 para analizar mejor los resultados en formaciones que dan relaciones no lineales entre el volumen bombeado y la presión de la bomba observada. Esta sección discute los subsistemas, las soluciones matemáticas del modelo de Altun LOT¹⁰.

El modelo consta de 4 subsistemas: expansión de fluido, de expansión de revestimiento, de expansión del pozo y escape de líquidos (filtración). El comportamiento de cada subsistema es investigado de forma independiente y deben combinarse entre sí para mostrar el comportamiento total del sistema. La Figura 1. Muestra los subsistemas para el modelo Altun.

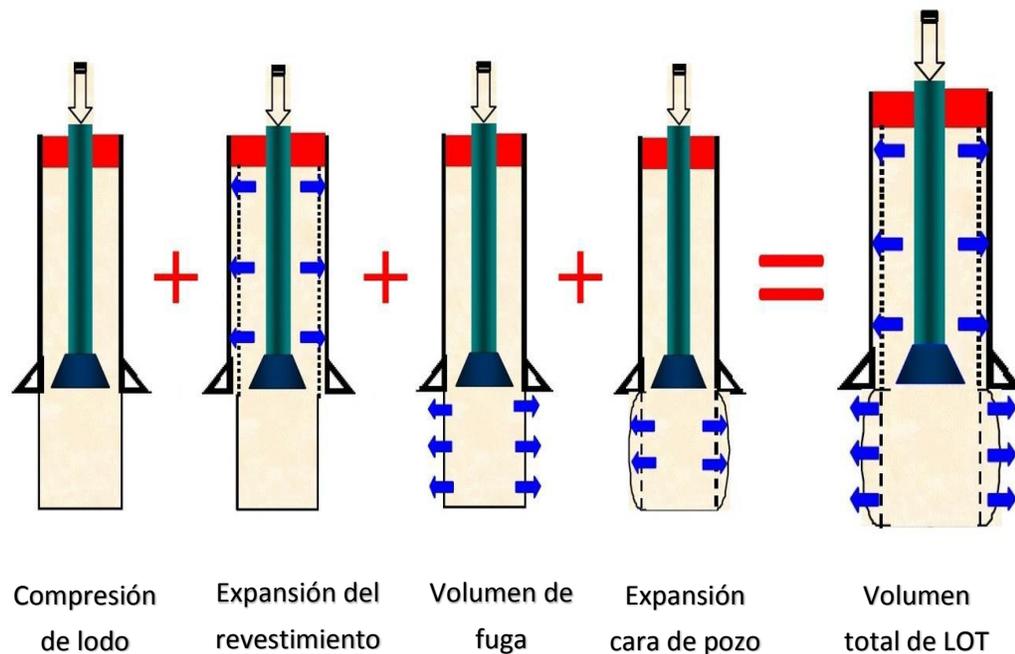


Figura 1. Subsistemas modelo Altun

Fuente: Fu Yao, Leak-Off Test Models, Thesis. 2014.

¹⁰ YAO, Fu. "Leak-Off Test (LOT) Models". Texas, May 2014. Master of Science in Engineering. The University of Texas at Austin. p. 38.

a. Compresión de lodo:

El límite del sistema para la compresión de fluido se supone que se fija a lo largo del LOT y el sistema sólo permitiría la compresión del fluido de perforación en el pozo. El bombeado para comprimir el volumen de lodo se determina de la siguiente ecuación:

$$V_m = c_{mud} * V_o * P \quad (1)$$

Dónde:

- Volumen a la compresión de lodo, V_m .
- Compresibilidad del lodo, C_{mud} .
- Volumen de lodo original en el sistema, V_o .
- Presión de la bomba, P .

b. Expansión del revestimiento:

El volumen requerido para el sistema de expansión del revestimiento está dividido en el volumen bombeado para expandir el revestimiento y el volumen bombeado para comprimir el volumen de expansión del revestimiento. La figura 8. Muestra el diagrama para la expansión del revestimiento.

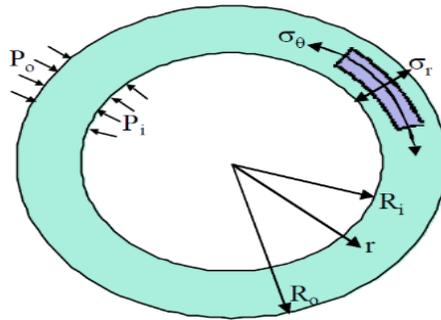


Figura 2. Expansión del revestimiento.

Fuente: Fu Yao, Leak-Off Test Models, Thesis. 2014.

Ecuación para el volumen bombeado para expandir el revestimiento es:

$$V_{ce} = 2\pi h_{csg} R_i^2 \frac{P}{E_{csg}} \left[-\frac{(R_o^2 + R_i^2)}{R_o^2 - R_i^2} (1 - \nu^2) - (\nu + \nu^2) \right] \quad (2)$$

Donde:

- V_{ce} = Volumen bombeado para expandir el revestimiento.
- h_{csg} = longitud de la cubierta del revestimiento.
- R_i = radio interior de la sarta de revestimiento.
- E_{csg} = Modulo de Young del revestimiento.
- P = Presión de la bomba.
- R_0 = Radio exterior de la sarta de revestimiento.
- ν = coeficiente de poisson del revestimiento.

Ecuación para el volumen bombeado para comprimir el volumen de expansión del revestimiento es:

$$V_{cce} = 2\pi h_{csg} C_{mud} R_i^2 \frac{P}{E_{csg}} \left[-\frac{(R_0^2 + R_i^2)}{R_0^2 - R_i^2} (1 - \nu^2) - (\nu + \nu^2) \right] \quad (3)$$

Donde:

- C_{mud} = compresibilidad del lodo de perforación.

c. Expansión cara de pozo:

El límite del sistema para la expansión del pozo no es fijo. El sistema global Volumen V_0 cambia con el tiempo durante la carga y aumenta a un nuevo volumen de $V_0 + V_e$. El incremento de volumen V_e es el incremento de volumen o el volumen variable del sistema debido a la expansión del pozo causada por la presión de la bomba. Al igual que el subsistema de expansión de revestimiento, el volumen bombeado para el sistema de expansión del pozo también se divide a su vez en volumen bombeado para expandir el pozo de sondeo y el volumen bombeado para comprimir el volumen de expansión del pozo.

Ecuación para el volumen de expansión de la cara del pozo es:

$$V_{be} = 2\pi h_{fmn} r_0^2 \left[\frac{P}{E_{fmn}} + \left(\frac{P}{E_{fmn}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Ecuación para el volumen bombeado para comprimir el volumen de expansión de la cara del pozo es:

$$V_{cbe} = 2\pi h_{fmn} r_0^2 C_{mud} P \left[\frac{P}{E_{fmn}} + \left(\frac{P}{E_{fmn}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Donde:

- V_{be} = volumen bombeado para expandir la cara del pozo.
- h_{fmn} = Longitud hueco abierto.
- r_0 = Radio hueco abierto.
- E_{fmn} = Modulo de Young de la formación.
- P = Presión de la bomba.
- V_{cbe} = Volumen bombeado para comprimir el volumen de expansión de la cara del pozo
- C_{mud} = Compresibilidad del lodo

d. Volumen de fuga:

El volumen de fugas en el modelo de Altun se describe utilizando el flujo de Poiseuille en los canales. La relación general para el volumen de fugas se da como:

$$V_l = D\Delta Pt \quad (6)$$

Donde:

- V_l = Volumen de fuga
- D = Constante de fuga
- ΔP = Diferencia de presión entre la punta del canal y la parte inferior del canal.
- t = tiempo.

Si el canal se supone de forma rectangular, entonces la contante de fuga sería:

$$D = 8.7 \times 10^9 \frac{W^2 A_{X-S}}{\mu L} \quad (7)$$

Donde:

- W = Anchura del canal.
- A_{x-s} = Área de la sección transversal de la fractura.
- μ = viscosidad del lodo.
- L = longitud del canal.

Volumen bombeado para comprimir el volumen de fugas se determina de la siguiente manera:

$$V_{cl} = DC_{mud}\Delta Pt \quad (8)$$

Donde:

- V_{cl} = volumen que comprime el volumen de fuga. (se diferencia del volumen de fuga agregándole la compresibilidad del lodo (C_{mud}))

Ya teniendo todos los volúmenes que se relacionan con cada uno de los subsistemas del modelo se procede a realizar una suma de todos los volúmenes con el fin de determinar el volumen total bombeado el cual tendrá relación directa con LOT.

1.4.1.2. Modelo Paknejad, a (LOT):

Paknejad presenta un nuevo método para evaluar LOT en los sedimentos marinos poco profundos en 2007. En esta sección se analiza el modelo de LOT Paknejad.

El modelo de LOT Paknejad se compone de dos piezas de gran tamaño. El primer componente representa el cambio de volumen en un sistema cerrado, que consiste en la compresión de fluido, expansión del revestimiento, y la expansión de pozo abierto. El segundo componente es la fuga de fluido a fracturas suponiendo flujo lineal¹¹.

Soluciones matemáticas de Paknejad a la compresión del fluido, la expansión del revestimiento, y la expansión en la cara del pozo, son idénticas a las soluciones matemáticas de Altun. Sin embargo, la fuga de fluido difiere de Altun y asume flujo lineal a través de las fracturas creadas durante una LOT, y se describe como:

$$\Delta P = \frac{4.064qB}{h_f x_f} \sqrt{\frac{\mu t}{k\phi C_t}} \quad (9)$$

¹¹ YAO, Fu. "Leak-Off Test (LOT) Models". Texas, May 2014. Master of Science in Engineering. The University of Texas at Austin. p. 46.

Donde:

- ΔP = Cambio de presión.
- B = Factor de volumen de formación.
- μ = viscosidad del lodo.
- h_f = Altura de la fractura.
- k = Permeabilidad.
- q = rata de inyección.
- X_f = longitud de la fractura.
- t = tiempo.

1.4.1.3. Modelo convencional (LOT):

Un LOT se lleva a cabo perforando 10 ft de nueva formación por debajo de la zapata. Para ello se debe cerrar el anular y la bomba en el pozo. A medida que se bombea lodo en un pozo cerrado, la presión de superficie aumentará hasta que ocurra la fractura hidráulica. Se debe continuar bombeando con el fin de que la fractura crezca y garantice que la fractura pase el cemento y mida realmente la resistencia a la fractura de la roca. Después de detener las bombas y esperar por 10 segundos, la presión en el Medidor de Presión del Revestimiento se utiliza para registrar la presión de fractura estática para los cálculos LOT¹².

Presión de Fuga de Formación = Presión Hidrostática + Presión de Revestimiento de superficie



Figura 3. Pruebas de integridad de la formación.

Fuente: Manual de control de pozos – Oxy.

¹² OXY, "Manual comprensión del control de pozos". Dic. 2010. Capítulo 8 p. 7.

$$P_{Frac} = (TVD \times 0.052 \times MW) + LOT \quad (10)$$

$$P_{Frac} = (1000 \text{ ft} \times 0.052 \times 9.0 \text{ ppg}) + 150 \text{ psi}$$

$$P_{Frac} = 618 \text{ psi}$$

Peso máximo de lodo estático:

$$\frac{618 \text{ psi}}{0.052 \times 1000} = 11.88 \text{ ppg} \sim 11.8 \text{ ppg}$$

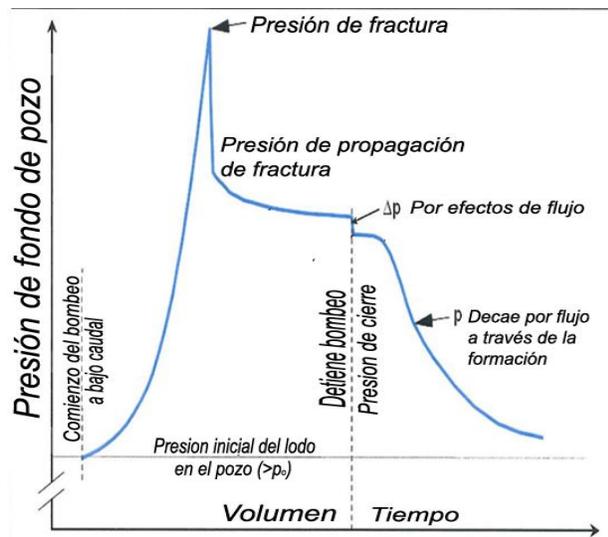


Figura 4. Comportamiento de la presión en una prueba de integridad.

Fuente: Manual de control de pozos – Oxy.

1.4.2. Prueba de integridad de la formación (Formation integrity test – FIT).

En campos de desarrollo, con datos conocidos, un FIT (Prueba de Integridad de Formación) validará la integridad del revestimiento y los pesos de lodo equivalentes requeridos para perforar la siguiente sección del agujero. Una Prueba de Integridad de Formación no está diseñada para romper la roca, sino para probar la capacidad de las rocas de mantener una cierta cantidad de presión y confirmar la integridad del cemento alrededor de la zapata.

Un FIT Se lleva a cabo perforando 10' de formación nueva por debajo de la zapata. Se debe cerrar el anular y se debe presurizar hasta una presión predeterminada con el lodo de perforación. Si la formación puede resistir la presión aplicada, la prueba se considera buena. Con estos datos se calcula el peso del lodo equivalente¹³.

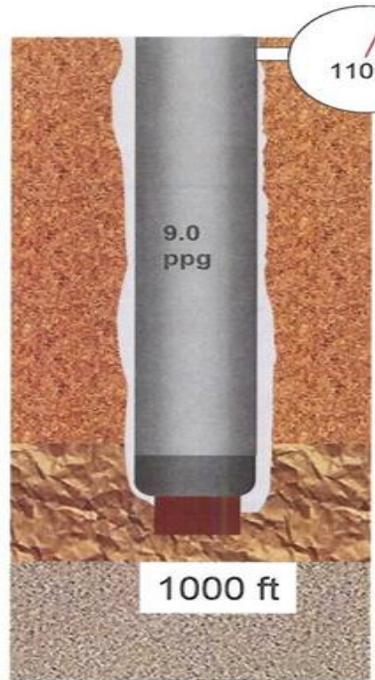


Figura 5. Prueba de integridad de la formación.

Fuente: Manual de control de pozos – Oxy.

FIT = Presión Hidrostática + Presión de Revestimiento de superficie

$$P_{Frac} = (1000 \text{ ft} \times 0.052 \times 9.0 \text{ ppg}) + 110 \text{ psi}$$

$$P_{Frac} = 578 \text{ psi}$$

Peso máximo de lodo estático:

$$\frac{578 \text{ psi}}{0.052 \times 1000} = 11.11 \text{ ppg} \sim 11.1 \text{ ppg}$$

¹³ OXY, “Manual comprensión del control de pozos”. Dic. 2010. Capítulo 8 p. 12.

1.5. LEY DE BOYLE

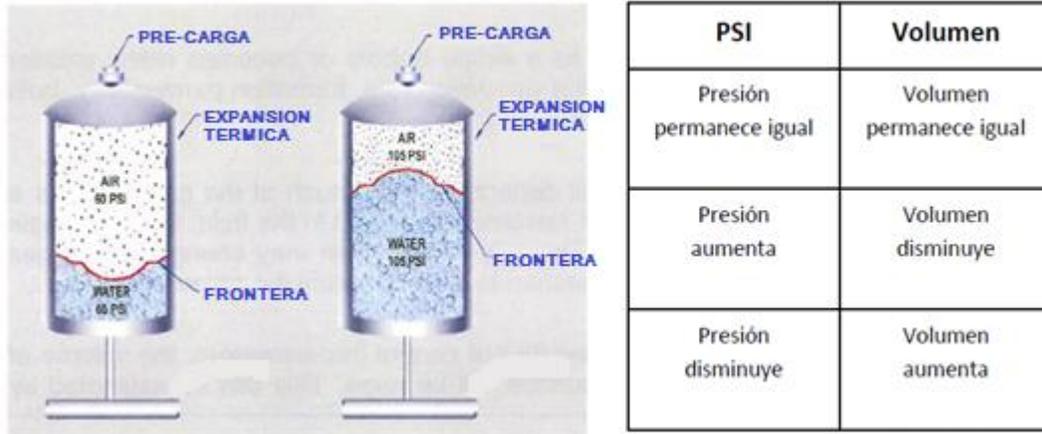


Figura 6. Ley de Boyle.

Fuente: Manual de control de pozos – Oxy.

En los años 1700, Robert Boyle investigó la relación entre el volumen de un gas seco ideal y su presión. Boyle fijó la cantidad de gas y su temperatura durante su investigación. Encontró que cuando manipulaba la presión, el volumen respondía en la dirección opuesta. Por ejemplo, cuando Boyle aumentó la presión en una muestra de gas, el volumen disminuyó.

La ley de Boyle es un método simple que se utiliza para comparar el resultado de un cambio en volumen y presión con el estado inicial de un volumen de gas fijo. En nuestros pozos, este cambio de volumen y presión es causado por un cambio en la profundidad debido a la migración de gas¹⁴. Los volúmenes y presiones de gas "antes" y "después" se relaciona mediante la siguiente ecuación:

$$V_1 P_1 = V_2 P_2 \quad (11)$$

En la práctica, usamos esta ecuación para resolver para una o para las dos cantidades "después" cuando conocemos el cambio en la otra cantidad "después". Por ejemplo:

$$P_2 = \frac{(P_1 * V_1)}{V_2} \quad o, \quad V_2 = \frac{(P_1 * V_1)}{P_2}$$

¹⁴ OXY, "Manual comprensión del control de pozos". Dic. 2010. Capítulo 4 p. 8.

Veamos cómo funcionan estas ecuaciones cuando calculamos el nuevo volumen de gas a medida que una burbuja migra el pozo con expansión incontrolada.

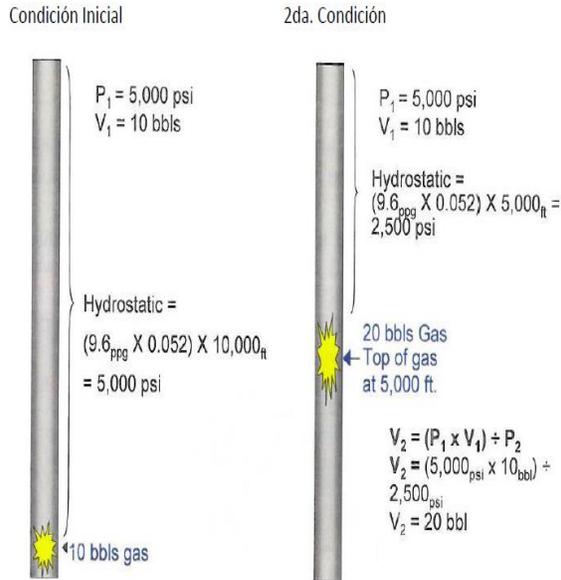


Figura 7. Migración del gas dentro del pozo, parte I.

Fuente: Manual de control de pozos – Oxy.

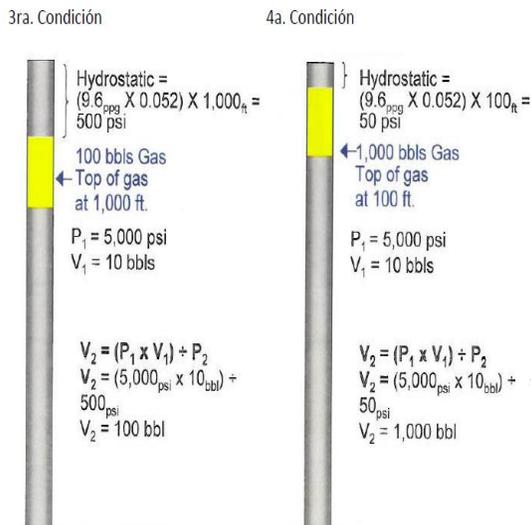


Figura 8. Migración del gas dentro del pozo, parte II.

Fuente: Manual de control de pozos – Oxy.

Expansión Incontrolada de Gas:

En teoría, si una manifestación de gas de 10 bbl se toma a 10,000 pies y se le permite migrar y expandirse (sin control), el volumen de gas sería de 3400 bbls.

En realidad, el pozo estaría sub-balanceado antes de que el gas inicial alcanzará la superficie y toda la columna de lodo sería descargada.

Reconocer un influjo y cerrar el pozo es la responsabilidad de trabajo más importante que tiene un perforador para protegerse a sí mismo, a su equipo, al medio ambiente y a la torre.

No Expansión de Gas:

Si se cierra el pozo con un influjo de gas migrando, y no se purga ningún fluido, el gas no se expande. Si no se permite al gas que se expanda, entonces la presión del gas permanece igual.

A medida que el gas migra, la presión de superficie, presión de fondo (Bottom Hole Pressure – BHP) y la presión en el zapato aumentará hasta que el pozo falle o la presión de la formación alcance la superficie.

Se debe permitir que el gas se expanda para reducir la presión, pero también se debe controlar la expansión entendiendo cómo usar el estrangulador para controlar el volumen de fluido que se purga del pozo¹⁵.

1.6. ZAPATO DEL REVESTIMIENTO: PUNTO MÁS DÉBIL DEL POZO

La suposición de que el gradiente de fractura es más bajo en el zapato del revestimiento previamente corrido no es necesariamente cierta; debido a que los gradientes de fractura varían con los esfuerzos locales (sobrecarga, presión de poro, etc.) y con los esfuerzos tectónicos y el tipo de formación. Por lo tanto, aunque generalmente el gradiente de fractura es más bajo a la altura del zapato, no siempre se puede hacer esta afirmación.

Sin embargo, si es correcto afirmar que el zapato del revestimiento es el punto más crítico en cuanto a la seguridad del pozo, debido a que si el zapato se llega a fracturar al momento de un influjo, no se podría tener control del pozo, ya que el influjo va a poder migrar libremente por el espacio existente entre el revestimiento y las formaciones.

¹⁵ OXY, “Manual comprensión del control de pozos”. Dic. 2010. Capítulo 4 p. 7-11.

1.7. OTROS CONCEPTOS

1.7.1. Presión de cierre de la tubería de revestimiento (SICP)

La presión ejercida en el extremo superior de un pozo cuando éste se cierra con el conjunto de preventoras. La presión puede provenir de la formación o de una fuente externa e intencional. La SICP puede ser igual a cero, lo que indica que cualquier formación abierta esta balanceada en forma efectiva por la columna hidrostática de fluido del pozo. Si la presión es igual a cero, el pozo se considera muerto y puede ser abierto a la atmósfera en forma segura¹⁶.

1.7.2. Presión de cierre de la tubería de perforación (SIDPP)

Diferencia entre la presión de formación y la presión hidrostática de la columna de líquido en la tubería de perforación.

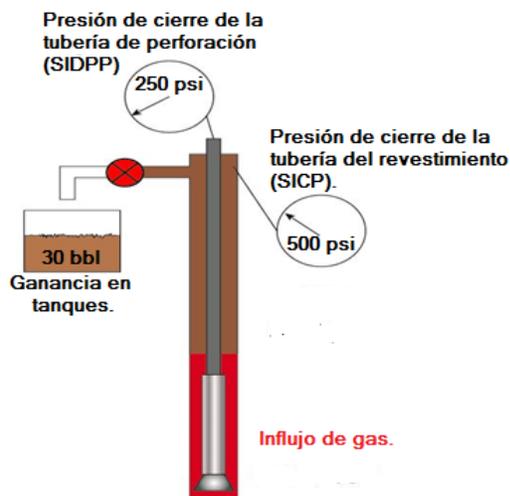


Figura 9. Presión de cierre de tubería y revestimiento.

Fuente: Manual de control de pozos – Oxy.

1.7.3. La máxima presión anular admisible en superficie (MAASP)

¹⁶ OXY, “Manual comprensión del control de pozos”. Dic. 2010. Capitulo 1.

Presión superficial que si se excede puede causar pérdidas de lodo en la formación por debajo de la zapata a través de una fractura, o puede causar fallas en el revestimiento o en equipos instalados en el pozo.

La Máxima Presión Anular Admisible en Superficie (MAASP) debe ser re-calculada si la densidad del fluido dentro del pozo cambia a una densidad diferente a la del fluido de prueba.

1.7.4. Peso del lodo (MW)

La masa por unidad de volumen de un fluido de perforación, sinónimo de densidad del lodo. El peso se expresa en lb/gal (también conocido como ppg). El peso del lodo controla la presión hidrostática en el pozo y evita el flujo no deseado al pozo. El peso del lodo también evita el colapso de la tubería de revestimiento y el agujero descubierto. Un peso de lodo excesivo puede causar pérdida de circulación por la propagación, y posterior llenado, de fracturas en la roca¹⁷.

1.7.5. Presión hidrostática

La fuerza por unidad de área producida por una columna de fluido. Es igual a la presión de fondo (BHP) si el pozo de encuentra estático y Se puede calcular de la siguiente manera¹⁸:

$$P_h = 0.052 \times TVD \times MW \quad (12)$$

Dónde:

- Presión hidrostática o presión de fondo estática (BHP), P_h (psi)
- Profundidad vertical verdadera, TVD (ft)
- Peso del fluido de perforación, MW (lb/gal)

1.7.5.1. Presión de fondo fluyendo (BHP)

En los pozos en circulación, el incremento de la BHP es equivalente a magnitud de la fricción del fluido en el espacio anular. El gradiente de BHP debe exceder el gradiente de presión de formación para evitar un influjo del fluido de formación en el pozo¹⁹.

¹⁷ SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary [En línea]. <<http://www.slb.com/search>>.

¹⁸ OXY, "Manual comprensión del control de pozos". Dic. 2010. Capitulo 1.

¹⁹ SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary [En línea]. <<http://www.slb.com/search>>.

$$BHP = 0.052 \times TVD \times EMW \quad (13)$$

Dónde:

- Presión de fondo fluyendo, BHP (psi)
- Profundidad vertical verdadera, TVD (ft)
- Densidad equivalente de circulación, EMW (lb/gal)

1.7.6. Gradiente de presión

La tasa de aumento de la presión por unidad de profundidad vertical es decir, psi por pie (psi / ft) y está dada por la siguiente ecuación:

$$\nabla P = 0.052 \times MW \quad (14)$$

Dónde:

- Gradiente de presión, ∇P (psi/ft)
- Peso del fluido de perforación, MW (lb/gal)

1.7.7. Capacidades volumétricas

1.7.7.1. Capacidad anular

La capacidad anular se mide entre el espacio que se forma entre la pared del hueco o la pared interior del revestimiento y el diámetro externo de la tubería de perforación, esta permite determinar el volumen que se encuentra en el espacio anular por cada unidad de longitud y se define por la siguiente ecuación:

$$Cap \text{ anular} = \frac{ID^2 - OD^2}{1029.4} \quad (15)$$

Dónde:

- Capacidad anular (bbl/ft)
- Diámetro interno del revestimiento o diámetro del hueco, ID (in)
- Diámetro externo de la tubería de perforación, OD (in)

1.7.7.2. Capacidad de la tubería

La capacidad anular es el espacio volumétrico efectivo que se encuentra entre la tubería.

$$Cap\ tubería = \frac{ID^2}{1029.4} \quad (16)$$

Dónde:

- Capacidad Tubería (bbl/ft).
- Diámetro interno de la tubería, ID (in).

2. EXPLICACIÓN PASO A PASO DEL MODELO

2.1. CONDICIONES EN LAS QUE SE DESARROLLA EL MODELO

Este trabajo se desarrolló bajo las siguientes condiciones de hueco durante el influjo:

- El influjo solo se ubicará y migrará a través del espacio anular, este modelo no considera presencia del influjo dentro de la tubería de perforación.
- La broca debe estar en fondo.
- Se recomienda siempre asumir un influjo de gas.

2.2. CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE ASENTAMIENTO DEL ZAPATO DE REVESTIMIENTO

Para el cálculo de la profundidad de asentamiento del zapato de revestimiento se tiene en cuenta el comportamiento de las presiones y sobrepresiones que se pueden presentar en el pozo y su relación con las pruebas de integridad de la formación (LOT y FIT), ya que estas determinan el valor límite admisible de sobrepresión que se pueda tener en superficie sin que se vea afectada la integridad del zapato de revestimiento, para ello se sigue un procedimiento paso a paso el cual determina un intervalo admisible de profundidades de asentamiento del revestimiento (profundidad máxima y mínima) y se explica a continuación:

2.2.1. Cálculo de la profundidad máxima

En este numeral se muestra el procedimiento que determina la profundidad máxima permitida para el asentamiento del zapato de revestimiento de la sección planeada a perforar. Este método permite definir la profundidad de asentamiento sin que se vea afectada la integridad del zapato, garantizando una correcta estabilidad al hueco y adicional a esto que no se fracture el zapato en presencia de una sobrepresión en el pozo ocasionada por un influjo de gas.

Esta profundidad se relaciona directamente con las condiciones actuales del pozo es decir con lo que se conoce de la sección revestida anteriormente, el lodo con el que fue perforada y el dato más importante la profundidad a la cual fue asentado

el zapato de revestimiento de la sección anterior, además se debe establecer un valor de tolerancia al influjo definido previamente por políticas de la empresa operadora o simplemente este valor puede variar dependiendo de las tecnologías que se tengan en superficie para medir una ganancia en tanques (depende de la exactitud de medición de los equipos a disposición).

A. Cálculos previos necesarios para desarrollar el método:

- Presión de formación:

El cálculo de la presión de formación relaciona la intensidad del influjo (Kick intensity – KI) sumado con el peso del lodo de la sección perforada anteriormente, este valor de intensidad del influjo se estima correlacionando los valores de KI visto en pozos perforados en el yacimiento con anterioridad, en caso tal de que sea un pozo exploratorio este valor se estima a través de estudios previos.

Esta adición da como resultado una presión de formación equivalente en unidades de densidad, esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\rho_{fm} = MW_1 + KI \quad (17)$$

- Profundidad inicial máxima admitida:

Como el proceso con el que se calcula la profundidad máxima es de tipo iterativo se debe asumir un valor inicial máximo admitido (los autores proponen un 20 % por debajo de la profundidad del zapato del revestimiento anterior), sin embargo se aclara que este valor con el pasar de las iteraciones debe ajustar en un único valor para cada corrida.

$$h_{max\ i} = 1,20 * h_z \quad (18)$$

- Capacidad anular de la siguiente sección:

$$CapAnular = \frac{(D_{hueco}^2 - DDP^2)}{1029,4} \quad (19)$$

B. Presión de fractura:

La presión de fractura se calcula a la profundidad del zapato del revestimiento anterior, este valor se obtiene a través de una prueba de integridad de formación (Leak off test - LOT) que presuriza el pozo y mide el valor de la sobrepresión con el que se fractura la integridad del revestimiento a la profundidad del zapato, este valor se lee en el manómetro ubicado en superficie, este valor es el LOT que sumado con la presión ejercida por el peso del lodo (con el que se realiza el LOT) a la profundidad del zapato, da como resultado la presión que se denota en la siguiente ecuación:

$$P_{\text{frac}} = (0,052 * MW_{\text{LOT}} * hz) + \text{LOT} \quad (20)$$

C. Presión de fondo:

La presión de fondo relaciona la presión de formación con la profundidad máxima inicial estimada, calculadas en el numeral 1 (ρ_{fm} y $hmax$) esta profundidad corresponde al 20 % por debajo de la profundidad del zapato anterior, en donde se toma este valor inicial ya que se empieza con un punto de partida conocido para llevar a cabo el procedimiento del método, la presión de fondo se calcula con la siguiente ecuación:

$$BHP = 0,052 * \rho_{fm} * hmax \quad (21)$$

D. Cálculo del volumen de gas:

El volumen del gas es un factor de ajuste clave para el desarrollo del método ya que este determina la profundidad máxima admisible para asentar el revestimiento de la siguiente sección, esto se debe a que tiene una relación directa con las presiones presentes en el pozo y la tolerancia al influjo (Kick tolerance – KT), estos factores se relacionan con la ley de los gases ideales, ya que se considera que el influjo de gas es una burbuja única y que no se ve afectada por la temperatura del pozo. A pesar de que el comportamiento de los gases se afecta por las variaciones de temperatura, esta consideración no afecta el desarrollo del método y por el contrario agiliza los cálculos y da exactitud en los resultados.

El volumen de gas presuriza el pozo en caso tal de que ocurra una patada de pozo, este factor determina que tanto incremente la presión en el pozo a medida

de que el volumen de gas avanza hacia la superficie por diferencia de densidades, aliviando la columna de lodo creando un fluido combinado (lodo y gas) el cual se le calcula un gradiente de presión de la mezcla útil para cálculos posteriores.

De acuerdo a lo planteado el volumen de gas se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{gas} = \frac{(BHP+14,696)*KT}{P_{frac} + 14,696} \quad (22)$$

Debido a que las presiones medidas en los fluidos que actúan en el pozo son manométricas se debe adicionar para este cálculo el valor de 14,696 Psi a cada presión como se muestra en la ecuación anterior.

E. Fracción de gas:

Con el valor del volumen de gas se calcula la fracción de gas en la sección comprendida entre el zapato del revestimiento anterior y la profundidad máxima calculada (h_{max}), esta fracción de gas varia a medida de que se desarrolla el modelo, esto explica en los siguientes numerales. Esta fracción se calcula con la siguiente ecuación:

$$FG = \frac{V_{gas}}{(h_{max}-h_z)*CapAnular} \quad (23)$$

F. Gradiente de presión de los fluidos:

Los fluidos que interactúan en el desarrollo del modelo son lodo original (MW_1) y gas. Como se conoce la fracción de gas en la sección en cuestión y por consiguiente la fracción de lodo original se calcula el gradiente de presión de la mezcla con la siguiente ecuación:

$$\nabla P_{mz} = (FG * \nabla P_G) + ((1 - FG) * 0,052 * MW_1) \quad (24)$$

G. Cálculo de la nueva profundidad máxima de asentamiento:

Considerando ya la interacción de lodo y gas en el pozo se calcula la profundidad nueva a la que puede ir asentado el revestimiento sin que se afecte la integridad del zapato de la sección en cuestión, con este fin se relaciona el gradiente de

presión de los fluidos con la presión de fractura y el gradiente de formación de la siguiente manera:

$$hmax_n = \frac{(P_{frac} - (\nabla P_{mz} * hz))}{((0,052 * P_{fm}) - \nabla P_{mz})} \quad (25)$$

H. Calculo de la profundidad de asentamiento máxima final:

El método consiste en desarrollar los cálculos planteados en los numerales anteriores con el fin de realizar un proceso iterativo que da como resultado la profundidad máxima admisible de asentamiento del zapato de la siguiente sección de revestimiento. Este valor se halla comparando el valor obtenido de $hmax_n$ con el $hmax$ inicial, si estos valores son diferentes se debe tomar el valor de $hmax_n$ como valor nuevo inicial e ir al numeral 3 para realizar todos los cálculos pertinentes con esta nueva profundidad, este procedimiento se realiza hasta que el valor absoluto de la diferencia de los valores de profundidades inicial y nuevo ($hmax$ y $hmax_n$) sean iguales o menores a una tolerancia definida de 0,1 ft ya que esta longitud no representa ninguna afectación a las propiedades del pozo.

$$|hmax_n - hmax| \leq 0,1ft \quad (26)$$

Si se cumple esta condición la profundidad final máxima admита es igual a $hmax_n$. En donde este valor garantiza que la integridad del zapato de revestimiento con las condiciones establecidas en los anteriores numerales no se va a ver afectada por sobrepresiones ocasionadas por un influjo de gas en el pozo, en pocas palabras es seguro asentar el revestimiento a esta profundidad.

2.2.1.1. Diagrama de flujo del cálculo de la profundidad máxima

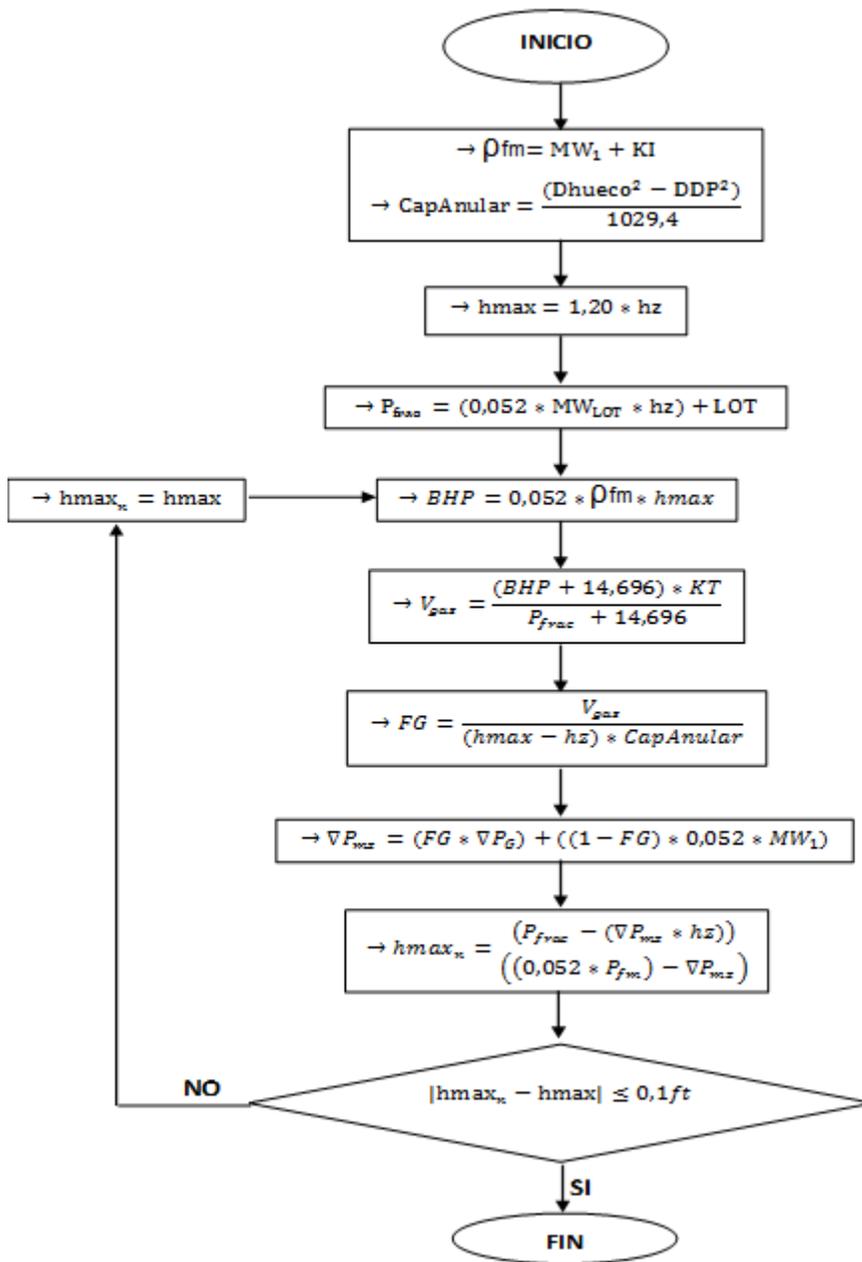


Figura 10. Diagrama de flujo para el cálculo de la profundidad máxima

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

2.2.2. Cálculo de la profundidad mínima

Este modelo calcula la profundidad mínima admisible para asentar el revestimiento sin que se vea afectada la integridad del zapato de esta sección cuando se continúe perforando hasta la profundidad proyectada. Esta profundidad es el complemento a la profundidad hallada en la sección anterior (profundidad máxima) generando un intervalo admisible de profundidades en el cual se puede asentar el zapato de revestimiento.

Puede sonar controversial que teniendo una profundidad máxima se necesite el valor de una profundidad mínima de asentamiento, pero no lo es, ya que no siempre se puede llegar exactamente al valor máximo de asentamiento debido a factores externos. Los factores principales pueden ser la disposición de tubos del mismo diámetro en el campo e incluso la longitud de cada tubo que puede alterar la longitud máxima de asentamiento forzando a asentar el revestimiento más arriba de lo planeado, pero se tiene en cuenta que la profundidad planeada a llegar ya se tiene definida por ende esta profundidad mínima se realiza de acuerdo a ese valor ya que es el punto de partida para este método iterativo.

A diferencia del cálculo de la profundidad máxima este método se lleva a cabo teniendo en cuenta condiciones de la siguiente sección o condiciones futuras, estas condiciones son peso del lodo con el que se va a perforar la sección y la profundidad proyectada a la que se tiene planeado llegar. En cuanto al valor de tolerancia al influjo y gradiente de fractura del zapato se conservan del método anterior.

Los cálculos a realizar son similares a los del procedimiento anterior a diferencia de que la naturaleza del método cambia debido a que el proceso iterativo busca una profundidad de asentamiento mínima admisible y no una máxima, este método se explica a continuación:

A. Cálculos previos necesarios para desarrollar el método:

- Presión de formación:

El cálculo de la presión de formación relaciona la intensidad del influjo (Kick intensity – KI) sumado con el peso del lodo de siguiente sección (sección donde se evalúa la profundidad de asentamiento). A diferencia de la presión de formación del método anterior (cálculo de la Profundidad máxima), esta tiene en cuenta las condiciones planeadas para la sección a revestir, es decir el peso del lodo con el

que se perfora la sección de interés. La intensidad al influjo se define como un valor constante para el cálculo de las profundidades mínima y máxima de asentamiento.

Esta adición da como resultado una presión de formación equivalente en unidades de densidad, esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\rho_{fm2} = MW_2 + KI \quad (27)$$

- Presión de fondo:

La presión de fondo para el desarrollo de la profundidad mínima de la siguiente sección de revestimiento es un valor constante ya que se evalúa a las condiciones proyectadas, es decir a la profundidad a la que se quiere llegar en relación con la presión de formación que igualmente es un valor constante. La presión de fondo se calcula de la siguiente manera:

$$BHP_2 = 0,052 * \rho_{fm} * h_{interes} \quad (28)$$

- Profundidad inicial mínima:

El proceso con el que se calcula la profundidad mínima es de tipo iterativo en donde se asume como valor inicial mínimo el 20 % por encima de la profundidad total proyectada. A diferencia del cálculo de la profundidad máxima inicial admitida, este método tiene en cuenta la profundidad proyectada para esta sección ya que los cálculos a realizar se llevan a cabo de base a techo es decir de la profundidad admitida a profundidades menores. La profundidad inicial mínima se calcula de la siguiente manera:

$$h_{min\ i} = h_{interes} - (h_{interes} * 0,2) \quad (29)$$

- Capacidad anular de la siguiente sección:

$$CapAnular = \frac{(D_{hueco}^2 - DDP^2)}{1029,4} \quad (19)$$

B. Presión de fractura y gradiente de fractura:

La presión de fractura se calcula de la misma manera que en el procedimiento anterior y con los mismos valores, este valor es de vital importancia para este método ya que se sabe a qué condiciones se fractura la integridad del zapato del revestimiento anterior dando un punto de partida para el diseño de la profundidad mínima de asentamiento con el fin de proyectar este valor de la presión de fractura a profundidades mayores de las que fue evaluado (mayores a la profundidad del zapato anterior), por ende es importante conocer el gradiente de fractura a la altura del zapato anterior para proyectar este valor como ajuste a diferentes profundidades de evaluación, este gradiente de fractura se deja en términos de densidad equivalente de fractura con el fin de utilizarla en cálculos posteriores. La densidad equivalente de fractura se calcula de la siguiente manera:

$$P_{frac} = (0,052 * MW_{LOT} * hz) + LOT \quad (20)$$

$$MW_{frac} = \frac{P_{frac}}{(0,052 * hz)} \quad (30)$$

C. Presión de fractura a la profundidad mínima:

Teniendo la densidad equivalente de fractura se correlaciona este valor con las profundidades de interés es decir con la profundidad mínima de asentamiento ya que es la profundidad a la que se evalúa si la integridad del zapato de la sección de interés se afecta o no dependiendo de las sobrepresiones existentes en el fondo del pozo. La presión de fractura evaluada a la profundidad mínima se calcula de la siguiente manera:

$$P_{frac 2} = 0,052 * MW_{frac} * hmin \quad (31)$$

D. Cálculo del volumen del gas:

El volumen de gas se calcula de la misma manera que en el procedimiento anterior y se tienen en cuenta las mismas consideraciones con el fin de utilizar la ley de los gases ideales. A diferencia de que la presión de fondo que se utiliza para el cálculo mínimo es un valor constante y la presión de fractura es un valor

variable debido a que depende de la variación en la profundidad de asentamiento mínima calculada.

$$V_{gas\ 2} = \frac{(BHP_2 + 14,696) * KT}{P_{frac\ 2} + 14,696} \quad (32)$$

E. Fracción de gas:

Con el valor del volumen de gas se calcula la fracción de gas en la sección comprendida entre la profundidad de interés (profundidad proyectada) y la profundidad mínima calculada (h_{min}), esta fracción de gas varía a medida de que se desarrolla el modelo, debido a que la profundidad mínima calculada varía. Esta fracción se calcula con la siguiente ecuación:

$$FG_2 = \frac{V_{gas\ 2}}{(h_{interes} - h_{min}) * CapAnular} \quad (33)$$

F. Gradiente de presión de los fluidos:

Los fluidos que interactúan en el desarrollo del modelo son lodo de la sección a perforar (MW_2) y gas. Como se conoce la fracción de gas en la sección en cuestión y por consiguiente la fracción de lodo original se calcula el gradiente de presión de la mezcla con la siguiente ecuación:

$$\nabla P_{mz\ 2} = (FG_2 * \nabla P_G) + ((1 - FG_2) * 0,052 * MW_2) \quad (34)$$

G. Cálculo de la nueva profundidad mínima de asentamiento:

Considerando ya la interacción de lodo y gas en el pozo se calcula la profundidad nueva a la que puede ir asentado el revestimiento sin que se afecte la integridad del zapato de la sección en cuestión después de que se continúe perforando. A diferencia del cálculo del máximo que busca ir de menor profundidad a mayor profundidad en este el proceso consiste en iterar de mayor profundidad a menor, sabiendo esto el método para calcular la nueva profundidad de asentamiento depende de los cambios de las presiones del fluido en el pozo (lodo y gas) con respecto a la presión de fondo a la profundidad proyectada o de interés. Este valor se calcula de la siguiente manera:

$$hmin_n = \frac{(BHP_2 - (\nabla P_{mz 2} * h_{interes}))}{((0,052 * MW_{frac}) - \nabla P_{mz 2})} \quad (35)$$

H. Cálculo de la profundidad de asentamiento mínima final:

El método consiste en desarrollar los cálculos planteados en los numerales anteriores con el fin de realizar un proceso iterativo que da como resultado la profundidad mínima admisible de asentamiento del zapato de la siguiente sección de revestimiento sin que se vea afectada la integridad del mismo mientras se continúe perforando a la profundidad de interés. Este valor se halla comparando el valor obtenido de $hmin_n$ con el $hmin$ inicial, si estos valores son diferentes se debe tomar el valor de $hmin_n$ como valor nuevo inicial e ir al numeral 3 para realizar todos los cálculos pertinentes a esta nueva profundidad, este procedimiento se realiza hasta que el valor absoluto de la diferencia de los valores de profundidades inicial y nuevo ($hmin$ y $hmin_n$) sean iguales o menores a una tolerancia definida de 0,1 ft ya que esta longitud no representa ninguna afectación a las propiedades del pozo.

$$|hmin - hmin_n| \leq 0,1ft \quad (36)$$

Si se cumple esta condición la profundidad final mínima admisible es igual a $hmin_n$. En donde este valor garantiza que la integridad del zapato de revestimiento con las condiciones establecidas en los anteriores numerales no se va a ver afectada por sobrepresiones ocasionadas por un influjo de gas en el pozo mientras se continúe perforando, en pocas palabras es seguro asentar el revestimiento a esta profundidad.

2.2.2.1. Diagrama de flujo del cálculo de la profundidad mínima

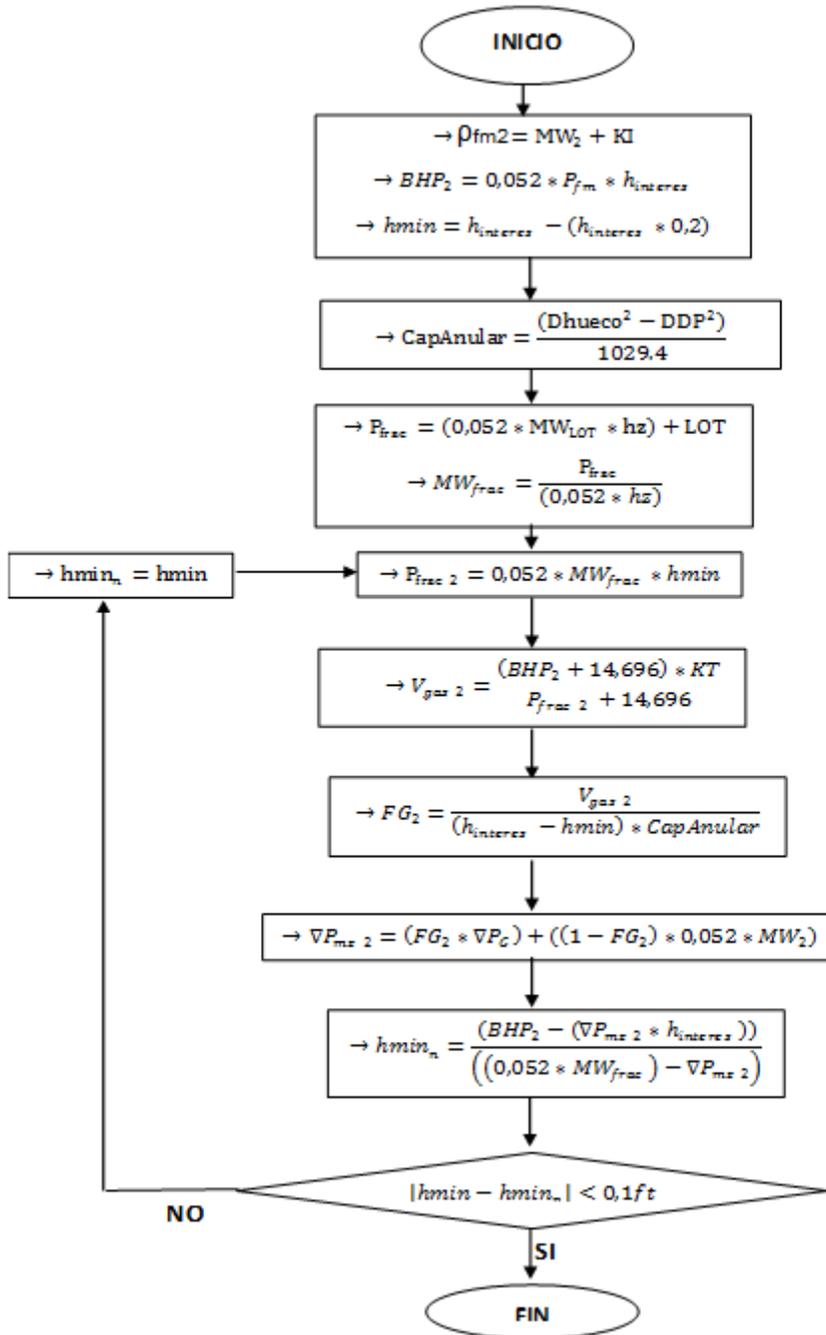


Figura 11. Diagrama de flujo para el cálculo de la profundidad mínima

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

2.3. METODO ALTERNATIVO

En el método anterior se calcula la profundidad de asentamiento del zapato del revestimiento determinando un intervalo admisible en el cual se puede asentar el zapato sin que se vea afectada la integridad del mismo; pero no siempre se realiza de esta manera. En este caso se busca determinar ya teniendo definidas las profundidades de asentamiento de revestimiento por estudios previos y considerando que estas no se puedan modificar, se busca la tolerancia al influjo admisible (Kick tolerance – KT) en el fondo sin que este afecte la integridad del zapato anterior.

2.3.1. Cálculo de la tolerancia al influjo (KT)

Como se definió anteriormente y diferenciando este método con el anterior, se tiene que el valor que arroja este método es la tolerancia al influjo, en donde se sabe que este valor es dependiente de las condiciones y equipos durante la perforación que se encuentren disponibles en superficie para medir una ganancia en tanques proveniente de la formación. Cabe resaltar que se hace más difícil este control para tolerancias pequeñas al influjo ya que se necesitan de equipos potentes y tecnológicamente dotados para que las detecten, de lo contrario la integridad del zapato de revestimiento se va a ver afectada generando catástrofes ambientales, pérdidas económicas y más lamentable aun pérdidas humanas.

A continuación se detalla el procedimiento para calcular la tolerancia al influjo admisible en fondo sin que genere ningún riesgo a la integridad del zapato de revestimiento.

A. Presión de fractura en el zapato:

La presión de fractura en el zapato se calcula de la misma manera que los otros métodos para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{\text{frac}} = (0,052 * MW_{\text{LOT}} * hz) + \text{LOT} \quad (20)$$

B. Máxima presión anticipada admitida en superficie (MAASP).

El MAASP es un valor clave para el desarrollo del método alternativo ya que con este se sabe la sobrepresión que se puede aceptar en el manómetro en superficie en presencia de un influjo de gas. La máxima presión anticipada admitida en

superficie es igual al LOT en caso tal de que sean medidas con el mismo peso del lodo en el mismo punto de interés.

Como el valor del LOT es medido a una densidad de lodo específica es necesario calcular un nuevo valor de LOT para diferentes pesos de lodo ya que la sección siguiente a perforar no se llevara a cabo con el mismo peso del lodo al cual se midió el LOT para ello se debe realizar el siguiente cálculo:

$$LOT_n = MAASP = P_{frac} - (0,052 * MW_2 * hz) \quad (37)$$

C. Cálculo de la presión de cierre de tubería:

Como es un fluido uniforme el que se encuentra en tubería (lodo de perforación) se relaciona que la presión de cierre será determinada por la intensidad del influjo (KI) a la máxima profundidad evaluada, en donde esta se conoce como el desbalance que existe del peso del lodo con respecto a la presión de formación.

La intensidad del influjo para este método se considera dependiendo de los conocimientos del campo y las posibles sobrepresiones que se presenten en el fondo el pozo. La intensidad del influjo es definida por la empresa operadora ya que se tiene indicios de su valor a través de estudios previos.

$$SIDPP = 0,052 * KI * TVD_{max} \quad (38)$$

D. Delta de presión:

Este valor de delta de presión está definido como la diferencia de presión entre el MAASP y SIDPP indicando el desbalance de presión entre la presión de cierre de tubería y la máxima presión anticipada admitida en superficie sirviendo como valor clave inicial para el desarrollo del método, ya que determina el valor del desbalance admisible a la altura del zapato ocasionado por un influjo de gas en fondo.

$$\Delta P = MASSP - SIDPP \quad (39)$$

E. Columna de gas en el zapato:

Este valor representa la columna máxima de gas admisible a la profundidad del zapato de la sección anterior sin que se vea afectada la integridad del mismo. Con este valor se calcula posteriormente lo que representa esta columna en barriles de gas en el zapato y se proyecta a lo que representa en fondo.

$$h_{gas-z} = \frac{\Delta P}{0,052 * \left(MW_2 - \left(\frac{\nabla P_G}{0,052} \right) \right)} \quad (40)$$

F. Volumen de gas en el zapato:

Con la columna de gas en el zapato se calcula lo que representa esta en términos de volumen, en donde para ello se debe conocer la capacidad anular de la zona en cuestión, los cálculos a realizar se determinan por las siguientes ecuaciones:

$$CapAnular = \frac{(D_{hueco}^2 - DDP^2)}{1029,4} \quad (41)$$

$$V_{G-z} = h_{gas-z} * CapAnular \quad (42)$$

G. Presión de fondo:

La presión de fondo relaciona la máxima profundidad vertical verdadera con el peso del lodo de la sección a perforar sumado a la presión de cierre de la tubería de perforación definida anteriormente con la intensidad del influjo.

$$BHP_3 = (0,052 * MW_2 * TVD_{max}) + SIDPP \quad (43)$$

H. Tolerancia al influjo (KT):

Sabiendo cuanto volumen de gas es admisible a la altura del zapato (V_{G-z}) y cuanta presión representa en el mismo (P_{frac}), además de conocer la presión de fondo se realiza al igual que el método anterior una relación de presiones y volúmenes con la ley de los gases ideales en donde se determina el volumen admisible en fondo (KT). De la misma manera que el método anterior se considera de que la burbuja de gas es única y que la temperatura no altera su comportamiento. La tolerancia al influjo se calcula con la siguiente expresión:

$$KT = \frac{(V_{G-z} * P_{frac})}{BHP_3} \quad (44)$$

2.3.1.1. Diagrama de flujo del método alternativo

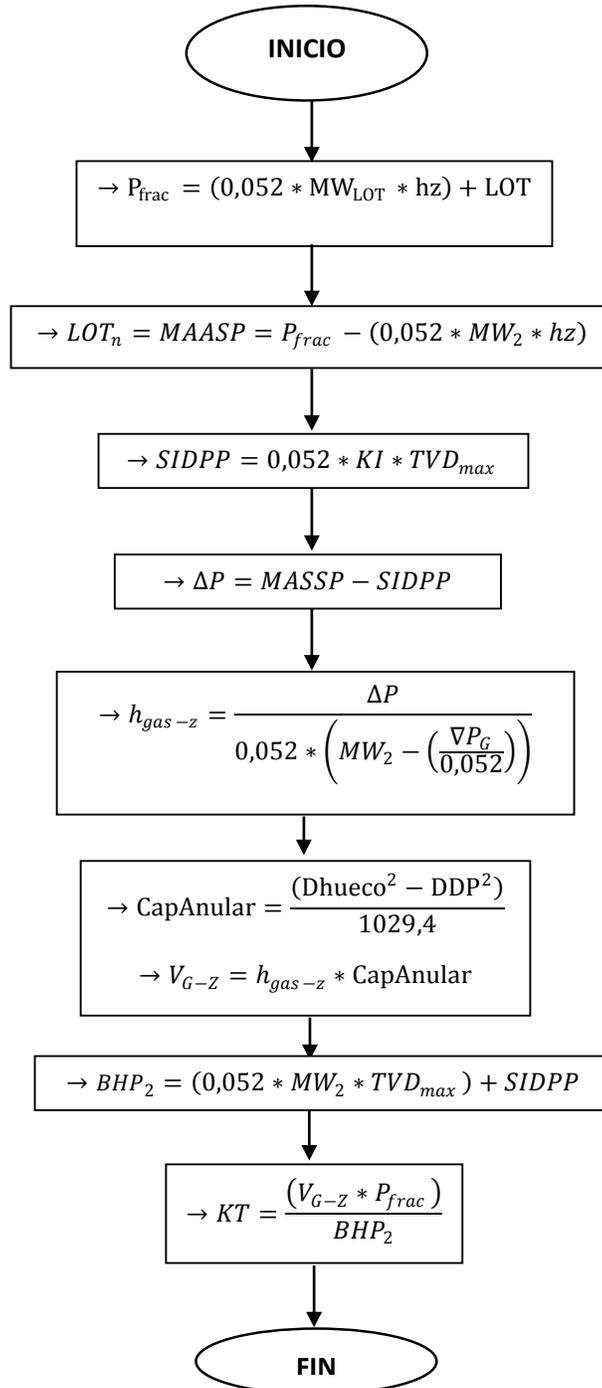


Figura 12. Diagrama de flujo del método alternativo

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

CONCLUSIONES

Luego de desarrollar el trabajo se concluye que la metodología aplicada en el software tiene como una de sus principales funciones la optimización económica de un pozo debido a que permite ajustar las profundidades mínimas por cada sección de un pozo, ahorrando en el número de juntas de revestimiento necesarias para la culminación del mismo.

El cálculo de la máxima y mínima profundidad de asentamiento del zapato se lleva a cabo por el desarrollo de iteraciones independientes. Esto quiere decir, que se puede dar la posibilidad de presentar un valor de profundidad mínima mayor que el valor de la profundidad máxima, este comportamiento se puede dar en dos escenarios: a) Cuando el revestimiento anterior es muy somero, se puede corregir, corriendo un revestimiento intermedio antes de llegar a la profundidad proyectada. b) Cuando la veracidad de los datos es baja.

Algunas condiciones como el gradiente de presión esperado en las formaciones pueden variar con respecto al diseño inicial por efectos de la naturaleza, por ende cabe la posibilidad que los datos estimados de tolerancia al influjo e intensidad del influjo no correspondan a la realidad, desajustando el intervalo admisible de asentamiento. Pero al ser un método práctico, rápido y fácil de usar permite tomar decisiones de corrección a los diseños previstos en el menor tiempo posible.

Usualmente las compañías operadoras del campo definen en sus políticas de seguridad un valor fijo de tolerancia al influjo (por ejemplo, 20 Barriles) que dependerá de la precisión de los equipos con los que cuentan y de experiencias previas en la zona. El método alternativo provee al usuario el valor exacto de la tolerancia al influjo para alcanzar una profundidad proyectada fija, de esta manera el ingeniero podrá saber si los equipos con los que cuenta, tienen la precisión para medir el volumen de influjo tolerado.

La aplicabilidad del método alternativo depende mucho de la sensibilidad de los equipos disponibles durante la perforación ya que a valores de tolerancias muy bajas se necesitan equipos de alta sensibilidad para que detecte esta ganancia anormal en los tanques de lo contrario se verá comprometida la integridad del zapato del revestimiento anterior.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar en el peor de los escenarios considerando un influjo de gas y presiones de fractura bajas con el fin de establecer el intervalo de profundidades de manera precavida.
- Considerar valores de tolerancia al influjo por encima de 10 Barriles, debido a que en situaciones inherentes como las paradas de tubería, pueden generar ganancias de hasta 6 barriles de fluido de retorno. Esto podría generar confusiones durante la operación.
- Reestructurar las profundidades de asentamiento por el método 1 en caso tal de obtener por el método alternativo valores de tolerancia al influjo muy bajos.

NOMENCLATURA

μ	Viscosidad del lodo
$Ax-s$	Área de la sección transversal de fractura
B	Factor de volumen de formación
BHP	Presión de fondo tenida en cuenta en el máximo, psi
BHP_2	Presión de formación para el cálculo del mínimo, lb/gal
BHP_3	Presión para el cálculo usada en el método alternativo, Psi
$CapAnular$	Capacidad anular, bbl
$Cmud$	Compresibilidad del lodo
D	Constante de fuga
DDP	Diámetro de la tubería de perforación, in
$Dhueco$	Diámetro del hueco de interés, in
Ecs_g	Módulo de Young del revestimiento
Ef_{mn}	Módulo de Young de la formación
EMW	Densidad del lodo equivalente, lb/gal
FG	Fracción del gas para el cálculo del máximo
FIT	Prueba de integridad de la formación, Psi
hcs_g	Longitud de la cubierta del revestimiento
hf_{mn}	Longitud hueco abierto
$hgas-z$	Columna de gas en el zapato, ft

$h_{interes}$	Profundidad de interés, ft
h_{max}	Profundidad inicial máxima admitida, ft
h_{max_n}	Nueva profundidad máxima de asentamiento, ft
h_{min}	Profundidad inicial mínima, ft
h_{min_n}	Nueva profundidad mínima de asentamiento, ft
H_z	Profundidad del zapato, ft
ID	Diámetro interno, in
K	permeabilidad
L	Longitud del canal
LOT	Presión de fuga de la formación, Psi
LOT_n	Presión de fuga convertida al nuevo peso del lodo, Psi
$MAASP$	Máxima presión anular admisible en superficie, Psi
MW	Peso del lodo, lb/gal
MW_1	Peso del lodo de la sección anterior, lb/gal
MW_2	Peso del lodo de la siguiente sección, lb/gal
MW_{frac}	Peso del lodo equivalente a la presión de fractura, lb/gal
OD	Diámetro externo, in
P	Presión de bomba.
ρ_{fm}	Presión de formación equivalente en densidad para el máximo, lb/gal
ρ_{fm2}	Presión de formación equivalente en densidad para el mínimo, lb/gal
P_{frac}	Presión de fractura , Psi
P_{frac2}	Presión de fractura para el cálculo del mínimo, Psi
Q	Rata de inyección

R_i	Radio interior de la sarta de revestimiento
R_o	Radio exterior de la sarta de revestimiento
R_o	Radio hueco abierto
$SICP$	Presión de cierre de revestimiento, Psi
$SIDPP$	Presión de cierre de tubería, Psi
t	tiempo
TVD_{max}	Máxima profundidad vertical verdadera, ft
V	Coefficiente de Poisson del revestimiento
V_{be}	Volumen bombeado para expandir la cara del pozo
V_{cbe}	Volumen bombeado para comprimir el volumen de expansión de la cara del pozo
V_{ce}	Volumen bombeado para expandir el revestimiento
V_{cl}	Volumen que comprime el volumen de fuga
V_{gas}	Volumen de gas para el cálculo del máximo, bbl
V_{gas2}	Volumen del gas para el cálculo del mínimo, bbl
V_{G-Z}	Volumen de gas en el zapato, bbl
V_i	Volumen de fuga
V_m	Volumen a la compresión del lodo
V_O	Volumen del lodo original en el sistema.
W	Anchura del canal
ΔP	Diferencial de presión
∇P	Gradiente de presión, Psi/ft
∇P_G	Gradiente de presión del gas, Psi/ft

∇P_{mz}	Gradiente de presión de la mezcla para el cálculo del máximo, Psi/ft
$\nabla P_{mz 2}$	Gradiente de presión de la mezcla para el cálculo del mínimo, Psi/ft

BIBLIOGRAFIA

- O. Santos, SPE: “Determination of casing setting depth using kick tolerance concept”. SPE-30220-MS, U.S.A. - Jun. 1995, p. 1-2.
- IADC, “Drilling Manual”. Eleventh edition. Chapter R Hydraulics, p. R-4 - R-89.
- YAO, Fu. “Leak–Off Test (LOT) Models”. Texas, May 2014. Master of Science in Engineering. The University of Texas at Austin. p. 38-46.
- OXY, “Manual comprensión del control de pozos”. Diciembre 2010. Capitulo 1, capítulo 4 p. 3-8, capitulo 6 p. 5-14, capitulo 8 p. 7-21.
- BRATTON, EDWARDS, FULLER, MURPHY, GORAYA, HARROLD, HOLT, LECHNER, NICHOLSON, STANDIFIRD, WRIGHT. Prevención de Problemas durante la perforación. En Oilfield Review Schlumberger, Otoño de 2001, p. 32-51.
- SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary [En línea]. <<http://www.slb.com/search>>.
- SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, PetroWiki [En línea]. <<http://petrowiki.org/>>.
- TECHNICAL FORMATION CENTER, “Manual de control de pozo”, Enero 2014, p.66.
- UNAM. Conceptos generales del control de pozos, Capitulo 1, p. 6-8.

- WILD WELL CONTROL. Gradiente de fractura de la formación [diapositivas], 2011, 18 diapositivas, color, Imágenes.
- ACOSTA, Carla. “Model for kick tolerance”. Julio 2012, Master of petroleum Engineering. Norwegian University of Science and Technology.

ANEXO A. MANUAL DEL USUARIO PARA EL MANEJO DEL SOFTWARE DEPTSHOE

El software DephtShoe llevado permite realizar los cálculos de los procedimientos desarrollados en el proyecto tanto para el cálculo de la profundidad de asentamiento del revestimiento como para el de la tolerancia al influjo admisible en fondo, en donde lleva a cabo el proceso de una manera rápida, eficiente y confiable, optimizando el desarrollo del modelo.

A continuación se detalla el paso a paso del manejo adecuado del software DephtShoe:

1. Instalación del Software:

Debe abrir el instalador del software a su disposición el cual arroja una ventana emergente de aceptación la cual se muestra a continuación:



Figura 13. Ventana emergente de aceptación

Fuente: Control cuentas de usuario Microsoft

Después de seleccionar la opción “SI”, saldrá automáticamente una ventana la cual solicitara el acceso directo del programa en el escritorio, en esta se debe presionar el botón siguiente para posteriormente proceder a instalar el programa en la carpeta anteriormente seleccionada, por último el instalador solicita el acceso al programa si lo desea, en donde se debe presionar el botón finalizar para culminar el proceso de instalación exitosamente. Este paso a paso se muestra a continuación en la figura 14:

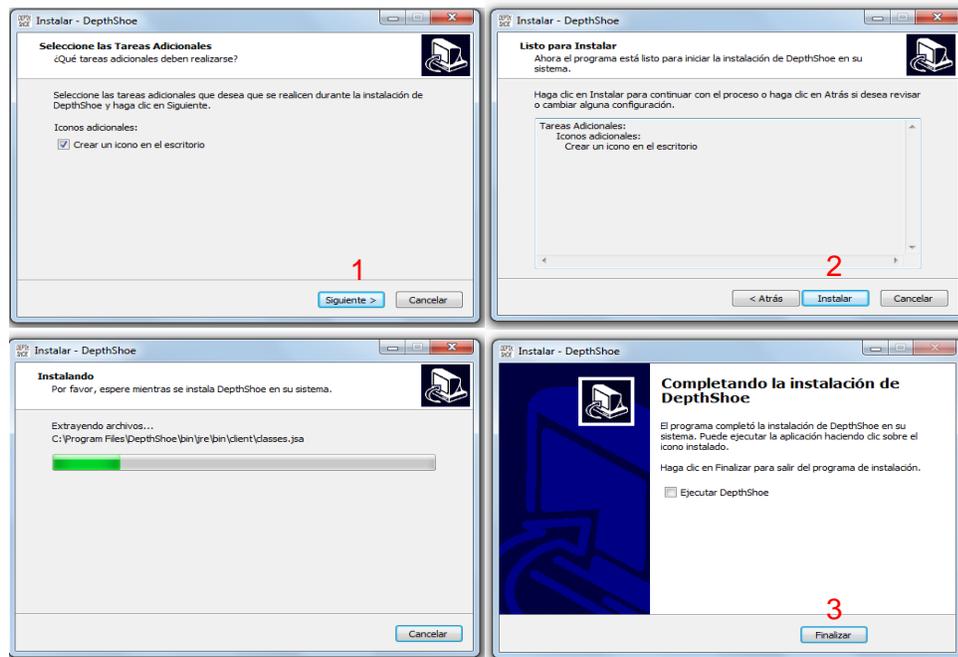


Figura 14. Proceso de instalación

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

2. Manejo del software:

Ya instalado el software DephtShoe se procede a realizar su respectivo ingreso, en este se observa una interfaz de inicio sencilla con una única pestaña de activación llamada “Archivo”, la cual despliega 4 opciones, observar la figura 15:

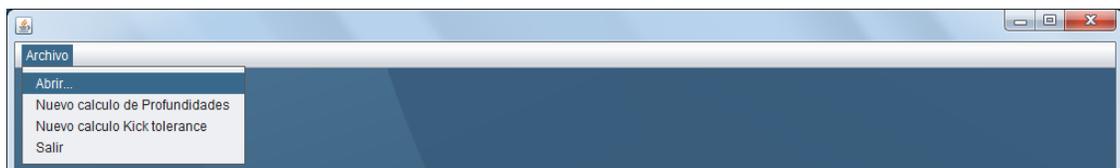


Figura 15. Interfaz DepthShoe

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

Ya sabiendo las cuatro opciones únicas disponibles por el software se procede a seleccionar el procedimiento adecuado para los cálculos que se quieran realizar. DephtShoe tiene disponible para el usuario el cálculo de la profundidad de asentamiento del zapato del revestimiento y el de la tolerancia al influjo, nombrados como nuevo cálculo de profundidades y nuevo cálculo de Kick tolerance respectivamente.

A continuación se muestra el proceso que se lleva a cabo para cada procedimiento de cálculo disponible para el usuario en el software:

- **Nuevo Cálculo de profundidades:**

Al ingresar a la opción de “Nuevo cálculo de profundidades”, Se abrirá inmediatamente un formulario con espacios en blanco, en este se debe ingresar todos los valores solicitados para el pozo en cuestión con el fin de calcular de manera óptima, rápida y eficaz el intervalo admisible de asentamiento de revestimiento. También el software tiene como opción guardar los datos si así se desea, para ello se debe dar “click” en el botón guardar en donde se puede conservar los datos ingresados en un archivo de tipo “DephtShoe” (.ds) que solo puede ser ejecutado por el software, ver figura 16.

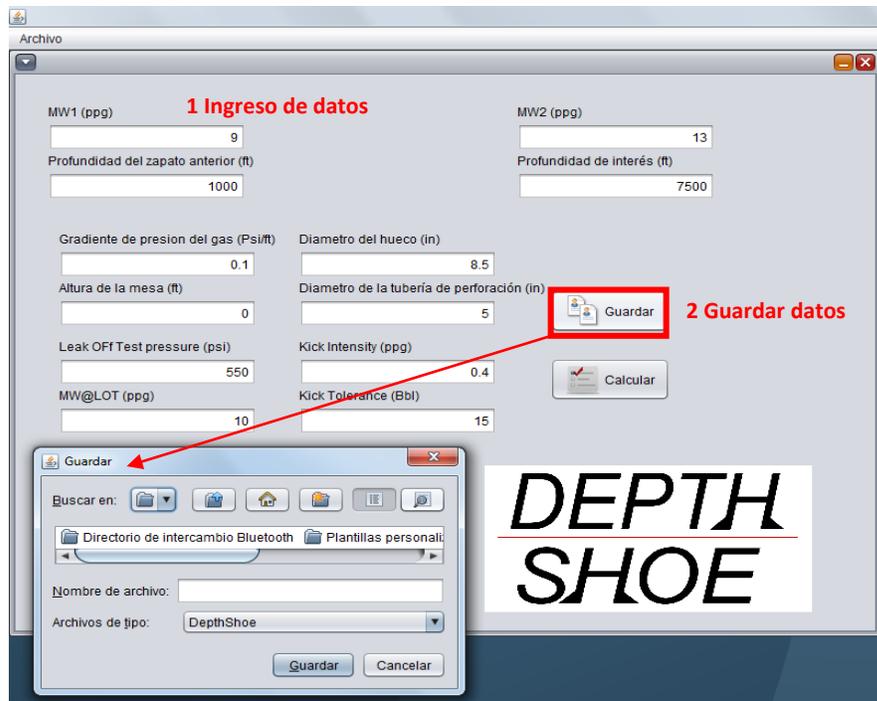


Figura 16. Ingreso de datos “Nuevo cálculo de profundidades”

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

Ya con los datos ingresados y guardados, se realiza el cálculo del intervalo admisible de asentamiento del revestimiento (profundidad mínima y máxima de asentamiento) seleccionando el botón calcular en donde inmediatamente el software arroja una ventana respuesta con una ilustración que ayuda a entender mejor el resultado, de esta manera se realiza con éxito este cálculo. Ver la figura17.

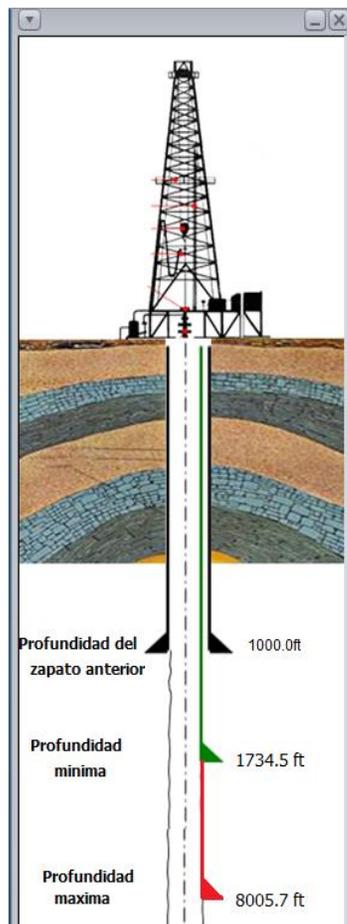


Figura 17. Profundidad mínima y máxima de asentamiento

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

- **Nuevo cálculo de Kick tolerance:**

Al ingresar la opción de “Nuevo cálculo de Kick tolerance” se abrirá de la misma manera que el procedimiento anterior, un formulario con espacios en blanco en

donde se deben ingresar todos los datos solicitados del pozo en cuestión con el fin de calcular de manera óptima, rápida y eficaz la tolerancia al influjo admisible en el fondo del pozo. El procedimiento para guardar el archivo es el mismo que en el del cálculo anterior.

A diferencia del procedimiento anterior, este tiene en la misma ventana de ingreso de datos un espacio respuesta el cual después de ingresados, guardados los datos y al oprimir el botón calcular se llena automáticamente con el valor correspondiente a la tolerancia al influjo admisible en fondo esto se observa en la figura 18.

1 Ingreso de datos

2 Guardar datos

3

Respuesta

Tolerancia al influjo admisible en fondo (Bbl) 13.3 bbl

DEPTH SHOE

Figura 18. Tolerancia al influjo admisible en fondo

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

NOTA: todos los archivos guardados para los dos métodos pueden ser ejecutados nuevamente en el software ingresando a la pestaña archivo, opción abrir y por último se busca el archivo. Este procedimiento carga automáticamente los datos guardados para su posterior ejecución.

ANEXO B. APLICACIÓN DEL METODO PROPUESTO

Se está perforando una sección de un pozo exploratorio con una broca de 8-1/2", usando una tubería de perforación de 5" y un lodo de 13 ppg, la profundidad total proyectada de la sección es de 7500' TVD. Previamente se perforó una sección de revestimiento de 9-5/8" hasta 1000' TVD con lodo de 9ppg y se realizó una prueba de integridad LOT con 550Psi y un fluido de 10ppg. La compañía operadora del pozo, definió una tolerancia al influjo de 15 Barriles. Determine si con las condiciones mencionadas, es posible alcanzar la profundidad de interés, tomando una intensidad de influjo de 0,4ppg.

a) Solución manual del método paso a paso:

Calculo de la profundidad máxima.

A. Cálculos previos necesarios para desarrollar el método:

$$\rho_{fm} = MW_1 + KI$$

$$\rho_{fm} = 9\text{ppg} + 0,4\text{ppg} = 9,4\text{ppg}$$

$$h_{max\ i} = 1,20 * h_z$$

$$h_{max\ i} = 1,20 * 1000\text{Ft} = 1200\text{Ft}$$

$$\text{CapAnular} = \frac{(D_{hueco}^2 - DDP^2)}{1029,4}$$

$$\text{CapAnular} = \frac{(8,5''^2 - 5''^2)}{1029,4} = 0,0459\text{Bls/Ft}$$

B. Presión de fractura:

$$P_{frac} = (0,052 * MW_{LOT} * hz) + LOT$$

$$P_{frac} = (0,052 * 10ppg * 1000Ft) + 550Psi = 1070Psi$$

C. Presión de fondo:

$$BHP = 0,052 * \rho_{fm} * hmax$$

$$BHP = 0,052 * 9,4ppg * 1200Ft = 586,56 Psi$$

D. Calculo del volumen de gas:

$$V_{gas} = \frac{(BHP + 14,696) * KT}{P_{frac} + 14,696}$$

$$V_{gas} = \frac{(586,56 Psi + 14,696) * 15}{1070 Psi + 14,696} = 8,31 Bls$$

E. Fracción de gas:

$$FG = \frac{V_{gas}}{(hmax - hz) * CapAnular}$$

$$FG = \frac{8,31Bls}{(1200Ft - 1000Ft) * 0,0459 Bls/Ft} = 0,9057$$

F. Gradiente de presión de los fluidos:

$$\nabla P_{mz} = (FG * \nabla P_G) + ((1 - FG) * 0,052 * MW_1)$$

$$\nabla P_{mz} = (0,9057 * 0,1ppg) + ((1 - 0,9057) * 0,052 * 9ppg) = 0,1347Psi/Ft$$

G. Calculo de la nueva profundidad máxima de asentamiento:

$$hmax_n = \frac{(P_{frac} - (\nabla P_{mz} * hz))}{((0,052 * P_{fm}) - \nabla P_{mz})}$$

$$hmax_n = \frac{(1070Psi - (0,1347ppg * 1000Ft))}{((0,052 * 9,4ppg) - 0,1347ppg)} = 2641,3 Ft$$

H. Calculo de la profundidad de asentamiento máxima final:

$$|hmax_n - hmax| \leq 0,1ft$$

$$|2641,3Ft - 1200Ft| = 1441ft$$

Como la diferencia es grande, es necesario iterar hasta que el valor de la profundidad converja, empezando desde el paso C. En la siguiente tabla se muestran los valores calculados en cada iteración:

Parámetros Calculados	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5	Iteración 6
Presión de Fondo (BHP).	1291 Psi	3095 Psi	3812 Psi	3903 Psi	3912 Psi	3913 Psi
Volumen del gas en el zapato (V_{gas}).	18 Bls	43 Bls	52,9 Bls	54,2 Bls	54,3 Bls	54,3 Bls
Fracción de gas (FG).	0,2396	0,1757	0,1696	0,1690	0,1689	0,1689
Gradiente de presión de los fluidos (∇P_{mz}).	0,3798 Psi/Ft	0,4033 Psi/Ft	0,4056 Psi/Ft	0,4058 Psi/Ft	0,4058 Psi/Ft	0,4058 Psi/Ft
Profundidad calculada (H_{max_n}).	6332 Ft	7800 Ft	7985 Ft	8003 Ft	8005 Ft	8005 Ft

Tabla 1. Resultado de las iteraciones para el cálculo de la profundidad máxima.

La profundidad máxima a la que se puede bajar este revestimiento con una tolerancia al influjo de 15 barriles, es de 8005 Pies.

Ahora los cálculos de la profundidad mínima.

A. Cálculos previos necesarios para desarrollar el método:

$$\rho_{fm2} = MW_2 + KI$$

$$\rho_{fm2} = 13ppg + 0,4ppg = 13,4ppg$$

$$BHP_2 = 0,052 * \rho_{fm} * h_{interes}$$

$$BHP_2 = 0,052 * 13,4ppg * 7500 Ft = 5226 Psi$$

$$h_{min\ i} = h_{interes} - (h_{interes} * 0,2)$$

$$h_{min} = 7500Ft - (7500 Ft * 0,2) = 6000Ft$$

$$CapAnular = \frac{(D_{hueco}^2 - DDP^2)}{1029,4}$$

$$CapAnular = \frac{(8,5''^2 - 5''^2)}{1029,4} = 0,0459 Bls/Ft$$

B. Presión de fractura y gradiente de fractura:

$$P_{frac} = (0,052 * MW_{LOT} * hz) + LOT$$

$$P_{frac} = (0,052 * 10ppg * 1000Ft) + 550Psi = 1070Psi$$

$$MW_{frac} = \frac{P_{frac}}{(0,052 * hz)}$$

$$MW_{frac} = \frac{1070\text{Psi}}{(0,052 * 1000\text{Ft})} = 20,58 \text{ ppg}$$

C. Presión de fractura a la profundidad mínima:

$$P_{frac 2} = 0,052 * MW_{frac} * h_{min}$$

$$P_{frac 2} = 0,052 * 20,58\text{ppg} * 6000\text{Ft} = 6420 \text{ Psi}$$

D. Calculo del volumen del gas:

$$V_{gas 2} = \frac{(BHP_2 + 14,696) * KT}{P_{frac 2} + 14,696}$$

$$V_{gas 2} = \frac{(5226 \text{ Psi} + 14,696) * 15\text{Bls}}{6420 \text{ Psi} + 14,696} = 12,22\text{Bls}$$

E. Fracción de gas:

$$FG_2 = \frac{V_{gas 2}}{(h_{interes} - h_{min}) * CapAnular}$$

$$FG_2 = \frac{12,22 \text{ Bls}}{(7500\text{Ft} - 6000\text{Ft}) * 0,0459\text{Bls/Ft}} = 0,1774$$

F. Gradiente de presión de los fluidos:

$$\nabla P_{mz 2} = (FG_2 * \nabla P_G) + ((1 - FG_2) * 0,052 * MW_2)$$

$$\begin{aligned} \nabla P_{mz 2} &= (0,1774 * 0,1\text{Psi/Ft}) + ((1 - 0,1774) * 0,052 * 13\text{ppg}) \\ &= 0,5738 \text{ Psi/Ft} \end{aligned}$$

G. Calculo de la nueva profundidad mínima de asentamiento:

$$hmin_n = \frac{(BHP_2 - (\nabla P_{mz2} * h_{interes}))}{((0,052 * MW_{frac}) - \nabla P_{mz2})}$$

$$hmin_n = \frac{(5226 \text{ Psi} - (0,5738 * 7500 \text{ Ft}))}{((0,052 * 20,58 \text{ ppg}) - 0,5738)} = 1859,2 \text{ Ft}$$

H. Calculo de la profundidad de asentamiento mínima final:

$$|hmin - hmin_n| \leq 0,1 \text{ ft}$$

$$|6000 \text{ Ft} - 1859,2 \text{ Ft}| = 4141 \text{ ft}$$

Como la diferencia es grande, es necesario iterar hasta que el valor de la profundidad converja, empezando desde el paso C. En la siguiente tabla se muestran los valores calculados en cada iteración:

Parámetros Calculados	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5	Iteración 6	Iteración 7	Iteración 8
Presión de Fractura (P_{frac2}).	1989 Psi	1801 Psi	1880 Psi	1846 Psi	1860 Psi	1854 Psi	1857 Psi	1855 Psi
Volumen del gas en el zapato (V_{gas2}).	39,22 Bls	43,27 Bls	41,5 Bls	42,3 Bls	41,9 Bls	42,1 Bls	42 Bls	42 Bls
Fracción de gas (FG_2)	0,1515	0,1621	0,1574	0,1594	0,1585	0,1589	0,1588	0,1588
Gradiente de presión de los fluidos (∇P_{mz2})	0,5887 Psi/Ft	0,5826 Psi/Ft	0,5853 Psi/Ft	0,5842 Psi/Ft	0,5847 Psi/Ft	0,5845 Psi/Ft	0,5846 Psi/Ft	0,5846 Psi/Ft
Profundidad calculada (H_{min_n})	1684 Ft	1757 Ft	1725 Ft	1738 Ft	1733 Ft	1735 Ft	1734 Ft	1734 Ft

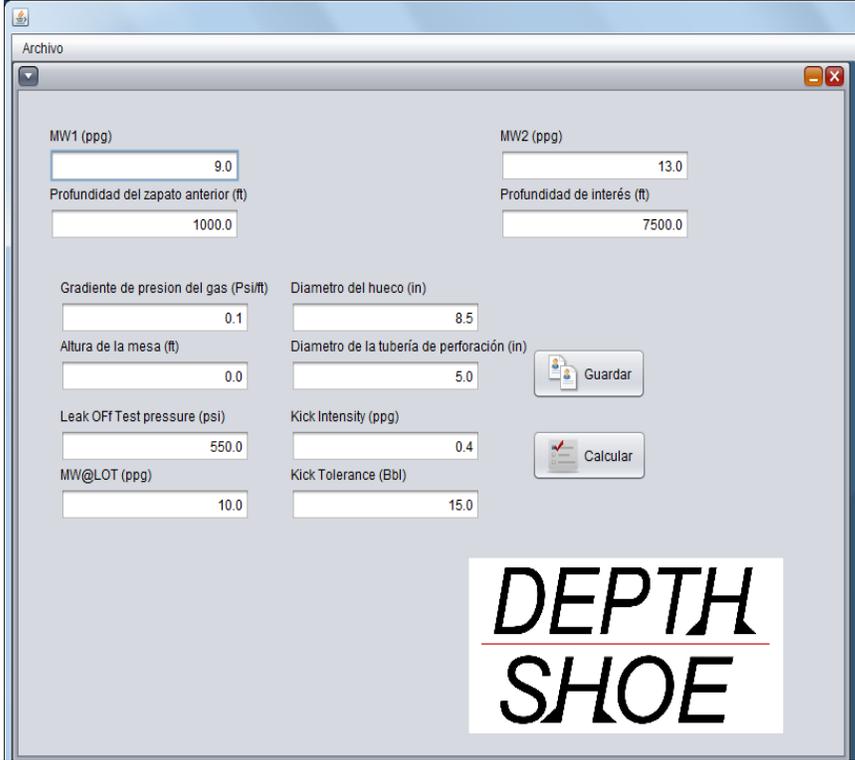
Tabla 2. Resultado de las iteraciones para el cálculo de la profundidad mínima.

La profundidad mínima a la que se puede bajar este revestimiento con una tolerancia al influjo de 15 barriles, es de 1734 Pies.

Como la profundidad de interés (7500 Pies) se encuentra dentro del rango calculado, es posible llegar a esta profundidad minimizando los riesgos por influjos menores o iguales a 15 Barriles en volumen.

b) Solución del método por el software “DephtShoe”:

Con el fin de autenticar la veracidad del software, se realiza el mismo problema planteado en el numeral anterior. Para ello primero se deben ingresar los datos del problema a la interfaz de DephtShoe como se muestra a continuación:



The screenshot shows the DEPTH SHOE software interface with the following data entered:

Parameter	Value
MW1 (ppg)	9.0
Profundidad del zapato anterior (ft)	1000.0
MW2 (ppg)	13.0
Profundidad de interés (ft)	7500.0
Gradiente de presión del gas (Psi/ft)	0.1
Dímetro del hueco (in)	8.5
Altura de la mesa (ft)	0.0
Dímetro de la tubería de perforación (in)	5.0
Leak OFF Test pressure (psi)	550.0
Kick Intensity (ppg)	0.4
MW@LOT (ppg)	10.0
Kick Tolerance (Bbl)	15.0

Buttons: Guardar, Calcular

Logo: DEPTH SHOE

Figura 19. Carga de datos para el cálculo de la profundidad de asentamiento

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

Después de realizada la carga se procede a presionar el botón calcular con el fin de que calcule el intervalo de asentamiento admisible del revestimiento. Estos resultados se muestran a continuación:

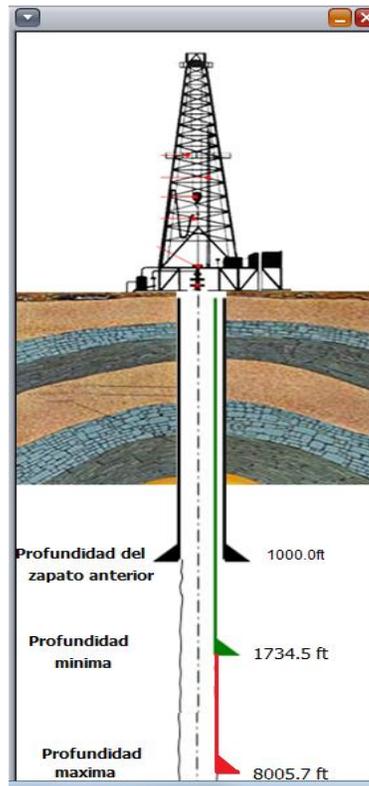


Figura 20. Profundidad máxima y mínima de asentamiento.

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

Comparando los valores obtenidos por el desarrollo del método manualmente y los obtenidos por el software se afirma que la corrida fue exitosa arrojando un 100 % de confiabilidad en los valores respuesta.

ANEXO C. APLICACIÓN DEL METODO ALTERNATIVO

Se está perforando un pozo exploratorio con una broca de 12-1/4", usando una tubería de perforación de 5" y un lodo de 12.5 ppg, la profundidad total proyectada de la sección es de 10000' (TVD 9650'), previamente se realizó una prueba de integridad LOT a 4100' con 1500Psi y un fluido de 8.4ppg. Determine la tolerancia al influjo a la profundidad total proyectada del pozo, la intensidad del influjo es de 1.0 ppg.

a. Solución manual del método alternativo paso a paso:

Solución.

Para este caso se debe usar el procedimiento alternativo, debido a que se ha fijado la profundidad proyectada y el objetivo es saber cuál es la tolerancia a un influjo en estas condiciones.

A. Presión de fractura en el zapato:

$$P_{frac} = (0,052 * MW_{LOT} * hz) + LOT$$

$$P_{frac} = (0,052 * 8.4ppg * 4100Ft) + 1500Psi$$

$$P_{frac} = 3290.88 Psi$$

B. Máxima presión anticipada admitida en superficie (MAASP).

$$MAASP = P_{frac} - (0,052 * MW_2 * hz)$$

$$MAASP = 3290.88Psi - (0,052 * 12.5ppg * 4100Ft)$$

$$MAASP = 625.88 Psi$$

C. Calculo de la presión de cierre de tubería:

$$SIDPP = 0,052 * KI * TVD_{max}$$

$$SIDPP = 0,052 * 1ppg * 9650Psi$$

$$SIDPP = 501.8 Psi$$

D. Delta de presión:

$$\Delta P = MASSP - SIDPP$$

$$\Delta P = 625.88 \text{Psi} - 501.8 \text{Psi}$$

$$\Delta P = 124 \text{Psi}$$

E. Columna de gas en el zapato:

Se asume un gradiente de presión del gas de 0.1Psi/Ft.

$$h_{gas-z} = \frac{\Delta P}{0,052 * \left(MW_2 - \left(\frac{\nabla P_G}{0,052} \right) \right)}$$

$$h_{gas-z} = \frac{124 \text{Psi}}{0,052 * \left(12.5 - \left(\frac{0.1}{0,052} \right) \right)}$$

$$h_{gas-z} = 225.5 \text{ Ft}$$

F. Volumen de gas en el zapato:

$$\text{CapAnular} = \frac{(D_{hueco}^2 - DDP^2)}{1029,4}$$

$$\text{CapAnular} = \frac{(12.25^2 - 5^2)}{1029,4}$$

$$\text{CapAnular} = 0.1215 \text{ Bls/Ft}$$

$$V_{G-z} = h_{gas-z} * \text{CapAnular}$$

$$V_{G-z} = 225.5 \text{ Ft} * 0.1215 \text{ Bls/Ft}$$

$$V_{G-z} = 27.4 \text{ Bls}$$

G. Presión de fondo:

$$BHP_2 = (0,052 * MW_2 * TVD_{max}) + SIDPP$$

$$BHP_2 = (0,052 * 12.5 \text{ppg} * 9650 \text{Ft}) + 501.8 \text{Psi}$$

$$BHP_2 = 6774.3 \text{ Psi}$$

H. Tolerancia al influjo (KT):

$$KT = \frac{(V_{G-z} * P_{frac})}{BHP_2}$$

$$KT = \frac{(27.4 \text{ Bbls} * 3290.8 \text{ Psi})}{6774.3 \text{ Psi}}$$

$$KT = 13.3 \text{ Bbls}$$

Es decir, que la tolerancia máxima admitida para que un influjo en esta sección del pozo no supere la presión de fractura del zapato, será de 13.3Bbls de gas.

b. Solución del método alternativo por el software:

Se ingresan los datos del problema en las casillas en blanco del software para la opción del cálculo de la tolerancia admisible en fondo y se presiona el botón calcular, el cual arrojará el valor respuesta así como se ve en la figura 21:



Figura 21. Ingreso de datos y cálculo de la tolerancia admisible en fondo.

Fuente: Jaime A. Morales y Juan N. Trujillo

Se observa que el valor calculado por el desarrollo del método paso a paso de manera manual y el calculado por el software coinciden con una veracidad del 100 %, esto indica que el modelo se desarrolló de una manera eficaz, rápida y confiable.