



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 24 de mayo de 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

Los suscritos:

Diego Armando Ospina Poloche, con C.C. No.1075270807 de Neiva, y Fabio Quintero Rodríguez, con C.C. No. 1075272142 de Neiva, autores de la tesis titulada “OPTIMIZACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS PARA CONTROL DE MIGRACIÓN DE GAS Y ELABORACIÓN DEL MANUAL DE PRUEBAS BÁSICAS” presentado y aprobado en el año 2018 como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos;

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.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL ESTUDIANTE: DIEGO ARMANDO OSPINA POLOCHE

Firma:

EL ESTUDIANTE: FABIO QUINTERO RODRÍGUEZ

Firma:



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Ospina Poloche	Diego Armando
Quintero Rodríguez	Fabio

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Orduz Pérez	Luis Humberto

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Morales	Haydee
Vargas Castellanos	Constanza

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero de petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería de petróleos

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2018 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 62

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías__**X**_ 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: Ninguno



MATERIAL ANEXO:

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

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. ___ Optimización ___	___ Optimization ___	6. ___ Gas ___	___ Gas ___
2. ___ Equipo ___	___ Equipment ___	7. ___ Cemento ___	___ Cement ___
3. ___ Prueba ___	___ Test ___	8. _____	_____
4. ___ Control ___	___ Control ___	9. _____	_____
5. ___ Migración ___	___ Migration ___	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En este artículo se describe la optimización del equipo simulador de migración de gas para la cementación en una sección de un pozo vertical, mediante la ejecución de pruebas en lechadas con aditivos. En la optimización se consideraron parámetros como el espacio anular de un pozo vertical constituido por la formación y la tubería de revestimiento, la migración de gas, la presión hidrostática del cemento y la implementación de ciertos accesorios necesarios para simular las condiciones en que se realiza una cementación con presencia de gas en el fondo del pozo. Teniendo en cuenta estos parámetros, se identificaron las fallas y se plantearon las soluciones y mejoras, para poder ejecutar las respectivas reparaciones. Una vez realizadas estas reparaciones, se procedió a realizar las pruebas en el equipo, estas no fueron realizadas siguiendo las normas API (American Petroleum Institute). El diseño de las lechadas de cemento se realizó teniendo en cuenta los valores establecidos en el Redbook de Halliburton (Applied Drilling Engineering), en pruebas realizadas a cementos por la empresa Halliburton y artículos de investigación.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This article describes the optimization of gas migration simulation equipment for cementation in a section of a vertical well, through the execution of tests on slurries with additives. In the optimization parameters were considered as the annular space of a vertical well constituted by the formation and the casing, the migration of gas, the hydrostatic pressure of the cement and the implementation of certain necessary accessories to simulate the conditions in which a Cementation with presence of gas at the bottom of the well. Taking into account these parameters, the faults were identified and the solutions and improvements were proposed, in order to execute the respective repairs. Once these repairs were made, the tests were carried out on the equipment, these were not carried out following API standards. The design of the cement slurries was carried out taking into account the values established in the Halliburton Redbook (Applied Drilling Engineering), in tests carried out on cements by the Halliburton company and research articles.

APROBACION DE LA TESIS

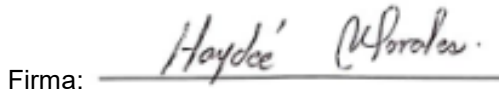
Nombre Presidente Jurado: Luis Humberto Orduz Pérez



Luis Humberto Orduz Pérez

Firma: Director de Proyecto de Grado

Nombre Jurado: Haydee Morales Mondragón



Firma:

Nombre Jurado: Constanza Vargas Castellanos



Firma:

Vigilada mineducación

OPTIMIZACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS PARA CONTROL DE MIGRACIÓN DE
GAS Y ELABORACIÓN DEL MANUAL DE PRUEBAS BÁSICAS



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA-HUILA
2018

OPTIMIZACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS PARA CONTROL DE MIGRACIÓN DE
GAS Y ELABORACIÓN DEL MANUAL DE PRUEBAS BÁSICAS

DIEGO ARMANDO OSPINA POLOCHE CÓD 2010295590
FABIO QUINTERO RODRÍGUEZ CÓD 2010191682

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA-HUILA
2018

OPTIMIZACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS PARA CONTROL DE MIGRACIÓN DE
GAS Y ELABORACIÓN DEL MANUAL DE PRUEBAS BÁSICAS

DIEGO ARMANDO OSPINA POLOCHE CÓD 2010295590
FABIO QUINTERO RODRÍGUEZ CÓD 2010191682

Trabajo de grado presentado para optar por el título de:
Ingeniero de Petróleos

Director del proyecto
ING. LUIS HUMBERTO ORDUZ PÉREZ

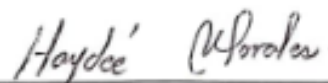
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA-HUILA
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN



Luis Humberto Orduz Pérez
Director de Proyecto de Grado

Ing. Luis Humberto Orduz Pérez
Director del proyecto.



Ing. Haydee Morales Mondragón
Jurado.



M.Sc. Ing. Constanza Vargas Castellanos
Jurado.

Neiva, 11 de abril de 2018.

DIEGO ARMANDO OSPINA POLOCHE

A Dios, por estar siempre a mi lado y cuidar mi camino de todo mal, a quien todo le debo por bendecirme enormemente.

A mis padres, Nini y Gardel, por apoyarme incondicionalmente y estar siempre ahí, junto a mis hermanos en toda circunstancia.

FABIO QUINTERO RODRÍGUEZ

A Dios y a mi familia. A mis padres, Etelvina y Fabio, y mis hermanas, Katherine, Andrea y Lizeth, por apoyarme y creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

Ofrecemos nuestros agradecimientos a:

El ingeniero Luis Humberto Orduz Pérez, director del proyecto y profesor de la Universidad Surcolombiana, por sus enseñanzas y el soporte académico ofrecido durante el desarrollo del proyecto.

Las ingenieras Constanza Vargas y Haydde Morales, profesoras de la Universidad Surcolombiana y evaluadores de este proyecto, por su apoyo, interés y observaciones en el desarrollo del proyecto.

Los ingenieros Andrés Cerón, Alex Orlando Orozco y John Jairo Pineda, por la ayuda brindada para poder realizar este proyecto.

Al señor Gelmo Tierradentro por la colaboración brindada en la prestación del laboratorio durante la realización de las pruebas.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. JUSTIFICACIÓN	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1 CEMENTACIÓN DE POZOS PETROLEROS	15
3.1.1 Tipos de cementación	15
3.1.1.1 Cementación primaria	15
3.1.1.2 Cementación secundaria o remedial	16
3.1.1.2.1 Objetivos de una cementación forzada	16
3.1.1.2.1.1 Reparación de un aislamiento zonal defectuoso	16
3.1.1.2.1.2 Eliminación de entrada de agua	17
3.1.1.2.1.3 Reparación de fugas en la tubería de revestimiento	17
3.1.1.3 Tapones de cemento	17
3.1.1.3.1 Desviación y perforación direccional	18
3.1.1.3.2 Taponamiento de una zona agotada	18
3.1.1.3.3 Pérdida de circulación	18
3.1.1.3.4 Abandono	18
3.1.2 Clasificación de los cementos	19
3.2 CEMENTO PORTLAND	19
3.3 UNIDAD DE CEMENTACIÓN	20
3.4 MIGRACIÓN DE GAS EN POZOS PETROLEROS	21
3.4.1 Posibles rutas de migración de gas en el anular	22
3.5 PRESIÓN HIDROSTÁTICA	24
3.6 LEY DE BOYLE	25
3.7 ADITIVOS QUÍMICOS	26
4. COMPORTAMIENTO INICIAL, FALLAS Y SOLUCIONES	28
4.1 FALLA EN LA HERMETICIDAD	28
4.2 FALLA EN CIERRES SUPERIORES	28
4.3 FALLA PARA EXTRAER EL CILINDRO INTERIOR	29
4.4 SISTEMA DE INYECCIÓN ESPORÁDICO DE GAS	29
5. FORMULACIÓN DE PRUEBAS	30
5.1 PRUEBA 1: RECONOCIMIENTO DEL EQUIPO	30
5.2 PRUEBA 2: CEMENTO CLASE G	35
5.3 PRUEBA 3: CEMENTO CLASE G CON ADITIVO CONTROLA- DOR DE MIGRACIÓN DE GAS	37

5.4 PRUEBA 4: CEMENTO CLASE G CON POCOADITIVO CONTROLADOR DE MIGRACIÓN DE GAS	40
5.5 PRUEBA 5: CEMENTO CLASE G CON MAYOR ADITIVO CONTROLADOR DE MIGRACIÓN DE GAS	42
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
7. CONCLUSIONES	49
8. RECOMENDACIONES	50
9. BIBLIOGRAFÍA	51
10. ANEXOS	53

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Objetivos de la cementación primaria	15
Tabla 2. Clasificación API de los cementos	19
Tabla 3. Aditivos para cementación	27
Tabla 4. Diseño de la lechada de cemento utilizada en la prueba 3	37
Tabla 5. Delta de presión obtenidos en la prueba 3	39
Tabla 6. Diseño de la lechada utilizada de cemento en la prueba 4	40
Tabla 7. Delta de presión obtenidos en la prueba 4	42
Tabla 8. Diseño de la lechada utilizada de cemento en la prueba 5	42
Tabla 9. Delta de presión obtenidos en la prueba 5	44
Tabla 10. Datos de presión obtenidos en todas las pruebas	46

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Dos escenarios que muestran la migración de gas en el anular cementado	21
Figura 2. Posibles caminos de migración de gas	22
Figura 3. Efecto de la gelación del cemento sobre la pérdida de presión hidrostática	23
Figura 4. Dos escenarios de migración de gas anular	24
Figura 5. Relación de presión versus volumen a diferentes temperaturas	26
Figura 6. Daño en empaque lateral	28
Figura 7. Tapa superior con cierres más gruesos	29
Figura 8. Tubo interior en forma de tronco de cono	30
Figura 9. Jeringas para inyección y evaluación de presión de gas	30
Figura 10. Gas migrando a través del cemento	32
Figura 11. Cemento fraguado alrededor del tubo interior	33
Figura 12. Cemento extraído con golpes fuertes	33
Figura 13. Cemento extraído con golpes suaves y firmes	34
Figura 14. Evidencia de migración de gas en el cemento	34
Figura 15. Cemento neto clase G marca DYCKERHOFF	37
Figura 16. Lechada con aditivo controlador de migración de gas	40
Figura 17. Relación de tiempo y presión en pruebas con GasStop™	46

RESUMEN

El equipo simulador de migración de gas para la cementación en una sección de un pozo vertical consta de una base por medio de la cual se puede inyectar gas a las lechadas de cemento; un tubo exterior, dividido en dos partes, que se atornillan una a la otra y también a la base, que hacen las veces de pared del pozo; un tubo interior que actúa como el revestimiento; y la tapa, por la cual también es posible generar presión sobre la lechada mediante aplicación de aire comprimido.

En este proyecto se optimizó el desmontaje del equipo después de haber fraguado el cemento mediante la modificación de la forma del tubo interior, pasando de cilíndrico a tronco de cono, y se puso a prueba a través de la ejecución de pruebas en lechadas con aditivos y se estableció una guía básica aplicable de apoyo a la formación de los estudiantes del programa de Ingeniería de Petróleos en el curso de Cementación de Pozos.

También fue necesario cambiar los empaques que generaban el sello hermético del tubo exterior, porque se encontraban desgastados; además se reemplazaron los cierres de la tapa, debido a que eran muy flexibles y se doblaban después de cada prueba.

INTRODUCCIÓN

La migración de gas es un problema ampliamente conocido en la industria petrolera, que puede ocurrir durante el proceso de perforación o de completación de pozos. Se puede decir que la misma consiste en la invasión de gas presente en la formación dentro del anular cementado, en el cual el gas puede migrar hacia zonas de más baja presión o hacia la superficie.

Las consecuencias de la migración de gas son numerosas y lamentables en gran manera, pues hay casos en que la presión del gas o el flujo de gas son tan grandes que llegan a la superficie, causando generalmente la pérdida total del pozo. En la actualidad se sabe que, dentro de las fallas en los procesos de cementación, un tercio de estas son atribuibles a problemas de migración de gas.

Debido a la dificultad que existe para detectar el problema de migración de gas inmediatamente y más aún para corregirlo, se han desarrollado numerosas técnicas especializadas de cementación y sistemas de cemento con la finalidad de prevenirlo. Todos estos sistemas han tenido cierto grado de éxito, pero ninguno ha sido completamente exitoso. La teoría de cómo el cemento pierde su presión hidrostática es una de las más aceptada por la industria. Sin embargo, las teorías sobre el gel del cemento, la influencia de la permeabilidad, y la pérdida de fluido del cemento son todavía puntos de discusión, siendo la fuerza de gel estática una de las propiedades de la lechada de cemento que más se ha intentado definir y evaluar. Pero debido a la dificultad que existe para medirla aún se siguen realizando estudios para especificarla mejor, ya que se tiene la certeza que está vinculada directamente con la pérdida de presión que ocurre en el cemento y por ende con el problema de migración de gas.

Debido a las razones antes mencionadas es que en el presente proyecto se estudiará cómo la optimización del equipo simulador de la migración de gas mejorará el desarrollo de las pruebas y la utilización de aditivos en el cemento para el control de la migración de gas. Para ello se estudiarán lechadas de cemento empleadas convencionalmente, con diferentes concentraciones de aditivos ampliamente utilizados en el control de la migración de gas.

1. JUSTIFICACIÓN

El equipo ya se encontraba instalado en el laboratorio de lodos y cementos de la Facultad de Ingeniería, sin embargo, aún no se realizaban pruebas en él, debido a falta de instrucciones sobre operación del mismo. Se hicieron modificaciones para dotar el equipo con un suministro de aire intermitente mediante inyección del gas con jeringas, debido a que el sistema ya contaba con flujo constante de gas, proveniente del aire comprimido de los laboratorios. Se realizaron cinco pruebas básicas, las cuales corroboraron la finalidad del proyecto con la elaboración del manual de pruebas. Así, una de las finalidades del proyecto es la evaluación de aditivos que disminuyan la migración de gas durante la cementación de pozos.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Optimizar el equipo simulador de migración de gas durante la cementación en una sección de un pozo vertical, mediante la ejecución de pruebas en lechadas para lograr establecer una guía básica aplicable durante la formación de los estudiantes del programa de ingeniería de petróleos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar comportamiento actual, fallas y plantear soluciones
- Formular al menos 5 lechadas de cemento que permitan el cumplimiento del objeto del equipo (Migración de gas)
- Elaborar el manual de operaciones y pruebas básicas del equipo

3. MARCO TEÓRICO

3.1 CEMENTACIÓN DE POZOS PETROLEROS

Las operaciones de cementación de pozos petroleros consisten en poner una lechada de cemento en el espacio anular entre el revestimiento y la formación expuesta del hueco (Pared del pozo) o en revestimientos anteriores¹⁵.

Los objetivos principales de la cementación son: El aislamiento zonal (prevenir comunicación entre zonas), proveer soporte al revestimiento dentro del pozo, proteger al revestimiento (corrosión, formaciones plásticas, etc.), y proteger el hoyo de un colapso¹⁵.

3.1.1 Tipos de Cementación

Las operaciones de cementación en pozos de petróleo y gas se clasifican en:

- Cementación primaria.
- Cementación secundaria o remedial.
- Tapones de cemento.

3.1.1.1 Cementación Primaria

Consiste en el asentamiento de cemento en el anular. El objetivo de la cementación primaria es proteger la integridad del agujero, lo cual incluye los siguientes aspectos:

Tabla 1.

Objetivos de la cementación primaria

Aislamiento zonal	Se basa en sellar unas zonas con respecto a otras. Esto evita el desplazamiento de líquidos y gases entre las zonas de la formación a través del anular.
Sustentación	La capa de cemento proporciona soporte axial a la tubería de revestimiento de la superficie, así como a cualquier otra tubería de revestimiento que se instale luego (por ejemplo, los liner).

Protección de la tubería de revestimiento	El cemento sirve como soporte y protección contra las formaciones plásticas (por ejemplo, sales) y fluidos corrosivos de la formación (por ejemplo, H ₂ S y CO ₂).
Sustentación del agujero	El cemento actúa como soporte para el agujero en formaciones plásticas, sensibles al agua o no consolidadas.

Nota: Manual de cementación de pozos level 1-JET 14 - Introducción a la Cementación, Capítulo 2.0. Cementación primaria.

3.1.1.2 Cementación Secundaria o Remedial

Debido a que en algunas ocasiones la cementación primaria no cumple con sus objetivos o el revestimiento presenta fallas, se hace necesario corregir estos problemas. Estos procesos se conocen como cementaciones secundarias¹⁵.

La cementación forzada es la técnica más comúnmente usada en estas ocasiones, la cual consiste en hacer pasar la lechada a través de agujeros o ranuras en la tubería de revestimiento, de forma forzada, con el fin de reparar una cementación primaria defectuosa¹⁵.

3.1.1.2.1 Objetivos de una cementación forzada

Las principales condiciones que demandan la realización de una cementación secundaria son: Reparar un aislamiento zonal defectuoso, eliminar la entrada de agua y reparar fugas en la tubería de revestimiento¹⁵.

3.1.1.2.1.1 Reparación de un aislamiento zonal defectuoso

Si el objetivo principal de la cementación primaria no se cumple a cabalidad, sobre todo en zonas problemáticas o de producción, el área de la tubería de revestimiento que debe repararse se perfora y se inyecta (se fuerza) lechada de cementación a presión a través de los orificios¹⁵.

“La parte superior del cemento también puede estar más baja de lo deseado debido a pérdidas ocurridas durante la cementación primaria, cálculos erróneos del volumen del agujero o un desplazamiento incompleto. La solución es forzar la lechada de cementación a través de las perforaciones por encima de la parte superior del cemento para extender la longitud de la columna en el anular”¹.

¹ Manual de cementación de pozos level 1 - JET 14 - Introducción a la Cementación, Capítulo

3.1.1.2.1.2 Eliminación de entrada de agua

Si existe entrada no deseada de agua o gas provenientes de áreas situadas por encima o por debajo de la zona de producción también se debe hacer uso de la cementación forzada: al igual que en la reparación de un aislamiento zonal defectuoso, se hacen perforaciones en estas áreas y se inyecta lechada de cementación a través de los orificios¹⁵.

3.1.1.2.1.3 Reparación de fugas en la tubería de revestimiento

Cuando las tuberías de revestimiento presentar fallas por corrosión o hay presencia de grietas o fallas en las uniones, se baja un empaque, que se sitúa encima de la tubería de revestimiento dañada; luego se hace circular lechada de cementación hasta el área dañada, se fija el empaque, y se fuerza la lechada a baja presión hacia el interior y en torno a los orificios de la tubería¹⁵.

3.1.1.3 Tapones de cemento

Consiste en un volumen relativamente pequeño de lechada de cementación que se coloca en el agujero con diversos fines, entre ellos¹⁵:

- Desviar el agujero del pozo por encima de un pescado (por ejemplo, una herramienta perdida en el agujero).
- Realizar una perforación direccional (tapón desviador).
- Taponar una zona o un pozo agotados (abandono).
- Resolver un problema de pérdida de circulación durante la fase de perforación.

3.1.1.3.1 Desviación y perforación direccional

En las perforaciones direccionales, se usan para poder alcanzar ángulos y direcciones correctas, que en circunstancias normales son difíciles de conseguir. También cuando es necesario desviar el agujero debido a pérdida de herramientas o sartas de perforación dentro del pozo¹⁵.

3.1.1.3.2 Taponamiento de una zona agotada

Este taponamiento se realiza con el fin de evitar posibles migraciones desde zonas agotadas o también para proteger una zona de baja presión en un

5.0 Cementaciones de reparación.

agujero abierto, antes de la terminación de un tramo superior¹⁵.

3.1.1.3.3 Pérdida de circulación

Cuando existen una zona ladrona se debe colocar una lechada de cemento para detener las pérdidas de lodo de perforación. La lechada se puede perder en esta formación, pero, aun así, sirve para fortalecer a la misma. También se puede inyectar un tapón de cementación en la parte superior de una zona con el fin de aislarla y evitar que se fracture por la presión hidrostática que se genera durante la cementación de una sarta de revestimiento¹⁵.

3.1.1.3.4 Abandono

Cuando un pozo se seca, se inyectan tapones de cemento a diferentes profundidades, para evitar la comunicación entre las diferentes zonas e incurrir en contaminación de fuentes de agua dulce¹⁵.

3.1.2. Clasificación de los Cementos

El American Petroleum Institute (API) ha identificado nueve tipos de cementos de acuerdo a su composición química y propiedades físicas, y estos son²

- API Clase A y B
- API Clase C
- API Clase D, E y F
- API Clase G y H
- API Clase J

Tabla 2.
Clasificación API de los cementos

Clase	Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Observaciones
A (tipo I)	Hasta 1830	77	Donde no se requieren propiedades especiales.
B (tipo II)	Hasta 1830	77	Donde se requiere moderada resistencia a los sulfatos.
C (tipo III)	Hasta 1830	77	Donde se requiere alta resistencia a la compresión y moderada o alta resistencia a los sulfatos.

² Citado por HENRÍQUEZ ARCINIEGAS, J.A. y SERRANO, F.J. Diseño y construcción de un equipo para simular la migración de gas durante la cementación. Universidad Surcolombiana. 2016. p. 16.

D	De 1830 a 3050	110	Aplicado en presión moderada, con moderada y alta resistencia a los sulfatos.
E	De 1830 a 4270	143	Aplicado en presiones altas, con moderada y alta resistencia a los sulfatos.
F	De 1830 a 4880	160	Aplicado en presiones altas, con moderada y alta resistencia a los sulfatos.
G y H		Comúnmente conocidos como cementos petroleros, son básicos para emplearse desde la superficie hasta 2240 m tal como se fabrican. Pueden modificarse con aceleradores y retardadores para usarlos en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura.	
J	De 1830 a 4880	177	En etapa de experimentación y diseño para emplearse sin necesidad de harina de sílice, que evita la regresión de la resistencia a la compresión.

Nota: Halliburton, Well Cementing. 2010. Citado por HENRÍQUEZ ARCINIEGAS, J. A. Y SERRANO, F. J., Diseño y construcción de un equipo para simular la migración de gas durante la cementación. 2016. p. 17.

3.2 CEMENTO PORTLAND

Es una mezcla de caliza (u otros materiales con alto contenido de carbonato de calcio), sílice, hierro y arcilla, molidos y calcinados, que fragua y se endurece al reaccionar con el agua. Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al enfriarse³.

El cemento Portland es, además, el ejemplo típico de un cemento hidráulico; fragua y desarrolla resistencias a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. De todos los cementos, el Portland es el más importante en cuanto a términos de calidad, desarrollo de resistencia a la compresión, tensión y a los sulfatos; por lo cual es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos petroleros.

Cabe mencionar que algunos cementos Portland se fabrican de manera especial debido a que las condiciones de los pozos difieren

³ HENRIQUEZ. Op. cit, p. 16.

significativamente entre sí al variar su profundidad, temperatura, ubicación geográfica; etc. El fraguado y endurecimiento se presenta si el cemento se coloca en agua. El cemento fraguado tiene baja permeabilidad y es insoluble en agua, de tal forma que expuesto a ésta no se destruyen sus propiedades. Tales atributos son esenciales para que un cemento obtenga y mantenga el aislamiento entre las zonas del subsuelo⁴.

Los principales componentes del cemento son:

- Silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) Es el componente más abundante y factor principal para producir la consistencia temprana (de 1 a 28 días).
- Silicato di cálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) Proporciona la resistencia gradual después de los 28 días.
- Aluminato tricálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaO}$) Proporciona resistencia al ataque de los sulfatos.
- Aluminato férrico tetra cálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) Es un compuesto de bajo calor de hidratación en el cemento y no influye en el fraguado inicial.

3.3 UNIDAD DE CEMENTACIÓN

“Una unidad de cementación es útil para casi todos los trabajos de cementación que se realizan en un pozo de petróleo. Existen unidades fijas y móviles pero en general, todas cumplen la función principal de mezclar la lechada de cemento, bombearla al pozo, y finalmente desplazarla y ubicarla en el sitio planeado”⁵.

“Entre los componentes principales de un camión de cementación, se pueden citar los siguientes”⁶:

- Bombas centrífugas de alimentación
- Tanque de mezcla de cemento
- 2 Bombas múltiples - alto caudal/alta presión
- 2 tanques de desplazamiento (10 bls de capacidad)
- Instalaciones apropiadas (líneas, conexiones, válvulas, etc.)
- Medidores de caudal
- Manómetros
- Densímetros

⁴ HENRIQUEZ. Op. cit, p. 16.

⁵ CORTÉS RODRÍGUEZ, L. A. Evaluación de la calidad del cemento en cementaciones forzadas, mediante el análisis de los registros CBL, VDL Y CET del pozo guanta 18d. 2010. p 15.

⁶ CORTÉS RODRÍGUEZ. Op. cit, p. 15.

3.4 MIGRACIÓN DE GAS EN POZOS PETROLEROS

La migración de gas consiste en el movimiento del gas que se encuentra en la formación hacia canales creados en el anular cementado. Este fluido puede migrar hacia las zonas de más baja presión o hacia la superficie (ver Figura 1)¹⁴.

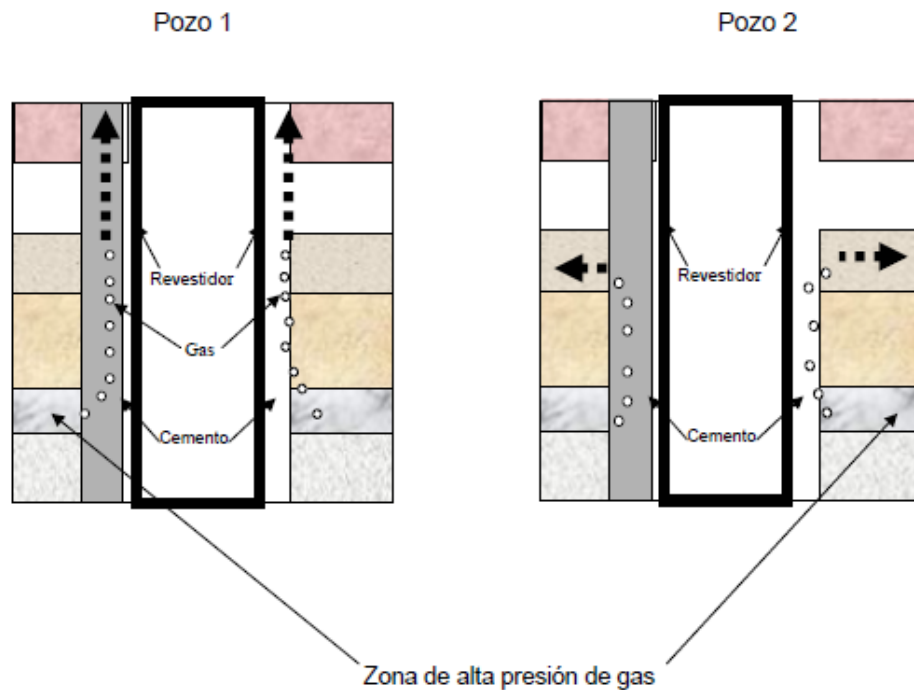


Figura 1. Dos escenarios que muestran la migración de gas en el anular

Fuente: Márquez, F., Geilhy, Z. Evaluación de materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas. 2002. p. 34.

3.4.1. Posibles Rutas de Migración de Gas en el Anular

“Una vez que el gas ha entrado en el anular, este viaja a lo largo de una trayectoria hacia la superficie o dentro de otra formación permeable para completar la acción del flujo de gas. El gas fluye luego por el anular a través de tres trayectorias: la interfase cemento/formación; la interfase cemento/tubería; los canales formados a través de la matriz del cemento (ver Figura 2)”⁷.

En 1980 Sabins realizó un estudio en donde cuantificó el grado de gelación en términos de fuerza de gel estática (SGS, por sus siglas en inglés), la cual definió como la medida directa de la fuerza adhesiva de un fluido a la pared del hoyo o revestidor. Así mismo introdujo el concepto de

⁷ Márquez, F., Geilhy, Z. Evaluación de materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas. 2002. p. 35.

tiempo de transición como el intervalo durante el proceso de fraguado desde que la columna de lechada de cemento comienza a perder la capacidad para transmitir toda la presión hidrostática hasta que el cemento desarrolla suficiente fuerza de gel para prevenir la entrada o migración de gas. Se ha determinado experimentalmente que este valor debe ser mínimo 500 lb/100 ft².⁸

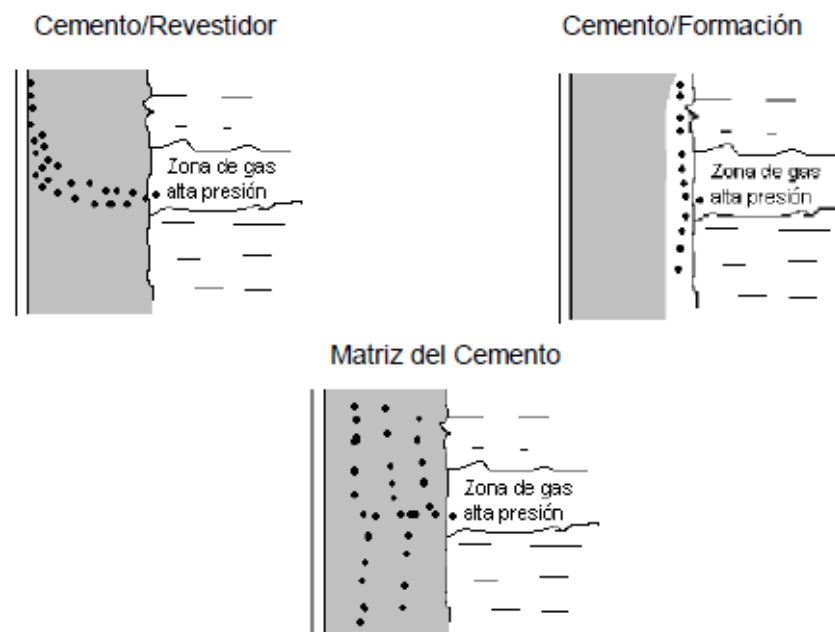


Figura 2. Posibles caminos de migración de gas

Fuente: Márquez, F., Geilhy, Z. Evaluación de materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas. 2002. p. 35.

En el diagrama (ver Figura 3) se muestra claramente el efecto que tiene la gelación del cemento sobre la caída de presión hidrostática hasta el punto de potencial invasión de gas. Este es uno de los puntos de mayor interés en el estudio de migración de gas, ya que teóricamente si el cemento no posee 500 lbf/100 ft² en este momento, el gas puede invadirlo. Es por esta razón que se deben realizar pruebas para verificar si realmente el cemento es capaz de controlar la entrada de gas en este punto⁹.

⁸ Ibíd. p. 35.

⁹ Márquez. Op. cit, p. 41.

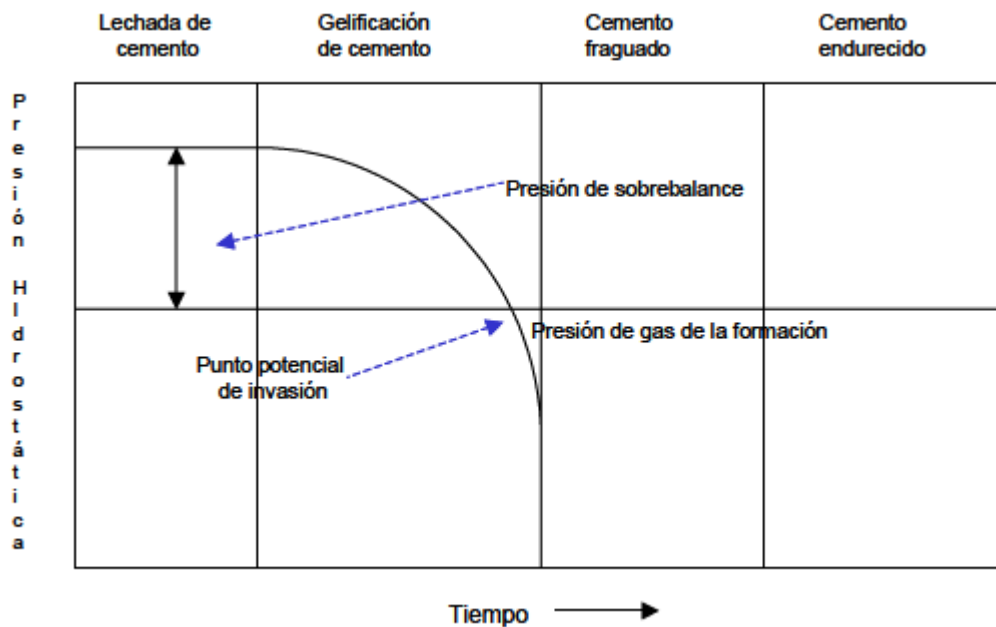


Figura 3. Efecto de la gelación del cemento sobre la pérdida de presión
Fuente: Márquez, F., Geilhy, Z. Evaluación de materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas. 2002. p. 41.

Las posibles consecuencias de la migración de gas después de la cementación primaria son numerosas, pero no siempre se detectan inmediatamente. En algunos casos se manifiestan en superficie, por ejemplo, la presión del gas o el flujo de gas en la boca del pozo. Con frecuencia, se realiza cementación remedial hasta que se cierra el flujo de gas y la presión del gas se reduce a un nivel compatible con la política de seguridad del operador y las reglamentaciones locales. Sin embargo, la eficiencia de un squeeze en tales circunstancias es muy pobre porque¹⁰:

1. Los canales de gas son difíciles de localizar, especialmente si son submilimétricos.
2. Los canales de gas pueden ser demasiado pequeños para poder rellenarlos con cemento.
3. La presión ejercida durante el trabajo de compresión a veces es suficiente para romper los enlaces de cemento en el fondo del pozo, o incluso para iniciar la fracturación de la formación, empeorando los problemas de comunicación en el fondo del pozo.

¹⁰ NELSON, E. Well Cementing. Schlumberger Educational Services, Sugar Land 1990. p. 8-1.

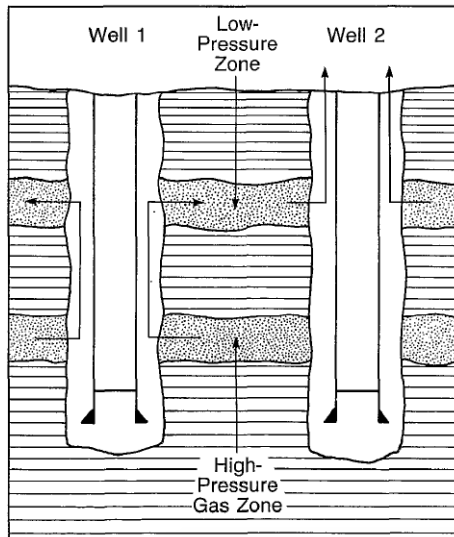


Figura 4. Dos escenarios de migración de gas anular.
Fuente: NELSON, E. Well Cementing. 1990. p. 8-1.

La migración de gas interzonal, sin manifestaciones superficiales, es muy difícil de detectar. En tales casos, la posterior producción de gas puede verse afectada, puede producirse el relleno no deseado de una zona superior agotada (posiblemente seguida de migración de gas a la superficie en otro pozo), o puede reducirse la eficacia de los tratamientos de estimulación. Tal canalización de fondo de pozo puede evaluarse mediante métodos especiales tales como registros acústicos¹¹.

3.5 PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Es la presión ejercida por una columna de fluido, generalmente expresada en libras por pulgada cuadrada (lb/in² – psi). Para determinar la presión hidrostática a una profundidad dada en pies (ft), se debe multiplicar la profundidad en pies por la densidad en libras por galón por 0.052. La presión hidrostática del agua dulce se obtiene de 0.433 libras por cada pie de altura. La presión hidrostática es directamente proporcional a la densidad y profundidad del fluido. En perforación, este término describe a la presión ejercida por la columna de fluido en el pozo¹².

Ecuación 3.1 Presión hidrostática utilizando lpg (lb/gal) y pies como unidades de medición.

$$P_H = 0.052 * \rho * TVD$$

¹¹ NELSON, Op. cit, p. 8-1.

¹² GARCÍA J. A., y BARBOSA, P. A. Manual básico de control de pozo petrolero. 2011. p. 121.

Donde

P_H = Presión hidrostática (psi)

ρ = Densidad del fluido (lb/gal)

TVD = Profundidad vertical verdadera (ft)

Al hacer cálculos que involucren la presión de un fluido, se deben efectuar en relación con alguna presión de referencia. Esta presión de referencia suele ser la presión atmosférica, que para la ciudad de Neiva tiene un valor de 95936 Pa.

Así, la presión que arroja la medición del fluido se llama presión manométrica. La presión que se mide en relación con un vacío perfecto se denomina presión absoluta. Tiene importancia extrema que se conozca la diferencia entre estas dos maneras de medir la presión, para poder convertir una en la otra.

Una ecuación sencilla que relaciona los dos sistemas de medición de la presión es4:

Ecuación 2. Presión absoluta

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

Donde

P_{abs} = Presión absoluta (psia)

P_{man} = Presión manométrica (psig)

P_{atm} = Presión atmosférica (psig)

3.6. LEY DE BOYLE

Esta ley establece que el volumen de cualquier cantidad definida de gas a temperatura constante, varía inversamente a la presión ejercida sobre este.

Ecuación 3. Ley de Boyle

$$V \propto \frac{1}{P}$$
$$VP = cte$$
$$V_1P_1 = V_2P_2$$

Donde

V= Volumen (L)

P = Presión (atm)
V₁ = Volumen inicial (L)
P₁ = Presión inicial (atm)
V₂ = Volumen final (L)
P₂ = Presión final (atm)

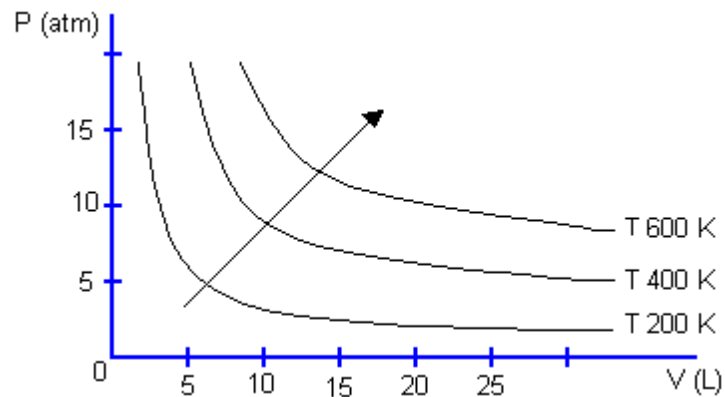


Figura 5. Relación de presión versus volumen a diferentes temperaturas
Fuente: Presentación en clase. Gases Ideales, Carmen Pinzón.

Al aumentar el volumen, las partículas del gas tardan más en llegar a las paredes del recipiente y por lo tanto chocan menos veces por unidad de tiempo contra ellas. Esto significa que la presión será menor ya que ésta representa la frecuencia de choques del gas contra las paredes. Cuando disminuye el volumen la distancia que tienen que recorrer las partículas es menor y por tanto se producen más choques en cada unidad de tiempo, por tanto aumenta la presión¹³.

3.7 ADITIVOS QUÍMICOS

Actualmente, hay disponibles más de 100 aditivos para cementación de pozos petroleros, muchos de los cuales se pueden encontrar de forma sólida o líquida. Generalmente se reconocen ocho categorías, como se muestra en la Tabla 3.

¹³ Disponible en: http://www.educaplus.org/gases/ley_boyle.html

Tabla 3.
Aditivos para cementación

Aceleradores	Son sustancias que reducen el tiempo de fraguado de la lechada de cemento, por tanto también se reduce el tiempo en que esta es bombeable.
Retardadores	Cumplen una función contraria a los aceleradores, aumentando el lapso que requiere el cemento para comenzar a fraguar, haciéndolo bombeable por más tiempo.
Extendedores	Son materiales que reducen la densidad del sistema y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen.
Densificantes	Aumentan la densidad de la lechada de cemento, haciendo que esta sea más pesada.
Dispersantes	Son químicos que reducen la viscosidad de la lechada, lo que permite trabajar con cementos más densos pero que continúan siendo bombeables.
Agentes de control de pérdida de fluido	Su función es controlar las fugas de la fase acuosa de la lechada hacia la formación.
Agentes controladores de pérdida de circulación	Son materiales que controlan la fuga de la lechada de cemento hacia formaciones que son débiles.
Aditivos especiales	Entre ellos se encuentran materiales como los agentes antiespumantes, aditivos misceláneos, controladores de migración de gas, entre otros.

Nota: Información extraída de Manual de cementación de pozos level 1 - JET 14 - Introducción a la Cementación.

Algunos aditivos sirven para más de un propósito y, además, se ajustan a más de una de las categorías citadas arriba.

4. COMPORTAMIENTO INICIAL DEL EQUIPO, FALLAS Y SOLUCIONES

4.1 FALLA EN LA HERMETICIDAD

Inicialmente, el equipo para pruebas de migración de gas en lechadas de cemento, presentaba una serie de fallas que dificultaban su uso y la aplicación de pruebas en el mismo. Estas fallas consistían en la falta de hermeticidad debido al poco mantenimiento que se le realizó (Ver Figura 6). Esto se solucionó realizando un cambio en los empaques para mejorar el sellado.



Figura 6. Daño en empaque lateral
Fuente: Autores

4.2 FALLA EN CIERRES SUPERIORES

El segundo inconveniente que se encontró en el equipo fue la flexibilidad presentada por los cierres superiores, que al momento de atornillar la tapa del equipo, se doblaban y obligaban al usuario a retornarlos a su estado inicial mediante el uso de fuerza. Se procedió entonces, a realizar la sustitución de estos cierres por unos más gruesos y resistentes, facilitando así la inserción de los tornillos y el uso del equipo (Ver Figura 7).



Figura 7. Tapa superior con cierres más gruesos
Fuente: Autores

4.3 FALLA PARA EXTRAER EL CILINDRO INTERIOR

Después de realizar la primera prueba con cemento, también se encontró la dificultad para extraer el tubo interior una vez la lechada hubiera fraguado, por lo tanto, luego de analizar varias opciones, se decidió reducir el diámetro externo de uno de los extremos del tubo interno en un 27 %, haciendo que su forma cambiara de cilíndrica a tronco de cono (Ver Figura 8). Además se le aplicó grasa a dicho tubo para disminuir la fricción y evitar la pega después de la realización de las pruebas.

4.4 SISTEMA DE INYECCIÓN ESPORÁDICO DE GAS

Por último, después de haber hecho las pruebas para identificar las principales fallas usando el flujo de aire comprimido, se le adaptó al equipo un sistema de inyección de gas a baja presión, que consiste en un par de jeringas que facilitan la aplicación de la Ley de Boyle, mediante la medición de volúmenes y presión (Ver Figura 9).



Figura 8. Tubo interior en forma de tronco de cono
Fuente: Autores

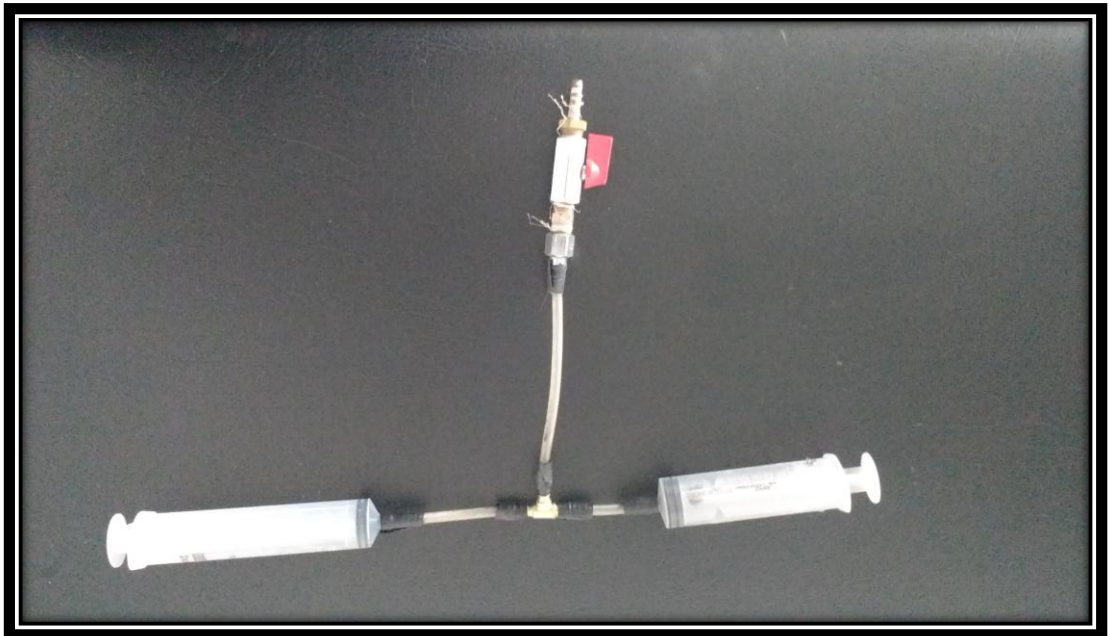


Figura 9. Jeringas para inyección y evaluación de presión de gas
Fuente: Autores

5. FORMULACIÓN DE PRUEBAS

5.1 PRUEBA 1: RECONOCIMIENTO DEL EQUIPO

El primer procedimiento realizado fue el armado y la puesta en funcionamiento del equipo, en el cual se usó agua fresca con el propósito de afianzar el uso de este y evidenciar el comportamiento del sistema de inyección de gas. Seguidamente se preparó una lechada de cemento clase A, basada en la información suministrada por el Red Book de Halliburton [8], de esta manera:

Material	Requerimiento de Agua
API Class A & B Cement	19.7 L / 42.6 Kg Sack

En esta prueba no se usó ningún aditivo para cemento. Para hallar la densidad de la lechada se procede a calcular las libras de cemento neto y agua requeridas si se usara un saco de cemento neto Clase A:

Cemento	94 lb
Agua fresca	5.2 gal*8.33 lb/gal = 43.4 lb

El peso total sería de 137.4 libras.

Seguidamente se halla en volumen que se espera obtener de un saco de cemento, usando los valores de volumen absoluto que se encuentran en el Red Book [8]:

Cemento	94 lb* 0.0382	3.6 gal
Agua fresca	43.4 lb* 0.12	5.2 gal

El volumen de lechada por cada saco de cemento sería de 8.8 Galones.

Por último, se utilizan estos valores de masa y volumen para hallar la densidad esperada:

$$137.4 \text{ lb} / 8.8 \text{ gal} = 15.62 \text{ lb/gal}$$

Entonces, para 4.6 Kg de cemento neto Clase A disponibles en el laboratorio, el requerimiento de agua fue:

$$4.6 \text{ Kg} \times \frac{19.7 \text{ L}}{42.6 \text{ Kg (1 saco)}} = 2.13 \text{ L de agua fresca}$$

Agua requerida: 2.13 litros.

Usando la balanza de lodos, la densidad obtenida fue de 15 lpg, obteniendo un volumen de lechada de cemento de 0.83 galones aproximadamente.

Se procedió a verter la lechada en el equipo, y se abrió el paso de aire durante aproximadamente 2 horas.

La presión hidrostática de la lechada de cemento fue calculada usando la Ecuación 3.1:

$$\begin{aligned} P_h &= 0,052 * \rho * TVD & (3.1) \\ P_h &= 0.052 * (15.62 \text{ lpg}) * 0.756 \text{ ft} \\ P_h &= 0.614 \text{ psi} \end{aligned}$$

Después de esperar a que el cemento endureciera durante 24 horas, se procedió al desmontado del equipo, teniendo especial cuidado con el tubo interno, pues para poder separarlo del cilindro de cemento formado alrededor de este, se debieron realizar pequeños pero firmes golpes con un martillo de goma en la parte inferior (ver Figura 11, Figura 12 y Figura 13).



Figura 10. Gas migrando a través del cemento
Fuente: Henríquez y Serrano, 2016 [9]



Figura 11. Cemento fraguado alrededor del tubo interior
Fuente: Autores



Figura 12. Cemento extraído con golpes fuertes
Fuente: Autores



Figura 13. Cemento extraído con golpes suaves y firmes
Fuente: Autores



Figura 14. Evidencia de migración de gas en el cemento
Fuente: Henríquez y Serrano, 2016 [9]

5.2 PRUEBA 2: CEMENTO CLASE G

En esta prueba, se realizó una lechada de cemento clase G Neto marca Dyckerhoff, Lote No. 1602085 (Figura 15), sin usar ningún aditivo, y basándose en la información suministrada por el RedBook de Halliburton [8] para el requerimiento de agua, de esta manera:

Material	Requerimiento de Agua
API Class G Cement	18.9 L / 42.6 Kg Sack

Para hallar la densidad de la lechada se procede a calcular las libras de cemento neto y agua requeridas si se usara un saco de cemento neto Clase G:

Cemento	94 lb
Agua fresca	$5 \text{ gal} * 8.33 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} = 41.65 \text{ lb}$

EL peso total sería de 135.65 libras.

Seguidamente se halla en volumen que se espera obtener de un saco de cemento, usando los valores de volumen absoluto que se encuentran en el Red Book [8]:

Cemento	94 lb * 0.0382	3.6 gal
Agua fresca	41.65 lb * 0.12	5 gal

El volumen de lechada por cada saco de cemento sería de 8.6 galones.

Por último, se utilizan estos valores de masa y volumen para hallar la densidad esperada:

$$\frac{135.65 \text{ lb}}{8.6 \text{ gal}} = 15.8 \frac{\text{lb}}{\text{gal}}$$

Entonces, para 4.3 Kg de cemento Clase G usados en el laboratorio:

$$4.3 \text{ Kg} \times \frac{18.9 \text{ L}}{42.6 \text{ Kg (1 saco)}} = 1.91 \text{ L de agua fresca}$$

En esta prueba no se usó ningún aditivo para cemento y se obtuvo que la densidad de la lechada usando la balanza de lodos fue de 15.9 lpg, obteniendo un volumen de lechada de cemento de 0.73 galones aproximadamente.

Una vez lista la lechada, fue vertida en el espacio anular del equipo y se le inyectó aire por la parte inferior por solo uno de los cuatro orificios, de manera instantánea, siendo necesario reducir el volumen de aire en la jeringa en 29 cm^3 para poder generar una burbuja en el cemento.

La presión hidrostática de la lechada de cemento fue calculada usando la Ecuación 3.1:

$$\begin{aligned}
 P_h &= 0,052 * \rho * TVD & (3.1) \\
 P_h &= 0.052 * (15.8 \text{ ppg}) * 0.756 \text{ ft} \\
 P_h &= 0.621 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la ley de Boyle, usando la Ecuación 3 se procedió a calcular la presión que fue requerida para que el gas penetrara en la lechada, así:

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2 \quad (3.3)$$

$$V_1 = V_{\text{jeringa}} + V_{\text{mangueras}}$$

$$V_1 = 50 \text{ cm}^3 + 26.9 \text{ cm}^3 \approx 77 \text{ cm}^3$$

$$P_1 = P_{\text{Atmosferica Neiva}} = 13.91 \text{ psi}$$

$$V_2 = 48 \text{ cm}^3$$

Despejando P_2 de la Ecuación (3.3) se obtiene:

$$P_2 = \frac{P_1 * V_1}{V_2}$$

$$P_2 = \frac{13.91 \text{ psi} * 77 \text{ cm}^3}{48 \text{ cm}^3}$$

$$P_2 = 22.31 \text{ psi}$$

Después de esperar a que el cemento fraguara durante 24 horas, se procedió al desmontado del equipo, teniendo especial cuidado con el tubo interno, pues para poder separarlo del cilindro de cemento formado alrededor de este, se debieron realizar pequeños pero firmes golpes con un martillo de goma en la parte inferior.



Figura 15. Cemento neto clase G marca DYCKERHOFF
Fuente: Autores

5.3 PRUEBA 3: CEMENTO CLASE G CON ADITIVO CONTROLADOR DE MIGRACIÓN DE GAS

El diseño de la lechada de cemento usado en esta prueba está basado en la información suministrada en un informe de cementación presentado por la empresa Halliburton [7].

Tabla 4.

Diseño de la lechada de cemento utilizada en la prueba 3

Concentración	Aditivo	Cantidad usada
100 % BWOC	Dyckerhoff clase G	3 Kg
8.73 gal/saco	Agua fresca	0.524 gal /1.983 L
1.2 % BWOC	CaCl ₂	36 g
0.4 % BWOC	HALAD-344	12 g
1.8 % BWOC	Bentonita	54 g
0.5 % BWOC	GasStop™ [7]	15 g

Nota. Tomado de informe de laboratorio de cementación HALLIBURTON [7]

Para hallar la densidad de la lechada se procede a calcular las libras de cemento neto, aditivos y agua requeridas si se usara un saco completo de cemento neto Clase G:

Cemento	94 lb	
CaCl ₂	94 lb*(1.2/100)	1.13 lb
HALAD-344	94 lb*(0.4/100)	0.38 lb
Bentonita	94 lb*(1.8/100)	1.69 lb
GasStop	94 lb*(0.5/100)	0.47 lb
Agua fresca	8.73 gal*8.33 lb/gal	72.72 lb

EL peso total sería de 170.39 libras.

Seguidamente se halla en volumen que se espera obtener de un saco de cemento, usando los valores de volumen absoluto que se encuentran en el Red Book [8]:

	Peso* Factor Vol. Abs.	Volumen
Cemento	94 lb*0.0382	3.6 gal
CaCl ₂	1.13 lb*0.02164	0.024 gal
HALAD-344	0.38 lb*0.1009	0.038 gal
Bentonita	1.69 lb*0.0453	0.077 gal
GasStop	0.47 lb*0.1009	0.047 gal
Agua fresca	72.72 lb*0.12	8.73 gal

El volumen de lechada por cada saco de cemento sería de 12.5 galones.

Por último, se utilizan estos valores de masa y volumen para hallar la densidad esperada:

$$\frac{170.39 \text{ Lbs}}{12.5 \text{ Gal}} = 13.62 \text{ lpg}$$

Densidad obtenida con balanza de lodos: 13.4 lpg

Volumen de lechada: 0.73 gal (2.76 L)

En esta ocasión, se inyectó aire a la lechada de cemento en cuatro ocasiones a diferentes tiempos: 0, 5, 10 y 30 minutos, para no hacer la prueba demasiado extensa, ya que el proceso completo de fraguado de cemento es más largo.

Fue necesario re calcular el volumen 2, debido a que se cambiaron las mangueras usadas en la prueba 1 y se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \text{Volumen 1 (V}_1\text{)} &= V_{\text{mangueras}} + V_{\text{jeringa1}} + V_{\text{jeringa2}} \\ &= 34 \text{ cm}^3 + 50 \text{ cm}^3 + 60 \text{ cm}^3 \\ &= 144 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen 2 (V}_2\text{)} &= V_1 - V_{\text{desplazado}} \\ &= 144 \text{ cm}^3 - V_{\text{desplazado}} \end{aligned}$$

La presión hidrostática de la lechada de cemento fue calculada con la Ecuación (3.1):

$$\begin{aligned} P_h &= 0.052 * \rho * TVD \\ P_h &= 0.052 * (13.62 \text{ lpg}) * 0.75 \text{ ft} \\ P_h &= 0.531 \text{ psi} \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la ley de Boyle (Ecuación 3.3), se procedió a calcular la presión que fue requerida para que el gas penetrara en la lechada en cada intervalo, obteniendo los resultados que se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5.
Delta de presión obtenidos en la prueba 3

Intervalo	Tiempo (min)	Volumen de aire desplazado (cm ³)	Volumen 2 (cm ³)	P ₂ (psi)	ΔP (psi)
1	0	28	116	17.27	3.36
2	5	30	114	17.57	3.66
3	10	13	131	15.29	1.38
4	30	31	113	17.73	3.82



Figura 16. Lechada con aditivo controlador de migración de gas
Fuente: Autores

5.4 Prueba 4: Cemento clase G con poco aditivo controlador de migración de gas

El diseño de la lechada de cemento usado en esta prueba está basado en la información suministrada en un informe de cementación presentado por la empresa Halliburton [7], usando menor cantidad de controlador de migración de gas.

Tabla 6.

Diseño de la lechada de cemento utilizada en la prueba 4

Concentración	Aditivo	Cantidad usada
100 % BWOC	Dyckerhoff clase G	3 Kg
8.73 gal/saco	Agua fresca	0.524 gal /1.983 L
1.2 % BWOC	CaCl ₂	36 g
0.4 % BWOC	HALAD-344	12 g
1.8 % BWOC	Bentonita	54 g
0.16 % BWOC	GasStop™ [7]	5 g

Nota. Modificado de informe de laboratorio de cementación HALLIBURTON [7]

Para hallar la densidad de la lechada se procede a calcular las libras de cemento neto, aditivos y agua requeridas si se usara un saco completo de cemento neto Clase G:

Cemento	94 lb	
CaCl ₂	94 lb*(1.2/100)	1.13 lb
HALAD-344	94 lb*(0.4/100)	0.38 lb
Bentonita	94 lb*(1.8/100)	1.69 lb
GasStop	94 lb*(0.16/100)	0.15 lb
Agua fresca	8.73 gal*8.33 lb/gal	72.72 lb

EL peso total sería de 170.07 libras.

Seguidamente se halla en volumen que se espera obtener de un saco de cemento, usando los valores de volumen absoluto que se encuentran en el Red Book [8]:

	Peso* Factor Vol. Abs.	Volumen
Cemento	94 lb*0.0382	3.6 gal
CaCl ₂	1.13 lb*0.02164	0.024 gal
HALAD-344	0.38 lb*0.1009	0.038 gal
Bentonita	1.69 lb*0.0453	0.077 gal
GasStop	0.15 lb*0.1009	0.015 gal
Agua fresca	72.72 lb*0.12	8.73 gal

El volumen de lechada por cada saco de cemento sería de 12.47 galones.

Por último, se utilizan estos valores de masa y volumen para hallar la densidad esperada:

$$\frac{170.07 \text{ lb}}{12.47 \text{ gal}} = 13.636 \text{ lpg}$$

Densidad obtenida: 13.5 lpg

Volumen de lechada: 0.73 gal (2.76 L)

Se inyectó aire a la lechada de cemento en cuatro ocasiones a diferentes tiempos.

La presión hidrostática de la lechada de cemento fue calculada con la Ecuación (3.1):

$$P_h = 0.052 * \rho * TVD$$

$$P_h = 0.052 * (13.636 \text{ lpg}) * 0.75 \text{ ft}$$

$$P_h = 0.532 \text{ psi}$$

Teniendo en cuenta la ley de Boyle (Ecuación 3.3), se procedió a calcular la presión que fue requerida para que el gas penetrara en la lechada en cada intervalo, obteniendo los resultados que se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7.
Delta de presión obtenidos en la prueba 4

Intervalo	Tiempo (min)	Volumen de aire desplazado (cm ³)	Volumen 2 (cm ³)	P ₂ (psi)	ΔP (psi)
1	0	11	133	15.05	1.14
2	5	16	128	15.65	1.74
3	10	14	130	15.41	1.5
4	30	20	124	16.15	2.24

5.5 PRUEBA 5: CEMENTO CLASE G CON MAYOR CONTROLADOR DE MIGRACIÓN DE GAS

El diseño de la lechada de cemento usado en esta prueba está basado en la información suministrada en un informe de cementación presentado por la empresa Halliburton [7], usando mayor cantidad de controlador de migración de gas.

Tabla 8.
Diseño de la lechada de cemento utilizada en la prueba 5

Concentración	Aditivo	Cantidad usada
100 % BWOC	Dyckerhoff clase G	3 Kg
8.73 gal/saco	Agua fresca	0.524 gal /1.983 L
1.2 % BWOC	CaCl ₂	36 g
0.4 % BWOC	HALAD-344	12 g
1.8 % BWOC	Bentonita	54 g
0.67 % BWOC	GasStop™ [7]	20 g

Nota. Modificado de informe de laboratorio de cementación HALLIBURTON [7]

Para hallar la densidad de la lechada se procede a calcular las libras de cemento neto, aditivos y agua requeridas si se usara un saco completo de cemento neto Clase G:

Cemento	94 lb	
CaCl ₂	94 lb*(1.2/100)	1.13 lb
HALAD-344	94 lb*(0.4/100)	0.38 lb
Bentonita	94 lb*(1.8/100)	1.69 lb
GasStop	94 lb*(0.67/100)	0.63 lb
Agua fresca	8.73 gal*8.33 lb/gal	72.72 lb

EL peso total sería de 170.55 libras.

Seguidamente se halla en volumen que se espera obtener de un saco de cemento, usando los valores de volumen absoluto que se encuentran en el Red Book [8]:

	Peso* Factor Vol. Abs.	Volumen
Cemento	94 lb*0.0382	3.6 gal
CaCl ₂	1.13 lb*0.02164	0.024 gal
HALAD-344	0.38 lb*0.1009	0.038 gal
Bentonita	1.69 lb*0.0453	0.077 gal
GasStop	0.63 lb*0.1009	0.064 gal
Agua fresca	72.72 lb*0.12	8.73 gal

El volumen de lechada por cada saco de cemento sería de 12.52 galones.

Por último, se utilizan estos valores de masa y volumen para hallar la densidad esperada:

$$\frac{170.55 \text{ Lbs}}{12.52 \text{ Gal}} = 13.64 \text{ lpg}$$

Densidad obtenida: 13.6 lpg

Volumen de lechada: 0.73 gal (2.76 L)

Se inyectó aire a la lechada de cemento en cuatro ocasiones a diferentes tiempos.

La presión hidrostática de la lechada de cemento fue calculada con la Ecuación (3.1):

$$P_h = 0.052 * \rho * TVD$$

$$P_h = 0.052 * (13.64 \text{ lpg}) * 0.75 \text{ ft}$$

$$P_h = 0.532 \text{ psi}$$

Teniendo en cuenta la ley de Boyle (Ecuación 3.3), se procedió a calcular la presión que fue requerida para que el gas penetrara en la lechada en cada intervalo, obteniendo los resultados que se encuentran en la Tabla 9.

Tabla 9.

Delta de presión obtenidos en la prueba 5

Intervalo	Tiempo (min)	Volumen de aire desplazado (cm ³)	Volumen 2 (cm ³)	P ₂ (psi)	ΔP (psi)
1	0	14	130	15.41	1.5
2	5	17	127	15.77	1.86
3	10	13	131	15.29	1.38
4	30	23	121	16.55	2.64

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La primera prueba realizada fue de reconocimiento del equipo, de sus fallas, armado y puesta en funcionamiento para poder realizar las mejoras mencionadas en el documento. Esta prueba fue realizada con cemento neto clase A, debido a que su propósito fue la optimización del equipo a la hora de desmontar el tubo interno. Dicha prueba fue necesaria repetirla varias veces, tratando de encontrar la manera adecuada de desmonte y el lubricante necesario que permitiera que esta pieza (tubo interno) se separara con relativa facilidad sin estropear el cemento que ha fraguado a su alrededor.

Una vez preparada la lechada, se procedió a medir su densidad con la balanza de lodos, que dio como resultado 15 lpg; y se calculó la densidad esperada siguiendo el método de la determinación de el volumen y la masa de los materiales que componen la lechada según procedimiento descrito en el RedBook de Halliburton [8] con una densidad de 15.62 lpg. Esto se debe principalmente a que la densidad de la lechada de cemento debió haber sido medida en una balanza presurizada, por tal motivo se obtienen resultados diferentes de densidad. Los resultados arrojan un porcentaje de diferencia máximo de 3.9 %.

Esta prueba se realizó con flujo de aire comprimido presente en el laboratorio, de manera constante, a la mínima presión posible. Después de haber fraguado, se pudo notar que se forman canales en el cemento por donde el gas ha migrado y corroborar que el equipo funciona adecuadamente y se puede seguir trabajando en el mismo.

La prueba 2 se realizó con lechada de cemento clase G y se inyectó gas haciendo uso de las jeringas, para poder determinar presiones mediante el uso de la Ley de Boyle.

El gas fue inyectado solamente por uno de los 4 orificios presentes en la base del equipo, con el objetivo de poder apreciar mejor el burbujeo del gas y para que la presión no tuviera que ser distribuida en 4 partes.

Al igual que en la prueba 1, en la prueba 2 se halla la densidad de dos maneras: usando balanza de lodos y mediante el procedimiento descrito en el Red Book de Halliburton [8]. En este caso, el resultado de las densidades también difiere, pero solo en un 1.6%.

Usando los datos de las densidades esperadas mediante cálculos, se pueden hallar las presiones hidrostáticas de la lechada para las pruebas 1 y 2.

En la prueba 2 no se evidencian canales de migración de gas a través del cemento, debido a que el flujo de aire no fue constante.

Para las pruebas que le siguieron (3, 4 y 5), se inyectó gas de manera diferente: a diferentes intervalos y con concentraciones diferentes de aditivo controlador para migración de gas y se observó un comportamiento similar entre cada una, a medida que el cemento iba fraguando.

Tabla 10.

Datos de presión obtenidos en todas las pruebas

Tiempo (min)	Presión Prueba 4 (psi)	Presión Prueba 3 (psi)	Presión Prueba 5 (psi)
0	15.05	17.27	15.41
5	15.65	17.57	15.77
10	15.41	15.29	15.29
30	16.15	17.73	16.55

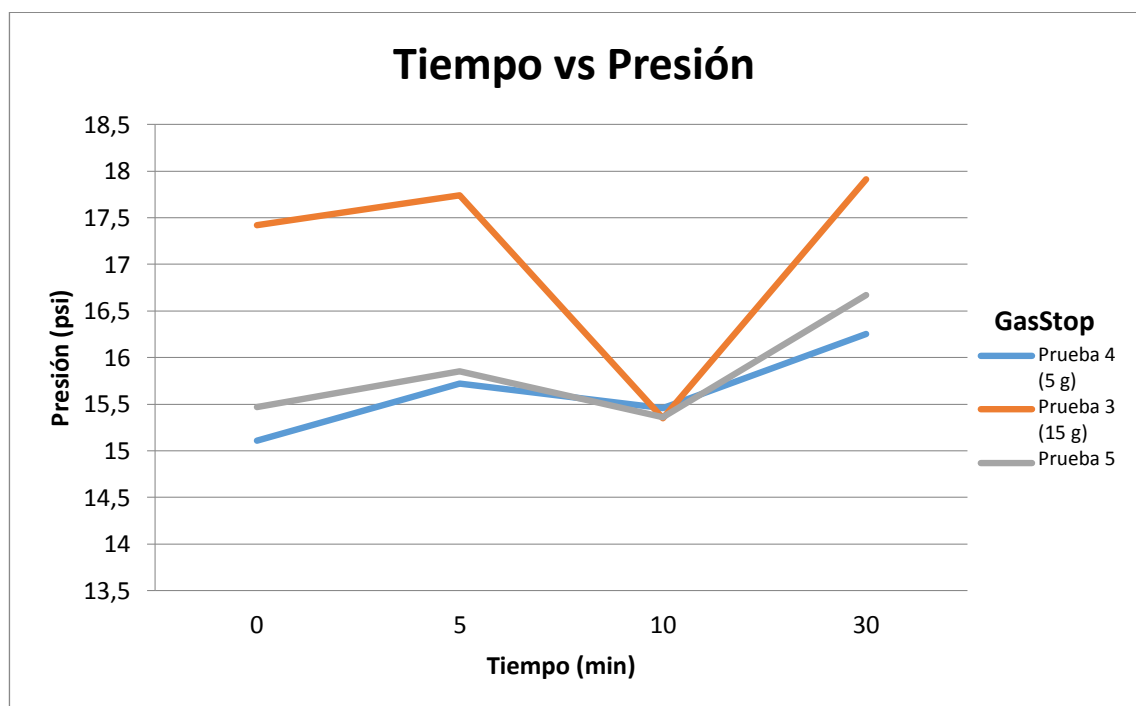


Figura 17. Relación de tiempo y presión en pruebas con GasStop™

Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 17, en el tiempo 0 min, dependiendo de la cantidad usada de aditivo para controlar la migración de gas, se obtienen presiones iniciales diferentes, y que al usar mayor o menor cantidad de la recomendada (5 g y 20 g), se obtienen presiones menores a la de la lechada con la cantidad adecuada de aditivo (15 g) indicando que en ambos casos la lechada dejara fluir el gas con mayor facilidad.

En el tiempo 5 min, la presión aumenta para todas las lechadas, debido probablemente a que estas presentan un aditivo acelerador y uno para control de migración de gas, esto quiere decir que se reduce el tiempo en el que la lechada se mantiene fluida, y también se acorta el tiempo de transición entre el estado líquido y el cemento completamente fraguado, es decir, lo que se puede suponer es que la lechada ha comenzado el proceso de endurecimiento y ejerce un poco más de resistencia. A los 10 min disminuye, debido probablemente a la creación de canales causados por la inyección de gas, ya que este tiende a seguir el mismo camino que ya ha sido trazado en la inyección anterior de gas, facilitándolo y haciendo que disminuya la presión. Finalmente, a los 30 minutos se evidencia un nuevo aumento en la presión porque el cemento ha continuado su proceso de fraguado y ejerce mayor resistencia al flujo del gas.

Debido a que las lechadas de cemento de las pruebas 3, 4 y 5 se basan en información que se encuentra en un informe de la empresa HALLIBURTON [7], se pueden comparar con los resultados obtenidos en el laboratorio:

- La temperatura a la que se realizaron las pruebas en el laboratorio de la universidad, es aproximadamente la misma a la que se realizaron según el informe, es decir, 27° Celsius. Al momento de fraguar, las lechadas de cemento no mostraron un aumento apreciable en su temperatura, debido principalmente a que estaba fluyendo gas a través de ella, haciendo que se transfiriera el calor generado al aire inyectado.
- La densidad de las lechadas para las últimas tres pruebas, al igual que en las pruebas 1 y 2, se halló usando la balanza de lodos y también calculando masa y volumen, como se indica en el Red Book de Halliburton [8], y en esta ocasión, las densidades también difieren. La posible razón es el uso de un instrumento inadecuado, ya que normalmente se debería usar una balanza presurizada, que es adecuada para lechadas de cemento. El porcentaje de error máximo que se obtuvo fue de 1.6%.

- Las pruebas realizadas en el laboratorio están a la presión atmosférica y no se puede comparar con el informe de la empresa HALLIBURTON [7] debido a que las pruebas que se realizaron no son las mismas ni requerían las mismas condiciones de presión, ya que solo se tomó este informe como una guía para realizar una lechada de cemento.

Todas las pruebas realizadas fueron llevadas a cabo usando el mismo tipo de aditivo para control de migración de gas, pero existen otros aditivos que, al momento de la investigación para la realización de estas pruebas, fueron puestos a consideración, pero no fueron usados debido a que el GasStop™ supuso mayor facilidad para su adquisición y se contó con la posibilidad de obtener más en caso de que el aditivo escaseara.

En futuros trabajos de grados se podría hacer una comparación entre el comportamiento del aditivo para control de migración de gas usado en este trabajo y otros aditivos, para evidenciar la eficacia de cada uno e incluso se podrían realizar pruebas a diferentes temperaturas, con el fin de evaluar cada uno de estos aditivos en diferentes condiciones.

7. CONCLUSIONES

- Se identificó el comportamiento inicial que presentaba el equipo, se identificaron las fallas en el mismo y se plantearon las soluciones.
- Se logró restaurar el equipo de migración de gas para simular la cementación en una sección de un pozo vertical, mediante la ejecución de pruebas en lechadas con diferentes aditivos y optimizar el proceso de desmontado.
- Se evidenció que el equipo puede ser usado para evaluar aditivo controlador de migración de gas en lechadas de cemento.
- Se formularon 5 pruebas con lechadas de cemento de diferente composición que permitieron el cumplimiento del objeto del equipo (Evaluar la migración de gas).
- Se elaboró un manual de operaciones y pruebas básicas del equipo.

8. RECOMENDACIONES

- Las pruebas que se realizaron en este equipo no consideran la normatividad API.
- Realizar pruebas similares a las planteadas, pero utilizando distintos tipos de aditivos controladores de migración de gas.
- Cuando se use el equipo, aplicar una generosa capa de grasa en el tubo interno, para mejorar el desmonte y recuperación del cemento fraguado.
- Cuando se use el equipo, utilizar una fina membrana de algodón en las salidas de aire de las mangueras de la base del equipo, con el fin de evitar la penetración de la lechada en las mangueras de inyección.
- Usarlo con pruebas como parte de la electiva de Cementación de Pozos en lo concerniente al control de migración de gas.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. BERMÚDEZ, Raúl., 2007. Cementación de Pozos Petroleros - Principios y Tecnologías. Manual de Schlumberger. 2007. Consultado el 18 de febrero de 2018. <http://perfob.blogspot.com.co/2015/09/cementacion-de-pozos-petroleros.html>
2. CALLONI, G., MORONI, N., MIANO, F., 1996. Carbon Black: A Low Cost Colloidal Additive for Controlling Gas-Migration in Cement Slurries. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 14-17. <https://doi.org/10.2118/28959-MS>
3. COKER, O.D, Phillips Petroleum Co. Norway; Harris, K.L., Halliburton Mfg. & Services Ltd.; and Williams, T.A., 1992. Preventing Shallow Gas Migration in Offshore Wells: The Performance of Lead Cements. Halliburton Oilfield Services. SPE. <https://doi.org/10.2118/24978-MS>
4. GARCÍA, J. A., y BARBOSA, P. A. Manual básico de control de pozo petrolero. 2011. p. 121.
5. HAIJIN, Z., JIANSHENG, L., AIPING, Z., JIANLONG Z., JIAXING, X., 2010. A New Method to Evaluate the Gas Migration for Cement Slurries. International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, 8-10. <https://doi.org/10.2118/131052-MS>
6. HALLIBURTON. Cementing Materials tables. 2017.
7. HALLIBURTON. Informe La Cañada Norte 19 Tapón 13.6 Controladora %40 cto dyckerhoff. 2014.
8. HALLIBURTON, RedBook Engineering Tables. 2013.
9. HENRÍQUEZ, J.E., SERRANO, F.J., Diseño y construcción de un equipo para simular la migración de gas durante la cementación. Universidad Surcolombiana. 2016. p. 16,17.

10. ISGENDEROV, I., BOGAERTS, M., DOCHERTY, K., 2013. Solid Polymer Prevents Gas Migration into Cement Slurry in Subzero Conditions. SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition, 15-17 October, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/166853-MS>
11. La Comunidad Petrolera, 2017. Cementación para evitar la migración de gas (Segunda parte). Consultado el 15 de febrero de 2018. [https://www.lacomunidadpetrolera.com/2017/10/cementacion-
evitarmigraciongas-2.html](https://www.lacomunidadpetrolera.com/2017/10/cementacion-evitarmigraciongas-2.html)
12. Ley de Boyle. Consultado el 20 de febrero de 2018. Disponible en: http://www.educaplus.org/gases/ley_boyle.html
13. LEVINE, Ira, Fisicoquímica. Quinta edición, Volumen I. 2004.
14. MÁRQUEZ, F., GEILHY, Z., 2002. Evaluación de materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas.
15. JET 14 - Introducción a la Cementación. Manual de cementación de pozos level 1. cap. 2.0, 5.0, 6.0.
16. NELSON, Erick., 1990. Well Cementing. Schlumberger Educational Services, Sugar Land, Texas, 8-1, 8-2.
17. VÁSQUEZ, G., LANCO, A., COLINA, A., 2005. A Methodology to Evaluate the Gas Migration in Cement Slurries. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. <https://doi.org/10.2118/28959-MS>

MANUAL DE PRUEBAS BÁSICAS DE EQUIPO PARA CONTROL DE MIGRACIÓN DE GAS DURANTE OPERACIONES DE CEMENTACIÓN.

PRUEBA DE LABORATORIO 1. ENSAMBLAJE Y PUESTA EN MARCHA.

OBJETIVO: Conocer la forma correcta de ensamblar el equipo y poner en evidencia los canales de migración de gas.

EQUIPOS:

- 2 Llaves inglesa o expansibles
- 1 beaker de 1000 mL
- 1 probeta
- Balanza analítica
- Cronómetro
- Mezcladora o licuadora
- Martillo de goma
- Espátula
- Equipo para pruebas de migración de gas.

MATERIALES:

- Cemento clase A
- Algodón
- Grasa para rodamientos

PROCEDIMIENTO PARA ENSAMBLAJE

1. Revisar todas las partes del equipo, verificando que se encuentran en óptimas condiciones.
2. Revisar las mangueras de flujo de gas para asegurar que no se encuentren obstruidas por cemento ni sedimentos.
3. Ajustar las mangueras a la base, se deben poner los empaques circulares en las respectivas ranuras.
4. Poner cuatro finas capas de algodón en los orificios de entrada de gas al equipo, para evitar que la lechada fragüe en las mangueras, pero que permitan un adecuado flujo de aire.
5. Hacer la conexión con el flujo de gas, proveniente del aire a presión que se encuentra en los laboratorios.
6. Las dos partes del tubo exterior se atornillan unas a otras y posteriormente se ponen encima de la base, para también ser atornilladas, usando como referencia las flechas blancas presentes en el equipo.
7. Estas dos partes deben ser debidamente lubricadas con grasa para rodamientos, para facilitar el desmontado.
8. Se inserta el tubo interno justo encima de los empaques circulares de la base, debidamente engrasado.



PROCEDIMIENTO PARA EVIDENCIAR LA MIGRACION DE GAS

1. Se usa la relación: 19.7 litros de agua por cada saco de cemento neto clase A, es decir, 42.6 kilogramos.
2. Colocar el agua en la mezcladora presente en el laboratorio.
3. Poco a poco incorporar el cemento al agua mientras se va mezclando a las mínimas revoluciones posibles.
4. Este proceso se debe hacer por tandas, dependiendo del volumen de lechada que se desea obtener.
5. Mientras el flujo de aire se encuentra apagado, se vierte en el equipo la lechada preparada.
6. Permitir el flujo de aire, lentamente, hasta alcanzar un leve burbujeo en la superficie del cemento.
7. Se deja así durante 3 horas aproximadamente, para que se formen canales en el cemento.
8. El cemento se debe dejar fraguando por aproximadamente 24 horas
9. Después de este tiempo, se continúa con el desmontado del equipo.
10. Determinar la densidad y la presión hidrostática con los valores de volumen absoluto del agua y del cemento:
Volumen absoluto del cemento: 0.0382 gal/lb
Volumen absoluto del agua: 0.12 gal/lb
11. Una vez el cemento ha fraguado por 24 horas, se procede a desatornillar el equipo y desmontar cada pieza.
12. Luego, es necesario dar golpes suaves en la parte inferior del tubo interior con el cemento, para poder separarlos y apreciar los canales de migración de gas que se formaron.
13. Desmontar y limpiar el equipo.

PRUEBA DE LABORATORIO 2. FLUJO DE GAS INERMITENTE

OBJETIVO: Observar el comportamiento de la lechada de cemento en el equipo con un flujo de gas instantáneo e intermitente mediante jeringas.

EQUIPOS:

- 2 Llaves inglesa o expansibles
- 1 beaker de 1000 mL
- 1 probeta
- Balanza analítica
- Cronómetro
- Mezcladora o licuadora
- Martillo de goma
- Espátula
- Equipo para pruebas de migración de gas.

MATERIALES:

- Cemento clase G
- Algodón
- Grasa para rodamientos

PROCEDIMIENTO

1. Ensamblar y adecuar el equipo del mismo modo que en la PRUEBA 1, pero esta vez no se debe conectar a la salida de aire comprimido del laboratorio, sino a las jeringas adecuadas para la inyección de gas.
2. Preparar una lechada de cemento usando la relación: 18.9 litros de agua por cada saco de cemento neto clase G, es decir, 42.6 kilogramos.
3. Primero se debe colocar el agua en la mezcladora presente en el laboratorio.
4. Poco a poco se va incorporando el cemento al agua mientras se va mezclando a las mínimas revoluciones posibles.
5. Este proceso se debe hacer por tandas, dependiendo del volumen de lechada que se desea obtener.
6. Las jeringas deben estar llenas de aire y el paso de gas desde estas hacia el equipo debe encontrarse cerrado.
7. Verter la lechada de cemento en el espacio anular del equipo.
8. Abrir el paso de gas desde las jeringas hacia el equipo.
9. Inmediatamente después, se debe comenzar a inyectar el aire de las jeringas de manera lenta, hasta notar que se genera burbujeo en la superficie de la lechada.
10. Tomar registro del volumen desplazado por la jeringa al momento del burbujeo.
11. Repetir este procedimiento 5, 10 y 30 minutos después de haberlo realizado la primera vez.
12. Determinar la densidad y la presión hidrostática con los valores de volumen absoluto del agua y del cemento.

Volumen absoluto del cemento: 0.0382 gal/lb

Volumen absoluto del agua: 0.12 gal/lb

13. Hallar la presión requerida en cada caso para que la burbuja penetre en la lechada. Volumen de las mangueras = 34 mL (Ley de Boyle).

14. Una vez el cemento ha fraguado por 24 horas, se procede a desatornillar el equipo y desmontar cada pieza.

15. Luego, es necesario dar golpes suaves en la parte inferior del tubo interior con el cemento, para poder desmontarlo.

DATOS OBTENIDOS

TIEMPO(MIN)	VOLUMEN DESPLAZADO DE AIRE (mL)	PRESION 2 (psi)
0		
5		
10		
30		

PRUEBA DE LABORATORIO 3. ADITIVO CONTROLADOR DE MIGRACIÓN DE GAS

OBJETIVO: Observar el comportamiento de la lechada de cemento en el equipo con un flujo de gas instantáneo e intermitente mediante jeringas al adicionar un aditivo para control de migración de gas.

EQUIPOS:

- 2 Llaves inglesa o expansibles
- 1 beaker de 1000 mL
- 1 probeta
- Balanza analítica
- Balanza de lodos
- Cronómetro
- Mezcladora o licuadora
- Martillo de goma
- Espátula
- Equipo para pruebas de migración de gas.

MATERIALES:

- Cemento clase G
- Cloruro de calcio
- HALAD-344
- Bentonita
- GasStop
- Algodón
- Grasa para rodamientos

PROCEDIMIENTO

1. Ensamblar y adecuar el equipo del mismo modo que en la PRUEBA 1.
2. Preparar una lechada de cemento de acuerdo a los siguientes porcentajes:

Concentración	Aditivo
100 % BWOC	Dyckerhoff clase G
8.73 gal/saco	Agua fresca
1.2 % BWOC	CaCl ₂
0.4 % BWOC	HALAD-344
1.8 % BWOC	Bentonita
0.5 % BWOC	GasStop™

*BWOC: Porcentaje basado en el peso del cemento.

3. Colocar el agua requerida en la mezcladora presente en el laboratorio.
4. Agregar el cloruro de calcio.
5. Mezclar bien.
6. Dejar en reposo por 15 minutos.
7. Adicionar HALAD-344™ u otro aditivo para controlar la perdida de filtrado.
8. Adicionar GasStop™ u otro aditivo para controlar la migración de gas.
9. Adicionar la bentonita.

10. Adicionar el cemento.
 11. Se dejan mezclar por 15 min.
 12. Medir densidad con balanza de lodos
 13. Las jeringas deben estar llenas de aire y el paso de gas desde estas hacia el equipo debe encontrarse cerrado.
 14. Verter la lechada de cemento en el espacio anular del equipo.
 15. Abrir el paso de aire.
 16. Inmediatamente después, se debe comenzar a inyectar el aire de las jeringas de manera lenta, hasta notar que se genera burbujeo en la superficie de la lechada.
 17. Tomar registro del volumen desplazado por la jeringa.
 18. Repetir este procedimiento 5, 10 y 30 minutos después de haberlo realizado la primera vez.
 19. Determinar la densidad y la presión hidrostática con los valores de volumen absoluto del agua, el cemento y los aditivos:
- Cemento: 0.0382 gal/lb
 CaCl₂ : 0.02164 gal/lb
 HALAD-344: 0.1009 gal/lb
 Bentonita: 0.0453 gal/lb
 GasStop: 0.1009 gal/lb
 Agua fresca: 0.12 gal/lb
20. Hallar la presión requerida en cada caso para que la burbuja penetre en la lechada. Volumen de las mangueras = 34 mL.
 21. Una vez el cemento ha fraguado por 24 horas, se procede a desatornillar el equipo y desmontar cada pieza.
 22. Luego, es necesario dar golpes suaves en la parte inferior del tubo interior con el cemento, para poder desmontarlo.

DATOS OBTENIDOS

TIEMPO(MIN)	VOLUMEN DESPLAZADO DE AIRE (mL)	PRESION 2 (psi)
0		
5		
10		
30		

PRUEBA DE LABORATORIO 4. VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DEL ADITIVO CONTROLADOR DE MIGRACIÓN DE GAS

OBJETIVO: Observar el comportamiento de la lechada de cemento en el equipo con un flujo de gas instantáneo e intermitente mediante jeringas al variar la proporción de aditivo para control de migración de gas.

EQUIPOS:

- 2 Llaves inglesa o expansibles
- 1 beaker de 1000 mL
- 1 probeta
- Balanza analítica
- Balanza de lodos
- Cronómetro
- Mezcladora o licuadora
- Martillo de goma
- Espátula
- Equipo para pruebas de migración de gas.

MATERIALES:

- Cemento clase G
- Cloruro de calcio
- HALAD-344
- Bentonita
- GasStop
- Algodón
- Grasa para rodamientos

PROCEDIMIENTO

1. Ensamblar y adecuar el equipo del mismo modo que en la PRUEBA 3.
2. Preparar una lechada de cemento de acuerdo a los siguientes porcentajes:

Concentración	Aditivo
100 % BWOC	Dyckerhoff clase G
8.73 gal/saco	Agua fresca
1.2 % BWOC	CaCl ₂
0.4 % BWOC	HALAD-344
1.8 % BWOC	Bentonita
0.16 y 0.67 % BWOC	GasStop™

*BWOC: Porcentaje basado en el peso del cemento.

*Este procedimiento se realiza dos veces, usando diferentes concentraciones de GasStop en cada una, pero manteniendo iguales los demás aditivos.

3. Colocar el agua requerida en la mezcladora presente en el laboratorio.
4. Agregar el cloruro de calcio.
5. Mezclar bien.
6. Dejar en reposo por 15 minutos.

7. Adicionar HALAD-344™ u otro aditivo para controlar la perdida de filtrado.
8. Adicionar GasStop™ u otro aditivo para controlar la migración de gas.
9. Adicionar la bentonita.
10. Adicionar el cemento.
11. Se dejan mezclar por 15 min.
12. Las jeringas deben estar llenas de aire y el paso de gas desde estas hacia el equipo debe encontrarse cerrado.
13. Verter la lechada de cemento en el espacio anular del equipo.
14. Abrir el paso de aire.
15. Inmediatamente después, se debe comenzar a inyectar el aire de las jeringas de manera lenta, hasta notar que se genera burbujeo en la superficie de la lechada.
16. Tomar registro del volumen desplazado por la jeringa.
17. Repetir este procedimiento 5, 10 y 30 minutos después de haberlo realizado la primera vez.
18. Determinar la densidad y la presión hidrostática con los valores de volumen absoluto del agua, el cemento y los aditivos:
Cemento: 0.0382 gal/lb
CaCl₂ : 0.02164 gal/lb
HALAD-344: 0.1009 gal/lb
Bentonita: 0.0453 gal/lb
GasStop: 0.1009 gal/lb
Agua fresca: 0.12 gal/lb
19. Hallar la presión requerida en cada caso para que la burbuja penetre en la lechada. Volumen de las mangueras = 34 mL.
20. Una vez el cemento ha fraguado por 24 horas, se procede a desatornillar el equipo y desmontar cada pieza.
21. Luego, es necesario dar golpes suaves en la parte inferior del tubo interior con el cemento, para poder desmontarlo.
22. Comparar el comportamiento de cada una de las pruebas, teniendo en cuenta la presión hallada para cada caso.

DATOS OBTENIDOS

CONCENTRACIÓN 1			CONCENTRACIÓN 2		
TIEMPO (MIN)	VOLUMEN DESPLAZADO DE AIRE (mL)	PRESION 2 (psi)	TIEMPO(MIN)	VOLUMEN DESPLAZADO DE AIRE (mL)	PRESION 2 (psi)
0			0		
5			5		
10			10		
30			30		

MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

PROCEDIMIENTO.

Para mantener en óptimas condiciones el equipo, es necesario tener en cuenta los siguientes pasos:

1. Después de finalizada cada prueba, desatornillar el equipo.
2. Lavar cada pieza con jabón para remover el cemento que pueda quedar pegado al equipo.(Realizarlo en el sitio adecuada para dicho proceso, dentro del laboratorio, para evitar que los sedimentos se vayan por el drenaje y ocasionen obstrucciones).
3. Secar cada una de las partes, para evitar la formación de óxido.
4. Revisar las mangueras de inyección de gas, en busca de posibles intrusiones de cemento o perforaciones. En el caso de que hayan ocurrido, estas deben ser reemplazadas.
5. El tubo interno del equipo debe ser engrasado después de su uso para evitar la corrosión, debido a que este no presenta ningún tipo de protección como pintura o agentes anticorrosivos.