



**UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TECNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**Análisis de la migración de gas durante la cementación de
pozos horizontales de petróleo.**

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en
Perforación de pozos de petróleo y producción de petróleo.**

Mención: Perforación de pozos de petróleo

Autora: Ing. Arianna Álvarez Ramos

**Matanzas
2019**



**UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**CENTRO POLITÉCNICO DEL
PETRÓLEO
SEDE: VARADERO**

Análisis de la migración de gas durante la cementación de pozos horizontales de petróleo.

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en
Perforación de pozos de petróleo y producción de petróleo.**

Mención: Perforación de pozos de petróleo

Autora: Ing. Arianna Álvarez Ramos

Tutores: Dr. C. Agustín Benítez Hernández

Esp. Liván Márquez García

**Matanzas
2019**

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a mis padres que me han brindado todo su cariño y apoyo incondicional, a mi hermano, a mi novio y a mis abuelos que siempre han estado para mí cuando los he necesitado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco:

A mis tutores Agustín y Liván que hicieron posible la realización de este trabajo.

A mis padres por apoyarme y aconsejarme durante todos mis años como estudiante.

A mis abuelos, hermano y novio por su apoyo y preocupación.

A todas mis amistades que no dejaron de apoyarme, especialmente a:

Yaremis

Rachel

En general, mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me brindaron su apoyo durante los últimos tres años.

A todos Muchas Gracias...

RESUMEN

El presente trabajo se realiza en la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro, en la misma se analiza la migración de gas durante la cementación de pozos horizontales de petróleo mediante la erradicación de los problemas de hermeticidad que presentan los mismos y que limitan su tiempo de vida y producción, teniendo en cuenta las principales técnicas de cementación de los pozos de petróleo reportadas por la literatura y la influencia de la migración de gas en la perforación horizontal. Para la solución del problema presentado fue necesario diseñar una correcta lechada de cemento, realizando varias pruebas. En la determinación del tiempo de espesamiento se obtuvieron valores de 3 horas y 8 minutos, 3 horas y 15 minutos y 3 horas y 32 minutos, en los experimentos 1, 2 y 3 respectivamente, los valores obtenidos en la determinación de la pérdida de filtrado en los experimentos 1, 2 y 3 fueron de 125 mL, 70 mL y 36 mL respectivamente. De los tres experimentos realizados, el 3 es el diseño más adecuado de la lechada de cemento ya que en todas las pruebas realizadas los resultados fueron favorables y están en correspondencia con la norma, debido a la utilización de las proporciones adecuadas de los aditivos que actúan directamente en las propiedades de la lechada.

ABSTRAT

The present work is carried out in the Company of Perforation and Extraction of Petroleum of the Center, in the same one the migration of gas is analyzed during the cementation of horizontal wells of petroleum by means of the eradication of the staunchness problems that it present the same ones and that they limit its time of life and production, keeping in mind the main techniques of cementation of the wells of petroleum reported by the literature and the influence of the migration of gas in the horizontal perforation. For the solution of the presented problem it was necessary to design a correct cement grout, carrying out several tests. In the determination of the time of thickening values of 3 hours and 8 minutes, 3 hours and 15 minutes and 3 hours and 32 minutes it were obtained, in the experiments 1, 2 and 3 respectively, the values obtained in the determination of the filtrate loss in the experiments 1, 2 and 3 were respectively of 125 mL, 70 mL and 36 mL. Of the three carried out experiments, the 3 are since the most appropriate design in the cement grout in all the carried out tests the results it were favorable and it are in correspondence with the norm, due to the use of the appropriate proportions of the preservatives that it act directly in the properties of the grout.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.	6
1.1. QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND.	6
1.2. CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND	7
1.2.1. CLASE DE CEMENTO UTILIZADA EN CUBA.	8
1.3. ADITIVOS DE LA LECHADA DE CEMENTO.	9
1.4. PROPIEDADES DEL CEMENTO.	12
1.5. GENERALIDADES DE LA CEMENTACIÓN.....	12
1.5.1. OBJETIVO FUNDAMENTAL DE LA CEMENTACIÓN.....	13
1.5.2. CEMENTACIÓN PRIMARIA.....	13
1.5.2.1. FALLAS EN LA CEMENTACIÓN PRIMARIA.	17
1.5.3. CEMENTACIÓN REMEDIAL.....	21
1.5.4. LAVADORES Y ESPACIADORES.....	22
1.6. DESARROLLO DE LA FUERZA DE GEL.....	23
1.7. COMPRESIÓN DEL CEMENTO	23
1.8. PERMEABILIDAD DEL CEMENTO.....	24
1.9. TAPONES DE CEMENTO.....	24
1.10. IDENTIFICACIÓN DE LAS CAUSAS DE LA MIGRACIÓN DE GAS.....	25
1.11. CONCLUSIONES PARCIALES	26
CAPÍTULO 2: MIGRACIÓN DE GAS DURANTE LA CEMENTACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO HORIZONTALES.....	28
2.1. FENÓMENO DE MIGRACIÓN DE GAS DURANTE LA CEMENTACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO.	28
2.1.1. MIGRACIÓN DE GAS EN POZOS HORIZONTALES.	29
2.1.2. CAUSAS DE LA MIGRACIÓN DE GAS.	30
2.1.3. CATEGORÍAS DE LA MIGRACIÓN DE GAS.....	30
2.1.3.1. MIGRACIÓN DE GAS INMEDIATA.	31
2.1.3.2. MIGRACIÓN DE GAS A CORTO PLAZO.....	31
2.1.3.3. MIGRACIÓN DE GAS A LARGO PLAZO.....	31

2.1.4. POSIBLES RUTAS DE MIGRACIÓN DE GAS EN EL ANULAR.	31
2.1.5. FACTORES DE LA MIGRACIÓN DE GAS.....	33
2.1.5.1. PÉRDIDA DE FLUIDO.	33
2.1.5.2. PRESENCIA DE AGUA LIBRE.	34
2.1.5.3. TIEMPO DE ESPESAMIENTO.....	35
2.1.5.4. REMOCIÓN DEL LODO.....	36
2.1.5.5. OTROS FACTORES.....	36
2.2. PROPIEDADES REOLÓGICAS (EN FRÍO Y EN CALIENTE) A LA LECHADA DE CEMENTO.....	36
2.3. CONTROL DE LA MIGRACIÓN DE GAS.....	39
2.3.1. MÉTODO MECÁNICO	39
2.3.2. INCREMENTO DE LA PRESIÓN INICIAL.....	40
2.3.3. ALTERACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA LECHADA DE CEMENTO.....	40
2.4. SOLUCIONES PRÁCTICAS USADAS PARA COMBATIR LA MIGRACIÓN DE GAS.....	40
2.5. CONSECUENCIAS DE LA MIGRACIÓN DE GAS.....	43
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	44
3.1. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS (EN FRÍO Y EN CALIENTE) A LA LECHADA DE CEMENTO.....	44
3.2. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE ESPESAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO.	50
3.3. DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE FILTRADO DE LA LECHADA DE CEMENTO.	54
3.4. DETERMINACIÓN DEL FLUIDO LIBRE PRESENTE EN LA LECHADA DE CEMENTO.	55
3.5. CONCLUSIONES PARCIALES.....	59
CONCLUSIONES	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS.....	64

Introducción

La cementación es una de las operaciones más críticas durante la perforación o terminación de un pozo. Una cementación exitosa es aquella en la cual la tubería de revestimiento se baja hasta su profundidad programada y se llena el espacio anular con una lechada de cemento, la cual, al fraguar crea un sello y una adherencia entre la tubería y la formación.

Durante el proceso de cementación se pueden presentar una serie de problemas, entre los que se encuentra la entrada de gas durante la cementación o la migración de gas presente en la formación una vez concluida la colocación del cemento en el espacio anular e iniciado el proceso de transición para el fraguado.

El éxito de la cementación puede eliminar el costo y tiempo en cementaciones remediales y proveer un ambiente de trabajo seguro ausente de gas percolado o venteado desde las zonas cubiertas por dicha cementación primaria.

La migración de gas es un proceso muy complejo ampliamente conocido en la industria petrolera, el cual fue identificado cuando se comenzaron a perforar pozos con mayor profundidad en donde existían mayores reservorios de gas, y desde entonces se han realizado valiosos esfuerzos para combatir dicho problema.

Este fenómeno puede ocurrir durante el proceso de perforación o de completamiento de pozos. Sin embargo, en general se puede decir que el mismo 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. Los factores que influyen en la migración de gas son: el control de la densidad del lodo, la remoción del lodo, las propiedades de la lechada de cemento, la hidratación del cemento y las interacciones entre el cemento, la camisa y la formación.

En los pozos horizontales las propiedades más críticas vinculadas a la migración de gas son la estabilidad de la lechada y la pérdida de fluido. Las dos propiedades principales que determinan la estabilidad de la lechada son la sedimentación y el agua libre.

Las consecuencias de la migración de gas son numerosas y lamentablemente éstas no se pueden detectar inmediatamente. Debido a esta dificultad, 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 migración de gas es un problema complejo que involucra la condición del pozo, la eliminación efectiva del lodo y el diseño del sistema de cementación para su colocación, durabilidad y adaptabilidad al ciclo de vida productiva del pozo.

Después de estudios sucesivos se ha llegado a la conclusión que actuando sobre los factores que influyen en la migración de los fluidos a través del anular cementado y que ponen en peligro la integridad de la columna de cemento, se logra controlar el fenómeno.

Existen algunos métodos disponibles para prevenir la migración de gas, cada uno con sus ventajas. Una combinación de estos funciona mejor usualmente, pero en la selección de estos deben ser considerados aspectos del pozo, tales como: presión de poro o de la formación, permeabilidad, flujo de gas, temperatura, geometría y desviación del caño, altura de la columna de cemento y la presión de fractura de la formación.

Problema:

¿Cómo erradicar los problemas de hermeticidad que presentan los pozos horizontales de petróleo que limitan el tiempo de vida y la producción de los mismos?

Hipótesis:

Si se realizan correctas prácticas en el diseño de la lechada de cemento, se podrán erradicar los problemas de hermeticidad que presentan los pozos horizontales de petróleo que limitan el tiempo de vida y la producción de los mismos.

Objetivo General:

Desarrollar buenas prácticas en cuanto al diseño de la lechada de cemento para erradicar los problemas de hermeticidad que presentan los pozos horizontales de petróleo que limitan el tiempo de vida y la producción de los mismos.

Objetivos específicos:

1. Determinar las principales técnicas de cementación de los pozos de petróleo reportadas por la literatura
2. Estudiar la influencia de la migración de gas en la perforación horizontal.
3. Obtener los valores óptimos del tiempo de espesamiento, fluido libre y pérdida de filtrado en la lechada de cemento.
4. Diseñar la lechada de cemento.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico.

1.1. Química del cemento Portland.

El cemento Portland está básicamente compuesto por silicato tricálcico (Ca_3SiO_5), silicato dicálcico (Ca_2SiO_4), aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), aluminoferrita tetracálcica ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Estos compuestos denominados “clinker” (excepto el yeso) se forman en un horno por una serie de reacciones a una temperatura de 1500 °C aproximadamente. (Nelson *et al.*, 2006)

Tabla 1.1: Compuestos básicos del cemento Portland.

Componentes	Fórmula	Nomenc. abreviada	Función que realiza
Aluminato tricálcico	CaOAl_2O_3	C_3A	Esta es la fase que se hidrata más rápidamente y es el componente que controla el inicio del tiempo de consistencia y fragüe; también produce una porción que ataca los sulfatos presentes en el agua más rápido.
Silicato tricálcico	CaOSiO_2	C_3S	Es el componente que se encuentra en mayor proporción en el cemento y es el principal material productor de la resistencia. Este componente es el responsable de la resistencia en edades tempranas (1-28 días). Esta es la fase en que ocurren unos esfuerzos tempranos de compresión en el cemento y esta etapa de esfuerzos que desarrolla es la más importante en la cementación.
Silicato dicálcico	CaOSiO_2	C_2S	Esta es la fase que hidrata lentamente y por lo tanto es el componente que produce un tiempo prolongado de esfuerzos en el cemento. Es un compuesto de hidratación lenta y proporciona el incremento gradual de la resistencia en edades tardías.
Aluminoferrita tetracálcica	$\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Tiene un efecto leve. Es un compuesto de bajo calor de hidratación. Da el color al cemento. Un exceso de óxido de hierro puede incrementar la cantidad de C_4AF y disminuir la cantidad de C_3A .

Los materiales usados en la fabricación de cemento Portland deben contener las cantidades apropiadas de calcio, sílice, alúmina, y los compuestos férricos. Durante la fabricación, se hacen análisis químicos frecuentemente de todos los materiales asegurar la uniformidad y la calidad alta. (Nelson *et al.*, 2006)

Las propiedades físico – químicas del cemento son: la granulometría, el peso específico y la superficie específica. (Managuero *et al.*, 2006)

1.2. Clasificación del cemento Portland

Los cementos tienen características físicas y químicas y en base de esto, es el uso que se le puede dar, dependiendo de la profundidad, presión y temperatura a soportar.

El criterio químico principal por clasificar los cementos Portland es la distribución relativa de las fases, conocida como el “la composición de la fase potencial“. Los límites en las cantidades de álcalis, CaO libre, MgO, SO₃ y el residuo insoluble así como la pérdida en la ignición (la pérdida de peso después de quemar) también se especifica para algunos las clases de cementos de Portland.

Actualmente existen ocho clases de cemento establecidas por el Instituto Americano del Petróleo (API 1984). (Nelson *et al.*, 2006)

- **Clase A:** apropiado para ser usado desde la superficie hasta una profundidad de 1830 m (6000 ft) cuando no se requieren propiedades especiales. Disponible sólo en grado ordinario de resistencia a los sulfatos.
- **Clase B:** destinado para emplear desde la superficie hasta una profundidad de 1830 m (6000 ft) cuando las condiciones requieren una resistencia el sulfato moderada o alta. Tiene menor contenido de Aluminato tricálcico que el clase A
- **Clase C:** destinado para usar desde la superficie hasta 1830 m (6000 ft) cuando se requiere una elevada y temprana resistencia del cemento; para lograrla el contenido de Silicato tricálcico y el área superficial deben ser relativamente altos. Está disponible en los tres grados de resistencia al sulfato.
- **Clase D:** empleado para profundidades desde 1830 m (6000 ft) a 3050 m (10000 ft) bajo condiciones de presión y temperatura moderadamente altas. Está disponible en los tipos de grado de resistencia al sulfato moderado y alto.
- **Clase E:** empleado para profundidades desde 3050 m (10000 ft) a 4270 m (14000 ft) bajo condiciones de presión y temperatura elevadas. Está disponible en grados de resistencia al sulfato moderado y alto.
- **Clase F:** empleado para profundidades desde 3050 m (10000 ft) a 4880 m (16000 ft) bajo condiciones de presión y temperaturas extremadamente elevadas. Está disponible en grados de resistencia al sulfato moderado y alto.

Las clases D, E y F son conocidas como cementos retardados empleados en pozos profundos, el retardo se logra por la significativa reducción de la cantidad de fases de hidratación rápida (C_3S y C_3A) y el aumento del tamaño de cada partícula de los granos de cemento. Desde que se desarrolló la tecnología de los retardadores químicos, estos cementos son raramente empleados.

- **Clase G y H:** Son los ideales para trabajos de cementación de pozos petroleros, son cementos que se emplean desde superficie hasta 10000 m. Son diseñados bajo los requerimientos de las normas API, cumpliendo con los requisitos especificados tales como tiempo de bombeabilidad, consistencia, agua libre y resistencia mecánica/compresiva. Pueden modificarse con aceleradores o retardadores para poder usarlos en un amplio rango de presión y temperatura, conservando su composición, propiedades mecánicas, desempeño, fluidez y evitando el fraguado prematuro de la lechada. Un cemento clase G y H de buena calidad, proporciona alta resistencia a la compresión, resistencia al ataque químico, buen sello hidráulico y bajo consumo de aditivos convirtiéndose en un producto con características técnicas aceptables y económicamente rentables. (Cruz, 2017). Son los cementos de uso más común en los pozos en la actualidad. Se emplean como el cemento básico de pozos desde la superficie hasta 2440 m (8000 ft) o pueden ser usados con aceleradores o retardadores para cumplir un amplio rango de profundidades y temperatura de pozos. La composición química de ambos es idéntica, su principal diferencia es el área superficial. El clase H es significativamente más grueso que el G, debido a sus diferentes requerimientos de agua.

1.2.1. Clase de cemento utilizada en Cuba.

En Cuba se utiliza para la cementación de pozos de petróleo el cemento Portland 350, que se produce en la fábrica Siguaney, situada en Sancti Spíritus, ya que el mismo tiene características similares al Portland clase G, que es el que se usa en la industria petrolera.

Características:

- Controla el porcentaje de Silicato Tricálcico y de Aluminato Tricálcico para lograr los efectos deseados en el cemento.
- Posee gran resistencia.

- Se obtienen bajas temperaturas de hidratación.
- Pueden ser modificados con aditivos como aceleradores o retardadores u otros para garantizar nuestras necesidades.
- Su densidad puede ser modificada con los porcentajes de agua.

El cemento producido en la fábrica anterior mente mencionada es destinado a la construcción, por esta razón sus propiedades cubren un rango muy amplio de especificaciones que satisfacen las exigencias de la industria de la construcción, pero que por su variabilidad no cumplen las exigencias para la cementación de pozos. Esto constituye una dificultad para la industria petrolera.

En cuanto a este aspecto se hace necesario aclarar que la demanda de cemento fresco para los pozos es del orden de miles de toneladas en un año, mientras que la capacidad productiva de una fábrica se encuentra alrededor de este mismo valor, pero en un día. Por tanto, no se justifica la producción de una fábrica en comparación con la demanda de la industria petrolera cubana, ni siquiera sería rentable la producción de una línea destinada al petróleo. (Managuero *et al.*, 2006)

1.3. Aditivos de la lechada de cemento.

Los aditivos agregados a la lechada de cemento son materiales orgánicos e inorgánicos. Existen aditivos sólidos que se pueden agregar al cemento seco para optimizar sus propiedades finales. La adición de estos productos en la lechada de cemento, modifican las características del proceso de hidratación, el endurecimiento e incluso la estructura interna del concreto.

Existen actualmente más de 100 aditivos disponibles para cementos, muchos de los cuales puede proporcionarse en estado sólido o líquido, entre los que se encuentra los siguientes:

1. Aceleradores: Químicos que reducen el tiempo de la reacción. Son empleados para reducir el tiempo de espesamiento y acelerar el proceso de endurecimiento del cemento. El acelerador más común es el cloruro de calcio, ya que además de ser el más efectivo para lechadas de cemento para pozos petroleros se puede obtener fácilmente y es económico. Además para este fin se pueden utilizar soluciones de silicato de sodio.

Cruz, (2017) expone que entre sus características principales se destacan las siguientes:

- Disminuyen el tiempo de bombeabilidad requerido para el posicionamiento de la lechada en el anular a las bajas temperaturas del pozo.
 - Aceleran el proceso de fraguado.
 - Aumentan la hidratación.
2. Retardadores: Químicos que tardan el tiempo de la reacción. Son químicos que se le añaden al cemento para aumentar el tiempo de fraguado, con la finalidad de garantizar el tiempo necesario para que la lechada de cemento sea bombeada y colocada en su lugar antes que fragüe. Los aditivos retardadores incluyen a los lignosulfonatos, los derivados de la celulosa, derivados del azúcar y mezclas orgánicas.

Brindan la posibilidad de trabajar el cemento en un amplio rango de temperatura y presión. Entre sus características principales se destacan las siguientes:

- Incrementan el tiempo de bombeabilidad requerido para el posicionamiento de la lechada en el anular con altas temperaturas del pozo.
 - Pospone el tiempo de fraguado.
 - Inhiben la hidratación prematura.
3. Extendedores: Son aditivos químicos o material inerte utilizado para incrementar el rendimiento de una lechada de cemento, esto permite reducir ligeramente la densidad de la mezcla. El incremento del rendimiento reduce el costo por volumen de la lechada de cemento. La densidad de la lechada se puede reducir con extendedores como bentonita, puzolanas, tierras diatomeas y silicato de sodio. El agua es el principal aditivo extendedor y que los materiales antes mencionados sólo ayudan a transportar el agua para aligerar la lechada de cemento.
4. Agentes pesantes: Materiales que incrementan la densidad de la lechada de cemento, con la finalidad de utilizarla en pozos profundos para vencer las altas presiones en el fondo del mismo. Entre los principales agentes densificantes se encuentran: la barita, la ilmenita y la hematita.
5. Dispersantes: Materiales encargados de la reducción de la viscosidad de la lechada de cemento. Entre los principales dispersantes se encuentran: los

lignosulfonatos, el polinaftaleno sulfonado y los ácidos hidroxicarboxílicos. (Nelson *et al.*, 2006)

Cruz, (2017) plantea que sus características primordiales son las siguientes:

- Reducir la viscosidad y el punto de cedencia de la lechada.
 - Reducir la presión de fricción.
 - Modificar el régimen de flujo.
 - Mejorar la eficiencia de los controladores de filtrado.
6. Controladores de la pérdida de fluido: Materiales encargados de controlar el escape de la fase acuosa de la lechada de cemento hacia la formación. Esto se debe controlar ya que debido a la disminución de la fase acuosa, la densidad de la lechada de cemento aumenta, lo que trae como consecuencia que ésta no sea bombeable. Los controladores de pérdida de fluido más comunes son los polímeros solubles en agua.
 7. Controladores de la pérdida de circulación: Materiales encargados de prevenir o mitigar la pérdida de circulación de la lechada de cemento hacia formaciones débiles o altamente permeables. Entre los principales agentes que controlan la pérdida de circulación se encuentran: materiales fibrosos fragmentados, perlas expandidas, celofán y materiales granulados.
 8. Aditivos especiales: Aditivos misceláneos como fibras y partículas flexibles.
 9. Antiespumantes: Son productos químicos necesarios en cada cementación por su capacidad de prevenir/eliminar la espuma generada durante la mezcla de la lechada. Mantienen la densidad de la lechada que se bombea al pozo. No influye en las reacciones químicas de los productos químicos adicionados a la mezcla. Los antiespumantes más comúnmente usados son los éteres de poliglicoles y las siliconas.
 10. Antisedimentantes: son aquellos que permiten obtener lechadas de cemento homogéneas, restaurando los valores de punto cedente y permitiendo un bajo contenido de agua libre. Entre los antisedimentantes más usados se encuentran: la bentonita, los polímeros hidrosolubles y los silicatos.
 11. Tixotrópicos: son empleados para combatir la pérdida de circulación y para minimizar la migración de gas a través del crecimiento acelerado de la fuerza de gel estática de la lechada de cemento.

12. Inhibidores de retrogresión: son aquellos que ayudan a prevenir la pérdida de resistencia a la compresión del cemento (retrogresión). El aditivo mayormente usado es la harina sílice y se recomienda que la cantidad óptima empleada para controlar la retrogresión sea de 30% a 40%.
13. Antimigratorios: son aquellos que ayudan a prevenir la migración de fluidos durante el fraguado de la lechada de cemento. El desarrollo de estos aditivos está basado en el comportamiento de la lechada de cemento entre el estado fluido y sólido, ya que se tiene la certeza que es en ese período que el fluido puede migrar. El aditivo antimigratorio más usado es el látex con los polímeros: resinas de estireno-butadieno (SBR), acrílicos, estireno-acrílicos, polivinil acetato (PVA) y copolímeros de vinil acetato. (Smith *et al.*, 2006)

1.4. Propiedades del cemento.

Actualmente la industria se ha enfocado en las propiedades mecánicas de cemento. Técnicas ultrasónicas usan herramientas como el analizador de cemento ultrasónico que permite supervisar la evolución de fuerza con tiempo, se puede determinar el tiempo requerido para lograr la compresibilidad dado la fuerza del cemento. (Jackson *et al.*, 1993)

En los recientes años, la industria del cemento para la perforación ha empezado a concentrarse en la habilidad del mismo de proporcionar el aislamiento zonal a lo largo de la vida del pozo. (Goodwin *et al.*, 1992)

La pérdida de aislamiento zonal se ha atribuido a varias causas:

- Migración del gas, problema que no se conocía inicialmente.
- Adherencia
- Fracturación de una zona con problemas durante una simulación de tratamiento.
- Temperatura del pozo extrema o cambios de presión
- Ataque químico
- Presión de la migración a las zonas de las pérdidas.

1.5. Generalidades de la cementación

La cementación es una de las operaciones más críticas durante la perforación o terminación de un pozo. Una cementación exitosa es aquella en la cual la tubería de

revestimiento se baja hasta su profundidad programada y se llena el espacio anular con una lechada de cemento, la cual, al fraguar crea un sello y una adherencia entre la tubería y la formación. (Pérez, 2013)

El proceso de cementación de pozos puede ser clasificado en cementación primaria y cementación secundaria.

1.5.1. Objetivo fundamental de la cementación.

El objetivo de la cementación es asegurar la integridad del agujero, lo cual implica los siguientes aspectos:

Aislamiento zonal: Consiste 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. En el anexo 1 se muestra un ejemplo de cementación para evitar que el gas y el petróleo se mezclen con agua de la zona superior.

Sustentación de la tubería de revestimiento: La capa de cemento proporciona soporte axial a la tubería de revestimiento que se instale después (por ejemplo, los liners).

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, H₂S y CO₂).

Sustentación del agujero: El cemento actúa como soporte para el agujero en las formaciones plásticas, sensibles al agua o no consolidadas.

1.5.2. Cementación primaria.

La cementación primaria es la operación realizada inmediatamente después de encamisado el pozo y con su aplicación se pretende lograr el aislamiento zonal (Ott, 1990). Ésta se realiza a la camisa de superficie, a la intermedia y a la de producción.

De no realizarse un buen trabajo de cementación puede no lograrse el aislamiento zonal requerido y a su vez se puede afectar la vida productiva del pozo. El fracaso en el aislamiento de zonas de interés puede conducir a una comunicación indeseable de fluidos del pozo o a una acumulación de gas en el anular. (Smith *et al.*, 2006)

Métodos de cementación primaria.

Los métodos para realizar la cementación dependen principalmente del tipo de pozo y sus características.

- **Cementación en una etapa.**

Este método es el más empleado, ya que es simple y bastante seguro. En la mayoría de los casos para su realización se usan dos tapones; el primero cuya función es separar el fluido de perforación (lodo) de la lechada de cemento o del espaciador para que no se mezclen, y el segundo tiene como función desplazar toda la lechada que está dentro de la camisa, el mismo es empujado por el fluido de desplazamiento (generalmente lodo). De forma general, el método consiste en inyectar inicialmente la lechada en la tubería de revestimiento por medio de un dispositivo especial denominado cabezal de cementación, en el cual se encuentran colocados los dos tapones al momento de comenzar la operación. El encargado de la actividad de mezcla y bombeo es el agregado de cementación. Antes de bombear el espaciador se deja caer el primer tapón, el que se asienta en la válvula flotadora o de retención. (Mavliútov, 1986)

Circulación del lodo mediante la bomba del equipo de perforación:

Antes de bombear la lechada en el pozo, se lleva a cabo otro proceso: utilizando la bomba del equipo de perforación se hace circular el lodo de perforación en el pozo, con el fin de acondicionar el lodo y lavar el pozo, ver el anexo 2. Este proceso recibe el nombre de acondicionamiento del lodo, lo que significa que fluya sin problemas. Si no se lleva a cabo el acondicionamiento del lodo, el paso del fluido por el anular puede verse dificultado por la presencia de sectores con lodo gelificado.

El condicionamiento consiste en circular el lodo, que baja por la tubería de revestimiento, y retorna por el anular. (Pérez, 2013)

Bombeo del lavador y espaciador:

Antes de bombear la lechada de cemento, por lo general, se bombea un lavador químico o un espaciador densificado, o ambos, para que actúen como buffer entre el fluido de perforación y el cemento. Los lavadores químicos son fluidos base agua que pueden utilizarse en espacios anulares pequeños con geometría del agujero regular. Estos fluidos pueden utilizarse cuando se puede lograr turbulencia en todas las secciones del espacio anular. Los espaciadores son fluidos densificados que se bombea e flujos turbulentos o laminares. Estos productos sirven para eliminar completamente los fluidos de perforación del anular antes de inyectar la lechada de cemento. Ver anexo 3.

Los lavadores y espaciadores se preparan antes del trabajo de cementación y se bombean antes de empezar la mezcla de cemento.

Lanzamiento del tapón superior:

En los trabajos de cementación primaria, antes y después de la inyección de la lechada de cemento, se lanzan tapones limpiadores. Estos elementos sirven para separar la lechada de los fluidos de perforación, limpiar las paredes interiores de la tubería de revestimiento y obtener una indicación positiva de que el cemento ya está en posición fuera de la tubería de revestimiento.

Se utilizan dos tapones, el primero, el tapón inferior, es hueco y tiene una membrana de caucho en la parte superior. Esta membrana estalla cuando el tapón llega a la parte superior del collar de flotación, en la zona inferior de la sarta de revestimiento, y se aplica presión diferencial.

El tapón inferior se lanza desde el cabezal de cementación antes de bombear la lechada de cemento por la tubería de revestimiento, y su misión es mantenerse parada la lechada del lodo y limpiar el interior de la tubería de revestimiento, ver anexo 4.

Antes de bombear el cemento, se llevan a cabo los siguientes procesos:

- Las válvulas de la cabeza de cementación se colocan en la posición correcta.
- El mecanismo de lanzamiento del tapón (situado en la cabeza de cementación) se activa.
- Se bombea algo de fluido para empujar el tapón limpiador desde la cabeza hacia la tubería de revestimiento.

Las válvulas de la cabeza de cementación se vuelven a colocar en su posición para la cementación, y puede iniciarse la mezcla y el bombeo de la lechada de cemento.

Mezcla de la lechada:

La lechada de cemento se forma combinando cemento seco, agua y los aditivos necesarios en un mezclador. Este proceso puede realizarse en continuo o por baches. El fluido de mezcla (agua más los aditivos del cemento) puede prepararse antes o al vuelo mediante un sistema de aditivos líquidos. En algunas locaciones, los aditivos se mezclan en seco con el cemento.

Bombeo de la lechada inicial:

La lechada inicial es un tipo de lechada de baja densidad y alto rendimiento diseñada para llenar y cubrir la sección superior del anular. Este material se bombea después del lavador y el espaciador y antes de la lechada de cola, como se muestra en el anexo 5. Su densidad es superior a la del fluido de perforación y menor que la de la lechada de cola.

No siempre se realiza el bombeo de la lechada inicial.

Bombeo de la lechada de cola:

La lechada de cola es una lechada de mayor densidad, diseñada para cubrir la sección inferior del anular desde el fondo del agujero. Normalmente, la lechada de cola presenta unas propiedades superiores a las de la lechada inicial. Es esencial que la lechada de cementación tenga la densidad correcta para que sus propiedades sean las deseadas, como se muestra en el anexo 6.

Lanzamiento del tapón superior:

El segundo tapón limpiador de cementación se denomina tapón superior y es sólido. Se bombea al final de los trabajos de cementación con el fin de separar la lechada del fluido de desplazamiento que se bombea en la siguiente etapa del proceso, y evitar así que sea contaminada por dicho fluido.

Una vez que la lechada ya se ha bombeado en la tubería de revestimiento, el tapón superior se lanza desde la cabeza de cementación, como se muestra en el anexo 7.

- **Cementación en varias etapas.**

Este método se aplica cuando existe peligro de ruptura hidráulica de la formación; al cementar pozos a fin de disminuir la probabilidad de migración del gas; cuando conforme a las condiciones de pozo se requiere el uso de materiales de cementación diferentes. (Smith *et al.*, 2006)

Para la realización del método se utilizan las conexiones para cementar en etapas, generalmente se hacen dos etapas. Se utilizan dos tapones de goma, el de la primera etapa es de aletas flexibles y el de la segunda es de aletas rígidas. El procedimiento para cementar la primera etapa es: bombear el espaciador o preflujo, mezclar y bombear la cantidad de cemento necesaria, dejar caer el tapón (aletas flexibles) y realizar el desplazamiento hasta que el tapón se asiente en la válvula de retención y comience a aumentar la presión, lo que indica el final del desplazamiento. Después en dependencia del tipo de conexión para cementar en etapas usada se utiliza un dardo para que la accione, es decir la abra y permita circular y eliminar el exceso de lechada de la primera etapa. El procedimiento para cementar la segunda etapa es: bombear el espaciador, la lechada, se deja caer el tapón (aletas rígidas) y se realiza el desplazamiento con el lodo hasta que comienza a aumentar la presión porque el tapón se asienta en la conexión para cementar en etapas. Se espera al fragüe del cemento. (Managuero, 2006) (Figura. 1.1)

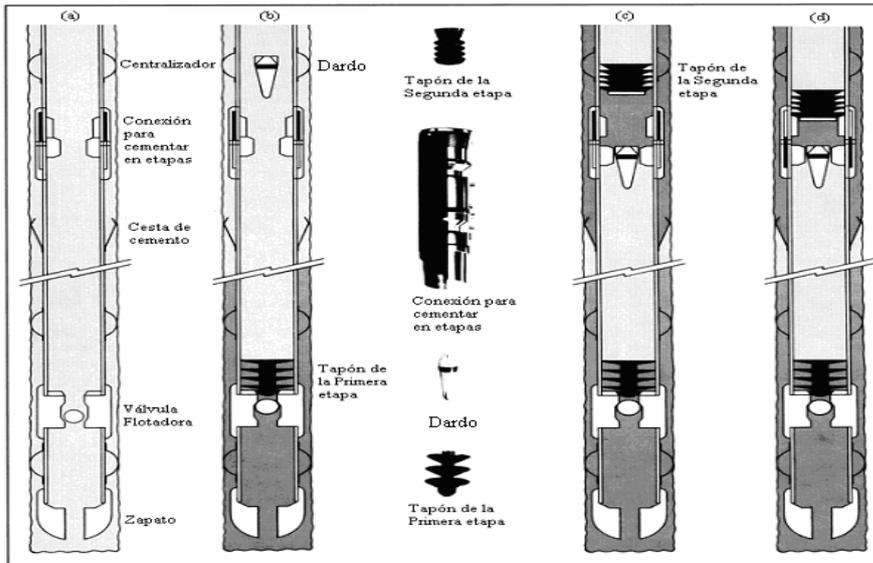


Figura 1.1: Cementación en dos etapas. a. Lodo de perforación circulando, b. Desplazamiento de la lechada de cemento en la primera etapa, c. Desplazamiento de la lechada de cemento en la segunda etapa y cierre del tapón, d. Trabajo terminado. (Mavliútov, 1986)

1.5.2.1. Fallas en la cementación primaria.

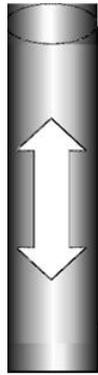
El principal factor que afecta la colocación de la lechada de cemento es el desplazamiento inefectivo del fluido de perforación del espacio anular, y su reemplazo con lechada de cemento, la cual una vez fraguada protegerá el revestidor y suministrará un sello para los fluidos provenientes de las formaciones. (Smith, 1990)

Varios son los factores que influyen directamente con la eficiencia del desplazamiento del lodo. Entre los que se encuentran:

- Movimiento de la tubería. El movimiento de la tubería durante la colocación de la lechada de cemento ayuda a remover el lodo que posiblemente se encuentra atrapado en las zonas más angostas del anular. (Smith *et al.*, 2006)

Este punto es uno de los factores principales que ayudan a un buen desplazamiento del lodo. Para lograr esto se emplea el movimiento de tubería de rotación y/o el de reciprocación, dependiendo del tipo de operación y geometría del hoyo (Haut *et al.*, *sa*) (Figura. 1.2).

RECIPROCACIÓN



ROTACIÓN



Figura 1.2. Tipos de movimientos de tubería.

- Centralización de la tubería y tasas de desplazamiento. (Figura 1.3). Cuando se evalúan los factores que afectan el desplazamiento inefectivo del fluido de perforación, es necesario considerar el comportamiento del fluido en un anular excéntrico, en donde la tubería no se encuentra exactamente centralizada en el hoyo, ya que una tubería centralizada origina un área de flujo uniforme en el anular y por lo tanto se logra una distribución uniforme de la presión alrededor de la tubería (Smith *et al.*, 2006). Por el contrario, si la tubería está descentralizada la velocidad del fluido no es uniforme, debido a que éste tiende a fluir a tasas más elevadas entre los sitios que ofrecen menor resistencia al flujo (lado ancho de la excentricidad). Se desarrolla en consecuencia, la canalización del lodo en el lado estrecho debido a su pérdida de fluidez y a la desigual distribución de presiones. (Moon *et al.*, 1999)

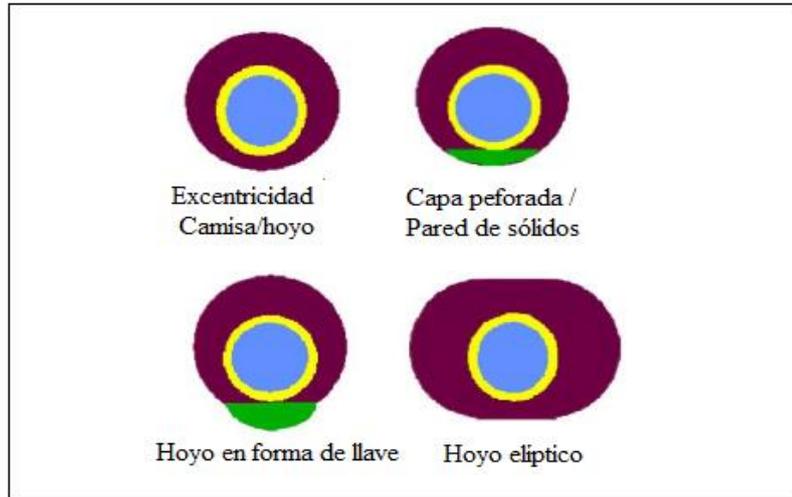


Figura 1.3: Centralización de tubería

Diferencia de densidades. Estudios realizados han encontrado que la diferencia de densidad entre el lodo y la lechada de cemento es un factor significativo para lograr una buena remoción del lodo (Rodríguez, 2001). Si el lodo es más ligero que el cemento, la capacidad de flotación del lodo contribuirá a su remoción, se desarrollan unas fuerzas denominadas de flotación que tienden a aplanar la interfase cemento-lodo y se promueve la eficiencia del desplazamiento (Moon *et al.*, 1999). Sin embargo la diferencia de densidades no necesariamente debería ser la máxima posible, ya que se alcanza una mejor remoción con una reducida diferencia de densidad, aplicándole al cemento una tasa más alta de desplazamiento. (Clark, *et al.*, 1973)

- Tiempo de contacto. Según estudios realizados el tiempo de contacto (tiempo en que la lechada de cemento permanece en contacto con un punto en particular en el área anular) parece tener efectos positivos sobre la eficiencia en la remoción del lodo. Este tiempo se ha estimado que debería ser mayor de 10 minutos para lechadas de cemento en régimen turbulento. (Smith *et al.*, 2006)

Existen mecanismos que permiten identificar si la cementación es buena o no, tales como:

- Registro CBL-VDL: Al ser interpretado según las curvas que ofrece da idea de la presencia de cemento, de cuán adherido está el cemento a la camisa o a la formación y/o que el pozo fue cementado satisfactoriamente. En ocasiones en que la cementación no es del todo buena pueden ocurrir micro espacios de cemento entre la camisa y el cemento, para identificar esto solo se resuelve corriendo un registro CBL-VDL sin presión y otro con presión.
- Registro CCL: Magnetiza la tubería y se ven entonces rayas horizontales (una sola raya, fina) en los lugares donde la tubería tiene las calas (empates de un tubo con el otro) porque éstas son de mayor espesor que el resto de la tubería. Mientras que en las zonas de averías de las camisas o en los punzados (que son en fin como una abertura a la camisa) este registro muestra muchas rayas horizontales pegadas, cada una cerca de otra, por eso se puede usar con ambos objetivos, ver si el punzado quedó bien o ver si hay roturas en las camisas.
- Registro USIT: Cuando se muestran colores claros como el amarillo es que no hay buena cementación y cuando tenemos colores casi negro hay buena cementación, pero estos son los datos crudos de la información que viene del campo, en realidad es importante mirar el mapa de cemento, o sea lo mismo pero clasificado, donde el color rojo es gas, el verde contaminaciones, el azul líquido, el blanco no hubo respuesta y el casi negro buena calidad del cemento.

Son muchos los pozos cubanos en los que la cementación lejos de garantizar el aislamiento de las zonas, ha dado resultados negativos tal es el caso de un pozo del yacimiento Varadero, que al interpretar el registro CBL-VDL se obtuvo que en gran parte no había cemento, como se muestra en la Figura 1.4, en la que excepto en los tres intervalos encerrados en rectángulos verdes (que no es cemento sino arcilla), el resto está mal cementado.

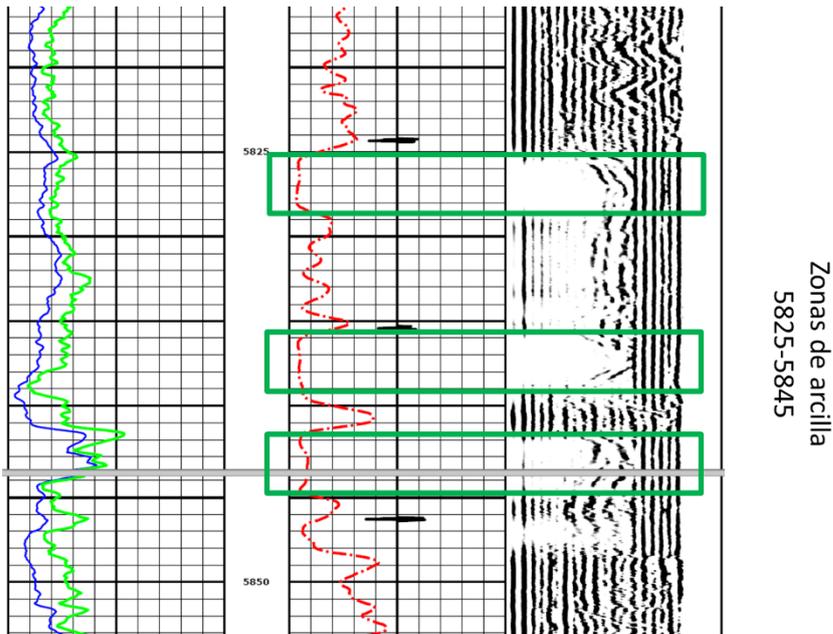


Figura 1.4: CBL-VDL corrido en el VD-XXXX

1.5.3. Cementación remedial.

La cementación remedial o secundaria consiste en inyectar una lechada para forzar su entrada a través de espacios vacíos presentes en el anular. Su objetivo principal es crear un sello en el anular con la finalidad de lograr el aislamiento zonal. La efectividad de esta operación es baja en comparación con su costo y resultados, por lo que se recomienda tratar de obtener los mejores resultados durante la cementación primaria, para no incurrir en gastos y trabajos adicionales. (Managuero, 2006)

Objetivos de la cementación remedial:

- Reparar fallas originadas en la cementación primaria debido a canalización o insuficiente altura de cemento colocada en el anular.
- Eliminar el exceso de agua o gas (mejorar la relación agua/petróleo o gas/petróleo a través del aislamiento de zonas de agua o gas).
- Reparar grietas en el revestidor causadas por la corrosión o rompimiento de la tubería.

- Abandonar zonas de producción agotadas para prevenir la migración de fluidos y la contaminación de otras zonas o pozos.

1.5.4. Lavadores y espaciadores.

En muchos casos durante los trabajos de cementación puede existir incompatibilidad entre la lechada de cemento y el fluido de perforación, por lo que se forma una masa viscosa difícil de bombear en la interfase de estos fluidos. Esto trae como consecuencia que la lechada de cemento no pueda desplazar todo el fluido de perforación y queden restos de lodo contaminado en las paredes del revestidor y de la formación. (Rodríguez, 2001)

Para evitar este problema se bombea dentro del pozo, antes de introducir la lechada de cemento, un fluido que sea compatible tanto con la lechada de cemento como con el fluido de perforación. Este fluido es conocido con el nombre de preflujos. Los preflujos deben por tanto eliminar el lodo de perforación del revestidor y de las paredes de la formación. Estos se clasifican según su formulación en lavadores y espaciadores.

Los **lavadores** son fluidos cuya densidad y viscosidad son muy parecidas a las del agua o el aceite, y están constituidos por una mezcla de dispersantes, surfactantes y solventes, la cual actúa adelgazando y dispersando al lodo. Debido a su baja viscosidad, estos son particularmente empleados para desplazamientos en flujos turbulentos. La forma más simple de un lavador es el agua fresca. (Rodríguez, 2001)

Los **espaciadores** son preflujos con densidades y propiedades reológicas diseñadas cuidadosamente. Estos poseen un contenido de sólidos mayor que los lavadores, y son generalmente efectivos para evitar el contacto entre los dos fluidos presentes en el pozo. Un buen espaciador debería separar adecuadamente ambos fluidos y ser compatible con los mismos, remover tanto el fluido de perforación como la torta de filtrado y no afectar las propiedades de la lechada de cemento o del fluido de perforación. (Smith, 1990)

Aspectos a tener en cuenta:

- Todos los productos químicos usados deben ser compatibles con los fluidos de la formación, con el lodo y el cemento, no deben causar efectos adversos como fluidos viscosos, o los daños en el reservorio por precipitado o emulsiones.

- El volumen de los espaciadores y los lavadores tienen que ser suficiente para darle un margen de 10 minutos al menos, del tiempo de contacto en el desplazamiento planificado dentro del espacio anular para esta operación.
- En los pozos que sean de ángulos grandes hay que tener alternativas de uso de espaciadores con alta o baja viscosidad.
- Una técnica común en estos días es el uso también como separador de un pequeño volumen de una lechada scavenger elaborada con la misma agua con aditivos y el cemento, pero de densidad algo menor que se bombea delante de la que se empleará en la operación la cual por su alto contenido de sólidos ayuda a completar la limpieza, ajustándose a continuación la densidad de la misma a la programada para la operación.

1.6. Desarrollo de la fuerza de gel.

Después que la lechada de cemento se coloca en el anular, ésta se comporta inicialmente como un fluido el cual transmite por completo la presión hidrostática. Cuando la lechada de cemento está un tiempo estática las fuerzas iónicas pueden crear una estructura terciaria débil que posteriormente se transformará en una estructura más fuerte (Economides *et al.*, 1988). Esta estructura es lo que se conoce como gel, el cual se define como una estructura que posee propiedades de cohesión que pertenecen al estado sólido así como la propiedad de fluir que pertenece al estado líquido. Así mismo, es la que señala el punto en el cual la lechada de cemento comienza a cambiar de un fluido hidráulico que transmite completamente la presión hidrostática a un material sólido al cual se le puede medir la resistencia a la compresión. (Moon *et al.*, 1999)

1.7. Compresión del cemento

La compresión del cemento contribuye a la migración del gas porque causa una reducción de la presión en el anular y proporciona un espacio para el gas para entrar en el pozo. (Nelson, 2006)

La competencia para el diseño de cemento es a menudo medido por su resistencia a la compresión. Una resistencia de 250 a 500 psi es generalmente considerada aceptable a los fines de continuar con la perforación. Mayores resistencias se correlacionan con

mayor adherencia del cemento, lo cual es importante para la restricción del flujo de gas en las interfases cemento-revestidor y cemento-formación. Es por lo tanto, muy importante que el diseño de la lechada permita que se desarrolle la más alta resistencia a la compresión que puedan ser colocada con seguridad en el pozo. (Managuero, 2006)

1.8. Permeabilidad del cemento.

Diversos métodos de control de gas basan su teoría en que algunas formulaciones de cemento desarrollan permeabilidades extremadamente altas durante el proceso de hidratación, creando de esta manera un canal de flujo a través de la matriz del cemento (Economides *et al.*, 1988).

Así lo demostraron Chandler, (2001) y Beirute, (1990) cuando describieron el uso de un cemento impermeable el cual opera inmovilizando los fluidos dentro de los poros del cemento. Debido a que el agua contenida en el cemento no puede ser desplazada, el gas no puede moverse dentro los poros de la lechada de cemento. Así mismo Parcevaux y Drecq, (1988) emplearon la técnica del cemento látex impermeable señalando que éste es un efectivo y satisfactorio método para prevenir la migración de gas.

Contrario a esto, en 1989 se demostró con ecuaciones matemáticas que los canales en la columna de cemento no están vinculados con la permeabilidad de la lechada de cemento. Sin embargo algunos estudios de laboratorio indican que la permeabilidad intrínseca del cemento puede contribuir al problema de migración. (Managuero, 2006)

1.9. Tapones de cemento.

Un tapón de cemento es un volumen relativamente pequeño de lechada de cemento que se coloca dentro del pozo. Existen varias razones para colocar los tapones de cemento, entre las que se encuentran:

- Abandono de un pozo seco o una zona agotada. Para sellar un pozo seco o una zona agotada se colocan tapones de cemento a las profundidades requeridas. Estos tapones previenen la comunicación zonal evitando cualquier migración de fluido no deseado.

- Perforación direccional. Se coloca un tapón de cemento a una profundidad específica para desviar un hoyo debido a que se realizó en una dirección indeseable o en una posición estructural pobre.
- Control de pérdida de circulación. Si existe pérdida de circulación durante la perforación, ésta se puede restaurar en algunos casos colocando un tapón de cemento contra la zona donde se está produciendo dicha pérdida y posteriormente se perfora de nuevo a través del tapón, el cual se denomina “tapón perforable”. (Prohaska, 1994)

1.10. Identificación de las causas de la migración de gas

Desde los primeros pozos de petróleo, la migración de hidrocarburos a la superficie ha sido un desafío para la industria del petróleo y el gas. La migración de gas, también conocida como flujo anular, puede promover la acumulación de presión detrás de la tubería de revestimiento (SPC, por sus siglas en inglés). La existencia de presión detrás de la tubería de revestimiento puede definirse como el desarrollo de presión anular en la superficie que puede eliminarse pero luego vuelve a aparecer. La SPC indica que hay comunicación con el espacio anular, desde una fuente de presión sustentable, debido a un aislamiento inadecuado de las distintas zonas. El flujo anular y la SCP son problemas importantes que afectan a los pozos perforados en diversas regiones productoras de hidrocarburos del mundo. (Colectivo de autores, 2004)

La determinación de la fuente precisa del flujo anular o la existencia de presión detrás de la tubería de revestimiento suele ser difícil, no obstante, las causas probables pueden dividirse en cuatro categorías principales:

Fugas de gas en la tubería de producción y en la tubería de revestimiento: Las fugas pueden producirse como consecuencia de la existencia de conexiones a rosca deficientes, corrosión, fisuras por esfuerzo térmico o rotura mecánica de la sarta interna, o a raíz de una fuga en el empacador. (Bourgoyne *et al.*, 2000)

Pobre desplazamiento del lodo: La eliminación inadecuada del lodo o de los fluidos tapón antes de la colocación del cemento puede impedir el logro del aislamiento por zonas. Varios son los motivos que producen una eliminación deficiente del lodo

incluyendo, entre otras causas, inadecuada mecánica de desplazamiento, y fallas en el proceso o la ejecución del desplazamiento. (Colectivo de autores, 2004)

Diseño inadecuado de la lechada de cemento: El flujo que tiene lugar antes de que fragüe el cemento es el resultado de la pérdida de presión hidrostática al punto tal que el pozo deja de estar en condiciones de sobrebalance; la presión hidrostática es menor que la presión de formación. Esta disminución de la presión hidrostática es el resultado de diversos fenómenos que tienen lugar como parte del proceso de fraguado del cemento. (Wojtanowicz *et al.*, 2000)

El cambio de una lechada bombeable, altamente fluida, a un material fraguado, tipo roca, implica una transición gradual del cemento de fluido a gel y finalmente a una condición de fraguado. Esto puede demandar varias horas, según la temperatura, la cantidad y las características de los compuestos retardantes que se agregan para evitar el fraguado del cemento antes de su colocación.

Mientras la presión hidrostática en el cemento parcialmente fraguado se encuentra por debajo de la presión de formación, puede producirse invasión de gas. Si no se controla, la invasión de gas puede crear un canal a través del cual puede fluir el gas, comprometiendo efectivamente la calidad del cemento y el aislamiento por zonas.

Daño del cemento después de fraguado: La SCP puede desarrollarse mucho después del proceso de construcción del pozo. Hasta una cementación primaria libre de fallas puede ser dañada por las operaciones del equipo de perforación o las actividades realizadas en el pozo después de fraguado el cemento. Los esfuerzos variables presentes en el pozo pueden generar micro espacios anulares, fisuras por esfuerzos locales, o ambas situaciones, conduciendo a menudo al desarrollo de las SCP. (Colectivo de autores, 2004)

1.11. Conclusiones Parciales

1. Existen ocho clases de cemento establecidas por el Instituto Americano del Petróleo según sus propiedades físicas y químicas. En Cuba se utiliza el cemento clase G ya que proporciona alta resistencia a la compresión, resistencia al ataque químico, buen sello hidráulico y bajo consumo de aditivos convirtiéndose en un producto con características técnicas aceptables y económicamente rentables.

2. La adición de aditivos a la lechada de cemento, modifica las características del proceso de hidratación, el endurecimiento e incluso la estructura interna del concreto, existen actualmente más de 100 aditivos disponibles para cementos
3. La industria del cemento para la perforación ha empezado a concentrarse en la habilidad del mismo de proporcionar el aislamiento zonal a lo largo de la vida del pozo, evitando entre otras causas, la migración del gas.
4. La cementación se realiza con el objetivo de asegurar la integridad del agujero, puede ser clasificada en cementación primaria y cementación secundaria.
5. La migración de hidrocarburos a la superficie ha sido un desafío para la industria del petróleo y el gas, las causas que provocan este fenómeno son: fugas de gas en la tubería de producción y en la tubería de revestimiento, pobre desplazamiento del lodo, diseño inadecuado de la lechada de cemento y daño del cemento después de fraguado.

Capítulo 2: Migración de gas durante la cementación de pozos de petróleo horizontales.

2.1. Fenómeno de migración de gas durante la cementación de pozos de petróleo.

La migración de gas es un proceso complejo que tiene lugar por muchos factores: el control de la densidad del lodo, la remoción del lodo, las propiedades de la lechada de cemento, la hidratación del cemento y las interacciones entre el cemento, la camisa y la formación. (Nelson, 2006)

El flujo de gas que tiene lugar inmediatamente después de la cementación o antes de que fragüe el cemento, se conoce como flujo de gas anular o migración de gas anular. Este flujo es generalmente masivo y el gas puede migrar entre zonas, cargando las formaciones menos presurizadas, o puede fluir a la superficie y se pueden requerir procedimientos de control de pozo. (Figura.2.1)

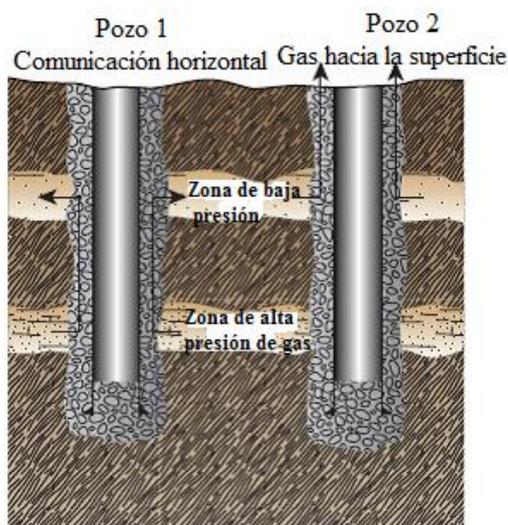


Figura 2.1: Dos escenarios que demuestran la migración de gas en el anular cementado.

Las fallas en los trabajos de cementación primaria alcanzan el 15% del trabajo total en el pozo y que aproximadamente una tercera parte de este problema corresponde a la migración de fluidos presentes en la formación, durante el período de colocación y transición del cemento. (Ott, 1990)

2.1.1. Migración de gas en pozos horizontales.

Originalmente, la construcción de pozos horizontales largos era una decisión económica; se lograba más zona productiva expuesta por el costo de un pozo o bien se explotaban numerosas formaciones por el costo de una sola localización de superficie. Al actuar como túneles de disparos de gran diámetro y penetración profunda, los pozos horizontales también constituyen una respuesta para el desafío de lograr tasas de flujo económicas desde formaciones compactas y de escaso espesor. (Schlumberger, 2011)

En los últimos años, la industria del petróleo y el gas ha perfeccionado su capacidad para perforar pozos de alto ángulo cada vez más largos, a lo largo de trayectos cada vez más complejos. Hoy, las longitudes horizontales de estos pozos de alcance extendido se miden en kilómetros y en millas, y múltiples depósitos aislados se vinculan con un solo pozo.

La tecnología innovadora se caracteriza por su capacidad para abrir nuevos horizontes. En el mundo de las operaciones de perforación de alcance extendido, este estándar es literal.

Un pozo de alcance extendido se define como aquel que posee una relación desviación horizontal – profundidad vertical verdadera (HD/TVD) de más de 2.0.

Las operaciones de perforación que apuntan a una distancia horizontal significativa respecto a la localización superficial, requieren algo más que perforar en sentido vertical, girar y perforar en sentido horizontal.

Los pozos de alcance extendido se perforan por numerosas razones:

- ✓ Para contactar el mayor volumen del yacimiento con el pozo.
- ✓ Para acceder a varios depósitos de hidrocarburos de amplia distribución desde una sola localización.
- ✓ Para eliminar las operaciones de superficie de las áreas ambientalmente sensibles.

La migración de gas en estos pozos constituye un factor muy importante a tener en cuenta para lograr una perforación con resultados satisfactorios ya que las fugas de

gas a la superficie o los reventones subterráneos pueden poner en peligro la seguridad del personal, las instalaciones de la plataforma de producción y el medio ambiente, además puede probar la pérdida del pozo lo que tiene grandes implicaciones económicas.

Es de vital importancia que el aislamiento zonal se logre con resultados positivos, así como que la lechada de cemento sea diseñada correctamente ya que bajo condiciones estáticas, la inestabilidad de la lechada puede hacer que el agua se separe de la lechada de cemento. Esta agua puede migrar hacia la pared del pozo y acumularse formando un canal. Esto resulta particularmente preocupante en los pozos desviados donde las fuerzas gravitacionales pueden producir separación por densidad e inversión del fluido, conduciendo al desarrollo de un canal de fluido libre en la parte superior del pozo, por el que sin dudas puede migrar el gas.

2.1.2. Causas de la migración de gas.

La migración de gas puede originarse debido a tres causas:

1. La presión hidrostática en el espacio anular es menor a la presión de poro de la zona donde se localiza el gas.
2. Presencia de una vía en el anular mediante la cual el gas puede migrar.

2.1.3. Categorías de la migración de gas.

El proceso de la migración de gas se categoriza de acuerdo a la ocurrencia del mismo durante la operación de cementación, por lo que se han definido tres categorías fundamentales. (Nelson, 2006)

1. Migración de gas inmediata (durante la cementación)
2. Migración de gas a corto plazo (después de la cementación)
3. Migración de gas a largo plazo

2.1.3.1. Migración de gas inmediata.

La migración de gas inmediata, también conocida como migración de gas, durante la cementación, ocurre entre el comienzo de la operación de cementación y la terminación del mismo y es normalmente marcada cuando el tapón limpiador llega al tope. Durante este período de tiempo el resultado de la migración de gas es la pérdida de equilibrio de la presión hidrostática con respecto a las formaciones con contenido de gas. Para la prevención de la migración de gas inmediata es necesario mantener un control del pozo similar al que se tiene durante la perforación. Uno de los primeros acercamientos a resolver la migración de gas inmediata es el aumento de la densidad del fluido en el anular; sin embargo esto puede resultar peligroso ya que un aumento en la presión hidrostática puede provocar la pérdida de circulación y fracturar la formación. (Nelson, 2006)

2.1.3.2. Migración de gas a corto plazo.

La migración de gas a corto plazo ocurre entre el fin de la cementación primaria y el fraguado del cemento. La migración puede ocurrir, entre pocos minutos o después de varios días después de finalizada la cementación. Esto la convierte en la más compleja de entender, difícil de predecir y complicada para prevenir. Es por eso que los estudios se han enfocado en esta categoría. (Nelson, 2006)

2.1.3.3. Migración de gas a largo plazo.

La migración de gas a largo plazo ocurre después de que el cemento ha fraguado, lo cual puede ocurrir pocas horas después de que el cemento ha finalizado su trabajo. Respecto a esta categoría de la migración de gas, ha aumentado el interés industrial en los últimos años debido a las observaciones a pozos de gas abandonados que expulsan gas a la atmósfera. (Nelson, 2006)

2.1.4. Posibles rutas de migración de gas en el anular.

La teoría de la migración de gas es compleja y el gas puede viajar por diferentes y variadas rutas. (Beirute *et al.*, 1990)

El gas fluye por el anular a través de tres trayectorias fundamentales:

- la interfase cemento/tubería
- la interfase cemento/formación
- los canales formados a través de la matriz del cemento (ver figura 2.2)

Cemento/Revestidor



Cemento/Formación



Matriz del Cemento



Figura 2.2: Posibles caminos de migración de gas.

Además de éstas y de manera más específica, la industria da cuenta de otras rutas por las que el gas puede migrar. (García, 2003)

- A través del cemento no fraguado por percolación de las burbujas de gas.
- A través de la microestructura del cemento no fraguado.
- A través de canales en el cemento no fraguado.

- A través del cemento no fraguado en condiciones de “blowout” en bajo balance.
- A través de fisuras, canales o la permeabilidad del cemento fraguado.
- A través de una combinación de los arriba mencionados.

Los microanillos pueden formarse en la interfase del cemento con la tubería o la formación. Estos se forman como resultado de fluctuaciones en la temperatura o la presión en el pozo durante la cementación (Nelson, 2006). En algunos casos, se pueden formar microanillos más grandes en la interfase cemento/tubería por canales formados por una mala remoción del fluido de perforación durante la adhesión del cemento a la tubería o a las paredes del pozo, por lo que es de especial interés garantizar una adecuada remoción del lodo del pozo.

2.1.5. Factores de la migración de gas.

Es importante destacar que no es solo un factor sino la combinación de varios factores lo que provoca la migración de gas, dependiendo de las condiciones de cada pozo.

2.1.5.1. Pérdida de fluido.

La pérdida de la lechada de cemento hacia la formación afecta directamente a las tres categorías de la migración de gas, es por eso que esta es considerada uno de los factores fundamentales.

Primeramente esto pudiera ser provocado por una disminución de la presión anular debido a:

- Incremento de los efectos de gelificación de la lechada causada por una reducción del contenido de agua en la misma.
- Disminución de la altura de la columna hidrostática.
- Pérdidas de fricción-presión durante el fraguado provocando como resultado una disminución del volumen lechada.

Además la pérdida fluido puede crear un espacio dentro de la matriz de cemento que puede ser ocupada por el gas.

Finalmente la pérdida de fluido puede ser responsable del control de la permeabilidad de la formación lo cual influye directamente en la migración. (Nelson, 2006)

Parcevaux (1987) estudió cómo la pérdida de fluido causa una disminución de la presión de poro y la formación de un espacio nulo de cemento.

A nivel de laboratorio se realizan pruebas para la determinación de la pérdida de filtrado teniendo en cuenta la norma API.

Se utiliza la ecuación siguiente:

$$Q30 = \frac{\sqrt{30} \cdot mL \cdot 2}{\sqrt{t}} \quad (2.1)$$

Dónde:

Q30 – Pérdida de filtrado

mL – mililitros de agua perdidos

t – tiempo

Antes de realizada la prueba es necesario conocer la reología de la lechada por medio de la cual se describe el comportamiento de la lechada de cemento en movimiento a través de las tuberías y otros conductos. Para describir las propiedades reológicas de las lechadas de cemento se utilizan comúnmente el modelo de plástico de Bingham o el modelo de la Ley de Potencia.

De igual manera se respeta lo establecido en la norma API.

$$Vp = (L300 - L100) \cdot 1.5 \quad (2.2)$$

$$Ty = L300 - Vp \quad (2.3)$$

Dónde:

Vp – Viscosidad plástica

L300 y L100 – Lecturas del viscosímetro a 300 y 100 RPM respectivamente.

Ty – Punto de cedencia

2.1.5.2. Presencia de agua libre.

La estabilidad de la lechada es una propiedad importante, que está relacionada con el control del agua libre y la sedimentación. El control del agua libre es un parámetro importante en la ayuda a la prevención del flujo de gas y especialmente crítico en condiciones de pozos desviados.

En los pozos inclinados el agua puede salir a la superficie para formar canales continuos sobre la parte superior del pozo por donde puede migrar el gas. (Sons, 1988)

Bajo condiciones estáticas, la inestabilidad de la lechada puede hacer que el agua se separe de la lechada de cemento. Esta agua puede migrar hacia la pared del pozo y

acumularse formando un canal. Esto resulta particularmente preocupante en los pozos desviados donde las fuerzas gravitacionales pueden producir separación por densidad e inversión del fluido, conduciendo al desarrollo de un canal de fluido libre en la parte superior del pozo

En pozos verticales someros, una lechada sedimentada ocasiona cambios en la densidad y un problema potencial con el control hidrostático del pozo. También, una columna con agua libre puede promover la migración de gas por la formación de venas de agua en la columna de cemento, las cuales pueden servir como conductos para el flujo de gas. Por tales razones se recomienda el uso de lechadas con cero agua libre.

Sin embargo, Nelson, (2006) expone que estudios revelaron que aunque el agua es indeseable no es un factor influyente en el flujo de gas en el anular.

Esta prueba se aplica sólo a cemento Clase G y H. (Erik B. Nelson, 2006)

Para la determinación del agua libre en la lechada de cemento, se realiza una prueba a nivel de laboratorio según lo establecido por la norma API.

$$\%agua = \frac{Vagua \cdot 100}{Vlechada} \quad (2.4)$$

Dónde:

%agua - % del agua libre

Vagua – Volumen de agua libre

Vlechada – Volumen de lechada de cemento utilizado en la prueba

2.1.5.3. Tiempo de espesamiento

Es el tiempo que la lechada de cemento permanecerá bombeable bajo condiciones de pozo.

Es importante tomar en consideración que el tiempo de espesamiento debe ser mayor que el tiempo que va a durar el trabajo de cementación, para evitar el fraguado prematuro del cemento dentro de la camisa o dentro de los dispositivos para la cementación. Por tanto, este tiempo se debe estimar como el tiempo total del trabajo de cementación más un 50% como factor de seguridad. (Dwight, 1990)

En esta prueba se deber simular las condiciones de temperatura y presión del pozo que se va a cementar lo más exacto posible debidos a que existen otros factores que no pueden ser probados en un laboratorio como son la contaminación del fluido, las caídas de presión en el bombeo no controladas, etc. (Ramos, 2015)

2.1.5.4. Remoción del lodo.

Para aislar las formaciones y ayudar a la prevención del movimiento de gas a largo de la interfase formación/cemento, el primer requisito es la remoción apropiada del fluido de perforación del caño. La importancia de la remoción del lodo en el proceso de cementación es clara, pero en el caso de los primeros revestidores, la condición del caño algunas veces no es atendida adecuadamente. Esto es obvio, sin embargo, el fluido de perforación no desplazado puede servir como un conducto para el flujo de gas, anulando el desempeño de cualquier lechada diseñada para el control de la migración de gas. La eficiencia del desplazamiento del fluido de perforación puede ser incrementada de muchas formas incluyendo el apropiado acondicionamiento del lodo, el uso de los espaciadores adecuados, la centralización del revestidor, el bombeo a altas tasas y el movimiento de la tubería durante la circulación y la colocación del cemento. (Managuero, 2006)

2.1.5.5. Otros factores.

- Los problemas mecánicos en la cementación debido a que la formación de grietas o rajaduras provocada por tensiones u otras causas puede dar lugar a la migración de gas.
- Permeabilidad del cemento
- Compresión del cemento
- Desarrollo de la fuerza de gel.

2.2. Propiedades reológicas (en frío y en caliente) a la lechada de cemento.

La reología define las propiedades de flujo de la lechada. Estas características se controlan con el fin de facilitar la mezcla y bombeabilidad y obtener características deseadas del caudal del flujo.

El equipo estándar para medir la reología de las lechadas de cemento es el viscosímetro cilíndrico coaxial, es un equipo de tipo rotacional, movido por un motor sincronizado a dos velocidades diferentes que permiten obtener velocidades rotacionales de 600 a 300 RPM, 600 – 300 – 100 – 6 – 3 RPM, o más. (Apolinario del Pezo *et al.*, 2014)

Las propiedades de fluido que definen la reología son:

- Viscosidad plástica (PV), expresada en cP (centipoise).

- Punto de cendencia (T_y), mide la resistencia de fluido a fluir.

Para diseñar la lechada de cemento y determinar valores de pérdida de fluido, presencia de agua libre y tiempo de espesamiento, es de gran importancia la determinación de las propiedades reológicas en frío y en caliente de la lechada de cemento, primeramente se procede al peso de los productos en una pesa analítica. (Figura 2.3)



Figura 2.3: Pesa analítica.

Posteriormente se realiza la mezcla de los productos previamente pesados en un mezclador de velocidad constante. (Fig. 2.4)



Figura 2.4: Mezclador de velocidad constante.

Luego de realizada la mezcla se determinan las propiedades reológicas a condiciones ambiente (en frío) en el viscosímetro que se muestra en la figura 2.5 tomando lecturas cada 10 segundos en cada una de las velocidades y se determinan según lo establecido por la norma API la viscosidad plástica y el punto de cedencia.



Figura 2.5: Viscosímetro

La lechada se introduce en un simulador llamado Consistómetro Atmosférico en el que se mantiene durante 30 minutos. En este equipo se obtiene la temperatura que tendría la lechada de cemento una vez en el fondo del pozo. (Fig. 2.6)



Figura 2.6: Consistómetro Atmosférico

Luego de simulada la temperatura del fondo del pozo se realiza nuevamente la medición de las propiedades reológicas (en caliente) que serían las más cercanas a la realidad, por lo que los valores tendrán cierta variación respecto a los primeros.

Además de los resultados de viscosidad plástica (V_p) y punto de cedencia (T_y) obtenidos siguiendo la metodología de la norma API, se determinan estos valores en un software especializado en la realización de cálculos de este tipo y que además utiliza todos los valores decimales por lo que los resultados serían más exactos, esto se hace con el objetivo de corroborar de alguna manera los valores obtenidos.

2.3. Control de la migración de gas.

La migración de gas es un problema complejo que involucra la condición del pozo, la eliminación efectiva del lodo y el diseño del sistema de cementación para su colocación, durabilidad y adaptabilidad al ciclo de vida productiva del pozo.

Después de estudios sucesivos se ha llegado a la conclusión que actuando sobre los factores que influyen en la migración de los fluidos a través del anular cementado y que ponen en peligro la integridad de la columna de cemento, se logra controlar el fenómeno.

Existen algunos métodos disponibles para prevenir la migración de gas, cada uno con sus ventajas. Una combinación de estos funciona mejor usualmente, pero en la selección de estos deben ser considerados aspectos del pozo, tales como: presión de poro o de la formación, permeabilidad, flujo de gas, temperatura, geometría y desviación del caño, altura de la columna de cemento y la presión de fractura de la formación.

2.3.1. Método mecánico

Este método consiste en colocar un sello externo al revestidor para retener al gas en las zonas más profundas del pozo. Éste es instalado en el revestidor colgante por encima de la zona de gas, y posteriormente el cemento es colocado normalmente. Cuando el cemento es colocado y aún no ha fraguado el sello se expande formando un sello mecánico para el flujo de gas. (Economides *et al.*, 1988)

2.3.2. Incremento de la presión inicial.

Este método consiste en incrementar la densidad del fluido con la finalidad de aumentar la diferencia de presión para lograr que la formación de gas sea taponada. Así mismo se puede aplicar presión en la superficie o incrementar la densidad del fluido de perforación para crear los mismos efectos. Todo esto se debe realizar tomando en consideración los valores máximos permitidos de densidad y presión para evitar posibles fracturas sobre la formación, lo que origina ciertas limitaciones en el momento de aplicar este método. (Managuero, 2006)

2.3.3. Alteración de las características de la lechada de cemento.

Esto se puede lograr alterando las tres características que afectan al cemento tales como, desarrollo de la fuerza de gel estática, pérdida de fluido, o reducción de volumen. (Economides *et al.*, 1988)

Se han desarrollado algunas metodologías para crear las alteraciones necesarias. Éstas incluyen el incremento del control de pérdida de fluido, ejerciendo una presión sobre el anular después que se coloca el cemento, incrementando la densidad de los fluidos en el pozo, ajustando el tiempo de espesamiento de la lechada, disminuyendo la columna de cemento, disminuyendo el tiempo de transición del cemento, incrementando la compresibilidad, o disminuyendo la permeabilidad interna del cemento. Estas técnicas se han aplicado y en algunos casos han resultado exitosas.

2.4. Soluciones prácticas usadas para combatir la migración de gas.

Varios son los métodos para solucionar el problema de la migración de gas, sin embargo son muy variadas las opiniones sobre el tema. Para la aplicación de una solución determinada sería importante el conocimiento de la zona gasífera, mediante el estudio de la concentración de gases durante la perforación y poder enfrentar así el problema en la zona aproximada de influjo. Las soluciones prácticas son:

- Cementos compresibles: los cuales se utilizan para mantener la presión de poro del cemento por encima de la presión de formación. Funcionan mediante reacciones químicas capaces de generar gases como hidrógeno y nitrógeno. Estas reacciones no pueden ser utilizadas únicamente, debido a que ellas no tienen la suficiente capacidad de ocupar el 6% que puede alcanzar la reducción de la columna de cemento, y de utilizarse en exceso pudiera crear canales por los que posteriormente viajaría el gas.
- Cementos expandibles: para estas cementaciones se utilizan dos técnicas, crecimiento de cristales y formación de gases, los que se basan en el crecimiento de cierto mineral en la matriz del cemento. La expansión volumétrica total se controla para que no pase de un 1%.
- Cementos tixotrópicos y de alta fortaleza de gel: se conoce que el problema fundamental de la migración de gas es la gelificación, aunque desarrollando una fortaleza de gel elevada del cemento puede ayudar a reducir la migración del gas. Por esta razón se propone la utilización de cementos tixotrópicos de elevada fortaleza de gel. Pudieran utilizarse varios métodos: adición de bentonita, adición de algunas sales de sulfatos, adición de polímeros entrecruzados.
- Cementos de ángulo recto: lechadas de cementos bien dispersas tienen tendencia a la gelificación progresiva, algunos sistemas mantienen la carga hidrostática sobre la zona de gas hasta el comienzo del fraguado y desarrollan muy baja permeabilidad de la matriz con suficiente velocidad para prevenir una intrusión de gas significativa; utilizan un mecanismo diferente a la fuerza de gel elevada, son lechadas caracterizadas con estados de alta presión y temperatura de espesado. (Nelson, 2006)
- Cementos impermeables: la migración del gas se puede prevenir mediante la reducción de la permeabilidad de la matriz del cemento durante el tiempo de transición de líquido a sólido. La primera medida fue el uso de polímeros solubles en agua para viscosificar el agua intersticial de la lechada. Desde que al menos una parte de la migración del gas se debe al desplazamiento del agua de los poros del cemento la viscosidad del agua tiende a limitar la movilidad del

gas. Esta aproximación también es apropiada para el control de la pérdida de fluido, pero desafortunadamente la viscosificación aumenta la presión de desplazamiento, además de incrementar el riesgo de fractura. Este método es limitado a bajas temperaturas, debido a que la eficiencia de los viscosificantes a bajas temperaturas es mayor. Otros cementos impermeables son los que inmovilizan el fluido dentro de la matriz del cemento. Es una combinación de agentes de puenteo y polímeros.

- Cementos energizados: Al reducirse el volumen a través de la deshidratación, la relación de presión-volumen utilizado en el proceso de espumado permite mantener mayor presión contra la formación, minimizando así el influjo de gas.
- La baja pérdida de filtrado, el agua libre reducida hasta cero y la rápida gelificación de la lechada en el espacio anular y la disminución de la permeabilidad son propiedades que permiten controlar el flujo de gas previniendo principalmente la migración primaria en los estadios iniciales de la hidratación de la lechada. Esto se logra con la utilización de aditivos que controlen dichas propiedades, tal es el caso de la adición de un látex en la formulación de la lechada, los cuales actúan sobre la permeabilidad de la misma, floculando en la matriz del cemento durante el proceso de hidratación.
- Solución técnica: utilización de packers externos de carácter inflable, lo que consiste en colocar un sello externo al revestidor para retener el gas en la zona más profunda del pozo; se refiere a la formación y la tubería de revestimiento. Ellos pueden ser inflados con lodo o lechada de cemento, pero ello requiere de una formación competente, lo cual hace más complejo el trabajo, debido a que en la operación de colocación o bajada pueden dañarse. (Nelson, 2006)
- Como otra solución se puede plantear la cementación de pozos con lechadas de cemento de diferentes tiempos de fragüe, la cual se podría aplicar en dos etapas. La lechada que se utiliza en la primera etapa, es más pesada y contiene un aditivo antimigratorio, el cual puede ser el látex, estas características se requieren porque es ésta la que estará ubicada frente a la formación gasífera; la misma tendrá un mayor tiempo de fragüe que la de la segunda etapa. La que se

usa para cementar la segunda etapa es más ligera y tiene un tiempo de fragüe menor, de forma tal que se garantice su transición al estado sólido cuando la lechada de la primera etapa aún ejerza toda su presión hidrostática sobre la formación gasífera, evitando así la canalización del gas.

2.5. Consecuencias de la migración de gas.

Las consecuencias de la migración de gas son numerosas y lamentablemente éstas no se pueden detectar inmediatamente.

Una de las más desastrosas es cuando la presión del gas o el flujo del mismo son tan grandes que llegan a la superficie, causando generalmente la pérdida total del pozo. Esto representa un peligro para la vida de las personas y para el medio ambiente; por lo que la entidad a cargo del pozo está obligada a remediarlo y a liquidarlo si llegase a ser necesario. Además esto puede provocar la pérdida de gas hacia zonas no productivas y por tanto, la pérdida de la energía del yacimiento, lo que repercute en la cantidad de crudo a extraer.

En caso de que ocurriera el fenómeno habría que emplear un método de cementación remedial, la cual se realiza hasta que se logra parar el flujo de gas y su presión se reduzca a niveles seguros. Sin embargo, la eficiencia de este trabajo en tal situación es muy pobre debido a tres razones esenciales:

- Los canales de gas son difíciles de localizar.
- Los canales de gas pueden ser tan pequeños que no se pueden rellenar con cemento.
- La presión ejercida durante la cementación remedial es suficiente para causar fracturas a la formación.

En general, se puede decir que los trabajos de reparación son muy costosos por lo que resulta más conveniente prevenir el problema de migración de gas que repararlo. (Nelson, 2006)

Capítulo 3: Análisis de los resultados.

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en los experimentos realizados con el fin de diseñar una lechada de cemento que cumpla con todos los requerimientos para la obtención de favorables resultados, haciendo énfasis en analizar el fenómeno de la migración de gas en pozos horizontales de petróleo. En cuanto a este aspecto se debe aclarar que en Cuba no contamos con los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo simulaciones de gran embergadura como los realizados en otras partes del mundo. Con respecto a la migración de gas a través de la columna de cemento se puede determinar el tiempo de espesamiento, fluido libre y pérdida de filtrado de la lechada de cemento, propiedades relacionados con el fenómeno. Todos los experimentos se desarrollaron con el objetivo final de diseñar una lechada de cemento con buenas propiedades antimigratorias, lo que tuvo lugar en tres etapas experimentales: Mezcla de agua y cemento sin aditivos, Mezcla de agua y cemento con aditivos excepto el controlador de gas y Mezcla de agua y cemento con todos los aditivos necesarios.

3.1. Determinación de las Propiedades reológicas (en frío y en caliente) a la lechada de cemento.

Experimento # 1: En este experimento Inicialmente se pensó mezclar solo cemento y agua, pero previendo el fragüe de la lechada antes de concluir el experimento, lo cual provocaría el fallo de la prueba y la destrucción de los equipos utilizados, se decidió añadir un poco de retardador (D013).

En la tabla 3.1 se muestran los productos utilizados en la prueba y sus correspondientes pesos.

Tabla 3.1: Peso de los productos a mezclar.

Producto	Peso (g)
Cemento	786.04
Agua	351.99
D013	1.97

En primer lugar se mezcla el retardador con el agua durante 60 segundos y luego se va añadiendo el cemento y se da un tiempo de mezclado de 35 segundos.

Propiedades reológicas en frío:

Lecturas:

300 – 53

200 – entre 23 y 28 (se determina el promedio)

100 - entre 19 y 23 (se determina el promedio)

6 – 11

3 – 9.5

$$V_p = (L_{300} - L_{100}) * 1.5$$

$$V_p = 48 \text{ cps}$$

$$T_y = L_{300} - V_p$$

$$T_y = 51 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Realizando los cálculos en un software especializado los valores obtenidos son:

$$V_p = 43.13 \text{ cps}$$

$$T_y = 6.41 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Propiedades reológicas en caliente:

Lecturas:

300 – 97

200 – entre 85 y 83 (se determina el promedio)

100 - entre 68 y 65 (se determina el promedio)

6 – entre 20 y 18 (se determina el promedio)

3 – 17

$$V_p = (L_{300} - L_{100}) * 1.5$$

$$V_p = 45.75 \text{ cps}$$

$$T_y = L_{300} - V_p$$

$$T_y = 51.25 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Realizando los cálculos en un software especializado los valores obtenidos son:

$$V_p = 45 \text{ cps}$$

$$T_y = 52.04 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Experimento # 2: El objetivo de esta prueba radica en determinar las propiedades a una lechada de cemento que además de tener cemento y agua también tiene una serie de aditivos cuyas funciones hacen que la misma obtenga las propiedades para la obtención de excelentes resultados.

Tabla 3.2: Aditivos añadidos a la mezcla de agua y cemento:

Código	Función
D047	Antiespumante
D153	Antisedimentante y Controlador de Fluido libre
D167	Controlador de filtrado
D065	Dispersante
D013	Retardador

En la tabla 3.3 se exponen los productos utilizados en la prueba y sus correspondientes pesos.

Tabla 3.3: Peso de los productos a mezclar.

Producto	Peso (g)
Cemento	782.426
Agua	347.01
D047	0.78
D153	1.17
D167	3.13
D065	3.13
D013	2.35

Inicialmente se mezclan los aditivos líquidos con el agua, luego se va añadiendo el cemento y los aditivos sólidos, que previamente fueron mezclados en una bolsa de nylon, se da un tiempo de mezclado de 35 segundos.

Propiedades reológicas en frío:

Lecturas:

300 – 157

200 – entre 132 y 130 (se determina el promedio)

100 - entre 78 y 82 (se determina el promedio)

6 – entre 35 y 32 (se determina el promedio)

3 – entre 30 y 32 (se determina el promedio)

$$V_p = (L_{300} - L_{100}) * 1.5$$

$$V_p = 142.5 \text{ cps}$$

$$T_y = L_{300} - V_p$$

$$T_y = 32.5 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Realizando los cálculos en un software especializado los valores obtenidos son:

$$V_p = 145.8 \text{ cps}$$

$$T_y = 31.22 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Propiedades reológicas en caliente:

Lecturas:

300 – 241

200 – entre 172 y 175 (se determina el promedio)

100 - entre 116 y 110 (se determina el promedio)

6 – entre 20 y 18 (se determina el promedio)

3 – entre 16 y 14 (se determina el promedio)

$$V_p = (L_{300} - L_{100}) * 1.5$$

$$V_p = 192 \text{ cps}$$

$$T_y = L_{300} - V_p$$

$$T_y = 49 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Realizando los cálculos en un software especializado los valores obtenidos son:

$$V_p = 191.38\text{cps}$$

$$T_y = 49.95\text{lf}/100\text{ft}^2$$

Experimento # 3: Con este experimento se logra determinar las propiedades de una lechada de cemento que además de tener los aditivos utilizados en el experimento # 2, también se le añade un aditivo encargado del control del gas, con el objetivo de ir diseñando una lechada de cemento con las condiciones óptimas para la obtención de excelentes resultados enfatizando en minimizar el fenómeno de la migración de gas en pozos horizontales de petróleo.

Tabla 3.4: Aditivos añadidos a la mezcla de agua y cemento:

Código	Función
D047	Antiespumante
D153	Antisedimentante y Controlador de Fluido libre
D167	Controlador de filtrado
D065	Dispersante
D013	Retardador
D500	Controlador de gas

En la tabla 3.5 se exponen los productos utilizados en la prueba y sus correspondientes pesos.

Tabla 3.5: Peso de los productos a mezclar.

Producto	Peso (g)
Cemento	782.248
Agua	316.37
D047	0.78
D153	1.17
D167	2.35

D065	3.13
D013	2.35
D500	31.60

La variación en el peso del D167 con respecto a la prueba anterior está dada porque en este experimento se añade D500 que es un aditivo encargado en el control del gas pero a su vez repercute en el control del filtrado.

Inicialmente se mezclan los aditivos con el cemento y el agua siguiendo la misma metodología anteriormente utilizada.

Propiedades reológicas en frío:

Lecturas:

300 – 186

200 – entre 133 y 131 (se determina el promedio)

100 - entre 87 y 82 (se determina el promedio)

6 – entre 30 y 28 (se determina el promedio)

3 – entre 28 y 27 (se determina el promedio)

$$V_p = (L_{300} - L_{100}) * 1.5$$

$$V_p = 152.25 \text{ cps}$$

$$T_y = L_{300} - V_p$$

$$T_y = 33.75 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Realizando los cálculos en un software especializado los valores obtenidos son:

$$V_p = 152.59\text{cps}$$

$$T_y = 32.34 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Propiedades reológicas en caliente:

Lecturas:

300 – 185

200 – entre 130 y 128(se determina el promedio)

100 - entre 84 y 82 (se determina el promedio)

6 – 12

3 – 8

$$V_p = (L_{300} - L_{100}) * 1.5$$

$$V_p = 148.5 \text{ cps}$$

$$T_y = L_{300} - V_p$$

$$T_y = 36.5 \text{ lf}/100\text{ft}^2$$

Realizando los cálculos en un software especializado los valores obtenidos son:

$$V_p = 153.4\text{cps}$$

$$T_y = 30.34\text{lf}/100\text{ft}^2$$

3.2. Determinación del tiempo de espesamiento de la lechada de cemento.

Con el objetivo de simular la presión de la lechada de cemento en el fondo del pozo y el tiempo de espesamiento de la misma, la lechada de cemento se introduce en un Consistómetro Presurizado. (Figura 3.1)

El tiempo de espesamiento es el tiempo que demora la lechada de cemento en comenzar a endurecerse una vez que comienza a ser bombeada, un valor correcto debe estar entre valores de 3 a 4 horas.

A este equipo se le introducen los valores de temperatura y presión iniciales y finales. (Tabla 3.6)

Tabla 3.6: Valores iniciales y finales de temperatura y presión.

	Valores iniciales	Valores finales
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	27	53
Presión (Mpa)	5	3

Finalmente el equipo brinda una tabla y un gráfico donde se observa el tiempo de espesamiento de la lechada de cemento.



Figura 3.1: Consistómetro Presurizado

Como resultado de esta prueba se muestran dos gráficos con el objetivo de exponer el estilo del gráfico que da el equipo y desarrollarlo en el software Excel para visualizar con más exactitud el resultado obtenido.

Los valores en forma de tabla se pueden ver en los anexos correspondientes.

Experimento # 1: El tiempo de espesamiento de la lechada de cemento es de aproximadamente tres horas y ocho minutos, el cual se encuentra en el rango establecido aunque bien cercano a los límites del mismo. (Anexo 8)

Gráfico 3.1: Gráfico brindado por el equipo

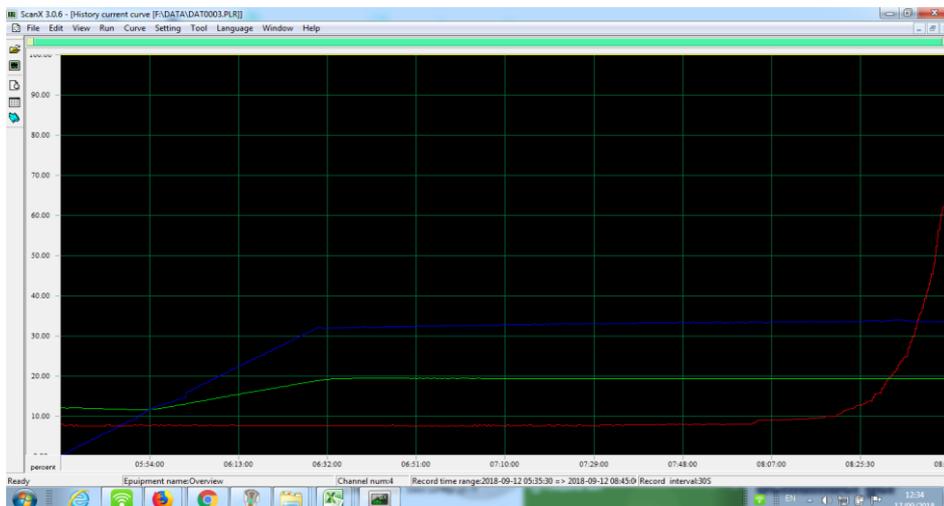
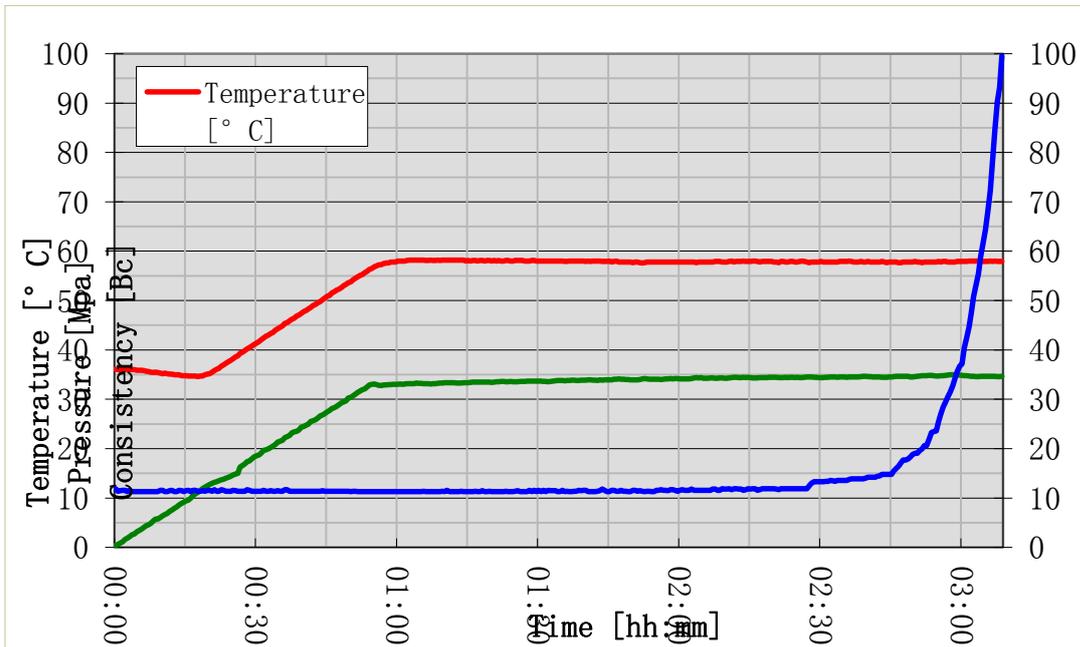


Gráfico 3.2: Gráfico elaborado en el software Excel con los valores brindados por el equipo.



Experimento # 2: El tiempo de espesamiento de la lechada de cemento es de aproximadamente tres horas y quince minutos, el cual se encuentra en el rango establecido. (Anexo 9)

Gráfico 3.3: Gráfico brindado por el equipo

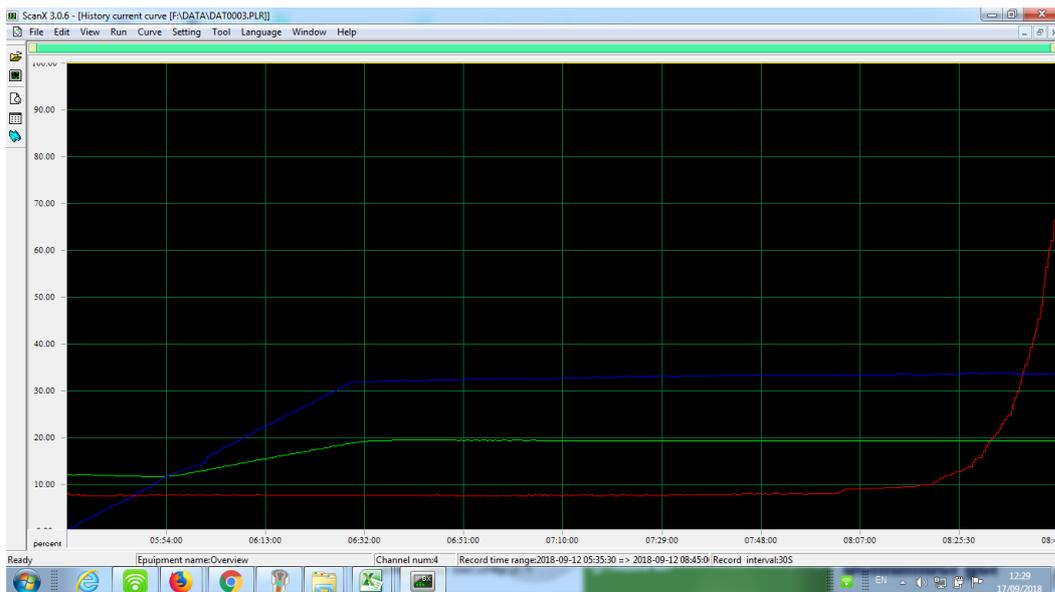
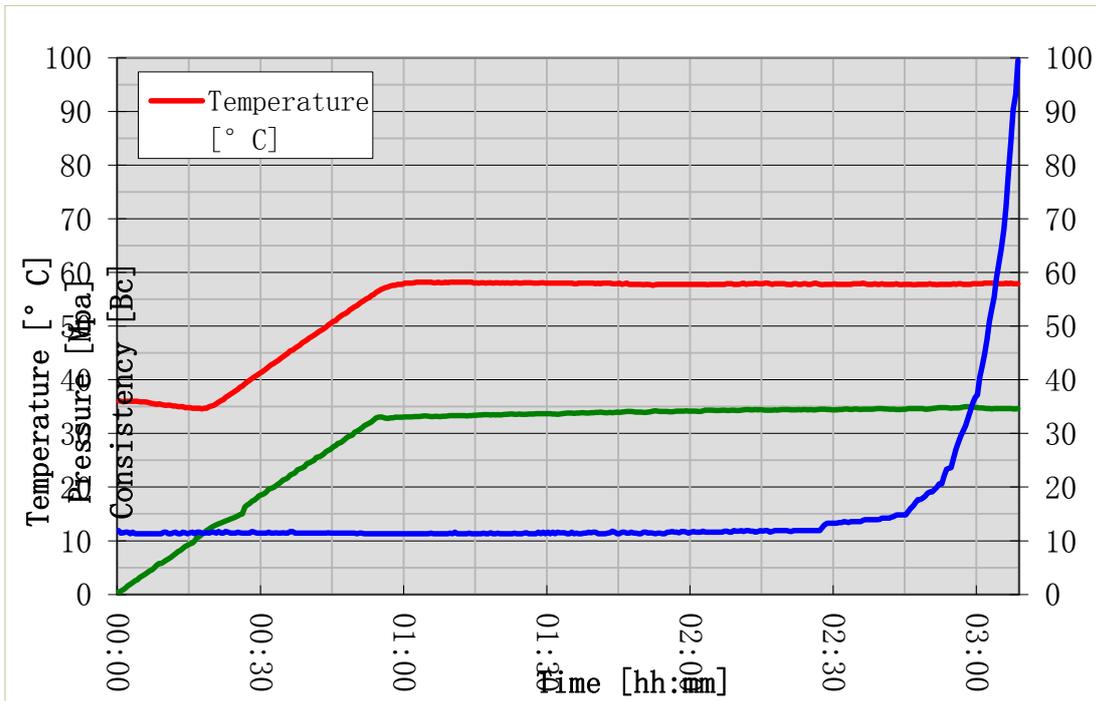


Gráfico 3.4: Gráfico elaborado en el software Excel con los valores brindados por el equipo.



Experimento # 3: Se obtuvo que el tiempo de espesamiento de la lechada de cemento es de aproximadamente tres horas con treinta y dos minutos, el cual se encuentra en el rango establecido. (Anexo 10)

Gráfico 3.5: Gráfico brindado por el equipo

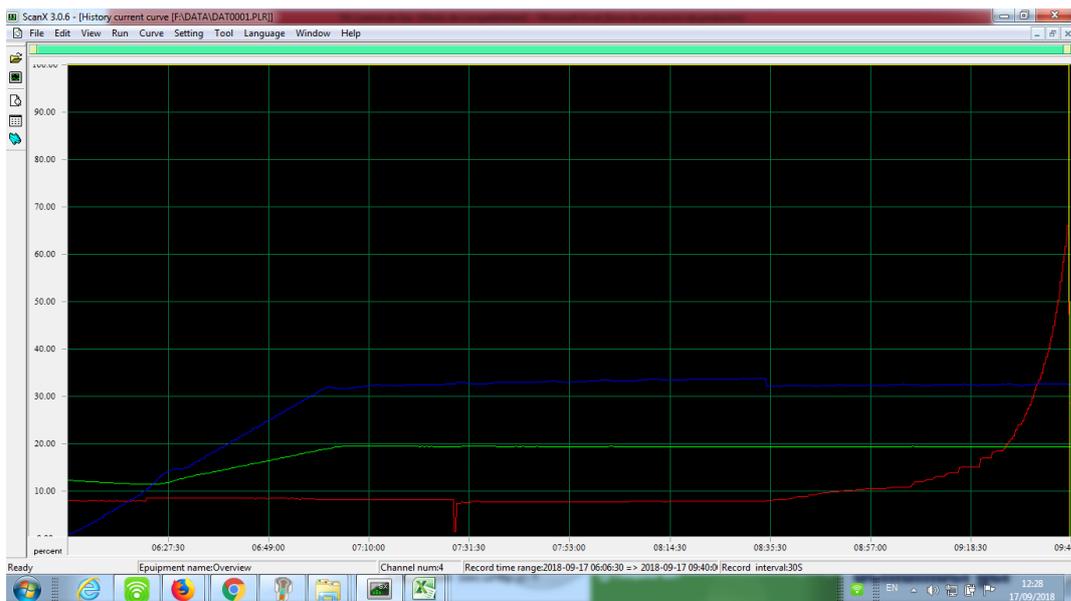
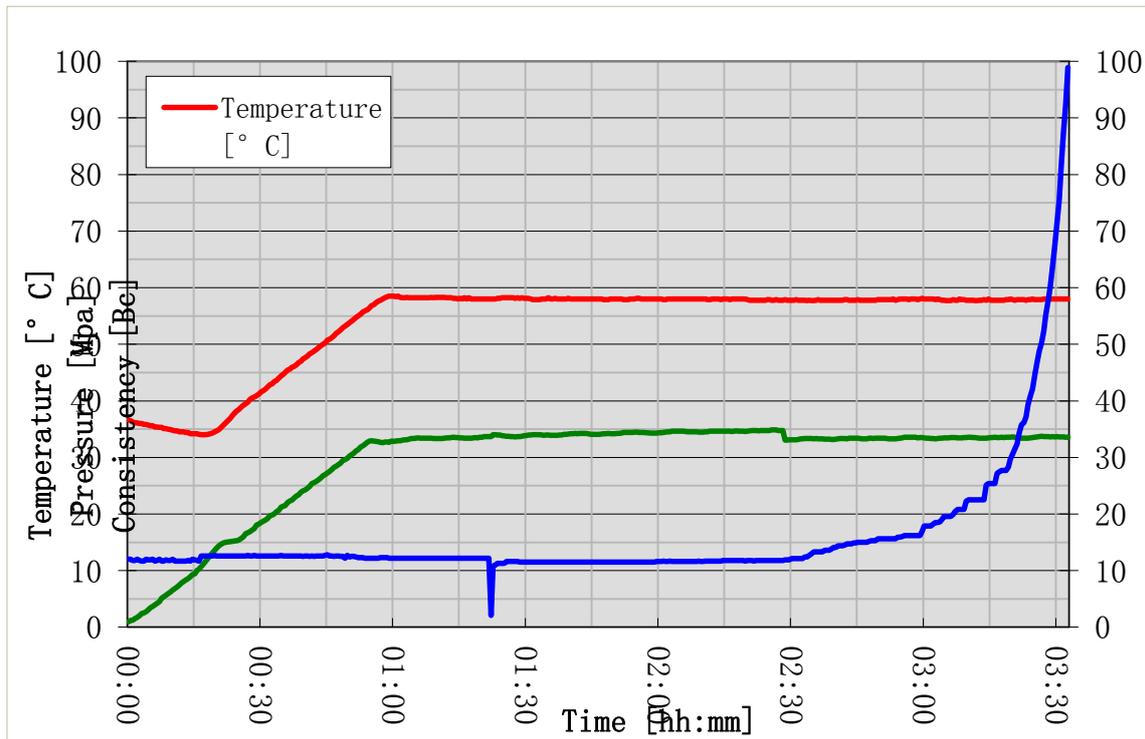


Gráfico 3.6: Gráfico elaborado en el software Excel con los valores brindados por el equipo.



3.3. Determinación de la pérdida de filtrado de la lechada de cemento.

Para el desarrollo de esta prueba se utiliza la lechada de cemento con la temperatura a la que estará sometida en el fondo del pozo (luego de pasada por el Consistómetro Atmosférico).

La prueba se realiza en un equipo llamado Celda de Pérdida de Filtrado HTHP (Fig. 3.6), en el que se suministra nitrógeno hasta alcanzar 1000 psi de presión y así medir la cantidad de agua perdida en función del tiempo.

Para realizar la prueba se sigue el procedimiento según lo establecido por la norma API y para el cálculo se utiliza la ecuación siguiente:

$$Q30 = \frac{\sqrt{30} \cdot mL \cdot 2}{\sqrt{t}}$$

Según lo normado Q30 debe ser menor que 100 mL API.

El valor de Q30 se expresa en mL API cuando es en 30 minutos, si el tiempo es menor Q30 se expresa en mL API calculado.



Figura 3.2: Celda de Pérdida de Filtrado HTHP

Experimento # 1: Se obtuvo como resultado la pérdida de 125 mL calculado en 1.01 minutos, arrojando como resultado $Q_{30} = 1363.85$ mL API calculado por lo que el valor obtenido no cumple con lo establecido.

Experimento # 2: Se perdieron 35 mL en 30 minutos, por lo que $Q_{30} = 70$ mL API, esta lechada de cemento tiene las propiedades adecuadas para su utilización dado a que el valor de Q_{30} es menor que 100 mL API, aunque se acerca bastante al límite establecido.

Experimento # 3: Se obtuvo como resultado la pérdida de 18 mL en 30 minutos, dando como resultado $Q_{30} = 36$ mL API esta lechada de cemento tiene las propiedades excelentes para su utilización en cuanto a la pérdida de filtrado, dado a que el valor de Q_{30} es mucho menor que 100mL API.

3.4. Determinación del fluido libre presente en la lechada de cemento.

Luego de simular la temperatura en el Consistómetro Atmosférico se vierte la lechada de cemento en una probeta de 250 mL, se le da a la misma una inclinación de 45° y se deja en reposo durante dos horas (Fig. 3.3).

Con esta prueba se tiene una idea de la cantidad de agua libre que tiene la lechada, la cual puede crear un canal por el que el gas puede migrar fácilmente.

Esta prueba logra tener resultados satisfactorios cuando el porcentaje de agua libre en la lechada de cemento es cero o lo más cercano a cero posible.



Figura 3.3: Inclinación de la probeta con la lechada a 45°

La metodología utilizada para la determinación de este parámetro es según la norma API. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$\% \text{agua} = \frac{V_{\text{agua}} \cdot 100}{V_{\text{lechada}}}$$

Experimento # 1: La prueba comenzó a las 11:20 am, debido a que la lechada de cemento utilizada en este experimento no contiene aditivos que reduzcan el agua libre presente en la misma, se le tomaron fotos cada 30 minutos para observar claramente la presencia de la misma. (Anexos 11, 12, 13 y 14)

En las figuras 3.4 y 3.5 se observa el canal que dejó el agua por el cual el gas puede migrar con facilidad.

En este experimento se obtuvo 1.4% de agua libre, es un valor bajo pero fuera mejor un valor más cercano a cero.



Figura 3.4: Vista superior de la probeta después de extraída el agua libre



Figura 3.5: Vista frontal de la probeta después de extraída el agua libre

Experimento # 2: Se encontraron solo trazas de agua presente en la lechada de cemento por lo que el porcentaje de agua libre es aproximadamente cero, siendo este un resultado muy favorable, esto se debe a que la lechada de cemento utilizada en este experimento contiene un aditivo encargado de controlar el fluido libre. (Ver figura 3.6 y 3.7)

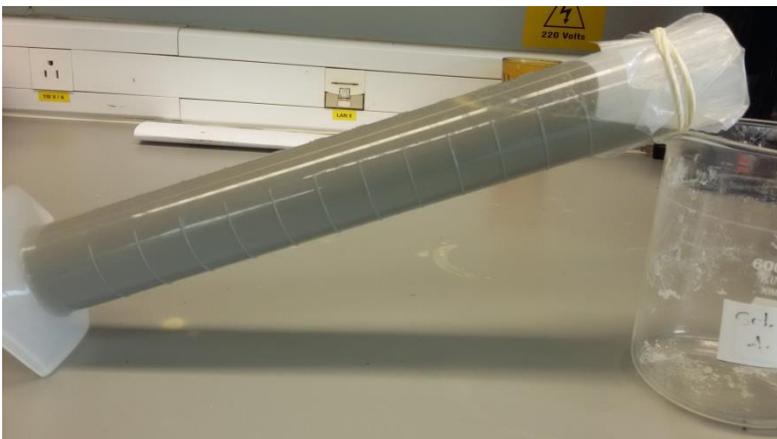


Figura 3.6: Vista superior de la probeta después de concluida la prueba

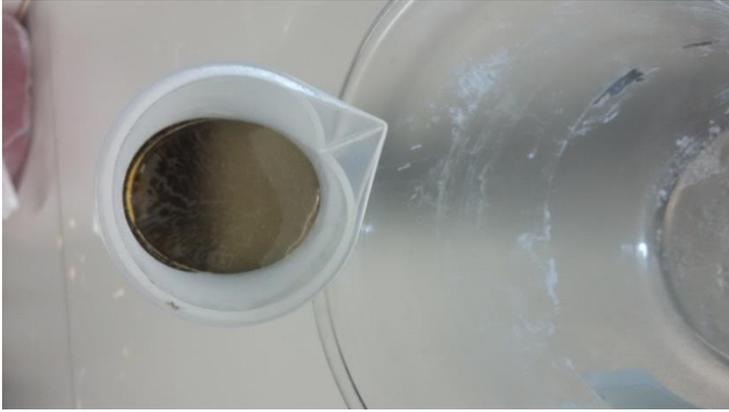


Figura 3.7: Vista frontal de la probeta después de concluida la prueba

Experimento # 3: De igual forma que en el experimento anterior se encontraron solo trazas de agua presente en la lechada de cemento por lo que el porcentaje de agua libre es aproximadamente cero, siendo este un resultado muy favorable, esto se debe a que también la lechada de cemento utilizada en este experimento contiene un aditivo encargado de controlar el fluido libre. (Ver figura 3.8 y 3.9)



Figura 3.8: Vista superior de la probeta después de concluida la prueba



Figura 3.9: Vista frontal de la probeta después de concluida la prueba

3.5. Conclusiones parciales.

1. Para el diseño de la lechada de cemento y la determinación de los valores de pérdida de fluido, presencia de agua libre y tiempo de espesamiento, es de gran importancia obtener de las propiedades reológicas en frío y en caliente de la lechada de cemento.
2. En los tres experimentos realizados se obtuvo un valor del tiempo de espesamiento en el rango normado que es de 3 a 4 horas, siendo en el experimento # 1 de 3 horas y 8 minutos, en el experimento # 2 de 3 horas y 15 minutos y en el experimento # 3 de 3 horas y 32 minutos, siendo este último el mejor resultado, al encontrarse en la media de los valores establecidos.
3. Para la determinación de la pérdida de filtrado, el valor obtenido de Q30 debe ser menor a 100 API, solo se cumple esta condición en los experimentos 2 y 3, con valores de 70 y 36 mL API respectivamente, siendo el tercer experimento el de mejor resultado al obtener el valor más pequeño.
4. La presencia de fluido libre en la lechada de cemento debe ser lo más cercana a cero posible debido a que el agua puede crear un canal por el que el gas puede migrar fácilmente, en el experimento # 1 se obtuvo 1.4% de agua libre, pero en los dos posteriores experimentos solo se observaron trazas de agua, lo cual es un resultado muy favorable.

Conclusiones

1. El uso de un aditivo encargado del control del gas en la lechada permite erradicar los problemas de hermeticidad que presentan los pozos horizontales.
2. En la determinación del tiempo de espesamiento se obtuvieron valores de 3 horas y 8 minutos, 3 horas y 15 minutos y 3 horas y 32 minutos, en los experimentos 1, 2 y 3 respectivamente siendo este último el mejor resultado, al encontrarse en la media de los valores establecidos.
3. Los valores obtenidos en la determinación de la pérdida de filtrado en los experimentos 1, 2 y 3 fueron de 125 mL, 70 mL y 36 mL respectivamente, siendo el último el de mejor resultado a obtener el menor valor según lo establecido por la norma.
4. Según lo normado la presencia de fluido libre en la lechada de cemento debe ser lo más cercana a cero posible debido a que el agua puede crear un canal por el que el gas puede migrar fácilmente, en el experimento # 1 se obtuvo 1.4% de agua libre, pero en los dos posteriores experimentos solo se observaron trazas de agua, lo cual es un resultado muy favorable.
5. De los tres experimentos realizados, el experimento # 3 es el diseño correcto de la lechada de cemento ya que en todas la pruebas realizadas los resultados fueron favorables y están en correspondencia con la norma, debido a la utilización de las proporciones adecuadas de los aditivos que actúan directamente en las propiedades de la lechada.

Bibliografía

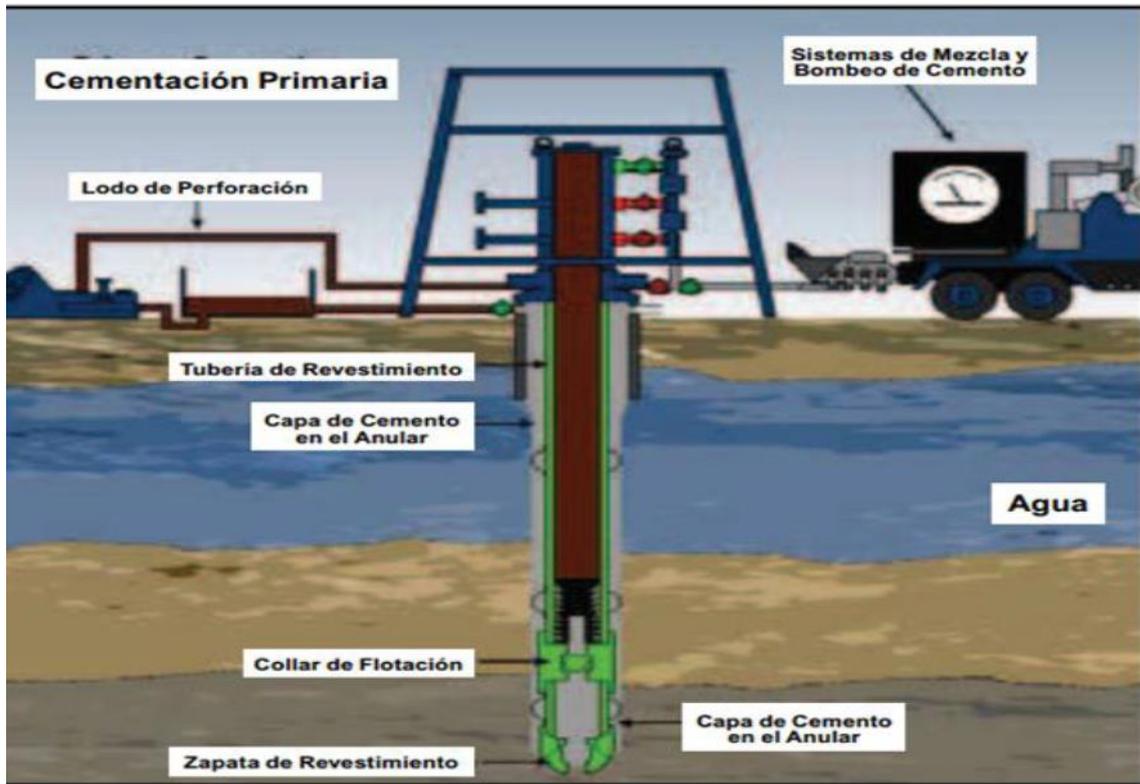
1. API RP 10B-2 Recommended Practice for Testing Well Cements_Abril 2013
2. API Spec 10A_Specification For Cements and Materials for Well Cementing
3. Apolinario Del Pezo, Henry Fabricio and Lucas Del Pezo, Fabricio Omar, (2014). "Cementación primaria en el pozo APOL 62F" Ubicado en el Campo Apolo del Oriente Ecuatoriano". Tesis presentada Previo a la obtención del Título de Tecnólogo en petróleo. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Guayaquil – Ecuador.
4. Beirute, R and Cheung, P. (1990). *A method for selection of cement recipes to control fluid invasion after cementing.*
5. Bourgoyne A, Scott y Manowski W. (2000). "Review of Sustained Casing Pressure Occurring on the OCS",
6. Chandler. (2001). "Manual del Free Migration Analyzer (FMA)". Tulsa.
7. Clark, C. R. and Carter, L. G. (1973). "Mud displacement with cement slurries". *Journal of Petroleum technology.*
8. Colectivo de autores. (2004). "Del lodo al cemento: Construcción de pozos de gas.
9. Cruz R. Francisco Antonio (2017). "Cementación de tuberías de revestimiento riserless con aplicación de técnicas inner string en proyectos de aguas profundas". Tesis presentada para obtener el título de ingeniero petrolero. México
10. Dreck, P and Parcevaux, P. (1988). *A single technique solves gas migration problems across a wide of condition.*
11. DWIGHT, S. (1990). Cementing. USA.
12. Economides, M, Watter, I and Dunn-Norman, S. (1988). *Petroleum well construction.* Inglaterra.
13. García, José J. (2003). Informe sobre la migración de gas. PDVSA-INTEVEP CEMENTACION.
14. Goodwin, K.J., and Crook, R.J. (1992). *Cement Sheath Stress Failure. SPE Drilling Engineering* 7, No. 4, 291–296; also presented as paper SPE 20453 at

- the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA.
15. Guyvoronsky, A.A. and Farukshin, L.K. (1963). *Hydrostatic Pressure of Cement Slurry*. p. 30–32. Russian.
 16. Haut, R. C. and R. J. Crook. *Primary Cementing: the mud removal*.
 17. Jackson, P.B., and Murphey, C.E. (1993). *Effect of Casing Pressure on Gas Flow Through a Sheath of Set Cement. Paper SPE 25698 presented at the 1993 SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, The Netherlands*.
 18. Managuero, Diana y Márquez, Liván (2006). “Migración de gas durante la cementación de pozos de petróleo“. Tesis presentada para obtener el título de especialista en Perforación de pozos de petróleo. Matanzas, Cuba.
 19. Marrast, J. (1975). *Well Cementing Process*. U.S.
 20. Mavliútov (1986). Tecnología de perforación de pozos profundos. URSS: Editorial Mir. Moscú.
 21. Moon, Jeff and Wang, Steven. (1999). *Acoustic Method for determining the static gel strength of slurries*.
 22. Nelson Erik B. and Dminique Guillot (2006). “*Well cementing*“. Second Edition. Texas.
 23. Ott, W.K. (1990). “*Cements and Cementing Practices*“. Curso diseñado por IHRDC, Boston.
 24. Parcevaux, P.A (1987). Gas Migration and GASBLOK Technology”, *Drilling & Pumping Journal*”.
 25. Pérez Castañeda, Miguel Angel (2013). “Apuntes y ejercicios de ingeniería de perforación“. Tesis presentada para obtener el título de ingeniero petrolero. México
 26. Prohaska, M. (1994). *Modeling early-time gas migration through cement slurries*.
 27. Ramos Vesco, Katia (2015). “Fabricación de cementos Portland para la cementación de pozos de petróleo en condiciones de laboratorio“. Trabajo de Diploma. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.
 28. Rodríguez, C. (2001). “Evaluación de la compresibilidad y erosionabilidad de revoques de fluidos de perforación previa a la cementación“. Trabajo Especial de Grado Presentado ante la UCV para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad de Caracas-Venezuela.

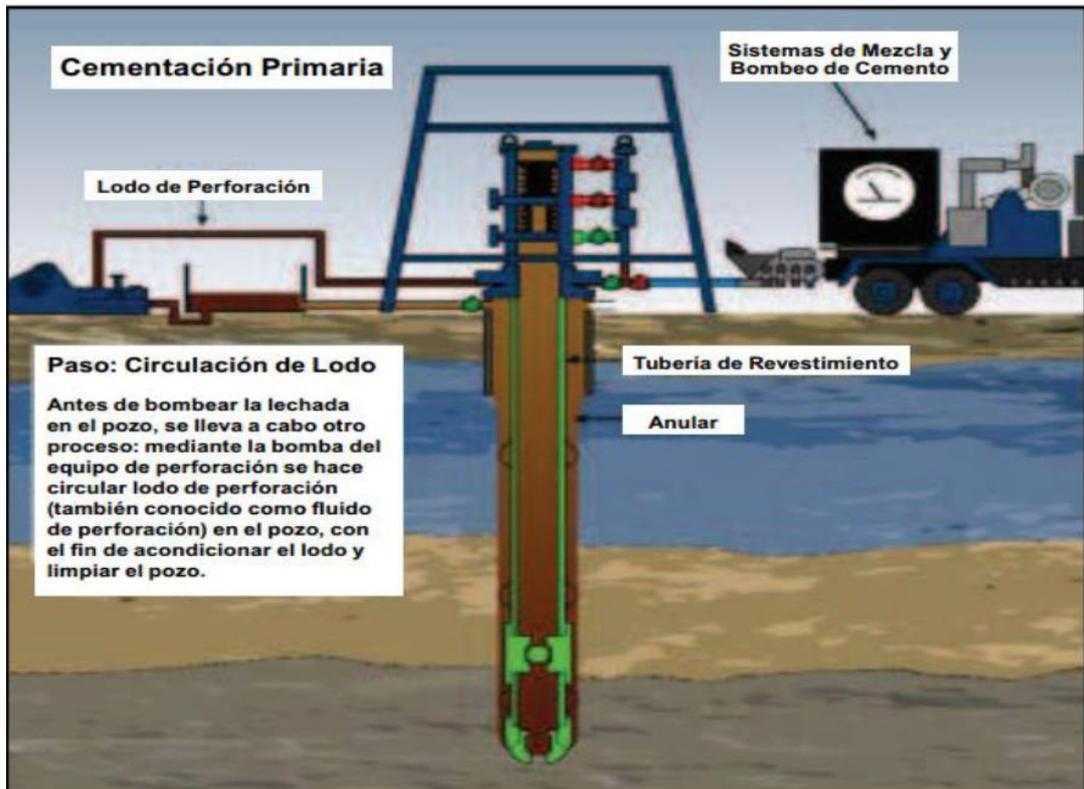
29. Schlumberger (2011). Pozos de alcance extendido. Texas.
30. Smith, Dwight (1990). *Cementing. Monographs*. Volume 4. USA: Segunda edición.
31. Smith, T. R., Ravi, K. M. (1991). "Investigation of drilling fluid properties to maximize cement displacement efficiency".
32. SONS, J. W. (1988), *Petroleum well construction*. Inglaterra
33. Wojtanowicz AK y Zhou D, (2000). "New Model of Pressure Reduction to Annulus During Primary Cementing". Artículo presentado en la Conferencia de Perforación de la IADC/SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EUA, 23 al 25 de febrero de 2000

Anexos

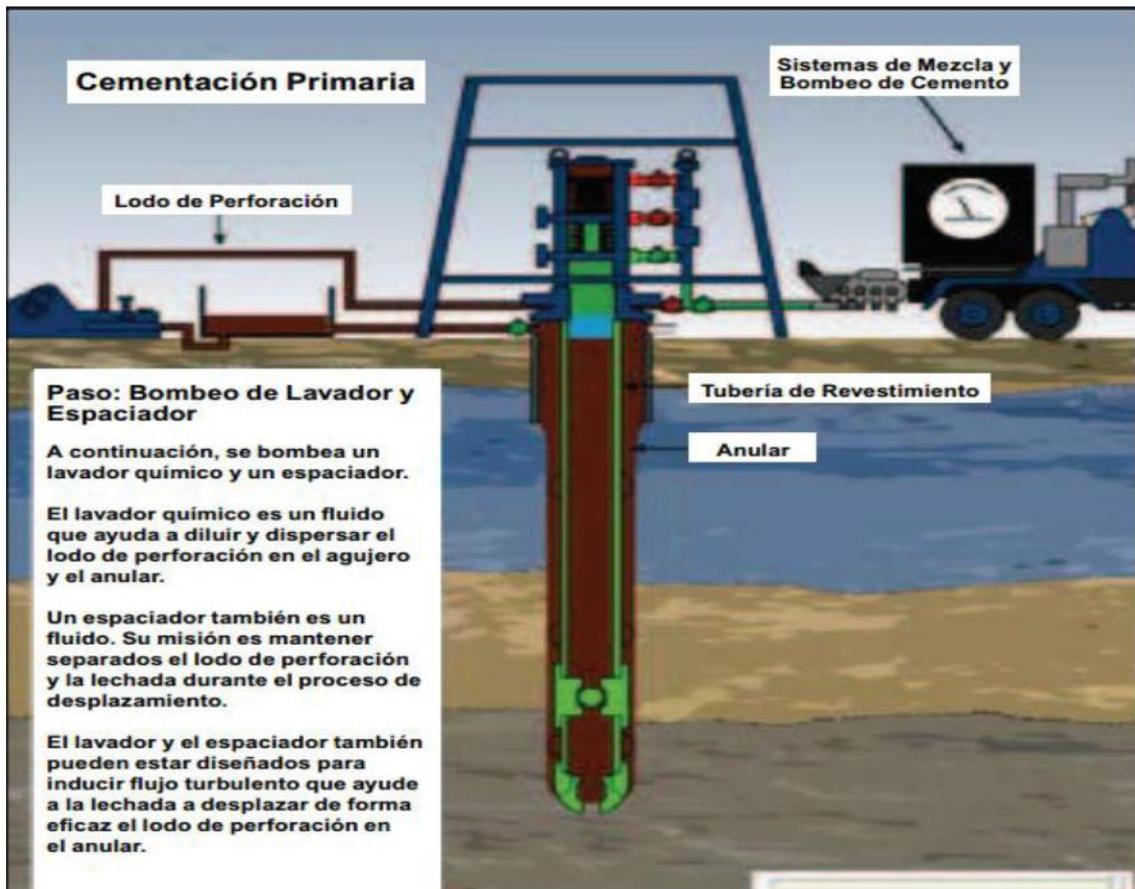
Anexo 1: Aislamiento zonal



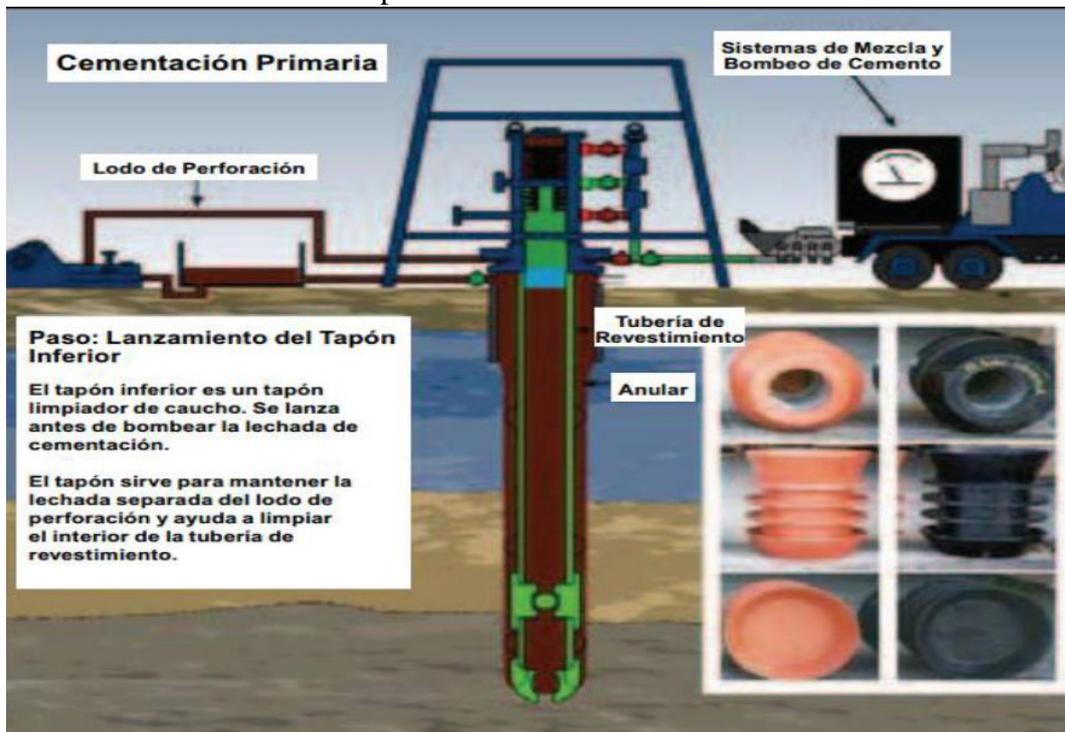
Anexo 2: Circulación del lodo.



Anexo 3: Bombeo del espaciador y el lavador.



Anexo 4: Lanzamiento del tapón inferior.



Anexo 5: Bombeo de la lechada inicial.

Cementación Primaria

Sistemas de Mezcla y Bombeo de Cemento

Lodo de Perforación

Paso: Bombeo de la Lechada Inicial

Una vez que la lechada se ha mezclado (con la densidad correcta), se bombea desde la unidad de cementación hasta la tubería de revestimiento a través de la cabeza de cementación y luego se desplaza al anular. Cuando la mezcla se realiza en continuo, el mezclado puede continuar al mismo tiempo que el bombeo, según los requisitos del trabajo. La cabeza de cementación es un contenedor montado en la tubería de revestimiento. Está unida a la unidad de cementación y sirve para inyectar los fluidos y tapones según una secuencia predeterminada.

La lechada empuja el lavador, el espaciador y el tapón inferior hacia el interior de la tubería de revestimiento. Cuando el tapón inferior llega al collar de flotación, el diafragma del tapón estalla y el lavador, el espaciador y la lechada continúan hacia la zapata de revestimiento.

Hay dos tipos de lechada: la lechada inicial y la lechada de cola. La lechada inicial tiene una densidad baja y sirve para cubrir la sección superior del anular.

Tubería de Revestimiento

Anular

Collar de Flotación

Zapata de Revestimiento

PULSE EL BOTÓN DE REPRODUCCIÓN PARA INICIAR LA ANIMACIÓN

Anexo 6: Bombeo de la lechada de cola.

Cementación Primaria

Sistemas de Mezcla y Bombeo de Cemento

Lodo de Perforación

Paso: Bombeo de la Lechada de Cola

Hay dos tipos de lechada: la lechada inicial y la lechada de cola. La lechada de cola tiene mayor densidad y cubre la zapata.

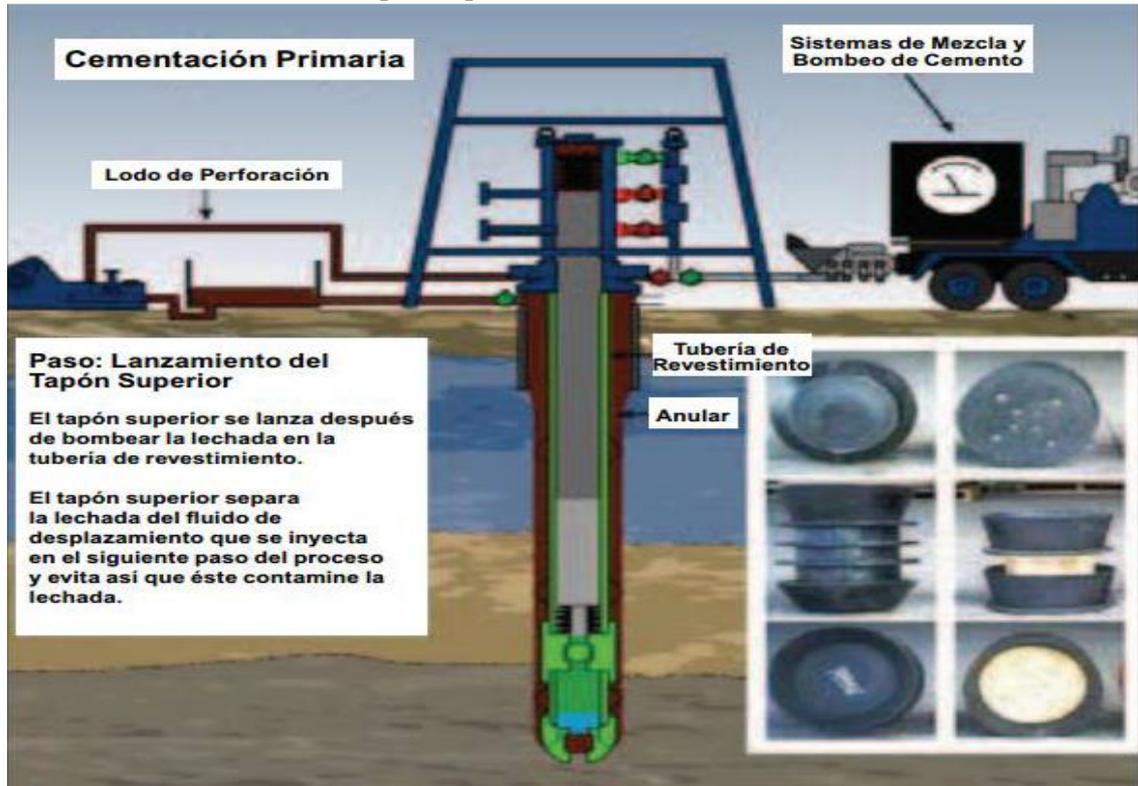
Tubería de Revestimiento

Anular

Collar de Flotación

Zapata de Revestimiento

Anexo 7: Lanzamiento del tapón superior.



Anexo 8: Tabla de resultados del tiempo de espesamiento del experimento # 1.

Tiempo [hh:mm]	Consistencia [Bc]	Temperatura [°C]	Presión [Mpa]
0:00:00	11,9	36,1	0,455078
0:00:30	11,4	36	0,606771
0:01:00	11,5	35,9	0,875681
0:01:30	11,6	36	1,172171
0:02:00	11,6	36	1,599669
0:02:30	11,3	36	1,889264
0:03:00	11,6	36	2,199545
0:03:30	11,3	36	2,558091
0:04:00	11,3	36	2,73047
0:04:30	11,3	35,9	3,185548
0:05:00	11,3	35,9	3,447563
0:05:30	11,3	35,9	3,681997
0:06:00	11,3	35,8	4,068124
0:06:30	11,3	35,7	4,364614
0:07:00	11,3	35,6	4,585258
0:07:30	11,3	35,5	4,916224
0:08:00	11,3	35,4	5,391988
0:08:30	11,3	35,5	5,750534
0:09:00	11,3	35,4	5,778115

0:09:30	11,6	35,3	6,047025
0:10:00	11,6	35,2	6,377991
0:10:30	11,3	35,3	6,626215
0:11:00	11,3	35,2	6,922706
0:11:30	11,5	35,1	7,281252
0:12:00	11,6	35,1	7,591533
0:12:30	11,3	35	7,950079
0:13:00	11,3	35	8,198304
0:13:30	11,6	35	8,598221
0:14:00	11,5	34,8	8,915397
0:14:30	11,3	34,8	9,184307
0:15:00	11,5	34,8	9,432531
0:15:30	11,6	34,7	9,584224
0:16:00	11,3	34,7	10,01862
0:16:30	11,6	34,7	10,52196
0:17:00	11,6	34,7	10,83224
0:17:30	11,4	34,6	11,19079
0:18:00	11,4	34,7	11,53554
0:18:30	11,5	34,7	11,8872
0:19:00	11,4	35	12,20437
0:19:30	11,6	35,1	12,48018
0:20:00	11,6	35,2	12,76288
0:20:30	11,4	35,5	12,96284
0:21:00	11,7	35,8	13,1559
0:21:30	11,4	36,1	13,32828
0:22:00	11,4	36,3	13,50755
0:22:30	11,7	36,7	13,68682
0:23:00	11,6	37	13,83852
0:23:30	11,4	37,3	14,02468
0:24:00	11,4	37,6	14,19706
0:24:30	11,4	37,9	14,4246
0:25:00	11,6	38,2	14,65214
0:25:30	11,5	38,6	14,8521
0:26:00	11,4	38,8	15,02448
0:26:30	11,4	39,3	16,28629
0:27:00	11,4	39,6	16,64483
0:27:30	11,4	39,9	16,9689
0:28:00	11,7	40,2	17,36193
0:28:30	11,6	40,5	17,54809
0:29:00	11,4	40,8	17,95491
0:29:30	11,4	41,1	18,37551
0:30:00	11,4	41,4	18,57547
0:30:30	11,4	41,7	18,76164
0:31:00	11,4	42,1	19,12018
0:31:30	11,6	42,4	19,63042
0:32:00	11,4	42,8	19,76832
0:32:30	11,4	43	19,96139
0:33:00	11,5	43,3	20,20961

0:33:30	11,4	43,6	20,56816
0:34:00	11,4	44	20,91291
0:34:30	11,5	44,3	21,31973
0:35:00	11,4	44,6	21,5059
0:35:30	11,4	44,9	21,72654
0:36:00	11,7	45,4	22,27125
0:36:30	11,7	45,5	22,42295
0:37:00	11,4	45,9	22,66428
0:37:30	11,4	46,2	23,18831
0:38:00	11,4	46,4	23,37447
0:38:30	11,4	46,9	23,54685
0:39:00	11,4	47,1	23,78129
0:39:30	11,4	47,4	24,37427
0:40:00	11,4	47,8	24,53286
0:40:30	11,4	48	24,76039
0:41:00	11,4	48,3	24,98104
0:41:30	11,4	48,6	25,52575
0:42:00	11,4	49	25,66366
0:42:30	11,4	49,2	25,85672
0:43:00	11,4	49,5	26,19458
0:43:30	11,4	49,8	26,62897
0:44:00	11,5	50,2	26,84962
0:44:30	11,4	50,5	27,07026
0:45:00	11,4	50,9	27,50465
0:45:30	11,4	51	27,73909
0:46:00	11,4	51,5	28,13211
0:46:30	11,4	51,8	28,2907
0:47:00	11,4	52,1	28,59408
0:47:30	11,4	52,3	28,90436
0:48:00	11,4	52,6	29,31118
0:48:30	11,4	53	29,51114
0:49:00	11,4	53,3	29,68351
0:49:30	11,4	53,6	30,23512
0:50:00	11,3	53,8	30,4075
0:50:30	11,4	54,2	30,71089
0:51:00	11,4	54,5	31,02117
0:51:30	11,3	54,8	31,44867
0:52:00	11,3	55,1	31,64862
0:52:30	11,3	55,3	31,91064
0:53:00	11,3	55,7	32,15197
0:53:30	11,3	55,9	32,50362
0:54:00	11,3	56,3	32,91043
0:54:30	11,3	56,5	33,05523
0:55:00	11,3	56,8	33,0966
0:55:30	11,3	57	32,94491
0:56:00	11,3	57,2	32,86217
0:56:30	11,3	57,3	32,79322
0:57:00	11,3	57,5	32,89664

0:57:30	11,3	57,6	32,91043
0:58:00	11,3	57,6	33,00007
0:58:30	11,3	57,8	33,00007
0:59:00	11,3	57,8	33,03454
0:59:30	11,3	57,8	33,05523
1:00:00	11,3	58	33,06902
1:00:30	11,3	58	33,11039
1:01:00	11,3	58	33,06902
1:01:30	11,3	58	33,11039
1:02:00	11,3	58,1	33,14487
1:02:30	11,3	58,2	33,14487
1:03:00	11,3	58,2	33,15866
1:03:30	11,3	58,2	33,19313
1:04:00	11,3	58,2	33,26898
1:04:30	11,3	58,2	33,25519
1:05:00	11,3	58,2	33,20692
1:05:30	11,4	58,2	33,14487
1:06:00	11,3	58,1	33,15866
1:06:30	11,3	58,1	33,17934
1:07:00	11,3	58,2	33,12418
1:07:30	11,3	58,1	33,15866
1:08:00	11,3	58,1	33,19313
1:08:30	11,3	58,2	33,2345
1:09:00	11,3	58,1	33,26898
1:09:30	11,4	58,2	33,30345
1:10:00	11,3	58,2	33,33793
1:10:30	11,6	58,2	33,33793
1:11:00	11,3	58,2	33,33793
1:11:30	11,3	58,2	33,35172
1:12:00	11,3	58,2	33,35172
1:12:30	11,3	58,2	33,30345
1:13:00	11,3	58,2	33,28277
1:13:30	11,4	58,2	33,30345
1:14:00	11,3	58,2	33,33793
1:14:30	11,3	58	33,39309
1:15:00	11,3	58,1	33,39309
1:15:30	11,3	58	33,44136
1:16:00	11,3	58,1	33,46204
1:16:30	11,4	58,1	33,5172
1:17:00	11,3	58	33,50341
1:17:30	11,3	58,1	33,50341
1:18:00	11,5	58,1	33,46204
1:18:30	11,3	58	33,47583
1:19:00	11,3	58,1	33,46204
1:19:30	11,4	58,1	33,47583
1:20:00	11,3	58	33,44136
1:20:30	11,3	58,1	33,50341
1:21:00	11,3	58	33,55168

1:21:30	11,3	58,1	33,57926
1:22:00	11,3	58	33,59994
1:22:30	11,3	58	33,59994
1:23:00	11,4	58,1	33,56547
1:23:30	11,3	58,1	33,57926
1:24:00	11,3	58	33,59994
1:24:30	11,3	58	33,57926
1:25:00	11,4	58,1	33,57926
1:25:30	11,5	58,1	33,55168
1:26:00	11,3	58,1	33,59994
1:26:30	11,3	58,1	33,61374
1:27:00	11,3	58	33,59994
1:27:30	11,3	58	33,6689
1:28:00	11,6	58	33,71027
1:28:30	11,3	58,1	33,68958
1:29:00	11,6	58,1	33,6689
1:29:30	11,3	58	33,6689
1:30:00	11,6	58	33,6689
1:30:30	11,3	58	33,6689
1:31:00	11,6	58	33,64132
1:31:30	11,3	58	33,64132
1:32:00	11,6	58	33,57926
1:32:30	11,5	58	33,61374
1:33:00	11,5	58	33,65511
1:33:30	11,5	58	33,72406
1:34:00	11,3	58	33,81369
1:34:30	11,3	58	33,7999
1:35:00	11,6	58	33,78611
1:35:30	11,3	57,9	33,76543
1:36:00	11,4	57,9	33,81369
1:36:30	11,3	58	33,81369
1:37:00	11,3	58	33,84817
1:37:30	11,4	58	33,84817
1:38:00	11,4	58	33,81369
1:38:30	11,6	58	33,81369
1:39:00	11,5	58	33,84817
1:39:30	11,6	58	33,88264
1:40:00	11,6	57,9	33,91023
1:40:30	11,3	58	33,93781
1:41:00	11,3	57,9	33,95849
1:41:30	11,3	58	33,91023
1:42:00	11,3	58	33,84817
1:42:30	11,4	58	33,83438
1:43:00	11,5	58	33,93781
1:43:30	11,8	57,9	33,88264
1:44:00	11,6	57,9	33,92402
1:44:30	11,3	57,9	33,95849
1:45:00	11,3	58	33,93781

1:45:30	11,6	57,8	33,97228
1:46:00	11,6	57,9	34,04813
1:46:30	11,4	58	34,09639
1:47:00	11,4	57,8	34,11018
1:47:30	11,6	57,8	34,09639
1:48:00	11,4	57,8	34,06192
1:48:30	11,4	57,8	34,00676
1:49:00	11,3	57,8	33,98607
1:49:30	11,3	57,8	33,95849
1:50:00	11,6	57,7	33,92402
1:50:30	11,6	57,8	33,93781
1:51:00	11,4	57,8	33,95849
1:51:30	11,5	57,7	34,02744
1:52:00	11,4	57,6	34,14466
1:52:30	11,3	57,7	34,19982
1:53:00	11,4	57,8	34,14466
1:53:30	11,4	57,8	34,09639
1:54:00	11,3	57,8	34,09639
1:54:30	11,3	57,8	34,09639
1:55:00	11,6	57,8	34,07571
1:55:30	11,6	57,8	34,04813
1:56:00	11,7	57,8	34,02744
1:56:30	11,6	57,8	34,07571
1:57:00	11,6	57,8	34,13087
1:57:30	11,5	57,8	34,16535
1:58:00	11,7	57,8	34,18603
1:58:30	11,7	57,8	34,14466
1:59:00	11,6	57,8	34,22051
1:59:30	11,4	57,8	34,18603
2:00:00	11,6	57,8	34,16535
2:00:30	11,7	57,8	34,16535
2:01:00	11,6	57,8	34,14466
2:01:30	11,6	57,8	34,11018
2:02:00	11,6	57,8	34,11018
2:02:30	11,8	57,8	34,22051
2:03:00	11,6	57,8	34,31014
2:03:30	11,6	57,7	34,3653
2:04:00	11,6	57,8	34,34462
2:04:30	11,6	57,8	34,3653
2:05:00	11,6	57,8	34,28946
2:05:30	11,6	57,8	34,26877
2:06:00	11,6	57,8	34,26877
2:06:30	11,6	57,8	34,32393
2:07:00	11,8	57,8	34,32393
2:07:30	11,8	57,9	34,28946
2:08:00	11,6	57,9	34,26877
2:08:30	11,6	57,9	34,34462
2:09:00	11,9	57,8	34,31014

2:09:30	11,8	57,8	34,28946
2:10:00	11,8	57,8	34,28946
2:10:30	11,9	57,9	34,34462
2:11:00	11,7	58	34,37909
2:11:30	11,9	57,8	34,43425
2:12:00	11,9	57,9	34,45494
2:12:30	11,8	57,9	34,41357
2:13:00	11,8	57,9	34,39288
2:13:30	11,6	58	34,43425
2:14:00	11,7	57,9	34,41357
2:14:30	11,9	57,9	34,45494
2:15:00	11,8	57,9	34,39288
2:15:30	11,9	58	34,31014
2:16:00	11,9	58	34,32393
2:16:30	11,6	57,9	34,32393
2:17:00	11,7	57,8	34,3653
2:17:30	11,9	57,9	34,39288
2:18:00	11,9	57,9	34,3653
2:18:30	11,9	57,9	34,37909
2:19:00	11,9	57,9	34,43425
2:19:30	11,9	57,9	34,46873
2:20:00	11,9	57,8	34,48252
2:20:30	11,8	57,8	34,45494
2:21:00	11,7	57,7	34,41357
2:21:30	11,9	57,9	34,39288
2:22:00	11,9	57,9	34,41357
2:22:30	11,9	57,8	34,43425
2:23:00	11,9	57,8	34,41357
2:23:30	11,9	57,9	34,45494
2:24:00	11,9	57,9	34,45494
2:24:30	11,9	57,8	34,39288
2:25:00	11,9	57,8	34,43425
2:25:30	11,9	57,9	34,41357
2:26:00	11,9	58	34,41357
2:26:30	11,9	57,9	34,43425
2:27:00	11,9	57,8	34,50321
2:27:30	12,5	57,7	34,517
2:28:00	13	57,8	34,50321
2:28:30	13,3	57,8	34,45494
2:29:00	13,3	57,8	34,43425
2:29:30	13,3	57,8	34,41357
2:30:00	13,3	57,9	34,41357
2:30:30	13,3	57,8	34,39288
2:31:00	13,4	57,8	34,45494
2:31:30	13,4	57,8	34,45494
2:32:00	13,6	57,8	34,50321
2:32:30	13,5	57,8	34,55147
2:33:00	13,4	57,8	34,517

2:33:30	13,6	57,8	34,48252
2:34:00	13,6	57,9	34,53768
2:34:30	13,6	57,9	34,55147
2:35:00	13,6	57,9	34,50321
2:35:30	13,6	57,9	34,46873
2:36:00	13,8	58	34,50321
2:36:30	13,9	57,9	34,50321
2:37:00	13,9	57,8	34,50321
2:37:30	13,9	57,8	34,517
2:38:00	13,9	57,8	34,53768
2:38:30	13,9	57,9	34,59284
2:39:00	13,9	57,8	34,62732
2:39:30	14	57,8	34,62732
2:40:00	14,2	57,9	34,60663
2:40:30	14,2	57,8	34,59284
2:41:00	14,2	57,8	34,55147
2:41:30	14,2	57,8	34,53768
2:42:00	14,4	57,8	34,50321
2:42:30	14,5	57,8	34,50321
2:43:00	14,8	57,9	34,48252
2:43:30	14,8	57,8	34,43425
2:44:00	14,8	57,7	34,46873
2:44:30	14,8	57,8	34,53768
2:45:00	14,8	57,8	34,53768
2:45:30	15,5	57,8	34,60663
2:46:00	16	57,8	34,64111
2:46:30	16,5	57,7	34,64111
2:47:00	17,1	57,7	34,64111
2:47:30	17,7	57,8	34,6549
2:48:00	17,7	57,8	34,64111
2:48:30	17,9	57,8	34,62732
2:49:00	18,3	57,8	34,53768
2:49:30	18,8	57,8	34,517
2:50:00	19,1	57,9	34,59284
2:50:30	19,1	57,8	34,6549
2:51:00	19,6	57,8	34,71696
2:51:30	20	57,7	34,77901
2:52:00	20,6	57,8	34,7997
2:52:30	20,6	57,8	34,81349
2:53:00	22	57,8	34,84107
2:53:30	23,3	57,8	34,84107
2:54:00	23,5	57,8	34,77901
2:54:30	23,6	57,8	34,71696
2:55:00	25,5	57,9	34,73075
2:55:30	27	57,8	34,76522
2:56:00	28,4	57,9	34,77901
2:56:30	29,5	57,9	34,84107
2:57:00	30,5	57,8	34,92381

2:57:30	31,4	57,8	34,97897
2:58:00	32,7	57,8	34,96518
2:58:30	34,2	57,8	34,94449
2:59:00	35,6	57,9	34,94449
2:59:30	36,7	57,9	34,88933
3:00:00	37,2	57,9	34,84107
3:00:30	40,4	57,9	34,77901
3:01:00	42,6	57,9	34,75143
3:01:30	44,7	58	34,69627
3:02:00	47,6	58	34,6549
3:02:30	50,8	58	34,6549
3:03:00	53,3	58	34,59284
3:03:30	55,4	58	34,60663
3:04:00	58,9	58	34,62732
3:04:30	61,8	57,9	34,62732
3:05:00	64,4	57,9	34,64111
3:05:30	67,9	57,9	34,64111
3:06:00	72,3	58	34,6549
3:06:30	78,3	57,9	34,6549
3:07:00	84,4	58	34,64111
3:07:30	90,3	57,9	34,57905
3:08:00	93,2	57,9	34,59284
3:08:30	99,5	57,9	34,64111

Anexo 10: Tabla de resultados del tiempo de espesamiento del experimento # 2.

Tiempo [hh:mm]	Consistencia [Bc]	Temperatura [°C]	Presión [Mpa]
0:00:00	11,7	37,1	0,467077
0:00:30	11,2	35	0,506772
0:01:00	11,9	34,9	0,965683
0:01:30	11,8	35,9	2,202171
0:02:00	11,6	36	1,599669
0:02:30	12	37	2,383264
0:03:00	11,7	35	2,033545
0:03:30	11,7	36	1,558091
0:04:00	11,7	36	3,73047
0:04:30	11,7	35,9	2,185548
0:05:00	11,7	35,9	3,447563
0:05:30	11,3	35,9	3,681997
0:06:00	11,3	35,8	4,068124
0:06:30	11,3	35,7	4,364614
0:07:00	11,3	35,6	4,585258
0:07:30	11,3	35,5	4,916224
0:08:00	11,3	35,4	5,391988
0:08:30	11,3	35,5	5,750534

0:09:00	11,3	35,4	5,778115
0:09:30	11,6	35,3	6,047025
0:10:00	11,6	35,2	6,377991
0:10:30	11,3	35,3	6,626215
0:11:00	11,3	35,2	6,922706
0:11:30	11,5	35,1	7,281252
0:12:00	11,6	35,1	7,591533
0:12:30	11,3	35	7,950079
0:13:00	11,3	35	8,198304
0:13:30	11,6	35	8,598221
0:14:00	11,5	34,8	8,915397
0:14:30	11,3	34,8	9,184307
0:15:00	11,5	34,8	9,432531
0:15:30	11,6	34,7	9,584224
0:16:00	11,3	34,7	10,01862
0:16:30	11,6	34,7	10,52196
0:17:00	11,6	34,7	10,83224
0:17:30	11,4	34,6	11,19079
0:18:00	11,4	34,7	11,53554
0:18:30	11,5	34,7	11,8872
0:19:00	11,4	35	12,20437
0:19:30	11,6	35,1	12,48018
0:20:00	11,6	35,2	12,76288
0:20:30	11,4	35,5	12,96284
0:21:00	11,7	35,8	13,1559
0:21:30	11,4	36,1	13,32828
0:22:00	11,4	36,3	13,50755
0:22:30	11,7	36,7	13,68682
0:23:00	11,6	37	13,83852
0:23:30	11,4	37,3	14,02468
0:24:00	11,4	37,6	14,19706
0:24:30	11,4	37,9	14,4246
0:25:00	11,6	38,2	14,65214
0:25:30	11,5	38,6	14,8521
0:26:00	11,4	38,8	15,02448
0:26:30	11,4	39,3	16,28629
0:27:00	11,4	39,6	16,64483
0:27:30	11,4	39,9	16,9689
0:28:00	11,7	40,2	17,36193
0:28:30	11,6	40,5	17,54809
0:29:00	11,4	40,8	17,95491
0:29:30	11,4	41,1	18,37551
0:30:00	11,4	41,4	18,57547
0:30:30	11,4	41,7	18,76164
0:31:00	11,4	42,1	19,12018
0:31:30	11,6	42,4	19,63042
0:32:00	11,4	42,8	19,76832
0:32:30	11,4	43	19,96139

0:33:00	11,5	43,3	20,20961
0:33:30	11,4	43,6	20,56816
0:34:00	11,4	44	20,91291
0:34:30	11,5	44,3	21,31973
0:35:00	11,4	44,6	21,5059
0:35:30	11,4	44,9	21,72654
0:36:00	11,7	45,4	22,27125
0:36:30	11,7	45,5	22,42295
0:37:00	11,4	45,9	22,66428
0:37:30	11,4	46,2	23,18831
0:38:00	11,4	46,4	23,37447
0:38:30	11,4	46,9	23,54685
0:39:00	11,4	47,1	23,78129
0:39:30	11,4	47,4	24,37427
0:40:00	11,4	47,8	24,53286
0:40:30	11,4	48	24,76039
0:41:00	11,4	48,3	24,98104
0:41:30	11,4	48,6	25,52575
0:42:00	11,4	49	25,66366
0:42:30	11,4	49,2	25,85672
0:43:00	11,4	49,5	26,19458
0:43:30	11,4	49,8	26,62897
0:44:00	11,5	50,2	26,84962
0:44:30	11,4	50,5	27,07026
0:45:00	11,4	50,9	27,50465
0:45:30	11,4	51	27,73909
0:46:00	11,4	51,5	28,13211
0:46:30	11,4	51,8	28,2907
0:47:00	11,4	52,1	28,59408
0:47:30	11,4	52,3	28,90436
0:48:00	11,4	52,6	29,31118
0:48:30	11,4	53	29,51114
0:49:00	11,4	53,3	29,68351
0:49:30	11,4	53,6	30,23512
0:50:00	11,3	53,8	30,4075
0:50:30	11,4	54,2	30,71089
0:51:00	11,4	54,5	31,02117
0:51:30	11,3	54,8	31,44867
0:52:00	11,3	55,1	31,64862
0:52:30	11,3	55,3	31,91064
0:53:00	11,3	55,7	32,15197
0:53:30	11,3	55,9	32,50362
0:54:00	11,3	56,3	32,91043
0:54:30	11,3	56,5	33,05523
0:55:00	11,3	56,8	33,0966
0:55:30	11,3	57	32,94491
0:56:00	11,3	57,2	32,86217
0:56:30	11,3	57,3	32,79322

0:57:00	11,3	57,5	32,89664
0:57:30	11,3	57,6	32,91043
0:58:00	11,3	57,6	33,00007
0:58:30	11,3	57,8	33,00007
0:59:00	11,3	57,8	33,03454
0:59:30	11,3	57,8	33,05523
1:00:00	11,3	58	33,06902
1:00:30	11,3	58	33,11039
1:01:00	11,3	58	33,06902
1:01:30	11,3	58	33,11039
1:02:00	11,3	58,1	33,14487
1:02:30	11,3	58,2	33,14487
1:03:00	11,3	58,2	33,15866
1:03:30	11,3	58,2	33,19313
1:04:00	11,3	58,2	33,26898
1:04:30	11,3	58,2	33,25519
1:05:00	11,3	58,2	33,20692
1:05:30	11,4	58,2	33,14487
1:06:00	11,3	58,1	33,15866
1:06:30	11,3	58,1	33,17934
1:07:00	11,3	58,2	33,12418
1:07:30	11,3	58,1	33,15866
1:08:00	11,3	58,1	33,19313
1:08:30	11,3	58,2	33,2345
1:09:00	11,3	58,1	33,26898
1:09:30	11,4	58,2	33,30345
1:10:00	11,3	58,2	33,33793
1:10:30	11,6	58,2	33,33793
1:11:00	11,3	58,2	33,33793
1:11:30	11,3	58,2	33,35172
1:12:00	11,3	58,2	33,35172
1:12:30	11,3	58,2	33,30345
1:13:00	11,3	58,2	33,28277
1:13:30	11,4	58,2	33,30345
1:14:00	11,3	58,2	33,33793
1:14:30	11,3	58	33,39309
1:15:00	11,3	58,1	33,39309
1:15:30	11,3	58	33,44136
1:16:00	11,3	58,1	33,46204
1:16:30	11,4	58,1	33,5172
1:17:00	11,3	58	33,50341
1:17:30	11,3	58,1	33,50341
1:18:00	11,5	58,1	33,46204
1:18:30	11,3	58	33,47583
1:19:00	11,3	58,1	33,46204
1:19:30	11,4	58,1	33,47583
1:20:00	11,3	58	33,44136
1:20:30	11,3	58,1	33,50341

1:21:00	11,3	58	33,55168
1:21:30	11,3	58,1	33,57926
1:22:00	11,3	58	33,59994
1:22:30	11,3	58	33,59994
1:23:00	11,4	58,1	33,56547
1:23:30	11,3	58,1	33,57926
1:24:00	11,3	58	33,59994
1:24:30	11,3	58	33,57926
1:25:00	11,4	58,1	33,57926
1:25:30	11,5	58,1	33,55168
1:26:00	11,3	58,1	33,59994
1:26:30	11,3	58,1	33,61374
1:27:00	11,3	58	33,59994
1:27:30	11,3	58	33,6689
1:28:00	11,6	58	33,71027
1:28:30	11,3	58,1	33,68958
1:29:00	11,6	58,1	33,6689
1:29:30	11,3	58	33,6689
1:30:00	11,6	58	33,6689
1:30:30	11,3	58	33,6689
1:31:00	11,6	58	33,64132
1:31:30	11,3	58	33,64132
1:32:00	11,6	58	33,57926
1:32:30	11,5	58	33,61374
1:33:00	11,5	58	33,65511
1:33:30	11,5	58	33,72406
1:34:00	11,3	58	33,81369
1:34:30	11,3	58	33,7999
1:35:00	11,6	58	33,78611
1:35:30	11,3	57,9	33,76543
1:36:00	11,4	57,9	33,81369
1:36:30	11,3	58	33,81369
1:37:00	11,3	58	33,84817
1:37:30	11,4	58	33,84817
1:38:00	11,4	58	33,81369
1:38:30	11,6	58	33,81369
1:39:00	11,5	58	33,84817
1:39:30	11,6	58	33,88264
1:40:00	11,6	57,9	33,91023
1:40:30	11,3	58	33,93781
1:41:00	11,3	57,9	33,95849
1:41:30	11,3	58	33,91023
1:42:00	11,3	58	33,84817
1:42:30	11,4	58	33,83438
1:43:00	11,5	58	33,93781
1:43:30	11,8	57,9	33,88264
1:44:00	11,6	57,9	33,92402
1:44:30	11,3	57,9	33,95849

1:45:00	11,3	58	33,93781
1:45:30	11,6	57,8	33,97228
1:46:00	11,6	57,9	34,04813
1:46:30	11,4	58	34,09639
1:47:00	11,4	57,8	34,11018
1:47:30	11,6	57,8	34,09639
1:48:00	11,4	57,8	34,06192
1:48:30	11,4	57,8	34,00676
1:49:00	11,3	57,8	33,98607
1:49:30	11,3	57,8	33,95849
1:50:00	11,6	57,7	33,92402
1:50:30	11,6	57,8	33,93781
1:51:00	11,4	57,8	33,95849
1:51:30	11,5	57,7	34,02744
1:52:00	11,4	57,6	34,14466
1:52:30	11,3	57,7	34,19982
1:53:00	11,4	57,8	34,14466
1:53:30	11,4	57,8	34,09639
1:54:00	11,3	57,8	34,09639
1:54:30	11,3	57,8	34,09639
1:55:00	11,6	57,8	34,07571
1:55:30	11,6	57,8	34,04813
1:56:00	11,7	57,8	34,02744
1:56:30	11,6	57,8	34,07571
1:57:00	11,6	57,8	34,13087
1:57:30	11,5	57,8	34,16535
1:58:00	11,7	57,8	34,18603
1:58:30	11,7	57,8	34,14466
1:59:00	11,6	57,8	34,22051
1:59:30	11,4	57,8	34,18603
2:00:00	11,6	57,8	34,16535
2:00:30	11,7	57,8	34,16535
2:01:00	11,6	57,8	34,14466
2:01:30	11,6	57,8	34,11018
2:02:00	11,6	57,8	34,11018
2:02:30	11,8	57,8	34,22051
2:03:00	11,6	57,8	34,31014
2:03:30	11,6	57,7	34,3653
2:04:00	11,6	57,8	34,34462
2:04:30	11,6	57,8	34,3653
2:05:00	11,6	57,8	34,28946
2:05:30	11,6	57,8	34,26877
2:06:00	11,6	57,8	34,26877
2:06:30	11,6	57,8	34,32393
2:07:00	11,8	57,8	34,32393
2:07:30	11,8	57,9	34,28946
2:08:00	11,6	57,9	34,26877
2:08:30	11,6	57,9	34,34462

2:09:00	11,9	57,8	34,31014
2:09:30	11,8	57,8	34,28946
2:10:00	11,8	57,8	34,28946
2:10:30	11,9	57,9	34,34462
2:11:00	11,7	58	34,37909
2:11:30	11,9	57,8	34,43425
2:12:00	11,9	57,9	34,45494
2:12:30	11,8	57,9	34,41357
2:13:00	11,8	57,9	34,39288
2:13:30	11,6	58	34,43425
2:14:00	11,7	57,9	34,41357
2:14:30	11,9	57,9	34,45494
2:15:00	11,8	57,9	34,39288
2:15:30	11,9	58	34,31014
2:16:00	11,9	58	34,32393
2:16:30	11,6	57,9	34,32393
2:17:00	11,7	57,8	34,3653
2:17:30	11,9	57,9	34,39288
2:18:00	11,9	57,9	34,3653
2:18:30	11,9	57,9	34,37909
2:19:00	11,9	57,9	34,43425
2:19:30	11,9	57,9	34,46873
2:20:00	11,9	57,8	34,48252
2:20:30	11,8	57,8	34,45494
2:21:00	11,7	57,7	34,41357
2:21:30	11,9	57,9	34,39288
2:22:00	11,9	57,9	34,41357
2:22:30	11,9	57,8	34,43425
2:23:00	11,9	57,8	34,41357
2:23:30	11,9	57,9	34,45494
2:24:00	11,9	57,9	34,45494
2:24:30	11,9	57,8	34,39288
2:25:00	11,9	57,8	34,43425
2:25:30	11,9	57,9	34,41357
2:26:00	11,9	58	34,41357
2:26:30	11,9	57,9	34,43425
2:27:00	11,9	57,8	34,50321
2:27:30	12,5	57,7	34,517
2:28:00	13	57,8	34,50321
2:28:30	13,3	57,8	34,47894
2:29:00	13,3	57,8	34,44425
2:29:30	13,3	57,8	34,38357
2:30:00	13,3	57,9	34,39357
2:30:30	13,3	57,8	34,42288
2:31:00	13,4	57,8	34,46494
2:31:30	13,4	57,8	34,46494
2:32:00	13,6	57,8	34,50321
2:32:30	13,5	57,8	34,55147

2:33:00	13,4	57,8	34,517
2:33:30	13,6	57,8	34,48252
2:34:00	13,6	57,9	34,53768
2:34:30	13,6	57,9	34,55147
2:35:00	13,6	57,9	34,50321
2:35:30	13,6	57,9	34,46873
2:36:00	13,8	58	34,50321
2:36:30	13,9	57,9	34,50321
2:37:00	13,9	57,8	34,50321
2:37:30	13,9	57,8	34,517
2:38:00	13,9	57,8	34,53768
2:38:30	13,9	57,9	34,59284
2:39:00	13,9	57,8	34,62732
2:39:30	14	57,8	34,62732
2:40:00	14,2	57,9	34,60663
2:40:30	14,2	57,8	34,59284
2:41:00	14,2	57,8	34,55147
2:41:30	14,2	57,8	34,53768
2:42:00	14,4	57,8	34,50321
2:42:30	14,5	57,8	34,50321
2:43:00	14,8	57,9	34,48252
2:43:30	14,8	57,8	34,43425
2:44:00	14,8	57,7	34,46873
2:44:30	14,8	57,8	34,53768
2:45:00	14,8	57,8	34,53768
2:45:30	15,5	57,8	34,60663
2:46:00	16	57,8	34,64111
2:46:30	16,5	57,7	34,64111
2:47:00	17,1	57,7	34,64111
2:47:30	17,7	57,8	34,6549
2:48:00	17,7	57,8	34,64111
2:48:30	17,9	57,8	34,62732
2:49:00	18,3	57,8	34,53768
2:49:30	18,8	57,8	34,517
2:50:00	19,1	57,9	34,59284
2:50:30	19,1	57,8	34,6549
2:51:00	19,6	57,8	34,71696
2:51:30	20	57,7	34,77901
2:52:00	20,6	57,8	34,7997
2:52:30	20,6	57,8	34,81349
2:53:00	22	57,8	34,84107
2:53:30	23,3	57,8	34,84107
2:54:00	23,5	57,8	34,77901
2:54:30	23,6	57,8	34,71696
2:55:00	25,5	57,9	34,73075
2:55:30	27	57,8	34,76522
2:56:00	28,4	57,9	34,77901
2:56:30	29,5	57,9	34,84107

2:57:00	30,5	57,8	34,92381
2:57:30	31,4	57,8	34,97897
2:58:00	32,7	57,8	34,96518
2:58:30	34,2	57,8	34,94449
2:59:00	35,6	57,9	34,94449
2:59:30	36,7	57,7	34,88933
3:00:00	37,2	57,9	34,84107
3:00:30	40,4	57,4	34,77901
3:06:00	42,6	57,5	34,83143
3:06:30	44,7	58	34,763327
3:07:00	47,6	58	34,758
3:07:30	50,8	56	34,655
3:08:00	53,3	56	34,59884
3:08:30	55,4	58	34,66663
3:09:00	58,9	58	34,62732
3:09:30	61,8	57,9	34,62932
3:10:00	64,4	55,9	34,64111
3:10:30	67,9	55,9	34,62222
3:11:00	72,3	56	34,665
3:11:30	78,3	56,9	34,6349
3:12:00	84,4	57	34,8222
3:12:30	90,3	58,8	34,67905
3:15:00	93,2	58,9	34,6384
3:15:30	99,5	58,9	35,73222

Anexo 10: Tabla de resultados del tiempo de espesamiento del experimento # 3

Tiempo [hh:mm]	Consistencia [Bc]	Temperatura [°C]	Presión [Mpa]
0:00:00	12	36,6	0,930842
0:00:30	12	36,5	1,158381
0:01:00	11,8	36,3	1,234227
0:01:30	11,8	36,1	1,530718
0:02:00	12	36,1	1,744467
0:02:30	11,8	36	2,040957
0:03:00	11,7	36	2,413294
0:03:30	11,7	35,8	2,558091
0:04:00	12	35,8	2,778735
0:04:30	11,9	35,7	3,068331
0:05:00	11,9	35,6	3,447563
0:05:30	12	35,6	3,681997
0:06:00	11,7	35,4	3,964697
0:06:30	11,8	35,4	4,240502
0:07:00	12	35,3	4,488726
0:07:30	11,7	35,3	5,116183
0:08:00	11,7	35,1	5,357512

0:08:30	11,9	35,1	5,660898
0:09:00	11,8	35	5,922913
0:09:30	11,8	34,9	6,219403
0:10:00	12	34,8	6,543474
0:10:30	11,7	34,7	6,839964
0:11:00	11,7	34,7	7,122664
0:11:30	11,7	34,5	7,432945
0:12:00	11,7	34,5	7,763911
0:12:30	11,7	34,5	8,074192
0:13:00	11,7	34,4	8,322416
0:13:30	11,8	34,4	8,598221
0:14:00	11,7	34,2	8,915397
0:14:30	12	34,2	9,308419
0:15:00	11,9	34,2	9,411846
0:15:30	11,8	34,2	10,01862
0:16:00	11,7	34,1	10,28063
0:16:30	12,6	34	10,72192
0:17:00	12,6	34	11,15631
0:17:30	12,6	34	11,67345
0:18:00	12,6	34,1	12,15611
0:18:30	12,6	34,2	12,62497
0:19:00	12,6	34,3	13,1559
0:19:30	12,7	34,5	13,5765
0:20:00	12,6	34,7	13,9971
0:20:30	12,6	34,9	14,36944
0:21:00	12,6	35,3	14,65214
0:21:30	12,6	35,7	14,86589
0:22:00	12,6	36,1	15,00379
0:22:30	12,6	36,5	15,07964
0:23:00	12,6	36,9	15,11411
0:23:30	12,6	37,4	15,16928
0:24:00	12,6	37,8	15,23823
0:24:30	12,6	38,2	15,2727
0:25:00	12,6	38,5	15,37613
0:25:30	12,6	38,9	15,67951
0:26:00	12,6	39,2	15,9898
0:26:30	12,6	39,5	16,52072
0:27:00	12,7	39,8	16,6862
0:27:30	12,6	40,2	16,89306
0:28:00	12,6	40,5	17,14128
0:28:30	12,7	40,7	17,43777
0:29:00	12,6	40,9	18,03075
0:29:30	12,6	41,2	18,23761
0:30:00	12,6	41,6	18,51341
0:30:30	12,6	41,8	18,74785
0:31:00	12,6	42,1	18,98228
0:31:30	12,6	42,4	19,16845
0:32:00	12,6	42,8	19,67869

0:32:30	12,6	43	19,82348
0:33:00	12,6	43,4	20,02344
0:33:30	12,6	43,6	20,42336
0:34:00	12,6	44	20,63711
0:34:30	12,7	44,4	21,23699
0:35:00	12,6	44,7	21,37489
0:35:30	12,6	45	21,5059
0:36:00	12,6	45,4	21,97476
0:36:30	12,6	45,6	22,25746
0:37:00	12,6	45,9	22,45053
0:37:30	12,6	46,1	22,85734
0:38:00	12,6	46,4	23,20899
0:38:30	12,6	46,8	23,38826
0:39:00	12,6	47	23,86403
0:39:30	12,5	47,4	24,09157
0:40:00	12,6	47,6	24,23636
0:40:30	12,6	47,9	24,53286
0:41:00	12,5	48,3	24,87072
0:41:30	12,6	48,5	25,40164
0:42:00	12,5	48,8	25,57402
0:42:30	12,6	49,1	25,80845
0:43:00	12,6	49,4	26,08426
0:43:30	12,6	49,7	26,33248
0:44:00	12,6	50	26,75998
0:44:30	12,7	50,2	26,98752
0:45:00	12,8	50,7	27,27022
0:45:30	12,6	50,9	27,51844
0:46:00	12,6	51,2	27,89078
0:46:30	12,5	51,5	28,27001
0:47:00	12,6	51,9	28,4355
0:47:30	12,6	52,2	28,7182
0:48:00	12,5	52,5	28,98021
0:48:30	12,5	52,9	29,46976
0:49:00	12,2	53,2	29,59388
0:49:30	12,7	53,5	29,8421
0:50:00	12,4	53,8	30,24891
0:50:30	12,5	54,1	30,49714
0:51:00	12,5	54,4	30,75915
0:51:30	12,4	54,7	31,1177
0:52:00	12,3	55	31,36592
0:52:30	12,3	55,3	31,80721
0:53:00	12,3	55,7	32,06923
0:53:30	12,2	55,9	32,33814
0:54:00	12,2	56,1	32,68289
0:54:30	12,2	56,4	32,88285
0:55:00	12,2	56,8	32,93112
0:55:30	12,2	57	32,89664
0:56:00	12,2	57,3	32,84838

0:56:30	12,2	57,6	32,77253
0:57:00	12,3	57,8	32,68289
0:57:30	12,3	58	32,59326
0:58:00	12,3	58,2	32,70358
0:58:30	12,3	58,4	32,72426
0:59:00	12,2	58,5	32,68289
0:59:30	12,2	58,5	32,88285
1:00:00	12,2	58,5	32,86217
1:00:30	12,2	58,4	32,88285
1:01:00	12,2	58,5	32,93112
1:01:30	12,2	58,3	32,93112
1:02:00	12,2	58,2	33,03454
1:02:30	12,2	58,2	33,11039
1:03:00	12,2	58,3	33,14487
1:03:30	12,2	58,2	33,20692
1:04:00	12,2	58,2	33,31724
1:04:30	12,2	58,2	33,35172
1:05:00	12,2	58,2	33,42757
1:05:30	12,2	58,2	33,44136
1:06:00	12,2	58,2	33,41378
1:06:30	12,2	58,2	33,39309
1:07:00	12,2	58,2	33,3793
1:07:30	12,2	58,2	33,41378
1:08:00	12,2	58,2	33,39309
1:08:30	12,2	58,3	33,3793
1:09:00	12,2	58,2	33,33793
1:09:30	12,2	58,3	33,31724
1:10:00	12,2	58,3	33,33793
1:10:30	12,2	58,3	33,33793
1:11:00	12,2	58,3	33,35172
1:11:30	12,2	58,3	33,41378
1:12:00	12,2	58,2	33,44136
1:12:30	12,2	58,2	33,47583
1:13:00	12,2	58,2	33,50341
1:13:30	12,2	58,1	33,55168
1:14:00	12,2	58,1	33,53099
1:14:30	12,2	58	33,5172
1:15:00	12,2	58,1	33,46204
1:15:30	12,2	58	33,46204
1:16:00	12,2	58,2	33,42757
1:16:30	12,2	58	33,41378
1:17:00	12,2	58,2	33,42757
1:17:30	12,2	58	33,42757
1:18:00	12,2	58	33,44136
1:18:30	12,2	58	33,50341
1:19:00	12,2	58	33,47583
1:19:30	12,2	58	33,55168
1:20:00	12,2	58	33,57926

1:20:30	12,2	58	33,6689
1:21:00	12,2	58	33,6689
1:21:30	12,2	58	33,65511
1:22:00	2,1	58	33,65511
1:22:30	10,8	58	34,02744
1:23:00	11	58	34,02744
1:23:30	11,3	58,1	33,97228
1:24:00	11,3	58,1	33,93781
1:24:30	11,3	58,2	33,84817
1:25:00	11,3	58,2	33,78611
1:25:30	11,6	58,2	33,73785
1:26:00	11,6	58,2	33,71027
1:26:30	11,6	58,2	33,68958
1:27:00	11,6	58,2	33,6689
1:27:30	11,6	58,1	33,64132
1:28:00	11,6	58,2	33,6689
1:28:30	11,5	58,1	33,6689
1:29:00	11,5	58,2	33,73785
1:29:30	11,5	58,1	33,83438
1:30:00	11,5	58,1	33,86196
1:30:30	11,5	58,1	33,93781
1:31:00	11,5	58	33,98607
1:31:30	11,5	57,9	34,00676
1:32:00	11,5	57,9	34,04813
1:32:30	11,5	57,9	34,04813
1:33:00	11,5	57,9	34,00676
1:33:30	11,5	58	33,93781
1:34:00	11,5	58	33,92402
1:34:30	11,5	58	33,97228
1:35:00	11,5	58,2	33,93781
1:35:30	11,5	58	33,92402
1:36:00	11,5	58	33,92402
1:36:30	11,5	58,1	33,92402
1:37:00	11,5	58	33,92402
1:37:30	11,5	58	33,97228
1:38:00	11,5	58	33,98607
1:38:30	11,5	58	34,07571
1:39:00	11,5	58	34,07571
1:39:30	11,5	58,1	34,13087
1:40:00	11,5	58	34,16535
1:40:30	11,5	58	34,19982
1:41:00	11,5	58	34,22051
1:41:30	11,5	58	34,19982
1:42:00	11,5	58	34,22051
1:42:30	11,5	58	34,24809
1:43:00	11,5	58	34,26877
1:43:30	11,5	58	34,22051
1:44:00	11,5	58	34,18603

1:44:30	11,5	58	34,09639
1:45:00	11,5	58	34,09639
1:45:30	11,5	58	34,07571
1:46:00	11,5	58	34,07571
1:46:30	11,5	58	34,09639
1:47:00	11,5	58	34,14466
1:47:30	11,5	57,9	34,18603
1:48:00	11,5	57,9	34,18603
1:48:30	11,5	57,9	34,22051
1:49:00	11,5	58	34,18603
1:49:30	11,5	58	34,16535
1:50:00	11,5	58	34,18603
1:50:30	11,5	58	34,24809
1:51:00	11,5	58	34,26877
1:51:30	11,5	58	34,31014
1:52:00	11,5	57,9	34,39288
1:52:30	11,5	57,9	34,39288
1:53:00	11,5	57,9	34,43425
1:53:30	11,5	58	34,43425
1:54:00	11,5	58	34,43425
1:54:30	11,5	58	34,46873
1:55:00	11,5	58,1	34,45494
1:55:30	11,5	58,1	34,41357
1:56:00	11,5	58	34,39288
1:56:30	11,5	58	34,41357
1:57:00	11,5	58	34,37909
1:57:30	11,5	58	34,34462
1:58:00	11,5	58	34,31014
1:58:30	11,5	58	34,28946
1:59:00	11,5	58	34,28946
1:59:30	11,6	58	34,32393
2:00:00	11,6	58	34,34462
2:00:30	11,6	58	34,3653
2:01:00	11,7	57,9	34,43425
2:01:30	11,6	57,9	34,48252
2:02:00	11,6	58	34,53768
2:02:30	11,7	58	34,53768
2:03:00	11,6	58	34,62732
2:03:30	11,6	58	34,62732
2:04:00	11,6	58	34,6549
2:04:30	11,6	58	34,64111
2:05:00	11,6	58	34,62732
2:05:30	11,6	58	34,64111
2:06:00	11,6	58	34,57905
2:06:30	11,6	58	34,55147
2:07:00	11,6	58	34,517
2:07:30	11,6	58	34,53768
2:08:00	11,6	58	34,517

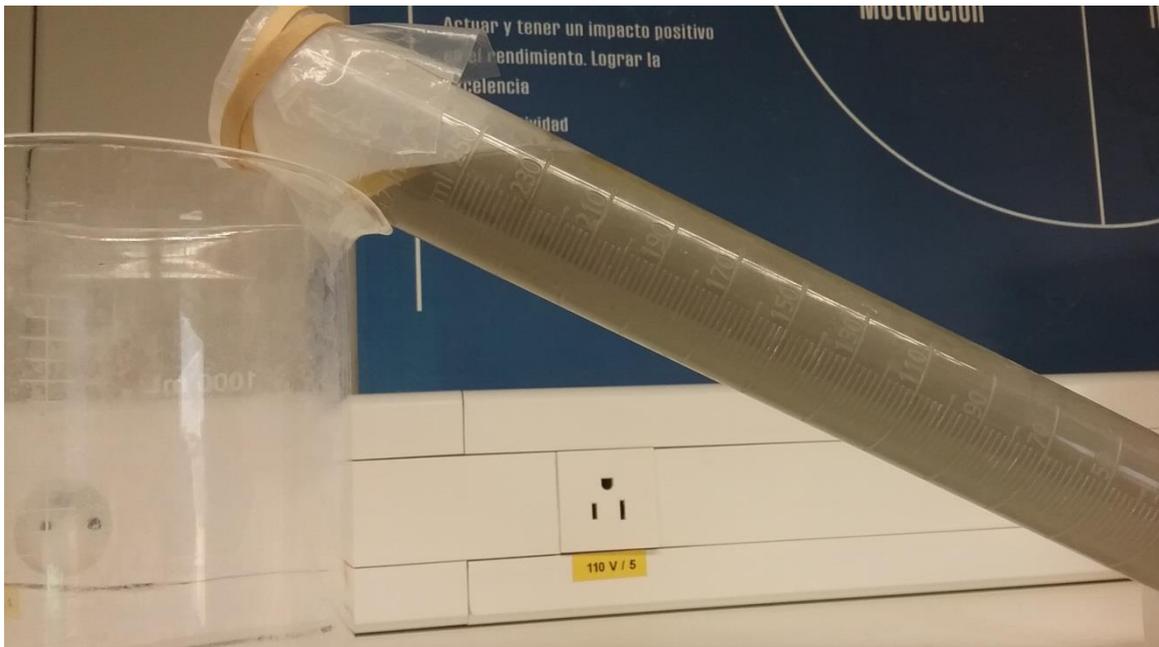
2:08:30	11,6	58	34,517
2:09:00	11,7	58	34,46873
2:09:30	11,6	58	34,45494
2:10:00	11,6	58	34,48252
2:10:30	11,7	58	34,53768
2:11:00	11,7	57,9	34,55147
2:11:30	11,7	57,9	34,62732
2:12:00	11,7	58	34,64111
2:12:30	11,7	58	34,62732
2:13:00	11,7	58	34,62732
2:13:30	11,7	58	34,6549
2:14:00	11,7	57,9	34,64111
2:14:30	11,8	58	34,62732
2:15:00	11,8	58	34,64111
2:15:30	11,8	58	34,64111
2:16:00	11,8	57,9	34,62732
2:16:30	11,8	58	34,60663
2:17:00	11,8	58	34,6549
2:17:30	11,8	58	34,67558
2:18:00	11,8	58	34,64111
2:18:30	11,8	58	34,62732
2:19:00	11,8	58	34,62732
2:19:30	11,7	58	34,60663
2:20:00	11,8	57,9	34,62732
2:20:30	11,8	57,8	34,67558
2:21:00	11,8	57,8	34,73075
2:21:30	11,7	57,8	34,73075
2:22:00	11,8	57,8	34,73075
2:22:30	11,8	57,8	34,71696
2:23:00	11,8	57,8	34,77901
2:23:30	11,8	57,8	34,76522
2:24:00	11,8	57,8	34,75143
2:24:30	11,8	57,9	34,77901
2:25:00	11,8	57,9	34,77901
2:25:30	11,8	57,8	34,84107
2:26:00	11,8	57,8	34,85486
2:26:30	11,8	57,9	34,84107
2:27:00	11,8	57,8	34,77901
2:27:30	11,8	57,8	34,77901
2:28:00	11,8	57,8	34,76522
2:28:30	11,9	57,9	33,06902
2:29:00	11,9	57,8	33,06902
2:29:30	11,9	57,8	33,11039
2:30:00	12,1	57,8	33,0966
2:30:30	12,1	57,8	33,11039
2:31:00	12,1	57,9	33,12418
2:31:30	12,1	57,8	33,17934
2:32:00	12,1	57,8	33,26898

2:32:30	12,1	57,8	33,28277
2:33:00	12,4	57,8	33,31724
2:33:30	12,4	57,7	33,35172
2:34:00	12,7	57,8	33,35172
2:34:30	13	57,7	33,33793
2:35:00	13,3	57,7	33,28277
2:35:30	13,3	57,8	33,31724
2:36:00	13,3	57,9	33,28277
2:36:30	13,3	57,8	33,28277
2:37:00	13,3	57,8	33,28277
2:37:30	13,6	57,8	33,25519
2:38:00	13,6	57,8	33,2345
2:38:30	13,6	57,8	33,20692
2:39:00	13,8	57,8	33,19313
2:39:30	14,1	57,8	33,17934
2:40:00	14,1	57,8	33,2345
2:40:30	14,4	57,8	33,28277
2:41:00	14,4	57,8	33,31724
2:41:30	14,4	57,8	33,33793
2:42:00	14,5	57,9	33,31724
2:42:30	14,7	57,9	33,30345
2:43:00	14,7	57,8	33,3793
2:43:30	14,7	57,8	33,41378
2:44:00	14,9	57,8	33,41378
2:44:30	14,9	57,8	33,39309
2:45:00	15	57,9	33,3793
2:45:30	15	57,8	33,35172
2:46:00	15	57,8	33,30345
2:46:30	15	57,8	33,28277
2:47:00	15	57,8	33,30345
2:47:30	15,2	57,8	33,3793
2:48:00	15,3	57,8	33,39309
2:48:30	15,3	57,8	33,35172
2:49:00	15,3	57,8	33,3793
2:49:30	15,6	57,9	33,39309
2:50:00	15,6	57,9	33,41378
2:50:30	15,6	57,9	33,41378
2:51:00	15,6	57,9	33,39309
2:51:30	15,6	57,9	33,33793
2:52:00	15,6	57,9	33,30345
2:52:30	15,6	57,9	33,26898
2:53:00	15,6	58	33,26898
2:53:30	15,6	57,8	33,28277
2:54:00	15,9	57,9	33,35172
2:54:30	15,9	58	33,42757
2:55:00	16	58	33,47583
2:55:30	16,2	58	33,56547
2:56:00	16,2	58	33,55168

2:56:30	16,2	57,9	33,56547
2:57:00	16,2	58	33,56547
2:57:30	16,2	58	33,57926
2:58:00	16,2	58	33,56547
2:58:30	16,2	57,9	33,46204
2:59:00	16,2	58	33,50341
2:59:30	17	58,1	33,50341
3:00:00	17,9	58	33,46204
3:00:30	17,9	58	33,42757
3:01:00	17,9	58	33,39309
3:01:30	17,9	58	33,33793
3:02:00	18,2	58	33,31724
3:02:30	18,5	57,9	33,28277
3:03:00	18,5	58	33,33793
3:03:30	18,6	57,9	33,3793
3:04:00	19	57,8	33,41378
3:04:30	19,6	57,8	33,46204
3:05:00	19,6	57,7	33,46204
3:05:30	19,6	57,7	33,47583
3:06:00	19,6	57,7	33,5172
3:06:30	19,9	57,9	33,50341
3:07:00	20,5	57,8	33,53099
3:07:30	20,8	57,8	33,47583
3:08:00	20,8	58	33,46204
3:08:30	20,8	57,9	33,47583
3:09:00	20,8	57,9	33,53099
3:09:30	22,3	57,8	33,53099
3:10:00	22,5	57,8	33,56547
3:10:30	22,5	57,8	33,57926
3:11:00	22,5	57,8	33,53099
3:11:30	22,5	57,7	33,53099
3:12:00	22,5	57,7	33,47583
3:12:30	22,5	57,8	33,41378
3:13:00	22,5	57,8	33,39309
3:13:30	22,5	57,9	33,3793
3:14:00	25,1	57,8	33,42757
3:14:30	25,4	58	33,46204
3:15:00	25,4	57,8	33,53099
3:15:30	25,4	57,8	33,53099
3:16:00	25,4	57,8	33,55168
3:16:30	27,2	57,8	33,5172
3:17:00	27,5	57,8	33,53099
3:17:30	27,7	57,8	33,55168
3:18:00	27,7	57,8	33,53099
3:18:30	27,7	57,9	33,57926
3:19:00	28,3	57,9	33,56547
3:19:30	29,7	58	33,57926
3:20:00	30,6	57,9	33,59994

3:20:30	31,5	57,8	33,57926
3:21:00	32,4	57,9	33,5172
3:21:30	34,4	57,9	33,50341
3:22:00	35,8	57,9	33,42757
3:22:30	36,1	57,9	33,39309
3:23:00	37,2	57,8	33,39309
3:23:30	39,3	57,9	33,41378
3:24:00	40,8	57,9	33,44136
3:24:30	42,1	58	33,50341
3:25:00	44,5	57,9	33,55168
3:25:30	46,8	57,9	33,64132
3:26:00	48,8	57,9	33,68958
3:26:30	50,2	57,9	33,73785
3:27:00	52,3	58	33,6689
3:27:30	55,1	58	33,65511
3:28:00	57,5	58	33,65511
3:28:30	60,1	58	33,64132
3:29:00	63,6	58	33,6689
3:29:30	67,3	58	33,64132
3:30:00	71,4	58	33,65511
3:30:30	75,5	58	33,64132
3:31:00	81,3	58	33,61374
3:31:30	87,3	58	33,59994
3:32:00	92,3	58	33,57926
3:32:30	98,9	58	33,57926

Anexo 11: Resultado de la prueba pasado 30 minutos



Anexo 12: Resultado de la prueba pasada una hora



Anexo 13: Resultado de la prueba pasado una hora 30 minutos



Anexo 14: Resultado de la prueba pasado las dos horas

