

## **DISEÑO DE UN SISTEMA CEMENTANTE PARA POZOS UTILIZADOS EN ANCLAJE DE PLATAFORMAS DE PRODUCCIÓN EN AGUAS PROFUNDAS. CASO: RIO DE JANEIRO, BRASIL**

*FRANCISCO J. MAVARES<sup>1</sup>, ALBERTO D. PERTUZ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Petrobras, Departamento de Cementación y Revestimiento. RJ Brasil. francisco.mavares@petrobras.com,

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Código Postal N° 48222, Los Chaguaramos, Caracas, Venezuela. alberto.pertuz@ucv.ve

Recibido: julio 2011

Recibido en forma final revisado: octubre 2012

### **RESUMEN**

La cementación de pozos en zonas no consolidadas, con estrecho margen entre los gradientes de poro y fractura, requieren un foco en sistemas cementantes de baja densidad. La perforación en aguas profundas donde una serie de pozos son perforados, cementados, completados y puestos a producción a una plataforma específica, la cual posee un determinado número de anclas que de acuerdo con el estudio de suelos puede ser del tipo torpedo o de anclaje utilizando pozos cementados. Estos pozos utilizados para el anclaje de unidades marítimas de producción se perforan en aguas profundas con retorno al suelo marino, sin equipamiento para prevenir reventones y sin tubería de conexión entre la unidad marítima de perforación y el pozo, en zonas no consolidadas con bajo gradiente de fractura. Diseños de sistemas cementantes son desarrollados y pruebas de laboratorio son ejecutadas para determinar si se adaptan a las condiciones previstas para garantizar el anclaje mediante un eficiente sistema de pozo, cemento y tubería. Se desarrollaron sistemas cementantes para aplicación Costa Afuera con una resistencia compresiva mayor a 2500 psi, que estén entre los rangos de gradiente de poro y de fractura en formaciones no-consolidadas, en profundidad de agua de 1400 m y temperatura del suelo marino de 40 °F. Es novedoso el desarrollo de sistemas cementantes en láminas de agua profundas, con temperaturas del suelo marino relativamente bajas y con una alta resistencia compresiva.

*Palabras claves:* Cementación de pozos para anclaje, Pasta leve, Anclaje para plataformas, Revestidor superficial, Microesferas.

### **CEMENT SYSTEM DESIGN USED IN ANCHORAGE WELLS FOR OFFSHORE DEEPWATER PRODUCTION PLATFORMS. EVENT: RIO DE JANEIRO, BRAZIL**

#### **ABSTRACT**

The cementing of wells in unconsolidated zones, with narrow margin between the pore and fracture gradients, require a focus on low density cements systems. Drilling in deep water where a series of wells are drilled, cemented, complete and put into a production in a specific maritime unit. These maritime unit of production would need a certain number of anchors, which according to study of soils can be of torpedo type or cemented wells. When drilling deep water wells of the sea floor return, the riserless, drill sections have low fracture gradient, unconsolidated sands. Cement system design are developed and laboratory tests are executed to determine the anchorage which an efficient system of well, cement and casing. Cement systems developed for offshore application with a compressive strength greater than 2500 psi, between the gradient pore and fracture in unconsolidated formations, in water depth of 1400 m, where the temperature of the ocean floor is 40 °F. The cement system development is new in deep water, with low temperatures of the sea floor and with a high compressive strength.

*Keywords:* Well cementation for anchorage, Light cement, Platforms anchorage, Superficial casing, microspheres.

## INTRODUCCIÓN

La perforación y puesta a producción de los pozos de petróleo costa afuera, necesitan de unidades marítimas de producción que tengan capacidad instalada para procesar el petróleo, gas y agua, las cuales pueden llegar a pesar en orden de las 80 toneladas, con una capacidad de procesamiento de petróleo de 180 mil Bbls/día, 6 millones de metros cúbicos por día de gas y 250 mil Bbls de agua. Estas unidades necesitan ser ancladas para mantener una cierta posición, que permita una conexión entre el sistema de tuberías que conectan los pozos a la plataforma de producción, haciendo de esta manera viable económicamente los proyectos de perforación Costa Afuera.

La resistencia mecánica de los suelos marinos no es homogénea, como resultado no es factible la utilización de torpedos en todos los casos, los cuales son introducidos en el suelo marino por la aplicación de peso, para el anclaje de las unidades marítimas de producción; otra alternativa es la perforación de pozos de 36", para luego bajar un revestidor combinado de 30" con 13-3/8" y cementarlo adecuadamente para llevar las amarras que servirán para el anclaje de la plataforma de producción.

En Venezuela hay poca experiencia en perforación en aguas profundas. En un futuro, cuando sea necesario la exploración, explotación y producción, y se confirmen yacimientos nuevos para el desarrollo de la economía Venezolana, este estudio servirá de guía para el anclaje de unidades marítimas de producción, desarrollando otra alternativa para la explotación de un recurso de máxima importancia para la economía venezolana.

## ANTECEDENTES

La perforación y cementación en zonas no consolidadas, con estrecho margen entre los gradientes de poro y fractura, requiere un foco en sistemas cementantes de baja densidad (Kulakofsky et al. 2005).

El incremento de la perforación costa afuera, donde una serie de pozos son perforados, cementados, completados, conectados y puestos a producción a una unidad marítima de producción, la cual precisa de un determinado número de anclas, según un estudio de suelos pueden ser de tipo torpedos o utilizando anclaje con pozos cementados.

Las secciones perforadas sin columna de conexión entre el cabezal del pozo y la unidad marítima de perforación, poseen bajo gradiente de fractura, arenas no consolidadas y en algunos casos gas o agua presurizada superficial

(Chan et al. 2005). Uno de los principales objetivos de la cementación primaria es prevenir la migración de fluidos en el espacio anular mediante un efectivo aislamiento zonal. Para lograr este objetivo, el fluido de perforación debe ser desplazado eficientemente y un sistema cementante competente debe ser colocado en el anular (Ravi & Bosma, 2005). El revestidor de superficie tiene como función aislar formaciones no consolidadas y acuíferos de agua fresca, además previene la contaminación de acuíferos con fluidos de perforación usados en el pozo para producir petróleo o gas (Mueller & Eid, 2006).

Simulaciones con el software "Cement" se realizaron para verificar que la densidad equivalente de circulación este entre los gradientes de poro y fractura. Además, se necesitan avances en los diseños de los sistemas cementantes con un rango reducido entre los gradientes de poro y de fractura, con temperaturas bajas del suelo marino (Lopez et al. 2009).

Un factor importante es conseguir un sistema cementante que desarrolle una alta resistencia compresiva a una temperatura de 40°F. Por tal motivo se realizaron simulaciones en el software "Well Cat", a fin de validar las temperaturas del fondo de pozo del primero y último saco de cemento. El problema de la influencia de las bajas temperaturas y fraguado del cemento fueron observados en trabajos anteriores (Piot et al. 2001).

Optimizando la distribución del tamaño de las partículas (por sus siglas en inglés, "Particle Size Distribution", "PSD"), esta nueva tecnología de mezcla de cemento de diferentes tamaños de partículas en diferentes proporciones desarrolla mejores propiedades mecánicas. Esta nueva tecnología fue adaptada para baja y alta densidad con sistemas de cemento desde 10 hasta 23 lpg. Diseños adecuados para baja temperatura todavía no están disponibles (Piot et al. 2001). En el presente estudio fue necesaria la utilización de la tecnología PSD con una temperatura del suelo marino de 40 °F, donde la ventana operacional se disminuye a medida de que aumenta la profundidad de agua. En profundidades de agua mayores a 600 m, en algunos casos la presión hidrostática de un sistema cementante convencional, excede la presión de fractura, resultando en pérdida de fluido hacia la formación o formaciones.

Opciones para este caso es un sistema cementante de bajo peso con micro-esferas o los denominados espumados en el rango de 10 a 12 lpg (Waheed et al. 2002). Un sistema cementante espumado en base de nitrógeno de corto tiempo de tránsito, en el cual la densidad del sistema cementante es compatible con la ventana operacional, y al mismo tiempo desarrolla excelentes resistencias compresivas,

sería otra opción a ser analizada (Schuberth & Walker, 2000). Avances tecnológicos en la cementación de pozos han hecho posible el uso de ultra-baja densidad (por sus siglas en inglés "Ultra Light Weight") con densidades de 7,5 lpg, sin el uso de cementos espumados. Las esferas de cerámicas pueden ser usadas para desarrollar un alto performance con una densidad mínima de 9 lpg, mientras las esferas de vidrio son mezcladas para producir sistemas cementantes con densidades hasta 7 lpg (Dajani & Curtis, 2009). Excelentes resultados se han obtenidos usando cementos ultra livianos en pozos que poseen bajo gradiente de fractura, zonas presurizadas con agua, zonas de gas despresurizadas, contenidos de H2S y CO2, arcillas y en algunos casos presencia de micro fracturas (Mata et al. 2006). El mecanismo de hidratación del cemento se desarrolla considerando los efectos de la composición química, finura del cemento, relación agua cemento, temperatura y presión, destacando que la composición del cemento es el más importante factor de todos (Lin & Meyer, 2006).

### OBJETIVO GENERAL

El presente estudio tiene como objetivo general diseñar un sistema cementante para pozos utilizados en anclaje de plataformas de producción Costa Afuera, con una resistencia mínima a la compresión de 2500 psi en agua profundas; ubicada en Río de Janeiro, Brasil.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Desarrollar mediante ensayos de laboratorio la propuesta de uno o varios sistemas cementantes que tengan una resistencia compresiva mínima de 2500 psi.
- 2.- Desarrollar un sistema cementante que su densidad esté entre los rangos de gradientes de poro y fractura, en pozos de formaciones no-consolidadas someras.
- 3.- Determinar la resistencia compresiva de los sistemas cementantes, mediante la ayuda de ensayos de compresión destructivos ("Crush") y mediante un ensayo no destructivo como el Analizador Ultrasónico de Cemento. ("U.C.A.").
- 4.- Desarrollar un sistema cementante para una temperatura de 40 °F, para una profundidad de agua de 1400 m.
- 5.- Determinar las densidades de los sistemas cementantes, aditivos y de concentración de los mismos, a fin de conseguir el diseño más factible técnicamente.
- 6.- Realizar la formulación del sistema cementante con aditivos disponibles en Brasil para la ejecución del trabajo.

- 7.- Verificar los resultados del programa "Cement", mediante cálculos de densidad equivalente de circulación, y presión final de desplazamiento del sistema cementante, afin de validar los resultados obtenidos por este software.

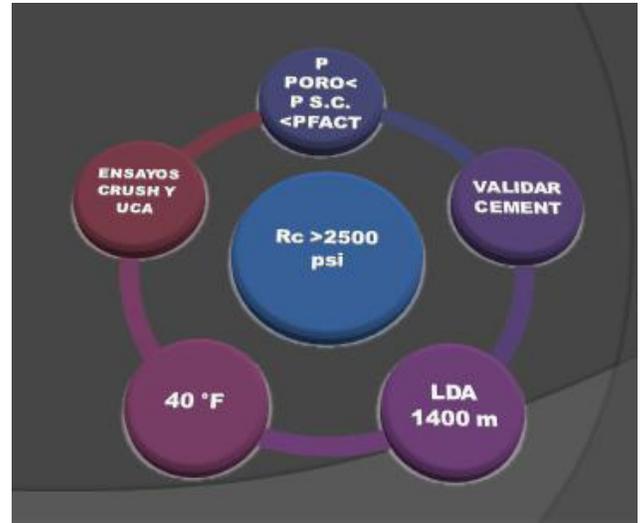


Figura 1. Objetivos específicos del diseño del sistema cementante

### METODOLOGÍA

Se diseñaron varios sistemas cementantes, cuyas formulaciones fueron probados en laboratorio para medir el desarrollo de su resistencia compresiva en 28 días (Figura 2). Inicialmente se diseña un sistema cementante el cual se somete a una metodología de laboratorio, colocando aditivos y porcentajes g de forma empírica, para verificar que la resistencia compresiva sea mayor a 2500 psi. Se realizaron simulaciones hidráulicas para definir la densidad del sistema y que esté entre el gradiente de poro y de fractura. Adicionalmente que los aditivos estén disponibles en Brasil para la ejecución del trabajo.

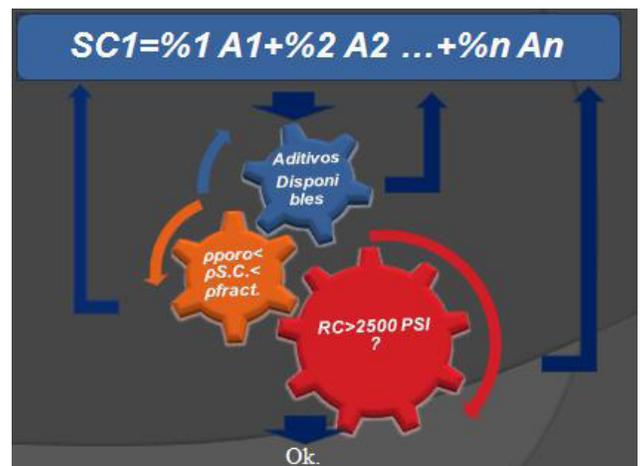


Figura 2. Esquema general de la metodología utilizada

## DENSIDAD DEL SISTEMA CEMENTANTE

La densidad del sistema cementante tiene que estar entre los rangos de presión de poro y de fractura de las formaciones superficiales que serán perforadas para posteriormente colocar y cementar el pozo utilizado para anclaje. Para obtener la densidad máxima permisible se simulaban pesos desde 12 hasta 15,8 lpg con el software "Cement" y se compararán con la densidad equivalente de circulación.

## DISEÑO DEL SISTEMA CEMENTANTE.

Se utilizaron 34 diseños de sistemas cementantes, teniendo como foco los estudios realizados en sistemas de tecnología de distribución de partículas, variando algunos aditivos como se observa en la Figura 3: dispersantes o reductores de fricción, retardadores, antiespumantes, micro esferas, entre otros.



*Figura 3. Funciones de los aditivos utilizados en cementación de pozos*

En general un diseño de un sistema cementante que se utilice en formaciones superficiales debe tener:

**Antiespumante:** Su objetivo principal es evitar la generación de espuma durante la mezcla del sistema cementante.

**Controlador de filtrado:** Previenen la deshidratación del sistema cementante y evitan la disminución de la columna hidrostática del mismo debido a la pérdida de agua, lo cual origina reducción de la presión ejercida por la columna hidrostática. Se debe evitar daño a las formaciones productoras. Entre estos se tienen polímeros orgánicos, látex, cemento con bentonita y dispersantes.

**Dispersante:** Se agregan al sistema cementante para proveer propiedades de flujo y permite un bombeo del mismo en flujo

turbulento a menor caudal, minimizando los requerimientos de potencia hidráulica.

**Extendedor:** Se utilizan para reducir la densidad de los sistemas cementantes o para aumentar el rendimiento de éstas. La reducción de la densidad persigue disminuir la presión hidrostática de la columna de cemento y prevenir pérdidas de circulación debido a rupturas de formaciones débiles.

**Retardador:** Aditivo esencial para cementaciones de revestidores intermediarios o de producción. Para el presente estudio no se utilizará, ya que operaciones de cementación a una temperatura de 40 °F, ayuda a aumentar considerablemente el tiempo de bombeabilidad.

La concentración de cada uno de ellos va a depender del aditivo utilizado, pues cada compañía recomienda un rango mínimo y máximo a ser utilizado, se debe considerar cómo interactúan los diferentes aditivos del sistema cementante y lo más importante es la composición química de la batelada de cemento utilizada. Siempre, de ser posible, se debe utilizar la tecnología en base de micro esferas inertes para obtener una baja densidad y buenas propiedades mecánicas del sistema cementante en formaciones superficiales.

Se realizarán pruebas de laboratorio para determinar la resistencia compresiva de los sistemas cementantes, con los siguientes pasos:

- 1.- Se calculó 600 cm<sup>3</sup> de pasta de cemento, incluyendo en este valor los aditivos y el agua de mezcla.
- 2.- Se colocó el cemento y los aditivos por una malla 20 MESH (Equivalente a 850 micrones) antes de realizar la mezcla.
- 3.- Realizar la mezcla del sistema cementante. Medir propiedades reológicas.
- 4.- Realizar muestras de cemento según norma de 2" x 2" x 2". Colocarlas en una cámara de curado a una temperatura de 40 °F.
- 5.- Enfriar las muestras de cemento hasta 40 °F.
- 6.- Realizar ensayos destructivos ("crush"), para medir la resistencia compresiva de las muestras de cemento, luego de 28 días.
- 7.- Realizar ensayos en el Analizador Ultrasónico de cemento (por sus siglas en inglés "Ultrasonic Cement Analyzer", "UCA") en aquellas muestras próximas a 2500 psi, según resultados de los ensayos destructivos ("crush"), durante 28 días.

En forma general para el diseño del sistema cementante se utilizó el árbol de decisión mostrada en la Figura 9.

## PREPARACIÓN DEL SISTEMA CEMENTANTE

Una vez definida la cantidad de cemento, aditivos a utilizar y la cantidad de agua de mezcla, se calculará 600 cm<sup>3</sup> del sistema cementante. Se colocará la cantidad de agua necesaria, luego se adicionara aditivo por aditivo siguiendo la secuencia establecida previamente a una velocidad de 4000 rpm +/- 200 rpm hasta 15 segundos. Por último, colocar la cantidad de cemento. Una vez colocados todos los aditivos y cemento se agitará por 35 segundos a una velocidad de 12000 rpm +/- 500 rpm.

## DESARROLLO DE LA RESISTENCIA COMPRESIVA

Se requiere una resistencia compresiva de 2500 psi. Ésta es 5 veces mayor que la requerida en una cementación convencional que generalmente desarrolla 500 psi de resistencia compresiva (Piot et al. 2001). Esta propiedad se medirá inicialmente utilizando ensayos destructivos denominados "CRUSH", luego de 28 días. En aquellas muestras donde este ensayo den valores mayores a 2500 psi de resistencia compresiva, se confirmará mediante la aplicación de un método no destructivo, cuyo principio se basa en la velocidad de ondas a través de un sistema cementante y mediante un algoritmo que calcula la resistencia compresiva. Este método es el Analizador Ultrasónico de Cemento "UCA".

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### SIMULACIONES REALIZADAS CON EL SOFTWARE CEMENT

Consideraciones para realizar las simulaciones:

- 1.- Revestidor combinado de 30" y de 13-3/8" (Figura 4).
- 2.- Columna de conexión de 18-3/4" de diámetro interno entre el cabezal del pozo y la unidad marítima de perforación.
- 3.- En esta fase es considerado un exceso de 300% del volumen de la pasta nominal en el anular entre el pozo de 36", los revestidores de 30" y 13-3/8", y sus respectivas longitudes, utilizando la siguiente ecuación:

$$V_p = \frac{\text{Diámetro Hoyo}^2 - \text{Diámetro Revestimiento}^2}{313,7} \quad (1)$$

El resultado de la ecuación es en Bbbls/m x Longitud anular respectiva en m.

$$V_{ir} = \frac{\text{Diámetro interno del revestidor}^2}{313,7} \quad (2)$$

en Bbbls/m x Longitud interna en m, normalmente considerada de 10 m en revestidores conductores.

$$V_p \text{ nominal} = V_p \text{ anular } 36" + V_p \text{ anular } 13 - 3/8" \quad (3)$$

Esta ecuación considera el pozo en calibre, es decir con un diámetro uniforme en toda su longitud.

$$V_p \text{ estimado} = V_p \text{ nominal} \times (1 + 300\%/100\%) + V_{ir} \quad (4)$$

$$V_{dep} = \frac{D I d p^2}{313,7} \quad (5)$$

en Bbbls/m x Longitud interna en m.

Para el volumen de desplazamiento se considera la tubería de perforación, incluyendo la longitud colocada dentro del revestidor, y los 40 m de revestidor.

- 4.- Es bombeado, antes del sistema cementante, un colchón trazador denominado "Xadrez", para tener una indicación visual en el suelo marino de estar próximo el retorno del cemento. Esta indicación visual es facilitada por el vehículo operado remotamente ("R.O.V").
- 5.- El desplazamiento de la pasta es realizado a través de la columna de perforación, normalmente de 5", denominado "stinger o inner string method", donde la base queda a 50 m de la sapata flotante y se desplaza 40 m de revestidor, siendo el retorno al suelo marino.
- 6.- No se consideró en el diseño un colchón espaciador para separar el indicador "Xadrez" y el sistema cementante, ya que los primeros barriles hasta un máximo del volumen de desplazamiento puede considerarse sistema cementante de sacrificio.

Las simulaciones se realizarán con el siguiente criterio:

1. 90 m de 12,2 lpg y 10 m de 15,8 lpg (Sistema cementante convencional para el revestidor de 30").
2. 100 m de 12.5 lpg, incrementando la densidad del sistema cementante en 0.5 lpg, hasta llegar a 15 lpg.
3. Peso máximo permisible 15,8 lpg, ya que hay experiencia en el área de fracturamiento durante la cementación del revestidor de 30", en pozos de 60 m de longitud.
4. En la Figuras 5 se muestran la Densidad Equivalente de Circulación en lpg vs el gradiente de poro y de fractura (grafico inferior), los márgenes de operación que se tiene para cada densidad del sistema cementante y el peso máximo a ser utilizado. Se observó que a medida de que se aumenta la densidad del sistema cementante la curva de presión de fondo

y de densidad equivalente de circulación, se acercan a la presión y densidad de fractura, respectivamente.

5. Al final del desplazamiento del sistema cementante se reduce el caudal de 12 BPM a 6 BPM, normalmente este desplazamiento es realizado con dos bombas, colocando fuera de operación una de ellas, se consigue disminuir la densidad equivalente de circulación, para mantener un margen de operación seguro y no alcanzar el gradiente de fractura al final del desplazamiento.
6. Las pruebas de laboratorio se realizaron a una temperatura de 40 °F, simulando la temperatura del suelo marino, esta temperatura menor hace que el sistema cementante tenga un tiempo de fraguado mayor. Para este trabajo se tendrá un tiempo de cura de 28 días, como mínimo y no se realizara la perforación de una próxima fase.

En la Figura 5 se observa los resultados de la simulación realizada en un sistema cementante de densidad 15 lpg, en el cual la densidad equivalente de circulación llega a la fractura de la formación al término de la operación de cementación. Se observa el aumento de la densidad equivalente de circulación a medida de que el sistema cementante está siendo colocado en el espacio anular. Cuando una de las bombas triples es colocada fuera de operación se observa una caída de la presión de circulación.

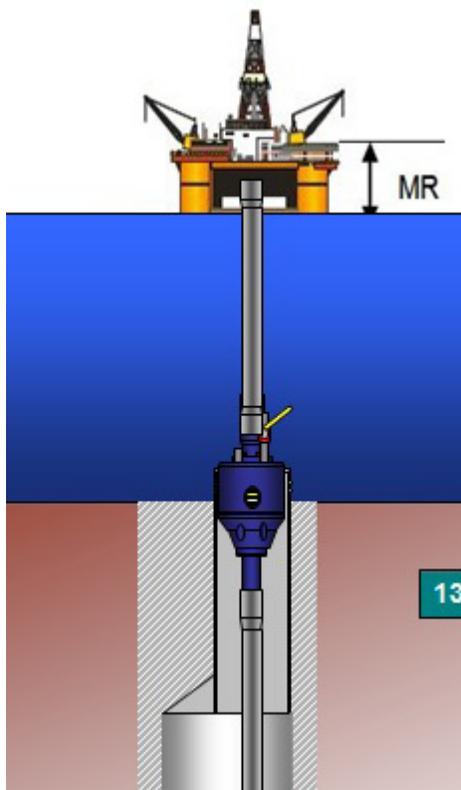


Figura 4. Esquema de pozo utilizado para anclaje de unidades marítimas de producción

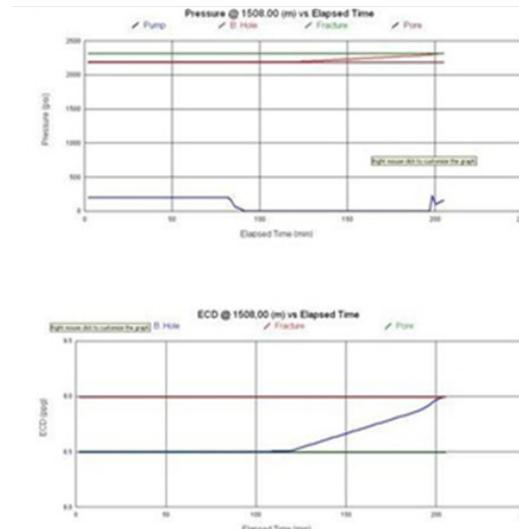


Figura 5. Simulación de un sistema cementante de 15 lpg

### SIMULACIÓN DE TEMPERATURA

En la Figura 6 se observa la simulación realizada considerando una temperatura del suelo marino de 40 °F, se muestra la profundidad alcanzada por el primero y último saco de cemento.

Se observa una temperatura de superficie de 80 °F, se evidencia un intercambio de calor con la profundidad de agua. Se muestra la temperatura del último saco que está cerca de 48 °F, al final cambia su tendencia, debido al gradiente geotérmico del pozo. El primer saco se calienta alrededor de 4 °F, debido al intercambio de calor en el espacio anular, y luego tiende a estabilizarse la temperatura con la del suelo marino. Se observan variaciones máximas de 1 °F entre las temperaturas mínimas del primer y último saco.

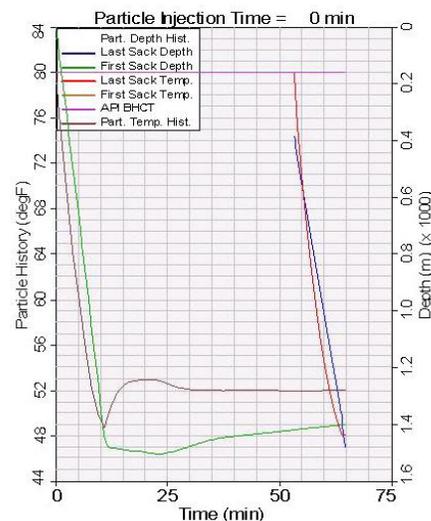


Figura 6. Simulación de temperatura del primer y último saco de cemento

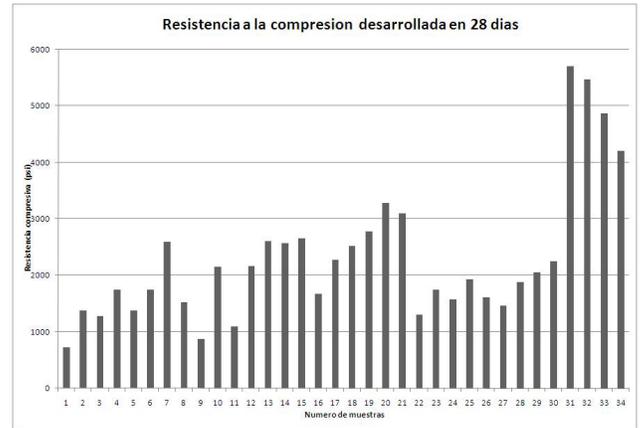
En la Figura 7, se muestra los valores de resistencia compresiva obtenida en ensayos de laboratorio para las 34 muestras desarrolladas. Valores de densidades de sistemas cementantes por encima de 14 lpg dan valores de resistencia compresiva por encima de 4200 psi. En las simulaciones realizadas, la densidad equivalente de circulación está muy próximo al gradiente de fractura para las formaciones no consolidadas, superficiales estudiadas en Rio de Janeiro, Brasil, para una profundidad de agua de 1400 m, por lo que no se recomienda sistemas cementantes con densidad superior a 14 lpg.

**Tabla 1.** Resultados de la resistencia compresiva de las muestras ensayadas

Sistema Cementante Nro.	Densidad	Rendimiento	Agua	Antiespumante (0.01-0.02 gpc)	Reductor de filtrado (0.05-1 gpc)	Aditivo multipropósito (0.05 - 1.2 gpc)	Microesferas	Dispersante gps	Dejersante 2 0.02-0.4 gpc	Controlador de filtrado gps	S001% BWOc	Antiespumante gps	Temperatura °F	Rc28 (Crush)	UCA28	Resistencia a la compresion
1	13	1,90	Mar	0,005	1								40	725		725
2	14	1,79	Mar	0,005	1								40	1375		1375
3	13	1,84	Mar	0,005		0,5							40	1275		1275
4	14	1,73	Mar	0,005		0,5							40	1750		1750
5	13	1,79	Mar	0,005		1							40	1375		1375
6	14	1,75	Mar	0,005		1							40	1750		1750
7	15	1,44	Mar	0,012	0,3								40	2500	2590	2590
8	13	1,94	Mar	0,012	0,6								40	1525		1525
9	13	2,33	Mar	0,012	0,2								40	875		875
10	13	1,94	Mar	0,012	0,6		3						40	2150		2150
11	14	1,78	Mar	0,012	0,6								40	1100		1100
12	14	1,59	Mar	0,012	0,6								40	2160		2160
13	14	1,56	Mar	0,012		0,4							40	2435	2605	2605
14	14	1,70	Mar	0,012		0,6	3						40	2570	2600	2600
15	14	1,73	Mar	0,012	0,6	0,3	3						40	2475	2650	2650
16	14	1,59	Mar	0,012		0,4							40	1675		1675
17	13	2,00	Mar	0,005	0,3	0,3	12						40	2280		2280
18	13	1,86	Mar	0,005	0,2	0,15	20						40	2458	2515	2515
19	13	1,76	Mar	0,005	0,15	0,15	12						40	2655	2780	2780
20	13	1,91	Mar	0,005	0,25	0,2	18						40	3045	3197	3197
21	13	1,76	Mar	0,012	0,15	0,15	12						45	3012	3090	3090
22	14		Dulce							0,8	0,02	45	1300		1300	
23	14		Mar							0,8	0,02	45	1741		1741	
24	14		Mar					0,05		1	0,02	45	1575		1575	
25	14							0,05		1	1	0,02	45	1933		1933
26	14							0,05		1	2	0,02	45	1616		1616
27	14							0,08		1,2	0,02	45	1458		1458	
28	14							0,12		1,2	0,02	45	1875		1875	
29	14								0,25	1	0,02	45	2050		2050	
30	14								0,3	1,2	0,02	45	2250		2250	
31	15	1,35	Mar	0,012		0,2	5						45	5412	5558	5558
32	14	1,44	Mar	0,012		0,2	7						45	5244	5327	5327
33	15	1,43	Mar	0,012	0,15		2						45	4771	4827	4827
34	15	1,44	Mar	0,012	0,3								45	4033	4087	4087

En la Figura 8, se observan 12 sistemas cementantes con una Resistencia Compresiva mayor a 2500 psi de un total de 34 muestras ensayadas en Laboratorio. Se separan estas muestras en 3 grupos de la siguiente manera:

- 1er grupo. Conteniendo 5 muestras: N° 7, 13, 14, 15 y 18 cuya resistencias compresivas se encuentran entre 2515 y 2650 psi.
- 2do grupo. Conteniendo 3 muestras: N° 19, 20 y 21 cuya resistencias compresivas están entre 2700 y 3300 psi.
- 3er grupo. Conteniendo 4 muestras: N° 31, 32, 33, y 34 cuya resistencias compresivas están por encima de 4200 psi.



**Figura 7.** Valores de resistencia compresiva de las 34 muestras

#### Muestra N° 7

Su diseño contempla una densidad 14,5 lpg con los siguientes aditivos: antiespumante y reductor de filtrado.

#### Muestra N° 13

Su diseño contempla una densidad 14 lpg con los siguientes aditivos: antiespumante y un aditivo multipropósito.

#### Muestra N° 14

Su diseño contempla una densidad 13,5 lpg con los siguientes aditivos: Antiespumante, aditivo multipropósito con un porcentaje de 3% de micro esfera.

#### Muestra N° 15

Su diseño contempla una densidad 13,5 lpg con los siguientes aditivos: antiespumante, reductor de filtrado y un aditivo multipropósito con un porcentaje de 3% de micro esfera.

#### Muestra N° 18

Su diseño contempla una densidad 12,5 lpg con los siguientes aditivos: Antiespumante, reductor de filtrado y un aditivo multipropósito con un porcentaje de 20% de micro esfera.

#### Muestra N° 19 y 21

Su diseño contempla una densidad 13 lpg con los siguientes aditivos: Antiespumante, reductor de filtrado y un aditivo multipropósito con un porcentaje de 12% de micro esfera.

#### Muestra Nro. 20

Su diseño contempla una densidad 12,5 lpg con los siguientes aditivos: Antiespumante, reductor de filtrado y un aditivo multipropósito con un porcentaje de micro esfera de 18%.

El grupo 3, tiene un peso entre 14 y 14,5 lpg que sobrepasa los requerimientos de Resistencia Comprensiva requerido en este estudio, siendo que los valores de densidad equivalente de circulación no dan margen de seguridad con respecto al gradiente de fractura en estas formaciones superficiales no consolidadas.

Para tener un margen de seguridad de 0,2 lpg entre la densidad equivalente de circulación y el gradiente de fractura se pueden utilizar los siguientes sistemas cementantes de las muestras: 18, 19, 20, 21. Las muestras 18, 19, 20 y 21 son sistemas cementantes que están compuestos por un antiespumante, un reductor de filtrado, un aditivo multipropósito y micro esferas. Las muestras 18 y 20 son ambas de densidad 12,5 lpg, las 19 y 21 tienen una densidad de 13 lpg, poseen los mismos aditivos que las muestras 18 y 20, variando su concentración, pero las 19 y 21 tienen menor concentración de micro esferas con 12%, la muestra 19 posee menor concentración de antiespumante que la 21, siendo los demás aditivos y concentración iguales, la densidad es de 13 lpg, que son factibles de utilizar técnicamente según las simulaciones realizadas en el presente estudio.

Se recomienda la utilización de la muestra 19 ya que cumple con los requisitos exigidos en el presente estudio.

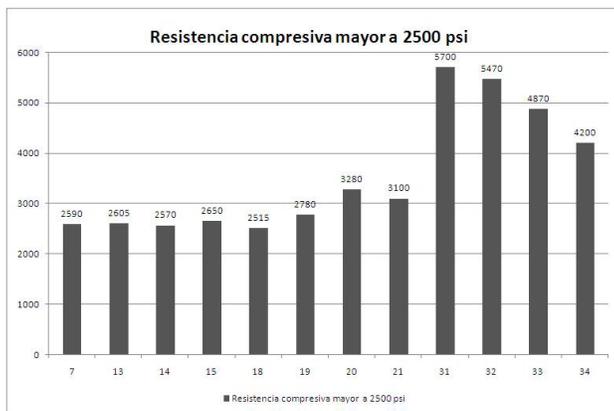


Figura 8. Sistemas cementantes con resistencia compresiva mayor a 2500 psi.

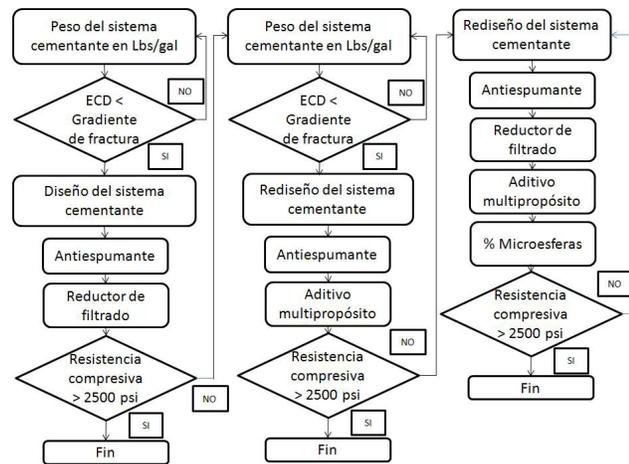


Figura 9. Arbol de decisión para diseñar el sistema cementante

## CONCLUSIONES

Se desarrollaron sistemas cementantes para aplicación Costa Afuera con una resistencia compresiva mayor a 2500 psi, donde la densidad equivalente de circulación esta entre los gradientes de poro y de fractura en formaciones no consolidadas, en profundidad de agua de 1400 m, donde la temperatura del asuelo marino es de 40 °F. “Es novedoso en Brasil el desarrollo de sistemas cementantes en agua profundas, con temperaturas del suelo marino relativamente bajas y con una alta resistencia compresiva”.

Se obtuvieron 4 muestras que cumplen con el requisito de una Resistencia Compresiva de 2500 psi desarrollada en 28 días, dos de ellas son de 12,5 y dos de 13 lpg. En las cuatro muestras fue necesario el uso de un sistema a base de micro esferas. De las 4 muestras la recomendación es usar la muestra 19 que poseen 12% de micro esferas, las muestras 18 y 20 poseen 20% y 18% respectivamente. La aplicación de la técnica de distribución del tamaño de partícula, basada prácticamente en la utilización de sistemas con micro esferas de diferentes granulometrías ayudan al aumento de la resistencia compresiva para sistemas cementantes considerados de baja densidad, al tener más relación de solido disminuye la permeabilidad y la porosidad.

Sistemas cementantes convencionales con densidades igual o superior a 14 lpg se obtienen resistencias compresivas por encima de 2500 psi, que no son utilizables en este estudio debido que al final del desplazamiento no se tiene diferencia entre la densidad equivalente de circulación y el gradiente de fractura.

En la tabla 1 se observa que hay una relación establecida entre los diferentes tipos de aditivos, como interactúan

entre ellos y su concentración con la resistencia compresiva requerida y es esta combinación que hace posible llegar a los objetivos planteados, ya que de manera individual cada aditivo está formulada para una función específica, entonces es el sistema cementante como un todo, quien logra satisfacer las necesidades operacionales y determinado principalmente por la composición química del cemento que se está utilizando. El peso del sistema cementante ayuda al desarrollo de la resistencia compresiva, pero en este trabajo está limitado al gradiente de fractura de formaciones superficiales, y a la ventana operacional utilizada.

El programa "Cement" que se utilizó para realizar las simulaciones del proceso de desplazamiento del sistema cementante, de presión de fondo de pozo entre los gradientes de presión de poro y de fractura, es una herramienta útil a la hora de obtener el peso máximo a utilizar en un sistema cementante, así como la densidad equivalente de circulación.

## NOMENCLATURA

Bbls: Barriles.  
BPM: Barriles por minutos.  
cm<sup>3</sup>: Centímetros cúbicos.  
°F: Grados Fahrenheit.  
gpc: Galones por pie cúbico.  
gps: Galones por sacos.  
lpg: Libras por galón.  
psi: Libras por pulgadas cuadradas.  
m: Metros.  
sc: Sacos.

## AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de cementación y revestimiento. Sercim, Macae, Rio de Janeiro. Petrobras por permitir el estudio de este proyecto. A la Universidad Central de Venezuela: A la Escuela de Ingeniería Mecánica y al Departamento de Post Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

## REFERENCIAS

CHAN, G., FULLER, G., FAUL, R. (2005). Deepwater Cementing Best Practices for the Riserless Section. American Association of Drilling Engineers.

DAJANI R, & CURTIS, J. (2009). Guidelines for Appropriate Application of Non-Foamed Ultra Lightweight Cement Slurries. SPE/IADC nro.119535.

KULAKOFSKY, D., ARAUJO, O., SELF, F., MORA, A., HENDRIKS, P. (2005). New Ultra-lightweight Cementing Technology Proven with Case Studies, Combines Benefits of Current Leading Methodologies. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Kingdom of Bahrain.

LIN, F. & MEYER, C. (2006). Hydration kinetic modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure. Cement and concrete research.

LOPEZ, J., GARRETT, D., ZANATY, A., WAHEED, A. (2009). Successful Mitigation of Deepwater Shallow Flows in the East Mediterranean Region – Case Histories. SPE 120399.

MATA, F., DÍAZ, C., VILLA, H. (2006). Ultralightweight and Gas Migration Slurries: An Excellent Solution for Gas Wells. SPE 102220.

MUELLER, D. & EID, R. (2006). Characterization of the early-Time Mechanical Behavior of Wells cements Employed in Surface Casing Operations. IADC / SPE 98632.

PIOT, B., FERRI, A., MANANGA, S., COLLINS, K., VIELA, D. (2001). West Africa Deepwater Wells Benefit from Low Temperatures Cements. SPE Nro 67774.

RAVI, K. & BOSMA, M. (2005). Improve the economics of oil and gas wells by reducing the risk of cementing failure. Publicación del Colegio de Ingenieros Petroleros de México, CIPM.

SCHUBERTH, P. & WALKER, M. (2000). Shallow Water Flow Planning and Operations: Titan No. 1 Exploration Well, Deepwater Gulf of Mexico. SPE/IADC nro. 65751.

WAHEED, A., COCKRAM, M., RASHPETC, O., BAHR, M. (2002). Foam Cementing Controls Deepwater Shallow Flow in the East Mediterranean. SPE Nro 74402.