

**CONGRESO DE PERFORACION, TERMINACION, REPARACION Y
SERVICIO DE POZOS**

**CEMENTACION PRIMARIA CON LECHADAS DE CEMENTO DE BAJA
DENSIDAD DE ALTA RESISTENCIA A LA COMPRESION**

JOSE MAGALLANES, HALLIBURTON ARGENTINA

JORGE PONCE , PAN AMERICAN ENERGY LLC

- **Abstracto**

El objetivo de este trabajo es destacar los resultados y experiencias obtenidas por Halliburton y Pan American Energy en diferentes yacimientos del área operada por PAE en la Cuenca Golfo San Jorge utilizando lechadas de baja densidad con alta resistencia.

La experiencia se inició en el yacimiento denominado Anticlinal Funes. En los últimos pozos perforados de este yacimiento se produjo un decrecimiento en el éxito de la cementación primaria de la cañería de producción; lo cual trajo aparejado costos y tiempos adicionales para la remediación de la mala cementación. Estos malos resultados se deben a diferentes factores que derivan de la depletación del reservorio y del método utilizado de cementación. Al analizar las posibles alternativas para solucionar estos malos resultados aparecen como opciones la modificación del método de cementación y del diseño de la lechada de cemento utilizada.

La elección del sistema de cementación apropiado se ajustará para alcanzar las necesidades específicas de las condiciones del pozo y a los requerimientos del ciclo de vida esperado. Dado que dos pozos no son iguales, los requerimientos específicos del pozo varían ampliamente incluyendo los costos.

En este reporte se muestran los resultados obtenidos en la aplicación del sistema de cementación óptimo para estos pozos. Estos resultados se pudieron medir no solo técnicamente (adherencia de cemento) sino también en relación a los costos y tiempos asociados a la completación del pozo.

- **Introducción**

Para el caso que se presenta se estaba frente a una necesidad de mejorar el rendimiento de la cementación primaria de la cañería de producción de un determinado grupo de pozos del yacimiento Anticlinal Funes. Esta área cuenta con ciertas características especiales respecto del resto de los yacimientos. Son pozos someros con capas productivas a profundidades cercanas a la cañería de superficie, es decir que se debe cubrir con cemento todo el pozo abierto. Además de ser un área de varios años en desarrollo, ciertas capas se encuentran depletadas.

La cementación primaria en principio se realizaba en una única etapa con *lechadas de cemento de baja densidad extendidas* con una densidad aproximada de 1600 gr/lit. Sin embargo, a causa de que existen capas de bajo gradiente de fractura y/o baja presión poral, la presión hidrostática generada con el cemento era superior a esos gradientes por lo que se producía la admisión de esas zonas y el cemento no alcanzaba a llegar a la cañería guía y cubría solo parte del intervalo. Entonces se debía realizar cementaciones auxiliares para completar la aislación de las capas de interés.

Ante este problema se debieron analizar que soluciones eran las adecuadas y lograr el éxito de la aislación total de las zonas. Una de estas soluciones que se consideraron fue modificar el método de la cementación y realizarla en 2 etapas colocando un Dispositivo Doble Etapa. Este se ubicaría en la mitad del intervalo a cementar y se cementaría con la misma *lechada de cemento de baja densidad extendida*. Los resultados logrados de aplicar esta alternativa fueron variables. La cementación en dos etapas trae aparejado ciertas desventajas que se manifestaron en los resultados obtenidos.

La cementación que se efectuaba en dos etapas tenía el perjuicio de no poder reciprocarse la cañería durante la segunda etapa, esto ocasionaba que el flujo de los espaciadores y lechada de cemento no fuese uniforme en el espacio anular. Luego para realizar el perfil de cemento se debía esperar que montara el equipo de Terminación para primero rotar el Dispositivo Doble Etapa y después poder

correr el perfil. Cuando se corría el perfil de cemento se advertía que existía adherencia de pobre calidad a la cañería y a la formación, principalmente a partir del Dispositivo de Doble Etapa hacia arriba hasta la cañería guía. Por consiguiente, para remediar los intervalos de falta de cemento adherido se debían hacer cementaciones auxiliares.

Por todo esto, se indagó en la utilización de otras alternativas como lo son las lechadas de baja densidad y definir cual método es el óptimo para la cementación primaria de estos pozos en particular.

- **Desarrollo**

Como se mencionó anteriormente, los pozos del yacimiento Anticlinal Funes son pozos medianamente someros, entre 900 y 1100 m con una cañería de superficie 9 $\frac{5}{8}$ " de 100 m y una cañería de producción 5 $\frac{1}{2}$ " hasta el fondo descrito. La perforación del tramo principal de 8 $\frac{1}{2}$ " se completa aproximadamente en 3 días y luego se realiza maniobras de calibre antes y después del perfilaje. El lodo base agua posee una densidad promedio de 1150 gr/lt.

A partir de poca profundidad se encuentran capas productoras que deben ser aisladas con cemento. Por tal razón, la longitud de cemento a ubicar es de 800 a 1000 m hasta el zapato de la cañería guía. Esta cementación con anillo largo indica realizarla con lechadas de baja densidad debido al cambio de gradiente hidrostático del fluido de inyección frente a la lechada de cemento.

Basados en que el empleo de etapas múltiples no resultó en todos los pozos, se pasó a la etapa de investigar soluciones basadas en sistemas de lechadas de baja densidad. De la variedad de lechadas de cemento de baja densidad diseñadas para la cementación primaria podemos encontrar en general tres categorías, las cuales se adecuan una u otra a los requerimientos específicos de un pozo en particular, a saber:

- Sistema Convencional de Cemento Extendido con Agua
- Sistema de Cemento Espumado
- Sistema de Cemento Extendido Especial

Las lechadas de baja densidad utilizadas cuando el campo tenía las presiones originales de reservorio anteriormente habían sido las *extendidas con agua*. El agua (1000 gr/lt) es muy efectiva para disminuir la densidad, pese a que la cantidad de agua agregada a la lechada es importante para producir tal efecto. Para tomar o absorber ese exceso de agua se agregan materiales livianos con un alto requerimiento de agua. Uno de los aspectos a tener en cuenta con estas lechadas es que poseen resistencias a la compresión inferior a la de una lechada convencional de 1800 ó 1900 gr/lt. Ya que a que a mayor porcentaje de agua, menor densidad y menor resistencia a la compresión; estas lechadas tienen un rango de densidades útil que va de 1450 a 1800 gr/lt.

En la Fig. 1 se puede observar los distintos sistemas de lechadas con su rango de densidades, encontrando las *lechadas extendidas con agua* y los diferentes materiales que utilizan para tomar ese exceso de agua que se agrega para reducir la densidad. Dentro de estos materiales podemos enumerar a la Bentonita, Rafaelita, Gilsonita, Fly Ash, harina de sílice, Diacel o tierras diatomáceas, Metasilicato de sodio y Perlita entre muchos otros.

El uso de estas *lechadas extendidas con agua* está relacionado principalmente a su bajo costo, sin embargo tienen ciertas limitaciones como se menciona anteriormente, que es su resistencia a la compresión. Al ser baja origina problemas de desempeño y no aseguran una aislación zonal a lo

largo de la vida del pozo.

La *lechada de baja densidad extendida con agua* utilizada para estos pozos tenía 1650 gr/lt cuando se realizaba en una única etapa, tenía un gradiente hidrostático superior al gradiente de fractura de ciertas formaciones, provocando admisiones y pérdidas de circulación y no logrando alcanzar el tope de cemento requerido.

Cuando se cambió el diseño del trabajo por la cementación en *dos etapas* se continuó utilizando una lechada similar en densidad, logrando alcanzar el cemento a la cañería guía. Sin embargo, con el correr de las aislaciones de la cañería de producción, se fue deteriorando en forma notable la calidad de adherencia de cemento al casing y a la formación.

Ante la necesidad de optimizar la adherencia del cemento en toda la zona de interés se analizaron las diversas causas que influían en los malos resultados. Se determinó que la ausencia de *reciprocación* de la cañería en la segunda etapa es uno de los factores preponderantes que influyen notablemente en la falta adherencia, sumados a la depleción de las zonas.

A partir de esta determinación se buscaron soluciones para revertir la situación, siendo una alternativa volver a la cementación en una única etapa con una lechada de baja densidad de una densidad mucho menor a la utilizada. Al efectuar la cementación en una única etapa se contaba con la posibilidad de reciprocación de la cañería durante el bombeo de fluidos y así obtener una limpieza uniforme del pozo en todo el espacio anular para mejorar la adherencia de cemento en la parte superior de la zona de interés. Teniendo en cuenta los otros tipos de lechada livianas mencionadas anteriormente tenemos:

- lechadas de Cemento Espumadas

Las *lechadas de baja densidad espumadas*, poseen muchos beneficios tales como:

- lechada de baja densidad con densidad ajustable en locación con solo modificar la concentración del gas, haciéndolo muy flexible operacionalmente
- resistencia a la compresión similar a lechadas extendidas de mayor densidad
- buena remoción de lodo debido a su gran energía de limpieza
- buen control de migración de gas y flujo de agua ya que es un sistema expansivo
- buenas propiedades de elasticidad o flexibilidad
- buen aislante por su baja permeabilidad

A pesar de todas estas utilidades, se advirtió que la aplicación del *cemento espumado* a estos pozos incluía ciertos riesgos y desventajas, puesto que el cemento al tener que llegar cerca de la superficie existía la posibilidad de que la expansión del gas de la lechada se descontrolara y no fuese posible obtener una densidad homogénea a lo largo del anillo de cemento. Operacionalmente implica que tanto la compañía de servicio que cementa como el equipo deban estar muy bien coordinados para manejar la presión anular, lo cual no siempre es posible. Hay equipamiento adicional a usar que puede ser propenso a fallar y del cual depende en gran parte el éxito de esta técnica. Además por los bajos gradientes de fractura en algunas profundidades, el bombeo de una lechada cap cement a través del espacio anular estaba muy limitado por la contrapresión ejercida.

Frente a estas limitaciones de las alternativas con las que contábamos, para obtener la lechada de baja densidad que se adapte particularmente a este tipo de pozos, se debió reenfocar el problema y volver a las premisas básicas de diseño de lechadas. Analizando nuevamente la definición de densidad para el caso general tenemos:

$$r_{LECHADA} = \frac{\sum M}{\sum V} = \frac{M_{CEMENTO} + \sum M_{ADITIVOS} + M_{AGUA}}{V_{CEMENTO} + \sum V_{ADITIVOS} + V_{AGUA}} \quad (1)$$

donde:

r = densidad

M = masa

V = volumen

expresando el volumen como la relación masa sobre densidad, la ecuación anterior quedaría de la siguiente forma:

$$r_{LECHADA} = \frac{M_{CEMENTO} + \sum M_{ADITIVOS} + M_{AGUA}}{\frac{M_{CEMENTO}}{r_{CEMENTO}} + \sum \frac{M_{ADITIVOS}}{r_{ADITIVOS}} + \frac{M_{AGUA}}{r_{AGUA}}} \quad (2)$$

desde que:

$$M_{ADITIVOS} = M_{CEMENTO} * X_{ADITIVOS} \quad (3)$$

donde:

X = concentración o porcentaje

entonces la ecuación (2) quedaría:

$$r_{LECHADA} = \frac{M_{CEMENTO} + \sum M_{CEMENTO} * X_{ADITIVOS} + M_{AGUA}}{\frac{M_{CEMENTO}}{r_{CEMENTO}} + \sum \frac{M_{CEMENTO} * X_{ADITIVOS}}{r_{ADITIVOS}} + \frac{M_{AGUA}}{r_{AGUA}}} \quad (4)$$

ordenando:

$$r_{LECHADA} = \frac{M_{CEMENTO} * (1 + \sum X_{ADITIVOS}) + M_{AGUA}}{M_{CEMENTO} * \left(\frac{1}{r_{CEMENTO}} + \sum \frac{X_{ADITIVOS}}{r_{ADITIVOS}} \right) + \frac{M_{AGUA}}{r_{AGUA}}} \quad (5)$$

además sabemos que:

$$M_{AGUA} = M_{CEMENTO} * R_{AGUA/CEMENTO} + \sum M_{ADITIVOS} * N_{AGUA} \quad (6)$$

donde:

$R_{AGUA/CEMENTO}$ = relación agua-cemento

N_{AGUA} = necesidad de agua de cada aditivo

operando

$$M_{AGUA} = M_{CEMENTO} * R_{AGUA/CEMENTO} + \sum M_{CEMENTO} * X_{ADITIVOS} * N_{AGUA} \quad (7)$$

$$M_{AGUA} = M_{CEMENTO} * (R_{AGUA/CEMENTO} + \sum X_{ADITIVOS} * N_{AGUA}) \quad (8)$$

si reemplazamos esta igualdad (8) en la ecuación (5):

$$r_{LECHADA} = \frac{M_{CEMENTO} * (1 + \sum X_{ADITIVOS}) + M_{CEMENTO} * (R_{AGUA/CEMENTO} + \sum X_{ADITIVOS} * N_{AGUA})}{M_{CEMENTO} * \left(\frac{1}{r_{CEMENTO}} + \sum \frac{X_{ADITIVOS}}{r_{ADITIVOS}} \right) + \frac{M_{CEMENTO}}{r_A} * (R_{AGUA/CEMENTO} + \sum X_{ADITIVOS} * N_{AGUA})} \quad (9)$$

eliminando factores comunes:

$$r_{LECHADA} = \frac{1 + \sum X_{ADITIVOS} + R_{AGUA/CEMENTO} + \sum X_{ADITIVOS} * N_{AGUA}}{\frac{1}{r_{CEMENTO}} + \sum \frac{X_{ADITIVOS}}{r_{ADITIVOS}} + \frac{R_{AGUA/CEMENTO}}{r_{AGUA}} + \frac{\sum X_{ADITIVOS} * N_{AGUA}}{r_{AGUA}}} \quad (10)$$

Analizando esta última ecuación podemos observar que para disminuir la densidad de la lechada las alternativas que disponemos son: disminuir el valor del numerador o incrementar el valor del denominador. Estudiando cada término del numerador tenemos que:

- para el 2º término la cantidad de aditivos está sujeta a la composición de la lechada y sus necesidades a las que va a ser aplicada, por ello la disminución de estas cantidades no puede ser llevada a cabo sin tener en cuenta lo anterior
- para el 3º término la relación agua-cemento puede ser disminuida, sin embargo esta reducción está limitada por la necesidad básica de agua que tiene el cemento para las reacciones de hidratación y fragüe
- así también para el 4º término la necesidad de agua de cada aditivo no puede ser modificada y permanece constante

En cuanto al denominador:

- para el 1º término se puede disminuir la densidad del cemento, pero la misma está en un rango de densidades, por ejemplo para el cemento clase “G” va de 3.14 a 3.16, es decir que este término permanece constante a menos que se use un cemento especial como el TXI LW con una densidad de 2.78 lo cual no mejora mucho la situación y es poco lo que se logra.
- en el 2º término tenemos que la concentración de aditivos no puede ser modificada por lo anteriormente descrito, sin embargo la densidad de los aditivos puede ser disminuida utilizando materiales especiales que se encuentran en la industria o en otras. Si disminuimos bastante la densidad de los aditivos o de alguno de ellos, entonces este 2º término se vuelve mayor y de ese modo disminuimos la densidad de la lechada
- el 3º término permanece constante desde que la relación agua-cemento no puede ser modificada ampliamente y la densidad del agua es constante
- y por último el 4º término tampoco puede ser incrementado desde que la concentración de aditivos, el requerimiento de agua de cada uno de ellos, como así también la densidad del agua no pueden ser cambiados

Por lo tanto, la única manera física de disminuir la densidad de la lechada de cemento es incorporando materiales con muy baja gravedad específica, inclusive inferior al agua. Esto resuelve el problema de la densidad pero también estos materiales deben poseer propiedades particulares que le permitan a la lechada tener buena resistencia a la compresión mas otras ciertas propiedades como flexibilidad, etc. Si buscamos este tipo de material en la industria que se pueda utilizar en las lechadas de cemento, es decir que sean compatibles y que sumen beneficios a la lechada para el fin que son agregados, encontramos a las *microesferas huecas*.

Los sistemas de *lechadas de baja densidad con microesferas huecas*, han sido aplicados con éxito en diferentes partes del mundo desde la década de 1980. Este tipo de lechadas pertenecen a la familia de sistemas de baja densidad con alta relación sólido-líquido y alta resistencia a la compresión. Sus componentes principales son las *microesferas huecas* que por su composición y estructura, su gravedad específica es bastante menor a la del agua. El principal avance es que las nuevas esferas poseen altísimas resistencia que permiten usarlas en aplicaciones mas exigentes.

Este sistema de *lechada de baja densidad compuesta por microesferas huecas* presenta en este caso ciertas ventajas respecto a los otros sistemas mencionados, ya que provee alto desempeño en un amplio rango de bajas densidades con resistencia a la compresión comparable a lechadas convencionales, sin tener los inconvenientes de las *lechadas de cemento espumadas*.

Las propiedades principales de estas lechadas son las de ser diseñadas acorde a las condiciones del pozo y por lo tanto, como un ecualizador de un equipo de música, se van variando las propiedades de la lechada para ajustarla exactamente a las necesidades del pozo. Además de esta ventaja, contamos con:

- Características de lechada que pueden ser adecuadas para lograr en un amplio rango de densidades (750 a 1700 gr/lit), diferentes requerimientos como reología, control de filtrado, etc.
- Bajo contenido de agua, por el reemplazo de esta por las *microesferas*
- Resistencia a la compresión relativamente altas
- Módulos de Young altos
- Rápido desarrollo de resistencia temprana
- Baja porosidad y permeabilidad
- Compatible con todos los aditivos de cementación

El valor agregado que incorpora este tipo de sistema es:

- Aplicable en situaciones de severas pérdidas de circulación, formaciones débiles, zonas de gradientes de fractura bajos, largas columnas de cemento
- Incremento en el éxito de la cementación primaria en áreas de bajo gradiente de fractura
- Reducción en los costos de la cementación primaria asociados con herramientas de etapas múltiples
- Incremento en el éxito de la cementación primaria, por lo tanto, reducción de los costos de remediación
- Disminución del tiempo de fragüe WOC

Diseño de Lechadas de Cemento con Microesferas

Las *microesferas huecas*, poseen aire en su interior y su gravedad específica es muy baja (s.g. de 0.30 a 0.70). Dependiendo de la aplicación hay diseños especiales del producto que tienen

diferentes densidades. A su vez, estas *microesferas huecas* por su composición (alto contenido de óxido de silicio) y tamaño le confieren al cemento fraguado mayor resistencia a la compresión.

En las lechadas livianas tradicionales, los aditivos no son ciertamente aditivos alivianantes. El agua es el aditivo alivianante realmente. Aunque los aditivos alivianantes son requeridos para formular la lechada, no reducen verdaderamente la densidad de la lechada. Es decir que estos aditivos nos permiten tomar el extra de agua que está siendo agregada para reducir la densidad.

En las lechadas con *microesferas*, estas al igual que el agua también actúan como material alivianante. Desde que la resistencia a la compresión es directamente proporcional a la relación cemento-agua, al reducir la relación de agua, por el reemplazo de parte de esta por las *microesferas*, se incrementa el desarrollo de resistencia temprana y se reduce el tiempo de fragüe (WOC), suministrando un cemento de mejor calidad (baja permeabilidad) a bajas densidades que los obtenidos con las lechadas extendidas con agua.

El diseño de estas lechadas tiene sus consideraciones especiales a tener en cuenta para las condiciones actuales del pozo. Debido a que las *microesferas* son sensibles a la presión que son expuestas, bajo condiciones de fondo de pozo algunas esferas pueden romperse (Fig. 2). Si el porcentaje de esferas es importante, entonces habrá una diferencia entre la densidad y rendimiento de la lechada bajo condiciones de superficie y de fondo de pozo. A mayor cantidad de esferas rotas, mayor es la densidad y menor el rendimiento. A esto se le suma que las propiedades de la lechada (bombeabilidad, viscosidad, filtrado) varían de acuerdo a la variación de la densidad y rendimiento.

Es por ello que existen diversos tipos de estas *microesferas* que deben tenerse en cuenta cuando se diseña la lechada. Estas partículas huecas se clasifican según su tamaño y resistencia a la rotura, variando conjuntamente la gravedad específica. La fuente de estas *microesferas* es de un subproducto de procesos industriales. También son producidas en forma sintética para tal fin, fabricadas a partir de *vidrio* borosilicato, cuya propiedad es ser más resistentes al esfuerzo de corte y a la presión hidrostática con una gravedad específica mucho menor que las otras descritas anteriormente. Para este trabajo de cementación del pozo Anticlinal Funes, se utilizó *microesferas huecas de vidrio* o *HGS (Hollow Glass Spheres)* como se las mencionará en este trabajo en adelante.

El uso de menos cantidad de agua y más contenido de sólidos en la lechada se ve reflejado en un incremento de resistencia a la compresión. Esta reducción también puede provocar un aumento en la reología de la lechada, por lo que es necesario en ciertos casos, adicionar aditivos dispersantes para compensar el aumento de viscosidad por la reducción de agua.

Este tipo de lechada es compatible con todos los aditivos de cementación, es decir que además de los cuatro principales componentes, se incorporan reductores de filtrado, retardadores, dispersantes, antiespumantes, aditivos para control de gas, sal, etc.

Selección de Microesferas HGS

Una consideración adicional del diseño es que tipo de *microesfera hueca* se utilizará en la lechada. Las dos opciones principales son las obtenidas de un subproducto puzolánico y las obtenidas de la manufacturación específica de microesferas de vidrio borosilicato *HGS*.

Las *microesferas* derivadas de un subproducto son más económicas que las de vidrio, por ello la elección de una u otra estará determinada por una razón específica. Dejando de lado el costo

diferencial, las *microesferas de vidrio HGS* tienen ciertos beneficios sobre las derivadas de un subproducto, tales como la gravedad específica y la estabilidad bajo presión (Fig. 3 y 4).

Las características principales de las *HGS* son enumeradas a continuación:

- Rango de densidades de 0.12 a 0.60 gr/cm³
- Tamaño de partícula de 10 a 135 µm
- Resistencia a la ruptura de 250 a 18,000 psi
- Color blanco
- Espesor de Pared de 2 a 3 µm
- Material: vidrio de alta resistencia a la temperatura, estable químicamente, con una composición cercana a la del vidrio Pirex
- Área superficial mínima, generando bajas viscosidades
- Sin ángulos, esquinas o bordes, siendo no abrasivas, dando mayor lubricidad y mejorando el flujo
- Fácil de procesar
- Relación de aspecto = 1

Dentro de la gama de *HGS* aplicables a las lechadas de cemento, tenemos los siguientes rangos:

▪ Rango de densidades de 0.38 a 0.60 gr/cm ³	
▪ Tamaño de partícula de 10 a 90 µm	
▪ Resistencia al Colapso de 4,000 a 18,000 psi	
▪ Denominación	Densidad [gr/cm ³]
HGS-2000	0.32
HGS-3000	0.35
HGS-4000	0.38
HGS-5000	0.38
HGS-6000	0.46
HGS-10000	0.60
HGS-18000	0.60

Esta denominación está referida a la resistencia a la ruptura que poseen las *HGS* con el 90% de supervivencia y su densidad bajo esa presión hidrostática. Es decir que las HGS-2000 bajo 2000 psi de presión hidrostática sobreviven un 90% de *HGS* y su densidad es de 0.32 gr/cm³ a esa presión. En el gráfico de la Fig. 5 se presentan varios comportamientos de diferentes *HGS* cuando se les aplican presión hidrostática.

Si la presión de fondo de pozo es menor que la presión de trabajo de las *HGS*, la densidad de la lechada en superficie y pozo abajo es esencialmente la misma, haciendo menos complejo el diseño y la operación. Si se seleccionan las correctas *HGS*, la gravedad específica en fondo de pozo de estas será menor que las derivadas de un subproducto, lo cual significa que se demandará menos aditivo.

En las lechadas convencionales extendidas por agua, el agua es el único aditivo alivianante y por ello el cálculo de requerimiento de agua para generar la densidad deseada es directo, y por consiguiente, fácil de llevar a cabo.

En las lechadas con *HGS*, al tener dos aditivos alivianantes (agua y *HGS*), se tiene combinaciones infinitas de requerimientos de agua y concentraciones de *HGS* que todas procurarán la densidad

correcta. Desafortunadamente la mayoría de ellas no serán utilizables ya que otros parámetros como viscosidad y resistencia se verán afectados enormemente. Para bajas relaciones de agua, la lechada será demasiado viscosa; y para bajas concentraciones de microesferas, la lechada será demasiado fluida.

La determinación de la relación correcta de agua y *HGS* para obtener una lechada de cemento bombeable está en función de la distribución de partículas que conforman el empaquetamiento tridimensional. Al utilizar más de un tamaño de partículas el arreglo espacial que se consigue es más cerrado. Es decir, si tenemos partículas esféricas de un cierto tamaño en un empaquetamiento hexagonal, que es el arreglo espacial más cerrado, que luego son llenados los espacios remantes entre ellas con esferas más pequeñas para dar un empaquetamiento más cercano y esos espacios sobrantes son nuevamente llenados con partículas más finas; lo que conseguimos es reemplazar parte del agua de exceso de la lechada y por consiguiente obtenemos lechadas de mucha mayor resistencia a la compresión (Fig. 6).

Si algunas de estas partículas de un tamaño diferente al del cemento, son de una gravedad específica mucho menor que la del agua, lo que obtenemos es una reducción importante en la densidad sin utilizar excesiva agua. Sin embargo, el agregado de partículas con diferentes tamaño esta limitado por la viscosidad de la lechada y por el requerimiento mínimo de agua que necesita el cemento para producir las reacciones de hidratación en el fragüe. En teoría para un empaquetamiento de 3 tamaños de partículas, la relación deseada de tamaños es de 1:7:38, sin embargo en la práctica se ha visto que la relación debe ser del orden de 1:10:100. Esto es debido basicamente a que las partículas no son perfectamente esféricas, no tienen un solo diámetro sino que obedecen a una distribución de partículas y por otro lado cuando se acomodan lo hacen aleatoriamente, ya que están influenciadas por las fuerzas electrostáticas que existen entre ellas y por ende los empaques no son perfectos.

Si consideramos la partícula de cemento la de menor tamaño, nos queda definida aproximadamente la cantidad de *HGS* que deben estar presentes en la mezcla cemento-*HGS*-agua. Sin embargo, esta es una aproximación primaria, ya que hay que tener muy presente que las partículas de cemento no son esferas, sino que su forma es muy irregular con ángulos y aristas. Por lo tanto a pesar de que se puede hacer un primer acercamiento al diseño usando cualquiera de los tantos modelos que existen en la literatura para optimizar la lechada, es imprescindible el ajuste de la relación correcta agua-*HGS* en laboratorio para una densidad dada.

Asimismo, si se utilizara cemento con un tamaño de partícula mucho menor al utilizado normalmente, se obtendrían lechadas con altas resistencias tempranas debido a su gran área superficial. Por ejemplo el cemento clase “C” posee un área superficial de 2000 a 2800 cm²/gr frente al cemento clase “G” de 1800 cm²/gr o frente al cemento clase “A” con 1500 cm²/gr.

En la Fig. 7 se puede observar la distribución granulométrica de las partículas de cemento, *HGS* y aditivos.

Diseño en Laboratorio

El diseño de la lechada de cemento en laboratorio comienza cuando se determina la densidad necesaria para el trabajo de cementación, además de fijar los valores máximos de filtrado y reología, el tiempo de bombeabilidad necesario teniendo en cuenta el tiempo de la operación.

Una vez fijado los aditivos que van a componer la lechada, el tipo de *HGS*, la densidad en condiciones de fondo de pozo, la presión a la que va a estar sometida la lechada, la temperatura de

circulación; se inician con la preparación de la lechada que considera aspectos específicos en cuanto a la adición de las *HGS* a la lechada. Esto es contemplando que se mezclan todos los aditivos con el cemento en el agua con la mezcladora sin agregar las *HGS*. Estas se incorporan luego de sacar la lechada de la mezcladora y se mezclan con una espátula.

Luego de la preparación de la lechada, se realiza la determinación de la densidad en superficie, reología a temperatura ambiente, agua libre y sedimentación. En cuanto se satisfacen estas propiedades, se continúa con la presurización de la lechada durante 5 minutos con una presión igual a la que va a estar sometida en el fondo de pozo.

A partir de ahí, se determina la densidad y se realizan los ensayos de reología, filtrado, bombeabilidad y resistencia a la compresión en condiciones de temperatura de fondo. En caso de no alcanzar con los parámetros primordiales, se deberán realizar los ajustes tantas veces como sea necesario.

Para destacar es que un diseño de partículas acorde tiene relación directa con el filtrado o sea que se logran bajos valores de filtrado como beneficio adicional sin usar concentraciones altas de aditivos y en algunas aplicaciones no son necesarios.

Al utilizar *HGS*, siempre que no se supere la presión limitante de rotura, se puede considerar que la densidad y el rendimiento constante desde la superficie hasta las condiciones de fondo de pozo.

La composición y parámetros de la lechada utilizada en este trabajo (Fig.8) son los siguientes:

Cemento “G” + *HGS* + Reductor de Filtrado + Retardador + Reductor de Fricción + Antiespumante

Parámetros	Valores
Densidad (lb/gal) @ 1000 mt	12.00
Rendimiento (lt/bolsa * 50 kg)	74.50
Requerimiento Agua (lt/bolsa * 50 kg)	37.60
Bombeabilidad (min)	300
Filtrado (cc/30 min)	36
Agua Libre (%)	0
300 rpm	98
200 rpm	69
100 rpm	29
60 rpm	31
30 rpm	22
VP a 1000 mt	76
YP a 1000 mt	7
n' a 1000 mt	0.6379
k' a 1000 mt	0.0139
Resist. a la Compr. (psi a 4:30 hs)	500
Resist. a la Compr. (psi a 24:00 hs) @ 800 mts	1860

Mezcla en Planta de Cemento

Las lechadas con *HGS* tienen ciertos cuidados a los que deben prestarse atención, como es el mezclado en seco del cemento y demás aditivos con las *HGS*. Este tipo de lechadas tiene mucha menos agua que las lechadas convencionales con igual densidad. Esto se logra a través de la distribución por toda la mezcla de las *HGS* livianas. Si la mezcla no es uniforme, las secciones no uniformes pueden ser difíciles o imposibles de mezclar a la densidad correcta o al menos al requerimiento de agua correcto.

Por lo tanto, es crítico que se lleven a cabo las correctas prácticas de mezclado. Las prácticas convencionales pueden conducir a un nivel importante de no homogeneidad en la mezcla que se enviará a la unidad cementadora. La correcta preparación será recompensada por la mejora en la calidad de servicio y la facilidad en el mezclado.

Se hace uso del método de mezclado “sandwich” por medio del cual un tercio del total de volumen de cemento es agregado al silo balanza, seguido por la mitad de *HGS* junto con la mitad de aditivos. Luego el segundo tercio de cemento es añadido. Seguidamente se adiciona el remanente de *HGS* y aditivos. Finalmente, se agrega el restante de cemento. Este procedimiento provee la mejor opción para obtener una mezcla correcta cuando se usa materiales de tamaño de partículas y gravedades específicas variables (Fig. 9). El volumen total es luego transferido entre el silo balanza y el silo de mezcla 4 veces antes de realizar la carga en el bulk de transporte (Fig. 10).

Para la transferencia de la mezcla al bulk de transporte, se debe verificar que este último se encuentre limpio como así también las líneas de conducción. También asegurarse que la entrada superior de aire puede ser aislada del circuito de aire antes de la carga de la mezcla.

El material mezclado debería ser cargado solamente por el fondo del tanque. Bajo ninguna circunstancia debería la mezcla ser cargada por la parte superior. Cuando las *HGS* livianas caen, son desplazadas hacia arriba y hacia fuera del tanque. Los operadores de la planta de cemento deben evitar airear la mezcla, debido a que esa metodología tiende a segregar las *microesferas* hacia el tope de la carga.

La descarga de la mezcla de tanque a tanque o desde tanque a mixer debe ser hecha por la aplicación continua de aire de la parte superior de la mezcla. Ninguna fuente de aire debe ser aplicada a través de la parte inferior hasta que la máxima presión del sistema sea alcanzada por la aplicación desde la parte superior de la mezcla y que la presión del sistema pueda ser mantenida. Utilizar aire con moderación y solo cuando sea requerido para asistir la salida de la mezcla.

La toma de muestras debe ser hecha durante la transferencia de la mezcla desde la planta de cemento hacia los bulks de transporte. Existen ciertos muestreadores específicos que extraen muestras ya sea de la corriente de transferencia o desde el tanque de almacenaje de distintos puntos del interior de la mezcla. Lo importante es que la muestra sea lo más representativa para realizar los ensayos de verificación y hacer la corroboración de los ensayos iniciales.

Luego del transporte de la mezcla, al arribar a la locación es probable que exista, debido a un asentamiento, una segregación de las *HGS*. Por ello, es necesario remezclar la carga en la locación, exigiendo esto contar con otro bulk vacío para hacer la transferencia de tanque a tanque, volviendo a homogeneizar la mezcla.

Tener en cuenta al momento de descargar la mezcla hacia la unidad cementadora, de presurizar inicialmente el tanque por la parte superior del tanque. Esta presión debe ser mantenida durante toda la descarga. No presurizar desde el fondo para ayudar a la descarga hasta que la presión en el tanque esté estabilizada y solo cuando se necesario para un flujo estable.

Preparación de la Lechada en Locación

Cuando se prepara este tipo de lechada con *HGS*, es crucial que deba ser mezclada a la relación de agua-cemento correcta. Con mezclas de cemento conteniendo altas concentraciones de *HGS* es más difícil mantener esta relación de agua correcta. La adición de *HGS* reduce la densidad de la mezcla de sólidos y mientras más cercana esta densidad de mezcla a la del fluido de mezcla, mas dificultoso se vuelve conservar la relación de agua ideal con sistema de mezclado basados en la densidad. A causa de este fenómeno es vital que se monitoree el agua de mezcla durante la preparación de la lechada.

Al aproximarse la gravedad específica de los sólidos al fluido de mezcla (agua), pequeñas variaciones en la densidad de lechada resultan en importantes variaciones de la relación de agua-sólidos y por ende en las propiedades de la lechada. De ahí que en lugar de basarse en el control de la densidad, es más importante monitorear la relación de agua-sólidos durante la preparación de la lechada. Por esta razón que se han modificado los sistemas de mezclado para este tipo de lechadas dejando de lado el sistema de mezcla basados en la densidad.

La Fig. 11 grafica el criterio a seguir para seleccionar el sistema de mezclado apropiado. La concentración de agua y densidad de la lechada son requeridos para determinar si puede mezclar la lechada con el sistema basado en la densidad o si es más conveniente el sistema de mezclado basado en el monitoreo de la relación de agua-sólidos. Si una determinada lechada cae a la derecha de la curva entonces el uso del sistema basado en la densidad preparará una lechada con propiedades adecuadas. Si la lechada cae a la izquierda de la curva, entonces la conservación de la relación agua-sólidos es crítica y se deberá monitorear esta con el sistema nuevo de mezcla.

Si los volúmenes de lechada son reducidos y el equipamiento de batch mixers está disponible y logísticamente posible, entonces este tipo de sistema de mezclado es altamente recomendado. Al preparar todo el volumen de lechada en un recipiente como es el batch mixer minimiza el efecto de la heterogeneidad de la mezcla en los tanques de transporte debido a la segregación. Si el volumen de la lechada excede los 50 Bbl, colocar la mitad del agua de mezcla en cada tanque del batch mixer, como así también dividir la carga de cemento con aditivos de tal forma que adicionar la cantidad justa al agua ya separada. De esta forma, se asegurará que cada mitad del batch mixer contiene la lechada correcta.

Un punto a destacar durante el mezclado de la mezcla con el agua, es el daño que pudieran sufrir las *HGS* al pasar por bombas centrífugas. Se han realizado ensayos a grandes escalas y se ha podido determinar que no existe daño alguno o que es ínfimo y que la variación de densidad por la posible ruptura de las *HGS* está en el orden $\pm 0.1\%$.

Para el trabajo en cuestión se decidió utilizar este sistema de mezclado con batch mixer, obteniendo una lechada uniforme en densidad con los volúmenes de agua y cemento bien controlados. Como se mencionó anteriormente, los volúmenes de lechada y la logística de equipamientos en la locación del pozo permitieron el uso de este tipo mezclado (Fig 12).

Trabajo de Cementación

El pozo contaba con una cañería de superficie de 9 5/8" en 105 m. El pozo fue vertical perforado con trépano de 8 3/4" sin mayores inconvenientes. La profundidad final fue de 1003 m y se utilizó un fluido de inyección base agua con densidad de 1140 gr/lit. Las tareas posteriores de calibración, perfilaje y normalización del pozo fueron normales. Se utiliza para la cañería de producción casing de 5 1/2". La entubación de la misma y el acondicionamiento del pozo se ejecutaron sin problemas.

Para la secuencia de bombeo se utilizó un tren de colchones de densidad superior a la del lodo para no producir un desbalance del gradiente hidrostático durante el retorno a superficie de estos. A continuación, se bombeó la lechada con *microesferas de vidrio* preparada en batch mixers con su control de calidad previo al bombeo. Finalmente se continúa con el desplazamiento terminando la operación con total normalidad, circulando el pozo y reciprocando la cañería hasta la finalización del trabajo (Fig. 13). La presión final del trabajo estuvo ligeramente por encima de lo estimado en la simulación (750 psi real frente a 600 psi teórico) y la ecd real en el fondo de pozo un poco inferior a la calculada (0.66 psi/ft real frente a 0.675 psi/ft programada) (Fig. 14 y 15)

Evaluación de Adherencia de Cemento

Debido a ser esta lechada de cemento una lechada de baja densidad con microesferas huecas se recomendó realizar un perfil de cemento ultrasónico y luego ser interpretado por un software especial para evaluación de cemento, que se basa en el procesamiento de la variancia estadística. A su vez se corrió un perfil de cemento CBL convencional para realizar comparaciones utilizando la metodología del área.

Con el objetivo de realizar una evaluación de la adherencia del cemento, teniendo en cuenta las distintas técnicas disponibles y de acuerdo a una sugerencia, el orden de los perfiles con los que se cuenta sería:

- 1.- CAST-V/ CBL combo
- 2.- RBT (Radial Bond Tool)
- 3.- Convencional CBL

En base a los resultados en los primeros trabajos se definiría cual o cuales eran las herramientas adecuadas para evaluar el perfil de cemento. Esto debido a la baja densidad de la lechadas y los bajos contrastes de densidad con el resto de los materiales existentes en el pozo (lodo, cemento, casing, formación, etc).

La evaluación de la adherencia en este tipo de lechadas no se limita sencillamente a tener buena resistencia a la compresión, pero el hecho de tener una buena atenuación sería suficiente como para ver o evaluar la adherencia con una herramienta convencional (CBL) o sónica radial (RBT), pero siendo muy cuidadosos en la interpretación.

El hecho de tener valores de alta amplitud son una indicación de cañería libre o falta de adherencia a la misma, pero si seguimos observando arribos de formación en el MSG (microsismograma) como respuesta a un cambio de formación, esto será posible solamente por la existencia de cemento en el espacio anular y adherido a pesar de la alta amplitud. Este efecto puede deberse a diferentes causas y solamente uno de ellos a la utilización de cementos livianos.

Por tal motivo, luego de haber evaluado la totalidad de los factores que están en juego, si las

herramientas sónicas convencionales (CBL o RBT) no dan una respuesta satisfactoria de la cementación, deberemos utilizar herramientas ultrasónicas y posiblemente el proceso de evaluación por software. De tal forma que con la experiencia de este pozo y mientras no se modifiquen las condiciones generales que se presentaron en este pozo, la evaluación del cemento sugerida a realizarse en estos casos sería con CBL convencional y de no obtenerse buenos resultados correr como alternativa CAST-V.

La metodología de medición de adherencia de cemento en los yacimientos de Pan American Energy es a través de un CBL, donde se toma como línea base o 100% de adherencia al fondo del pozo, donde existen muchas probabilidades de encontrar buena adherencia; y como 0% de adherencia o cañería libre donde se sabe que no hay cemento, muy por encima del tope requerido. Estos 2 valores se toman para la calibración de la herramienta CBL y dentro de esos valores es que se medirá la calidad del cemento. En caso de no encontrar cañería libre por haber cemento hasta la boca de pozo, este dato se tomara de un pozo vecino con iguales características de cañerías y fluidos. Si durante la medición se observan valores superiores al 100% tomado, entonces ese valor será tomado como 100% y se deberá corregir el rango de la escala, además de indicarnos que el 100% de adherencia tomado anteriormente ya no es más 100%, sino que puede haber baja calidad de cemento en esa zona.

Para el trabajo en cuestión, los resultados obtenidos de ambos perfiles (Cast-V y CBL) mostraron buena adherencia a cañería y formación en todo el tramo cementado, es decir desde el fondo hasta el zapato de la cañería guía, con lo que se concluyó que se obtuvo una buena aislación de toda la zona de interés y que el perfil de cemento convencional CBL es apto para realizar la medición de adherencia de cemento con este tipo de lechada, al menos con el rango de densidad de lechada utilizada en este pozo (Fig. 16).

Reducción de Costos Asociados

Haciendo referencia a los costos involucrados en este trabajo, se menciona que es un poco más elevado si se compara con el tipo de trabajo que se venía realizando de dos etapas. Sin embargo, hay que tener en cuenta ciertos puntos para realizar la comparación global entre ambos métodos de cementación. Estos puntos son:

- La cementación en doble etapa debe ser exitosa para poder ser comparable!
- En la cementación de dos etapas, se debe circular el pozo entre ambas etapas, lo cual lleva costos extras por este tiempo extra de circulación; no así en la cementación de una única etapa; además del tiempo extra por la cementación de la segunda etapa,
- Finalizada la cementación de dos etapas, se debe montar equipo de Terminación y rotar el Dispositivo Doble Etapa previo al perfilaje de cemento, es decir que no se puede realizar con pluma, sino que se debe esperar el montaje del equipo de Terminación, esto conlleva tiempo perdido entre esperar el resultado del perfil y confirmar el programa de punzado; en la cementación en una única etapa se puede realizar el perfilaje al igual que la confirmación del programa de punzado sin equipo de Terminación.
- En caso de un mal resultado de la cementación de dos etapas (como sucedió en los últimos trabajos), se debe realizar cementaciones correctivas, y por lo tanto costos extras de: punzado, cementación, tiempo de equipo de Terminación y tiempo de análisis de estas cementaciones para poder continuar con el programa de completación.

Estos aspectos influyen y se deben analizar a la hora final de realizar un balance técnico-económico de la vida de producción del pozo.

Analizando todos estos costos y teniendo en cuenta los tiempos consumidos y resultados de ambos sistemas de cementación utilizados hasta el momento en este yacimiento, se puede concluir que los beneficios técnico-económicos obtenidos con el sistema *lechadas de cemento de baja densidad con microesferas de vidrio* satisfacen los objetivos perseguidos de una buena aislación del pozo abierto.

Completación del Pozo

Una vez montado el equipo de terminación, se procedió con la completación del pozo según se realiza en el área sin ningún tipo de inconveniente.

Se punzaron 11 capas y se ensayaron las mismas de acuerdo a lo programado. Luego de analizar los ensayos de las distintas capas se estimularon con fracturas hidráulicas 3 zonas, una de ellas eran 2 punzados en conjunto.

Los diseños de las 3 fracturas se realizaron sin ninguna consideración en especial con respecto a la lechada de cemento utilizada en la cementación de la cañería de 5 ½”.

Estos trabajos de estimulación se realizaron sin problemas con presiones máximas de 1400 psi. Luego de ensayar las zonas fracturadas, se bajó instalación final y se puso en producción.

• Conclusiones

El problema de aislar con buen cemento todo el intervalo de interés (todo el pozo abierto) en los pozos del yacimiento Anticlinal Funes, para poder realizar las estimulaciones y alcanzar su máximo potencial de producción, fue solucionado con la utilización de las lechadas de baja densidad con *microesferas huecas*, de *vidrio* en este caso.

Los beneficios que trae aparejado este tipo de lechadas para los pozos de Anticlinal Funes fueron varios, desde contar con una lechada con una densidad que se puede ajustar acorde a las condiciones del pozo, como las poseer una resistencia a la compresión similar a las de las lechadas utilizadas en la zona.

Esta lechada posee la particularidad de ser totalmente ajustable a la correcta condición del pozo y lograr el diseño correcto para cada pozo en especial, con costos basados en estos requerimientos y sin mayores modificaciones logísticas.

Este tipo de lechadas de baja densidad con *microesferas* y que existen en la industria del petróleo desde la década del 80, es una opción más a la de lechadas livianas extendidas con agua y lechadas espumadas.

La medición de la adherencia de cemento con el perfil convencional CBL es de total aplicabilidad con esta lechada de baja densidad con *HGS*, al menos en el rango de densidades que se utilizó, permitiendo reducir costos y tiempos de completación.

Evaluated in a zone, this latent application of this system of light leach with *HGS* conditioned to wells with situations of losses of circulation, weak formations, zones of

bajo gradientes de fractura, largas columnas de cemento, donde es posible extender el empleo de este sistema a otros yacimientos, donde la ECD (densidad equivalente) es crítica.

Esta situación de condiciones endeble se ha dado en otras áreas y con diseños de pozos diferentes en lo relacionado a profundidad y longitud de cemento a ubicar. Es decir que se han dado los requisitos para aplicar este tipo de lechada de baja densidad. Hasta el momento se ha utilizado la misma en 5 oportunidades más con total éxito en lo referente a lo operativo del trabajo de cementación, adherencia de cemento y completación del pozo. Tres de estos trabajos abarcaron un anillo de 1300 m con condiciones combinadas de zonas depletadas y zonas sobrepresurizadas por pozos inyectoros cercanos.

- **Próximas acciones**

Evaluar la alternativa técnico económica de uso de cemento mas liviano TXI LW con densidad 2.78.

Ahondar en la utilización de este tipo de lechadas con densidades más bajas a las utilizadas actualmente.

Reducir la densidad aún más con mayor concentración de microesferas o con la incorporación del gas nitrógeno a la lechada para ciertas aplicaciones en pozos problemas.

Incorporación de otros aditivos alivianantes a la lista de productos de posible uso.

Testeo de otros aditivos que mejoren las propiedades de las lechadas livianas.

- **Referencias**

Kulakofsky, D. et al.: "Lightweight Cementing Solutions: A Novel Concept Utilizes Field Case Histories," presentado en el 2003 Subsea Houston Conference, Houston, TX, USA, Septiembre 18.

Leinan, A.: "Canadian Field Successes of Ultra Low Density Cementing Slurries," trabajo No. 82-33-22, Petroleum Society of CIM, Calgary, Alberta, Canadá, Junio 6-9, 1982.

Ripley, H.E. et al.: "Ultra-Low Density Cementing Compositions," trabajo No. 80-31-19, Petroleum Society of CIM, Calgary, Alberta, Canadá, Mayo 25-28, 1980.

Nabhan, M. et al.: "Successful Lightweight Slurry Cementing across Production Intervals," presentado en el 2004 Mediterranean Offshore Conference, Alexandria, Egypt, Abril 20-22.

- Figuras

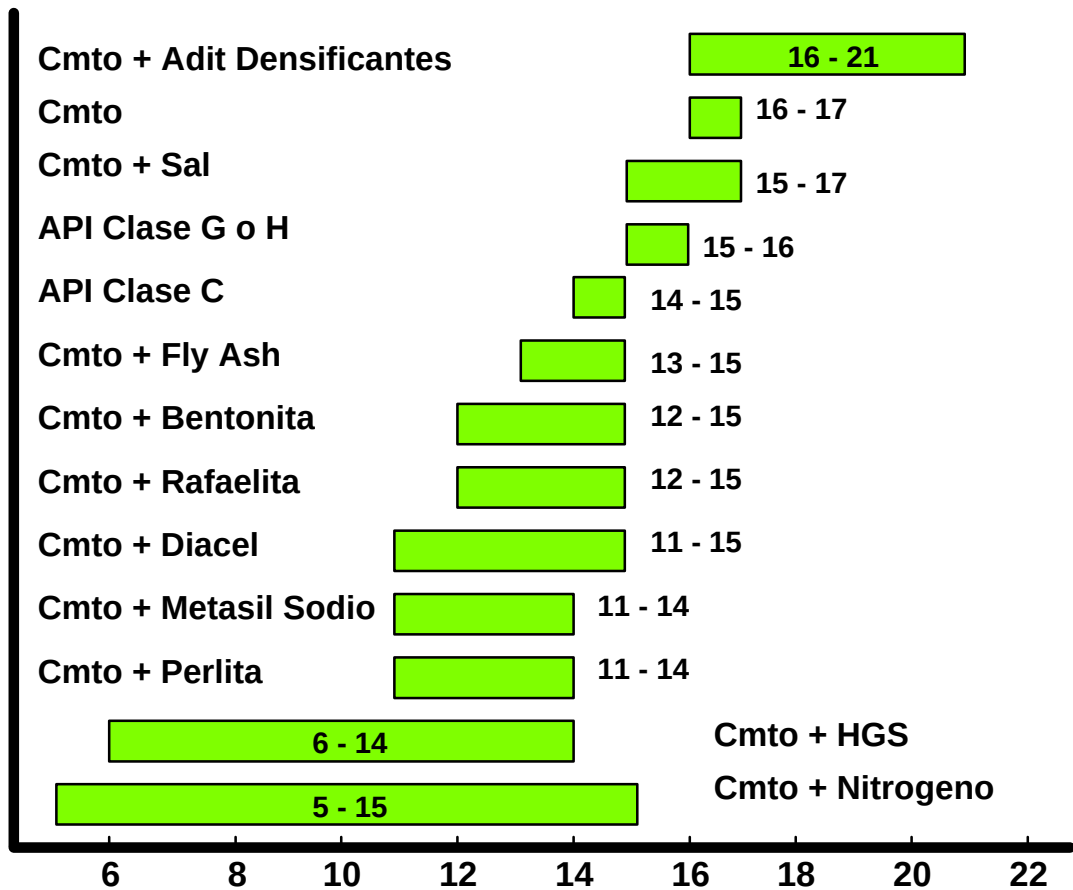


Fig. 1.- Rango de Densidades de los diferentes Sistemas de Cemento

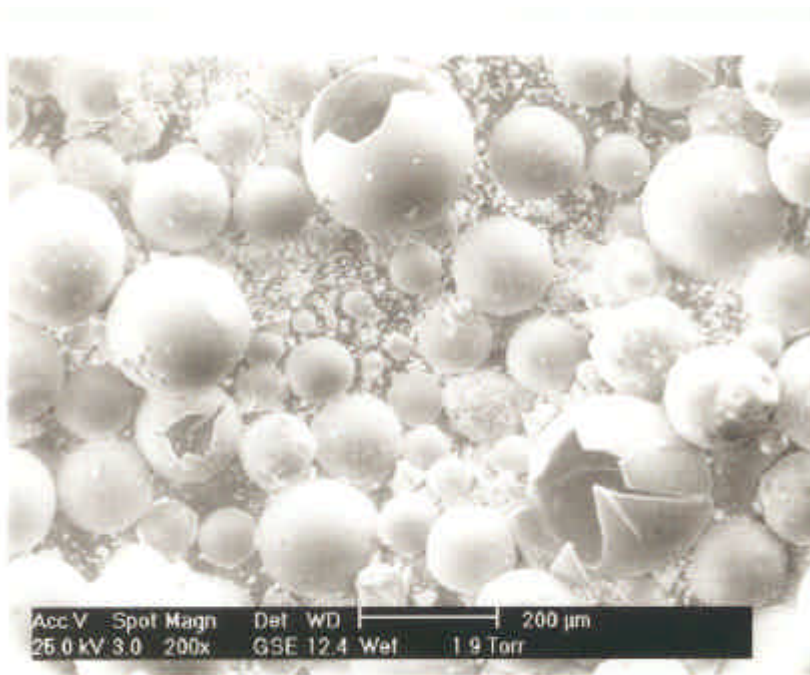
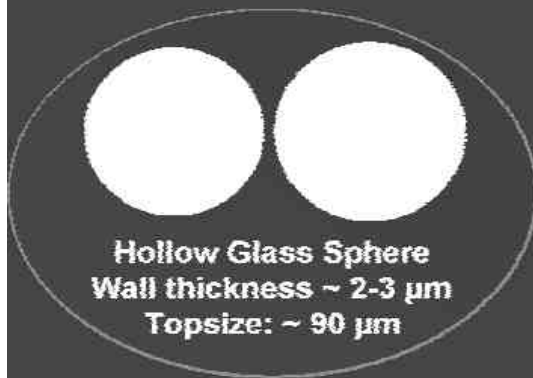


Fig. 2.- Imagen de las microesferas huecas

3 *Hollow Glass Spheres*

Engineered for a wide choice of performance enhancements



- **Material description**
High temperature resistant glass, chemically stable, with composition close to Pyrex™ glass
- **No corners/edge**
not abrasive
lubricity
improved flow
- **Ease of processing**
- **Minimum surface area**
low viscosity
- **Aspect ratio = 1**
no reinforcement properties

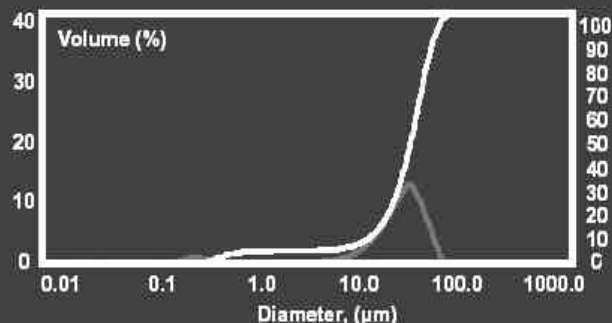
Fig. 3.- Características principales de las HGS

Design Parameters (parameters are not independent)

Size:
From 10 to 90 microns

Density:
0.38 g/cc to 0.60 g/cc

Typical PSD:



Collapse Strength:
4,000 to 18,000 psi

Typical behavior:

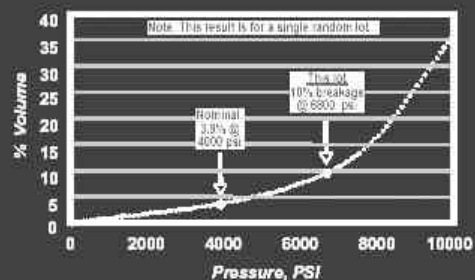


Fig. 4.- Parámetros principales de las HGS

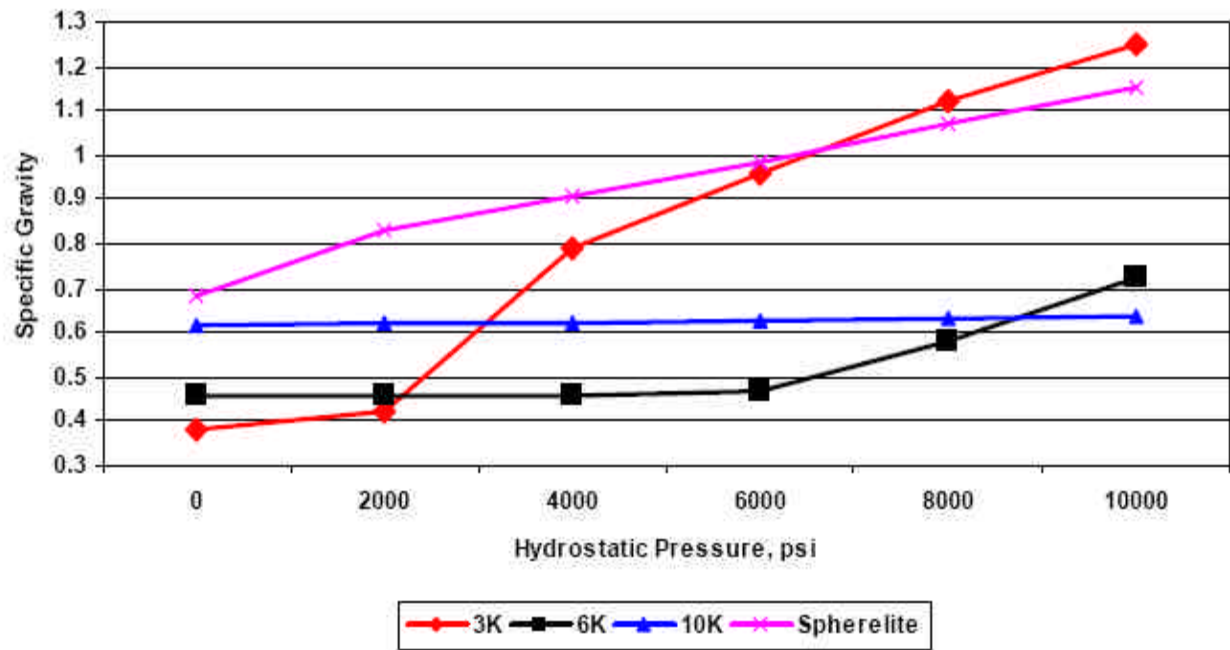


Fig. 5.- Presión hidrostática vs gravedad específica de varias HGS



Fig. 6.- Empaquetamiento con un solo tamaño de partículas vs tres tamaños reduciendo el contenido de agua

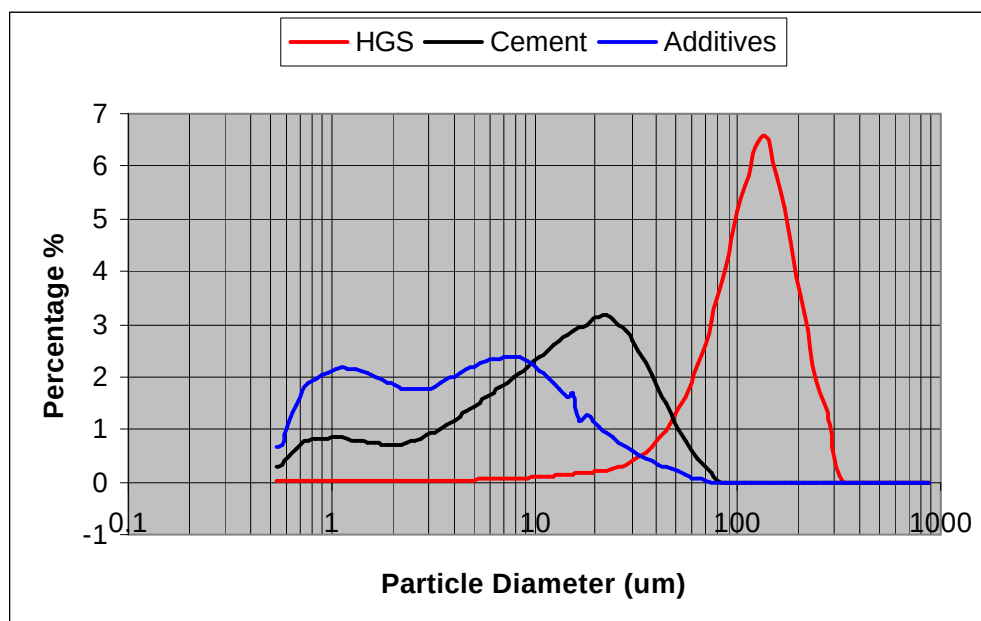


Fig. 7.- Distribución de Tamaño de Partículas

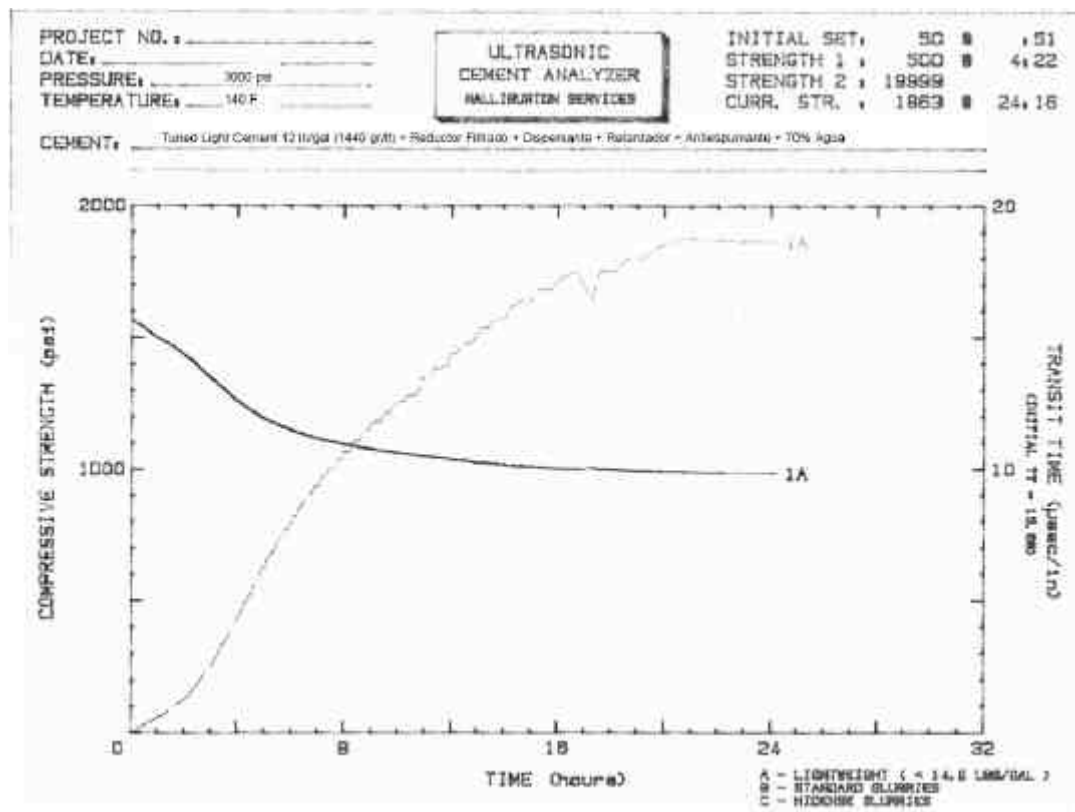


Fig. 8.- Desarrollo de Resistencia a la Compresión para Lechada 12 lb/gal

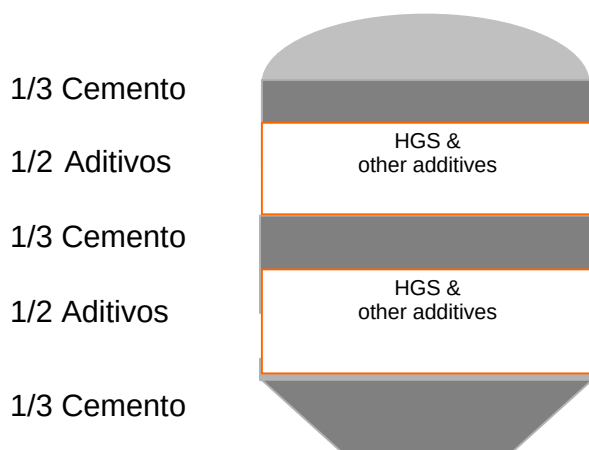


Fig. 9.- Método de Mezclado "Sándwich" de Halliburton

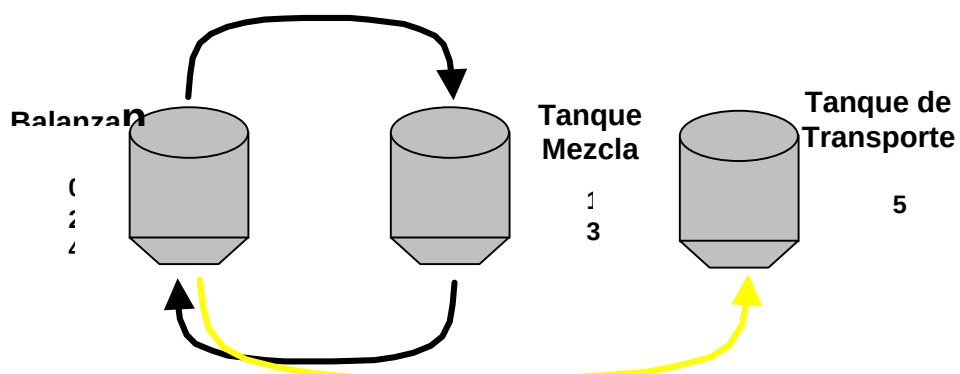


Fig. 10.- Número de Transferencias de Mezcla en Planta de Cemento

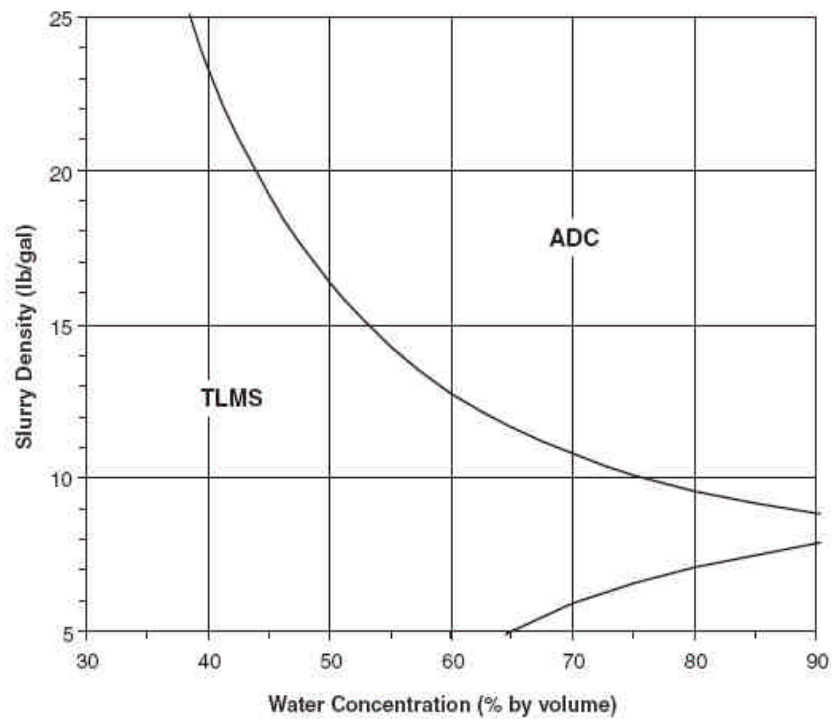


Fig. 11.- Selección de Sistema de Mezclado de Lechada de Baja Densidad

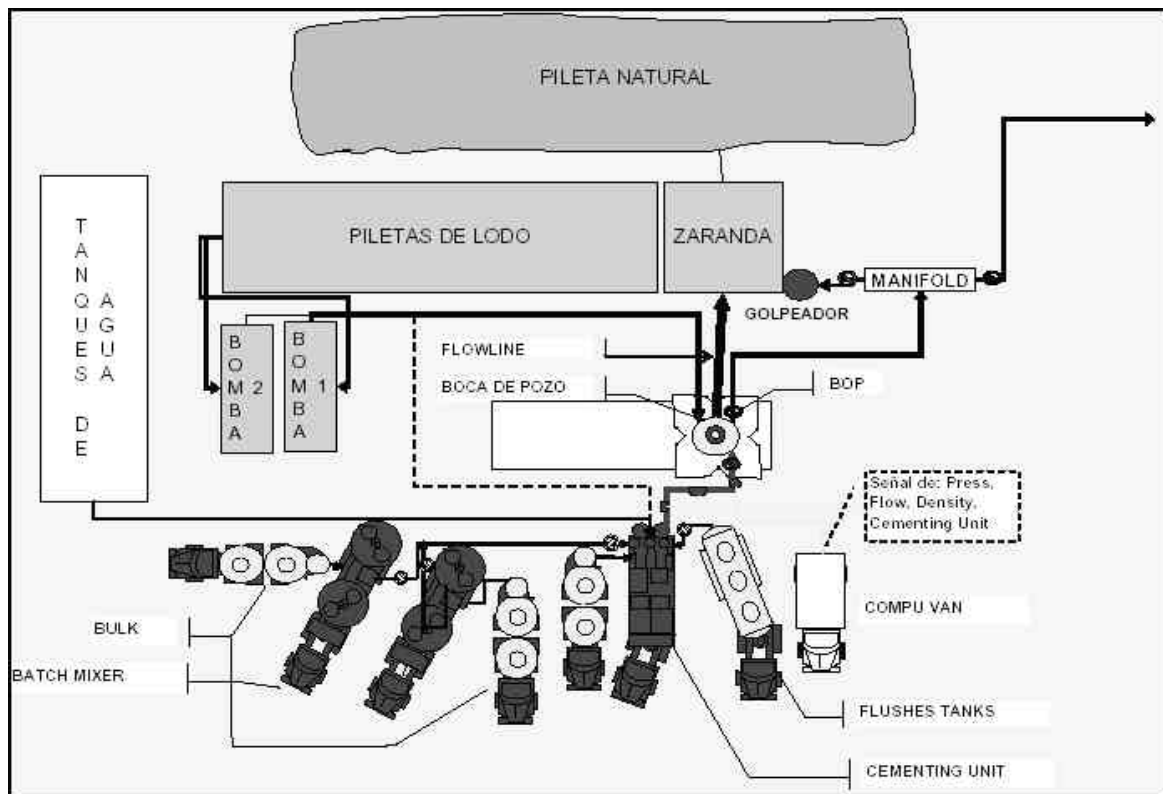
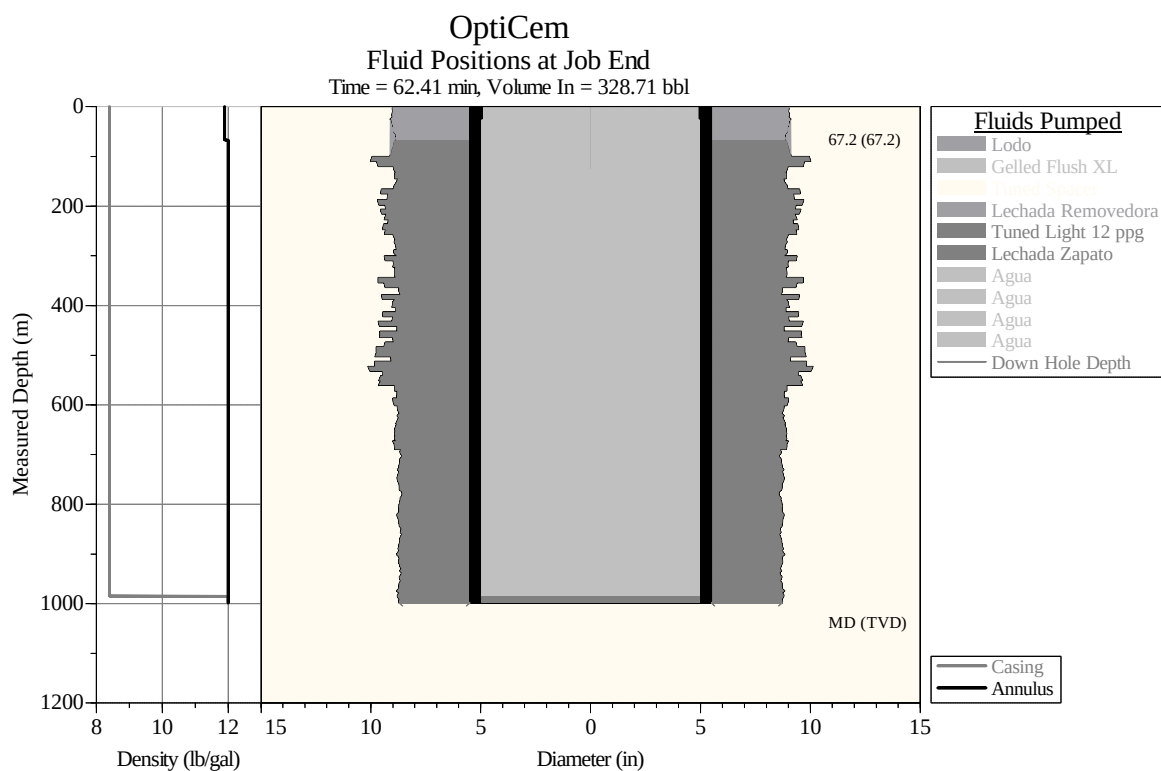


Fig. 12.- Layout Equipos



Customer: PAN AMERICAN ENERGY Job Date: 14-May-2004 Well #: PAF-133

OptiCem v5.2.0
07-Jul-05 17:07

Fig. 13.- Posición de Fluidos en el Pozo

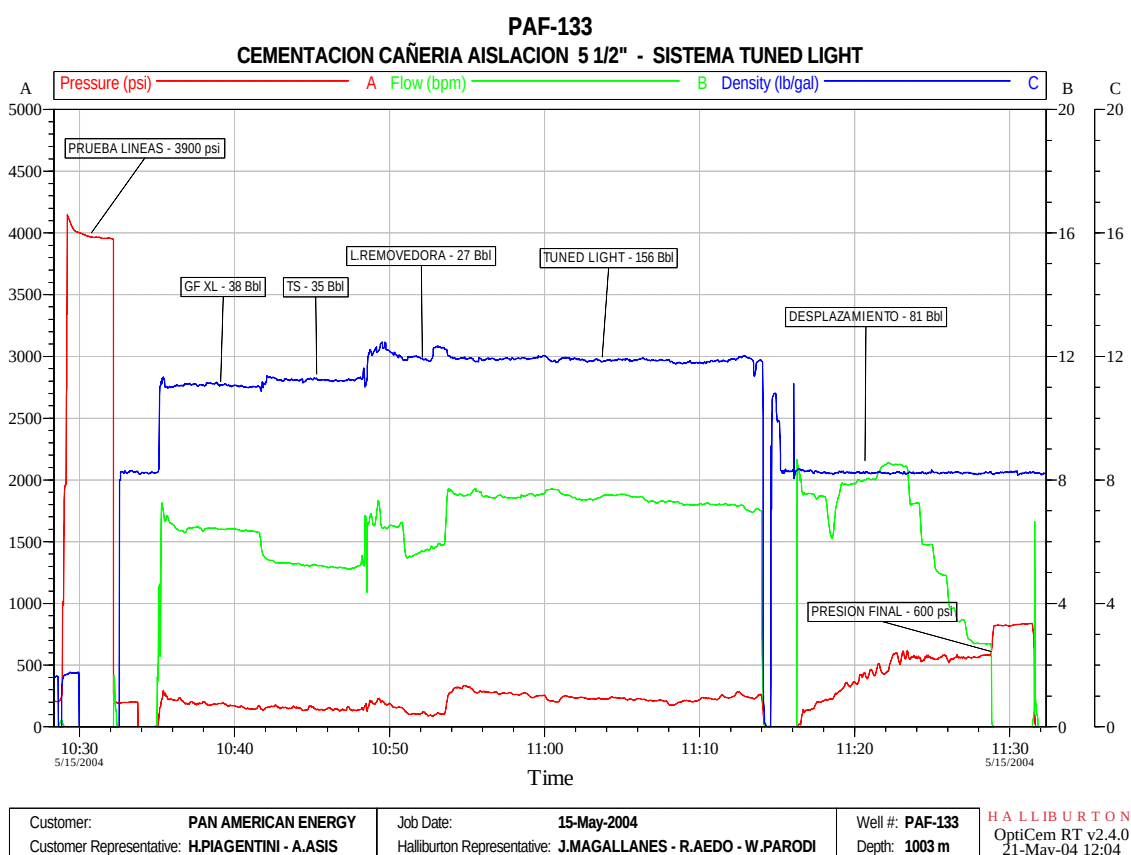
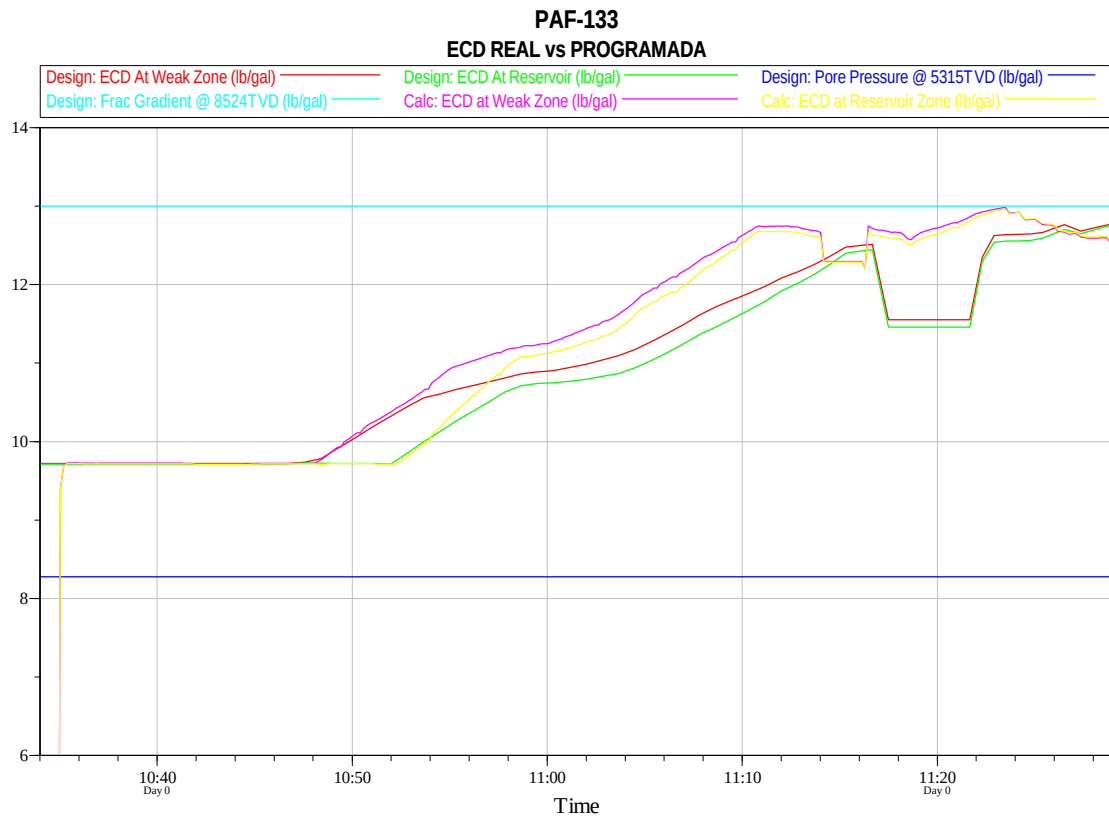


Fig. 14.- Gráfico Trabajo de Cementación



OptiCem RT v2.4.0
21-May-04 12:07

HALLIBURTON

Fig. 15.- Gráfico de Comparación de ECD

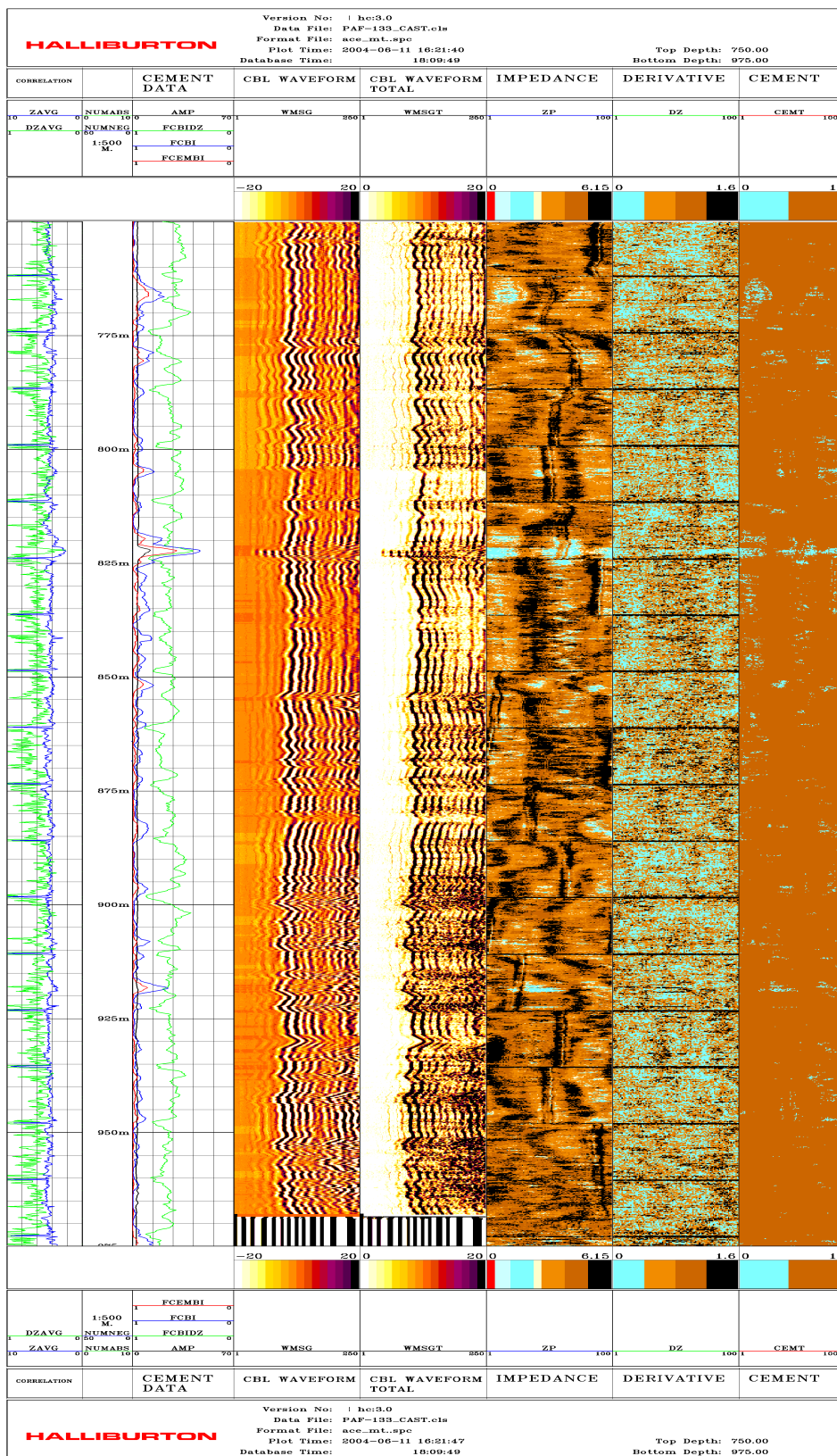


Fig. 16.- Perfil de Cemento CAST-V y CBL