

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE  
MEXICO**

20  
2EJ

**FACULTAD DE INGENIERIA**



**Aspectos generales sobre el  
cemento y recomendaciones  
que han llevado a operaciones  
exitosas de cementación.**

**TESIS**

**Que para Obtener el Título de:**

**Ingeniero Petrolero.**

**Presenta:**

**Alfonso Pluma Hernández.**

**México, D.F.**

**Noviembre 1995**

**FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

**SR. ALFONSO PLUMA HERNANDEZ**  
**Presente**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la Qufm. Rosa de Jesús Hernández Álvarez, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

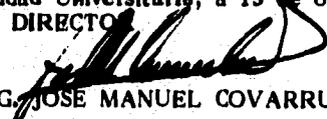
**ASPECTOS GENERALES SOBRE EL CEMENTO Y RECOMENDACIONES  
QUE HAN LLEVADO A OPERACIONES EXITOSAS DE CEMENTACION  
PRIMARIA**

- I INTRODUCCION**
- II ANTECEDENTES**
- III CARACTERISTICAS DE LA LECHADA DE CEMENTO**
- IV TIPOS DE CEMENTOS Y ADITIVOS USADOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA**
- V PLANEACION Y CONTROL DE LA OPERACION DE CEMENTACION**
- VI RECOMENDACIONES DURANTE LA OPERACION**
- CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 13 de octubre de 1994  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Tesis

"ASPECTOS GENERALES SOBRE EL CEMENTO  
Y RECOMENDACIONES QUE HAN LLEVADO A OPERACIONES  
EXITOSAS DE CEMENTACION PRIMARIA"

ALFONSO PLUMA HERNANDEZ

Número de cuenta 7930156-1

DIRECTORA DE TESIS: Quím. Rosa de Jesús Hernández Álvarez

JURADO DE EXAMEN PROFESIONAL:

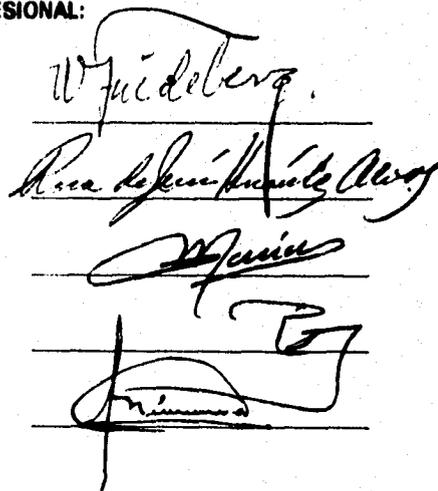
PRESIDENTE: Ing. Walter Friedberg Merzbach

VOCAL: Quím. Rosa de Jesús Hernández Álvarez

SECRETARIO: Ing. Salvador Macías Herrera

PRIMER SUPLENTE: M.I. Rafael Rodríguez Nieto

SEGUNDO SUPLENTE: Ing. Néstor Martínez Romero

  
The image shows four handwritten signatures, each written on a horizontal line. From top to bottom, the signatures correspond to the names listed in the text: Walter Friedberg Merzbach, Rosa de Jesús Hernández Álvarez, Salvador Macías Herrera, and Rafael Rodríguez Nieto. The signature of Néstor Martínez Romero is not present.

Noviembre de 1995



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE INGENIERIA EN  
CIENCIAS DE LA TIERRA

ASUNTO: Solicitud de Jurado para Examen  
Profesional.

**ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS**  
Director de la Facultad de Ingeniería  
de la U.N.A.M.  
Presente

El señor ALFONSO PLUMA HERNANDEZ registrado con número de cuenta 7930156-1 en la carrera de Ingeniero Petrolero, habiendo satisfecho los requisitos académicos necesarios para realizar sus trámites de examen profesional, le ruega atentamente autorizarle el siguiente jurado:

**PRESIDENTE: ING. WALTER FRIEDEBERG MERZBACH**

**VOCAL: QUIM. ROSA DE JESUS HERNANDEZ ALVAREZ**

**SECRETARIO: ING. SALVADOR MACIAS HERRERA**

**1ER. SPTE.: M.I. RAFAEL RODRIGUEZ NIETO**

**2DO. SPTE.: ING. NESTOR MARTINEZ ROMERO**

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 7 de noviembre de 1995  
EL JEFE DE LA DIVISION

M. en C. ROLANDO DE LA LLATA ROMERO

ENTERADO

ALFONSO PLUMA HERNANDEZ



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE INGENIERIA EN  
CIENCIAS DE LA TIERRA

ASUNTO: Solicitud de Jurado para Examen  
Profesional.

**ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS**  
Director de la Facultad de Ingeniería  
de la U.N.A.M.  
Presente

El señor ALFONSO PLUMA HERNANDEZ registrado con número de cuenta 7930156-1 en la carrera de Ingeniero Petrolero, habiendo satisfecho los requisitos académicos necesarios para realizar sus trámites de examen profesional, le ruega atentamente autorizarle el siguiente jurado:

**PRESIDENTE: ING. WALTER FRIEDEBERG MERZBACH**

**VOCAL: QUIM. ROSA DE JESUS HERNANDEZ ALVAREZ**

**SECRETARIO: ING. SALVADOR MACIAS HERRERA**

**1ER. SPTE.: M.I. RAFAEL RODRIGUEZ NIETO**

**2DO. SPTE.: ING. NESTOR MARTINEZ ROMERO**

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 7 de noviembre de 1995  
EL JEFE DE LA DIVISION

M. en C. ROLANDO DE LA LLATA ROMERO

ENTERADO

ALFONSO PLUMA HERNANDEZ

*Dedico este trabajo con cariño y respeto a mis padres **Alfonso Pluma González y Socorro Hernández de Pluma**, por haberme brindado la oportunidad de estudiar una carrera profesional; a mis hermanos: **Chela, Susi, Beto, Coco, Mari, Luis, Fer y Miguel** por su comprensión y apoyo; y a **Deira Lenia Saavedra González** como una expresión de mi amor y admiración.*

***Mi agradecimiento a:***

***La Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ingeniería.***

***La Quím. Rosa de Jesús Hernández Álvarez por la dirección de esta tesis.***

***El Ing. Paulino Valadez Pérez por su cooperación en la revisión de este trabajo.***

***La C.M.C. Deira Viola González Morelos Zaragoza por su invaluable ayuda y apoyo a través de estos años.***

***Los profesores, compañeros y amigos con los que compartí esta etapa de mi vida.***

**ASPECTOS GENERALES SOBRE EL CEMENTO  
Y RECOMENDACIONES QUE HAN LLEVADO A  
OPERACIONES EXITOSAS DE CEMENTACION PRIMARIA**

**CONTENIDO**

---

	Pág.
<b>CAPITULO I</b>	
<b>INTRODUCCION</b>	1
<b>CAPITULO II</b>	
<b>ANTECEDENTES</b>	4
<b>CAPITULO III</b>	
<b>CARACTERISTICAS DE LA LECHADA DE CEMENTO</b>	10
<b>PROPIEDADES DE FLUJO DE LOS FLUIDOS</b>	11
Modelo plástico de Bingham	13
Modelo de ley de potencias	17
<b>APARATOS USADOS PARA PREDECIR LAS PROPIEDADES DE FLUJO DE LOS FLUIDOS</b>	20
<b>ECUACIONES UTILIZADAS EN LOS CALCULOS</b>	21
<b>PROPIEDADES TIXOTROPICAS DEL FLUIDO DE PERFORACION</b>	27
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>TIPOS DE CEMENTOS Y ADITIVOS USADOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA</b>	33
<b>PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS QUE CUBREN LAS ESPECIFICACIONES API</b>	38
<b>CEMENTOS ESPECIALES</b>	40
Cementos Portland Puzolánicos	40
Cementos Puzolánico-Cálcicos	41
Cementos Plásticos o con Resinas	43
Cementos Base Yeso	43
Cementos para Diesel	44
Cementos Expansivos	44
Cementos Refractarios	46
Cementos con Látex	46
Cementos Permafrost	47

	<b>Pág.</b>
<b>ADITIVOS PARA CEMENTO</b>	<b>47</b>
<b>Aceleradores</b>	<b>50</b>
Cloruro de Calcio	50
Cloruro de Sodio	50
Cementos Base Yeso	51
Silicato de Sodio	51
Cementos con Dispersante y Agua Reducida	51
Agua de Mar	51
<b>RETARDADORES</b>	<b>52</b>
<b>A Base de Ligninas</b>	<b>53</b>
Carboximetil Hidroxietil Celulosa	53
Agua Saturada de Sal	53
<b>ALIGERADORES</b>	<b>54</b>
Bentonita	54
Cementos Modificados	55
Cementos Salados Altamente Gelificados	55
Gilsonita	56
Perlite expandida	56
Nitrógeno	56
<b>DENSIFICANTES</b>	<b>57</b>
<b>AGENTES PARA CONTROL DE PERDIDA DE CIRCULACION</b>	<b>58</b>
<b>AGENTES PARA CONTROL DE FILTRADO</b>	<b>58</b>
<b>REDUCTORES DE FRICCION</b>	<b>59</b>
<b>POLIMEROS</b>	<b>61</b>
Dispersantes o adelgazadores	61
Cloruro de Sodio	61
<b>MATERIALES ESPECIALES</b>	<b>64</b>
Descontaminantes de Lodo	64
Harina de Sílice	64
Trazadores Radioactivos	64
Tinturas para Cemento	65
Hidrazina	65
Fibras en el Cemento	66
Yeso	66

	Pág.
Aditivos Tixotrópicos	67
Espaciadores y Lavadores	67
<b>CAPITULO V</b>	
<b>PLANEACION Y CONTROL DE LA OPERACION DE CEMENTACION</b>	<b>71</b>
<b>PLANEACION DE LA OPERACION</b>	<b>71</b>
<b>FACTORES DE INFLUENCIA EN EL DISEÑO</b>	<b>74</b>
<b>POZO</b>	<b>75</b>
Geometría del agujero	75
Temperatura y Presión	79
<b>FLUIDO DE PERFORACION</b>	<b>80</b>
<b>TUBERIA DE REVESTIMIENTO</b>	<b>82</b>
Acondicionamiento	82
Centrado	84
<b>OPERACIONES DEL APAREJO</b>	<b>87</b>
Velocidad de	
Introducción de la Tubería	87
Circulación y Movimiento de la Tubería antes de la Cementación	88
<b>VOLUMEN DE CEMENTO</b>	<b>90</b>
<b>COMPOSICION DE LA LECHADA DE CEMENTO, PARAMETROS DE DISEÑO</b>	<b>90</b>
Presión, Temperatura y Tiempo de Bombeo	91
Viscosidad y	
Contenido de Agua	93
Contenido Máximo de Agua	94
Contenido Normal de Agua	94
Contenido Mínimo de Agua	94
Tiempo de Espesamiento	95
Fuerza Requerida en el Cemento para Soportar la Tubería	97
Calidad del Agua	
Disponible para el Mezclado	101

	<b>Pág.</b>
<b>Sensibilidad al Fluido de Perforación y sus Aditivos</b>	<b>103</b>
<b>Densidad de la Lechada</b>	<b>103</b>
<b>Pérdidas de Circulación</b>	<b>104</b>
<b>Calor de Hidratación</b>	<b>104</b>
<b>Permeabilidad del Cemento Fraguado</b>	<b>105</b>
<b>Control del Filtrado</b>	<b>106</b>
<b>Resistencia a las Salmueras</b>	<b>107</b>
 <b>DISEÑO DEL FLUIDO ESPACIADOR</b>	 <b>109</b>
<b>Reología del Espaciador y Gastos de Bombeo</b>	<b>110</b>
<b>Compatibilidad del Espaciador con el Cemento y el Lodo</b>	<b>114</b>
<b>Densidad del Espaciador y Características de los Sólidos Suspensos</b>	<b>114</b>
 <b>CONTROL DE LA OPERACION</b>	 <b>115</b>
<b>PRELAVADO</b>	<b>115</b>
<b>MEZCLADO DEL CEMENTO</b>	<b>117</b>
<b>FACTOR DE FLOTACION DE LA TUBERIA</b>	<b>120</b>
<b>CONTROL DE LA DENSIDAD</b>	<b>121</b>
<b>TAPONES DE CEMENTACION</b>	<b>122</b>
<b>FLUIDO DESPLAZANTE POSTERIOR AL TAPON SUPERIOR</b>	<b>123</b>
<b>CAIDA LIBRE DEL CEMENTO</b>	<b>123</b>
<b>MONITOREO DEL TRABAJO Y DEL RITMO DE FLUJO</b>	<b>125</b>
 <b>CAPITULO VI RECOMENDACIONES DURANTE LA OPERACION</b>	   <b>128</b>
<b>CONDICIONES PARA LOGRAR EL DESPLAZAMIENTO ALREDEDOR DE TODA LA T.R.</b>	<b>131</b>
<b>Desplazamiento del Lodo</b>	<b>132</b>
<b>Esfuerzo de Cedencia</b>	<b>133</b>
<b>Canalización</b>	<b>135</b>

	<b>Pág.</b>
<b>FLUJO TURBULENTO DURANTE EL DESPLAZAMIENTO</b>	136
<b>FLUJO LAMINAR EFECTIVO</b>	138
<b>MOVIMIENTO DE LA TUBERIA</b>	139
<b>CONDICION DEL FLUIDO DE PERFORACION</b>	139
<b>CENTRADO</b>	143
<b>VELOCIDAD ANULAR</b>	144
<b>VOLUMEN DE FLUIDO PASADA LA ZONA DE INTERES</b>	146
<b>BACHE PRELAVADOR</b>	147
<b>DIFERENCIAS DE DENSIDAD</b>	147
<b>ALGUNAS RECOMENDACIONES SOBRE TOPICOS DIFERENTES AL PROCESO DEL DESPLAZAMIENTO</b>	151
<b>ACONDICIONAMIENTO DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO CON ARENA A PRESION Y CUBIERTA DE RESINA</b>	151
<b>TIEMPO DE CIRCULACION DEL LODO ANTES DE LA CEMENTACION</b>	152
<b>PRUEBAS DE CALIBRADOR FLUIDO</b>	153
<b>COMPATIBILIDAD DEL ESPACIADOR CON EL LODO Y EL CEMENTO</b>	153
<b>TAPONES LIMPIADORES</b>	154
<b>PROCEDIMIENTO PREVIO A LA CEMENTACION</b>	155
<b>PROCEDIMIENTOS RECOMENDADOS PARA LA INTRODUCCION DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO, EL ACONDICIONAMIENTO DEL POZO Y EL USO DEL FLUIDO ESPACIADOR</b>	156
<b>PREVENCION DEL FLUJO ANULAR DESPUES DE CEMENTAR</b>	159
<b>ADITIVOS LIQUIDOS Y EN POLVO</b>	162

	Pág.
<b>UTILIZACION DE FLUIDOS SUSCEPTIBLES DE CONVERTIRSE EN CEMENTOS CON LA ADICION DE ESCORIA</b>	<b>165</b>
<b>EVALUACION DE LA CEMENTACION</b>	<b>167</b>
Indicaciones Indirectas	167
Indicaciones Directas	168
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>170</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>173</b>

## CAPITULO I. INTRODUCCION

La cementación de pozos de aceite, gas y agua es un proceso usado a lo largo y ancho del mundo. Este proceso ha crecido en complejidad, contribuyendo para ello mucha gente, organizaciones y tecnologías que lo han convertido en una gran industria en donde predomina un "Estado de arte".

Las operaciones de cementación se realizan durante la perforación -ademandando tuberías para aislar las formaciones-, y son la etapa preliminar a la terminación -para dejar listo el conducto requerido para la producción-, o bien, el abandono de un pozo petrolero,. Del éxito de esta operación dependerá en gran medida la producción óptima del pozo.

Un buen trabajo de cementación garantiza, de hacerse bien, grandes ahorros en tiempo y dinero, una adecuada producción de los hidrocarburos esperados, mediante la comunicación eficiente de la(s) zona(s) productora(s) con la superficie, aislándola(s) de zonas indeseables (manteniendo a la vez estándares adecuados en materia ecológica); a la vez se protegen las zonas de agua dulce y se aíslan eficientemente los pozos que deben ser abandonados. Simultáneamente, se crea un enlace efectivo entre la formación y la Tubería de Revestimiento (T.R.) que va a soportar.

Las cementaciones se dividen en primarias y forzadas, siendo la cementación primaria el primer y más importante paso para el logro de una buena terminación del pozo. Es una operación única, ya que ofrece la mejor oportunidad para desplazar de manera efectiva al fluido de perforación (F.P.) con una lechada de cemento.

Una operación de cementación es el proceso de mezclar cemento en polvo, con o sin aditivos, con agua y/o aceite, y bombear esta mezcla hacia el fondo del pozo para que se aloje alrededor de la T.R., colocada previamente, o en el agujero abierto mediante la Tubería de Perforación (T.P.). Pero allí acaba toda similitud entre un trabajo y otro, pues cada operación es especial, debido a que no

puede seguirse la misma metodología al pie de la letra en otros pozos y por lo tanto, se hace necesario contar con la experiencia y buen criterio de las personas involucradas en estas operaciones. De esta forma, la ejecución de cada trabajo lo convierte en un "Estado de Arte".

Existen, sin embargo, consideraciones previas a la operación de cementación, tal como la homogeneización de criterios en el uso, manejo y mezclado del cemento a granel con aditivos, así como medición de propiedades y diseño de la lechada de cemento. Por otro lado existen procedimientos que aplicados durante la operación han demostrado su efectividad en el buen desempeño de una cementación primaria y que sin llegar a ser recetas si pueden, como pretende este trabajo, ayudar al ingeniero dedicado a estas operaciones a tener más control sobre la operación mediante un mejor conocimiento del proceso del desplazamiento del F.P. por el elemento principal de este tipo de trabajos, y que lo constituye la lechada de cemento.

Este trabajo se divide en seis capítulos. El Capítulo I es esta introducción, que describe el objetivo del presente trabajo, así como una sinopsis de los cinco capítulos restantes.

En el Capítulo II se hace una breve reseña de algunos datos históricos de los primeros trabajos documentados en materia de cementaciones, así como la importancia de la existencia de organizaciones que regulen y homogeneicen los criterios en la metodología de medición de materiales, así como del equipo utilizado en la medición de propiedades de la lechada, manejo y control de calidad de materiales usados en su preparación; y ejecución de la operación de cementación.

El Capítulo III aborda lo referente a las propiedades reológicas de las lechadas, propiedades tixotrópicas de los (F.P.), los instrumentos usados para medir el comportamiento de los mismos; y las ecuaciones utilizadas en el análisis de la información obtenida.

El Capítulo IV hace una pequeña descripción de los tipos de cementos y aditivos de mayor uso en la actualidad en la industria Petrolera.

En el Capítulo V se mencionan algunos parámetros involucrados en el diseño de una operación de cementación y la lechada de cemento correspondiente, así como la importancia de un control en la ejecución de la operación.

Finalmente en el Capítulo VI se ofrecen algunas recomendaciones coincidentes, encontradas en la literatura, sobre los procesos de desplazamiento del lodo y colocación del cemento, así como sobre algunos otros aspectos, que en pruebas de laboratorio y en el trabajo de campo han demostrado efectividad, así como una breve descripción del proceso de desplazamiento.

## CAPITULO II. ANTECEDENTES

Si bien la historia de la industria petrolera tiene sus inicios en los Estados Unidos de Norteamérica con la perforación del pozo Drake en 1859, no fue sino hasta 1903 que se utilizó una lechada de cemento, con el fin de aislar en el fondo del pozo, una zona de agua que se encontraba sobre un cuerpo arenoso productor de aceite en el campo Lompoc en California.

A Frank F. Hill con la Union Oil Co., se atribuye el haber mezclado y vaciado, a través de un vertedor, una lechada consistente en 50 sacos de cemento puro tipo Portland. Después de 28 días el pozo fue terminado perforando el cemento a través de la zona de arena productora de aceite, el agua había sido aislada efectivamente. Este pasó a ser una práctica aceptada y pronto se extendió a otros campos Californianos en donde se presentaron dificultades similares.

Las técnicas del vertedor y el desplazamiento con tubería franca fueron pronto reemplazadas por el método de los dos tapones introducido por A.A. Perkins en 1910; y fue con este método que la era de la cementación moderna había comenzado.

Los primeros tapones o espaciadores eran de hierro colado y contenían discos amarrados que funcionaban como limpiadores de lodo en la (T.R.). Cuando el cemento era desplazado a través de la tubería, el tapón ocasionalmente se atoraba, provocando un incremento de presión que eventualmente dañaba la bomba.

La patente de Perkins especificaba el uso de los dos tapones. Posteriormente los tribunales reglamentaron que la patente incluyera cualquier barrera para prevenir el mezclado del cemento con cualquier otro tipo material que pudiera contaminarlo, no importando si éste se usaba antes o después que el cemento.

Los servicios de la Perkins Co. no se encontraban disponibles fuera del área de California, de tal forma que el proceso de la cementación tuvo diferentes comienzos. En Oklahoma fue introducido por Erie P. Halliburton en 1920 en el campo Hewitt del condado Carter.

La práctica común en Oklahoma era colocar la T.R. en la cima de la arena. En pozos perforados con rotaria, la T.R. era puesta comúnmente alta para evitar perforar en la zona productora.

Un reventón ocurrido en el pozo Skelly # 1 mientras que la tubería se corría en la zona de arena productora de aceite, se remedió después de varios esfuerzos cuando Halliburton, usando un equipo de cementación mezcló y bombeó 250 sacos de cemento tipo Portland con agua dentro del pozo. Luego de una espera de 10 días, el cemento se perforó y el pozo empezó a producir sin cantidades excesivas de gas o agua. Durante los siguientes meses se cementaron 61 pozos con este método.

Antes de 1940, los pozos se cementaban con cemento empacado en sacos, y eran muy pocos los aditivos en uso. En 1930 sólo existía un aditivo y un tipo de cemento. En la década siguiente había dos tipos de cemento y se habían desarrollado tres aditivos. Veinticinco años más tarde había ocho clases de cemento tipo API y 38 aditivos en uso común; hacia 1985 aunque el número de tipos de cemento había decrecido a cuatro, el número de aditivos había sobrepasado los cincuenta.

Con la aparición del cemento a granel en 1940 el manejo de los aditivos se hizo más práctico, se redujeron los desperdicios y se hicieron ahorros en mano de obra. La primera estación de cemento manejado a granel se construyó en Salem, Illinois. Otras plantas pioneras se construyeron en Texas y California. Esas estaciones conducían el cemento en carros tanque de ferrocarril especiales, de donde se vaciaba directamente a camiones -construidos también para este propósito-. El manejo del cemento a granel se introdujo en 1940, pero fue hasta 1949, con la aparición de los cementos puzolánicos, que el manejo a granel del cemento se hizo popular.

A través de los años ha habido un cambio continuo en el equipo de bombeo para hacerlo más portátil y dotarlo de mayor potencia para lograr un buen desempeño a presiones mayores. Para mejorar los trabajos de cementación primaria se ha hecho uso de una gran variedad de dispositivos mecánicos con el fin de colocar una cubierta de cemento más uniforme alrededor de la T.R. Estos dispositivos incluyen el uso de tapones de cementación, líneas de medición, centradores y raspadores.

A medida que ha avanzado la tecnología y los pozos se perforan a mayores profundidades, las prácticas de cementación han cambiado. Entre 1910 y 1920 se consideraban profundos los pozos entre 2,000 y 3,000 (pies). En los años 20<sup>os</sup> algunos campos se desarrollaron con pozos de más de 6,000 (pies).

Las temperaturas y presiones más altas trajeron como consecuencia nuevos problemas en las operaciones. Cementos utilizados a 2,000 (pies) sin dificultad, no resultaron adecuados a 6,000 ya que tendían a fraguar rápidamente.

Mientras que los laboratorios de prueba no se desarrollaron, la colocación del cemento fue un asunto de ensayo y error. Para retardar el fraguado en pozos a altas temperaturas, se intentó el uso de grandes cantidades de hielo a fin de bajar un poco la temperatura del lodo, este intento no fue del todo exitoso. Uno más confiable fue el mezclar y bombear el cemento tan rápido como fuera posible.

El tiempo de espera a que el cemento fraguara se consideraba improductivo. Cuando ocurría alguna falla en la cementación se achacaba a un insuficiente tiempo de espera del fraguado (WOC) o a un mal cemento. Se empezó a vender entonces una gran variedad de aceleradores de fraguado bajo una enorme cantidad de marcas registradas, pero todos ellos no eran sino soluciones de cloruro de calcio.

Los tiempos de espera del fraguado del cemento se redujeron a medida que se comprendieron mejor aspectos tales como: La composición, los procedimientos de prueba y la aceleración química del

fraguado.

Al principio, 72 horas se consideraban suficientes para que el cemento fraguara de forma efectiva alrededor de la zapata, y todos los organismos reguladores adoptaron este criterio casi universalmente. Luego, en 1946 Farris publicó sus hallazgos en cuanto a la influencia que tienen la presión y el tiempo sobre las propiedades de adherencia del cemento. Como la experiencia de campo validó estas observaciones, el tiempo de espera se redujo entre 24 y 36 horas.

El éxito de una cementación primaria era evaluado con una prueba de admisión de agua, si no se encontraba agua en la prueba, entonces la cementación se consideraba bien hecha, pero las fallas eran frecuentes. Estudios de aquellos primeros días revelaron que el cemento debía alcanzar una cierta resistencia o dureza para cumplir los objetivos previstos. Humble publicó los suyos en 1928 sobre pozos del golfo de México.

Los núcleos tomados de un gran número de pozos profundos revelaron la gran cantidad de cementaciones fallidas a consecuencia de contaminación del cemento por el F.P. A fin de disminuir este problema, se dio una gran atención al acondicionamiento del lodo, la circulación de éste antes de cementar, así como al uso de agua como fluido espaciador.

En los primeros años se aplicaba presión a la lechada de cemento después de colocarse en el pozo. Está reportado que ya en 1905 Frank F. Hill corrió tubería y un empacador al fondo de la T.R. y bombeó cemento por el exterior de la tubería para obtener un mejor aislamiento del agua. Aunque el método eliminaba el agua exitosamente, la tubería y el empacador quedaban ocasionalmente clavados cuando el agua de la lechada se perdía en la formación.

En otros trabajos el cemento era descargado en el fondo, luego el pozo era llenado con agua para aplicar una presión que forzara al cemento. También se aplicaba presión de bombeo a pozos completamente llenos para obtener un mejor aislamiento.

Cuando se usaban grandes volúmenes de cemento, la columna de cemento y fluido a un lado de la tubería era más pesada que la columna hidrostática del interior. Por tanto, era necesaria cierta presión para mantener la columna de cemento en su lugar. Largas sargas de tubería se corrieron con válvulas de contrapresión, las cuales no soportaban en todos los casos. Se aplicaba presión hasta que el cemento se consideraba fraguado, a este método se le llamó cementación forzada -squeezing-.

Esta práctica de bombear algunos cientos de sacos de cemento en un pozo a alta presión provocó mucha polémica, sus defensores argumentaban que desplazaba el lodo que no había sido posible mover de entre la T.R. y el agujero durante la operación original; en tanto los otros aducían que podía comprimir la formación expuesta o, incluso, fracturarla.

Los retenedores de cemento perforables fueron usados desde 1912, pero no fue sino hasta 1939 que los de tipo removible fueron introducidos a la industria. Estos ahorraron tiempo y dinero. Empezaron a ser usados ampliamente en circunstancias que no requerían de mantener el cemento a alta presión hasta su fraguado.

Cuando una formación perforada producía un volumen no esperado de agua o gas excesivo, era forzada y reperforada. La frecuencia de operaciones de cementación forzada y reperforaciones era alta, particularmente en la costa del golfo, pues la mayoría de los operadores hacían este tipo de operación como protección en las arenas antes de perforar para la terminación.

Junto con la homogeneización de las técnicas surgió también la necesidad de establecer criterios de uniformidad en cuanto a las técnicas de prueba de los cementos para hacerlas reproducibles. Es así como en 1937, el Instituto Americano del Petróleo (API) estableció el primer comité encargado de estudiar a los cementos.

Existían en ese entonces algunos dispositivos de pruebas de cementos equipados con aparatos de medición de resistencia, y aparatos de agitación para determinar la bombeabilidad y fluidez de las

**lechadas de cemento a las temperaturas del fondo del pozo.**

**Uno de los aparatos más innovadores para evaluación de lechadas, lo constituyó el probador de tiempo de espesamiento bajo condiciones de presión y temperatura controladas, desarrollado por Farris junto con la Standart Oil & Gas Co. en 1939.**

**Con el establecimiento de los laboratorios de pruebas se presentó un gran desarrollo en los cementos para pozos de aceite entre 1937 y 1950. En esa época, el Mid-Continent API Committe on Oil Well Cement preparó el primer borrador del API código 32 (API Code 32). Esta código se publicó en 1952 y ha sido periódicamente modificado por el comite nacional API en estandarización de cementos, formado en 1953.**

**Los estudios sobre estandarización se publicaron anualmente en dos folletos. Las especificaciones API se publicaron en el volumen 10A, y el "API Recommended Practice of Testing Oil Well Cements and Cement Additives" se publicó en el Volumen 10B. A partir del 1984 se publican conjuntamente.**

### CAPITULO III. CARACTERISTICAS DE LA LECHADA DE CEMENTO

Para que la lechada de cemento tenga un buen desempeño, es necesario que cumpla con ciertos requerimientos, mismos que se verán en capítulos subsecuentes. A fin de lograr el control de los parámetros que los regulan, se hace indispensable que éstos puedan medirse. Para lograr una lechada que sea reproducible se utiliza la reología, que es una rama de la física dedicada al estudio de los fluidos y en general de los cuerpos susceptibles de deformación.

Como veremos más adelante, es conveniente tener control sobre algunas propiedades de la lechada a lo largo de la cementación, las cuales pueden monitorearse durante el trabajo. Asimismo, pueden medirse en el laboratorio a fin de lograr las mejores condiciones de operación de una lechada en particular, mediante la simulación de aquellas con que va a enfrentarse en el fondo del pozo.

Parámetros tales como bajos valores de punto de cedencia y viscosidad plástica, son esenciales para un adecuado desempeño de la lechada, tanto en el desplazamiento del fluido de perforación (F.P.), como para lograr un patrón de flujo adecuado y la velocidad requerida para llegar a él. Por ello creemos de mayor importancia describir estas características de flujo de la lechada.

Estos parámetros pueden cuantificarse a través de mediciones efectuadas en viscosímetros Rotacionales y Capilares. De ellos, se genera información que sirve para determinar y predecir el comportamiento hidráulico del fluido en cuestión.

Las ecuaciones utilizadas en el análisis de la información difieren debido a los principios geométricos y de diseño de los aparatos utilizados -viscosímetros-, empero, todas generan similares relaciones entre las variables involucradas -esfuerzo de corte y velocidad de corte, cuyas unidades son  $(\text{lb}/100\text{pie}^2)$  y  $(\text{seg}^{-1})$  respectivamente-; existe, empero una tendencia a expresar el valor de esfuerzo de corte en (Pa).

Un buen entendimiento de la reología de los fluidos en el pozo, pueda ser de gran ayuda para una adecuada selección del equipo de bombeo, composición de la lechada y técnicas de colocación. A partir del desarrollo de los viscosímetros rotacional de varias velocidades y el de tubo capilar -los de mayor uso en la industria Petrolera- para la medición de las propiedades de flujo, las características reológicas de los fluidos en el pozo han sido mejor comprendidas y el análisis ha avanzado más allá de los métodos empíricos usados en el pasado.

El uso de los parámetros reológicos de la lechada de cemento y del F.P permiten que los siguientes factores puedan computarse durante la operación de cementación:

1. Velocidad anular y gasto de bombeo requeridos para lograr flujo tapón, laminar o turbulento.
2. Velocidad de la lechada dentro de la T.R.
3. Caída de presión por fricción en el espacio anular y en la tubería, para los espaciadores y la lechada.
4. Presión esperada en la cabeza a medida que el tapón se mueve por la tubería hacia el fondo del pozo.
5. Potencia hidráulica requerida en la cabeza del pozo.
6. Volumen de lechada para un tiempo de contacto dado.
7. Tiempo requerido para completar la operación.

### PROPIEDADES DE FLUJO DE LOS FLUIDOS

Por sus propiedades de flujo, a los fluidos (agua, lodos, lechadas de cemento, espaciadores y fluidos desplazantes), se les clasifica convencionalmente como Newtonianos o no Newtonianos. Los primeros como el aceite o agua, muestran una proporcionalidad directa y constante entre la velocidad de corte (la cual se relaciona con la velocidad del flujo o ritmo de flujo), y el esfuerzo de corte (relacionado con la caída de presión debida a ese flujo); en tanto que el régimen de flujo sea laminar.

En este patrón de flujo la viscosidad es independiente de la velocidad de corte a presión y temperatura constantes. Un fluido Newtoniano empezará su flujo inmediatamente que se le aplique una presión (fuerza/área), cuando ésta se quite, el fluido regresará inmediatamente al estado previo a la aplicación de dicha presión.

El término no Newtoniano describe a todo fluido cuyo comportamiento sea diferente al Newtoniano, ejemplo: Fluidos de perforación, lechadas de cemento y aceites asfálticos pesados, los cuales son reológicamente complejos, frecuentemente descritos como plásticos de Bingham o como fluidos de ley de potencias. Los fluidos no Newtonianos no muestran una proporcionalidad directa entre la pérdida de presión y el gasto de flujo a temperatura y presión constantes. Algunos tipos de fluidos no Newtonianos, tal como los F.P., no empiezan inmediatamente su movimiento al aplicarse una fuerza, pero sí pasan por las distintas etapas de flujo: Tapón, laminar y turbulento.

Algunos fluidos poseen, en el estado estático, tixotropía, categoría de algunos fluidos no Newtonianos de tiempo dependiente referente a la construcción de una estructura rígida o semi rígida que se rompe al aplicar un esfuerzo de corte, generando el movimiento del fluido en tanto que la presión o esfuerzo de corte no cesen, en caso contrario la estructura del fluido tiende al estado de reposo.

Los dos modelos matemáticos usados comúnmente para describir el comportamiento de los F.P. y las lechadas de cemento son: El modelo plástico de Bingham y el modelo de Ostwald de Waele conocido como ley de potencias, los cuales describen bien el comportamiento de fluidos no Newtonianos de tiempo independiente (que son aquellos en los el valor de corte y esfuerzo de corte no cambian con el tiempo). Existen otras categorías además de las descritas dentro de los fluidos no Newtonianos tanto de tiempo independiente -Pseudo-plásticos y dilatantes-, así como de los de tiempo dependiente -Reopéticos-; y aún viscoelásticos y complejos los cuales no abordaremos.

## MODELO PLASTICO DE BINGHAM

Este modelo es el más ampliamente utilizado en la industria petrolera debido a que describe muy cercanamente a los F.P. y lechadas de cemento y a la simplicidad del modelo mismo. Asume que las lechadas se comportan como un fluido plástico de Bingham ideal y todos los cálculos reológicos pueden hacerse mediante la relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte. Esta relación llamada "viscosidad aparente" (en lugar de simplemente viscosidad) puede obtenerse con un viscosímetro rotacional. Este instrumento se encuentra en una gran variedad de modelos para su uso en el campo y en laboratorio y está diseñado para operar en 6 velocidades de rotación (600, 300, 200, 100, 6 y 3 rev/min) u 11 velocidades de rotación (600, 300, 200, 180, 100, 90, 30, 6, 3, 1.8 y 0.9 rev/min).

Para este instrumento el esfuerzo de corte puede expresarse como:

$$T = \text{Lectura del instrumento} * \text{factor de resorte} * 1.066/100$$

Donde:  $T =$  Esfuerzo de corte, (lb/100 pie<sup>2</sup>).

El valor de 1.066 puede variar de acuerdo con la combinación de rotor y balancín. La velocidad de corte es función de la velocidad de rotación y de las dimensiones del rotor y el balancín. Para el instrumento estándar:

$$\dot{\gamma} = \text{velocidad de corte} = 1.7023 * (\text{rev/min})$$

Donde:  $\dot{\gamma} =$  Velocidad de corte, (seg<sup>-1</sup>)

Los dos términos usados en la descripción del fluido en un modelo plástico de Bingham son la viscosidad plástica (VP) o plastic viscosity (PV) y el punto de cedencia (PC) o yield point (YP). En adelante se denotarán indistintamente. La viscosidad plástica es expresada como la extrapolación de la pendiente de la línea recta en una gráfica de velocidad de corte vs. esfuerzo de corte. Es una medida del espesamiento del fluido y depende del contenido de sólidos, su tamaño, así como de la temperatura. Como el contenido de sólidos juega un papel importante, es difícil la predicción de la viscosidad plástica en fluidos de alta densidad, pero es, sin embargo un parámetro muy útil en el control de viscosidad de éstos. El punto de cedencia es la intercepción de esta línea recta con el eje del esfuerzo de corte -relacionado con la fuerza mínima requerida para iniciar el flujo y que proporciona una indicación de las fuerzas de atracción entre los sólidos y, por tanto, de la desviación del comportamiento no Newtoniano del fluido- en la misma gráfica de velocidad de corte vs. esfuerzo de corte.

El viscosímetro VG Fann (Figura III.1) está diseñado para proporcionar los elementos de cálculo de la viscosidad plástica y el punto de cedencia. Este aparato ejerce los esfuerzos de corte requeridos a dos diferentes velocidades de corte: 600 y 300 (rev/min). La ecuación básica que describe al modelo plástico de Bingham es:

$$T = \sigma + 2.088555 \cdot 10^6 (\dot{\nu})$$

Donde:

T = esfuerzo de corte, (lb/pie<sup>2</sup>)

$\sigma$  = punto de cedencia, (lb/pie<sup>2</sup>)

$\dot{\nu}$  = vel. de corte, (seg<sup>-1</sup>)

up = viscosidad plástica, (cp)

Esta ecuación proporciona una línea recta, y de ella, en base a la calibración del instrumento, pueden determinarse la VP y el PC. La PV es la lectura de 600 (rev/min) menos la lectura de 300 (rev/min). El PC es el resultado de VP menos el de la lectura de 300 (rev/min). Nótese la diferencia entre viscosidad plástica y viscosidad aparente. La viscosidad plástica es la pendiente real de la parte lineal de la curva de velocidad de corte vs. esfuerzo de corte como se muestra en la Figura III.2 y es un valor constante. La viscosidad aparente, la cual depende de la velocidad de corte, es la pendiente de la línea recta desde el origen a un punto de la curva velocidad de corte vs. esfuerzo de corte (esto es el cociente del esfuerzo de corte entre la velocidad de corte). Figura III.3.

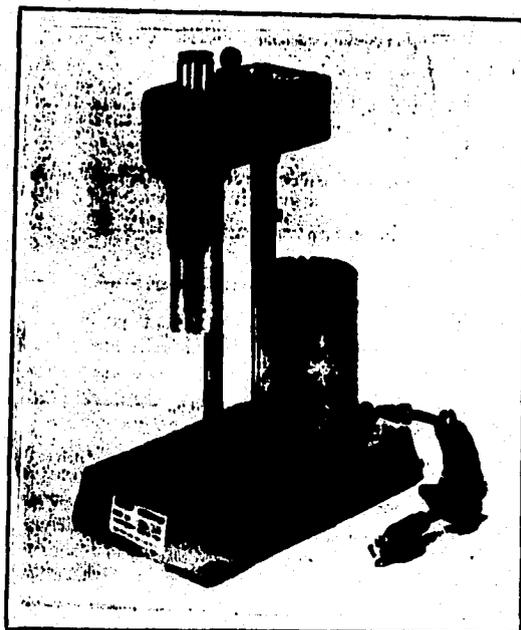


FIGURA III.3 Viscosímetro Fann.

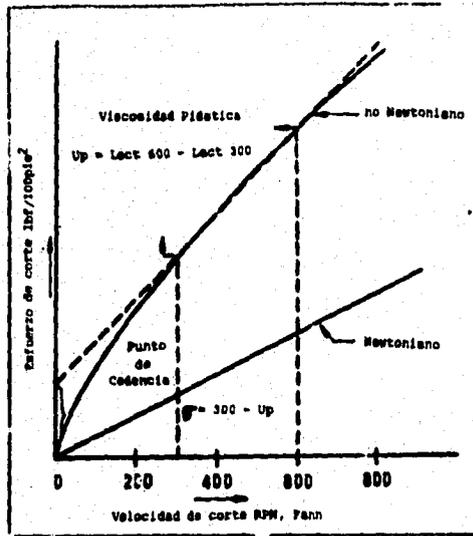


FIGURA III.2 Curvas Velocidad de corte/Esfuerzo de Corte para fluidos Newtonianos y no Newtonianos.

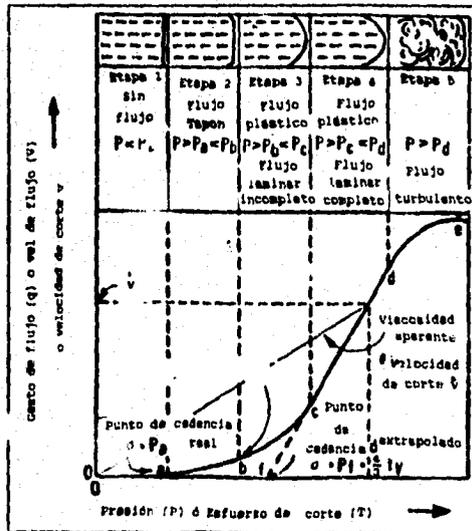


FIGURA III.3 Comportamiento típico de flujo de los fluidos no Newtonianos.

## EL MODELO DE LEY DE POTENCIAS

Este modelo, otra aproximación matemática para fluidos no Newtonianos, se popularizó por Metzner y Reed. Se basa en la suposición de que el fluido (lechada de cemento) muestra una proporcionalidad entre el logaritmo de la caída de presión y el logaritmo del gasto de flujo, con la inclusión de un valor de mínimo esfuerzo de corte requerido para iniciar el flujo.

Las ecuaciones de este modelo son más complejas pero también más precisas que aquellas usadas en el modelo plástico de Bingham, por tanto, los resultados son más cercanos al comportamiento real de las lechadas de cemento en el fondo del pozo.

Con conocimiento de las características de la curva de velocidad de corte vs. esfuerzo de corte es posible el cálculo de la viscosidad aparente de la lechada de cemento a la velocidad de corte observada. Esta viscosidad se utiliza en las ecuaciones hidráulicas de igual forma que la VP usada en el modelo plástico de Bingham.

Los dos parámetros requeridos para definir el modelo de fluidos ley de potencias son usualmente denotados como  $n$  y  $K$ . En este caso  $n$  es la pendiente de la curva del log del esfuerzo de corte vs log de la vel. de corte o índice de comportamiento de flujo, y  $K$  es la intercepción de esta línea con el eje de unidades de vel. de corte y es conocido como índice de consistencia (Figura III.4). Si se conocen estos dos índices es posible el cálculo del número de Reynolds ( $NR_e$ ) y la velocidad crítica a la cual empiece el patrón de flujo requerido.

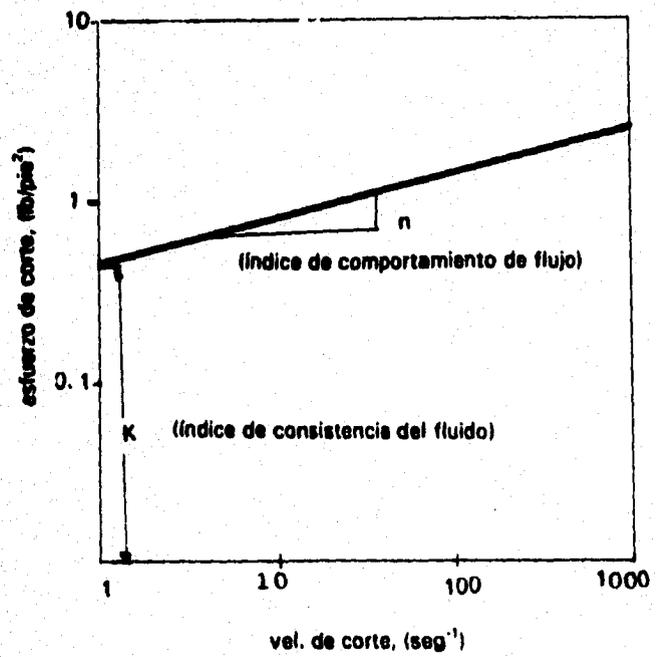


FIGURA III.4 Gráfica Velocidad de Corte/Esfuerzo de Corte de una lechada de cemento (Fluido no Newtoniano).

El viscosímetro Fann se usa para la obtención de los datos del modelo de ley de potencias. La ecuación que utiliza es la siguiente:

$$T = K (\dot{\gamma})^n$$

Donde:

$K$  = Intercepción de líneas (Índice de consistencia del fluido), (lb·seg<sup>-1</sup>/pie<sup>2</sup>).

$n$  = Pendiente de la curva esfuerzo de corte/vel. de corte (Índice de comportamiento de flujo), (adimensional).

Mientras que el modelo plástico de Bingham hace uso solamente de las lecturas de 600 y 300 (rev/min), el modelo de ley de potencias puede usar también, para mayor precisión, las de 200 y 100 (rev/min) conjuntamente con aquellas. Con la información obtenida puede trazarse una línea recta graficando en papel log/log.

$$\log_{10}(T) = \log_{10}K + n \log_{10}(\dot{\gamma})$$

Para un fluido en ley de potencias la viscosidad aparente a cualquier velocidad de corte determinada esta dada por:

$$U = 47,880 K \dot{\gamma}^{n-1}$$

Donde las unidades son (lb·seg<sup>n</sup>/pie<sup>2</sup>) y (seg<sup>-1</sup>) respectivamente. Se observa que si  $n = 1$ , entonces  $U = 47,880$ ,  $K$  es constante y el fluido es Newtoniano.

## APARATOS USADOS PARA PREDECIR LAS PROPIEDADES DE FLUJO DE LOS FLUIDOS

Como se indicó, para cálculos de flujo, se hace necesaria la medición precisa de la viscosidad del fluido. Los dos principales instrumentos usados para mediciones reológicas son: El viscosímetro de tubo capilar y el viscosímetro VG Fann rotacional.

El viscosímetro de tubo capilar (el cual se usa para medir la relación entre la caída de presión y el gasto de flujo) es el método preferido para la determinación del índice de comportamiento de fluidos no Newtonianos.

Tener la información de caída de presión a varios gastos de flujo permite la elaboración de una gráfica log/log de vel. de corte vs. esfuerzo de corte. Para fluidos que no muestran dependencia del tiempo (fluidos no tixotrópicos), estos datos proporcionan una línea recta. El índice de comportamiento de flujo,  $n$ , es la pendiente de esa recta y el índice de consistencia,  $K$ , es el valor de la intercepción con el eje del esfuerzo de corte. El valor de  $n$  será el mismo independientemente del instrumento de medición, el de  $K$  en cambio diferirá, por tanto, requiere de un factor de corrección para el VG Fann ya sea de geometría anular o de tubería.

Es difícil mantener el cemento uniforme y bombeable por largo tiempo para obtener mediciones del viscosímetro de tubo capilar. Sin embargo, los valores se obtienen más fácilmente con las lecturas del viscosímetro Fann rotacional, que es más sencillo de utilizar, y mediante el uso de las ecuaciones anteriores para convertir las (rev/min) del instrumento y las lecturas del dial en valores de esfuerzo de corte y vel. de corte. Del mismo modo que en el viscosímetro de tubo capilar, se obtiene, graficando en papel log/log, una línea recta.

La complejidad de las reacciones químicas ocurridas mientras el cemento y el agua se mezclan hacen de gran importancia que los métodos de preparación de la lechada se estandaricen para que pueda

obtenerse del viscosímetro una información confiable y reproducible. Los procedimientos estándar de prueba se publican en API Spec. 10.

### ECUACIONES UTILIZADAS EN LOS CALCULOS

Existe poca diferencia entre los resultados de los cálculos realizados con el modelo plástico de Bingham y los efectuados con el modelo de la ley de potencias para los fluidos no Newtonianos (aproximadamente 10% para los cálculos de la velocidad crítica, así como el de la caída de presión en la zona de flujo turbulento), exceptuando aquéllos hechos para la caída de presión en un patrón de flujo laminar. Una mayor discrepancia pueda resultar de los distintos métodos para la preparación de la lechada o de las diferentes marcas de cemento utilizadas.

El movimiento del fluido en la tubería o en el E.A. depende de la velocidad y las propiedades del fluido. Los cálculos para el flujo tapón, laminar o turbulento se basan usualmente en alguna forma de la correlación del  $NRe$  (modificada para fluidos no Newtonianos), o alguna otra correlación generalizada. El  $NRe$  es un indicador asociado al patrón de flujo existente, de acuerdo a las condiciones de densidad y la velocidad que el fluido puede alcanzar, debido principalmente a su viscosidad, y al diámetro de la tubería por donde fluye.

El viscosímetro rotacional pueda ser utilizado, con pequeñas variaciones en las aproximaciones matemáticas, para desarrollar información a usar en el cálculo del comportamiento de flujo de los fluidos no Newtonianos. De las lecturas de 600, 300, 200 y 100 (rev/min), se obtienen valores de  $n$  y  $K$ , y la caída de presión vs. el gasto de flujo, así como el factor de fricción vs.  $NRe$  pueden determinarse.

Las ecuaciones del modelo de la ley de potencias se ilustran en los siguientes ejemplos:

$$n = 3.32 \cdot (\log_{10} \{ \text{lectura @ 600 (rev/min)} / \text{lectura @ 300 (rev/min)} \})$$

y:

$$K = \{ N \cdot [\text{lectura @ 300 (rev/min)} \cdot 1.066 \cdot 100 \cdot (511)^n] \}$$

Donde N = Factor del rango de extensión del resorte del viscosímetro Fann.

Si se conocen los valores de punto de cedencia y viscosidad plástica, tendremos:

$$n = 3.32 \cdot \log_{10} [2u_p + \sigma / u_p + \sigma]$$

y:

$$K = \{ N \cdot (u_p + \sigma) \cdot 1.066 / 100 \cdot (511)^n \}$$

Donde:

$u_p$  = Viscosidad plástica, (cp)

$\sigma$  = Punto de cedencia, (lb/100 pie<sup>2</sup>)

\* Estos factores cambian para las diferentes combinaciones de rotor y bob.

Las siguientes ecuaciones se emplean en los cálculos de flujo:

1. Velocidad de Desplazamiento.

$$\overline{VD} = 17.15 \text{ qb/di}^2 = 3.057 \text{ qcf/di}^2$$

Donde:

$\overline{VD}$  = Velocidad de desplazamiento promedio, (pie/s)

qb = Gasto de flujo, (bl/min)

qb = Gasto de flujo, (pie<sup>3</sup>/min)

di = Diámetro interno de la tubería, (pg).

Para el E.A.

$$di^2 = diop^2 - doip^2$$

Donde:

diop = Diámetro interno de la tubería exterior, o agujero descubierto, (pg)

doip = Diámetro externo de la tubería interna, (pg).

2. Número de Reynolds.

$$NRe = [1.86 V^{(2-n)} \rho s / K (96/di)^n]$$

Donde:

NRe = Número de Reynolds, (adimensional)

V = Velocidad, (pie/s)

$\rho_s$  = Densidad de la lechada, (lbm/gal).

Para el E.A.

$$d_i = d_{iop} - d_{oip}$$

o bien:

$$d_i = (4 \cdot \text{área de flujo} / \text{perímetro mojado})$$

3. Área anular T.R./Agujero.

$$A = 0.7854 (d_h^2 - d_o^2)$$

Donde:

$A$  = Área, (pg<sup>2</sup>)

$d_h$  = Diámetro del agujero, (pg)

$d_o$  = Diámetro de la T.R., (pg)

4. Velocidad necesaria para alcanzar flujo turbulento.

$NRe = 2,100$  (Si el  $NRe = 3,000$  usar el factor 1,613 en lugar de 1,129)

$$V_c = [1,129 K (96/d_i)^n / \rho]^{1/(2-n)}$$

Donde:

$V_c$  = Velocidad crítica para llegar al flujo turbulento, (pie/s)

$\rho$  = Densidad del fluido, (lbm/gal).

### 5. Presión Hidrostática.

$$P_h = 0.052 f h$$

Donde:

$P_h$  = Presión Hidrostática, (lb/pg<sup>2</sup>)

$h$  = Altura de la columna de fluido, (pie)

$f$  = Densidad del fluido, (lbm/gal).

### 6. Caída de presión por fricción.

$$\Delta p_f = 0.039 L f V^2 / d_i$$

Donde:

$\Delta p_f$  = Caída de presión por fricción, (lb/pg<sup>2</sup>)

$L$  = Longitud de la tubería, (pies)

$f$  = Factor de fricción de Fanning, (adimensional)

Para el factor de fricción en flujo turbulento de lechadas que no contengan bentonita,

$f = 0.00454 + 0.645/NRe^{0.7}$ , y para los flujos tapón y laminar será  $f = 16/NRe$ .

### 7. Velocidad a un determinado NRe.

Para los cálculos generalizados, NRe para flujo tapón = 100.

Para lograr el flujo turbulento, el valor del NRe debe ser  $> 2,100$ , pero el valor más utilizado es

NRe = 3,000 para asegurar completamente que se desplaza en este patrón de flujo.

$$V = [NRe K (96/di)^n / 1.86 \rho]^{1/(2-n)}$$

Los términos se definieron en las ecuaciones antecedentes.

En el cálculo de la caída de presión, en flujo turbulento para el modelo plástico de Bingham, el factor de fricción de Fanning se obtiene de la correlación del factor de fricción/NRe para fluidos Newtonianos en tuberías comerciales, tal como se muestra en la Figura III.5

Para los dos métodos descritos, los cálculos para el E.A. con más de una sarta se basan en un diámetro equivalente (d.e.). Para E.A. con una sola sarta, d.e. es el diámetro del pozo menos el diámetro exterior de la T.R.

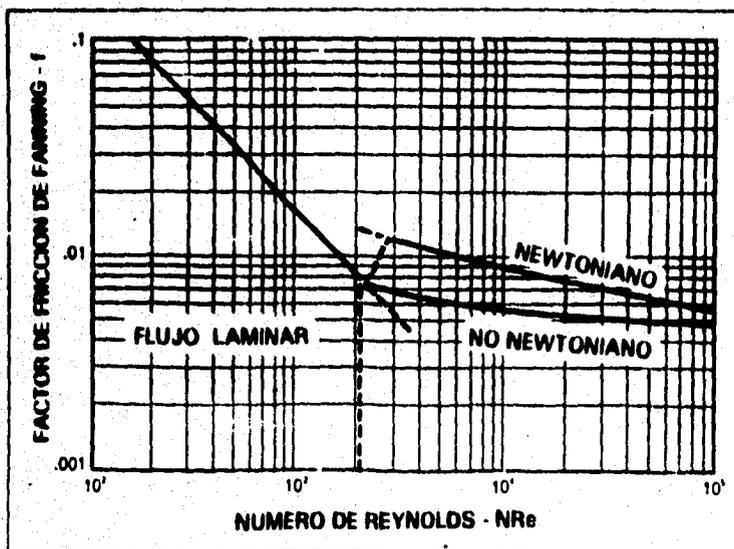


FIGURA III.5 Correlación NRe/Factor de Fricción.

## PROPIEDADES TIXOTROPICAS DEL FLUIDO DE PERFORACION

Los F.P., principalmente aquéllos del tipo arcilla en agua, poseen propiedades tixotrópicas, las cuales deben ser consideradas junto con las de flujo. Un material tixotrópico mostrará una reducción del esfuerzo gel al encontrarse bajo la acción de un esfuerzo cortante, y reformará su estructura gel cuando retorne al estado estático. Esta propiedad es el resultado de las fuerzas de interacción de los sólidos a bajas velocidades de corte, que provocan la gelación del fluido -la cual requiere de una fuerza finita para iniciar el flujo- y ejercen gran influencia en la viscosidad.

Por su parte, el punto de cedencia de un fluido tixotrópico puede extrapolarse a la porción recta de la línea velocidad de corte-esfuerzo cortante y la curva al punto de intercepción con el eje del esfuerzo cortante. Ver Figura III.6. Este valor no es el verdadero punto de cedencia sino una aproximación, pero también se expresa en  $(\text{lb}/100\text{pie}^2)$ . El concepto de viscosidad plástica es similar al de un fluido plástico de Bingham -pendiente de curva velocidad de corte vs. esfuerzo de corte-, sólo que aplicado a la porción recta de la curva.

Las ecuaciones de los modelos ley de potencias y plástico de Bingham pueden usarse una vez que los efectos de la estructura gel se han roto.

La tabla de la Figura III.7 ilustra la naturaleza tixotrópica de un F.P. como una función del tiempo, de la temperatura y de la pérdida de filtrado.

Los datos mostrados se obtuvieron usando un viscosímetro Fann Modelo 50. El F.P. fue premezclado y puesto en el viscosímetro. Después de permanecer estático durante 5 (min), el aparato fue puesto en marcha a una baja velocidad de corte; éste se incrementó a un ritmo constante hasta un valor de 1,000 (seg-1), después se redujo gradualmente al punto de velocidad inicial que es el más bajo. El lodo fue calentado hasta la siguiente temperatura de prueba, mientras que el viscosímetro fue operado a 1,000 (seg-1). Una vez alcanzada la temperatura, el viscosímetro se apagó y el lodo

permaneció estático por 5 (min), antes de que el esfuerzo de corte fuera aumentado o disminuido.

La tabla III.7 muestra también como a temperaturas elevadas un F.P. desarrolla un incremento en la viscosidad después de un corto tiempo, (la pérdida de filtrado de lodo también la incrementa).

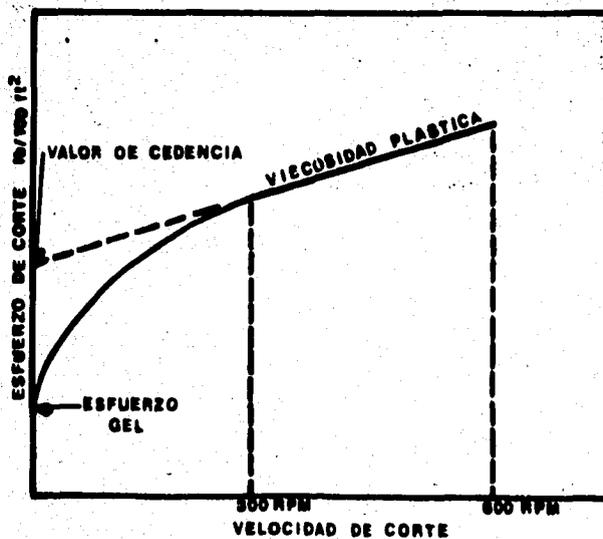


FIGURA III.6 Relación entre Esfuerzo de corte y Velocidad de corte para un fluido Newtoniano con propiedades tixotrópicas.

Temperatura (°C)	10 (s <sup>-1</sup> )		50 (s <sup>-1</sup> )		100(s <sup>-1</sup> )		500(s <sup>-1</sup> )		1.000 (s <sup>-1</sup> )	
	kg •	kg •	kg •	kg •						
17	0.008	—	0.08	1.0	0.080	0.70	0.065	0.36	0.070	0.27
66	0.580	—	0.08	1.6	0.034	0.73	0.021	0.20	0.027	0.16
93	1.500	—	0.29	2.0	0.130	0.90	0.027	0.18	0.025	0.14
121	2.100	—	0.78	3.5	0.300	1.70	0.048	0.27	0.039	0.19
149	7.300	—	4.00	10.0	0.900	7.00	0.120	1.50	0.060	0.62

\* Agua removida

FIGURA III.7 Características Tixotrópicas de un F.P.

El máximo esfuerzo gel puede ser determinado usando el método discutido por Garrison. La formación de la estructura gel es resultado de una disminución del ritmo en el esfuerzo de corte y está descrita por:

$$G = G_m K t/1 + K t \quad (1)$$

Rearreglando la ecuación (1)

$$1/G = (1/G_m K t) + (1/G_m) \quad (2)$$

Multiplicando por t:

$$t/G = (1/G_m K) + (t/G_m) \quad (3)$$

Donde:

$G$  = Esfuerzo gel al tiempo  $t$ , (lb/100pie<sup>2</sup>)

$G_m$  = Máximo esfuerzo gel, (lb/100pie<sup>2</sup>)

$K$  = Constante de flujo.

$t$  = Tiempo, (seg)

Cuando  $t/G$  es graficado como una función de  $t$  (Figura III.8), la ec.(3) representa una recta con pendiente igual a  $1/G_m$  y una intersección al eje de las ordenadas de  $1/G_m K$ ; el valor final del esfuerzo gel puede calcularse a partir del valor de la pendiente.

Los datos para algunos de los fluidos de perforación empleados en las pruebas de desplazamiento (desarrolladas por Haut) se graficaron y usaron con la ecuación (3) para determinar que el máximo esfuerzo gel es aproximado al esfuerzo gel a 10 (min).

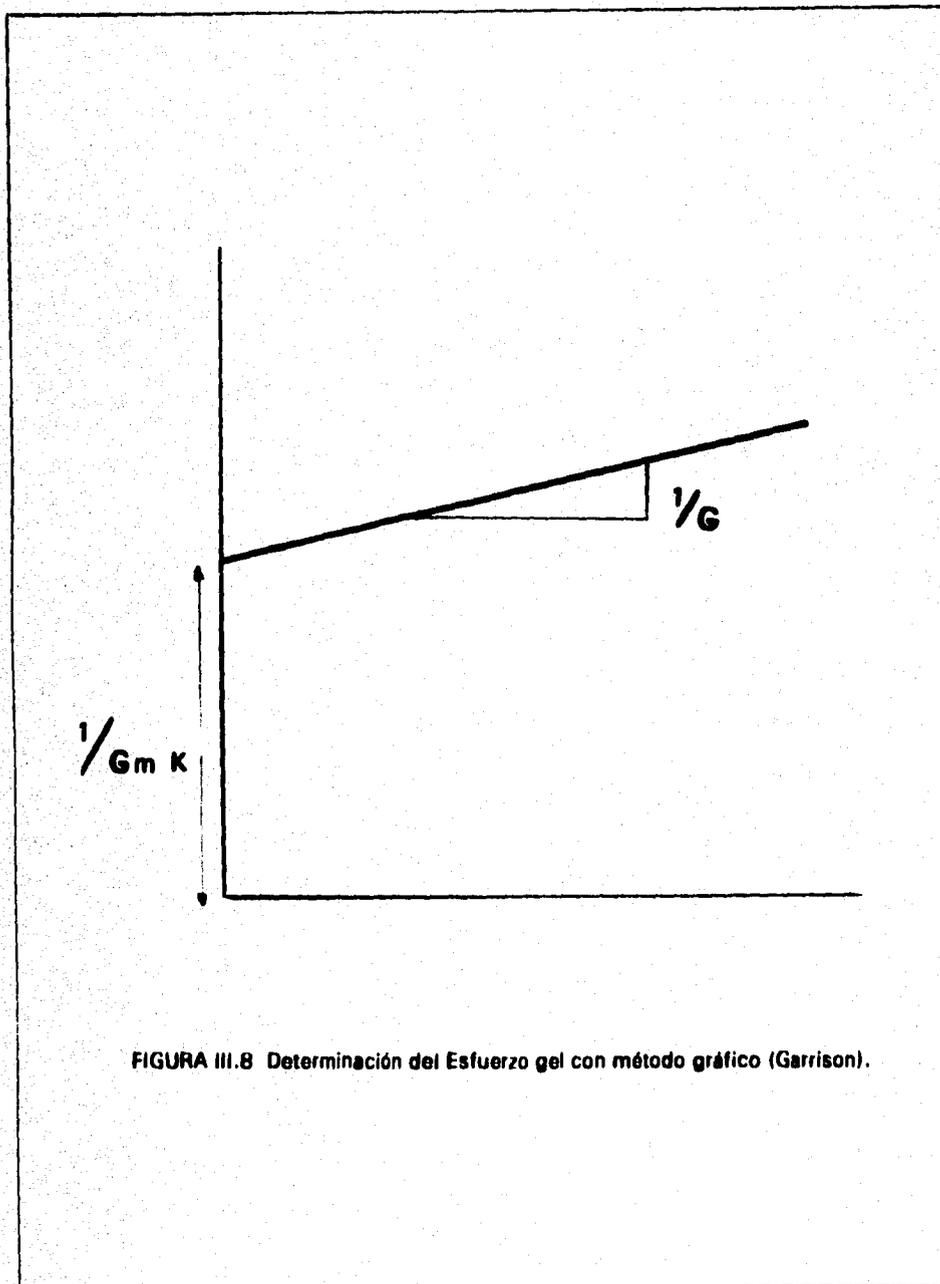


FIGURA III.8 Determinación del Esfuerzo gel con método gráfico (Garrison).

La Figura III.9 muestra como las propiedades tixotrópicas del F.P. como están indicadas para un esfuerzo gel de 10 (min), influenciaron el desplazamiento para unos valores de pérdida de filtrado constantes y un mismo valor de densidad del lodo y del cemento.

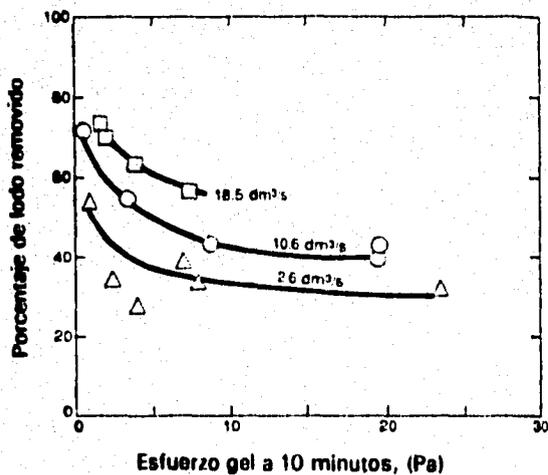


FIGURA III.9 Influencia del esfuerzo gel del F.P. en el proceso del desplazamiento

## CAPITULO IV. TIPOS DE CEMENTOS Y ADITIVOS USADOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA

La industria Petrolera en sus operaciones de cementación, utiliza en su gran mayoría cementos tipo Portland. Estos cementos se producen a partir de mezclas pulverizadas, parcialmente fundidas, compuestas de caliza con materiales como arcillas, arena, escoria, arenas silíceas, mineral férrico y carbón o rescoldos de pirita.

Desde el punto de vista químico estas mezclas están consideradas como óxidos de calcio ( $\text{CaO}$ ), magnesio ( $\text{MgO}$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicio ( $\text{SiO}_2$ ), fierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) y sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ).

Durante el proceso de fabricación del cemento, estos óxidos sufren un calentamiento de aproximadamente  $2700^\circ\text{F}$ , y se combinan para formar silicatos y aluminatos (comúnmente referidos como "clinker" -escoria-) que pueden reaccionar con agua para formar un producto hidratado con propiedades cementantes.

La pasta de cemento Portland endurecerá lo mismo bajo el agua que en la atmósfera, debido a esto es que se le conoce como cemento hidráulico. Estos cementos se fijan y endurecen por su acción química con el agua formando una masa como roca. La hidratación empieza tan pronto el cemento hace contacto con el agua. Cada partícula de cemento forma una especie de crecimiento en su superficie que gradualmente se extiende hasta que se enlaza con el crecimiento de otras, o bien, se adhiere a sustancias adyacentes de tal forma que se obtiene por resultado un endurecimiento y estrechamiento, además de un incremento en la fuerza.

El endurecimiento de las lechadas de cemento puede reconocerse por un incremento de la consistencia, la cual depende del tiempo, las condiciones de temperatura y presión, y la fineza de las composiciones de la lechada y del cemento mismo.

Los procedimientos y especificaciones para el comportamiento de algunos tipos de cementos Portland en el trabajo de la construcción son desarrollados por la American Society of Testing Materials (ASTM). Esta institución provee especificaciones para cinco tipos diferentes de cementos Portland: I, II, III, IV y V.

Los cementos manufacturados para uso en los pozos están sujetos a amplios rangos de temperaturas y presiones, y difieren considerablemente de los del tipo (ASTM) que están manufacturados para condiciones atmosféricas. Por tanto, el API provee especificaciones que cubren ocho clases de cementos para pozos de aceite y gas, designados con las letras A, B, C, D, E, F, G y H. Los cementos clases A, B y C corresponden a los tipos I, II y III; los tipos IV y V no tienen su correspondiente en las clases API.

La industria Petrolera determinó que las pruebas realizadas por la (ASTM) eran inadecuadas para comprobar el desempeño de los cementos en los pozos, ya que estos estudios se realizaron bajo condiciones poco posibles de encontrar en las operaciones de cementación.

En 1952 el comité nacional API adoptó estándares para seis clases de cementos usados en las operaciones de cementación de pozos de gas y aceite. La primera tentativa de estandarización -en 1953-, designada API Std 10A, fue titulada especificación API de cementos para pozos de aceite (Specification API for oilwell cements). Los estándares para las seis clases de cemento para pozos API cubrieron los requerimientos químicos determinados por los procedimientos (ASTM), y los requerimientos físicos determinados en concordancia con los procedimientos publicados en API RP 10b y (ASTM).

La industria Petrolera compra en su mayoría cementos manufacturados de acuerdo con las clasificaciones API, quien desde 1953 ha publicado estándares que se revisan año con año de acuerdo con las necesidades de la industria.

Las especificaciones no cubren todas las propiedades de los cementos en todo el rango de profundidades y presiones, sin embargo, engloban un método real de clasificación de los cementos

Portland y su uso en pozos mediante la especificación de las propiedades requeridas. El API provee al fabricante de una lista de las propiedades necesarias en el producto, las cuales aseguran que el comprador recibirá un cemento que reúna un mínimo de estos requerimientos y que simplifican la comunicación entre el fabricante, el distribuidor y el consumidor.

Las especificaciones no están impuestas por una agencia oficial, pero el uso del nomograma API indica que el fabricante accede a hacer cementos con las especificaciones publicadas en Spec 10.

Aunque el API define ocho tipos diferentes de cemento, sólo las clases A, B, C, G y H están disponibles por los fabricantes y distribuidos en E.U. Las clases G y H son las más frecuentemente usadas. Cerca de un 80% del cemento utilizado en los países del llamado "mundo occidental" o que no pertenecieron a los países socialistas cae dentro de esas dos clases. Más del 65% del cemento hecho para pozos en E.U es clase H, 15% clase G y el resto es clase C o A. En operaciones internacionales el de mayor uso es clase G (Canada, Europa, Medio Oriente, Sudamérica y Oriente). Los cementos especiales constituyen menos del 1% del mercado mundial.

Los estudios de estandarización resultan también en la publicación de los siguientes documentos bajo la jurisdicción del Comité 10:

1. Bulletin 10 C. Bulletin on Oil Well Cement Nomenclature.
2. Std 10 D. Specifications for Casing Centralizers.
3. RP 10 E. Recommended Practice for Application of Cement Lining to Steel Tubular Goods, Handling, Installation & Joining.
4. API RP 10 F. Recommended Practice for Performance Testing of Cementing Float Equipment.

Las diferentes clases de cementos API para uso a temperaturas y presiones del fondo del pozo se definen a continuación:

**Clase A:** Para usarse desde la superficie hasta una profundidad no mayor a los 6,000 (pies), siempre

y cuando no se requiera de propiedades especiales. Disponible sólo en tipo ordinario (similar al C150 Tipo I de ASTM).

**Clase B:** Para uso desde superficie hasta una profundidad de 6,000 (pies) y requerimientos de moderada e alta resistencia a los sulfatos. Disponible en ambos tipos: Moderada (ASTM C150, Tipo II) y alta resistencia a los sulfatos.

**Clase C:** Para uso desde la superficie hasta 6,000 (pies) donde las condiciones requieran de una alta y pronta resistencia. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

**Clase D:** Para usarse a profundidades entre 6,000 y 10,000 (pies) y temperaturas y presiones moderadamente altas. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

**Clase E:** Para uso en profundidades entre 10,000 y 14,000 (pies) donde se requiera de una alta resistencia a grandes presiones y temperaturas. Disponible en tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

**Clase F:** Para uso en profundidades de 10,000 a 16,000 (pies) y condiciones extremadamente altas de presión y temperatura. Disponible en tipo resistente a los sulfatos.

**Clase G:** Para uso como cemento básico tal como se fabrica desde la superficie hasta profundidades no mayores a los 8,000 (pies). Con aceleradores o retardadores puede ser usado en un amplio rango de presiones y temperaturas. Disponible en tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

**Clase H:** Para uso como cemento básico tal como se fabrica desde la superficie hasta profundidades de 8,000 (pies). Lo mismo que el cemento clase G puede, con la adición de aceleradores o retardadores utilizarse en una gran variedad de condiciones de presión y temperatura.

La tabla de la Figura IV.1 enlista las clases de cementos API y la profundidad de su aplicación.

CLASIF. API	AGUA DE MEZCLADO gal/saco	PESO DE LECHADA lbm/gal	PROF. pies	TEMP. ESTATICA ° F
A (Portland)	5.2	15.6	0 a 6,000	80 a 170
B (Portland)	5.2	15.6	0 a 6,000	80 a 170
C (Rápido Desarrollo)	6.3	14.8	0 a 6,000	80 a 170
D (Retardado)	4.3	16.4	6,000 a 12,000	170 a 260
E (Retardado)	4.3	16.4	6,000 a 14,000	170 a 290
F (Retardado)	4.3	16.2	10,000 a 16,000	230 a 320
G (Básico) *	5.0	15.8	0 a 8,000	80 a 200
H (Básico) *	4.3	16.4	0 a 8,000	80 a 200

\* Puede ser acelerado o retardado para una gran variedad de condiciones.

FIGURA IV.1 Aplicaciones de las clases se cementos API.

## **PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS QUE CUBREN LAS ESPECIFICACIONES API**

En operaciones de cementación de pozos, los cementos son universalmente usados para desplazar al fluido de perforación, y para llenar el espacio anular entre la T.R. y el agujero descubierto. A fin de cumplir con este propósito deben ser diseñados para condiciones en el fondo del pozo que varían desde profundidades muy someras hasta algunas que alcanzan o sobrepasan los 30,000 (pies), o bien en un rango de temperaturas entre varios grados bajo cero en zonas de permafrost (zonas permanentemente congeladas), hasta más de 700 °F en pozos perforados para la generación de energía geotérmica. Las especificaciones no cubren todas las propiedades de los cementos bajo estos rangos de temperaturas y presiones. Sin embargo, enlistan las diferentes propiedades químicas y físicas para los cementos que encajen en la mayoría de estas condiciones.

Estas especificaciones incluyen análisis químicos y físicos, entre los que se encuentran:

1. Contenido de agua
2. Fineza (Pureza)
3. Esfuerzo a la compresión
4. Tiempo de espesamiento

Aunque estas propiedades describen a los cementos para fines de especificación, éstos deben tener otras propiedades y características para cumplir con sus funciones en el pozo.

Las propiedades físicas de varias clases de cementos API se muestran en la tabla de la Figura IV.2.

PROPIEDADES DE LAS CLASES					
DE CEMENTOS API					
	Clase A	Clase C	Clase G y B	Clase D y E	
GRAVEDAD ESPECIFICA (PROMEDIO)	3.14	3.14	3.15	3.16	
AREA SUPERFICIAL (MAYOR), cm <sup>2</sup> /g	1,500 to 1,900	2,000 to 2,800	1,400 to 1,700	1,280 to 1,600	
PESO POR SACO, lbs	94	94	94	94	
VOLUMEN A GRANUL., Pie <sup>3</sup> /Saco	1	1	1	1	
VOLUMEN ABSOLUTO, gal/Saco	3.8	3.8	3.58	3.57	

PROPIEDADES DE LAS LECUADAS VIDAS					
	Deposición Normal				
	Partes por Cien de Fuerzas	API Clase C	API Clase B	Intermedias	
Aguá, gal/saco	5.19	6.32	4.97	4.29	4.29
Peso de la lechada, lbs/gal	15.6	14.8	15.8	16.5	16.5
Volumen de la lechada, Pie <sup>3</sup> /saco	1.18	1.33	1.14	1.05	1.05

Temperatura °F	Presión lb/pg <sup>2</sup>	Esfuerzo a la Compresión Típico (lb/pg <sup>2</sup> ) a las 24 Hrs.				
		Clase A	Clase C	Clase G y B	Clase D y E	Intermedias
60	0	615	780	440	325	.
80	0	1,470	1,870	1,185	1,065	.
95	800	2,085	2,015	2,540	2,110	.
110	1,600	2,925	2,795	2,915	2,525	.
140	3,000	5,050	3,560	4,200	3,160	3,045
170	3,000	5,920	3,710	4,830	4,485	4,150
200	3,000	-	-	5,110	4,575	4,775

Temperatura °F	Presión lb/pg <sup>2</sup>	Esfuerzo a la Compresión Típico (lb/pg <sup>2</sup> ) a las 72 Hrs.				
		Clase A	Clase C	Clase G y B	Clase D y E	Intermedias
60	0	2,870	2,535	-	-	.
80	0	4,130	3,935	-	-	.
95	800	4,670	4,105	-	-	.
110	1,600	5,840	4,780	-	-	.
140	3,000	6,550	4,960	-	7,125	4,000
170	3,000	6,210	4,460	5,685	7,310	5,425
200	3,000	-	-	7,360	9,900	5,920

Profundidad (Pies)	Temperatura °F		Tiempo de Espesamiento a Alta Presión (Hrs:Min)				
	Estática	Circulando	Clase A	Clase C	Clase G y B	Clase D y E	Intermedias
2,000	110	91	4:00+	4:00+	3:00+	3:57	.
4,000	140	103	3:25	3:10	2:30	3:20	4:00+
6,000	170	113	2:25	2:06	2:10	1:57	4:00+
8,000	200	125	1:40*	1:37*	1:44	1:40	4:00+

\* No se recomienda a esta temperatura

FIGURA IV.2 Propiedades Físicas de Varios Tipos de Cemento.

## CEMENTOS ESPECIALES

Un número de materiales cementantes, usados considerablemente en la cementación de pozos, no caen dentro de alguna clasificación de especificaciones API o ASTM, por tanto, pueden o no ser vendidos bajo una especificación reconocida, así que su calidad y uniformidad son responsabilidad del fabricante. Estos materiales incluyen:

1. Cementos Portland Puzolánicos
2. Cementos Puzolánico-Cálcicos
3. Cementos Plásticos o con Resinas
4. Cementos Base Yeso
5. Cementos para Diesel
6. Cementos Expansivos
7. Cementos Refractarios
8. Cementos con Látex
9. Cementos para Ambientes permafrost (No existen en México)

### CEMENTOS PORTLAND PUZOLANICOS

Incluyen algún material silíceo, natural o artificial, procesado o sin procesar, que en presencia de caliza (carbonato de calcio -óxido de calcio-) desarrolla cualidades cementantes. Pueden ser divididos en cementos puzolánicos naturales y artificiales. Los primeros son de origen volcánico, mientras los artificiales son principalmente obtenidos mediante tratamiento con calor a materiales naturales tales como arcillas, arenas y ciertas rocas silíceas.

La ceniza es un producto de la combustión del carbón y es ampliamente usado en la industria petrolera como agente puzolánico, de hecho es el único para el que existen especificaciones del API y ASTM.

Cuando el cemento Portland se hidrata, se libera hidróxido de calcio. Esto en sí no contribuye al aumento de la resistencia y puede ser removido mediante lixiviación, pero cuando la ceniza está presente en el cemento, se combina con el hidróxido de calcio contribuyendo a aumentar la resistencia.

La ceniza tiene una densidad relativa de 2.3 a 2.7 comparada con los 3.1 a 3.2 del cemento Portland. Esta diferencia provoca que se obtengan lechadas de cemento puzolánico más ligeras que las de la misma consistencia hechas con cementos Portland.

La tabla de la Figura IV.3 muestra las especificaciones API para la ceniza.

### **CEMENTOS PUZOLANICO-CALCICOS**

Los cementos puzolánico-cálcicos y los silíceo-cálcicos son generalmente mezclas de ceniza, caliza hidratada y pequeñas cantidades de cloruro de calcio. Estos materiales se hidratan para producir formas de silicatos de calcio. A bajas temperaturas reaccionan más lentamente que los cementos Portland, pero tienen alta resistencia a grandes temperaturas, por lo cual se recomienda su uso en cementaciones primarias cuando la temperatura exceda los 140 ° F.

Las propiedades más importantes de estos cementos son:

- Propiciar la retardación del fraguado.
- Bajo peso.
- Resistencia y estabilidad a altas temperaturas.

**PROPIEDADES FISICAS**

<b>Gravedad Específica</b>	<b>2.46</b>
<b>Peso en volumen absoluto Equivalente a 1 saco (94 lbm) de cemento, (lbm)</b>	<b>74.0</b>
<b>Cantidad retenida en una malla 200, (t)</b>	<b>5.27</b>
<b>Cantidad retenida en una malla 325 (t)</b>	<b>11.74</b>

**ANALISIS QUIMICO (t)**

<b>Dióxido de Silicio</b>	<b>43.20</b>
<b>Oxidos de Hierro y Aluminio</b>	<b>42.93</b>
<b>Oxido de Calcio</b>	<b>5.92</b>
<b>Oxido de Magnesio</b>	<b>1.03</b>
<b>Trióxido de Azufre</b>	<b>1.70</b>
<b>Dióxido de Carbono</b>	<b>0.03</b>
<b>Pérdido en Ignición</b>	<b>2.98</b>
<b>Indeterminado</b>	<b>2.21</b>

**FIGURA IV.3 Especificaciones API Para la Ceniza**

## **CEMENTOS PLASTICOS O CON RESINAS**

Este tipo de cementos son materiales especiales usados en taponamientos de agujeros descubiertos, cementaciones forzadas y trabajos en arreglos estrechos de pozos. Son usualmente mezclas de agua, resinas líquidas y un catalizador mezclado con cemento de clase A, B, G o H. Una propiedad que hace a estos cementos únicos es que cuando se aplica presión a la lechada, la fase resinosa penetra a la zona permeable formando un sello en el interior de la formación. Este tipo de cementos especiales son usados en volúmenes relativamente pequeños y son efectivos en un rango de temperaturas entre los 60°F y 200°F.

## **CEMENTOS BASE YESO**

Los cementos base yeso se utilizan en reparaciones de cementaciones primarias. Se encuentran normalmente disponibles en dos tipos: Forma semi hidratada de yeso ( $\text{CaSO}_4 + 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) y yeso semihidratado con un aditivo resinoso en polvo.

Sus propiedades de rápido fraguado e incremento de la resistencia, así como su expansión (aproximadamente 0.3%), lo hacen candidato idóneo como material en donde se necesiten estas características. Se le mezcla con cementos tipo API clases A, G o H en concentraciones del 8-10% para producir propiedades tixotrópicas. Esta combinación es ampliamente usada en pozos someros para minimizar la caída del cemento después de colocado.

Debido a la solubilidad del yeso, se considera como un material temporal en taponamientos, a menos que en el lugar de colocación no exista agua en movimiento.

Cuando se atacan problemas de pérdidas de circulación, los cementos base yeso se mezclan con volúmenes iguales de cemento Portland a fin de formar un material insoluble de taponamiento. Este tipo de mezclas debe manejarse cuidadosamente, ya que debido a sus propiedades de rápido

fraguado, pueden crear un problema al hacerlo prematuramente.

### **CEMENTOS PARA DIESEL**

Las lechadas de cemento con base diesel se usan frecuentemente en pozos en perforación o en producción donde existen problemas de control de agua. Están compuestas básicamente de cemento tipo API clases A, B, G ó H mezcladas con aceite Diesel o Keroseno y un agente surfactante. Este tipo de lechadas tiene tiempos de bombeo ilimitados y no fraguarán hasta encontrarse con una zona en donde exista producción de agua, en donde absorberá ésta, formando una dura y densa masa de cemento.

La función del surfactante es reducir la cantidad de aceite necesaria para mojar las partículas de cemento. Algunas composiciones contienen surfactantes aniónicos, cuyo efecto es extender el tiempo de espesamiento a fin de permitir una mayor penetración en la formación.

Las lechadas base aceite se usan principalmente para control de zonas de agua, pero pueden usarse también para reparar fugas en las T.R., combatir ciertos problemas de pérdidas de circulación, tapan canalizaciones a los costados de la tubería y para controlar la penetración de la lechada.

### **CEMENTOS EXPANSIVOS**

Para ciertas condiciones de fondo del pozo es deseable tener un cemento que expanda contra el filtrado del lodo y la T.R. Para tales usos, la industria ha evaluado varias composiciones que expanden ligeramente cuando fraguan.

Las reacciones que causan esta expansión son similares a las descritas en la literatura como Etringita. Este proceso se relaciona con la formación de cristales que tiene lugar entre los sulfatos y el aluminato tricálcico que es un material de los cementos Portland. Ver Figura IV.4.

Los cementos expansivos comerciales ( $3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4 + 32\text{H}_2\text{O}$ ) son tipo Portland a los

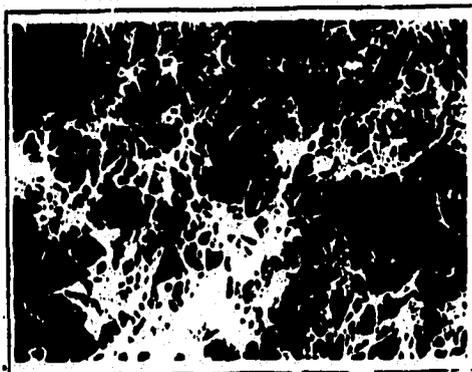


FIGURA IV.4 Cristales de Etringita en el cemento.

que se ha añadido un sulfoaluminato anhidro de calcio ( $4\text{CaO} + 3\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ).

Existen tres tipos de cementos expansivos comerciales:

**Tipo K.** Que contiene sulfoaluminato de calcio y puede mezclarse con cemento tipo Portland. Cuando se hace una lechada con cemento tipo K y agua, la reacción de expansión creada por la hidratación es del rango de 0.05 a 0.20%.

**Tipo S.** Recomendado por la Asociación Cementos Portland. Consiste de un cemento con altos contenidos de  $\text{C}_3\text{A}$ , similar al cemento clase A, con aproximadamente 10 a 15 % de yeso. Con características expansivas similares a las del cemento tipo K.

**Tipo M.** Se obtiene mediante la adición de pequeñas cantidades de cemento refractario al cemento Portland, para producir fuerzas expansivas.

Existen otras formulaciones de cementos expansivos:

1. Cemento Portland API clase A con 5-10% de formas semi hidratadas de yeso.
2. Cementos Portland API clases A, G o H que contienen cloruro de sodio en concentraciones que varían entre 5% y saturación. La expansión es causada por reacciones de los clorosilicatos.
3. Cementos Puzolánicos. Cuando los álcalis reaccionan con cementos clases A, G o H para formar cristales de sulfoaluminatos, se generan fuerzas expansivas.

## **CEMENTOS REFRACTARIOS**

Los cementos refractarios con altos contenidos de alumina se fabrican mediante la mezcla de bauxita (aluminio mineral) y caliza que se calienta en hornos hasta que se derrite. Los análisis de estos materiales difieren de los hechos a los cementos Portland dado que la bauxita reemplaza a la arcilla o la arena usadas en los cementos Portland. Análisis típicos de estos cementos refractarios muestran un contenido aproximado de 40 % de (CaO), además de pequeñas cantidades de sílice y hierro.

Los aluminatos de calcio que contienen estos cementos producen una pronta resistencia a los esfuerzos y a las temperaturas altas, además de proteger contra materiales corrosivos.

Los cementos con aluminatos de calcio se usan en pozos donde se efectúan trabajos de combustión in-situ, en donde las temperaturas pueden variar entre 750°F y 2,000°F durante el proceso de combustión.

Es posible acelerar o retardar el fraguado de este tipo de cementos de acuerdo a las condiciones del pozo requeridas, pero las características para retardarlos difieren mucho de aquéllas aplicables a los cementos Portland. La adición de cementos Portland a un cemento refractario provocará un fraguado instantáneo; es por esto que, deben manejarse de forma separada en el campo.

## **CEMENTOS CON LATEX**

Aunque a éstos se les considera dentro del grupo de los cementos especiales, en realidad son una mezcla de cemento API clase A adicionado de Látex en forma líquida o en polvo. Estos materiales están químicamente identificados como:

Acetato de polivinilo, cloruro de polivinilo o emulsiones de butadieno estireno. Mejoran notablemente las fuerzas de enlace cemento-T.R. y T.R.-formación, además controlan el filtrado de la lechada hacia la formación. El Látex es adicionado a razón de un galón por cada saco de cemento. El Látex en

la formación. El Látex es adicionado a razón de un galón por cada saco de cemento. El Látex en polvo no se congela y puede ser mezclado en seco antes de ser transportado al pozo.

### **CEMENTOS PERMAFROST**

Aunque en México no se encuentran ambientes de congelación permanente, en otras áreas petroleras ocurren problemas en las tuberías conductora y superficial en este tipo de ambiente. A través del Ártico, donde las zonas de hielo se extienden a profundidades que alcanzan los 3,000 (pies), se hace necesario un cemento que tenga un rápido fraguado, así como baja producción de calor de hidratación, que no provoque que se derrita el hielo. Para esas condiciones de baja temperatura, se han usado con éxito los cementos refractarios y base yeso. A los cementos base yeso se les puede acelerar o retardar el fraguado; y esta se realizará aún a 15°F antes de empezar a congelarse. El desarrollo de la resistencia a los esfuerzos es rápido y varía poco a temperaturas entre los 20°F y 80°F.

### **ADITIVOS PARA CEMENTO**

Los pozos en la industria petrolera de hoy cubren rangos más amplios de condiciones de profundidad y temperatura que en cualquier otro tiempo, por tanto, las composiciones de los cementos deben ser diseñadas bajo parámetros tan diferentes como: Temperaturas tan bajas como las existentes en las zonas de hielo permanente (Alaska, Canada), temperaturas de más de 500°F en los pozos profundos de aceite, temperaturas de (450°F - 500°F) en pozos de vapor y temperaturas de (1500°F a 2000°F) en trabajos de combustión in-situ; además deben soportar presiones que se encuentran en un rango entre la atmosférica y 30,000 (lb/pg<sup>2</sup>) en pozos extremadamente profundos. Ha sido posible acomodar tal variedad de condiciones sólo a través del desarrollo de los aditivos a fin de

modificar el cemento Portland disponible a los requerimientos individuales de cada pozo. Hoy día existen alrededor de 40 aditivos para cemento que se usan con varias clases de cemento API.

Con el advenimiento del cemento básico (API clases G y H) y el equipo de mezclado a granel, el uso de aditivos se ha hecho más fácil y flexible. Las lechadas de cemento pueden ahora ser hechas a la medida de los requerimientos que cada trabajo tiene.

Prácticamente todos los aditivos para cemento en uso corriente se encuentran en forma de polvo y pueden mezclarse en seco con el cemento a granel antes de ser transportados hacia el pozo, empero, en caso de hacerse necesario, la mayoría de ellos pueden también ser dispersados en agua en el lugar en que se realiza la cementación.

Dependiendo de como sean usados, los aditivos pueden modificar considerablemente las características de la lechada de cemento. Los siguientes son algunos ejemplos:

- La densidad puede cambiarse de 10.5 (lb/gal) a 25 (lb/gal).
- El esfuerzo a la compresión pueda variarse en un rango entre 200 (lb/pg<sup>2</sup>) y 20,000 (lb/pg<sup>2</sup>).
- El fraguado puede acelerarse o retardarse, dando como resultados: Un cemento que frague en apenas unos segundos, o bien, uno que después de 36 horas se mantenga aún fluido.
- El filtrado a la formación puede disminuirse a valores tan bajos como 25 (cm<sup>3</sup>/30 min) cuando se mide usando una malla 325 y una presión diferencial de 1,000 (lb/pg<sup>2</sup>).
- Las propiedades de flujo pueden variarse en un amplio rango.
- El cemento ya fraguado puede ser resistente a la corrosión, ya sea densificando la lechada, o bien, variando su composición química mediante aditivos.
- Mediante el uso de agentes sustentantes (en forma de fibra, hojuelas o gránulos) o gelantes, se puede controlar la pérdida de lechadas de cemento hacia las formaciones.
- Pueda dotarse de elasticidad a las lechadas mediante la incorporación de fibras finas en su composición.

La permeabilidad en lugares no deseados puede ser controlada en pozos de bajas temperaturas densificando la lechada y en donde existan altas temperaturas (arriba de 230°F) densificando y usando harina de sílice.

El cemento, al fraguado, puede expandirse ligeramente debido a la acción del cloruro de sodio o de yeso añadidos a las lechadas.

El calor de hidratación (El calor liberado durante el proceso en que las partículas de cemento se mojan y la lechada fragua) puede controlarse mediante el uso de arena, ceniza o bentonita combinados con agua.

De forma general el utilizar lechadas adecuadamente acondicionadas, se evitan problemas previstos, aumentando las probabilidades de éxito en la operación de cementación primaria y disminuyendo los costos que pudieran ocasionarse por eventuales reparaciones a trabajos mal planeados.

Los aditivos para cementos pueden clasificarse como sigue:

1. Aceleradores,
2. Retardadores,
3. Aligeradores,
4. Densificantes,
5. Agentes para control de pérdida de circulación,
6. Agentes para control de filtrado,
7. Reductores de fricción y
8. Materiales especiales.

## ACELERADORES

Las lechadas de cemento que se usan en pozos someros y a bajas temperaturas de formación, requieren un tiempo de fraguado breve y un rápido incremento de la resistencia a los esfuerzos, particularmente en formaciones abajo de los 100°F. Mediante el uso de aceleradores, buenas prácticas de bombeo y cementos base, en tan poco como 4 horas se puede alcanzar una resistencia a esfuerzos de 500 (lb/pg<sup>2</sup>). Este esfuerzo se considera como el mínimo necesario para soportar la tubería y unirle a la formación. Los siguientes son algunos de los aceleradores más ampliamente usados:

**Cloruro de calcio.**- Este material se encuentra disponible en forma de hojuelas o polvo conteniendo un 77% de cloruro de calcio, o bien, como anhídrido en forma de hojuelas conteniendo un 96% de cloruro de calcio. La segunda forma es la más usada ya que puede absorber algo de humedad sin tornarse estereonado y es más fácil de almacenar. Se usa normalmente en porcentajes de entre un 2 y 4 del peso del cemento, dependiendo de las condiciones del pozo; se usa un 4% en donde una relación agua/cemento muy grande propicie la dilución del material.

**Cloruro de sodio.**- El cloruro de sodio o sal de mesa es un efectivo acelerador para cementos puros y se usa en concentraciones de 1.5 a 5%. Lo común es usar entre 2% a 3.5 % por peso de cemento, pero como en el caso anterior se puede aumentar el porcentaje por altas relaciones agua/cemento.

Como se mencionó, porcentajes bajos de cloruro de sodio aceleran el fraguado, pero altas concentraciones, tales que saturan el agua de mezclado, retardarán el proceso de fraguado. Aunque este material no tiene el grado de aceleración producido por el cloruro de calcio, se usa cuando no se requiere de una aceleración muy grande en el proceso de fraguado, o bien, si no hay disponible cloruro de calcio.

**Cementos base yeso.**- Estos cementos están compuestos de una forma semihidratada de sulfato de calcio. Es usado como acelerador de cementos Portland en concentraciones superiores al 100% del peso del cemento. Con algunas mezclas de cementos base yeso y Portland pueden obtenerse tiempos de espesamiento tan cortos como 5 (min).

**Silicato de sodio.**- El silicato de sodio es usado principalmente en lechadas que contienen un agente retardador llamado carboximetil hidroxietil celulosa (CMHEC).

**Cementos con dispersantes y agua reducida.**- Las lechadas de cemento pueden ser aceleradas mediante densificación. Esto se logra mediante la adición de reductores de fricción y disminuyendo la cantidad de agua de mezclado.

La más común de las lechadas densificadas es una hecha con cemento API clase A, G o H con una relación agua/cemento de 3.4 (gal/saco) y un 0.75% a 1.0% de dispersante.

Cuando el objetivo sea taponar un pozo, la adición de 15 a 20 (lb/saco de cemento) a una lechada con igual relación agua/cemento que la anterior, ayudará a que se desarrolle un rápido incremento en la resistencia a los esfuerzos.

En general la lechada descrita arriba puede obtener una resistencia los esfuerzos suficiente en alrededor de las ocho horas a la temperatura estática del fondo del pozo si fue diseñada para un tiempo de bombeo de 1 1/2 a 2 (horas).

**Agua de mar.**- El agua de mar es usada extensamente para mezclarse con cemento en zonas marinas. Contiene más de 23,000 (ppm) de cloruros, los cuales actúan como aceleradores. La salinidad del agua en mar abierto es uniforme, no así la del agua cerca de las costas, que al diluirse con agua dulce, no produce la aceleración deseada. Donde la temperatura de fondo estática excede los 160 °F, las lechadas mezcladas con agua de mar deben ser adecuadamente retardadas.

## **RETARDADORES.**

En las perforaciones de hoy, temperaturas de fondo estáticas de 170°F a 500 °F son cada vez más comunes debido a las profundidades que se alcanzan de 6,000 a 25,000 (pies). Para prevenir que el cemento frague rápidamente, se recurre al uso de retardadores, junto con las lechadas de cemento puro, las cuales pueden ser puestas solamente hasta profundidades de 8,000 (pies) en forma segura. Un aumento en la temperatura tiene un efecto más preponderante sobre la ebrevisación del tiempo de espesamiento que lo que lo tiene la presión. El retardador debe ser compatible con los demás retardadores incluidos, además de con el cemento mismo.

Los retardadores para cementos comerciales (tales como tipo D y E por ejemplo) son compuestos del tipo de las ligninas (sales de ácido lignosulfónico), gomas, féculas, ácidos orgánicos y derivados de celulosa. En algunas ocasiones estos aditivos no son totalmente compatibles con aquellos adicionados por las compañías de servicio, de tal manera que los cementos deben probarse antes de su uso. Es este problema de compatibilidad el que motivó el desarrollo de los cementos tipos G y H, en cuya manufacture no está permitido el adicionar retardadores. Este tipo de cementos puede usarse hasta una profundidad de 8,000 (pies) tal y como vienen de fábrica, y con el uso de retardadores puede usarse adecuadamente en profundidades de hasta 30,000 (pies).

Los aditivos con grandes relaciones de agua requieren de cantidades adicionales de retardadores a fin de lograr un adecuado tiempo de espesamiento. Esto se debe a que:

- Los materiales con grandes áreas superficiales, los cuales generalmente tienen grandes requerimientos de agua, adsorberán parte del retardador, quitando por ende parte del necesario para el cemento.
- El agua adicionada diluye al retardador y reduce su efectividad.

**Retardadores a base de Ligninas.-** Estos materiales -lignosulfonato de calcio y lignosulfonato de calcio y sodio- son derivados de la madera. Se usan generalmente en el rango de 0.1% a 1.0% por peso del cemento. Los retardadores a base de ligninas han sido usados con mucho éxito como retardadores de fraguado en cementos API de todos los tipos y en profundidades de 12,000 (pies) a 14,000 (pies), o bien en donde la temperatura de fondo estática varía entre 260°F y 290°F.

Han sido también usados para incrementar la bombeabilidad de los cementos API clases D y E en pozos de altas temperaturas (300°F y mayores) pero para estos propósitos son más efectivos los lignosulfonatos modificados con ácidos orgánicos.

**Carboximetil Hidroxietil Celulosa (CMHEC).** - El Carboximetil Hidroxietil Celulosa, un derivado soluble de la madera, es un retardador muy efectivo. Puede usarse en concentraciones mayores a 0.70% sin la adición de agua para controlar la viscosidad de la lechada. Después de eso, debe agregarse, de 0.8 (gal) a 1.0 (gal agua/saco), por cada 1% de retardador usado. El rango en que se use el retardador es de 1.0% a 1.5% por peso de la composición básica de cemento, concentraciones mayores se hacen necesarias a temperaturas mayores a los 300 °F. El CMHEC es compatible con todas las clases de cementos API como retardador. Por sus propiedades se usa simultáneamente para control de la pérdida de fluido.

**Agua saturada de sal.-** La saturación del agua con que se va a mezclar el cemento en polvo proporciona una bombeabilidad suficiente para colocar los cementos API clases A, G o H a profundidades de 10,000 a 12,000 (pies) y a temperaturas entre 230°F y 260°F. Para la cementación en zonas saturadas de sal, se saturan las lechadas a ser utilizadas con este mismo material, pero para la mayoría de las arenas bentoníticas que son más sensibles al agua dulce, concentraciones menores de sal son generalmente adecuadas.

## **ALIGERADORES.**

Las lechadas hechas con cemento puro API clases A, B, G o H usando la cantidad recomendada de agua, tendrán una densidad excesiva con valores cercanos a las 15 (lb/gal). Muchas formaciones no soportarán una columna muy grande con esta densidad. Consecuentemente se hace necesario el empleo de aditivos que reduzcan la densidad de la lechada. Los aditivos hacen que las lechadas incrementen su punto de cedencia, y algunas veces que tengan una menor pérdida de filtrado. La densidad de las lechadas de cemento puede reducirse mediante la adición de agua, de sólidos con bajo peso específico, o mediante ambos procedimientos.

Los siguientes son algunos de los materiales aligeradores más usados:

**Bentonita.**- La bentonita -montmorillonita sódica- es una arcilla coloidal. Le imparta viscosidad y propiedades tixotrópicas al agua dulce, provocando un aumento de hasta 10 veces el volumen inicial debido al hinchamiento de sus partículas. La bentonita fue uno de los primeros materiales usados en los cementos para pozos de aceite a fin de reducir la densidad y aumentar el volumen de la lechada.

La bentonita puede añadirse a cualquier clase de cemento API en concentraciones de 1% a 16% por peso de cemento. Cuando se mezcla en seco con el cemento (en proporciones de 8% a 12%), requiere de aproximadamente 1.3 (gal de agua/2% de bentonita). El efecto de un 1% de bentonita prehidratada es el mismo que un 3.6% mezclada en seco.

Grandes cantidades de bentonita en el cemento reducen la resistencia a los esfuerzos de compresión y el tiempo de espesamiento para cualquier tipo de cemento -regular o con aditivos para retardar el fraguado-. La bentonita también provoca una baja en la resistencia de la lechada a la acción química de las aguas provenientes de la formación.

Dado que las especificaciones API establecen sólo requerimientos mínimos tanto para las distintas

clases de cementos, como para la bentonita, las propiedades para cada marca, o más aún, para las diferentes producciones de una misma marca, puedan variar.

Donde no existe equipo disponible para el mezclado en seco, se hace necesario añadir la bentonita al agua, esto es prehidratarla.

**Cementos modificados.**- Los cementos modificados están compuestos de cemento Portland, de un 8% a 10% de bentonita y de un dispersante -lignosulfonato de calcio-.

El lignosulfonato de calcio en lechadas altamente gelificadas funciona como dispersante y retardador.

Además de su bajo costo, de ser ligero y altos valores de punto de cedencia, las lechadas modificadas con este material tienen poca pérdida de filtrado.

Los cementos modificados se usan para operaciones de terminación permanentes y terminaciones múltiples.

Los cementos API clases D y E no se recomiendan para la preparación de cementos modificados, dado que contienen un dispersante a base de lignina, el cual actúa como retardador.

**Cementos salados altamente gelificados.**- High-gel salt cements (HGS).- Los cementos salados altamente gelificados consisten de cemento Portland, un 12% a 16% de bentonita, 3% a 7% de sal inorgánica (cloruro de sodio preferentemente) y de 0.1% a 1.5% de un agente dispersante (lignosulfonato de calcio). El cloruro de sodio actúa como acelerador y dispersante a la vez, el lignosulfonato por su parte tiene funciones de dispersante y retardador. La disolución de la sal en el agua de mezclado la hará más efectiva.

Debido a las propiedades dispersantes del retardador y la sal, este tipo de cementos es altamente bombeable, aún cuando la relación agua/cemento es generalmente menor a aquella asociada con las cantidades de agua necesaria para los porcentajes de bentonita antes mencionados.

**Gilsonita.**- En una lechada de cemento, la gilsonita actúa como un aditivo aligerador y como un agente contra pérdidas de circulación único.

La gilsonita es un asfalto natural, el cual es inerte en la lechada de cemento, tiene una densidad de 50 (lb/pie<sup>3</sup>) tomada a granel (con un volumen que incluye aire), un requerimiento de agua de cerca de 2 (gal/pie<sup>3</sup>) y una densidad relativa de 1.07.

Debido a su baja densidad relativa es bueno para reducir la densidad de una lechada. Además a diferencia de la perlita no absorbe agua a presiones altas. Las lechadas que contienen gilsonita tienen una mayor resistencia a los esfuerzos en cualquier etapa que cualquiera otra que tenga la misma densidad y que sea hecha con aditivos comerciales para reducir la densidad y/o la pérdida de filtrado. Por otra parte la gilsonita no cambia significativamente el tiempo de bombeo de la mayoría de los cementos API.

**Perlita expandida.**- La perlita es un material volcánico que se extrae de minas. Es triturado, cernido y calentado para formar un producto de un extremadamente bajo peso a granel. Fue originalmente manufacturado para la creación de los concretos ligeros. Hoy se usa en cementos de pozos de aceite, normalmente con pequeñas cantidades de bentonita (2% e 6%) para ayudar a prevenir la segregación de las partículas de perlita de la lechada. Las partículas de perlita expandida contienen poros abiertos y cerrados y una matriz. En el fondo del pozo, los poros abiertos se llenan de agua y algunos de los poros cerrados se rompen y les pasa lo mismo. La densidad final depende de cuantos poros se mantengan cerrados y de cuanto agua quede atrapada en los poros abiertos. Debido a esto es que las lechadas que contienen perlita son mezcladas con lo que aparenta ser una cantidad excesiva de agua para que la lechada pueda ser bombeada a condiciones del fondo del pozo.

**Nitrógeno.**- El nitrógeno se usa junto con el cemento para reducir la presión hidrostática en el fondo del pozo durante las operaciones de cementación. Para lograr este objetivo se usa una de las dos siguientes técnicas:

1. El nitrógeno es introducido junto con el cemento a través de la sarta de perforación.
2. Con el pozo lleno de lodo de perforación y circulación establecida, se detiene ésta y se introduce antes de cementar un "bache" de nitrógeno.

#### **DENSIFICANTES.**

Para balancear las altas presiones frecuentemente encontradas en los pozos profundos, se requiere de lechadas de altas densidades. A fin de incrementar la densidad de la lechada un aditivo debe:

1. Tener una gravedad específica en un rango entre 4.5 y 5.0.
2. Tener un bajo requerimiento de agua.
3. No reducir significativamente la resistencia a los esfuerzos del cemento.
4. Tener un efecto pequeño sobre el tiempo de bombeo.
5. Mostrar un tamaño de partícula uniforme entre un embarque y otro diferente.
6. Ser químicamente inerte y compatible con otros aditivos.
7. No interferir con los registros geofísicos.

Los materiales más comúnmente usados como densificantes se enlistan en la tabla de la Figura IV.5. De todos ellos, la hematita es la más usada, ya que es la que mejor se ajusta a los requerimientos físicos y además, tiene la mayor densidad relativa efectiva.

Las propiedades físicas y cantidades requeridas para obtener un peso especificado se muestran en la tabla de la Figura IV.6.

<b>MATERIAL</b>	<b>Cantidades Usadas</b> (% por peso de Cemento)
<b>Hematita</b>	4 a 104
<b>Ilmenita</b> (óxido de hierro-titanio)	5 a 100
<b>Barita</b>	10 a 108
<b>Arena</b>	5 a 25
<b>Sal</b>	5 a 16
<b>Cementos con dispersantes</b> y agua reducida	0.05 a 1.75

FIGURA IV.5 ADITIVOS DENSIFICANTES

**Libras por Saco de Cemento**

<b>Peso de la Lechada (lbm/gal)</b>	<b>Hematita</b>	<b>Barita</b>	<b>Arena Ottawa</b>	<b>Arseniato de Fierro</b>
16.2	—	—	—	—
17.0	12	22	28	12
17.5	20	37	51	21
18.0	28	55	79	31
18.5	37	76	—	41
19.0	47	106	—	52

**Propiedades Físicas**

<b>Gravedad Especifica</b>	5.02	4.23	2.65	6.98
<b>Requerimiento de Agua (%)</b>	3	22	0	19
<b>Gravedad Especifica Efectiva con Agua</b>	4.49	2.67	2.65	3.57
<b>Volumen Abs. del Aditivo con Agua (Gal/lbm)</b>	0.0275	0.0548	0.0456	0.0400

**FIGURA IV.6 Materiales para Densificar Cementos API Clases D,  
E y H.**

## **AGENTES PARA CONTROL DE PERDIDA DE CIRCULACION.**

Howard, G.C. define una pérdida de circulación como: "La pérdida del fluido de perforación o terminación o de la lechada de cemento usados en la perforación o terminación de un pozo hacia fractura(s) inducida(s)". Esta no debe confundirse con el decremento del volumen de fluido debido al filtrado, o el volumen que se requiere para llenar el agujero a la nueva profundidad de perforación.

Usualmente existen dos etapas en el combate de un problema de pérdida de circulación. La primera es reducir la densidad del fluido en cuestión; una segunda es añadir un agente sustentante o taponante. Otra técnica consiste en añadir nitrógeno al sistema del fluido.

## **AGENTES PARA CONTROL DE FILTRADO.**

La pérdida de filtrado de una lechada de cemento se disminuye con aditivos para dos fines principales:

1. Prevenir de una deshidratación prematura o de una pérdida de agua cuando atraviese por zonas porosas, particularmente en la cementación de liners.
2. Proteger la formaciones susceptibles de daño.

En caso de ser necesaria una cementación forzada, el uso de una lechada con poca pérdida de filtrado aumenta las probabilidades de éxito.

Una lechada a base de cemento API clases G o H puro y agua, tendrá una pérdida de filtrado máxima de 1,000 cm<sup>3</sup> en 30 min.

Las principales funciones de un aditivo para control de pérdida de filtrado son:

1. La formación de películas o (micelas), los cuales controlarán el flujo de agua de la lechada hacia la formación, evitando una rápida deshidratación.
2. Mejorar la distribución de los tamaños de partícula, la cual determina como el líquido es retenido en la lechada.

Los dos materiales para el control de pérdida de filtrado más ampliamente usados son: Los polímeros orgánicos (celulosa) y los reductores de fricción.

El alto peso molecular de los componentes de la celulosa producen una baja pérdida de agua en todas las composiciones de cemento si se usa en concentraciones entre 0.5% y 1.5% por peso del cemento; los requerimientos de agua, sin embargo, deben adecuarse a fin de lograr la viscosidad deseada; i.e. un cemento API clase A requerirá de 5.6 (gal de agua/saco) en lugar de los 5.2 (gal agua/saco) usuales.

Los dispersantes o reductores de fricción, se añaden a las lechadas de cemento para controlar la pérdida de filtrado mediante la dispersión y "empecamiento" de las partículas de cemento y con ello densificando la lechada. Esto es especialmente efectivo cuando la relación agua/cemento es baja.

El efecto que la densificación de una lechada tiene sobre la pérdida de filtrado se muestra en la tabla de la Figura IV.7.

#### DISPERSANTES O REDUCTORES DE FRICCIÓN

Agentes dispersantes se añaden a las lechadas de cemento para mejorar sus propiedades de flujo. Este acondicionamiento provoca una disminución de la viscosidad y permite que las lechadas puedan

**FALTA PAGINA**

**Nº 60.a la.....**

ser bombeadas en patrón de flujo turbulento a presiones menores, decreciendo de paso, la potencia necesaria así como las probabilidades de pérdidas de circulación y deshidratación prematura. Los dispersantes reducen los valores del esfuerzo gel y del punto de cedencia. La tabla de la Figura IV.8 muestra el efecto de los dispersantes sobre el gasto crítico -el gasto requerido para lograr flujo turbulento-.

Los dispersantes más comúnmente usados, tales como los polímeros y el cloruro de sodio se usan a bajas temperaturas debido principalmente a que, retardan ligeramente el fraguado, no así los lignosulfonatos de calcio, que retardan sustancialmente el fraguado y por ello son usados a más altas temperaturas.

## **POLIMEROS**

**(Dispersantes o adelgazadores)**.- Los polímeros, manufacturados en forma de polvo, producen inusuales y muy útiles propiedades en los sistemas de cemento. Ellos no retardan ni aceleran significativamente el fraguado de la mayoría de las lechadas, pero si reducen la viscosidad aparente. Se pueden usar en un rango de temperaturas entre los 60°F y 300°F. A pesar de su propiedad de reducir la viscosidad, los polímeros no causan agua libre en exceso ni asentamiento de las partículas de cemento de la lechada. Son compatibles con todos los sistemas de cementos, exceptuando a aquellos que contienen concentraciones altas de sal. Aunque aparentemente en un principio adelgazan este tipo de lechadas, son en realidad incompatibles con la sal, la cual provoca que las partículas se floquen, y después de 10 a 20 (min) de mezclado se observe un rápido incremento en la viscosidad.

**Sal (Cloruro de sodio)**.- La sal común además de actuar como un acelerador y un retardador (a temperaturas mayores de 160°F una lechada pasa de estar acondicionada para acelerar su fraguado a ser retardada en el mismo), puede actuar también como un dispersante (adelgazador) en muchas

composiciones de cemento. Es especialmente efectiva en la reducción de la viscosidad en las lechadas que contienen bentonita, cementos puzolánicos o tierra diatomácea.

La sal usada en las lechadas ayuda a que el cemento fraguado tenga una mejor unión con las formaciones salinas y arenas, además contribuye a que el cemento tenga una ligera expansión lo cual promueve un mejor enlace a la T.R.

Las lechadas que contienen sal ayudan a proteger de derrumbes a las secciones de formaciones salinas durante la cementación. Una formación que sea sensible al filtrado del lodo puede volverse muy suave por estar siendo mojada por el agua del cemento antes de que éste termine su fraguado, creando con ello canalizaciones a los costados de la cubierta de cemento entre una zona perforada y otra. Las lechadas que contienen entre 5% y 20% de sal por peso del cemento han probado su efectividad en la disminución tanto de los derrumbes como de la canalización.

En algunos casos, cuando la sal se mezcla con el cemento se genera espuma, haciendo más difícil el control de la densidad de la lechada. Esto puede prevenirse mediante la adición de agentes anti-espumantes al agua de mezclado o mediante el mezclado en seco de la sal con el cemento.

El uso de sal en las lechadas de cemento produce efectos similares para todos los tipos de cementos API y aún para los cementos puzolánicos y bentoníticos.

Aunque la sal generalmente usada es el cloruro de sodio, recientemente se recomienda el uso de cloruro de potasio. También se ha notado, que si bien altas concentraciones de sal no afectan grandemente el comportamiento respecto a aquella no tan concentradas, la viscosidad de la lechada sí sufre un aumento muy considerable, con todos los problemas que acarrea el bombeo de ésta.

TURBULENCIA PARA T.R. 5 1/2 pg. en Agujero de 8 3/8 pg								
Dispersante (%)	n	K	Ceniciento		Velocidad (Pie/meg)	Caída de Presión		
			Peso (lib/gal)	Volumen (Pie <sup>3</sup> /Baco)		Número de Reynolds	Por Fricción (lb/pg <sup>2</sup> /1,000 Pie)	
Cemento API Clase A - Agua 5.2 gal/saco								
0.0	0.30	0.19500	15.800	1.180	29.71	10.84	3,000	178.6
0.5	0.43	0.06700	15.800	1.180	23.41	8.87	3,000	117.3
0.75	0.67	0.00700	15.800	1.180	11.55	4.32	3,000	29.1
1.00	0.79	0.00230	15.800	1.180	7.51	2.78	3,000	12.1
Cemento API Clase C - Agua 5.3 gal/saco								
0.0	0.26	0.14410	14.800	1.320	21.12	7.83	3,000	90.6
0.5	0.34	0.06440	14.800	1.320	17.47	6.47	3,000	62.0
0.75	0.44	0.02570	14.800	1.320	13.57	5.03	3,000	37.4
1.00	0.60	0.00670	14.800	1.320	9.20	3.41	3,000	17.2
Cemento API Clase D - Agua 5.0 gal/saco								
0.0	0.20	0.37840	15.800	1.150	29.94	11.09	3,000	194.4
0.5	0.70	0.00503	15.800	1.150	10.01	3.71	3,000	21.7
0.75	1.17	0.00015	15.800	1.150	2.08	0.77	3,000	0.9
Cemento API Clase H - Agua 4.3 gal/saco								
0.0	0.25	0.28283	16.400	1.060	29.28	10.85	3,000	193.1
0.75	0.81	0.00115	16.400	1.060	6.17	2.29	3,000	6.6
1.00	1.08	0.00029	16.400	1.060	3.13	1.16	3,000	2.2

**FIGURA IV.8 Efecto del Dispersante en el Gasto de Flujo Crítico en Lechadas de Cemento API en Flujo Turbulento.**

## MATERIALES ESPECIALES

**Descontaminantes de lodo.**- Algunas veces, para evitar la contaminación de la lechada de cemento por el contacto con el fluido de perforación y a fin de minimizar los efectos retardadores de fraguado que contienen algunos componentes de éstos, se les agrega paraformaldehído, o bien, alguna mezcla de éste y cromato de sodio. Un descontaminante consistente en una mezcla de 60% paraformaldehído y 40% cromato de sodio, neutraliza ciertos aditivos químicos usados para tratar a los lodos. Es efectivo contra taninos, ligninas, féculas o almidones, celulosas y lignosulfatos.

**Harina de sílice.**- La harina de sílice o sílice fino es comúnmente usada en las formulaciones de lechadas como coadyuvantes en la prevención de la pérdida de la resistencia a los esfuerzos.

Algunas investigaciones han demostrado que la mayoría de los cementos pierden su resistencia a los esfuerzos cuando se encuentran a temperaturas que exceden los 230 °F, y que a medida que la temperatura aumenta, la resistencia disminuye. Esta pérdida de la resistencia, la cual se ve acompañada por un incremento en la permeabilidad, es causada por la formación de un tipo de alfa-hidrato de silicato de calcio en el fraguado de cemento. La adición de un material que requiera de una alta relación de agua tal como la bentonita, trae consigo una aceleración en la pérdida de resistencia.

La harina de sílice puede agregarse a todas las clases de cementos tipo API para prevenir esta pérdida de resistencia, la cual se presenta con el tiempo a altas temperaturas. La cantidad óptima para el control de la pérdida de la resistencia se encuentra entre 30% y 40%. Este material (malla - 200) tiene un requerimiento de agua de 40% (40 lb ó 4.8 gal por cada 100 lb de harina).

**Trazadores radioactivos.**- Los trazadores radioactivos se añaden a las lechadas de cemento como indicadores que pueden ser detectados por los registros geofísicos. Ayudan en la detección de la

cima del cemento y la localización y disposición del cemento en operaciones de cementación forzada.

Los isótopos utilizados en este tipo de trabajo tienen una vida media de entre 8 y 84 días.

Del tiempo que se lleva correr un registro y de cuando se realizará, depende la selección del isótopo a utilizar.

Los radioisótopos son controlados por la comisión de energía atómica (en los E.U.) y su uso está restringido.

**Tinturas para cemento.** - Pequeñas cantidades de tintura se usan para indicar o identificar a una clase de cemento API en particular, o bien, a un aditivo mezclado con el cemento. Estas tinturas, sin embargo, pueden diluirse, empañarse, o contaminarse con el lodo de perforación, perdiendo su efectividad.

**Hidrazina.** - La hidrazina es un aditivo usado para tratar la columna de lodo que queda sobre el cemento, a fin de disminuir los problemas de corrosión en la sección no cementada de la tubería.

Una libra de hidrazina (2.85 libras de solución al 35%) removerá una libra de oxígeno. La compañía California Research recomienda 6 galones de solución al 35% por cada 100 barriles de lodo.

Antes de empezar un trabajo con hidrazina, debe colocarse un adaptador especial en la sección de succión de la bomba, para ayudar a su mezclado con el lodo de perforación que será bombeado antes del cemento (y que quedará arriba de él después del desplazamiento). En la determinación de la cantidad a emplear, el volumen de lodo que se calculó va a quedar sobre el cemento debe aumentarse un 20%. Este material es caro, por tanto, debe calcularse cuidadosamente, empero, un exceso de ella en el lodo no se traduce en un detrimento en las propiedades físicas de la lechada.

Una vez terminado el trabajo, las bombas, líneas y contenedores deben ser lavados con agua a presión.

**Fibras en el Cemento.-** Los materiales fibrosos sintéticos son frecuentemente añadidos a las lechadas, en concentraciones de 1/8 (lb/saco) a 1/2 (lb/saco de cemento), su finalidad es reducir los efectos de desmoronamiento o destrucción parcial por la perforación, esfuerzos de la tubería lestrabarrera u otras fuerzas en el fondo del pozo. Los materiales fibrosos transmiten las tensiones localizadas más suavemente a través del cemento, y con ello, aumentando su resistencia a los impactos y golpes bruscos. La fibra más usada es el nylon, debido a que es muy elástico, y proporciona al cemento gran resistencia a la tensión, a los impactos y al esfuerzo cortante.

**Yeso.-** Cerca de un 4% a 10% de yeso se añade al cemento Portland para lograr estos objetivos:

- Fraguado rápido para combatir una pérdida de circulación.
- Obtención de propiedades gelantes o tixotrópicas.
- Propiedades expansivas al cemento fraguado.

La edición de un 30% al 50% de yeso a cualquier cemento Portland producirá un fraguado instantáneo en 12 a 20 minutos, aún con la lechada en movimiento. Esto se aplica de manera efectiva, en pozos someros, en donde se requiere de un rápido aumento en la resistencia a los esfuerzos, para dar estabilidad a la pared del pozo.

En formaciones no consolidadas, altamente permeables, fracturadas o cavernosas, la adición de un 5% a 10% de yeso a la lechada de cemento Portland ocasionará una pronta gelificación cuando el flujo se suspenda.

La lechada soportará el peso de su propia columna si se pierde la circulación y no "caerá" en la zona de pérdida. El yeso se usa principalmente en profundidades menores a los 6,000 (pies).

Si se añade yeso en concentraciones de 3% a 6% a un cemento API clases A, G o H, reaccionará con el aluminato tricálcico y provocará una expansión ligera al cemento cuando frague. Esta

propiedad de expansión, mejora la unión del cemento con la tubería y la formación, afectando un mejor sello contra el gas o la migración anular.

### Aditivos Tixotrópicos

Este tipo de aditivos es mezclado en las lechadas de cemento a fin de crear una rápida gelificación. Se utilizan para combatir pérdidas de circulación, prevenir la "caída" de la columna anular, y minimizar la migración de gas mediante un rápido desarrollo del esfuerzo gel. El término tixotrópico se aplica a los cementos que alcanzan un rápido esfuerzo gel si se les deja estáticos.

Los aditivos tixotrópicos son de los siguientes tipos:

1. **Orgánicos.** Sistemas compuestos de dos elementos que realizan las funciones tixotrópicas mediante el eslabonamiento del polímero contenido en una mezcla con un aditivo contra pérdidas de filtrado.

2. **Inorgánicos** que unen los componentes sólidos cristalinos de la mezcla del cemento.

Entre las mezclas típicas para estas aplicaciones se encuentra el uso de yaso (5-8%) en cemento API clases A ó H.

### Espaciadores y lavadores

Estos fluidos desempeñan dos importantes funciones en el proceso de una cementación primaria:

1. **Minimiza la contaminación del cemento por el F.P.**

2. **Desplaza al F.P. de la porción del E.A. a ser cementada de tal manera que una cubierta de**

cemento adecuada tome ese lugar y realice el sello hidráulico.

A pesar de que los términos se usan indistintamente, los espaciadores y lavadores no son lo mismo. Mientras que un espaciador se utiliza para separar dos fluidos incompatibles (F.P. y cemento), es compatible con ambos. Un lavador se bombea por delante de la lechada a fin de mejorar la eficiencia del desplazamiento y el enlace del cemento.

Los espaciadores pueden ser base aceite o agua. Los primeros son más compatibles con los F.P. y no dañan las arenas y arcillas, sin embargo, el cemento se enlaza mejor a las formaciones mojadas por agua, por tanto el uso de espaciadores base agua es más frecuente.

Los lavadores son fluidos base agua de baja viscosidad, utilizados para aumentar la eficiencia de desplazamiento.

El agua fresca y de mar son dos efectivos lavadores químicos, que pueden usarse si la presión hidrostática producida lo permite.

Debido a que el agua no ofrece un grado de control de fluido, y por tanto puede dañar las formaciones sensibles, los mejores lavadores son mezclas químicas:

1. Sistemas reactivos. Bajo gasto crítico, previene la caída del cemento y mejora el sello hidráulico.
2. Dispersantes y surfactantes. Rompen el esfuerzo gel del lodo y ayudan a alcanzar más pronto el flujo turbulento.

La tabla de la Figura IV.9 muestra los efectos que los aditivos tienen sobre las propiedades físicas del cemento.

La tabla de la Figura IV.10 es un resumen de la mayoría de los aditivos para cementos Portland, sus usos y beneficios y los cementos a los cuales puede añadirseles.

		ACELERACION (COEFICIENTE DE COLAPSO)	DEFERENCIA	VOLATILIDAD (COEFICIENTE)	IDENTIFICACION DEFERENCIA	DEFERENCIA	DEFERENCIA DE DEFERENCIA (DEFERENCIA)	TEMPERATURA DE FUSION	COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD	DEFERENCIA	DEFERENCIA (10 - 20 0)	DEFERENCIA DE DEFERENCIA	DEFERENCIA DE DEFERENCIA
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	DEFERENCIA		(X)	X				X	X			X	
	DEFERENCIA						X						
DEFERENCIA	DEFERENCIA				(X)					X	X		X
	DEFERENCIA		(X)	(X)			(X)		(X)			X	
DEFERENCIA	DEFERENCIA		X	X	X			X				X	
	DEFERENCIA	X				X	(X)			X	X		
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	DEFERENCIA	(X)											X
	DEFERENCIA		X			(X)	X	X					
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	DEFERENCIA		X				X	(X)					
	DEFERENCIA												
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	DEFERENCIA	(X)					X				X	X	X
	DEFERENCIA		X	X	X	(X)		X	X				
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	DEFERENCIA			X			X						(X)
	DEFERENCIA		X										(X)
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	DEFERENCIA			(X)			X						(X)
	DEFERENCIA												
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	P. B. DEFERENCIA	X					X		X		X		X
	P. B. DEFERENCIA	X		X			X		X		X		X
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	P. B. DEFERENCIA		X	Y			X		X		X		X
	P. B. DE DEFERENCIA		X	X	X	X	X	X	X				X
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	DEFERENCIA				X	X	X	X					X
	C. DEFERENCIA					X	X	X					
DEFERENCIA DE DEFERENCIA	DEFERENCIA DE C.						X			X			

X DEFERENCIA  
(X) DEFERENCIA

\* PARA TEMPERATURAS > 230 ° F

FIGURA IV.9 Efecto de las Mezclas en las Propiedades Físicas del Cemento.

TIPO DE ADITIVO	USO	COMPOSICION QUINICA	BENEFICIO	TIPO DE CEMENTO
<b>ACELERADORES</b>	-REDUCCION DE (WOC) -PERDIDAS DE CIRC. -TAPONES DE CEMENTO -TUBERIAS SUPERF.	CLORURO DE CALCIO CLORURO DE SODIO VEBO SILICATO DE SODIO DISPERSANTES AGUA DE MAR	ACELERA FRAGUADO RAPIDO DESARROLLO A LOS ESPESORES	TODAS LAS CLASES DE CEMENTO API C. POZOLANICOS SISTEMAS DIACEL.
<b>RETARDADORES</b>	-INCREMENTA TIEMPO DE ESPESAMIENTO -REDUCE VISCOSIDAD	LIGNOSULFONATOS ACIDOS ORGANICOS CMEC LIGNOSULFONATOS MODIFICADOS	INCREMENTA TIEMPO DE BOMBEO MEJORA PROPS. FLUJO	C. API TIPOS D,E,G Y H C. POZOLANICOS SISTEMAS DIACEL.
<b>ALIGERADORES</b>	-REDUCCION DEL PESO -CONTRA PERDIDAS DE CIRC.	BENTONITA/ATAPULGITA GILSONITA TIERRA DE ATONACEA PERLITA POZOLANICOS NITROGENO MICRO ESFERAS (VIDRIO)	DENSIDADES MAS BAJAS ECONOMIA MEJOR LLENADO DE CAVIDADES	TODAS LAS CLASES DE CEMENTO API C. POZOLANICOS SISTEMAS DIACEL.
<b>DENSIFICANTES</b>	-INCREMENTA PESO -CONTROL DE P.H	HEMATITA BARITA APENA ILMENITA	AUMENTO DE DENSIDAD	C. API TIPOS D,E,G Y H
<b>CONTRA PERDIDAS DE CIRCULACION</b>	-PUENTRAMIENTO -OPTIMIZA LLENADO DE CAVIDADES -CONTRA PERDIDAS DE CIRC. -SISTEMAS DE RAPIDO FRAGUADO	GILSONITA BOJUELAS DE CELOFAN CEMENTO BASE VEBO BENTONITA/DIESEL FIBRAS DE NYLON ADITIVOS TIOTROPICOS CASCARA DE NUEZ	PUENTE DE FRACTURAS COLUMNAS DE FLUIDO MAS LIGERAS C. DE ZONAS FRACTURADAS	TODAS LAS CLASES DE CEMENTO API C. POZOLANICOS SISTEMAS DIACEL.
<b>CONTRA PERDIDAS DE FILTRADO</b>	-C. FORRADAS -C. DE LINEAS LARGOS -C. EN FORMACIONES SENSIBLES AL AGUA	POLIMERO DISPERSANTES CMEC LATEX	REDUCE DESIDRATACION DISMINUYE EL VOLUMEN DE CEMENTO REQUERIDO	TODAS LAS CLASES DE CEMENTO API C. POZOLANICOS SISTEMAS DIACEL.
<b>DISPERSANTES</b>	-MEJORA PROPS. FLUJO -OPTIMIZA POTENCIA (PH) -DENSIFICACION DE LECHADAS	ACIDOS ORGANICOS POLIMERO CLORURO DE SODIO LIGNOSULFONATOS	LECHADAS MAS DELGADAS AMINORA PERDIDAS DE FILTRADO MEJOR REMOCION DEL LODO MEJOR COLOCACION DEL CEMENTO	TODAS LAS CLASES DE CEMENTO API C. POZOLANICOS SISTEMAS DIACEL.

FIGURA IV.10 Resumen sobre Aditivos para lechadas de cemento.

## **CAPITULO V. PLANEACION Y CONTROL DE LA OPERACION DE CEMENTACION**

### **PLANEACION DE LA OPERACION**

**El desempeño productivo de un pozo depende en gran medida de una buena operación de cementación primaria.**

**Un trabajo de cementación primaria debe constar de tres fases fundamentales: Una cuidadosa planeación, un buen control de la ejecución y una adecuada evaluación de los resultados.**

**Una operación exitosa requiere una buena coordinación y el control de muchos factores, empezando con la planeación misma del trabajo.**

**La planeación inicia mucho antes de que la operación se realice y en muchas ocasiones inclusive antes de perforar el pozo, basándose en información del área y experiencia previamente recolectadas. Asimismo involucra factores económicos, humanos y de ingeniería. Todos deben conjuntarse de forma adecuada y en los tiempos precisos para que se logre un trabajo de manera eficiente.**

**Una buena planeación debe, en primer lugar, conducir al objetivo principal para el que se está diseñando la operación. En un trabajo ideal, los canales de lodo y gas han sido permanentemente atajados y hay un completo sello hidráulico entre la T.R. y la formación a través de la(s) zona(s) de interés; aunque frecuentemente podemos tener un objetivo primario y uno secundario. Por ejemplo, en sartas de T.R. intermedias de gran longitud, una cubierta de cemento desde la cima hasta el fondo es lo ideal, pero en la realidad un buen sello en la zapata del fondo podría ser todo lo que se requiriera. En otros casos, el aislamiento aún a distancias considerables de la zapata puede ser importante (e.g en un liner o tubería corta traslapada o sobrepuesta). En todo caso, los objetivos de una cementación determinan como se diseñará dicho trabajo.**

El objetivo de producir el mayor número de barriles de aceite al más bajo costo posible requiere de una visión general de todas las etapas del pozo, desde su perforación hasta los métodos para optimizar el ritmo de producción a fin de cuidar el yacimiento, y ya en la vida productiva aún regirse por parámetros como la oferta y demanda y otros mecanismos que fijan el precio del aceite y que podrían -deberían- regular el ritmo de producción dentro de los rangos permisibles por las propias características del yacimiento. Pero, en cuanto a la cementación primaria se refiere, el objetivo no se cumplirá si la disminución de costos durante el diseño de la cementación primaria redunde en la necesidad de hacer trabajos de reparación posteriores u operaciones de cementación forzada, que además de costosos, pueden provocar un problema posterior o la posibilidad de que el trabajo no cumpla con los objetivos trazados.

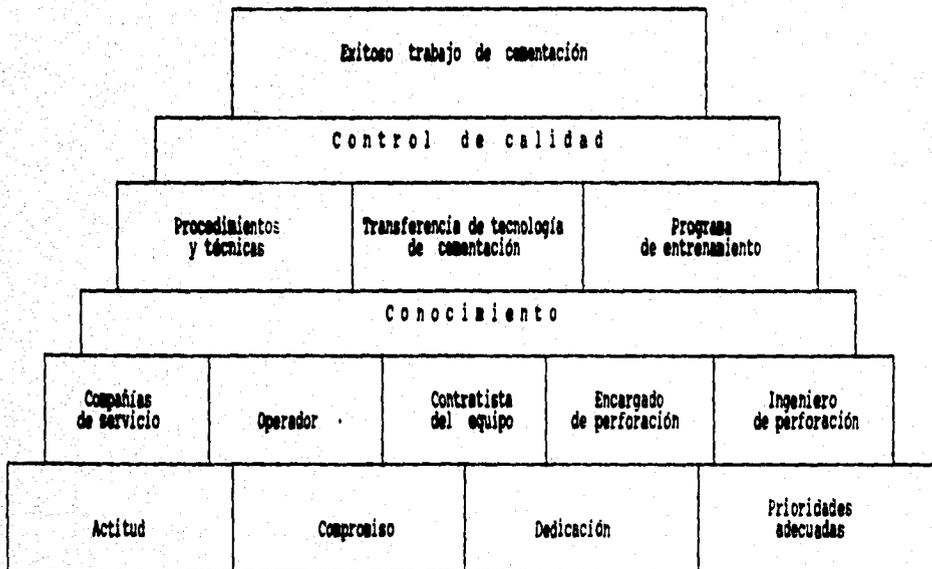
La no consecución de una buena cementación tiene por resultado un pobre aislamiento de las zonas productoras de las demás formaciones y puede traer consecuencias muy costosas en la vida productiva de cualquier pozo. Entre las más importantes se encuentran:

- Tratamientos de estimulación inefectivos
- Evaluación errónea del yacimiento
- Comunicación anular con fluidos indeseables
- Producción excesiva de fluidos del pozo
- Acumulación de gas en el espacio anular

Una planeación adecuada, por tanto, tiene por objetivo hacer una programación de los eventos que llevarán a la ejecución exitosa y a un buen control de la operación, así como de la conjunción de la gente, los materiales y equipo necesarios para lograrla.

Smith estableció que: "Una completa operación de cementación, es una cadena con tres eslabones: Criterio de cementación, conocimiento y control de calidad. Aunque estos eslabones se encuentran separados, son interdependientes. El adagio de mezclarlo, bombearlo e inyectarlo es arcaico. La

actitud negativa "Es imposible obtener un buen trabajo de cementación primaria, entonces, ¿Porqué intentarlo?" es una actitud de autocomplacencia. La actitud positiva deberá contener un compromiso verdadero e involucrará la dedicación de la gente, tiempo y dinero". La fig V.1 muestra la pirámide de Smith y como trabaja para el logro de una buena cementación.



**FIGURA V.1** Pirámide de Smith.

## FACTORES DE INFLUENCIA EN EL DISEÑO

Dentro de la planeación de la operación deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros y factores de influencia:

<b>AREA</b>	<b>FACTORES DE INFLUENCIA</b>
<b>Pozo</b>	Diámetro, Profundidad, Temperatura, Propiedades de la Formación.
<b>Fluido de Perforación</b>	Tipo, Propiedades, Peso, Compatibilidad con el Cemento.
<b>Tubería de Revestimiento</b>	Diseño, Tamaño y Tipo de Rosca, Profundidad de Colocación, Centradores, Raspadores, etc.
<b>Operaciones del Aparejo</b>	Velocidad de Colocación de la T.R., Tiempo de Circulación antes de Cementar.
<b>Composición de la Lechada</b>	Profundidad del pozo, Temperatura del Fondo del Pozo, Presión de la Columna del Fluido de Perforación, Tiempo de Esposamiento, Fza. requerida para soportar la Tubería, Volumen, Peso, Propiedades Reológicas, Aditivos, etc.
<b>Unidades de Mezclado y de Bombeo</b>	Tipo de Mezclador, Cabeza de Cementación, Tapones, Espaciadores, Fluido Desplazante.
<b>Personal</b>	Delimitación de Responsabilidades entre la Gente.

FIGURA V.2 Parámetros de Influencia en el Diseño de una Cementación Primaria.

## POZO

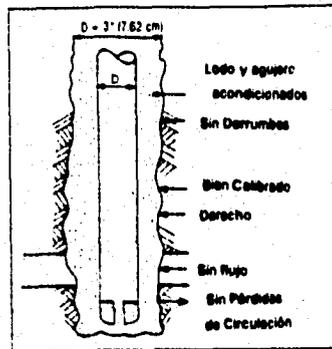
**Geometría del Agujero.-** Antea de que una lechada de cemento pueda diseñarse, debe recolectarse información sobre el agujero. Esto incluye la geometría, peso y tipo del lodo, altura de la columna de cemento necesaria y tipos de formación expuestos.

El agujero debe reunir ciertos requerimientos para ser cementado y realizar los objetivos deseados. Esta parte de la cementación comienza mucho antea de que el pozo comience a perforarse.

Entre lo más importante de toda la planeación y la toma de decisiones en cementación esté el obtener un total aislamiento entre las formaciones del agujero. Un sello hidráulico debe obtenerse entre el cemento y la T.R. y, entre el cemento y la formación, al mismo tiempo, los canales de lodo y gas dentro de la cubierta de cemento deben ser atajados.

El agujero cementable ideal, ver Figura V.3, es uno que sea 3 pg más grande que el diámetro exterior de la T.R. (el mínimo absoluto es 1 1/2 pg) medido con la mayor precisión posible (sin derrumbes, tan derecho como sea posible, sin severas patas de perro), estabilizado y apropiadamente acondicionado (sin derrumbamientos, inundaciones o pérdida de circulación).

La geometría del agujero por cementar tiene gran importancia tanto para el desplazamiento del lodo, como para seleccionar el volumen adecuado de cemento por bombear. Deberá recordarse que comúnmente tiende a considerarse al agujero de un diámetro constante, referido como diámetro uniforme, cuando tiende a ser más bien ovalado. Esta consideración puede conducir a una estimación incorrecta del volumen de desplazamiento del lodo, y por tanto el del cemento, resultando de ello un trabajo de cementación menos eficiente. Si el agujero tiene variaciones en el diámetro, llamadas derrumbes, la velocidad anular ( $V_a$ ), a través de esa sección transversal es menor que aquella donde el diámetro del agujero sea uniforme. Si esta velocidad anular es suficientemente baja, el lodo y los recortes de la perforación permanecerán en el derrumbe en estado gel, haciendo la remoción del lodo por el cemento muy difícil.



**FIGURA V.3** Agujero Cementable ideal.

Haut y Crook llamaron a esto el factor de movilidad del lodo y lo calcularon del modo siguiente:

$$F_{mm} = 1/V_f S_g$$

Donde:

$$F_{mm} = MMF$$

$$V_f = \text{Volumen filtrado, (Cm}^3/30 \text{ min)}$$

$$S_g = \text{esfuerzo gel a 10 minutos}$$

Estos autores concluyeron que mientras más bajo sea el valor de MMF, menor será también el porcentaje de lodo removido del pozo.

En esencia, quiere decir que mientras más espeso sea el lodo mayor dificultad tendrá su desplazamiento por el cemento.

La segunda parte de la geometría del pozo a considerar es qué tan redondo es. Si el volumen de cemento se subestima, la cima del cemento puede quedar más baja de lo requerido, lo que en el caso de un liner puede redundar en una costosa operación de reparación. También puede concluirse erróneamente, que el espaciador no cumplió su función de remover al lodo eficientemente. A fin de evitar estos problemas el pozo es calibrado (se mide el diámetro del agujero), para determinar el volumen de cemento a bombear.

Esencialmente, tres tipos de registros calibradores se corren hoy día: de dos, tres y cuatro brazos. La Figura V.4 muestra las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

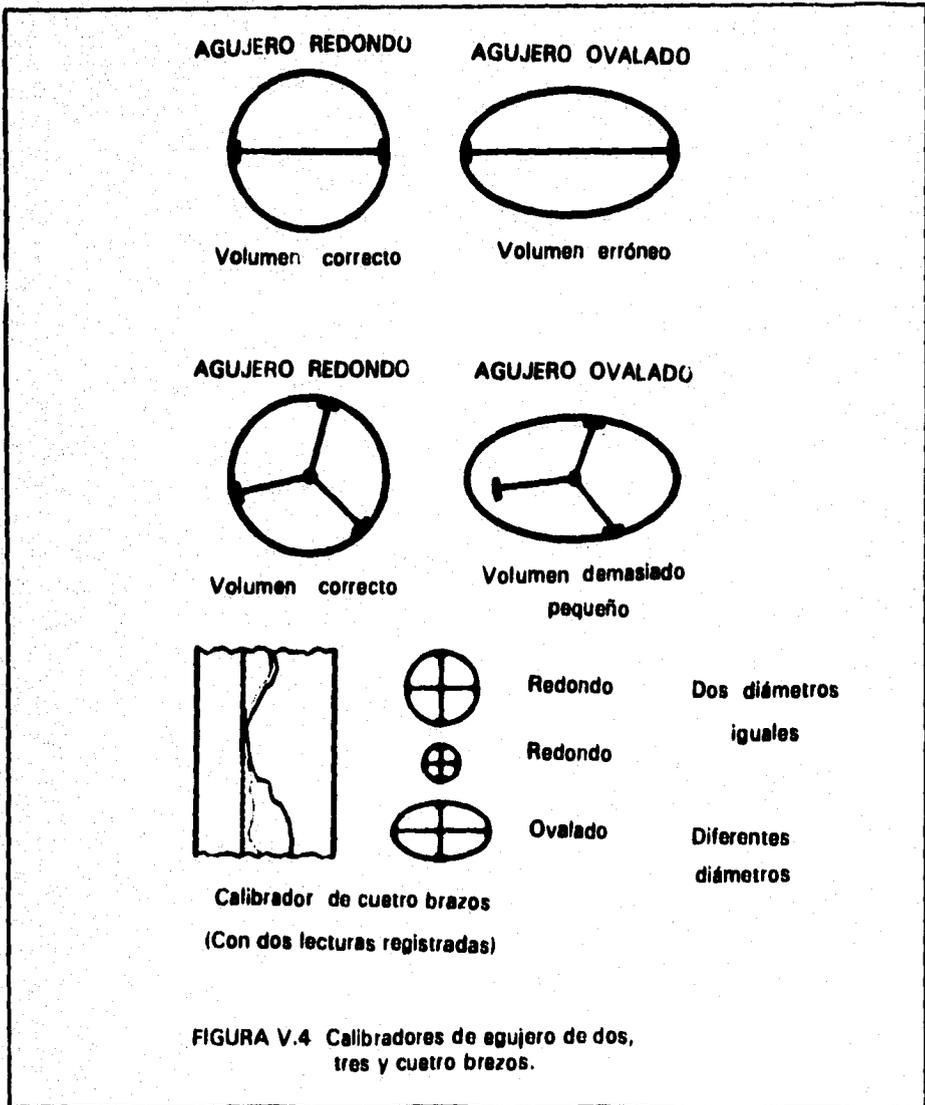
El registro calibrador de agujero de dos brazos puede correrse junto con una gran variedad de registros eléctricos y radioactivos. Las partes ovaladas del pozo darán una lectura mayor que cuando el volumen es calculado como la amplitud de dos brazos iguales al diámetro de un círculo.

El registro calibrador de agujero de tres brazos puede calcular, al contrario de su similar de dos brazos, un volumen de cemento muy pequeño para las condiciones reales.

El registro calibrador de cuatro brazos proporcionará la lectura más acorde a la geometría real del pozo. Este registro se puede obtener con diferentes tipos de arreglos de los registros. También será de ayuda si se corre con un integrador, para un cálculo sencillo de los volúmenes requeridos de cemento y el diámetro promedio del pozo, para los cálculos de la velocidad del desplazamiento.

Cualquier esfuerzo en la perforación del pozo que proporcione un agujero más uniforme deberá realizarse. Esto puede incluir perforación controlada, menor tiempo de exposición del agujero al lodo, mayor control de los sólidos del lodo, una buena determinación de la presión de poro, mejor control del contenido de calcio en el lodo. Si como resultado se obtiene un mejor perfil del agujero y una eficiente remoción del lodo durante la cementación, estas medidas adicionales bien podrían valer la pena en términos de reducir el número de costosas operaciones de reparación.

El agujero cementable no debe ser sacrificado con reducción en los costos de lodos y/o apresuramientos en su perforación. El costo de una reparación en la cementación puede exceder en mucho el ahorro en los costos de perforación. La producción y la reserva pérdidas deben ser incluidas en cualquier análisis de costos.



**Temperatura y Presión:** En toda operación de cementación las propiedades de la lechada -tiempo de espesamiento, desarrollo de esfuerzos, gasto de pérdida de fluido, reología y agua libre- se ven afectadas drásticamente por la presión y la temperatura del fondo del pozo. De aquéllas, el tiempo de espesamiento, el cual puede definirse como el tiempo transcurrido desde el mezclado inicial del cemento con el agua hasta alcanzar una consistencia final de cien unidades Bearden de viscosidad, es la más sensible. (Debido a que una lechada es un fluido no Newtoniano, es incorrecto referir su viscosidad a un valor en poise, de tal forma que la unidad adimensional Bearden es un índice real de esta propiedad).

Para asegurar que la composición de cemento seleccionada presente un adecuado tiempo de bombeo en el ambiente del fondo de pozo, se debe acondicionar un laboratorio que simule los trabajos reales. La simulación usualmente se hace en un consistómetro de alta presión y temperatura, en donde la lechada pueda exponerse a las condiciones en que se encontrará en el fondo de pozo.

Diferentes pruebas con varios aditivos retardadores, para control de pérdidas de filtrado, etc. se llevan a cabo hasta que se obtiene un tiempo de bombeo adecuado, pero primero es necesario determinar la temperatura y presión del fondo de pozo.

Debido a que la temperatura del pozo a la profundidad de cementación tiene una mayor influencia en la reducción del tiempo de bombeo que lo que lo afecte la presión, tener un conocimiento preciso de ella es importante.

A diferencia de la presión, la temperatura de fondo circulando no siempre está disponible. Las fuentes de información para la temperatura de fondo son registros primarios de pozos, medición de la temperatura durante la circulación anterior a la cementación y prácticas locales.

De las fuentes la mejor es la medición de la temperatura de circulación, seguida del uso de la carta API para temperaturas en conjunto con registros primarios de 24 horas o períodos más largos dentro del pozo y, tercero, una carta API.

Usando mediciones reales de pozos, el API ha desarrollado correlaciones entre la temperatura de cementación de fondo de pozo y una temperatura pseudo estática de fondo de pozo para gradientes de 0.9 a 1.9°F/100 pie y para profundidades hasta 20,000 (pies). Para hacerlas más completas, estas correlaciones han sido agrandadas por Calvert y Smith, mediante una interpolación simple entre los gradientes API ya existentes. Tabla de la Figura V.5.

## FLUIDO DE PERFORACION

Las propiedades del F.P. generalmente están limitadas a la limpieza y ascensión de los recortes y a proporcionar algunas propiedades de inhibición sobre ciertas formaciones.

El tipo y propiedades del F.P. que se encuentran en el pozo, deben tomarse en cuenta a la hora de realizar la planeación del trabajo de cementación. Para ello es necesario determinar que tipo de lechada es compatible con las características del F.P., para, en caso contrario, implementar la colocación de un fluido espaciador que lo sea tanto con el cemento como con el lodo.

Antes de cementar, es necesario que el lodo se encuentre a las mejores condiciones de perforación, es decir, con baja viscosidad (embudo Marsh), baja viscosidad plástica, bajo punto de cedencia, así como buen control de pérdida de filtrado; condiciones que de cuidarse dan un buen grado de certidumbre en cuanto a las funciones de buena estabilidad de la pared del pozo, suspensión y acarreo de los recortes, así como de estabilidad en el contenido de agua que le prevendrá de una eventual deshidratación, y con ello logrando también mejores condiciones para su desplazamiento por el cemento.

Para cementar, desde hace mucho tiempo, se acostumbra tratar al lodo a las últimas condiciones de perforación, pero las cuadrillas son renuentes a adelgazar el lodo más allá de esta operación. Algunos estudios sobre las propiedades de limpieza del F.P. y mecánica de rocas indican que un lodo menos

viscoso puede ser usado exitosamente para perforar el pozo si se usan mayores velocidades anulares. Los estudios de mecánica de rocas muestran también que altas velocidades anulares no producen problemas de estabilidad.

Si el pozo puede mantenerse limpio durante las operaciones de perforación y si la acumulación de cortes puede prevenirse, la eficiencia del desplazamiento puede mejorarse y se requerirá un menor tiempo de acondicionamiento del pozo antes de ser cementado.

		Gradiente de temperatura (°F/100 pies)																
Temperature		0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	Temperature (°F)			
		80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	90	100	110
1,000	BHCT	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	90	100	110
	BHLT	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	100	110	120	130
2,000	BHCT	89	89	89	90	90	90	90	90	91	91	91	91	91	91	101	111	121
	BHLT	96	96	100	102	104	106	109	110	112	114	116	118	120	120	131	141	151
3,000	BHCT	94	94	94	95	95	96	96	96	97	97	97	97	98	98	108	118	128
	BHLT	104	107	110	113	116	119	122	125	128	131	134	137	140	140	151	161	171
4,000	BHCT	99	99	100	100	101	101	102	102	103	103	104	104	105	105	115	125	135
	BHLT	112	116	120	124	128	132	136	140	144	148	152	156	160	160	171	181	191
5,000	BHCT	105	106	106	107	108	109	109	110	111	112	113	115	117	117	127	137	147
	BHLT	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	180	191	201	211
6,000	BHCT	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	123	126	129	129	139	149	159
	BHLT	128	134	140	146	152	158	164	170	176	182	188	194	200	200	211	221	231
7,000	BHCT	118	119	120	122	124	126	127	129	131	133	136	143	148	148	158	168	178
	BHLT	136	143	150	157	164	171	178	185	192	199	206	213	220	220	231	241	251
8,000	BHCT	125	126	126	129	132	135	138	140	143	146	153	160	167	167	177	187	197
	BHLT	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232	240	240	251	261	271
9,000	BHCT	132	134	136	138	142	147	150	154	158	163	172	180	189	189	199	209	219
	BHLT	152	161	170	179	188	197	206	215	224	233	242	251	260	260	271	281	291
10,000	BHCT	138	141	144	148	152	158	163	167	174	180	190	200	210	210	220	230	240
	BHLT	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	280	291	301	310
11,000	BHCT	144	148	152	158	164	172	177	182	190	199	211	224	236	236	246	256	266
	BHLT	168	179	190	201	212	223	234	245	256	267	279	290	300	300	311	321	331
12,000	BHCT	150	155	160	165	175	185	191	197	207	217	232	247	262	262	272	282	292
	BHLT	176	188	200	212	224	236	248	260	272	284	296	308	320	320	331	341	351
13,000	BHCT	155	162	169	176	188	200	208	215	226	236	254	270	286	286	296	306	316
	BHLT	184	197	210	223	236	249	262	275	288	301	314	327	340	340	351	361	371
14,000	BHCT	160	169	179	187	201	215	224	233	246	258	278	293	311	311	321	331	341
	BHLT	192	206	220	234	248	262	276	290	304	318	332	346	360	360	371	381	391
15,000	BHCT	165	176	187	199	214	230	241	252	266	280	298	317	335	335	345	355	365
	BHLT	200	215	230	245	260	275	290	305	320	335	350	365	380	380	391	401	411
16,000	BHCT	170	183	197	210	229	245	258	270	286	302	321	340	359	359	369	379	389
	BHLT	208	224	240	256	272	288	304	320	336	352	368	384	400	400	411	421	431
17,000	BHCT	176	181	207	222	242	261	275	289	307	325	344	363	382	382	392	402	412
	BHLT	219	233	250	267	284	301	316	335	352	369	386	403	420	420	431	441	451
18,000	BHCT	182	199	217	234	256	277	293	308	326	347	366	385	404	404	414	424	434
	BHLT	224	242	260	279	296	314	332	350	368	386	404	422	440	440	451	461	471
19,000	BHCT	187	207	227	247	271	295	311	328	348	370	389	408	427	427	437	447	457
	BHLT	232	251	270	289	309	327	346	365	384	403	422	441	460	460	471	481	491
20,000	BHCT	193	215	237	259	286	312	330	348	370	392	412	431	451	451	461	471	481
	BHLT	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	480	491	501	511

\*BHCT = bottomhole circulating temperature; BHLT = bottomhole log temperature after 24 hours of shut-in.

FIGURA V.5 Carta API de Temperaturas de Cementación de Fondo del Pozo.

## TUBERIA DE REVESTIMIENTO

Una vez realizado el diseño del grado y tipo de tubería, coples y roscas necesarios para que la T.R. tenga un adecuado desempeño en cuanto a tensión, presión interior y colapso se refiere, se procede a su acondicionamiento, para su posterior instalación al interior del pozo.

**Acondicionamiento.-** Antes de que la tubería sea transportada a la localización del pozo, debe realizarse una inspección cuidadosa, así como su acondicionamiento.

Además de la revisión de costumbre del espesor de la pared, área final, inspección a los coples y diámetro exterior e interno, debe llevarse a cabo un acondicionamiento de la superficie exterior.

Carter y Evans reportaron una marcada diferencia en la habilidad del cemento para adherirse a la superficie de la T.R. dependiendo del tipo de preparación que la superficie había recibido. La tabla de la Figura V.6 muestra un resumen de sus resultados.

Como puede observarse, la superficie que ofrece las mejores características de adherencia es aquella cubierta con arena y retenida en la superficie con resina (Este método de acondicionamiento se menciona paso por paso en el capítulo VI).

Usualmente esto es difícil de realizar en una operación típica. La segunda mejor alternativa, la cual es generalmente seleccionada, consiste en rociar con arena a presión la superficie de la T.R. a fin de hacerla rugosa. Esto no significa que el anterior método no sea conveniente, por el contrario es más eficiente, aunque requiere de un mejor control de calidad en el trabajo.

Indistintamente al método usado, la pregunta subsiste. ¿Qué tramo de la T.R. deberá ser acondicionado en relación a la zapata? Debe considerarse tanto la zona por aislar, como el apoyo requerido por la T.R.

Para la consideración de la zona por aislar, un valor de 200 a 500 (pies) es suficiente. La siguiente ecuación puede usarse para el cálculo de la altura de la columna de cemento requerida para soportar a la sarta de T.R.

**Cemento: API Clase A**

**Contenido de Agua: 5.2 gal/saco**

**Temperatura de Fraguado: 80°F**

**Tiempo de Fraguado: 24 horas**

**Dimensión de la Tubería: 2 pg (diámetro exterior) dentro  
de una tubería de 4 pg.**

<b>TIPO DE ACABADO</b>	<b>ESFUERZO (lb/pg<sup>2</sup>)</b>	<b>RESISTENCIA HIDRAULICA (lb/pg<sup>2</sup>)</b>	<b>GAS (lb/pg<sup>2</sup>)</b>
<b>Nueva (barniz del taller)</b>	<b>74</b>	<b>200 a 250</b>	<b>15</b>
<b>Nueva (barniz removido)</b>	<b>104</b>	<b>300 a 400</b>	<b>70</b>
<b>Nueva (Arena a presión)</b>	<b>123</b>	<b>500 a 700</b>	<b>150</b>
<b>Usada (Oxidada)</b>	<b>141</b>	<b>500 a 700</b>	<b>150</b>
<b>Nueva (Baño de arena con aire y recubierta de resina)</b>	<b>2,400</b>	<b>1,000 a 2,000</b>	<b>400+</b>

**FIGURA V.6** Propiedades de adherencia en varios tipos de acabado de Tuberías.

$$St = (L_c W_c)/(9.69 d_o h)$$

Donde:

$St$  = Resistencia a la tensión del cemento, (lb/pg<sup>2</sup>)

$L_c$  = Longitud de la T.R., (pies)

$W_c$  = Peso unitario de la tubería de revestimiento, (lb/pie)

$d_o$  = Diámetro exterior de la T.R., (pg)

$h$  = Altura de la columna de cemento, (pies)

Un factor crítico raras veces probado es la resistencia a la tensión del cemento. Con valores mínimos para el valor de resistencia a la tensión y un factor de seguridad de uno a dos, se encontró que 500 (pies) (152 m) de la cubierta de cemento que rodea a la T.R. son suficientes para un buen apoyo de la tubería.

**Centrado.** Algunos autores han reconocido y discutido los efectos benéficos del centrado de la tubería en la eficiente remoción del lodo durante la cementación primaria. La industria parece confiar en los varios modelos matemáticos para la predicción de presiones por fricción, densidades equivalentes de circulación (ECD), fuerzas de arrastre durante la reciprocación de la T.R., etc, los cuales asumen que la T.R. está totalmente centrada. En tanto que esos métodos son aceptados, la colocación de contradores se ve minimizada, generalmente debido a experiencias anteriores con contradores destruidos provocando fallas en la introducción de tuberías.

Algunos investigadores como Graham o Yuejin Luo han desarrollado sendos modelos para la efectiva remoción del lodo en un agujero excéntrico. Un problema de estos métodos es que, un mayor volumen de corriente debe ser bombeado en comparación con el que considera centrada la tubería, para todas las demás condiciones iguales.

Debido a la incertidumbre de los métodos descritos, se prefiere colocar el número de centradores necesario a fin de lograr un centrado mínimo en la T.R. de 67%. Teplitz y Hasselbroek discutieron los beneficios de una tubería bien centrada.

"Los resultados de la primera prueba fueron altamente satisfactorios. Se encontró que la T.R. fue más fácil de introducir que usualmente, después de puesta la tubería, la cima del cemento fue encontrada abajo del punto de llenado calculado por el registro calibrador, en lugar de los 1,000 a 2,000 (pies) arriba de este nivel que se encontró en los pozos anteriores de estudio. Aún más, el pozo se encontraba en producción sin la necesidad de una cementación forzada, un desempeño extremadamente raro para el campo en observación".

En cualquier caso un buen método para el cálculo de la colocación y número de centradores es necesario. Si un centrador está aprobado por API, entonces sus especificaciones de diseño mínimas pueden encontrarse en el API Spec. 10D. De capital importancia es que el centrador posea una fuerza de restauración capaz de realizar un 67% de centrado a fin de cumplir con las especificaciones de API. El cálculo de centrado se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$S = L_{\min} 100 / r_h - r_p$$

Donde:

S = Centrado de la tubería, %

$r_h$  = Radio del pozo, (pg)

$r_p$  = Radio de la tubería, (pg)

$L_{\min}$  = Distancia mínima entre el diámetro externo de la tubería y el diámetro del pozo, (pg)

Hoy día, existen varios métodos para el cálculo de colocación de centradores. El más sencillo, pero menos preciso es el siguiente:

$$l_{\min} = F / \sin \theta W_p$$

Donde:

F = Fuerza resultante, (lb/pie)

$\theta$  = Angulo del pozo

Wp = Peso de la tubería, (lb/pie)

l<sub>min</sub> = Mínimo espaciamento entre los centradores para un centrado de 67%,

Desafortunadamente esta ecuación está limitada, tal como lo reconocieron Myers y Sutko, dado que en sus cálculos incluyeron los efectos de las patas de perro, cambios en el ángulo del pozo, y la cantidad de tensión que actúa en el centrador. Calcularon el espaciamento mínimo de los centradores como una función de la carga lateral ejercida sobre él contra una fuerza mínima de restauración que el centrador posee. Lo cual es expresado por:

$$T = Wc \, nf,$$

$$Cw = Wc \, nfc \, \sin \theta,$$

$$CT = 2 [(T + Wc \, nfc \, \cos \theta) \, \sin \theta_{1/2}] \, y$$

$$Q = Cw + Ct$$

Donde:

T = Tensión,

nf = Pies de tubería bajo el centrador,

Cw = Componente del peso,

nfc = Pies de tubería entre centradores,

Q = Carga lateral

CT = Componente de la Tensión

$\theta_{1/2}$  = Mitad del cambio en el ángulo entre centradores.

Estas ecuaciones, comúnmente conocidas como modelos bidimensionales, han sido modificadas por algunos investigadores, que incluyeron el efecto de flotación y el radio de curvatura o cambio en la dirección del pozo.

Lee et al, publicaron un algoritmo para la solución de un modelo de colocación tridimensional. Goodwin desarrolló un modelo para el cálculo del pandeo entre los centradores. Estos últimos modelos han sido vistos conservadoramente, y su aceptación en el campo ha sido limitada.

En todo caso, un medio mecánico para el centrado de la tubería en el pozo ayudará en el proceso del desplazamiento del lodo. Recordemos que si la tubería se encuentra contra la pared del pozo, es imposible la instalación del cemento entre la T.R. y la pared del pozo.

Todo esfuerzo encauzado a contribuir a un buen desplazamiento se verá nulificado por una inadecuada colocación de los centradores y se reflejará en la evaluación que de la cementación se haga.

## OPERACIONES DEL APAREJO

Velocidad de introducción de la Tubería.- Otro problema que puede definir el éxito o fracaso en un trabajo de cementación es una pérdida de circulación provocada por el fracturamiento a la formación debido a una velocidad de introducción de la T.R. demasiado alta. Esto está referido comúnmente como presión de surgencia y puede ser completamente significativo si no se toma en cuenta cuando se está bajando la tubería al fondo del pozo. De nueva cuenta, el proceso del desplazamiento del lodo no se ve beneficiado si no puede obtenerse buena circulación antes y durante la cementación del pozo.

La velocidad de la tubería, particularmente el movimiento descendente, debe ser calculado antes de

que la operación de introducción de la T.R. comience. Una vez que una velocidad de descenso segura se ha calculado, la cuadrilla de piso y el perforador deberán vigilar para que ésta no se exceda.

Modelos matemáticos y gráficas han sido desarrollados para el cálculo de presiones de surgencia durante la introducción de tuberías. Esos modelos primordialmente se utilizan cuando el fluido permanece en el régimen de flujo laminar, de tal forma que esto debe tomarse en cuenta.

Esas ecuaciones pueden usarse para obtener una velocidad máxima de introducción de T.R. Comparando la presión de surgencia resultante con los gradientes de fractura, y, manteniéndose abajo de éstos, asegura que se pueda establecer circulación en el pozo con la T.R. en el fondo.

Circulación y Movimiento de la Tubería antes de la Cementación. Casi todo autor que ha escrito sobre la cementación de pozos reconoce los beneficios del movimiento de la tubería y la circulación en el pozo antes de la cementación.

Desafortunadamente no existen guías para cada caso: Es bien reconocido que la mayoría de los lodos tiene un valor bajo de esfuerzo de corte y forman geles con sólidos en suspensión cuando se encuentran en reposo. También, que es más sencillo desplazar un fluido con baja viscosidad que uno con alta. El movimiento de la tubería y la circulación del lodo ayudan a romper los geles y a reducir la viscosidad de lodo, pueden también desviar el flujo al interior de los derrumbes, que de otra manera no podría llegar.

Anterior a la consideración del desplazamiento mismo, es importante asegurar que el F.P se mueva alrededor de toda la T.R.

La condición necesaria es que el esfuerzo de corte en la pared del pozo sea mayor que el valor de cedencia del lodo. Dado que el esfuerzo de corte en la pared se genera por la caída de presión por fricción sólo durante la circulación del lodo, la condición implica que el gasto de flujo debe ser mayor

que el valor de inicio conocido como "mínimo gasto de circulación".

La primera decisión por tomar es si la tubería será rotada, reciprocada o ambas. Desde el punto de vista operativo, la rotación es mucho más difícil por los problemas que entraña el encontrar uniones giratorias, cabezas de rotación y centradores apropiados. El método usual es la reciprocación, en tanto que la tubería no se mueva a una velocidad tal que el pozo sea inducido o fracturado. Este tipo de movimiento parece tener mejores resultados para la obtención de un buen desplazamiento de lodo que ningún movimiento. Dos buenas "reglas de dedo" para determinar por cuanto tiempo deberá ser circulado el lodo en el pozo antes de cementar son:

1. Circular del fondo hacia arriba para asegurarse de que no existe flujo de gas, lo cual puede afectar la calidad del cemento y/o causar problemas en el control del pozo.
2. Circular un mínimo de una vez el volumen que contiene la T.R., a fin de garantizar que no ha quedado nada en ella que tapone los flotadores cuando pase a través de ellos.

Pero estas reglas no nos indican que tanto tiempo se debe hacer circular el lodo antes de cementar. El criterio que mejor se adecua a las necesidades de la industria lo propuso Smith R.C., quien aconseja hacerlo hasta que un 95% del volumen registrado por el calibrador de agujero se alcance. Esta filosofía está basada en el hecho de que el cemento no recomolazará al lodo defilicado si éste perdió su movilidad. El movimiento de la T.R. siempre es benéfico para el proceso de remoción del lodo, pero el tipo de movimiento, la cantidad y la velocidad deben determinarse.

Donde la reciprocación de la tubería no es considerada una opción, como en el caso de un liner, la rotación de ella puede ser la alternativa.

Existen colgadores de rotación para tuberías cortas que utilizan cajas de baleros sellados de chumacera, también existen colgadores que giran en cojinetes no sellados de baleros, aunque

generalmente su vida útil es más corta, debido a la erosión provocada por los sólidos en los cojinetes. La ventaja que tienen las herramientas de rotación es que la tubería corta puede quedar colgada, la herramienta de introducción y asentamiento se libera y la tubería puede continuar girando. Una vez que el cemento está en el lugar, todo lo que se requiere es un esfuerzo de tensión para recuperar las herramientas introducidas.

### **VOLUMEN DE CEMENTO**

Cuando se calcula el cemento necesario de acuerdo a los datos obtenidos del registro calibrador, una precaución sumamente valiosa es comparar este resultado con el cálculo obtenido si el pozo tuviera una sección transversal completamente uniforme. En un caso de estudio, el volumen anular total obtenido del registro fue un 22% menor, necesitándose una integración manual.

Algunos factores de seguridad han sido agregados a los volúmenes calculados de cemento a través de los años, el uso único de un factor de seguridad es estar prevenido contra una posible pérdida de circulación. de hecho, el cemento añadido puede contribuir a ello, ya que si la cima del cemento se encuentra arriba de lo esperado no es motivo de orullo, esto simplemente significa que el desplazamiento del lodo fue menos eficiente y que una mayor cantidad de él se quedó, desviándose el cemento que debiera estar en su lugar.

### **COMPOSICION DE LA LECHADA DE CEMENTO, PARAMETROS DE DISEÑO**

Las profundidades de terminación, las condiciones del agujero, así como los problemas durante la perforación deben ser considerados en el diseño de la composición de una lechada.

Los siguientes factores deben ser parámetros de diseño de una lechada de cemento.

1. Profundidad del pozo
2. Temperatura del fondo del pozo
3. Presión de la columna del fluido de perforación
4. Contenido de agua y viscosidad de la lechada
5. Tiempo de espesamiento o de bombeo
6. Fuerza requerida en el cemento para soportar a la tubería
7. Calidad del agua disponible para el mezclado
8. Tipos del fluido de perforación y de los aditivos
9. Densidad de la lechada
10. Calor de hidratación
11. Permeabilidad del cemento fraquado
12. Control del filtrado
13. Resistencia a las salmueras

Mucho del éxito y facilidad para el diseño de lechadas de cemento adecuadas ha sido resultado de la estandarización del equipo de laboratorio y de los procedimientos de prueba, muchos de los cuales se realizan simulando las condiciones de cementación en el fondo del pozo.

Presión, Temperatura y Tiempo de Bombeo. Dos parámetros básicos que tienen influencia en el comportamiento de una lechada en el fondo del pozo los constituyen la presión y la temperatura. Estos parámetros determinan por cuanto tiempo una lechada estará en condiciones de ser bombeada, y cuando y como se desarrollará la fuerza necesaria para sostener a la tubería. La temperatura, sin embargo, tiene un efecto más preponderante que la presión. A medida que la temperatura aumenta, la lechada de cemento se hidrata, fraquando más rápido, acelerando también el desarrollo de la fuerza. Por su parte el tiempo de espesamiento o tiempo de bombeo se acorta. La Figura V.7 muestra como se ve afectado el tiempo de espesamiento debido a la temperatura en

una lechada de cemento API Clase H puro y otra del mismo tipo adicionada de 2% por peso de cemento de cloruro de calcio.

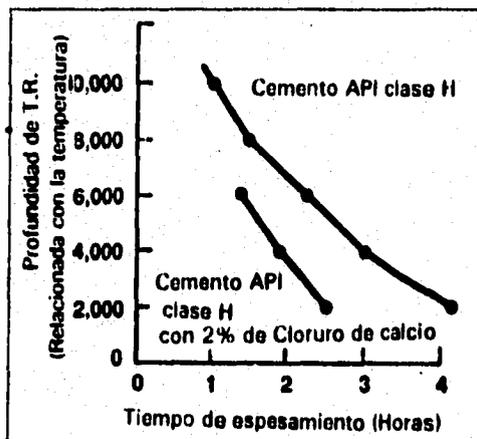


FIGURA V.7 Efecto de la temperatura sobre el tiempo de espesamiento en lechadas de cemento API clase H.

La estimación de la temperatura de fondo estática del pozo puede obtenerse de sondas que registran estas temperaturas. Las temperaturas de fondo fluyendo se obtienen de las lecturas tomadas por un dispositivo instalado en la tubería de perforación, y se registran en las diferentes "vueltas" que da el F.P. cuando se está acondicionando antes de que la T.R. sea introducida al pozo.

Con esta información puede obtenerse una relación entre las temperaturas de fondo estáticas y las de fondo fluyendo y de ella determinar la bombeabilidad de la lechada.

Estudios realizados a lo largo de la costa de Texas y Louisiana en los años 1950's han sentado las bases para los programas de prueba y especificaciones del cemento por más de 40 años. Los programas asumen que la temperatura de fondo estática varía como  $^{\circ}\text{F} = 80^{\circ}\text{F} + 0.015$  (prof en pies).

El efecto enfriador del fluido de perforación disminuye la temperatura de circulación considerablemente durante la cementación de una T.R. Durante una cementación forzada hay menos enfriamiento debido a que hay menor cantidad de fluido precediendo a la lechada. Por tanto, una misma lechada de cemento puede bombearse por mayor tiempo durante una operación de cementación de T.R. que durante una cementación forzada a la misma profundidad.

El tiempo que le lleva a una lechada alcanzar el fondo del pozo, depende del diámetro de la T.R. y del gasto de flujo.

En el diseño de una lechada de cemento para condiciones específicas de un pozo, el gasto del desplazamiento, los requerimientos de potencia, volumen de lechada, y la relación entre los diámetros del pozo y la T.R. se usan como bases para calcular el tiempo de bombeo adecuado para una composición de cemento dada.

Viscosidad y Contenido de Agua. En una cementación primaria, la lechada debe tener una viscosidad o consistencia para realizar del modo más eficiente el desplazamiento del lodo, y al mismo tiempo, permitir un buen enlace entre la formación y la tubería. A fin de alcanzar este objetivo, la mayoría de las lechadas se mezclan con una cantidad de agua, tal que provea de un volumen fijado igual de la lechada sin separación de agua libre.

En la cantidad de agua a usar para lograr una viscosidad predeterminada influyen, el tamaño de partícula, área superficial y aditivos utilizados.

Hay rangos de viscosidad que gobiernan que tan espesa puede ser una lechada de cemento en condiciones de ser bombeada, bajo un conjunto de condiciones en el pozo dadas. Esas cantidades de agua se cuantifican de acuerdo a los siguientes parámetros:

**Contenido Máximo de Agua.** Es la cantidad de agua de mezclado para una composición de cemento dada, tal que se obtenga un volumen conjunto igual al volumen de la lechada con no más de 1 1/2 veces el porcentaje de agua libre separada. Esto se mide por una prueba de asentamiento en una probeta de 250 ml en donde se vacía la lechada una vez que fue agitada en un probador de tiempo de espesamiento atmosférico. El contenido de agua máximo es el volumen empleado en la mayoría de las lechadas debido a que se desea siempre el máximo punto de cedencia y el menor de agua libre separada.

**Contenido Normal de Agua.** Es el volumen de agua de mezclado que proporciona una viscosidad de 11 Uc (unidades de consistencia) medido en un probador atmosférico de tiempo de espesamiento después de 20 minutos de agitarse. El API utiliza unidades de consistencia debido a que los valores obtenidos no son verdaderos valores de viscosidad. Las unidades de consistencia están basadas en el torque o arrastre. El contenido normal de agua es comúnmente llamado agua óptima, ya que proporciona una lechada bombeable.

**Contenido Mínimo de Agua.** Es la cantidad de agua de mezclado que dará como resultado una lechada de 30 unidades de consistencia después de 20 minutos de agitación. El resultado es una lechada de rápido espesamiento que puede ser usada por ejemplo para el control de una pérdida de circulación.

La relación agua/cemento, así como los volúmenes de lechada y total están ligados al tamaño de partícula y al área superficial del cemento.

Para la mayoría de los cementos API, están especificados tanto el tamaño de partícula, como los

requerimientos de agua para lograr ciertos niveles de resistencia a los esfuerzos, bombeabilidad, retardación en el fraguado, etc.

En una columna de cemento el exceso de agua puede juntarse y colectarse en pequeños "baches" en lugar de migrar hacia la cima de la columna.

Pruebas realizadas por Smith en una columna de 16 (pies) de longitud y con una "tubería de cristal" que dejaba un espacio de una pulgada de grosor entre el diámetro exterior de ésta y el diámetro interior de la tubería que simulaba la formación muestran que un cemento con una área superficial de 1500 (cm<sup>2</sup>/g), mezclado con agua a una densidad de 15.4 (lb/gal), forma un tapón sólido en la columna entera, sin embargo, cuando se mezcla con más agua 15.1 (lb/gal), ésta se separa en baches de 1/2 a 1 1/2 (pg) de grosor en toda la sección transversal.

A medida que la lechada se aligeró se hicieron más grandes y mayor el número de baches de agua separada. Los "baches" empezaron a formarse alrededor de 15 (min) después de que la lechada de cemento fue vaciada en la tubería de cristal.

Cabe aclarar, que aunque el incremento en el contenido de agua en una lechada, permite un mayor tiempo de bombeo y retardar el fraguado del cemento, no debe incrementarse a menos que se incorpore al cemento un material como bentonita u otro que restrinja el exceso de agua. Este exceso en todos los casos produce una lechada de cemento más débil y susceptible de corrosión.

Tiempo de Espesamiento: El tiempo mínimo de espesamiento es el requerido para mezclar y bombear la lechada desde la superficie hacia el fondo del pozo y su posterior ascensión por el espacio anular.

El equipo para la medición del tiempo de espesamiento de cualquier lechada de cemento bajo

condiciones de laboratorio está descrito en "API Testing Procedures".

El probador de tiempo de espesamiento simula condiciones del pozo, donde las temperaturas de fondo estáticas son mayores a los 500°F y las presiones llegan a valores extremos de 25,000 (lb/pg<sup>2</sup>). A medida que el aparato aplica calor y presión a la lechada, realiza una carta de registro continuo de las lecturas de consistencia. El límite de bombeabilidad se alcanza cuando el torque en la aleta dentro de la copa que contiene a la lechada alcanza las 100 (Uc).

Las recomendaciones sobre el tiempo de espesamiento específico dependen del tipo de trabajo, las condiciones del pozo y el volumen de cemento a ser bombeado.

Cuando se realizan trabajos de cementación de T.R. a profundidades entre 6,000 y 18,000 (pies) es común diseñar la lechada para tiempos de espesamiento de 3 a 3 1/2 (horas). Este tiempo permite un adecuado factor de seguridad, ya que son muy pocos los trabajos que requieren de más de 90 (min) para el desplazamiento de la lechada. Aún en trabajos de cementación de liners, donde se encuentran altas temperaturas 3 a 3 1/2 (horas) son suficientes.

Para la colocación de tapones de cemento, el tiempo de espesamiento no debe exceder de 2 (horas) ya que la mayoría de estas operaciones se realiza en menos de 1 (hora).

En trabajos de cementación forzada, los requerimientos en el tiempo de espesamiento pueden variar para las diferentes técnicas. Las obstrucciones durante un trabajo, pueden reducir considerablemente el tiempo de espesamiento. Aunque estas obstrucciones no se consideran en el laboratorio, pueden ser un factor que contribuya a propiciar que el cemento frague en la tubería antes de que la presión de trabajo sea alcanzada.

Para cualquier trabajo a profundidades mayores a los 12,000 (pies), la lechada de cemento producida con el agua de mezclado de la del sitio de la operación, y el cemento deberá probarse en el laboratorio

antes del mezclado en la locación del trabajo.

**Fuerza Requerida en el Cemento para soportar la Tubería.** - Los requerimientos de fuerza dependen de varios factores. Generalmente el cemento debe tener suficiente fuerza para sostener y asegurar la T.R. en el agujero, realizar un aislamiento en el pozo, prevenir la comunicación de fluidos a los lados de la T.R. y resistir los choques durante la perforación y el fracturamiento.

Un esfuerzo pequeño es necesario para soportar la tubería. Un esfuerzo de compresión cercano a las 100 (lb/pg<sup>2</sup>) se necesita solamente para soportar y asegurar la T.R. en el agujero, esto sin embargo, no elimina la necesidad de un esfuerzo mayor posterior en la vida del pozo. Para la mayoría de las sartas superficiales e intermedias, es una práctica común el uso de cementos de alta resistencia alrededor de las juntas de las zapatas y un cemento de menor resistencia -y menor costo- para llenar las porciones superiores de esas sartas.

El cemento de gran resistencia (alto esfuerzo) alrededor de las juntas de las zapatas contribuye también a ahorros, debido a que acortan el tiempo de espera del cemento -WOC-, (tiempo transcurrido antes de que las juntas puedan perforarse).

La capacidad de una cubierta de cemento para resistir la comunicación durante el fracturamiento y las subsiguientes operaciones de producción depende, entre otros factores, de la resistencia del cemento mismo.

Debido a la incertidumbre en la correcta simulación de las condiciones de fondo del pozo en el laboratorio, el esfuerzo mínimo más ampliamente usado para cualquier operación es de 500 (lb/pg<sup>2</sup>) a 24 (hrs), y a la temperatura de fondo.

La temperatura tiene un efecto pronunciado sobre el desarrollo del esfuerzo, por los 230° F un

incremento de la temperatura redundo en un incremento de la resistencia, pero a temperaturas mucho más altas la resistencia disminuye. Un estudio API reveló que la mayoría de las compañías rutinariamente agregan 35% de harina de sílice a los cementos que se van a usar a temperaturas estáticas de 230°F o mayores a fin de estabilizarlo contra pérdidas de resistencia durante su colocación y fraguado.

El cemento requiere de una rápida pero relativamente pequeña resistencia a los esfuerzos para soportar a la T.R. Los datos muestran que una cubierta anular de cemento de 10 (pies), con una resistencia a la tensión de apenas 8 (lb/pg<sup>2</sup>) puede sostener más de 200 (pies) de tubería de las de menor peso por pie, aún bajo no muy buenas condiciones de unión.

En la colocación de T.R. superficiales, cuando se requiere de gran peso en la barrena para perforar el equipo flotante, una carga adicional debe ser soportada por la T.R. y la cubierta de cemento. La tabla de la Figura V.8 muestra la mínima cantidad de T.R. y el tamaño de tubería lastrabarrena que teóricamente soporta una columna de 10 (pies) con una resistencia a la tensión de 8 (lb/pg<sup>2</sup>). Dado que en el laboratorio al cemento se prueba a la compresión en vez de a la tensión, los valores deben ser transformados. Como una regla general, el valor de la resistencia a la compresión es de 8 a 10 veces mayor que el correspondiente a la tensión; esto es que, una cubierta de cemento con un valor de resistencia a la tensión de 8 (lb/pg<sup>2</sup>) tendrá un valor a la compresión entre 80 y 100 (lb/pg<sup>2</sup>).

Es bien conocido que, el tiempo transcurrido entre que el cemento fragua y cuando alcanza las 100 (lb/pg<sup>2</sup>) es relativamente corto. Las variables de campo - procedimientos de terminación, materiales y condiciones de fraguado - no pueden ser controladas o conocidas suficientemente bien para establecer un tiempo de fraguado a toda prueba, por tanto debe aplicarse un factor de seguridad.

Es generalmente aceptado en la industria y por organismos reguladores, que una resistencia a la compresión como el indicado es adecuado para la mayoría de las operaciones, y que, usando buenos procedimientos de cementación un operador deberá ser capaz de perforar con seguridad si se ciñe

a los requerimientos mínimos de resistencia.

Tiempo de Fraguado (hr)	Fza. necesaria para romper la unión cementada (lbf)		Longitud de T.R. teóricamente soportada por 1 (pie) de cem.		
	1 (pie) de Cemento	4 (pies) de Cemento	5 1/2 de 17 (lb/pie)	7 pg de 24 (lb/pie)	13 3/8 de 72 (lb/pie)
1.83	100	400	5.8	4.1	1.3
2.33	137	550	8.0	5.7	1.9
3.08	325	1,300	19.1	13.5	4.5
3.66	1,000	4,000	58.8	41.6	13.8
4.42	4,450	18,200	267.5	189.6	63.1
4.40	5,000 +	20,000 +	—	—	—
6.50	5,000 +	20,000 +	—	—	—

**FIGURA V.8** Cantidad mínima de T.R. que soporte una columna de cemento de 1 (pie).

En la decisión de cuanto esperar a fin de que el cemento frague es importante:

1. Saber cuán fuerte debe ser el cemento antes de proseguir con la perforación.
2. Entender las características del desarrollo de la resistencia a los esfuerzos de los cementos en uso común.

Puede observarse de los valores de esfuerzo a la compresión de la tabla de la Figura V.9 que la temperatura de fraguado es muy significativa en el desarrollo del esfuerzo. Para aplicar adecuadamente la información del laboratorio y poder establecer un tiempo de espera del cemento, debe tenerse un buen conocimiento sobre las temperaturas de fraguado del fondo del pozo.

**Esfuerzo de Compresión a una temperatura de fraguado de:**

Tiempo de Fraguado (hr)	Cloruro de calcio (%)	95°F 800 (lb/pg <sup>2</sup> )	110°F 1,600 (lb/pg <sup>2</sup> )	140°F 3,000 (lb/pg <sup>2</sup> )	170°F 3,000 (lb/pg <sup>2</sup> )
6	0	100	350	1,270	1,950
8		500	1,200	2,500	4,000
12		1,090	1,980	3,125	4,700
24		3,000	4,050	5,500	6,700
6	1	900	1,460	2,320	2,500
8		1,600	1,950	2,900	4,100
12		2,200	2,970	3,440	4,450
24		4,100	5,100	6,500	7,000
6	2	1,100	1,700	2,650	2,290
8		1,850	2,600	3,600	4,370
12		2,420	3,380	3,900	5,530
24		4,700	5,600	6,850	7,400

**FIGURA V.9 Efecto de la temperatura y el tiempo de fraguado en el desarrollo del esfuerzo a la compresión.**

La temperatura de fondo estática en la mayoría de las áreas geotérmicas ha sido razonablemente bien definida mediante el uso de información sobre isotermas y los gradientes de temperatura aceptados. Los resultados se comparan con los tomados con sondas que se introducen en agujeros sin entubar. En la mayoría de las áreas, la temperatura de formación a la profundidad de la T.R. superficial es igual a la temperatura de superficie más 2 (°F/100pies).

La temperatura de fraguado del cemento, sin embargo, no será igual a la temperatura de la formación, de hecho no tiene siquiera un valor constante. Está gobernada por un grupo de complejas variables, que incluyen a las temperaturas del fluido de perforación, la lechada de cemento y el fluido del bache prelavador, así como del calor de hidratación del cemento.

Las siguientes observaciones relativas a la fuerza requerida en el cemento para soportar a la tubería están basadas en la investigación y experiencia de campo:

1. **Altas resistencias a los esfuerzos no siempre son requeridas para soportar a la tubería durante la perforación posterior, y mediante el incremento en la densidad de la lechada se disminuye el tiempo necesario para desarrollar una resistencia a los esfuerzos adecuada.**
2. **La densificación incrementa tanto la resistencia a los esfuerzos, como al calor de hidratación.**
3. **Las lechadas de cemento con altas relaciones agua/cemento resultan en fraguados débiles, por ende deben ser evitadas cerca de la porción baja de la tubería.**
4. **Mediante la selección de los cementos apropiados y aplicando buenos métodos de cementación, puede reducirse el tiempo de espera del fraguado hasta a 3 o 4 horas.**

**Calidad del Agua Disponible para el Mezclado.** - La función principal del agua en una lechada de cemento es mojar las partículas de sólidos y acarrearlos hacia el fondo del pozo.

Mucho de un trabajo de cementación se vuelve errado debido a la interferencia de algún componente del agua de mezclado. De forma ideal, la fuente de suministro de agua debe ser razonablemente limpia, libre de productos químicos, lodo, materia orgánica, alcalis u otros contaminantes solubles en ella. Esto no es posible en todos los casos, empero, cualquier suministro de agua debe siempre ser considerado.

El agua más comúnmente encontrada en el campo se obtiene de alguna laguna, río o receptáculo natural y en algunos casos de pozos naturales o perforados. Esta agua es generalmente buena para un mezclado satisfactorio con cemento en cualquier pozo que no exceda los 5,000 (pies), particularmente cuando es clara y tiene un contenido de sólidos de 500 (ppm) o menor.

Entre los contaminantes en el agua de mezclado más comunes se encuentran los fertilizantes disueltos por el agua de lluvia, los materiales acarreados cuando el suministro se alimenta de una

corriente, productos industriales de desecho y químicos solubles inherentes al terreno.

Los materiales inorgánicos (cloruros, sulfatos, hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos) acelerarán el fraguado del cemento. Cuánto puedan hacerlo, depende de las concentraciones de tales materiales.

Estos materiales al presentarse en pequeñas cantidades en el agua de mezclado, tendrán un efecto que puede despreciarse si el trabajo de cementación se realiza a una profundidad somera, sin embargo en una operación de cementación de un liner a una gran profundidad y presión por ejemplo, el contenido de materiales puede provocar un fraguado prematuro, particularmente si el agua contiene cantidades importantes de carbonatos o bicarbonatos.

El agua de mar, debido a sus concentraciones de sólidos de 30,000 a 43,000 (ppm) tendrá un efecto de aceleración en el fraguado del cemento. Este efecto puede, sin embargo, neutralizarse mediante el uso de un aditivo retardador de tal forma que el agua pueda usarse a altas temperaturas.

Los cloruros, a menudo, causan formación de espuma durante el mezclado, haciendo más difícil el pesado preciso del lodo.

El agua que contiene materia orgánica, producto de la descomposición de plantas, o bien fertilizantes, retardará el fraguado. Un material retardador común es el ácido húmico. Las propiedades retardantes de los contaminantes orgánicos perjudican especialmente en la cementación de tuberías superficiales.

El agua potable es siempre recomendable cuando esté disponible.

A menos que un agua que sea salobre o que se conozca por una alta salinidad, casi cualquier agua con apariencia clara puede utilizarse para agua de mezclado. Aún el agua salina puede usarse, siempre que la lechada producida con ella se pruebe primero en el laboratorio. Aunque debe procurarse que el agua a utilizar en el mezclado sea siempre la más pura disponible.

**Sensibilidad al Fluido de Perforación y sus Aditivos.-** Un problema importante en la cementación de un pozo de aceite es la efectiva remoción del F.P. durante el desplazamiento. La contaminación y la dilución por lodo pueden dañar a los sistemas de cemento.

En casi todo trabajo de cementación, ocurre una contaminación de este tipo, pero probablemente la más fuerte y frecuente de ellas, se presenta cuando un tapón de cemento es colocado en un sistema de lodo que ha sido altamente tratado con aditivos químicos. El volumen de cemento en relación con el volumen de lodo es pequeño, y el grado de contaminación provocado por el lodo es imposible conocerlo. La suavidad de un tapón de cemento al ser perforado, es un indicio de contaminación.

La mejor forma de combatir los efectos perjudiciales de los aditivos del F.P., es el uso de tapones limpiadores (wiper plugs) y fluidos espaciadores o lavadores.

Los tapones limpiadores ayudan a eliminar la contaminación dentro de la T.R. y el fluido lavador ayuda a limpiar el espacio anular entre la T.R. y la formación. Los espaciadores consisten de agua, soluciones de ácido, fosfatos, mezclas de agua con cemento y lechadas de bentonita no tratada y arcilla en agua. Para sistemas de lodo de emulsión inversa, son efectivos los baches lavadores de diesel densificado o sin densificar.

**Densidad de la Lechada.-** La densidad de una lechada de cemento debe siempre, exceptuando los trabajos de cementación forzada, ser suficientemente grande para mantener el control del pozo.

Existen varios materiales para el control de la densidad. Para bajas densidades -10.8 a 15.6 (lb/gal)- se usan frecuentemente materiales que requieren de grandes volúmenes de agua. Para densidades altas -15.6 a 22 (lb/gal)- se usan materiales de gran peso, tal como la hematita, aunados a dispersantes.

**Pérdidas de Circulación.** En la selección y uso de materiales para el control de pérdidas de circulación, deben tenerse en cuenta dos factores primordiales: el material debe ser de un tamaño, tal que, pueda ser manejado por el equipo de bombeo y las aberturas en la formación deben ser lo suficientemente pequeñas para permitir al material sustentar y sellar. Cuando las aberturas en la formación son tan grandes que hacen poco efectivos a los agentes sellantes puede hacerse necesario el diseño de cementos semisólidos o cementos de fraguado instantáneo.

En el capítulo IV se hace una descripción más detallada de los materiales que sirven para combatir este problema.

**Calor de Hidratación.** Cuando el cemento se mezcla con agua ocurre una reacción exotérmica en la que se libera una considerable cantidad de calor. A mayores masas de cemento, mayor será la evolución del calor. En el laboratorio es medido usualmente con un calorímetro y un frasco aislado y el vacío que contiene una termocopa que está conectado a un registrador. El incremento en la temperatura se registra a intervalos regulares hasta que la temperatura máxima es observada. El calor de hidratación (algunas veces llamado calor de reacción o calor de solución) se ve afectado por la fineza y composición del cemento, por los aditivos y por el ambiente en el fondo del pozo. A mayor temperatura de la formación, más rápida será la reacción y también más rápida la evolución del calor. La tabla de la figura V.10 compara los valores del calor de hidratación para varias composiciones de lechadas de cemento.

En una tubería superficial típica, el calor de hidratación provoca un aumento máximo en la temperatura de 35 a 45°F.

TIPO DE LECHADA	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR Btu/(hr-pie·°F)	CALOR DE HIDRATACION (Btu/lbm de lechada)
API Clase G	0.50	118.0
API Clase H	0.50	120.0
1:1 Clase H: Ceniza y 2% gel	0.49	91.4
1:1 Clase H: Ceniza y 6% gel	0.50	109.1
Cemento Refractario	0.40	57.0

FIGURA V.10 Calor de Hidratación de algunas Lechadas de Cemento.

**Permeabilidad del Cemento Fraguado.** Aunque en el diseño de una lechada se da poco énfasis a la permeabilidad del cemento fraguado, existen métodos para su medición, tanto para gas como para agua. El API ha especificado un sistema estándar que involucra el uso de un permeámetro.

Los cementos fraguados tienen muy bajas permeabilidades -mucho más bajas, de hecho, que aquéllas encontradas en las formaciones-.

Se ha observado que, a temperaturas menores a los 200°F la permeabilidad decrece con el tiempo. Después de 7 días de fraguado la permeabilidad es demasiado baja para medirse.

La permeabilidad al gas del cemento es normalmente mayor que al agua, pero las mediciones son menos confiables, toda vez que es más difícil la obtención de muestras representativas del flujo de

gas. Los cementos que han fraguado por 3 a 7 días muestran permeabilidades al gas menores a 0.1 (md). La dolomita y caliza tienen de 2 a 3 (md) en promedio. Las areniscas tienen un rango de permeabilidades entre 0.1 y 2,000 (md).

Para prevenir el incremento en la permeabilidad se utiliza la harina de sílice. En el capítulo IV se describe más ampliamente este material.

**Control del Filtrado.** Otra propiedad importante a controlar es el gasto de pérdida de filtrado. Existen varios aditivos usados para el control de esta pérdida de fluido y para mantener una apropiada relación agua/cemento. Estos aditivos previenen también de una deshidratación durante la colocación del cemento.

El control del filtrado, más aún en las operaciones donde se cementan liners a grandes profundidades y en cementaciones forzadas. La pérdida de filtrado a través de una formación permeable provoca un incremento en la viscosidad de la lechada, y una rápida depositación del enjarre, provocando con ello una restricción del flujo.

Los parámetros que tienen influencia sobre el filtrado de lodo son: tiempo, presión, temperatura y permeabilidad. Para la medición de las características de filtrado de una lechada de cemento, el API ha especificado una prueba tipo a 30 minutos a 100 o 1,000 (lb/pg<sup>2</sup>).

El procedimiento API utiliza una filtro prensa, que consiste de una estructura, un cilindro, una malla 325 soportada por una malla 60 como medio de filtrado. Una cubierta eléctrica hace posible simular condiciones de temperatura de la formación. Para simular condiciones de operación en el fondo del pozo, la lechada puede ser bombeada por un cierto tiempo en un probador de tiempo de espesamiento, el cual puede o no estar presurizado; y después ser removida y vaciada en la filtro prensa.

El filtrado API de toda lechada de cemento sin aditivos es alto, en algunos casos alcanza valores de 1,000 (ml/30 min). Cuando toda el agua es recibida como filtrado antes del término de la prueba, se usa la siguiente ecuación para el estimar el filtrado a 30 minutos.

$$F_{30\text{min}} = 5.477 F_t / t^{1/2}$$

Donde:

$F_{30\text{min}}$  = Cantidad de filtrado en 30 min (ml)

$F_t$  = Cantidad de filtrado en t minutos (ml)

t = Tiempo de la Prueba (min).

El control del filtrado de una lechada de cemento se logra normalmente mediante la adición de polímeros de cadena larga, en concentraciones que varían entre 0.6 y 1.0% por peso del cemento.

En cementaciones forzadas se usan lechadas con pérdidas de filtrado de 50 a 150 (ml/30 min) y en trabajos con liners profundos la pérdida de filtrado API puede ser de hasta 300 (ml/30 min).

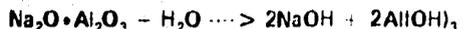
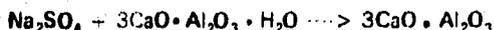
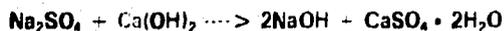
**Resistencia a las Salmueras.** Las salmueras del agua de formación que contienen sulfato de sodio, sulfato de magnesio y cloruro de magnesio se encuentran entre los agentes corrosivos más destructivos.

Los sulfatos, considerados como los agentes químicos que más corroen al cemento, reaccionan con el carbonato de calcio y el aluminato tricálcico del cemento, para formar grandes cristales de sulfoaluminato de calcio. Estos cristales necesitan de mayor espacio en los poros que los que el cemento puede proporcionar, causando una expansión excesiva y un eventual deterioro.

El ión sodio, se cree, es más perjudicial que el ión magnesio, por ende se utiliza más en las pruebas

de laboratorio.

Aparentemente ocurren tres tipos de reacciones químicas cuando el sulfato de sodio reacciona con el cemento:



En esas reacciones se forma el sulfoaluminato de calcio y el sulfoaluminato de sodio, y el segundo se transforma mediante hidrólisis en hidróxidos de sodio y de aluminio. El sulfoaluminato de calcio formado a temperatura de superficie contiene 31 moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ . De tal modo que, el producto es una larga molécula, y la mayor parte de la expansión y la desintegración es causada por la depositación de este material en el cemento fraquado.

El grado de ataque al cemento endurecido por la acción de una solución de sulfato de sodio o de magnesio es función de la concentración de esas sales en el agua de formación. Sin embargo, hay un valor límite de concentración, para la cual, un incremento en el contenido de sales, no redundará en un incremento en el grado de ataque por corrosión al cemento.

La temperatura también afecta el grado de resistencia del cemento a la acción corrosiva de esas sales. Se ha comprobado que, la agresión al cemento producida por la acción de los sulfatos, es más pronunciada en el rango de temperaturas de 80°F a 120°F, mientras que a 180°F se torna inocua.

Esta conclusión se sustenta en el hecho de que, los problemas en el campo se presentan más frecuentemente en pozos someros donde las temperaturas son menores, que en los pozos profundos donde las temperaturas pueden exceder los 200 °F. Un cemento que sea resistente a la acción corrosiva de los sulfatos a bajas temperaturas, muy probablemente tendrá un buen desempeño a altas temperaturas. La disminución del contenido de aluminato tricálcico, incrementará la resistencia del cemento a los sulfatos; por lo tanto, el API clasifica a los tipos de cementos como de moderada o alta resistencia a los sulfatos.

El cemento de moderada resistencia contiene un 3% a 6% de  $C_3A$  y el de alta resistencia de 3% a 6% de  $C_3A$ .

Se ha observado que es la corrosión electrolítica más que la química, la responsable de el debilitamiento y posterior falla de la sarta de T.R.

La mayoría de las investigaciones muestra que una cubierta uniforme y eficiente de cemento fraguado ofrece una excelente protección contra la corrosión electrolítica de la T.R. El hecho de que una corriente de 1 Amp lleva consigo una pérdida de 20 lb de metal por año, hace evidente la importancia de una buena cubierta de cemento entre la formación y la T.R.

### **DISEÑO DEL FLUIDO ESPACIADOR**

En la selección de un fluido espaciador del cemento y el lodo adecuado, deben considerarse los siguientes seis puntos:

1. Reología del espaciador y gastos de bombeo
2. Compatibilidad del espaciador con el cemento y el lodo
3. Características de mojabilidad del espaciador
4. Características de los sólidos en suspensión y densidad del espaciador

##### 5. Tiempo de contacto

6. Colocación de los tapones limpiadores en relación con el lodo, el espaciador y el cemento.

#### REOLOGIA DEL ESPACIADOR Y GASTOS DE BOMBEO

Como se mencionó antes, es conveniente la colocación de un espaciador entre el lodo y el cemento para prevenir que se "cuajen" aquellos fluidos incompatibles.

Con los fluidos base agua con poco o ningún tratamiento químico, un pequeño volumen de agua dulce ha redituado resultados satisfactorios. Algunos investigadores han encontrado que cuando los lodos son tratados, la incompatibilidad generada hace muy difícil el proceso de remoción del lodo. Como resultado de esto se ha propiciado un mayor desarrollo y uso de los espaciadores compatibles tanto con el lodo como con el cemento.

Uno de los pasos más importantes en el desarrollo de los fluidos espaciadores durante los últimos 50 años consistió en la invención de la "lechada raspadora". Ya en la década de los 40<sup>os</sup> se sabía que con altos gastos de bombeo y usando agua como fluido espaciador, se obtenía una mucho mejor remoción del lodo. No fue sino hasta 20 años más tarde que se reconoció que un patrón de flujo turbulento, en contacto con el punto de interés por un período de al menos 10 (min), podría también beneficiar al proceso de remoción del lodo. Se concluyó también que, el fluido en cuestión debía poseer características de baja pérdida de filtrado para poder mantener sus propiedades reológicas durante todo el desplazamiento.

Más tarde durante la década de los 80<sup>os</sup> se llegó a la conclusión de que los fluidos incompatibles con la "lechada raspadora" y la mayoría de los lodos podían tratarse mediante el uso de fluidos espaciadores, que pudieran desplazarse en patrón de flujo turbulento a gastos de bombeo razonables y aún así, mantener la suspensión de sólidos requerida para obtener una densidad mayor que la del

lodo. Este tipo de fluidos generalmente son polímeros en soluciones acuosas, los cuales son capaces de mantener a los sólidos en suspensión.

El criterio más importante en la selección de un fluido espaciador lo constituye el que el fluido seleccionado pueda desplazarse en flujo turbulento a gastos razonables de bombeo, de acuerdo con la geometría que presenta el pozo. Sabemos que un fluido Newtoniano, como lo es el agua, requiere tanto de el menor esfuerzo de corte como de un gasto de bombeo mínimo para desplazarse en flujo turbulento bajo un conjunto de condiciones establecidas, y esto puede calcularse como sigue:

$$\text{Viscosidad} = 300 \text{ d/Nr}$$

Donde:

d = Lectura del disco del viscosímetro Fann

Nr = Revoluciones por minuto del rotor del viscosímetro Fann

Y el gasto crítico, Qc:

$$Q_c, (\text{bl/min}) = \{(cp) (Dh + Dp)\} / \{5.31 (\text{lb/gal})\}$$

Donde:

cp = viscosidad del fluido espaciador, (cp)

Dh = diámetro del agujero, (pg)

Dp = diámetro exterior de la tubería, (pg)

lb/gal = densidad del fluido espaciado, (lb/gal)

Cuando la densidad del lodo es menor o igual a 9 (lb/gal), generalmente se hace uso del agua como fluido espaciador. Con frecuencia se adicionan 5 (lb sosa cáustica/barril de agua), que puede ser de mar o fresca, para elevar el pH. Cuando esta solución se ha bombeado en un volumen equivalente a 10 (min) de contacto delante de la lechada de cemento, se han obtenido resultados satisfactorios.

Este sencillo fluido espaciador puede mezclarse fácilmente en la presa si ésta tiene la capacidad suficiente.

Como la mayor parte de los fluidos espaciadores de alta densidad son no Newtonianos, se usa frecuentemente el modelo de la ley de potencias para el cálculo de los gastos críticos y las pérdidas de presión por fricción. De tal forma que lo primero que se requiere calcular es el índice de comportamiento de flujo,  $n$ , y posteriormente el índice de consistencia,  $K$ .

Los valores de  $n$  y  $K$  son funciones del logaritmo de la velocidad de corte contra el logaritmo del esfuerzo de corte, el valor de la pendiente que se obtiene directamente de la gráfica, proporciona el valor de  $n$ , y el punto de intersección con el eje de las  $Y''$  nos da el correspondiente valor de  $K$ . Si la gráfica no es construida, un procedimiento fácil es calcularlos por regresión lineal a partir de la información recabada de las lecturas del viscosímetro Fann.

El procedimiento anterior es el más simple y es suficientemente preciso para la mayoría de las aplicaciones en el campo.

Bannister y Banque observaron que ocurre un fenómeno en los fluidos que tienen un alto contenido de sólidos, al cual llamaron "resbalamiento de pared". La sensibilidad del modelo es decir como se ve afectado al "resbalamiento de pared" es una función de la cercanía del fluido en relación con la tubería o la pared del agujero.

El coeficiente de "resbalamiento" puede determinarse mediante el uso de un viscosímetro Fann

modelo 35 y realizando pruebas parecidas con diferentes combinaciones de los resortes del rotor.

Una vez determinados los valores de  $n$  y  $K$  del fluido espaciador, debe calcularse el gasto mínimo de bombeo con el que se obtiene patrón de flujo turbulento. Deberán hacerse ciertas suposiciones, y establecer las presiones de fractura consideradas. Es recomendable que estos cálculos se realicen con datos de laboratorio y datos de campo, a partir de la mezcla real del fluido espaciador.

El gasto crítico para la obtención de flujo turbulento puede calcularse por medio de la siguiente expresión:

$$Q_c = [N_{RE} K (96/D_h - D_p)^n / 1.86 d]^{1/2-n} (D_h^2 - D_p^2 / 17.157)$$

$d$  = Densidad, (lb/gal)

$K$  = Índice de consistencia, (lb-seg/pic<sup>2</sup>)

$n$  = Índice de comportamiento de flujo, adimensional

$D_h$  = Diámetro del agujero, (pg)

$D_p$  = Diámetro exterior de la tubería, (pg)

$Q_c$  = Gasto para obtener flujo turbulento en el espacio anular, (bl/min)

$N_{RE}$  = Número de Reynolds, adimensional

Como se estableció antes, la ley de potencias estándar y los métodos para la determinación de  $K$  y  $n$  deben ser suficientes para la mayoría de las aplicaciones. El fluido espaciador debe, entonces elegirse con base en si puede ser bombeado en patrón de flujo turbulento. Sólo los espaciadores que satisfagan este criterio podrán ser considerados para una posterior evaluación.

## COMPATIBILIDAD DEL ESPACIADOR CON EL CEMENTO Y EL LODO

El segundo punto de importancia -después del ritmo de bombeo y reología del espaciador- es saber si el fluido elegido es compatible con el lodo y el cemento.

Factores tales como el tratamiento químico del lodo, el tipo de éste (base agua o aceite), los cationes presentes en la fase agua, la carga iónica en el emulsificante y los aditivos químicos en el espaciador y el cemento deberán ser considerados cuando se seleccione el tipo de espaciador a utilizar.

En algunos lodos que en su composición incluyen el cloruro de calcio se ha encontrado que al mezclarse con el cemento presentan un aceleramiento en el fraguado. En tales casos, se requiere de un volumen mayor de espaciador base aceite para prevenir el mezclado lodo/cemento.

## DENSIDAD DEL ESPACIADOR Y CARACTERISTICAS DE LOS SOLIDOS SUSPENDIDOS

Al diseñarse un espaciador debe considerarse su densidad. El valor de ésta se encuentra normalmente entre las densidades del lodo y del cemento. Es costumbre que el peso del espaciador sea 0.5 lbm/gal (60 Kg/m<sup>3</sup>) mayor que el del lodo.

Aunque los espaciadores que pueden usarse a velocidades grandes pueden no ser dañinos, si son mucho más caros y probablemente provoquen mayores densidades efectivas de circulación (Effective Circulating Density -ECD-) durante la colocación del cemento.

El otro problema con espaciadores de altas densidades, especialmente aquellos con viscosidades suficientemente bajas para entrar en turbulencia, es la tendencia del asentamiento de sólidos. A menos que los polímeros usados en la composición del espaciador sean aquellos cuyos enlaces se rompen con la temperatura, y por tanto adelgacen el espaciador durante la colocación, el asentamiento de sólidos en la superficie puede representar un problema. Para mantener los sólidos

en suspensión se necesita de un equipo de mezclado bien diseñado, preferiblemente con un fondo cónico y líneas en la succión del bombeo que mantengan altas velocidades.

Debe hacerse una verificación final del agente densificante. La barita es el material más usado. Frecuentemente en la planeación del mezclado las compañías de servicio consideran el valor del mineral puro. Debido a que el mineral en forma pura jamás se ve en la localización del pozo es conveniente verificar la gravedad específica de la barita, para, en caso necesario, agregar más material o más agua. Como resultado de esto la reología puede ser diferente en el campo que aquella medida en el laboratorio y deberá nuevamente recalcularse la ECD.

## CONTROL DE LA OPERACION

### PRELAVADO

Los fluidos prelavadores, utilizados como espaciadores minimizan el mezclado y la gelificación interfacial en el E.A. Tienen varias características, dependiendo del sistema de lodo, así como varias funciones. Algunos contienen aditivos para adelgazar al lodo y para penetrar y deshacer el enjarre, algunos otros tienen materiales abrasivos para "lijer" el agujero, finalmente los hay que tienen gran viscosidad aparente para remover el F.P. por medio de flotación.

La tabla de la FIGURA V.11 muestra algunos prelavadores y los volúmenes recomendados.

Para lodos base agua, se utiliza agua fresca como un excelente fluido lavador, ya que es barata, fácil de manejar en flujo turbulento y tiene poco efecto dañino sobre el proceso de fraguado.

Algunos adelgazadores (quebracho y lignosulfonatos) añadidos al agua retardarán el fraguado, por tanto debe evitarse su uso.

El cemento Portland y el cemento puzolánico son excelentes lavadores, si se utilizan en pequeñas concentraciones con agua dulce, ya que pueden entrar fácilmente en turbulencia y sus partículas sólidas erosionan al lodo gelificado y al enjarre.

Una recomendación en el uso del fluido espaciador, es que éste llene de 750 a 1,000 (pies), o bien, se usen de 50 a 100 (barriles), excepto cuando la cabeza hidrostática sea insuficiente.

<b>PRELAVADOR</b>	<b>FUNCION</b>	<b>VOLUMEN RECOMENDADO</b>	<b>PATRON DE FLUJO RECOMENDADO</b>
<b>Dispersantes Químicos (Acido-Fosfatos, Silicatos o Emulsiones, Aceite Diesel o Lodos base Aceite).</b>	<b>Adelgazar el Lodo</b>	<b>Necesario para llenar 750 - 1,000 (pies) del E.A.</b>	<b>Turbulento</b>
<b>Lechadas de Cemento Adelgazadas con Agua en Exceso</b>	<b>Limpieza</b>	<b>30 a 50 (bl) de Lechada; 50 a 150 (Secos) de Cemento</b>	<b>Turbulento</b>
<b>HEC añadido al Agua o Lechada Adelgazada</b>	<b>Incrementar Viscosidad</b>	<b>Necesario para llenar 750 - 1,000 (pies) del E.A.</b>	<b>Tapón o Laminar</b>

**FIGURA V.11 Prelavadores.**

## MEZCLADO DEL CEMENTO

El sistema mezclador distribuye adecuadamente la formulación seca del cemento con el fluido acarreador líquido, dando un producto de propiedades predecibles.

Un dispositivo comúnmente usado es el mezclador tipo Jet. Ver Figura V.12. Consiste en una tolva en forma de embudo, un tazón mezclador, una línea de descarga, una tina de mezclado y líneas de alimentación de agua.

El mezclador fuerza una corriente de agua, formando un chorro hacia dentro del tazón, que se mezclará con el cemento proveniente de la tolva para formar una lechada, la cual es forzada a una línea de descarga, para luego entrar a la tina de mezclado, de donde es tomada por la bomba para su desplazamiento.

Con este tipo de mezcladores pueden obtenerse lechadas normales a gastos de flujo de 50 (pie<sup>3</sup>/min).

La velocidad de mezclado se controla regulando el agua forzada, y con la cantidad de cemento con que se alimenta al embudo durante el mezclado.

Para disminuir el peso de la lechada (incrementando la relación agua/cemento), puede descargarse mayor cantidad de agua a la línea de descarga del tazón a través de una tubería adjunta. Para algunas composiciones de cemento, el tamaño del orificio de salida del dispositivo puede ser cambiado para controlar el volumen y gasto de agua a través de la boquilla.

El agua es suministrada al mezclador por una bomba conectada a un tanque de almacenamiento cercano al aparejo.

Las presiones de mezclado pueden variar de 150 (lb/pg<sup>2</sup>) (sistema de baja presión), a 500 (lb/pg<sup>2</sup>)

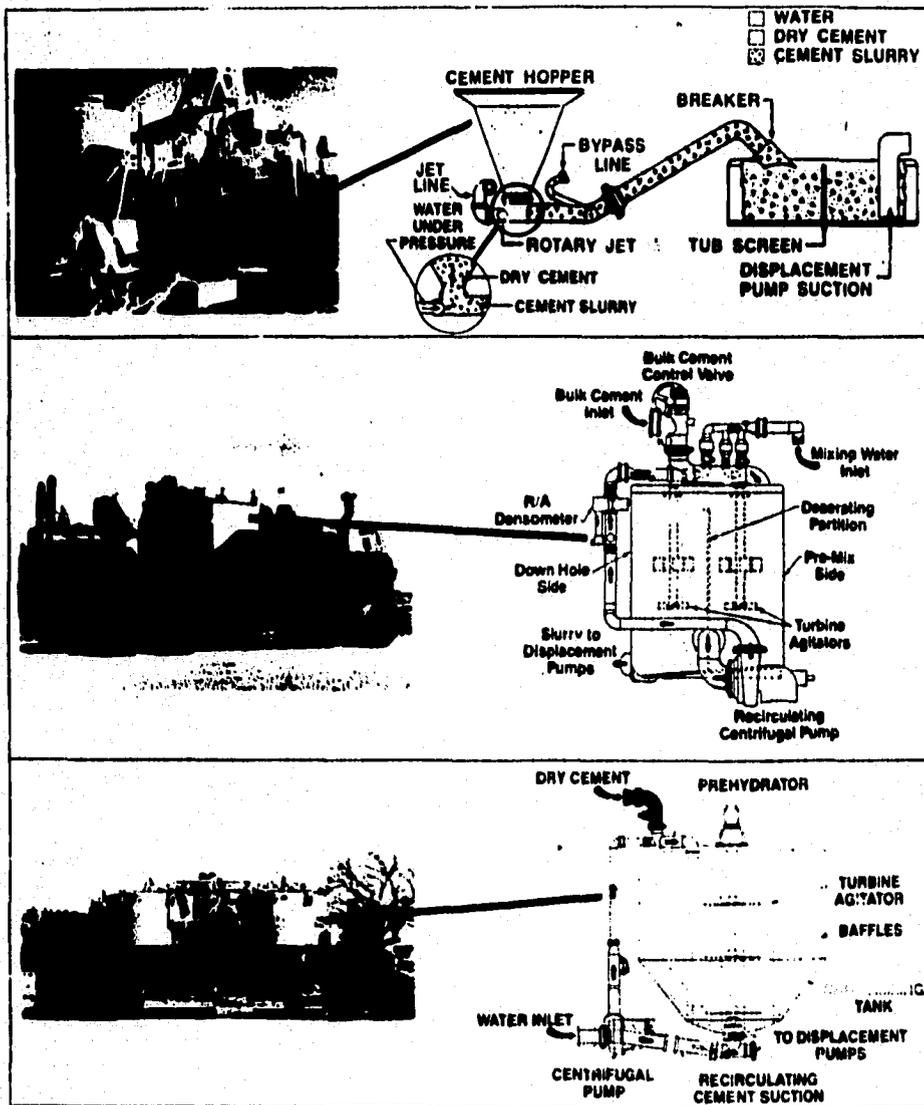


FIGURA V.12 Esquemas de los tipos de mezcladores de uso común.  
 Arriba: Tipo Jet, centro: Recirculante, abajo: batch mixer.

(sistema de alta presión) dependiendo del gasto de alimentación y la relación agua/cemento requeridos.

Otro tipo de mezclador es el recirculante, diseñado para mezclar más uniforme y homogéneamente a las lechadas. Es básicamente un mezclador tipo Jet presurizado y con una gran capacidad en la tina de mezclado, se muestra también en la Figura V.12.

Este aparato, mediante una bomba centrífuga, recircula la lechada al interior de la tina, para luego aplicarle mayor esfuerzo cortante mediante la misma bomba, unas paletas agitadoras proveen energía adicional para promover el mezclado. El resultado es una lechada más uniforme.

La tabla de la Figura V.13 compara los gastos de mezclado y las densidades de las lechadas provenientes de mezcladores tipo Jet y recirculantes.

	MEZCLADOR TIPO JET		MEZCLADOR RECIRCULANTE	
TIPO DE LECHADA	GASTO DE MEZCLADO (bbl/min)	DENSIDAD (lbm/gal)	GASTO DE MEZCLADO (bbl/min)	DENSIDAD (lbm/gal)
Densificada	2 a 5	16 a 20	0 a 8	16 a 22
Con Cemento Puro	2 a 8	15 a 17	0 a 10	14 a 18
Gran Relación Agua/Cemento	2 a 14	11 a 15	0 a 14	11 a 15

FIGURA V.13 Rangos de Gastos de Mezclado y Densidad para varias Lechadas.

Un tercer tipo de mezclador es el conocido como batch mixer. Figura V.12.

Este dispositivo se utiliza para mezclar una lechada de cemento en la superficie (en una operación en que la cantidad total de cada componente se mezcla en conjunto y no en un proceso continuo y dosificado como los anteriores) antes de ser bombeada hacia el pozo, y no es parte de la unidad de bombeo del cemento.

Se utiliza cuando se requiere de un volumen específico de cemento. El tanque de mezclado es llenado con suficiente agua para una cantidad específica de cemento. La turbina hace la mezcla a medida que el cemento es agregado, hasta que la lechada tiene la consistencia y el volumen calculados.

Con este dispositivo se usa un prehidratador a fin de prevenir problemas con el polvo.

Una desventaja de este mezclador es la limitación de capacidad y la necesidad del uso de mayor equipo adicional. Sin embargo, las unidades con múltiples tanques de mezclado, pueden usarse para cementaciones continuas.

### **FACTOR DE FLOTACION DE LA TUBERIA**

Cuando se corren tuberías de gran diámetro, la flotación puede convertirse en un problema. Cuando se inicia el bombeo, la tubería comienza a salirse del agujero si la presión excede cierto nivel. Para lidiar con este problema, la tubería debe desanclarse, y los elevadores atarse a la T.R. cuando se inicie el bombeo. A medida que la T.R. sale del pozo, el bombeo debe disminuirse (esto puede hacerse en forma segura, ya que la circulación se establece cuando la tubería se ha levantado unos cuantos pies).

La presión de bombeo debe incrementarse gradualmente para limpiar el pozo; la tubería debe luego

asentarse a su posición original.

Si la T.R. no puede ser regresada al pozo, puede ser levantada y sumergida mientras se bombea y trata de acomodar en su lugar. Si esto falla se puede: 1) Cementar en donde se encuentra. 2) Jalar la T.R. y correr T.P. con barrena al fondo para limpiar, y acondicionar el pozo. 3) Mezclar lodo, para detener el derrumbe y circularlo desde el agujero.

Otra práctica común es perforar un pequeño agujero en la zona del problema para formar una bolsa en donde el derrumbe pueda "caer".

### CONTROL DE LA DENSIDAD

El control de la lechada debe monitorearse y registrarse para asegurar que la relación agua/sólidos se mantenga. Para evitar el efecto de acreación, las muestras deben obtenerse de un múltiplo especial en el lado de la descarga de la bomba de desplazamiento y no de la tina de mezclado.

Las lechadas se mezclan con menor cantidad de agua hacia el final del trabajo, para lograr una mejor resistencia. Esto es particularmente importante con el último volumen mezclado, debido a que será el que quede colocado alrededor de la junta zapata.

Para el mezclado de lechadas densificadas o extremadamente pesadas, que necesitan ser bombeadas a gastos  $< 5$  (bl/min), un mezclador recirculante ofrece una lechada más uniforme que uno tipo Jet.

En operaciones de campo, es común que la densidad de la lechada sea monitoreada con una balanza de lodos convencional (para mayor precisión las muestras son tomadas de la presa de mezclado y sujetas a vibración a fin de remover las partículas de aire atrapadas del mezclador tipo jet).

Aparatos de pesado automático, sin embargo, son más comunes. Se colocan a la línea de descarga

entre la unidad mezcladora y la cabeza del pozo y proporcionan una carta en donde quedan registrados los cambios de densidad ocurridos durante el proceso.

La balanza de lodos, un dispositivo portátil y de fácil ensamble, mide la densidad de la lechada bajo suficiente presión, -cerca de 30 (lb/pg<sup>2</sup>)- para comprimir el aire entrampado. Esta compresión permite una mayor precisión en la medición que si se toma sin comprimir este aire, es decir, una muestra tomada de la presa de mezclado, y medida a la presión atmosférica.

### TAPONES DE CEMENTACION

Son ampliamente recomendados para separar lodo, cemento y fluido desplazante. El tapón de fondo es usado primero, para limpiar el lodo de la superficie interna de la T.R. antes del paso del cemento, y para separar a este del lodo. El tapón superior separa al lodo del cemento y provee de una barrera cuando el este se encuentra en su lugar. Si la colocación del tapón de fondo se olvida, la película de lodo limpiada por el tapón superior se acumula delante de él, propiciando una contaminación de la lechada de cemento.

Hay ocasiones, sin embargo, cuando el tapón de fondo no debe usarse. Por ejemplo cuando el cemento contiene grandes cantidades de material de pérdida de circulación, o cuando la T.R. está enmohecida o con escamas de algún material, lo cual podría causar un problema de puenteamiento y/o taponamiento en la T.R.

Cuando el tapón superior está por ser desplazado por lodo o agua, el volumen de este fluido debe medirse en las bombas y comparado con aquel medido en el tanque de lodo o agua. Donde exista un fluómetro, debe usarse para hacer un chequeo. Si el tapón superior no "suena", es decir, no se asienta en el float collar (causando un incremento de presión), deberá suspenderse el bombeo, a fin de que la lechada no se desplace fuera de la T.R.

Si se emplea movimiento de la T.R. este debe continuarse durante el ciclo de mezclado. Frecuentemente el movimiento continúa mientras los tapones son soltados y hasta que el tapón superior se asienta, por tanto no es raro detener el movimiento mientras alguno o ambos tapones están siendo insertados.

### **FLUIDO DESPLAZANTE POSTERIOR AL TAPON SUPERIOR**

El lodo es usado comúnmente como fluido desplazante en T.H. superficiales e intermedias, aunque el agua dulce puede ser más deseable en pozos más profundos. Además del agua dulce, otros fluidos desplazantes son: Agua salada, agua de mar y en algunas ocasiones, soluciones muy ligeras de ácido, dependiendo del programa de terminación.

La selección debe estar encaminada a minimizar el daño a la formación y el tiempo de terminación.

El aceite diesel puede ser utilizado para disminuir el tiempo de limpieza. Es recomendable el uso de agua que contenga aditivos retardadores inmediatamente arriba del tapón superior, (sobre todo en T.R. de diámetro pequeño) para inhibir el fraguado de cualquier cemento que pudiera haber transpuesto el tapón.

### **CAIDA LIBRE DEL CEMENTO**

En la mayoría de las cementaciones, existe un vacío en el pozo la mayor parte del tiempo de desplazamiento, debido a que los fluidos más pesados, las lechadas y los espaciadores, están siendo bombeados en la cima de un sistema de lodo más ligero. La columna de fluidos en la T.R. está en caída libre a ritmos diferentes de aquel gasto de flujo en la superficie. Figura V. 14.

Durante las primeras etapas, el ritmo de caída libre acelera y es mayor que el ritmo de bombeo en

la superficie. Esta aceleración inicial no afecta al proceso del desplazamiento del lodo, a menos que el trabajo haya sido diseñado para gastos bajos debido a un gradiente de fractura crítico.

Hacia el fin del período de caída libre (justo antes de observarse una presión superficial positiva), este valor decrece, aún tanto que provoca que la lechada ahora viaje a una velocidad menor que aquella requerida para alcanzar flujo turbulento. Esto último puede afectar el éxito de la operación, por tanto es necesario incluir este efecto en el diseño de la cementación para permitir un mayor control sobre el proceso del desplazamiento.

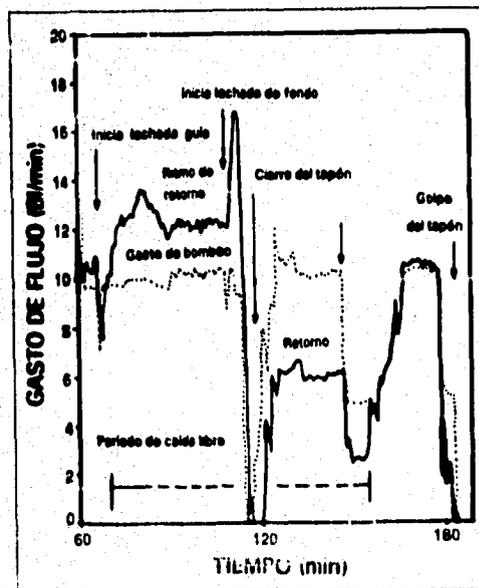


FIGURA V.14 Gastos de bombeo en superficie y de retorno por el E.A.

## MONITOREO DEL TRABAJO Y DEL RITMO DE FLUJO

Durante una típica operación de cementación, los espaciadores y la lechada de cemento son mezclados a la densidad planeada, y desplazados a un gasto suficiente para colocar el cemento antes de que éste endurezca.

Es bien sabido que durante estas operaciones el cemento más pesado trata de equilibrar las presiones en el espacio anular, a este fenómeno se le denomina "de vacío".

Estudios recientes han proporcionado modelos matemáticos para la predicción de este fenómeno de caída libre; su aplicación en el campo ha demostrado la validez de ellos. Algunas conclusiones que se desprenden de ello son:

1. Debido a la aceleración, los gastos de desplazamiento son superiores a los esperados en el diseño.
2. Esos incrementos en los gastos de desplazamiento conllevan a mayores ECD.
3. Se han previsto -y por lo tanto disminuido- los efectos del "golpe de ariete" provocados por el inicio o paro abrupto del movimiento.

Beirute y Wahlmeier describen los efectos de la caída libre y sugieren cambios en el ritmo de bombeo para compensar el efecto de tubo en U. Se hace por tanto necesario la toma de mediciones precisas de los flujos de entrada y salida del pozo para monitorear en forma adecuada la actividad en el fondo.

Para monitorear el flujo de salida es necesaria la colocación de un dispositivo de medición. Entre aquellos de uso común se encuentran: Turbinas, sónicos y de microdesplazamiento.

Las consecuencias de la caída libre del cemento incluyen la ruptura de la T.R. por un decremento en la presión de colapso, debido a un esfuerzo de tensión ejercido en el eje de la T.R. El decremento en la presión de colapso puede calcularse con la siguiente expresión:

$$P_{co} = \{ [1 - (0.75(s_e + p_i)/S_y)^2]^{1/2} - 0.5(s_e + p_i)/S_y \} p_{co}$$

Donde:

$p_{ca}$  = Mínima presión al colapso bajo un esfuerzo de tensión axial, (lb/pq<sup>2</sup>)

$p_{co}$  = Mínima presión al colapso sin esfuerzo de tensión axial, (lb/pq<sup>2</sup>)

$s_e$  = Esfuerzo de tensión axial, (lb/pq<sup>2</sup>)

$p_i$  = Presión interna, (lb/pq<sup>2</sup>)

$S_y$  = Mínimo esfuerzo de cedencia de la tubería, (lb/pq<sup>2</sup>).

Otro problema asociado con la caída libre del cemento es la generación de ECD más altas durante la colocación de la lechada, haciendo posible la fractura de la formación. Se recomienda que la ECD se calcule antes de cementar y que el ritmo de desplazamiento se ajuste a él. La ECD puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$ECD = \{ (0.039 L_{fc} r_{fc} v^2 f / (d_h - d_p)) + Ph \} / 0.52D$$

Donde:

$L_{fc}$  = Longitud de la columna de fluido, (pie)

$r_{fc}$  = Densidad de la columna de fluido (lb/gal)

$v$  = Velocidad, (pie/seg)

$f$  = Factor de fricción, adimensional

$d_h$  = Diámetro del pozo, (pq)

$d_p$  = Diámetro de la tubería, (pq)

$Ph$  = Presión hidrostática, (lb/pq<sup>2</sup>)

$D$  = Profundidad vertical efectiva, (pie)

Para prevenir esta caída libre, Beirute así como Wahimneier y Lam sugieren incrementar los ritmos de bombeo, y reducir los tiempos calculados para minimizar esos efectos. Otra alternativa es regular el flujo en el E.A a fin de ajustarlo al flujo en el interior de la sarta de revestimiento, lo cual requerirá del uso de medidores de flujo en ambos lados del sistema y un estrangulador ajustable en la parte final. La presión en el acumulador tendrá que ser reducida por el hydril (preventor esférico), para facilitar el movimiento de la tubería durante el desplazamiento.

Si estas sugerencias se implementan correctamente en el pozo, el proceso de desplazamiento del lodo puede ser controlado, y si la evaluación del trabajo de cementación no es favorable, podrán tomarse las decisiones adecuadas a fin de hacer los cambios pertinentes para aumentar el éxito de la operación.

## CAPITULO VI. RECOMENDACIONES DURANTE LA OPERACION

La obtención de una buena remoción del F.P. por la lechada, junto con las propiedades físicas del cemento, son los factores más importantes y críticos en una cementación primaria. Por tanto, es de suma importancia implementar las medidas necesarias para realizar esta remoción de manera efectiva.

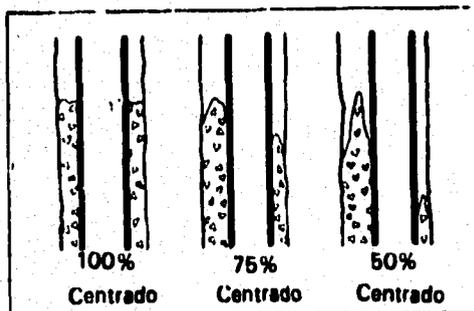
La causa predominante de fallas en las cementaciones, parece ser la formación de canales de lodo gelificado que permanece en el E.A., posterior a la colocación del cemento. La mayoría de las cementaciones de remedio (C. forzadas), y costos relativos, son resultado de este problema, que trae como consecuencias, comunicación zonal y fugas en el E.A. Si la formación de esos canales se eliminara, casi cualquier composición compatible con la formación proveería de un sello hidráulico efectiva.

En la evaluación de los factores que afectan el desplazamiento del lodo, es necesario considerar el patrón de flujo en un E.A. excéntrico - esto es, donde la tubería está más cercana a un lado de la pared del pozo que al otro -. La vel. de flujo no es uniforme, y el valor más alto se dará en el lado que tenga mayor amplitud. Si la T.R. está muy cercana a la pared del pozo, puede no ser posible bombear a un gasto suficiente para alcanzar un flujo uniforme alrededor de todo el E.A., y en casos extremos (aberturas menores a 0.47 pg, 12mm), ser imposible. Figura VI.1. Esta excentricidad afecta la eficiencia de desplazamiento, que puede definirse como el área cementada entre el área del E.A. Figura VI.2

Una mala remoción del fluido de perforación puede conducir a numerosos problemas una vez realizada la cementación, algunos de los cuales son los siguientes:

- Producción de fluidos indeseables.
- Migración de gas a la superficie.

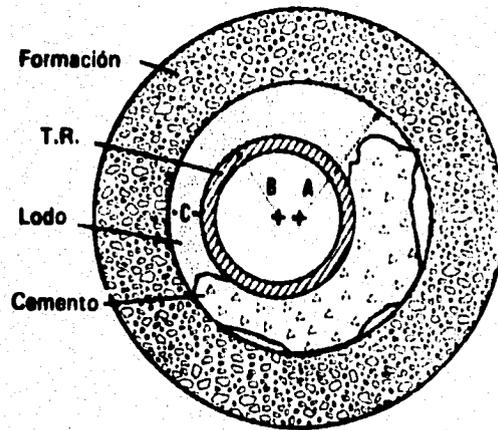
- Pérdida de producción
- Imposibilidad o dificultad para realizar trabajos de estimulación
- Comunicación zonal
- Descontrol del pozo.



**FIGURA VI.1 Efecto del Centrado sobre la uniformidad en la colocación de la Lechada de Cemento.**

Las primeras investigaciones en la mecánica de los desplazamientos fueron hechas por Jonas y Berdina en 1940. De este trabajo y subsecuentes investigaciones se han reconocido seis factores básicos que influncian el desplazamiento en el fondo de un pozo vertical:

- Movimiento de la tubería
- Condición del fluido de perforación
- Centrado de tubería
- Gasto de flujo (vel. anular)
- Cantidad de fluidos que han circulado pasado un intervalo en particular
- Diferencia de densidad entre los dos fluidos.



$$\text{Centrado} = \frac{C}{A - B}$$

$$\text{Eficiencia de Desplazamiento} = \frac{\text{Area Cementada}}{\text{Area Anular}}$$

FIGURA VI.2 Centrado y Eficiencia de desplazamiento  
(Sección transversal del pozo).

Estos trabajos fueron seguidos de una serie de intentos por desarrollar modelos matemáticos del proceso de desplazamiento (Mc Lean, Manry y Whitaker y Martin Latil), pero éstos no igualan en número al trabajo experimental, además, algunas suposiciones no son estrictamente válidas. Una causa importante de errores fue la suposición de que el perfil interfacial de velocidad podría ser descrito como un modelo de perfil de velocidad simple o sencillo. Los primeros modelos suponen que no hay reacciones entre el lodo y el cemento, lo cual no es cierto, aunque con el uso extensivo de espaciadores compatibles, esta suposición ahora es válida. Los problemas en pozos desviados no se vieron en los primeros modelos, pero tienen gran significancia hoy día.

Después del poco éxito de estos modelos matemáticos en la industria, un mayor acercamiento empírico se tomó para desarrollar series de recomendaciones, entre las que se encuentran: 10 (min) de tiempo mínimo de contacto del fluido espaciador, uso de espaciadores compatibles, altos gastos de desplazamiento y una mayor evidencia en el beneficio del flujo turbulento.

Tienen estas recomendaciones algunas carencias, ya que se limitan al rango de estudio y no pueden extrapolarse fácilmente a condiciones fuera de éste, como por ejemplo, en pozos horizontales o muy desviados. Se hace por ende necesario retornar un poco a un mejor entendimiento de los mecanismos de desplazamiento, para desarrollar un modelo que prediga el comportamiento bajo un rango más amplio de condiciones.

### **CONDICIONES PARA LOGRAR EL DESPLAZAMIENTO ALREDEDOR DE TODA LA T.R.**

Según Lockyear, Ryan y Gunningham, para colocar el cemento alrededor de toda la T.R. deben satisfacerse tres condiciones:

1. Desplazamiento del lodo.- El esfuerzo gel debe romperse, de tal forma que el lodo pueda moverse en la parte angosta del E.A. Esto puede lograrse durante el acondicionamiento del mismo antes de cementar.

2. **Esfuerzo de cedencia.**- El esfuerzo de cedencia del fluido (espaciador, lodo o cemento) debe vencerse para permitir el flujo en o hacia afuera del lado angosto del E.A.
3. **Canalización.**- La velocidad de la interfase entre dos fluidos en el E.A. debe ser la misma en los lados angosto y ancho. Si la velocidad interfacial en el lado ancho es sustancialmente mayor, provocará una severa canalización.

### DESPLAZAMIENTO DEL LODO

Lockyear y Hibert discutieron el problema del lodo gelificado a detalle. Durante la circulación de lodo antes de la cementación, el esfuerzo gel debe romperse para que el flujo sea alrededor de toda la T.R. Sin movimiento de tubería, la única fuerza actuando en el lodo gelificado es la caída de presión por fricción. La condición necesaria para romper el esfuerzo gel  $T_g$ , es:

$$T_w > T_g \quad (1)$$

Donde  $T_w$  = Esfuerzo de corte de pared generado por la caída de presión por fricción.

Una expresión simple para el cálculo del esfuerzo de pared, válida para E.A. con diámetros aproximados a la unidad es:

$$T_w = (b/2) dp/dL \quad (2)$$

Donde:

$dp/dL$  = Caída de presión por fricción

$b$  = Amplitud de la brecha anular en el lado angosto del E.A.

La caída de presión por fricción, idealmente, debe estimarse con un programa hidráulico que cuantifique el efecto del porcentaje de centrado.

Debido a la simulación por computadora, ha sido posible demostrar la sensibilidad de la caída de presión al porcentaje de centrado. El esfuerzo de corte de pared puede ser incrementado arriba del esfuerzo gel mediante el incremento del porcentaje de centrado o bien por el incremento en el gasto de flujo (lo cual incrementa  $dp/dL$ ). También  $T_g$  puede disminuirse mediante el acondicionamiento del lodo antes de correr la T.R.

### ESFUERZO DE CEDENCIA

Una vez que el esfuerzo gel del lodo se rompe a lo largo del E.A., y el desplazamiento completo es posible, es necesario considerar el esfuerzo de cedencia. Dos fuerzas son para ello importantes: La caída de presión por fricción y la caída de presión hidrostática resultante de la diferencia de densidad de los fluidos.

La Figura VI.3 muestra el desplazamiento del fluido A por el B en un pozo desviado. El B tiende a fluir hacia arriba en el lado ancho del E.A., dejando al A, ya sea estacionario o moviéndose lentamente en el lado angosto. Para mantener el fluido A en el lado angosto del E.A., el esfuerzo de corte de pared generado por la caída de presión por fricción y la diferencia en la cabeza hidrostática, deben exceder al punto de cedencia del fluido A, esto es:

$$\left| dp/dL + (R_B - R_A) g \cos \theta \right| > (2 T_{vA}/b) \quad (3)$$

Donde:

$dp/dL$  = Caída de Presión por Fricción, (lb/qq<sup>2</sup>/100 pies)

$R_B$  = Densidad del Fluido B, (lb/gal)

$R_A$  = Densidad del Fluido A, (lb/gal)

$g$  = Aceleración de la Gravedad, (ft/s<sup>2</sup>)

$T_{vA}$  = Esfuerzo de cedencia del Fluido A, (lb/100pie<sup>2</sup>)

Donde la diferencia de presión hidrostática ha sido dividida en dos componentes:

$$(R_B - R_A) g \cos \theta \quad (4a)$$

Actuando a lo largo del E.A. y:

$$(R_b - R_a) g \sin \theta \quad (4b)$$

Actuando transversalmente en el E.A.

Debido a que la mayor parte del flujo ocurre en el lado ancho del E.A., la reología del fluido B debe ser usada para estimar la caída de presión por fricción. Para desplazamientos de un líquido ligero por uno más denso, los dos términos de la izquierda de la ec.(3) son positivos (aditivos). En desplazamientos de un fluido por uno menos denso, la caída de presión actúa como una fuerza hacia arriba en el fluido en el lado angosto del E.A., y la diferencia de densidades como una fuerza hacia abajo. Por esto, las condiciones son posibles cuando las dos fuerzas se equilibran y una fuerza neta igual a cero se ejerce en el fluido en el lado angosto del E.A.

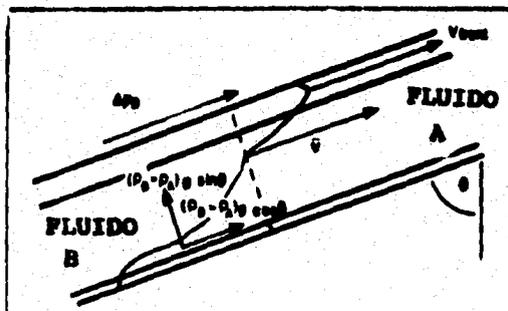
La ec. 3 puede escribirse en términos adimensionales:

$$\left| \frac{dp/dLB}{2T_{vA}/b} + \frac{(R_B - R_A) g \cos \theta}{2T_{vA}/b} \right| > 1 \quad (5)$$

Esto es:

$$\left| \frac{\text{Presión}}{\text{Cedencia}} + \frac{\text{Densidad}}{\text{Cedencia}} \right| > 1$$

Si la desigualdad anterior se cumple, el fluido A podrá moverse en el lado angosto del E.A.



**FIGURA VI.3** Fuerzas ejercidas durante el Desplazamiento en un E.A. Excéntrico de un Pozo desviado.

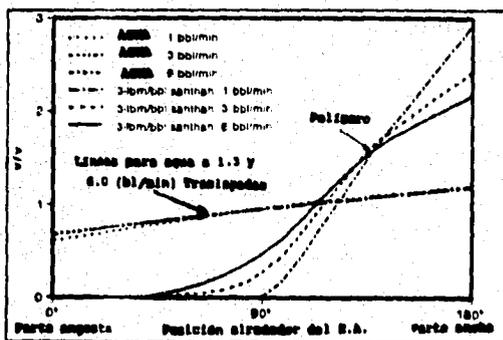
### CANALIZACION

El requerimiento final para una buena cementación primaria es la eliminación de la canalización mediante el control de la velocidad de la interfase entre los dos fluidos en el lado angosto del E.A. Esto se logra mediante el incremento en la velocidad del fluido que está siendo desplazado por el lado angosto, o promoviendo el mezclado e intercambio de fluidos alrededor de la T.R.

Perfiles simples de la velocidad de un fluido. La Figura VI.4 muestra un trazo plano de los perfiles de un fluido plástico de Bingham en flujo laminar, y agua en flujo turbulento a 3 gastos diferentes, predichos con varias técnicas numéricas. La Figura muestra también, la velocidad local a cada posición alrededor del E.A.,  $v$ , dividida entre la velocidad superficial total,  $v'$ , graficada vs. la posición alrededor del E.A. donde  $0^\circ$  es el lado angosto del E.A. y  $180^\circ$  el lado ancho. La velocidad superficial se calcula mediante la división del gasto volumétrico total entre el área anular. Si el flujo fuese uniforme en todas las partes del E.A., entonces  $v/v'$  sería igual a la unidad. En la misma Figura VI.4

se muestra el perfil de vel. del agua en flujo turbulento, el cual es más plano que el del líquido no Newtoniano en flujo laminar.

Como se había discutido, sin embargo, la vel. en la interfase entre los dos fluidos difiere sustancialmente del perfil simple de velocidad de cualquier fluido, excepto la del caso del desplazamiento que involucra fluidos de la misma reología y con cero diferencias de densidad.



**FIGURA VI.4** Perfiles de velocidad del fluido para agua y polímero Xantana (3lb/ml). Relación entre velocidades locales y promedio y puntos alrededor del E.A.

Además de cumplirse las condiciones para el desplazamiento, algunos autores han contribuido con recomendaciones derivadas de estudios realizados que ayudan a hacer más fácil este desplazamiento. De ellas se hablará a continuación.

### FLUJO TURBULENTO DURANTE EL DESPLAZAMIENTO

La turbulencia promueve el mezclado e intercambio de fluidos entre los lados del E.A., generándose una fuerza de arrastre durante el desplazamiento, que puede fomentar un pequeño movimiento en

el lado estrecho. La magnitud de la fuerza depende de la geometría y el gasto total de flujo.

Para realizar un efectivo flujo turbulento alrededor de toda la T.R. se requiere de gastos de flujo mayores que los usados cuando se calcule el gasto crítico bajo la suposición de que la tubería está centrada al 100%. Si la tubería está fuera de centro, y sin embargo, se asume un centrado total, el flujo laminar en el lado angosto coexistirá con el flujo turbulento en el lado ancho. Bajo estas condiciones, el todo no podrá ser removido del lado angosto del E.A. De tal forma, el cálculo del gasto requerido para realizar el flujo turbulento alrededor de toda la T.R. puede ser extremadamente incierto.

Un gasto que cumpla con la condición de flujo turbulento se calcula mediante la multiplicación del número de Reynolds crítico para flujo turbulento en un E.A. concéntrico por un factor de corrección, el cual depende del % de centrado de la tubería . Figura VI.5.

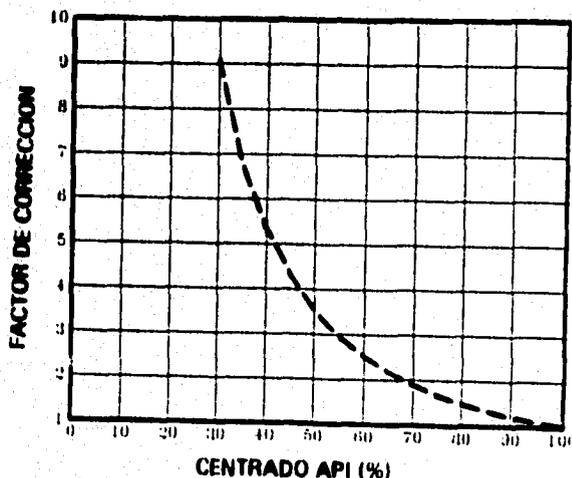


FIGURA VI.5 Factor de corrección en el  $N_{Re}$  crítico para flujo turbulento como una función del % de centrado.

## FLUJO LAMINAR EFECTIVO

Cuando la turbulencia alrededor de toda la T.R. no puede llevarse a cabo, debido al grado de excentricidad y/o limitaciones en las bombas, o por el gradiente de fractura, se recomienda un diseño de flujo laminar efectivo. Se ha llegado a varios criterios en cuanto a la consecución de este tipo de patrón de flujo de acuerdo con la información de computadora.

Los siguientes dos criterios ayudan a mantener una interfase plana entre los fluidos desplazante y desplazado:

**Jerarquía de la Caída de Presión por Fricción.** - La caída de presión por fricción generada por el fluido desplazante debe ser mayor que la del fluido desplazado.

**Jerarquía de Densidad.** - La densidad del fluido desplazante necesita ser mayor que la del desplazado, esto ayuda a minimizar el dictamiento y a mantener una superficie plana como interfase de los dos fluidos.

**Gradiente Mínimo de Presión.** - Este criterio asegura que los fluidos se muevan en el lado angosto del E.A. En un espacio anular excéntrico el esfuerzo de corte de pared es mayor en el lado ancho, cuando un fluido presenta un esfuerzo de cedencia. El esfuerzo en el lado angosto debe exceder al esfuerzo de cedencia del fluido para asegurar que éste se mueva alrededor de toda la T.R. El gasto de flujo mínimo debe cumplir este criterio. El concepto del mínimo gasto de flujo es el mismo, pero en este caso debe ser considerado un efecto debido al factor de flotación.

**Velocidad Diferencial.** - Para asegurar que no se formen canales de lodo o espaciador en el lado angosto del E.A., se hace el cálculo de tal modo que se asegure que la interfase entre el fluido desplazante y el desplazado no vaya más rápido en el lado angosto que en el amplio. En otras palabras el cálculo debe hacerse para que con el gasto máximo de flujo el fluido en el lado angosto

del E.A. pueda alcanzar al fluido en el lado ancho.

Estos criterios de ningún modo se contraponen, sino que complementan o inclusive reafirman las recomendaciones básicas citadas anteriormente y las cuales se describirán a continuación:

### **MOVIMIENTO DE LA TUBERIA**

Hay dos tipos de movimiento de tubería, llamados rotación y reciprocación. Mc Lean et.al. concluyeron que cuando la T.R. está severamente fuera del centro (excéntrica), la rotación parece ser más benéfica que la reciprocación. Durante la rotación, las fuerzas de arrastre cemento/T.R. tienden a "empujar" al cemento dentro del lodo. Sin embargo, no empujará el agua dentro de la columna de lodo, por tanto, la reciprocación parece ser la más deseable.

Como el movimiento simultáneo es usualmente poco posible, cualquier tipo de movimiento podrá ser benéfico. Los autores afirman también que si la tubería está bien centrada, el movimiento reciprocante parece ser la mejor opción. La reciprocación causa también movimientos laterales de la tubería cuando los centradores se mueven a través de las irregularidades del fondo del pozo. Estos movimientos laterales aminoran el área de flujo y pueden auspiciar el desplazamiento del lodo.

La reciprocación ha sido seleccionada sobre la rotación debido a una mayor simplicidad en la operación y porque no requiere equipo auxiliar especial en el aparejo. Cerca de un 90% de las sargas de revestimiento son reciprocadas con un movimiento de longitud entre 3 y 5 m (9.8 - 16.4 pie) y un período de 1 a 2 (min).

### **CONDICION DEL FLUIDO DE PERFORACION**

Como vimos, las investigaciones anteriores concluyeron que un decremento en la viscosidad del F.P. incrementará la eficiencia del desplazamiento. Sin embargo no se menciona el efecto que el enjarre

gelatinizado tiene sobre el proceso de desplazamiento.

Una de las principales funciones de un F.P. es sellar las formaciones permeables. Esto se realiza cuando los sólidos del lodo se depositan en la pared de las formaciones permeables, al tiempo que el filtrado penetra dentro de ella. A medida esta capa se va engrosando, el gasto hacia el interior de la formación se va disminuido. Un grado de sellamiento ocurre como resultado de este procedimiento.

Mantener esta delgada capa impermeable llamada enjarre es esencial para evitar posibles problemas, entre los que se enumeran: Pegaduras por presión diferencial, dificultad para correr registros, pérdidas de circulación y problemas en las cementaciones primarias.

La formación del enjarre puede darse en dos tipos de condiciones de flujo básicas: Estáticas, por ejemplo cuando se está introduciendo o sacando tubería, y dinámicas cuando se está perforando.

Se reconoce la existencia de tres tipos de enjarre:

- Una delgada capa dentro de la formación
- Uno delgado y duro en la cima de la formación
- Uno suave en la pared del fondo del pozo.

Es poco probable la remoción del enjarre interno, la remoción del segundo es posible con escariadores, pero temporal, el tercer tipo es, y debe ser removido durante la cementación. De hecho este último es un aspecto importante a considerar. Comúnmente se adicionan aditivos para mantener control sobre ese parámetro y existe un riguroso procedimiento API para probar las lechadas de cemento, mediante el uso de una malla 325 como medio de filtrado (condiciones de permeabilidad parecidas a una arenisca virgen muy permeable).

EL grosor del enjarre estático no varía con la permeabilidad de la formación. Bajo condiciones dinámicas, la cantidad de la pérdida de filtrado hacia la formación es proporcional a la permeabilidad

del núcleo.

Los autores asumen que las características del enjarre y las propiedades tixotrópicas -máximo esfuerzo gel- son los aspectos más importantes en un proceso de desplazamiento lodo/cemento, por tanto, consideran conveniente incluir un factor de movilidad del lodo, el cual puede definirse por la siguiente ecuación.

$$M.M.F. = \frac{1}{\text{Características del Enjarre} \times \text{Máximo Esfuerzo gel}} \quad (1)$$

El grosor del enjarre está relacionado a la cantidad de pérdida de filtrado a través de la formación y al tipo y volumen de los sólidos presentes en el F.P. Si estos parámetros permanecen constantes, entonces la cantidad de filtrado de lodo a través de la formación se convierte en el factor más importante.

Como el máximo esfuerzo gel puede ser aproximado al esfuerzo gel a 10 (min),  $G_{10 \text{ min}}$ , el factor de movilidad del lodo para las pruebas de desplazamiento estaría dado por:

$$M.M.F. = 1/Vf G_{10 \text{ min}} \quad (2)$$

Si el cemento y el F.P. tienen densidades iguales, entonces el parámetro importante de la energía de la corriente de flujo es la velocidad anular.

La Figura VI.6 delinea el porcentaje de lodo removido como una función de la velocidad anular del cemento al cuadrado por el factor de movilidad del lodo. La línea muestra una tendencia típica para todos los casos de desplazamiento en los cuales la diferencia de densidades sea cero.

Muestra además que un mínimo de (25-30%) de el lodo siempre fue desplazado. Luego entonces, el porcentaje de lodo removido se incrementa con un aumento en el factor de movilidad, es decir, el porcentaje de lodo desplazado puede aumentarse mejorando las características del enjarra de lodo (disminuyendo la pérdida de filtrado) o mediante la disminución del máximo esfuerzo gel (reduciendo el esfuerzo gel a 10 min).

Si el M.M.F. fuese igual a infinito (lo cual indicaría una cantidad de filtrado igual a cero), el 100% del lodo deberá ser removido.

Los resultados indican que cuando se usa un lodo con baja pérdida de filtrado, la permeabilidad del núcleo tiene un efecto en el proceso de desplazamiento, y que, la pérdida de filtrado a la formación fue proporcional a la permeabilidad del núcleo. Además, la más baja pérdida de filtrado, resulta en la más alta remoción del lodo.

La recomendación sería mantener bajos valores de esfuerzo gel a 10 (min), y de pérdida de filtrado.

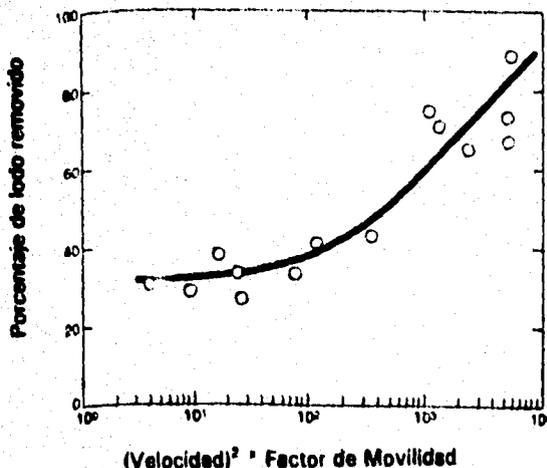


FIGURA VI.6 Porcentaje de lodo removido Vs. Velocidad de flujo en el E.A. durante la cementación.

## CENTRADO

La uniformidad de la cubierta de cemento alrededor de la tubería, determina en gran medida la efectividad del sello entre el pozo y la T.R. Dado el hecho de que los pozos raramente son derechos, la tubería estará en contacto con la pared del agujero en diversos lugares. Por ende, se hace necesario implementar un mecanismo que ayude a evitar ese contacto, este mecanismo lo constituye el centrado de la T.R.

La importancia de el centrado de la tubería ha sido reconocida desde los primeros estudios publicados en 1940. El centrado crea un área perpendicular uniforme al flujo. Esto provoca que se iguale la distribución de presión de flujo, y con esto, se uniformice la resistencia al flujo alrededor de la tubería; ayuda asimismo a que la presión hidrostática sea ejercida uniformemente en toda el área del E.A., previniendo pegaduras en la pared del pozo por acción de la presión diferencial. Protege a la T.R mientras está siendo rotada o reciprocada, y ayuda a reducir el movimiento de la T.R una vez que el cemento se encuentra en su lugar.

Desde un punto de vista teórico, la importancia del centrado puede entenderse considerando las propiedades de un fluido Newtoniano como el agua y de uno no Newtoniano como lo es una lechada de cemento. Como el esfuerzo de corte es proporcional a la caída de presión y lo es también al gasto de flujo, en un fluido no Newtoniano se requiere de una caída de presión considerable para iniciar un gasto de flujo significativo, sobre todo comparada con un fluido Newtoniano. Debido a esto, la lechada de cemento fluirá preferentemente en la parte ancha de un E.A. excéntrico, donde la resistencia al flujo será menor.

Los centradores son los únicos auxiliares mecánicos usados rutinariamente, debido a que las sargas de revestimiento son generalmente reciprocadas.

Crook et al. reportaron datos experimentales que demuestran la obtención de un buen sello hidráulico

en las inmediaciones del centrador, aún cuando el resto de la T.R. no estaba bien centrada. Esto probablemente resulta de un cambio en el patrón de flujo del cemento en esta región.

Una "regla de dedo" para el espaciamiento de los centradores en pozos relativamente derechos es colocar un centrador por cada junta en la sección del agujero a ser cementado. La mayoría de las compañías utilizan programas de cómputo para calcular un espaciamiento óptimo entre los centradores, cuando tienen datos vitales del pozo, tales como el peso del lodo, la desviación y el grado de excentricidad requerido.

### VELOCIDAD ANULAR

Mucho del trabajo sobre la relación de la vel. anular y la eficiencia de desplazamiento, se refiere a los regímenes de flujo (tapón, laminar y turbulento) asociados a fluidos no Newtonianos, como es el caso de una lechada de cemento o el F.P. Estos patrones de flujo pueden definirse por medio de una relación de parámetros conocida como número de Reynolds (NRe). El flujo tapón se da en condiciones de un número de Reynolds menor a 100, para flujo laminar entre 1,000 y 2,000, mientras que en el rango entre 2,100 y 3,000 se presenta la transición al flujo turbulento.

Se sugiere que inicialmente las condiciones de flujo laminar se eviten, debido a que el perfil de velocidad resultante podría promover la formación de canales de cemento a través del F.P. Empero, los flujos tapón o turbulento son las condiciones deseables.

En general, a medida que la lechada se adelgaza, más fácil resulta bombearla en flujo turbulento, que es el patrón que proporciona la máxima remoción del lodo y la más alta velocidad anular. Sin embargo, este adelgazamiento puede incrementar la tendencia de la lechada a formar canales en el lado estrecho del E.A.

Un valor moderado de punto de cedencia requiere un gasto promedio de 6 (bpm), mientras que uno

bajo requiera de un gasto de 5 (bpm). Una vez que el flujo turbulento se alcanza para una lechada con punto de cedencia moderado, la presión requerida es aproximadamente igual que para una con bajo punto de cedencia. Una lechada con un punto de cedencia alto requiere gastos del orden de 8.5 (bpm) o mayores. Gastos que son difíciles de manejar.

Algunas pruebas desarrolladas en modelos de gran escala indicaron que los gastos más altos proporcionaren la mejor eficiencia de desplazamiento, y que el régimen de flujo no fue necesariamente el factor más crítico. Esta teoría se sustenta más por la observación de que la eficiencia de desplazamiento no se incrementa naturalmente en la transición de flujo laminar a turbulento a medida que se incrementa la vel. anular.

La Tabla de la Figura VI.7 muestra los resultados de un estudio realizado por Terry R. Smith referente a la eficiencia de desplazamiento, que indica la existencia de una relación entre la vel. anular y la eficiencia de flujo. En todos los casos mejoró la eficiencia de desplazamiento al aumentar la vel. anular, confirmando lo aseverado.

Los gastos de desplazamiento usados comúnmente estaban cerca de un valor de  $(1\text{m}^3/\text{min})$  (6.3 bl/min). Dependiendo de la configuración debida a los diámetros de la T.R. y el agujero, el rango de velocidades anulares varía entre 34.4 m/min (112.9 pie/min) para una combinación T.R.-agujero de  $(9\frac{1}{2}\text{spg}/12\frac{1}{4}\text{spg})$  y 125.3 m/min (411.11 pie/min) para una configuración T.R.-agujero  $(4\frac{1}{2}\text{spg}/6\text{spg})$ .

Los desplazamientos de cemento a gastos de  $3\text{m}^3/\text{min}$  no son poco frecuentes. Los equipos de bombeo y de superficie deberán ser modificados para alcanzar estos gastos. Para T.R. intermedias, de producción y liners, es recomendable manejar un gasto de desplazamiento que resulte en una vel. anular mayor a 80 m/min (262 pie/min) por el bache lavador a través de las zonas de interés. Así como incrementar la vel. en etapas mientras se limpia y acondicione el pozo antes de introducir la T.R. Durante el acondicionamiento del pozo, el incremento en la velocidad anular da como resultado un inmediato aumento en el volumen de recortes acarreado y por ende una mejor limpieza.

Es importante que la velocidad se aumente gradualmente, ya que si se incrementa bruscamente, el volumen de recortes movilizado puede ocasionar problemas de puenteamiento.

Efic. Desplaz. (%)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad (g/l)	Viscosidad Plástica (mPa.s)	Punto de Cadencia (Pg)	Esfuerzo Gel (Pg)	Vel. Anular (m/min)	Tiempo Circ. (hr)
100	1,070	85	34	10	6/20	102	1
98	1,100	45	11	4	3/8	127	0
98	1,105	49	18	6	3/7	84	3
95	1,140	57	25	8	3/10	118	10.5
94	1,240	61	11	6	5/12	65	3
91	1,090	82	20	10	7/10	50	2
90	1,105	69	29	12	5/12	75	8
90	1,130	—	11	10	—	56	0
90	1,090	—	22	10	—	53	0
89	1,140	60	20	8	4/10	82	7
85	1,130	65	26	13	4/8	57	4
85	1,090	80	38	17	6/22	54	1
83	1,105	69	29	12	5/12	57	1
82	1,105	69	29	12	5/12	57	3.3
78	1,100	60	25	9	5/12	43	5
72	1,130	90	63	14	6/22	54	2
70	1,100	63	25	9	2/8	38	2
65	1,150	63	25	8	4/12	85	7.5
65	1,230	40	—	—	—	39	2.25
65	1,140	60	20	9	4/10	47	1
53	1,140	60	20	9	4/10	47	5
53	1,020	64	26	10	3/10	43	2

\* Tiempo desde el inicio de la circulación al inicio del cabezal fluido

FIGURA VI.7 Estudio realizado por Smith sobre relación entre vel. anular y eficiencia de desplazamiento

### VOLUMEN DE FLUIDO PASADA LA ZONA DE INTERES

Estudios de campo reportados por Brice y Holmes, indican que la cantidad total de fluido, que pasado el punto crítico del E.A., y en flujo turbulento, fluye a través del E.A., es un factor que contribuya a la obtención de una operación exitosa de cementación primaria a lo largo de esta zona, y se inclinan a establecer que el "tiempo de contacto", que definen como el período que un punto del E.A. en particular permanece en contacto con la lechada de cemento, siendo desplazada en flujo turbulento, debe ser más grande que 10 min. a fin de aumentar la probabilidad de éxito en una operación de cementación primaria.

## BACHE PRELAVADOR

El bache separa la lechada de cemento del F.P. y lo desplaza. En muchos casos la lechada de cemento y el F.P. no son compatibles, y un bache que lo sea se hace necesario. Este debe tener buenas propiedades reológicas para la buena limpieza del F.P. en el E.A.

El más común entre los baches lavadores es el agua dulce. Sus propiedades lo hacen bueno para mantener patrones de flujo turbulento, se prefiere también por su disponibilidad y economía.

Una recomendación que data de muchos años, es el uso de un bache lavador de  $3\text{m}^3$  (20 bl), independientemente de la configuración T.R./agujero. Algunos estudios de campo han dado como resultado la recomendación de que el volumen del bache debe ser el requerido para llenar 300 m (980 pies) de el E.A. Recomiendan el uso de agua siempre que sea posible. En caso de usar un fluido más denso, a fin de mantener el control del pozo, dividir el volumen del bache entre el espaciador densificado y la lechada de limpieza.

Una recomendación extra es que este fluido debe poseer características de baja pérdida de filtrado para conservar sus propiedades reológicas durante el desplazamiento.

El criterio de selección del fluido espaciador que constituye en saber si es posible bombearlo en flujo turbulento por más de 10 (min). se describe en el capítulo V. La densidad del espaciador se recomienda sea 0.5 (lb/gal) mayor que la del lodo. Fluidos no Newtonianos, además de ser de mayor costo pueden producir mayores ECD.

## DIFERENCIAS DE DENSIDAD

En desplazamientos que involucran fluidos con diferencias de densidad muy acentuadas, se da una canalización que resulta en 2 columnas de diferentes fluidos en los lados ancho y angosto del E.A.

Esta situación es inherentemente inestable y tiende a resultar en un intercambio de fluidos en el E.A. La Figura VI.8 muestra los posibles mecanismos involucrados en el desplazamiento de un fluido por otro más ligero en un pozo vertical. El fluido más ligero tiende a canalizarse hacia el lado amplio del E.A., mientras que el más denso queda atrapado en el lado angosto, tendiendo a moverse hacia abajo y afuera, antes de ser acarreado hacia arriba por el más rápido movimiento en el lado ancho.

Una diferencia de densidad puede resultar en un eficiente removedor de un fluido denso en el lado angosto, aún si el fluido desplazante es más ligero. El desplazamiento en estas condiciones, sin embargo, da como resultado un mezclamiento considerable entre los fluidos. En pozos altamente desviados el desplazamiento de un fluido por otro más ligero es poco probable.

Haut, Collins y Graves, en un estudio, establecieron que una diferencia grande entre la densidad del cemento y el lodo de perforación, conlleva a la inestabilidad del perfil interfacial (interfase entre los dos fluidos). La haneza de la interfase puede minimizar el contacto entre los dos fluidos y disminuir la contaminación de la zona entre el cemento y el F.P.

La curva en la Figura VI.9 presenta los resultados de una prueba de desplazamiento con fluidos de la misma densidad. Resultados de las pruebas, para diferencias de densidad de 72 y 360 Kg/m<sup>3</sup> (0.6 y 3 lb/gall se muestran en la misma figura.

Esos resultados muestran que un incremento en la diferencia de densidades no mejora el desplazamiento. El hecho de que la diferencia de densidades no contribuya a un mejor desplazamiento, se debe al hecho de que, el M.M.F y la velocidad de flujo, contrarrestan cualquier efecto que la densidad tenga sobre el desplazamiento.

La falta de influencia de la diferencia de densidades puede ser entendida en la tabla de la Fig. VI.10. Aquí se enlistan diferentes fluidos, junto con la densidad promedio del fluido no circulable que se manifestó después de estar 30 (min) bajo el efecto de pérdida de filtrado. Como se ilustra, la

densidad del lodo inmóvil puede alcanzar valores de 32.4 (lb/gal). Este aumento de densidad se debe a la pérdida de filtrado de lodo.

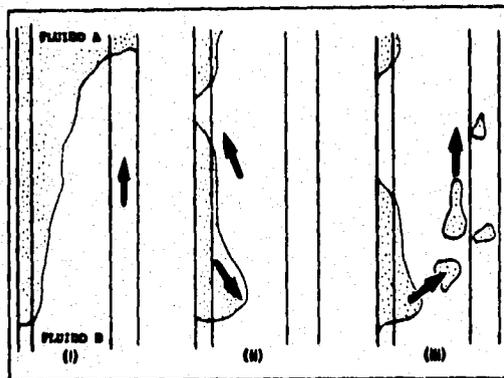


FIGURA VI.8 Desplazamiento de un fluido (B) por otro más denso (A).

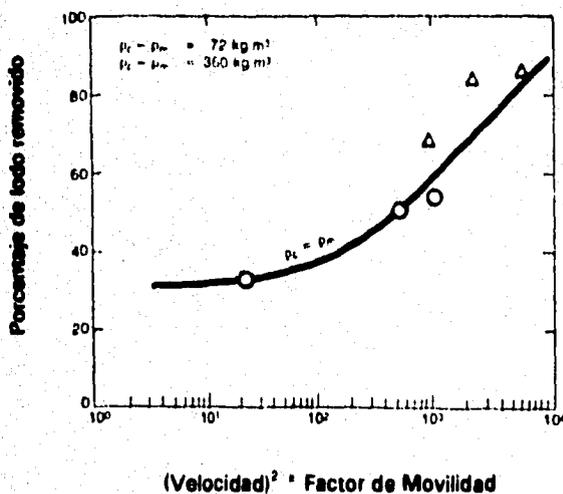


FIGURA VI.9 Desplazamientos con fluidos de igual densidad (curva) y diferentes densidades (puntos).

Densidad del Lodo (Kg/m <sup>3</sup> ) * 10 <sup>3</sup>	Pérdida de Fluido API (Cm <sup>3</sup> /30 min)	Espesor del Enjarre (mm)	Densidad del Enjarre (Kg/m <sup>3</sup> ) * 10 <sup>3</sup>
1.68	20.6	9.5	3.06
1.68	16.6	9.5	3.04
1.67	19.3	10.3	3.03
1.78	21.0	9.5	3.47
1.78	19.2	11.1	3.52
1.78	21.2	8.7	3.39
2.04	3.6	1.6	4.05
2.04	28.0	14.3	4.11
2.04	3.4	6.4	3.91

FIGURA VI. 10 Densidad Resultante del F.P. no Circulable.

Algunos autores han reportado buenos resultados en estudios de campo cuando usan un fluido desplazante con una densidad de 0.5 - 1.0 (lbm/gal) mayor que la del lodo, y muy malos cuando la diferencia alcanza las 5 - 6 (lb/gal). El efecto de flotación se observa generalmente a gastos muy bajos.

### **ALGUNAS RECOMENDACIONES SOBRE TOPICOS DIFERENTES AL PROCESO DEL DESPLAZAMIENTO**

Además de las recomendaciones anteriores, que promuevan un buen desplazamiento del F.P. por la lechada de cemento, se incluye a continuación una serie de recomendaciones y procedimientos en otros rubros que contribuyen a un buen resultado en trabajos de cementación primaria.

#### **ACONDICIONAMIENTO DE T.R. CON ARENA A PRESION Y CUBIERTA DE RESINA**

Deben tenerse ciertas precauciones si se selecciona este método de acondicionamiento:

1. Antes de colocar el recubrimiento de resina, debe limpiarse perfectamente la superficie de la tubería y dar un baño de arena inyectada a presión.
2. La cubierta de resina no debe ser demasiado gruesa.
3. La cubierta debe ser de arena angular y tampoco debe ser muy gruesa.
4. Si se utiliza una resina epóxica, el límite en la temperatura que la resina puede soportar es 230°F (110°C).
5. Tienen que hacerse pruebas para asegurarse de que el surfactante usado en el espaciador dejará la superficie de la resina mojabla por agua y que no dañe químicamente a la cubierta.
6. Debe tenerse gran cuidado en la colocación de los centradores, para evitar que durante la introducción de la T.R. se colapsen completamente provocando que la tubería raspe con la pared del pozo.

## CIRCULACION DEL LODO ANTES DE LA CEMENTACION

1. Posterior a la perforación total (TD), por medio de circulación, sacar los recortes provenientes del agujero, correr un registro calibrador, preferentemente uno de cuatro brazos.
2. Realizar la prueba de eficiencia de bombeo mediante la introducción de un volumen conocido (calibrador fluido).
3. Introducir al pozo la T.R. con sus centradores, iniciando con ello la circulación y el movimiento de la tubería. Dejar caer la canica de carburo, arena, etc., y registrar el número de emboledas necesarias para que la canica llegue al vibrador. Circular al gasto más alto posible, sin que se llegue a la presión necesaria para la fractura.
4. Verificar con la unidad de toma de registros de lodo si se puede registrar acetileno con el cromatógrafo de gas. Si es que se está utilizando el método de arrojar la canica de carburo.
5. Correlacionar el número de emboledas con el volumen del agujero obtenido por el calibrador y continuar el movimiento de tubería la circulación y el acondicionamiento del lodo hasta que al menos un 95% del volumen del agujero esté circulado.

Cuando se usa este procedimiento los tiempos de circulación generalmente son mayores que los normales. Un problema asociado es la erosión resultante de los accesorios de la T.R., principalmente los flotantes. Stringfellow encontró que las válvulas globo, de charnela y de retención mal diseñadas fallaban bajo una presión diferencial cuando los tiempos de circulación se extendían demasiado y debido a la acción de lodos con alto contenido de sólidos. De estas pruebas resultó un nuevo diseño de válvulas flotantes; si éstas fallan la presión interna de la T.R. deberá mantenerse, a fin de prevenir que el cemento forme un vaso comunicante. Esta presión provocaría la formación de un microespacio anular si se liberara, y podría conducir a una evaluación errónea de la cementación. Por esta razón, sólo aquellas válvulas que han sido probadas a condiciones dinámicas pueden ser utilizadas.

## **PRUEBAS DE CALIBRADOR FLUIDO**

Este procedimiento ha sido usado en situaciones similares por algunos investigadores como Smith R.C. La función de un calibrador fluido es determinar el monto de F.P. móvil en el pozo. Se coloca un marcador en el F.P. que puede ser detectado en la línea de retorno del lodo. Se han usado varios tipos de marcadores, pero se ha encontrado que la pildora de carburo es la más efectiva en caso de tener un registrador de lodo en la locación. Si no puede disponerse de un registrador puede utilizarse un marcador visible que consiste en una pintura base aceite mezclada con polímero. Un material de cuarzo en polvo, se usa también en algunos casos para hacerlo más visible al llegar a la temblorina.

El procedimiento de el calibrador fluido consta de las siguientes etapas:

1. Correr un calibrador de brazos múltiples sobre el intervalo completo del agujero descubierto para determinar el volumen total ya con la sarta corrida.
2. Determinar la eficiencia de bombeo aislando el tanque de succión y correlacionando las emboladas de la bomba con el fluido del tanque.
3. Colocar el marcador en la T.R. y verificar el volumen de fluido bombeado hasta que el marcador sea detectado en la línea de retorno de lodo.
4. Determinar la eficiencia de desplazamiento dividiendo el volumen de fluido bombeado (determinado en el paso anterior) entre el volumen del pozo (determinado en el paso 1) y expresar este valor en porcentaje.

La eficiencia de desplazamiento obtenida de esta prueba indica el % de fluido en el pozo que está activo o circulable.

## **COMPATIBILIDAD DEL ESPACIADOR CON EL LODO Y EL CEMENTO**

Es de gran importancia el saber si el espaciador es o no compatible con el lodo y el cemento. Cuando se seleccione el tipo de espaciador requerido, deben considerarse factores como: Tratamiento

químico del lodo, tipo de lodo (base aceite o agua), carga iónica del emulsificante y sus aditivos químicos, para asegurar compatibilidad con el lodo y con el cemento.

Como la tubería y la formación deberán quedar mojadas por agua, a fin de facilitar la adherencia del cemento, el sistema específico del lodo debe probarse con los sistemas del posible fluido espaciador, hasta encontrar uno que sea compatible. Durante la realización de estas pruebas, pudiera encontrarse un surfactante, o una combinación de ellos que la deje mojada por agua, para facilitar la compatibilidad del fluido espaciador con el lodo base aceite. Este procedimiento es lo ideal. De no ser posible, se deberá bombear entre el lodo y el cemento un bache de fluido oleoso. Sería ideal que éste se preparara con la misma densidad del lodo, pero esto no siempre es posible debido a las bajas viscosidades de algunos de los aceites de baja toxicidad. De utilizarse el método anterior, los siguientes pasos pueden ser una guía típica de bombeo:

1. Lodo.
2. 20 bl de fluido oleoso.
3. 50 bl de fluido espaciador.
4. Primera parte de la lechada de cemento (lechada guía).
5. Parte final de la lechada de cemento (lechada de fondo).
6. Lodo.

La única precaución que debe tomarse, es la de realizar en el campo una prueba de agitado de botella, si ésta resulta compatible en el laboratorio, y no es compatible en la prueba de campo, deberá bombearse un fluido base aceite adelante del espaciador.

#### TAPONES LIMPIADORES

Una vez que se selecciona el fluido espaciador, se realizaron las pruebas de compatibilidad, se determinó la cantidad del fluido espaciador, y si se bombea o no el fluido oleoso, permanece la pregunta de cómo separar los fluidos cuando se bombeen por la T.R. tomando en cuenta su

densidad relativa. Los fluidos más ligeros generalmente están al final de la cima del E.A., y los de mayor densidad en el fondo. Es evidente que durante la colocación del cemento, sucede justamente lo contrario. Un método que ha sido y puede ser utilizado, es la colocación de taponeros limpiadores de "fondo" entre el lodo y el fluido oleoso, entre el fluido oleoso y el espaciador y entre el espaciador y el cemento. El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Introducir el primer tapón.
2. Bombear 5 (bl) de fluido oleoso y soltar el tapón, bombear 5 (bl) mas y parar.
3. Introducir el segundo tapón.
4. Bombear el resto del fluido oleoso y soltar el segundo tapón.
5. Bombear 5 (bl) de fluido espaciador y parar.
6. Introducir el tercer tapón.
7. Bombear el resto del fluido espaciador y soltar el tercer tapón.
8. Bombear 5 (bl) de cemento y parar.
9. Introducir el tapón superior.
10. Bombear el resto del cemento, soltar el tapón superior y desplazar.

Antes de levantar el cabezal de cementación, deberá verificarse la amplitud del elevador y la longitud de las asas, para asegurar que la tapa del cabezal de cementación pueda desalojarse con el cabezal sujeto al elevador.

#### PROCEDIMIENTO PREVIO A LA CEMENTACION

1. Determinar los gastos de desplazamiento durante la cementación, para un fluido espaciador típico, en base del tipo de tubería a cementar, las capacidades de bombeo y mezclado, y las densidades equivalentes de circulación.
2. Seleccionar el fluido espaciador y probar la compatibilidad con el sistema de lodo. Si no es compatible, seleccionar otro fluido espaciador o utilizar un fluido espaciador base aceite.
3. Después de seleccionar el fluido espaciador, determinar la reología a condiciones de temperatura

- de circulación en el fondo del pozo y, si es posible, a la presión del fondo.
4. Utilizar la reología, para recalcular las ECD durante la cementación, y seleccionar el gasto de desplazamiento y las capacidades de mezclado y bombeo.
  5. Determinar el tipo de movimiento al que se someterá la tubería (rotatorio o reciprocante) y su velocidad.
  6. Verificar el tamaño del cabezal de lanzamiento del tapón del cemento y comparar la amplitud y longitud del asiento, para asegurar que pueda lanzarse en el cabezal. Si es necesario, obtener asientos especiales e instalarlos antes de la introducción de la T.R.
  7. Calcular el peso de la T.R. dentro del lodo, y no superar durante el movimiento reciprocante, el peso de arrastre que proporciona un factor de seguridad en el cuerpo o en la junta de 1 a 2, cualesquiera de éstos que sea menor.
  8. Verificar la densidad de la barita, o el material densificante que se uso en las tablas de mezclado, las cuales casi siempre están calculadas considerando la densidad del material puro, cuando en la mayoría de las ocasiones esto no sucede. Recalcular la cantidad de material densificante a usar y hacer la modificación.

#### PROCEDIMIENTOS RECOMENDADOS PARA LA INTRODUCCION DE T.R..

##### EL ACONDICIONAMIENTO DEL POZO Y EL USO DEL FLUIDO ESPACIADOR

1. Cuantificar la longitud de la T.R. y perforar el pozo para que tenga un agujero lo mejor calibrado posible hasta la profundidad total, de tal manera que la T.R. se pueda descender hasta una distancia de 5 (pies) del fondo. Si es posible, proporcionar un área en el E.A. mayor a  $10 \text{ (pg}^2\text{)}$ .
2. Acondicionar el lodo a valores reducidos de punto de cedencia y viscosidad plástica, antes de introducir la T.R. al fondo. Mantener reducido el contenido de sólidos, especialmente cuando el pozo tenga un ángulo de desviación alto.
3. Asegurar que por lo menos 500 (pies) de T.R. sobre la zepata, hayan sido tratados con un chorro de arena con aire para proporcionarle una superficie rugosa, o bien las zonas de interés y un mínimo de 500 (pies) adicionales.

4. Asegurar el centrado de la T.R. con centradores aprobados por el API, utilizando como mínimo la guía de diseño de espaciamiento 10D del API.
5. Calcular las presiones de surgencia para la introducción de la T.R., e introducirla a una velocidad suficientemente lenta para prevenir el fracturamiento de la formación.
6. Instalar sobre las conexiones la "rosca acme", para la rápida conexión de las roscas de la T.R. sobre la junta superior, antes de que la T.R. llegue al fondo. Instalar las líneas de circulación de superficie al conjunto de válvulas para facilitar el movimiento de la T.R.
7. Una vez que la tubería esté en el fondo, iniciar la circulación a un gasto equivalente o mayor que la velocidad anular a través de la tubería lastrabarrera durante la perforación, si las ECD lo permiten. Iniciar el movimiento continuo de la T.R., 15 a 30 (pies), para el movimiento recíprocante, ó 6-10 (rpm) para la rotación, no permitir que se supere el esfuerzo a la tensión y el torque previamente calculados.
8. Utilice el método de arrojar la canica de carburo para determinar cuando se ha circularado el suficiente volumen de lodo. No iniciar la cementación hasta circular un mínimo de 95% del volumen del agujero comparado con el obtenido con el registro calibrador de agujero de 4 brazos.
  - a) Circular el volumen de la T.R. hasta observar que no exista nada que pudiera tapar los flotadores.
  - b) circular del fondo de la superficie, hasta observar que no se presenta flujo de gas, parar el flujo de gas antes de realizar la cementación.
  - c) Generalmente esto involucra grandes tiempos de circulación antes de la cementación. Deberán tomarse las precauciones necesarias para asegurar que el equipo de flotación seleccionado pueda resistirlos.
9. Durante la circulación del lodo, acondicionar sus propiedades de punto de cedencia y viscosidad plástica, si éstas han cambiado durante la toma de registros e introducción de la T.R.
10. Mezclar los componentes del fluido espaciador en el pozo, agitando y mezclando en las presas, de preferencia con fondo cónico.
  - a) Mezclar el fluido espaciador para que su densidad sea 0.5 (lb/gal) mayor que la del lodo.

Verificar la densidad, de preferencia con la balanza de lodos presurizada.

b) Utilizar un volumen suficiente de fluido espaciador para proporcionar un tiempo de contacto de 10 (min) a los gastos de desplazamiento diseñados, y un volumen mínimo de 500 (pies) en el E.A.

c) Debe estar presente personal de la compañía proveedora del fluido espaciador y de la que proporciona el mezclado de dicho fluido.

d) Verificar la reología del fluido espaciador, repetir el cálculo del gasto crítico para obtener flujo turbulento, y desplazar con este gasto si no se crean excesivas ECD.

11. De ser posible, bombear el fluido oleoso con una densidad igual a la del lodo introducido delante del fluido espaciador, si éste no es compatible con el lodo:

a) Bombear un volumen equivalente a 1/3 del fluido espaciador o un volumen equivalente a 250 (pies) de E.A.

12. Bombear:

a) Lodo

b) Tapón de fondo

c) Fluido espaciador base aceite

d) Tapón de fondo

e) fluido espaciador

f) Tapón de fondo

g) Cemento

h) Tapón final

Si es posible bombear a gastos que proporcionen al fluido espaciador un flujo turbulento, bombear tan rápido como sea posible o en flujo laminar muy alto, si las ECD muestran una posibilidad de fracturamiento, hacerlo en flujo turbulento.

Controlar la entrada de flujo contra su salida durante la cementación. Utilizar un estrangulador ajustable para mantener ambos valores iguales, tomando en consideración el efecto de tubo en U del cemento de mayor densidad contra el lodo de menor densidad. Reducir la presión del

acumulador, para facilitar el movimiento de la tubería con el preventor cerrado. Ajustar los gastos de flujo si se mantiene contrapresión y se corre el riesgo de fracturar la formación.

### **PREVENCION DEL FLUJO ANULAR DESPUES DE CEMENTAR**

Este flujo ocurre cuando la columna de cemento colocada en el E.A. falla para contener la presión de formación, permitiendo que los fluidos de ella (gas, aceite y agua) fluyan hacia el pozo.

Son tres factores básicos, que se dan casi siempre en forma conjunta, los que se enumeran más frecuentemente en la literatura. Cual de los mecanismos domine dependerá de las condiciones del pozo y del diseño de la lechada.

**Deshidratación de la lechada.-** Causada por un control insuficiente de filtrado, que en casos extremos provoca el puentamiento de los sólidos en el E.A., evitando la transmisión de la presión hidrostática de la columna de cemento (todavía fluida) y con ello cuando la presión de formación vence a la presión equivalente debajo del puentamiento, generará la invasión de fluidos al pozo.

**Depósitos de agua libre y canalización.-** Se generan como consecuencia de una separación de los sólidos y el agua de la lechada. Pueden provocar flujo anular cuando la densidad equivalente de la columna de lechada y agua libre sea menor que la presión de formación.

**Gelificación de la lechada.-** Puede causar flujo anular posterior a la cementación debido a que la atracción de las partículas de cemento hidratado pueden evitar que la presión hidrostática se transmita totalmente a las formaciones expuestas. La columna de cemento soporta algo de su propio peso y con ello disminuye la presión equivalente.

Existen técnicas para predecir el flujo anular potencial después de cementar pero una lechada de buen diseño, en la cual se haga uso de aditivos para el control de pérdidas de filtrado puede

contribuir mucho a la prevención de este problema.

Como su nombre lo indica, la función de un aditivo contra pérdidas de filtrado es prevenir la deshidratación descontrolada de la lechada de cemento. Aunque de forma general, se acepta que el control de pérdida de fluido es benéfico para la lechada, existe cierta controversia de los valores óptimos. Aunque factores tales como la permeabilidad y presión diferencial afectan a la deshidratación de la lechada, se han obtenido buenos resultados de campo con un valor máximo de 100 (ml/30 min) para trabajos en T.R. Y 50 (ml/30min) para trabajos en liners. Estos valores pueden obtenerse fácilmente debido al múltiple rol de los aditivos contra pérdida de filtrado que son materiales orgánicos que retardan el fraguado del cemento. Aunque cuando se usan cantidades suficientes para obtener un tiempo de espesamiento adecuado se obtiene también el nivel de control de pérdida de filtrado requerido.

Se ha observado también que una concentración suficiente para controlar la pérdida de filtrado, controle también la separación de agua, dándose con esto, buenas relaciones agua/cemento. De manera análoga también controlan la gelación de la lechada, al adicionarse además del aditivo contra pérdidas de filtrado, cantidades convenientes de dispersantes.

Este último tipo de lechadas muestran un fraguado en "ángulo recto" -que es más deseable-, caracterizado por tener una consistencia muy similar a la inicial cerca del fin del tiempo de espesamiento, para luego alcanzar rápidamente su consistencia final, contrario el comportamiento de "gel" en que el fraguado es más paulatino. De manera similar presentan un más rápido desarrollo del esfuerzo gel estático, el cual es definido por Sabins como: " El tiempo transcurrido entre el desarrollo del esfuerzo gel inicial y el necesario para alcanzar un valor de 500 (lbf/100 pie<sup>2</sup>), (239 Pa)".

Otro fenómeno que se presenta con este tipo de lechadas es un tiempo gel cero. A diferencia de las lechadas que contienen lignosulfonatos para aumentar el tiempo de espesamiento, y que presentan

un desarrollo del esfuerzo gel inmediato a la interrupción del bombeo, estas lechadas muestran periodos largos (1 1/2 hr), en que este esfuerzo no se desarrolla, ejerciendo la misma presión hidrostática y controlando a la formación por más tiempo antes del fraguado.

Las lechadas de cemento saturadas de sal han sido recomendadas dentro de la industria por muchos años. La suposición es que una lechada saturada se unirá mejor a una formación con cierta salinidad. Otras razones incluyen la inhibición de las arenas y arcillas bentoníticas, y evitar aceleración de fraguado inadvertida, debida a una disolución a medida que el cemento es bombeado pasada la zona de sal.

Recientemente ha habido una tendencia a reducir sustancialmente o a eliminar esta práctica. Algunos autores como Beach y Bryant et al. recomiendan el uso de KCl en cementaciones en formaciones saladas, basado en estudios experimentales de desplazamientos con éxito utilizando KCl en lugar de retardadores como lignosulfonatos.

En todos los casos, Beach observo una mejor adherencia del cemento en zonas de gran salinidad que aquella presentada con cementos muy salados y demostró como la presión osmótica induce fracturas en los cementos muy salados colocados en formaciones de menor salinidad. Por su parte Bryant, reportó excelentes resultados en el campo Little Knife E.U.A. en la eliminación de problemas en formaciones muy saladas mediante la combinación de un agujero bien calibrado y el reemplazo de las lechadas altamente saturadas de sal por fluidos de emulsión inversa, con buen control de pérdida de filtrado y adicionadas de KCl.

Los citados autores recomiendan:

- En temperaturas muy altas 197 °F (91.6 °C) no usar KCl.
- Su uso se recomienda en cantidades de 2-3% por peso de agua.
- Los valores de pérdida de filtrado, deben mantenerse en valores de 100 (ml/30 min) o menores,

para T.R: y 50 (ml/30 min) o menor para liners.

- El agua libre debe reducirse a cero cuando se exponga a la lechada a condiciones de presión y temperatura del fondo del pozo.
- Las lechadas que cuentan con aditivos contra pérdida de filtrado y dispersantes para controlar el tiempo de espesamiento, deben preferirse en lugar de las que utilizan lignosulfonatos como retardadores, a fin de lograr un fraguado en "ángulo recto", el cual es deseable para mantener la presión hidrostática durante casi todo el tiempo de fraguado.
- Donde la temperatura exija el uso de lignosulfonatos, usarlos conjuntamente con aditivos contra pérdida de filtrado y dispersantes.

### ADITIVOS LIQUIDOS Y EN POLVO

El uso de aditivos líquidos se incremento en la década de los 70<sup>ª</sup> debido a 4 factores primordiales:

- 1) Los aditivos en polvo no podían ser mezclados e integrados confiablemente.
- 2) Se redujeron algunos problemas logísticos, abasteciendo cemento puro sin mezclar en locaciones remotas y ajustando el desempeño de la lechada mediante el mezclado de aditivos con el agua a usar en su preparación.
- 3) Se creía que los costos podrían ser menores debido a que el cemento con aditivos en seco se desperdicia, es decir, no puede usarse tiempo después en otra operación.
- 4) Los aditivos líquidos se consideraban tan buenos como los que se presentan en seco.

Grant y Rutledge realizaron un análisis de costos en dos lechadas hechas con un mismo criterio de diseño, el cual mostró que los sistemas líquidos son más caros. Para discutir las limitaciones de los aditivos líquidos, describen los factores que pueden influir en la capacidad adecuada de mezclado, y que son:

1. Contaminación.
2. Pesado inexacto.

3. Mala dispersión del aditivo en toda la mezcla.
4. Montos demasiado pequeños.
5. Aditivos en mal estado.
6. Mala supervisión.

La solución sería, por tanto, un control de calidad paso por paso.

La contaminación puede eliminarse con inspecciones visuales en los tanques, líneas, contenedores y transporte.

Debe tenerse en cuenta el peso del saco de aditivo, ya que su peso puede variar entre 47 y 54 (lbm) (21.3 y 24.5 Kg), en un saco de 50 (lbm) nominales. Otro aspecto importante es que las propiedades del aditivo varían de un lote a otro e inclusive dentro del mismo.

Una colocación adecuada de los aditivos en el tanque es importante. Se recomienda primero llenar 1/3 del tanque con cemento, la 1/2 de los aditivos otro 1/3 del cemento, la otra mitad de los aditivos y el último 1/3 del cemento; pasar 6 veces de un tanque a otro y muestrear constantemente.

Debe tratarse de evitarse concentraciones de aditivos  $< 0.2\%$  por peso de cemento, las  $< 0.1\%$  deben eliminarse, ya que, aún cuando en el laboratorio puedan realizarse, en el campo es muy improbable.

El cemento al "envejecer" -aún en 48 (hr)- puede cambiar el modo de reaccionar con un cierto tipo de aditivos sobre todo cuando se almacena en recipientes no sellados.

La tabla de la figura VI. 11 muestra los cambios en el comportamiento típico del cemento al añejarse en un recipiente no sellado.

FECHA	ESPEZAMIENTO (hr : min)	PERDIDA DE FILTRADO (ml/30 min)	AGUA LIBRE %
Junio 1988	2:43	79	0.0
Octubre 1988	3:26	100	1.1

**FIGURA VI.11 Cambios en el desempeño de un Cemento API Clase A con el Tiempo.**

Debe eliminarse el cemento no usado en un trabajo, ya que éste puede fraguar prematuramente, o no fraguar del todo, adherirse con mala calidad, permitir la formación de canales, o bien, deshidratarse.

El caso especial de los aditivos que sólo se presentan en polvo (tal como la harina de sílice), y que deben mezclarse en la planta, indican que no pueden usarse con un sistema líquido.

Entre las propiedades más difíciles de realizar con el uso exclusivo de aditivos líquidos están:

1. Fraguado en ángulo recto.
2. Prevención de flujo anular.
3. Control de agua libre.
4. Parámetros reológicos.
5. Rápido desarrollo de esfuerzo a la compresión.

La mayor limitante de un sistema líquido de aditivos es la sensibilidad a la variación de la densidad.

Esta sensibilidad, se acentúa cuando la diferencia es  $> 0.5 \text{ lb/gal}$  ( $59.9 \text{ Kg/m}^3$ ).

A partir del estudio anterior, Grant y Rutledge concluyen, y recomiendan:

- 1) Los aditivos en polvo bien mezclados deben usarse en donde sea práctico, los lignosulfonatos deben evitarse.
- 2) Las lechadas guía con cementos salados altamente gelificados (HGS) tienen la mejor cobertura de propiedades, y poca sensibilidad a los cambios de densidad.
- 3) Las lechadas de fondo con aditivos contra pérdida de filtrado y dispersantes muestran las mejores propiedades, y por tanto, deben ser utilizadas.
- 4) Los aditivos líquidos deben usarse sólo bajo las siguientes condiciones:
  - a) El sistema de mezclado sea capaz de mantener la densidad en un rango de variación de 11.9 Kg/m<sup>3</sup> (0.1 lb/gal).
  - b) El sistema de medición se pruebe para garantizar una distribución constante del aditivo.
  - c) Vigilar que los volúmenes de agua y aditivo se estén usando en las proporciones esperadas.
  - d) Se verifique la dispersión del aditivo líquido en el agua de mezclado.
  - e) Eliminar el uso de lignosulfonatos.
  - f) Se pruebe a las lechadas en un rango de 59.9 (Kg/m<sup>3</sup>), 0.5 (lbm/gal) arriba y abajo de la densidad de diseño, para determinar el efecto con la variación en la densidad.
  - g) Tener un equipo capaz de resistir la densidad a lo largo del trabajo y sensible para detectar pequeñas variaciones.
  - h) Los materiales y agua de prueba sean los mismos que en el campo.

#### UTILIZACION DE FLUIDOS DE PERFORACION SUSCEPTIBLES DE CONVERTIRSE EN CEMENTOS CON LA ADICION DE ESCORIA

Un método reciente de cementación, en donde el F.P. es convertido en un material con propiedades cementantes, similares a las lechadas de cemento Portland, es presentado por Cowan, Hale y Nahm, como alternativa para reducir las consecuencias de un mal desplazamiento del F.P., el cual propicia la formación de canales de cemento, así como un insuficiente aislamiento.

La solidificación del F.P. por medio de escoria (blast slag furnace) BSF, es aplicable a cualquier lodo base agua, aún en condiciones en donde otras técnicas presentan deficiencias.

Debido a su bajo impacto en la alteración de las propiedades del F.P., este material puede adicionarse en pequeñas concentraciones durante las operaciones de perforación. El enjarre resultante de un lodo que lo contenga, puede ser el primer sello en la cara de la formación. Además cualquier lodo que no haya sido desplazado durante la operación de cementación puede fraguar para completar el sello hidráulico y soporte estructural de la T.R.

La adición de BFS incrementa la viscosidad plástica y el esfuerzo gel del lodo, aunque lo hace en menor proporción que una cantidad equivalente de cemento Portland. Además, estas propiedades pueden controlarse mediante el uso de lignosulfonatos y dispersantes, que son fuertes retardadores.

La concentración de los aditivos citados debe aumentarse en comparación con las cantidades recomendables para una lechada de cemento Portland, ya que sus efectos pueden reducirse drásticamente al agregar los activadores de la escoria para su hidratación.

El tiempo de espesamiento y el desarrollo de la resistencia se controlan mediante alcalis comunes como sales, silicatos o hidróxidos.

El control de filtrado no es problema, pues se puede tener fácilmente valores de 100 (ml/30min) en condiciones de fondo del pozo, pero si es necesario puede usarse casi la totalidad de los aditivos para este fin utilizados.

El material es aplicable bajo condiciones donde la contaminación del cemento por el lodo tiene un gran efecto en la cementación. También en operaciones para detener una pérdida de circulación, colocación de tapones de cemento, pozos de abandono y cementaciones forzadas. Ofrece numerosas ventajas sobre los materiales convencionales. Entre otras se encuentran:

- Buen desarrollo de la resistencia a los esfuerzos.
- Propiedades reológicas similares a las del lodo.
- No se requiere el uso de espaciadores.

En pozos desviados las ventajas son claras, ya que este tipo de material tiene una suspensión de sólidos excelente, así como ausencia de agua libre; además se puede cambiar las propiedades en un rango tan amplio como en las lechadas de cemento.

Los costos son similares a una lechada hecha con cemento Portland, ahorrándose también el manejo posterior del F.P.

Una desventaja es la menor disponibilidad del material.

#### EVALUACION DE LA CEMENTACION

Después de realizada la operación, es necesario determinar si ésta se realizó de acuerdo con lo esperado. Para esto existen dos tipos de indicaciones que nos darán un grado de certidumbre sobre las acciones futuras a realizar -dependiendo de la etapa en que se encuentre el pozo-, ya sea la continuación de la perforación, la puesta en producción (en caso de haberse realizado correctamente), o bien su reparación.

#### INDICACIONES INDIRECTAS

Un medidor de temperatura en la cima del cemento, usado junto con el volumen del E.A. calculado por medio de un registro de calibración en agujero abierto, tomado antes de correr la T.R., puede indicar la presencia del desplazamiento del lodo. Por ejemplo, si la cementación primaria fue hecha con copiosos retornos y la longitud indicada en la columna de la cementación es de un 15-20% más alta que la calculada, debemos suponer que una cantidad considerable del lodo fue rebasado (se canalizó).

El registro CBL (Cement Bond Log) se usa frecuentemente para medir la cobertura hecha por el cemento en el E.A.. Este dispositivo electro-acústico, provee 3 diferentes mediciones: Señal de tiempo de viaje, señal de amplitud de la T.R. y la energía total desplegada. El CBL proporciona abundante información, pero debe considerarse como una herramienta de evaluación indirecta, debido a que no genera información directa del sello hidráulico.

El más reciente desarrollo para medir la cubierta de cemento es un dispositivo de alta frecuencia ultrasónico, que consiste en una serie de transductores. El propósito básico de la herramienta es hacer vibrar (resonar) a la T.R., y después cuantificar esta resonancia.

#### INDICACIONES DIRECTAS.

Los métodos directos de evaluación monitorean el flujo al lado de la T.R. midiendo la temperatura o anomalías sónicas (ruido) con registros que se colocan en el E.A. Cuando el gas entra a un E.A. cementado, existe una zona de enfriamiento -anomalía- debido a la expansión. El gas sufre ahora un calentamiento, que se observa a medida que se mueve hacia la región superior más fría. El agua por su parte, tiende a moverse pozo abajo después de entrar al E.A. provocando un enfriamiento de la zona en esa dirección.

Una herramienta de temperatura diferencial, que usa uno ó dos sensores, se coloca a la altura del flujo no deseado de agua y luego se rota. Los registros tomados con esta herramienta proporcionan información relativa a la presencia y localización (profundidad y azimut) del agua no deseada. La información posterior es de gran utilidad para la reparación del pozo.

Una herramienta de registro de ruido utiliza un micrófono junto con un sistema electrónico de amplificación. Si el nivel de ruido en el fondo es bajo, esto es, cuando el pozo está cerrado, el registro "oír" la entrada de fluido al pozo. Siendo más fácilmente detectable el flujo de gas que el de agua.

Seguendo la cementación de las T.R. superficiales e intermedias, es posible hacer una prueba de integridad de presión de la zapata. El procedimiento es perforar el flotador y la zapata, además de una pequeña cantidad de agujero. Se aplica suficiente presión de tal forma que la existente en la zapata, sea al menos la máxima presión hidrostática que se planea ejercer sobre ella, antes de que se ponga la siguiente sarta. Si se alcanza esta presión, puede seguirse perforando, en caso contrario, debe procederse a una cementación forzada.

La prueba más contundente y definitiva de una cementación primaria, será en todo caso una prueba de producción. Si el pozo produce los fluidos esperados y a los ritmos calculados, se efectuó una buena operación.

## CONCLUSIONES

Un conocimiento más amplio sobre las propiedades reológicas de los fluidos -especialmente los no Newtonianos-, buenas prácticas mecánicas (que incluyan movimiento y centrado de la tubería), así como un mayor y mejor control sobre el mezclado de cemento, la simulación en laboratorio de las condiciones de pozo, la calidad y el manejo de los materiales en las distintas etapas de cementación y el monitoreo de las propiedades durante el proceso, han generado un mayor número de cementaciones exitosas. Con esto, las fallas y los trabajos de reparación han disminuido considerablemente; por lo tanto, se han hecho ahorros en tiempo y dinero. Sin embargo, la mayor ganancia al lograr buenas cementaciones y por lo tanto, óptimas condiciones para una adecuada terminación, lo constituirá una buena recuperación de hidrocarburos, sin invasión de fluidos indeseables.

El control de calidad y la planeación son las claves para el trabajo exitoso. Debe procurarse prever y proveer todos los recursos humanos y materiales posibles, así como conjuntarlos de manera eficiente y oportuna para lograr una buena cementación primaria. Este evento nos ofrece la oportunidad única de aislar eficientemente la formación o formaciones productoras de aquéllas que no lo son.

Un mejor y más redituable trabajo de cementación se logra, en última instancia, bajo el compromiso de todas las partes involucradas, y cuidando cada etapa, desde el diseño hasta la ejecución. En los últimos tiempos se ha dado por tratar de manejar a la operación en un concepto integral, este es, las compañías independientes que suministraban una o algunas partes del proceso están promoviendo la cooperación entre ellas para ofrecer el trabajo completo, creando grupos interdisciplinarios que resuelven los problemas conjuntando conocimientos y puntos de vista. Los resultados les han sido satisfactorios, pues han elevado la eficiencia de cada trabajo y han reducido sus costos de operación.

La tecnología utilizada en las cementaciones se ha desarrollado bastante en poco más de noventa años; de hecho, se aplican los últimos avances de la ciencia. En el presente se utiliza tecnología de gran calidad; sin embargo, es necesario que el ingeniero dedicado a las operaciones de cementación se involucre además de los aspectos referentes a las funciones y operación del equipo, las técnicas de colocación y la metodología de la operación, en aquellos básicos que se refieren al proceso de desplazamiento del F.P. por cemento, así como a los factores que contribuyen a un buen diseño de la lechada y de la operación misma.

Actualmente existe una gran variedad de aditivos para cemento, los cuales hacen posible variar las condiciones de la lechada en rangos muy amplios. Por tanto, deben cuidarse las demás condiciones de cementación. El diseño de las condiciones necesarias durante el trabajo puede lograrse de manera satisfactoria apoyándose en aparatos de medición y simuladores.

Con la intención de predecir cada vez mejor las propiedades reológicas de las lechadas de cemento, se hace necesario el uso de modelos matemáticos que consideren el flujo a través de un E.A. excéntrico y que estén diseñados para lechadas de cemento. Los modelos de uso común están pensados para F.P. y no todos toman en cuenta el % de centrado en la T.R.

Buenas prácticas mecánicas (centrado, movimiento de tubería, etc.) no reemplazan una lechada con buenas propiedades reológicas, la complementan.

El cemento ha sido el material por excelencia utilizado en las cementaciones. Es muy difícil que deje de serlo en muchos años. Aún así, existen nuevos materiales, que valdría la pena evaluar y considerar, como el BFS que podría ser una alternativa para evitar contaminación del ambiente por lodo, una vez concluida la perforación, ya que este material se quedaría en el pozo.

Si dividimos el proceso de cementación en 1) el desplazamiento del lodo y 2) la colocación del cemento, observamos que:

El primero, que incluye la remoción del lodo gelificado, se beneficia con :

- Un régimen de flujo apropiado, ya sea turbulento, laminar efectivo, o bien, en caso de no ser posible lo anterior, con el mayor gasto que se pueda manejar.
- Un buen centrado de la T.R.
- La utilización de F.P. con bajo esfuerzo gel, así como con un buen acondicionamiento del mismo durante las últimas etapas de perforación y hasta antes de iniciar la cementación.
- La colocación del cemento (flujo uniforme del cemento, sin canalización), se propicia debido a:
  - Un buen centrado de la T.R.
  - Un adecuado diseño del espaciador, que debe ser más ligero que la lechada.
  - Lechadas con bajo esfuerzo de cedencia, buenas propiedades reológicas y buen control de filtrado.

Finalmente, toda recomendación encaminada al éxito de la operación, debe tomarse en consideración. Para lo cual un buen conocimiento y experiencia del responsable de la operación harán posible que pueda discernir cuál de ellas será la mejor, dado un grupo de condiciones específicas.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Brothers, L.E. y de Blanc, F.X.: "New Cement Formulation Helps Solve Deep Cementing Problems," J. Pet. Tech. Jun. 1989.
2. Bengo, G.: "Field Study of Offshore Cement-Spacer Mixing," SPE Drill. Eng. Sep. 1990.
3. Sauer, C.W.: "Mud Displacement During Cementing: A State of the Art," J. Pet. Tech. Sep. 1987.
4. Vidick, B.: "Critical Mixing Parameters for Good Control of Cement Slurry Quality," J. Pet. Tech. Jul. 1990.
5. Juttan, J.J. y Corrigan, E.: "Studies With Narrow Cement Thickness Lead to Improved CBL in Concentric Casings," J. Pet. Tech. Nov. 1989.
6. Marlow, R.S.: "Cement Bonding Characteristics in Gas Wells," J. Pet. Tech. Nov. 1989.
7. Calvert, D.G. y Smith, D.K.: "API Oilwell Cementing Practices," J. Pet. Tech. Nov. 1990.
8. Grant, W.H. y Dodd, E.L.: "Simplified Slurry Design Increases Wellsite Success," SPE. Drill. Eng. Sep. 1989.
9. Smith, T.R.: "Cementing Displacement Practices - Field Applications," J. Pet. Tech. Nov. 1990.
10. Haut, R.C. y Crook, R.J.: "Primary Cementing: Optimizing for Maximum Displacement," World Oil. Nov. 1980.

11. Grant, W.H., Rutledge, J.M. y Gardner, C.A.: "Quality of Bentonite and its Effect on Cement-Slurry Performance," SPE. Prod. Eng. Nov. 1990.
12. Grant, W.H. y Bergeron, H.A.: "Cement Quality-Control Program Shows Substantial Savings," SPE. Prod. Eng. Aug. 1990.
13. Grant, W.H., Granberry, V.L. y Clarke, J.W.: "Mobile Laboratory Improves Oilfield Cementing Success," J. Pet. Tech. Oct. 1989.
14. Beirute, M.R. y Cheung, P.R.: "A Method for Selection of Cement Recipes To Control Fluid Invasion After Cementing," SPE. Prod. Eng. Nov. 1990.
15. Arnold, E.S.: "Cementing: Bridging the Gap From Laboratory Results to Field Operations," J. Pet. Tech. Dec. 1982.
16. Sweetman, R.E. y Scoggins, W.C. "Acid Soluble Magnesia Cement: New Applications in Completion and Workover Operations" SPE. Prod. Eng. Nov. 1990.
17. Harari, Z.Y.: "Monitoring Short-Term Corrosion Rates in Some Oilwell Cements," April. 1990.
18. Gerke, R.R. y Simon, J.M.: "A Study of Bulk Cement Handling and Testing Procedures," SPE. Prod. Eng. Nov. 1990.
19. Lockyer, C.F., Ryan, D.F. y Gunningham, M.M.: "Cement Channeling: How to Predict and Prevent," SPE. Drill. Eng. Sep. 1990.
20. Jutten, J.J., Guillot, D. y Percevaux, P.A.: "Relationship Between Cement Slurry Composition, Mechanical Properties and Cement-Bond-Log Output," SPE Prod. Eng. Feb. 1989.

21. León Loya, J.G.: "Reología de Fluidos No-Newtonianos a Través de Conductos Circulares," IMP, Subd. Tec. Explotación - División Perforación. México 1986.
22. Clark, P.E. y Shaughnessy III, R.J.: "Rheological Evaluation of Dense Suspensions: Simulation of a Fresh Cement Paste," SPE Prod. Eng. May. 1990.
23. Guillot, D.J., D.J.Brady, S.D., Drecq, P.P. y Baker, K.C.: "Recent Technological Advances Help Solve Placement Problems in the Gulf of Mexico," IADC/SPE. 23927, Documento presentado en la Conferencia del IADC/SPE sobre Perforación de 1992 en New Orleans, Louisiana. Feb. 18 - 21, 1992.
24. Rogers, W.F.: "Composition & Properties of Oil Well Drilling Fluids," Fifth edition, Gulf Publishing Co., Houston 1984.
25. Grant, W.H., Rutledge, J.M. y Christy, R.H.: "Field Limitations of Liquid-Additive Cementing Systems," SPE. Drill. Eng. Dic. 1990.
26. Yuejin Luo, y Peden, J.M.: "Flow of Non-Newtonian Fluids Through Eccentric Annuli," SPE. Prod. Eng. Feb. 1990.
27. Martin, M., Latil, M., y Vetter, P.: "Mud Displacement by Slurry During Primary Cementing Jobs-Predicting Optimum Conditions," Documento SPE 7590 presentado en la Conferencia Anual Técnica y Exhibición, Houston, Texas, Oct. 1-3 1978.
28. "API Recommended Practice for Testing Oil-Well Cements and Cement Additives," API RP 10B Twenty-First Edition Dec. 1979.
29. Smith, D.K.: "Cementing, SPE Monograph," fourth edition, 1987.

30. "Halliburton Technical Data Cementing," Halliburton Co., Oklahoma 1979.
31. Lockyear, C.F. y Hibbert, A.P.: "Integrated Primary Cementing Study Defines Key Factors for Field Success," J. Pet. Tech. Dec. 1989.
32. Cowan, K.M., Hale, A.H. y Nahm, J.J. "Conversion of Drilling Fluids to Cements with Blast Furnace Slag: Performance Properties and Applications for Well Cementing," SPE 24575. Documento presentado en la 67th Conferencia Anual Técnica y Exhibición, Washington, D.C. Oct. 4-7 1992.