



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA
LA EVALUACIÓN DE LECHADAS
DE CEMENTO EMPLEADAS EN
AGUAS PROFUNDAS Y ULTRA
PROFUNDAS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A:

GÓMEZ MARTÍNEZ JOSÉ FRANCISCO.

DIRECTOR DE TESIS: ING. Ma. CRISTINA AVILÉS ALCÁNTARA.

MÉXICO D. F., CD. UNIVERSITARIA, FEBRERO 2016





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA
LA EVALUACIÓN DE LECHADAS
DE CEMENTO EMPLEADAS EN
AGUAS PROFUNDAS Y ULTRA
PROFUNDAS.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO**

P R E S E N T A:

GÓMEZ MARTÍNEZ JOSÉ FRANCISCO

DIRECTOR DE TESIS: ING. Ma. CRISTINA AVILÉS ALCÁNTARA.

MÉXICO D. F. CD. UNIVERSITARIA, FEBRERO 2016



Índice de Contenido	Página
Dedicatoria.	i
Agradecimientos.	ii
Resumen.	I
Introducción.	II,III
Generalidades.	IV,V
Capítulo I. Perforación en Aguas Profundas.	
1.1 Aguas Profundas. Retos en la Perforación de Agua Profundas y Ultraprofundas.	1
1.2 Posicionamiento Dinámico.	6
1.3 Compensación de movimientos en la superficie.	7
1.3.1 Compensadores de cable de registros eléctricos.	7
1.3.2 Compensador de Movimiento Vertical (CMV).	7
1.4 Perforación.	7
1.5 Sentado de Tubería de Revestimiento.	8
1.6 Seguridad en el control del pozo.	8
1.7 Operaciones misceláneas.	8
1.8 Métodos básicos del funcionamiento del compensador de movimiento vertical.	8
1.9 Compensador montado en la polea viajera.	9
1.10 Cilindro tipo Compresión.	9
1.11 Operación de un compensador de movimientos verticales, comienzo o inicio de la perforación.	9
1.12 Sentado de la tubería de revestimiento.	10
1.13 Sistema de tensionadores de líneas guía en plataformas semisumergibles.	10
1.14 Base guía temporal y permanente.	11
1.15 Conductores Marinos (RISER).	12
1.16 Componentes básicos de un sistema conductor marino para perforación.	13
1.17 Juntas del conductor marino.	14
1.18 Líneas de matar y estrangular.	14
1.19 Junta telescópica.	14
1.20 Efecto de flotación en conductores marinos (RISER).	14
1.21 Determinación de la longitud del Riser.	15
1.22 Revisión analítica de sistemas de conductores.	19
1.23 Capacidad de Tensión.	20
1.24 Carrera del cable de acero.	20
1.25 Velocidad de respuesta.	20
1.26 Cilindro doble acción, tipo compresión.	21
1.27 Vehículo de operación (ROV).	21
1.28 Selección del sistema de explotación.	22
1.29 Problemas de perforación en aguas profundas y ultraprofundas.	22
1.30 Problemas de posicionamiento del equipo.	23
1.31 Manejo de energía.	23
1.32 Sistemas de posicionamiento dinámico.	23
1.33 Posicionamiento.	24
1.34 Problemas ambientales.	24
1.34.1 Corrientes Cíclicas.	24

1.34.2 Abandono por huracán.	24
1.35 Problemas de control de los Preventores.	24
1.36 Conector inferior del Riser (LMRP).	25
1.37 Otros sistemas para el control de Preventores.	25
1.38 Problemas de manejo de los Risers.	25
1.39 Formación de Hidratos.	26
1.40 Problemas con la tubería de revestimiento.	26
1.41 Requerimientos de personal.	27
1.42 Costos.	27
1.43 Expansión del mercado.	28

Capítulo II. Historia del Cemento.

Introducción.	30
2.1 Historia del cemento.	31,32
2.2 Definición de cemento portland.	33
2.3 Fabricación y Composición del cemento.	34
2.3.1 Materias Primas.	34
2.3.2 Impurezas.	34
2.3.3 Selección de materiales.	35
2.4 Procesos de fabricación del cemento.	37
2.4.1 Proceso de mezcla de las materias primas.	37
2.4.2 Proceso Seco.	37
2.4.3 Proceso Húmedo.	39
2.4.4 Proceso de Calcinación.	40
2.4.5 Molienda del Clinker.	42
2.4.6 Efectos de la hidratación de las fases del Clinker.	42
2.4.7 Efectos de la hidratación del C3S y del C2S.	43
2.4.8 Comportamiento de la hidratación del C3S y el C2S en función de la temperatura y el tiempo.	44
2.4.9 Diagrama Térmico de Hidratación del C3S.	45
2.5 Fases del diagrama térmico.	46
2.5.1 Periodo de preinducción.	46
2.5.2 Periodo de inducción.	46
2.5.3 Periodo de aceleración.	47
2.5.4 Periodo de desaceleración.	47
2.5.5 Periodo de difusión.	47
2.6 Hidratación de las Fases del Clinker.	47
2.6.1 Hidratación de la fase Aluminato C3A.	47
2.6.2 Fase Aluminato. Control de la reacción de hidratación con yeso.	48
2.6.3 Diagrama térmico de la hidratación del C3A.	49
2.6.4 Diagrama térmico del cemento "Portland".	50
2.7 Efectos físicos de la hidratación del cemento.	50
2.7.1 variación del volumen.	50
2.7.2 Efecto de la temperatura.	51
2.7.3 Fragües instantáneo y falso.	51
2.7.4 Efecto del envejecimiento.	51
2.7.5 Influencia de los álcalis.	52
2.7.6 Efecto de la distribución de partículas.	52
2.7.7 Resistencia a los sulfatos.	52

2.7.8	Influencia de la distribución del tamaño de partícula.	54
2.7.9	El encogimiento externo.	54
2.8	Composición química del cemento.	55
2.9	Fases Cristalinas del Cemento.	55
2.9.1	Aluminato Tricálcico.	55
2.9.2	Alúmino Ferrito Tetracálcico.	56
2.9.3	Silicato Tricálcico.	56
2.9.4	Silicato Dicálcico.	56
2.10	Propiedades físicas y químicas de los cementos.	58
2.10.1	Gravedad Específica.	59
2.10.2	Peso Volumétrico.	59
2.10.3	Blaine.	59
2.10.4	Distribución del tamaño promedio de las partículas.	60
2.10.5	Tamaño promedio de las partículas.	60
2.10.6	Requerimiento de agua normal.	60
2.10.7	Requerimiento de agua mínima.	60
2.10.8	Rendimiento de Lechada.	60
2.10.9	Requerimiento de agua.	60
2.10.10	Requerimiento de agua en pozo.	60
2.10.11	Densidad de la lechada.	60
2.10.12	Ángulo de talud natural del cemento.	60
2.11	Requerimientos Químicos del cemento.	61
2.12	Requerimientos Físicos del cemento.	63
2.13	Clasificación API de los cementos y su equivalente en ASTM.	66
2.14	Clasificación del API.	68
2.15	Comparación con los cementos venezolanos.	71
2.16	Cementos especiales.	73
2.16.1	Cementos de Yeso.	73
2.16.2	Cementos Base Diesel.	74
2.16.3	Cementos Látex.	74
2.16.4	Cementos Plásticos.	76
2.16.5	Cementos para Ambientes Fríos.	76
2.16.6	Cementos Espumosos.	78
2.16.7	Cementos Tixotrópicos.	79
2.16.8	Cementos Antiácido.	82, 83
2.16.9	Cementos Expansivos.	84
a.	Cementos Portland-Puzolánicos.	86
2.16.10	Cementos Compresibles.	87
2.16.11	Cementos Fibrosos.	87
2.16.12	Cementos Epóxicos.	87
2.16.13	Cementos Ultrafinos.	87
2.16.14	Cementos Escoria.	88
2.16.15	Cementos Salados.	
2.16.16	Cemento CLASE H-PEMEX.	91
2.17	Pruebas físicas de calidad del cemento.	100
2.18	Equipo utilizado para pruebas de laboratorio.	100
2.19	Cementación.	101
2.19.1	Clasificación de las cementaciones.	101
2.19.2	Descripción de la cementación Primaria.	101
2.19.3	Objetivos de las cementaciones Primarias.	102
2.19.4	Descripción de la Cementación Forzada.	102

2.19.5	Objetivos de las cementaciones forzadas.	102
2.19.6	Descripción de los tapones de cemento.	102
2.19.7	Objetivos de los tapones de cemento.	102
2.20	Categorías de los aditivos y sus funciones.	103
2.20.1	Aceleradores.	103
2.20.2	Retardadores.	104
2.20.3	Extendedores o Aligerantes.	105
2.20.4	Densificantes.	106
2.20.5	Dispersantes o reductores de fricción.	106
2.20.6	Controladores de filtrado.	107
2.20.7	Controladores de Pérdida de circulación.	107
2.20.8	Aditivos especiales.	108
2.20.9	Controladores de Gas.	108
2.20.10	Controladores de agua libre.	109
2.20.11	Antidegradantes.	109
2.21	Lechadas de Cemento.	109
2.22	Tipos de Lechadas.	109
2.22.1	Lechada de Diseño.	110
2.22.2	Lechada de Base	110
2.22.3	De acuerdo al Método o Proceso de elaboración.	110

Capítulo III. Evaluación de la calidad de los cementos.

3.1	Pruebas de laboratorio.	111
3.2	Introducción a las normas API relacionadas con el servicio de cementación.	111
3.3	Normas utilizadas en el servicio de cementación.	112
3.4	Preparación de una Lechada de Cemento.	112
3.5	Determinación de la densidad de la lechada.	116
3.6	Determinación de las propiedades reológicas usando un viscosímetro rotacional y un Consistómetro Atmosférico.	118
3.7	Pérdida de Fluido por Filtrado en una Lechada de cemento.	125
3.8	Tiempo de espesamiento o Tiempo Bombeable. Consistómetro.	131
3.9	Esfuerzo compresivo.	140
3.10	Determinación del contenido de agua libre.	147

Capítulo IV. Lechadas Espumadas.

4.1	Definición de Lechada Espumada.	150
4.2	Características de las Lechadas Espumadas.	150
4.3	Propiedades del Nitrógeno.	151
4.4	¿Pero, como se genera físicamente la espuma en las lechadas?	151
4.5	Prácticas Recomendadas para la Preparación y realización de Pruebas de Lechadas de Cemento Espumado a Presión Atmosférica.	152
4.5.1	Diseño de la Lechada.	152
4.5.2	Temperatura de Fondo.	153
4.5.3	Temperatura Circulante de Fondo.	153
4.5.4	Temperatura Estática de Fondo.	154
4.5.5	¿Pero que es el Cemento Espumado?	154

4.5.6	Proceso Zone Seal “Cemento Espumado”	156
4.5.7	¿Cómo se hace el cemento espumado en Campo?	157
4.5.8	¿Dónde y por qué se utiliza el cemento espumado?	158
4.5.9	Cementos Ligeros.	159
4.5.10	Sistemas Espaciadores.	159
4.5.11	Compatibilidad de Fluidos.	160
4.5.12	Tipos de Espaciadores.	160
4.6	Características que nos provee un cemento espumado.	161
4.6.1	Resistencia compresiva-Densidad.	161
4.6.2	Ductilidad.	161
4.6.3	Remoción de lodo.	161
4.6.4	Expandible.	162
4.6.5	Prevención de la migración de gas.	162
4.6.6	Mejora la aislación Zonal.	162
4.6.7	Imparte mejor Control en Pérdidas de Fluido.	163
4.6.8	Aislamiento.	163
4.6.9	Estable a Altas Temperaturas.	163
4.6.10	Compatibles con Cementos Diferentes al Portland.	163
4.6.11	Logística de mezclado.	163
4.6.12	Rendimiento de Volumen.	163
4.6.13	El proceso de Espumado no está limitado a lechadas de cemento.	164
4.6.14	Baja Permeabilidad.	164
4.6.15	Estable a Invasiones de Fluido.	164
4.6.16	Sinergia en operaciones de Mezclado.	164
4.7	Cálculo de la composición de una lechada de cemento base con o sin surfactante (tensoactivo).	165
4.8	Determinación del volumen de lechada y de su masa.	168
4.8.1	Determinación del volumen de lechada y de su masa cuando se conoce El contenido de gas.	169
4.8.2	Determinación del volumen de lechada y de su masa cuando se conoce la densidad de la lechada de cemento espumado.	170
4.9	Masa del surfactante o Tensoactivo (s) y de la lechada.	171
4.10	Aparatos y/o Dispositivos para la generación de Lechadas espumadas.	173
4.11	Conjunto multi-cuchilla (stacked-blade) de montaje o de cuchillas apiladas, para la generación de Lechadas espumadas.	174
4.12	Determinación del volumen del recipiente de mezcla.	175
4.13	Preparación de pasta o de la lechada de Cemento Base.	177
4.14	Medición de la Densidad.	178
4.15	Método y Desarrollo de la elaboración de Pruebas atmosféricas a lechadas de Cemento Espumado.	180
4.16	Preparación de la lechada de cemento espumado a presión atmosférica.	180
4.17	Generación de la lechada de cemento espumado.	181
4.18	Ejemplo de cálculo para la preparación de la lechada de cemento espumado a presión atmosférica.	183
4.19	Determinación de la densidad de la lechada de cemento espumado.	191
4.20	Determinación de la estabilidad de la base de la lechada de cemento espumada.	193
4.21	Estabilidad de la lechada de cemento espumado sin preparar (sin fraguar).	195
4.22	Prueba de agua libre.	196
4.23	Estabilidad de la lechada de cemento espumado preparado (fraguado).	198
4.24	Evaluación de la estabilidad de la lechada de cemento espumado a una temperatura < a 90°C (194 ° F).	201

4.25	Los signos de inestabilidad en la espuma.	203
4.26	Determinación de la resistencia a la compresión a una lechada espumada.	204
4.27	Determinación de la permeabilidad.	207
4.28	Determinación de otras propiedades de la base de la lechada de cemento sin espumar.	208
4.29	Determinación del tiempo de espesamiento.	208
4.30	Determinación de la pérdida de fluido por Filtrado.	210
4.31	Determinación de las propiedades reológicas.	213

Capítulo V. Cementación Espumada.

5.1	Historia del Cemento Espumado.	215
5.2	Como se genera la espuma en la Cementación.	215
5.3	Ejecución de la Operación de Cementación en el Campo.	216
5.4	Propiedades del Cemento Espumado.	216
5.4.1	Prueba de Densidad.	216
5.4.2	Estabilidad.	216
5.4.3	Prueba de Reología.	216
5.4.4	Espuma y Presión (Definición de QE).	217
5.4.5	Prueba en la Pérdida de Filtrado.	217
5.4.6	Resistencia a la Compresión.	217
5.4.7	Permeabilidad.	218
5.4.8	Agua libre.	218
5.4.9	Estabilidad.	218
5.5	Beneficios del Cemento Espumado.	218
5.6	Compatibilidad-Versatilidad.	219
5.7	Tipos de trabajo.	219
5.7.1	Gasto de N2 Constante.	219
5.7.2	Gasto de N2 por etapas.	219
5.7.3	Proceso controlado.	219
5.7.4	Proceso no controlado.	219
5.8	Parámetros claves del cemento espumado.	221
5.8.1	La calidad de la espuma.	221
5.8.2	Densidad de la Espuma.	221
5.8.3	Rendimiento de la espuma.	221
5.8.4	Efectos sobre el cemento espumado por efecto U.	222
5.9	Requerimientos del Equipo de cementación Espumada y del Personal.	222
5.10	Equipo.	223
5.10.1	Caja Marina.	223
5.10.2	Inyección de espumante y Estabilizador.	224
5.10.3	Métodos de Inyección Espumante.	224
5.10.4	Unidades Eléctricas con Control de Proceso.	224
5.10.5	Unidades Hidráulicas con Control de Proceso.	224
5.10.6	Bomba de Nitrógeno.	224
5.10.7	Tanque de Nitrógeno.	225
5.11	Personal.	226
5.11.1	Generador de Espuma y Accesorios de Alta Presión.	226
5.11.2	Inyección de espumante y Estabilizador.	227
5.11.3	Métodos de Inyección Espumante.	227
5.11.4	Unidades Eléctricas con Control de Proceso.	227
5.11.5	Unidades Hidráulicas con Control de Proceso.	227

5.12	Manifol Removedor de Espuma.	228
5.13	Permeabilidad del cemento espumado generado a diferentes presiones.	229
5.14	Conclusiones.	230

Capítulo VI. Gradiente Térmico.

6.1	Definición y Obtención del Gradiente Térmico.	231
6.2	Ejercicio: Caso de ejemplo para la obtención de los grados y presiones por cada metro de gradiente.	231
6.3	Obtención del Gradiente Térmico.	233
6.4	Obtención de la temperatura BHST., TEF=Temperatura Estática de Fondo [°F/100ft] a la profundidad requerida a cementar.	234
6.5	Cálculo del número de Cédula API a la que se someterá el diseño de lechada en el Consistómetro Presurizado HP-HT para cementos.	235
6.6	Obtención de los grados y presiones por cada metro.	236
6.7	Temperatura y Presión de Circulación Real.	236
6.8	Tiempo bombeable de lechada de cemento.	240
6.9	Calculo del Rendimiento y Requerimiento de Agua para el caso de ejemplo de las densidades propuestas $\rho=1.60$ [gr/cm ³] y $\rho=1.90$ [gr/cm ³].	242
6.10	Criterios para correr pruebas de Tiempo Bombeable según el Tipo de Operación.	245
6.10.1	Cementación de TR.	245
6.10.2	Cementación de Linner.	245
6.10.3	Operaciones de TxC inyectado.	246
6.10.4	Operaciones de TxC con TF.	246
6.10.5	Operaciones con CF.	247
6.10.5.1	Para casos en que la BHCT sea menor de 300 °F.	247
6.10.5.2	Para casos en que la BHCT sea igual o mayor de 300 °F.	247
6.11	Cálculo del Requerimiento de Agua y Rendimiento para una Lechada con Densidad Conocida. Método de volumen absoluto.	248
6.11.1	Ejemplo 1.	248
6.11.2	Ejemplo 2.	250
6.11.3	Ejemplo 3.	252
6.11.4	Ejemplo 4.	254

Capítulo VII. Análisis de Conclusiones y Resultados (Ventajas y Desventajas).

7.1	Ventajas y Desventajas de los cementos Espumados.	257
7.2	Ventajas de los sistemas de espumados en conjunto.	257
7.3	Las permeabilidades típicas de la lechada de cemento espumado como una función de la densidad.	260
7.4	La conductividad Térmica de las lechadas de cemento Espumados.	260
7.5	Migración de Gas.	261
7.6	Ventajas de los sistemas de Cemento energizados.	262
7.7	Prueba de Estrés o esfuerzo a gran escala a una lechada de cemento convencional.	262
7.8	Prueba de esfuerzo a gran escala a una lechada de cemento espumado.	262
7.9	Ventajas de los sistemas de espuma durante la hidratación del cemento.	263
7.10	Estable a los intercambios.	264

7.11	Aplicaciones de los cementos espumados.	264
7.12	Gas y Agua. Problemas de Afluencia.	265
7.13	Las lechadas de Cemento Espumado una opción para el desarrollo de pozos en aguas Profundas y Ultraprofundas.	266
7.14	Terminaciones históricas:	266
7.15	Cemento Espumado con Pérdida de Circulación durante las operaciones de cementación de tuberías de revestimiento primarias.	267
7.16	Cemento energizado empleado durante la Pérdida de Circulación para un Liner completo o una sarta de producción en las operaciones de cementación, Casos Históricos.	270
7.17	Problemas de cementación en sartas de Producción y Liner:	270
7.18	Cementación espumada en pozos Horizontales.	273
7.19	Cementación Horizontal de un Liner para integridad y futuras Remediaciones.	274
7.20	Atributos y Propiedades de la Cementación espumada.	274
7.21	Simulador Computarizado de trabajos compresivos, SQZSIM 1 & 2.	275
7.22	Costos y Beneficios de la Cementación espumada.	276
7.23	Terrenos Ubicación Diseño de disposición.	277
7.24	Ingeniería de Diseño.	278
7.25	Ventajas del Empleo del software OPTICEM 3.1	279
7.26	Control a través de la adquisición de datos y monitorización de empleo.	279
	Índice de Contenido de Figuras.	281
	Apéndice.	VI-XXXI
	Anexo. Ejemplo de Cementación Espumada-Halliburton Company Services.	XXXII-LXIV
	Bibliografía.	LXV,LXVI

DEDICATORIA.

Este trabajo lo dedico a mis padres y hermanos quienes siempre estuvieron al pendiente de mí en todos sentidos.

Madre, este trabajo fue realizado pensando en ti. Siempre quise verte saludable pero desgraciadamente el tiempo y la vida traen sorpresas así como retos en los momentos menos pensados y a veces con la guardia abajo y las ganas de seguir vivo a media asta. Pero tu fuerza corporal y tu sonrisa me hicieron entender ese gran luchador e imponente gladiador que eres en esta vida, por tanto tuve ese ejemplo que una madre sabe dar como la oportunidad para demostrarme que todas aquellas carencias que pasamos fueron y son el motivo por el cual yo ahora te doy este regalo.

Sin ti no sería nada, gracias por enseñarme a vivir y a luchar diariamente...infinitamente gracias por tu fuerza, por tus esfuerzos, por tu lucha incansable ante la vida y sus retos, gracias por todo el sustento, el cobijo y abrigo que solamente una madre sabe dar a sus hijos. Te amo mamita polla.

También dedico este trabajo a esos padres adoptivos que me brindaron la claridad y lucidez primero, para entender la situación de mi niñez y después para luchar y salir adelante con esa gran sonrisa con que nos cobijaban, gracias padrinos Servando Soto Arellano y Antonia Martínez Medina.

Gracias a mis tíos Darío Martínez Iniesta, y Maura Medina por estar en ese momento tan importante de fe, amor, y fuerza emocional para mi madre. Infinitamente gracias por todo su apoyo para mi familia y mi casa.

También te dedico este trabajo Padre, primero por darme esa semilla para que existiera en este mundo, gracias por ese corazón de niño por esa sonrisa hermosa y esos ojos encantadores, y por estar conmigo cuando más te buscaba. No olvidare esa mañana despertando en tu casa, y regalarme esa sonrisa si decirme nada solo tus ojitos llenos de lagrimitas con felicidad. Sé que te hubiese gustado muchísimo estar presente en esta etapa de mi vida, sé que me escuchas y me acompañas siempre, gracias por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a DIOS primero por permitirme llegar a esta etapa de mi vida, agradezco todos los días de vida que me brindas, pues cada día que despierto es una nueva oportunidad de creer en mí, crecer, luchar y esforzarme.

También te agradezco todo lo otorgado a mi árbol genealógico pasado, presente, futuro y al que ya no alcanzare a conocer, pues a partir de este momento se escribe un libro nuevo en nuestra familia.

Agradezco Infinitamente el amor de mi padre Cipriano Gómez Hernández (QED), ya que me dejo esa chispa para siempre ver en los ojos el amor a la vida.

A mi madre Isabel Martínez Iniesta, quien me dio sin esperar nada a cambio, todas las enseñanzas para sonreír a la vida y saber vivir cada día como si fuera el último de esta hermosa vida.

Agradezco a mis hermanos Daniel Olegario Soria Martínez y a Guadalupe Ofelia Gómez Martínez quienes fueron parte importante en mi crecimiento y disciplina. Mí querido hermano me enseñaste a no cansarme y buscar siempre la disciplina. Mi querida hermana me demostraste que para vivir es necesario sonreír, siempre me diste casa, vestido y sustento., por lo cual siempre estaré en deuda contigo.

Agradezco infinitamente el amor que siempre nos brindaron mis padrinos Antonia Martínez Medina y Servando Soto Arellano, quien aun siendo jóvenes ambos y con sus múltiples labores se dieron el tiempo de educarnos de forma maternal, y nos regalaron ese cobijo cuando éramos niños. No olvidare esas deliciosas paletas después de la salida de la primaria, ni a los chaleques.

Madre, soy lo que soy ahora por ti, mis palabras no bastan para describir lo súper agradecido por traerme a la vida, tampoco he olvidado cuando vendíamos dulces en una esquina y tampoco cuando disfrutaba con mi padre esas paletas triplemente cubiertas de chocolate.

Sé que los tiempos fueron difíciles, pero nada ni nadie es eterno y no hay mal que por bien no venga, pues ÉL provee a manos llenas con amor, abundancia y en perfecto equilibrio.

Agradezco a cada uno de los profesores en mi formación, pues la máxima casa de estudios UNAM me brindo las bases necesarias para ser una gran profesional.

Agradezco los conocimientos brindados por los Ingenieros en aquella estancia realizada en Reforma-Chiapas, en especial al Ing. Juan Ángel Andrade de PEMEX Servicio a Pozos y al Ing. Lenin Ocaña por su paciencia y apoyo HALLIBURTON.

Agradezco mucho a la Ing. María Cristina Avilés Alcántara por creer en mí y por estar al pendiente de mi proceso no solo académico, sino también por el de la salud de mi madre.

Agradezco el apoyo, los conocimientos y el cariño y afecto de cada uno de mis compañeros de carrera, quien con su apoyo pasamos esa hermosa etapa de estudiantes. Con gran cariño al Ing. Roberto Alejandro Ortega Castillo quien con su constancia y ejemplo fue motor para enseñarme lo valioso que es el tiempo y la fuerza que otorga la unión fraternal de la familia. Y con gran respeto al Ing. Juan Manuel González Espinosa por demostrarme que no existe edad para buscar realizar tus metas, que no hay tiempo para sentirse cansado que siempre debemos de buscar la solución a todo y por ese gran ejemplo de lucha constante e incansable, gracias por tus sabias palabras amigo y por esa hermosa y gran humildad que solo un ser humano puede tener y brindar a otros.

RESUMEN

En la actualidad algunos de los pozos más difíciles de ser perforados por nuestra industria se encuentran en zonas de aguas profundas en el Golfo de México. Muchos de estos pozos se encuentran en profundidades de agua de 8,000 pies o más y varios están dirigidos a los yacimientos alrededor 30,000 pies y más allá.

Los ingenieros de perforación se enfrentan a muchos retos en la planificación de operaciones de perforación y terminación de dichos pozos. No hay muchas plataformas disponibles para perforar en aguas ultra profundas, e incluso las plataformas modernas, capaces de operar en este entorno presentarán limitaciones que van desde la densidad del lodo a ser utilizado, debido a las restricciones verticales del riser, y la capacidad de carga del gancho para correr tuberías de Revestimiento intermedias muy pesadas que superarán fácilmente el millón de libras.

El pozo mismo presentará muchos problemas, incluyendo la alta presión y la alta temperatura de las formaciones, la necesidad de múltiples sartas de revestimiento, formaciones inestables, la limpieza del pozo, la presencia inesperada de las zonas de bituminosas, enormes capas de sal, así como la necesidad de un ensanchador, es difícil de hacer la elaboración de un programa de evaluación eficientes etc, por el lado de terminación, los desafíos pueden ser aún más exigentes, como la necesidad de completar varias zonas y tratar de minimizar las futuras operaciones de reparación costosas.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer al lector un panorama general de la problemática que existe en la perforación en aguas profundas, algunos de los equipos empleados en ella, así como la tecnología formulada aplicada en el desarrollo de nuevos fluidos empleados en aguas profundas y Ultra profundas solo en la parte de Cementación de Pozos.

Así mismo se describe la metodología para el diseño, balance y elaboración de lechadas espumadas empleadas hoy día en el Golfo de México y alrededor del mundo, método que seguirá vigente por muchos años en muchas partes del mundo en la industria del Petróleo.

Este trabajo comprende desde el desarrollo y valoración de las Lechadas Convencionales hasta la Tecnología Espumada empleada por HALLIBURTON y SCHLUMBERGER bajo un sistema riguroso de creación y empleo de esta tecnología en los Servicios a Pozo por parte de nuestra empresa PEMEX.

INTRODUCCION

Perforación en Aguas Profundas

El potencial de la exploración y producción en aguas profundas es considerable en muchas locaciones costa fuera por todo el mundo. En general, la perforación en aguas profundas tiene un mayor grado de dificultad que la perforación convencional, y presenta muchos retos operacionales. Los recientes avances tecnológicos han motivado la expansión actual de la perforación y producción en aguas profundas, y la tendencia alrededor del mundo sigue siendo hacia aguas más profundas. La selección y aplicación del fluido correcto es uno de los factores claves para la perforación exitosa en aguas profundas.

Cuando se usa el término “aguas profundas” para describir la perforación y producción, puede significar varias cosas. Sin embargo, a los efectos de este capítulo, este término se refiere a los pozos perforados en profundidades de agua mayores que 1,500 pies. Estos pozos se caracterizan por el uso de equipos de perforación flotantes, posicionados dinámicamente o anclados por cadenas, del tipo de plataformas semisumergibles o buques de perforación, que usan cabezales de pozo submarinos y largos sistemas de riser (ver la Figura 1). Los pozos son perforados en formaciones más recientes que tienen perfiles de gradiente de fractura a presión poral más estrechos, requieren un mayor número de tuberías de perforación y generan mayores costos de operación.

Debido a los altos costos diarios de operación, la selección del fluido de perforación correcto es crítica. Si se logra mejorar el rendimiento, los costos del fluido de perforación estarán justificados, ya que producirán ahorros globales.

Muchos de los temas descritos en este capítulo serán aplicables a cualquier pozo para el cual se necesite un equipo de perforación que use un cabezal de pozo y un sistema de riser submarinos. Las dificultades relacionadas con la perforación, completación y producción de estos tipos de pozos exigen un diseño minucioso de los sistemas de fluidos.

Una lista de los factores y las consideraciones relacionadas con el diseño de los sistemas de fluidos incluye:

- Hidratos de gas.
- Geología/formaciones reactivas.
- Presión poral y bajos gradientes de fractura.
- Volúmenes del riser/diseño/logística de pozo con tubería de revestimiento grande.
- Pérdida de circulación.
- Temperaturas bajas de la línea de flujo.
- Limpieza del pozo.
- Control del pozo.
- Altos costos diarios del equipo de perforación.

El diseño y la aplicación del sistema de fluido correcto requieren la evaluación de cada uno de estos factores con respecto a su impacto sobre el proyecto en aguas profundas. No todos los pozos en aguas profundas presentarán todos los factores indicados anteriormente, pero muchos de éstos estarán presentes. Este capítulo describe a cada uno de estos factores.

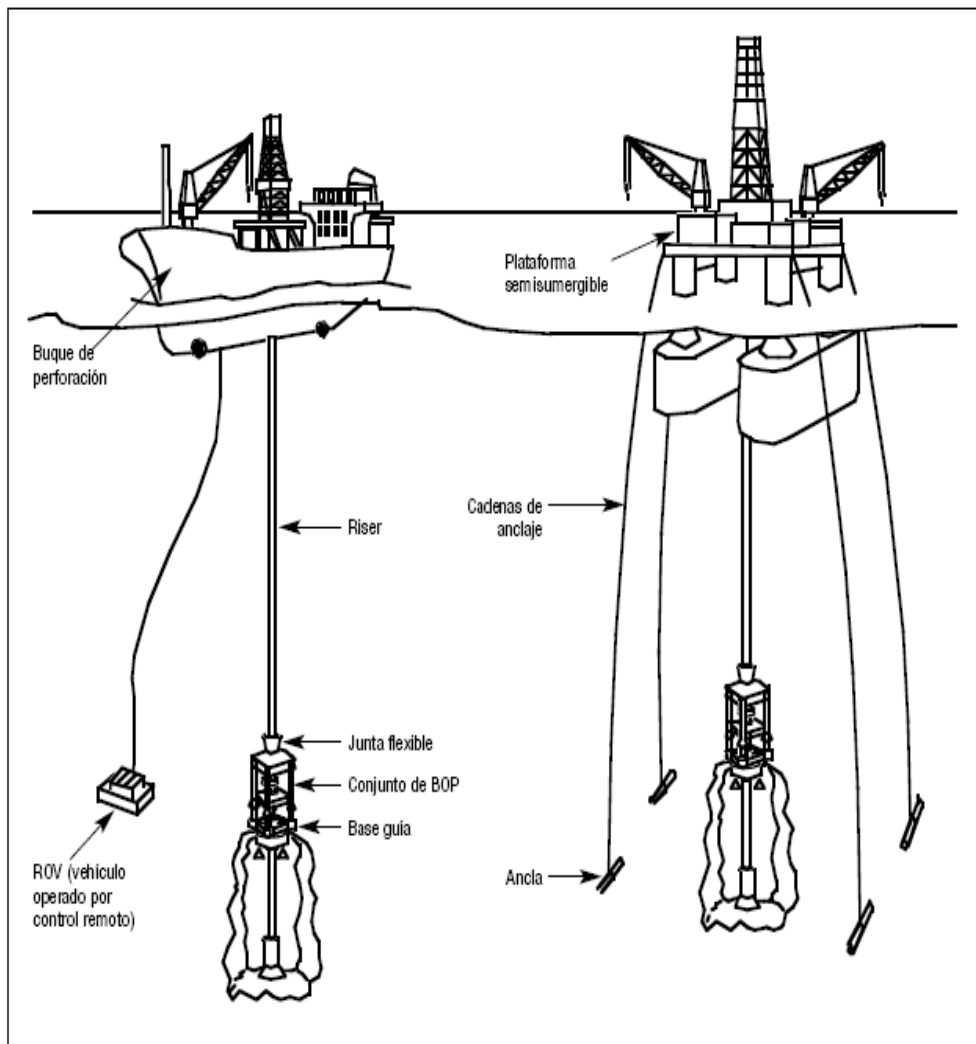


FIGURA 1. ILUSTRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE PERFORACIÓN EN AGUAS PROFUNDAS.

Generalidades.

Antes de describir los retos de la perforación en aguas profundas, se requiere lograr un entendimiento básico de los equipos de perforación y aparejos usados para perforar estos pozos.

Como se mencionó anteriormente, las plataformas semisumergibles y los buques de perforación son los tipos básicos de equipos de perforación usados para perforar en aguas profundas. Las profundidades de operación para los buques de perforación pueden variar de cientos de pies a más de 10,000 pies. En general, los buques de perforación son usados para perforar en las aguas más profundas y en las locaciones más remotas. Una vez que los pozos descubridores en aguas profundas han sido perforados, se suelen usar plataformas y equipos de perforación fijos o flotantes especialmente diseñados para desarrollar y producir estos campos. En general, las plataformas semisumergibles se limitan a profundidades de agua de 6.500 pies o menos.

Las plataformas semisumergibles y los buques de perforación tienen una característica en común: son plataformas flotantes de perforación que suben y bajan debido a la acción de las mareas y de las olas. Estos equipos de perforación tienen compensadores de movimiento que atenúan la acción de las olas y permiten mantener constante el peso aplicado sobre la barrena y la tensión impuesta sobre el riser. Los Preventores de Reventones (BOPs) son instalados sobre el fondo marino y conectados al equipo de perforación por un sistema de riser. El Riser es un sistema de tuberías que conectan el flujo de lodo desde el pozo hasta el equipo de perforación ubicado en la superficie. Además, el sistema de riser incluye líneas redundantes de estrangular y matar, y generalmente una línea dedicada de circulación de lodo para permitir una mayor velocidad anular en el riser de gran diámetro a fin de mejorar la limpieza del pozo.

En aguas de poca profundidad a profundidad media, estos equipos de perforación están amarrados a anclas ubicadas en el fondo marino. En profundidades de agua extremas, se usa un sistema de posicionamiento dinámico con hélices propulsoras para mantener el equipo de perforación encima de la locación, sin que sea necesario usar líneas de amarre y anclas. El posicionamiento dinámico, a veces llamado mantenimiento dinámico de la posición, es más común en los buques de perforación y las plataformas semisumergibles de aguas ultra-profundas.

Típicamente, se usa una señal acústica con sonar y un Vehículo Operado por Control Remoto (ROV) con video para posicionar el equipo de perforación y conectar el riser al conjunto de BOP submarino. El riser debe ser sostenido por el equipo de perforación para impedir que la presión hidrostática del agua y el peso del riser causen el colapso (pandeo) del riser, de la misma manera que se introduce la columna de perforación bajo tensión para prevenir el pandeo. Por lo tanto, el riser debe ser sometido a una tensión mientras que está conectado. Se suele revestir el riser con una camisa de espuma para aumentar su flotabilidad y reducir la carga sobre el equipo de perforación. El riser tiene una junta flexible en la parte superior para permitir el movimiento causado por las olas, y conexiones giratorias con unión esférica arriba y abajo, para permitir el movimiento angular.

El conjunto de BOP submarino está unificado con doble redundancia y puede quedar instalado en el fondo marino, aun cuando se desconecta y se recupera el riser. La mayoría de los Risers tienen por lo menos cuatro líneas separadas de estrangular y matar que pueden ser activadas, si es necesario. Los equipos de perforación flotantes tienen sistemas desviadores de reventones, además de las líneas de estrangular y matar y de los conjuntos de BOP submarinos. Los sistemas desviadores se usan para manejar las situaciones de control de pozo en intervalos poco profundos y las situaciones incontrolables. Estos sistemas “desvían” el flujo de fluidos, alejándolo del cuerpo principal del equipo de perforación.

En los casos de control de pozo en intervalos poco profundos, el gradiente de fractura es demasiado bajo para la presión de cierre del amago, y causará un reventón subterráneo. El sistema desviador permite que el gas y los fluidos suban por el pozo y a través de las tuberías superficiales, hacia un lugar seguro donde serán descargados. Los sistemas desviadores están expuestos a una erosión extrema causada por la arena y pueden desgastarse rápidamente.

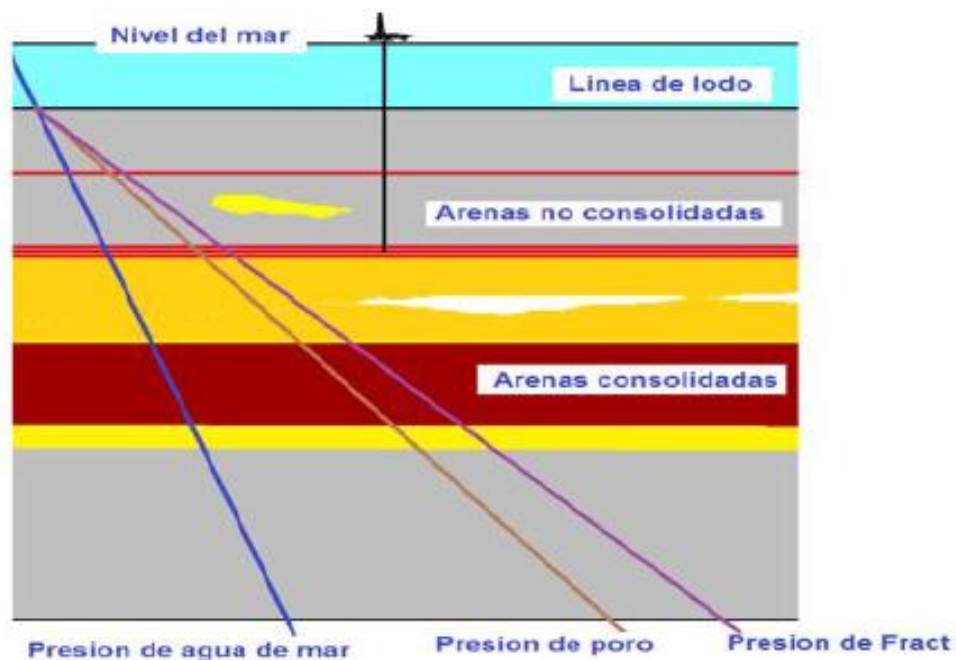


FIGURA 2. MARGEN ESTRECHO ENTRE EL GRADIENTE DE FRACTURA Y LA PRESIÓN DE PORO.

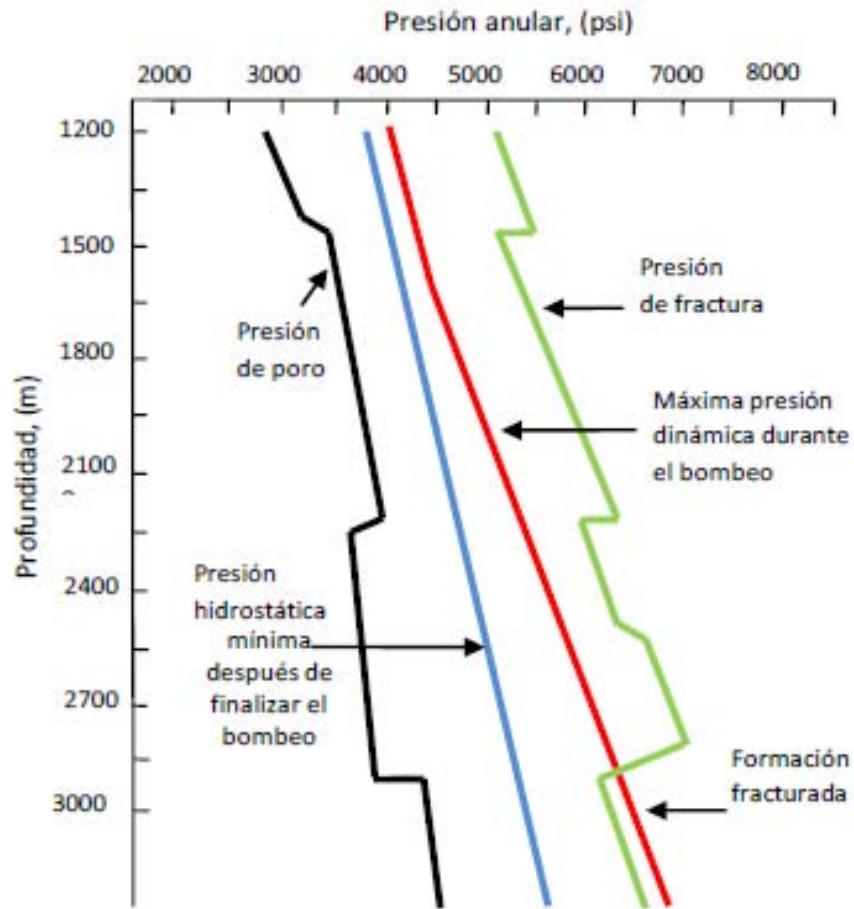


FIGURA 3. VENTANA OPERATIVA ESTRECHA EN ZONAS DE AGUAS PROFUNDAS.

Capítulo I. Perforación en Aguas Profundas.

1.1 Aguas profundas.

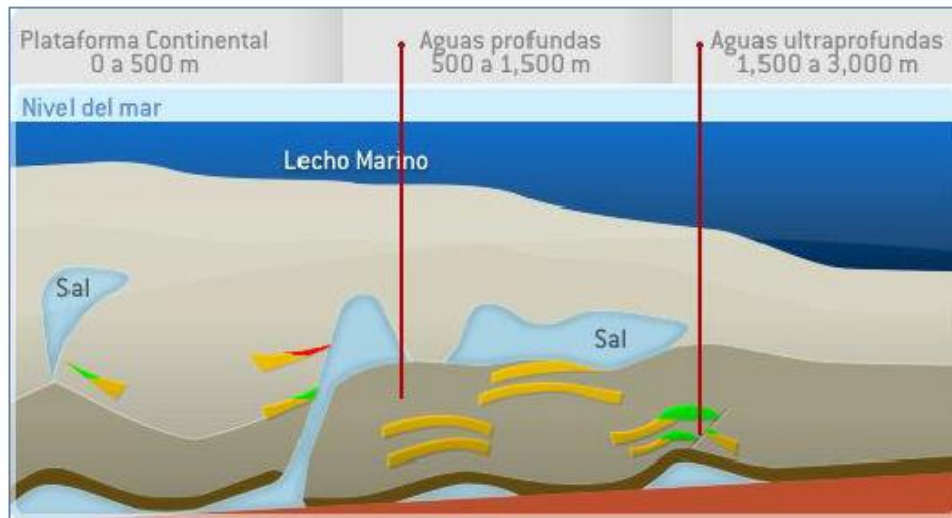


FIGURA 4. REPRESENTACIÓN DE AGUAS PROFUNDAS PEMEX.

En términos generales se consideran aguas profundas aquellas de más de 400-500 metros (1,304-1,630 ft) de tirante de agua. Se considera que las aguas ultra profundas comienzan a los 1,500 m (4 mil 891 ft), profundidad para la que generalmente se diseña la mayor parte del equipo de producción convencional.

En la Industria Petrolera Internacional existen distintas definiciones para delimitar lo que se considera como aguas profundas:

	Aguas someras [m]	Aguas Prof [m]	Aguas ultra prof [m]
API (American Petroleum Institute)	<610	610-1830	>1830
MMS (Minerals Management Service)	<304.8	304.8-1524	>1524
DEA (Drilling Engineering Asociation)	<457	457-2100	>2100
US (University of Stavanger)	<900	900-2100	>2100

FIGURA 5. DELIMITACIÓN DE AGUAS PROFUNDAS.

Los principales productores en aguas profundas son: Brasil, Nigeria, Estados Unidos, Angola, Egipto, Gran Bretaña, Noruega, India, Filipinas y Guinea Ecuatorial.

La localización de las aguas profundas en México se encuentra en las aguas territoriales del Golfo de México, conformada por una extensión aproximadamente de 575,000 km², en la que se estima existen numerosos campos y enormes potenciales de hidrocarburos; el costo de la realización de un pozo en aguas profundas va de los 70 a 150 millones de dolares.



FIGURA 6. UBICACIÓN DE AP EN EL GOLFO DE MÉXICO.

Al Norte limitan con aguas territoriales de los Estados Unidos de Norteamérica y al Oriente con Aguas territoriales de Cuba. Las áreas identificadas por PEMEX con alto potencial en el Golfo de México son:

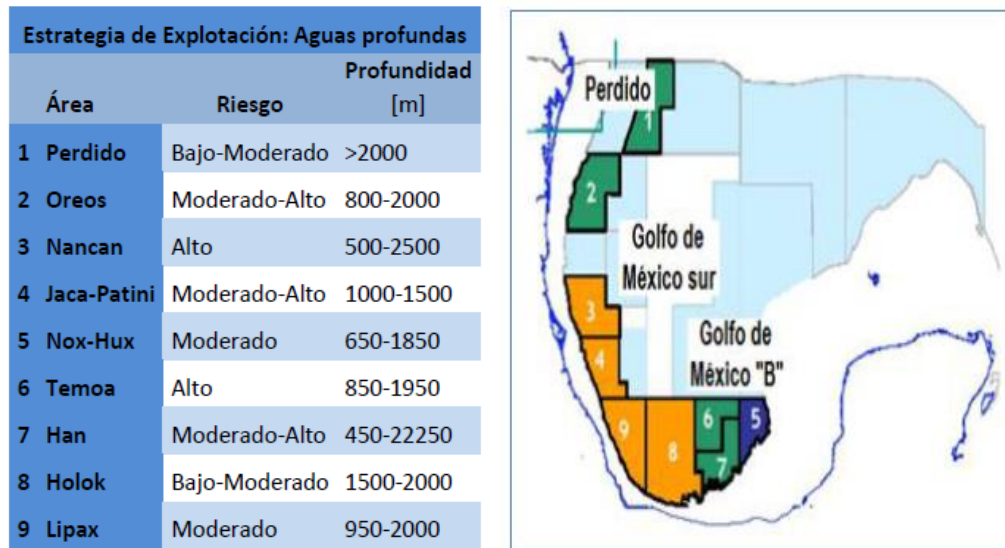


FIGURA 7. AREAS MONITOREADAS DE AP POR PEMEX

Los Yacimientos potenciales en Aguas Profundas se encuentran en el subsuelo entre los 500 y 3,200 [mt] de tirante de agua.

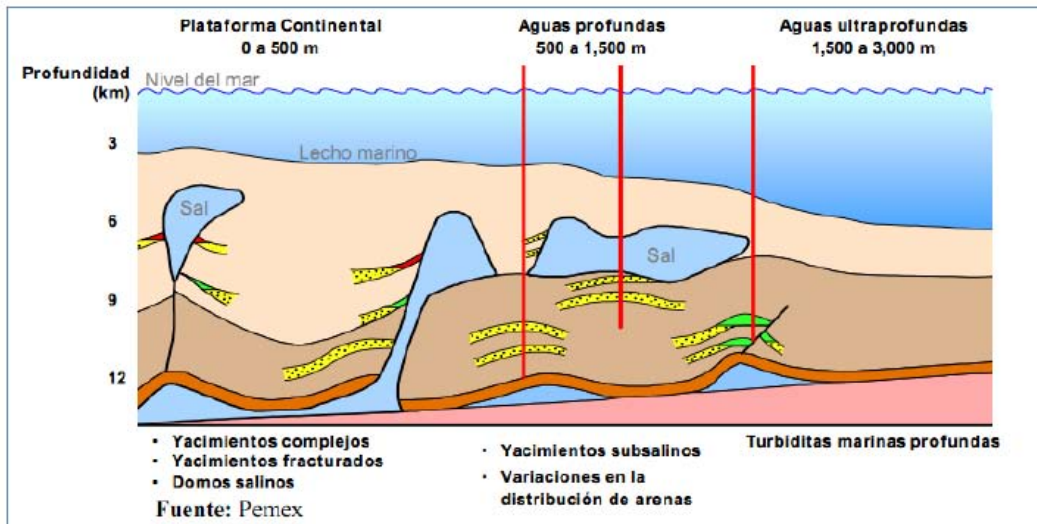


FIGURA 8. ESTRUCTURA DE LOS YACIMIENTOS EN AGUAS PROFUNDAS.

En este capítulo hablaremos muy poco acerca de los equipos de perforación, que operan costa fuera incluyendo los utilizados en agua profundas tales como:

- Barcos Perforadores.
- Semisumergibles
- Plataformas de patas tensionadas (TLP)
- Plataforma de mástil tipo boya (Spar Buoy)

El concepto de aguas profundas se comenzó a utilizar en 1947, para 1961 se había instalado el primer árbol de válvulas a una profundidad de 17 mt, así que se inició el progreso en la década de los 70's cuando se inició la producción del Campo Cognac en el Golfo de México con un tirante de 312 mt.

Los desafíos que se encuentran en aguas profundas y la perforación en aguas ultra profundas han forzado a la industria petrolera a desarrollar nuevas tecnologías y técnicas importantes, en un notable pero corto período de tiempo. Las características de los entornos de aguas profundas han empujado criterios de diseño, normalmente utilizados en pozos en tierra y en aguas poco profundas, a valores más allá de sus límites tradicionales.

Todas las fases de perforación de pozos en aguas profundas y ultra profundas enfrentan desafíos, son diversos los retos a los cuales nos enfrentamos cuando hablamos de la Perforación en aguas Profundas, a continuación nombrare algunos de estos siendo los más comunes:

1.- Las fases iniciales, generalmente compuestas de suelo blando o sólo barro, han requerido una gran cantidad de experiencia en términos del manejo del tubo conductor para evitar el

hundimiento de la cabeza del pozo. En las fases intermedias, los ingenieros deben tener mucho cuidado para evitar la pérdida de circulación debido a la estrecha ventana entre la presión de poro y gradientes de presión de fractura bajos. Además, la inestabilidad del agujero, siempre es un problema para la perforación direccional, a menudo limita la longitud de las salidas de los pozos de aguas profundas a valores considerados pequeños si se compara con los obtenidos en aguas poco profundas o en tierra. Además, la perforación de rocas permeables, muchas veces sólo arenas sueltas y no consolidados, aumenta la posibilidad de atascamiento diferencial. Para completar el cuadro, observando de cerca los parámetros de operación y perforación para mantener los riesgos bajo control por lo general no es suficiente. La creatividad es a menudo necesaria para superar los retos en aguas ultra profundas.

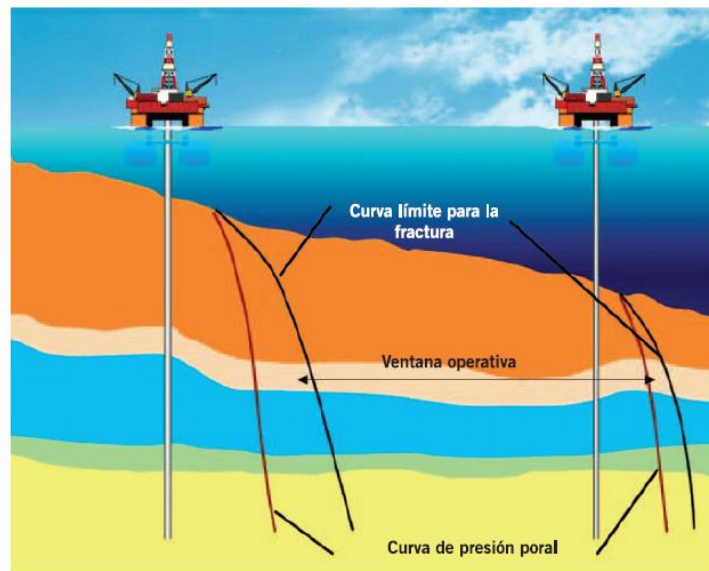


FIGURA 9. COMPARACIÓN DE LAS VENTANAS OPERATIVAS ENTRE CAMPOS SOMEROS vs AP

2.- La presión de poro y el gradiente de fractura. Por lo general, sólo hay un margen estrecho entre la presión de poro y el gradiente de fractura. Debido a esta pequeña diferencia, los fluidos no pueden circular por las elevadas tasas de flujo que son ideales para la limpieza del pozo y cemento. Esto complica un escenario de desplazamiento ya difícil en la consolidación de las cadenas de poca profundidad. Además, el tamaño del anillo es a menudo de gran tamaño por lo que se traduce en una velocidad reducida. Por lo tanto la condición de fluido de perforación, velocidad de flujo y las propiedades de los fluidos necesitan ser optimizados para la limpieza del pozo eficiente y la colocación del cemento.

3.- Los Hidratos presentan desafíos actuales a la perforación, cementación, y la producción en ambientes de aguas profundas. Si los hidratos se desestabilizan durante las operaciones, gases o sólidos podrían subir a la superficie y crear problemas. Por lo tanto, hay una necesidad imperiosa de evitar la desestabilización de los hidratos de la perforación a la producción de las operaciones en la vida del pozo.

El volumen de la lechada de cemento en la tubería superficial es muy grande, este volumen de suspensión da como resultado una gran cantidad de calor generado durante la hidratación de la

suspensión. Además, durante la producción de hidrocarburos podrían aumentar la temperatura de la formación circundante. Estos factores podrían desestabilizar los hidratos.

4.- Efectos de la lechada a través de su desplazamiento y bombeo para llegar a su posición de fraguado. Durante este tiempo, antes de que alcance cualquier valor medible de resistencia a la compresión el cemento existe como un gel, acompañado de una pérdida de volumen y de presión hidrostática contra la formación. El proceso de endurecimiento o de fraguado del cemento se complica más adelante debido a que la lechada de cemento debe resistir los cambios bruscos de temperatura entre la superficie y su destino final en las operaciones de Aguas Profundas y Ultra Profundas. El proceso de mezclado eleva al cemento aproximadamente a 35 °C (95 °F), luego se bombea a través de 500 a 1,500 [mt] de tirante de agua donde el fondo marino estará a pocos grados del congelamiento. Finalmente, después de que pasa nuestra lechada el fondo marino ésta viaja a través de la TR y del espacio anular, el Gradiente Térmico natural de la tierra calienta la lechada. En estos casos, las temperaturas son lo suficientemente bajas para extender severamente el tiempo de transición del cemento lo que implica tiempos de fraguados prolongados y posiblemente trabajos de cementación forzados.



FIGURA 10. GRÁFICA DEL EFECTO DE TEMPERATURA SOBRE UNA LECHADA EN AP

Una vez comprendido este panorama y los retos que implica la perforación en aguas, los países que han adoptado esta tecnología y que ocupan los primeros lugares son: Mar del Norte, Brasil, India, Europa y África. No obstante que las unidades flotantes se han utilizado para perforar desde los años setentas, debido al desarrollo de los campos en aguas profundas se ha requerido incorporar nuevas tecnologías, entre ellas se tiene:

1.2 Posicionamiento Dinámico.

Esto significa permanecer en un punto del mar sin anclas dentro de una tolerancia específica por el uso de vectores de empuje para contrarrestar las fuerzas del viento, olas y las corrientes que tienden a sacar a la unidad de la localización deseada. Este posicionamiento fue empleado en pequeños barcos para extraer núcleos del fondo del mar en tirantes de aguas profundas (proyecto Mohole, originalmente propuesto por la Fundación de Ciencias Naturales de los Estados Unidos).

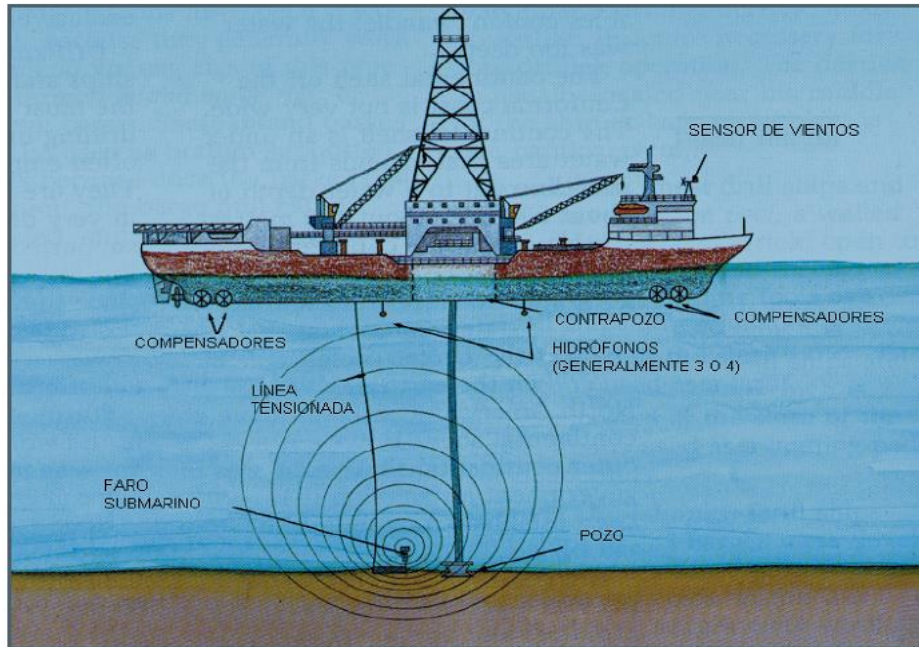


FIGURA 11. ESQUEMA DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO.

Al aumentar la profundidad del agua, la tarea de posicionamiento dinámico se vuelve más fácil porque el mismo porcentaje de profundidades permite mayor movimiento en aguas más profundas; por ejemplo, dado un 5% de exactitud requerida, es casi imposible permanecer dentro de 1.5m (4.92 ft), en 30m (100 ft) de tirante de agua. Igualmente con el mismo 5% en 305m (1,000 ft) de tirante, se permite un desplazamiento del pozo de 15m (50 ft) la cual es una tolerancia realista.

1.3 Compensación de movimientos en la superficie.

1.3.1 Compensadores de cable de registros eléctricos.

Existe un compensador de movimientos para contrarrestar el movimiento vertical de la unidad de perforación flotante durante las operaciones de toma de registros. Este aparato de compensación se cuelga debajo del gancho y usa un cable de acero guarnido, desde la parte superior del conductor marino pasando por la polea compensadora de movimientos, y que se fija al piso de perforación. La polea de registros se conecta a esta polea compensadora, la cual está colgada de un tensionador neumático.

1.3.2 Compensador de Movimiento Vertical (CMV)

La aplicación más grande de un compensador de movimientos de la sarta de perforación (CMV), es contrarrestar el movimiento vertical de la unidad de perforación que podría ser transmitido a la sarta de perforación (ver figuras 2 y 3). Esta anulación del movimiento mejora la operación de los siguientes procedimientos.

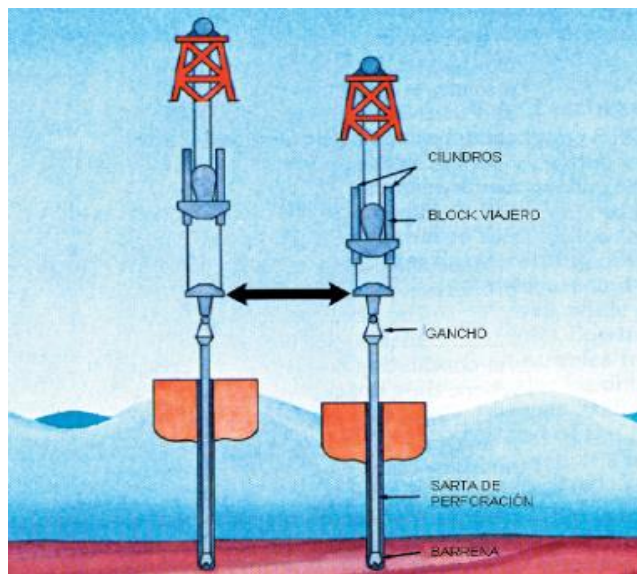


FIGURA 12. SISTEMA COMPENSADOR DE MOVIMIENTOS VERTICALES.

1.4 Perforación.

Con el CMV se logra un sentado suave del conjunto de Preventores sobre el cabezal del pozo, no sólo en forma más segura, sino aún en condiciones más severas de movimiento vertical, lo que no sería posible sin dicho elemento, lo que provocaría pérdida de tiempo si se esperan mejores condiciones de oleaje.

1.5 Sentado de Tubería de Revestimiento.

El CMV permite también que la tubería de revestimiento sea alojada con suavidad en su nido, hasta en condiciones adversas de oleaje o de movimiento vertical, lo que de otra forma sería imposible.

1.6 Seguridad en el control del pozo.

El CMV hace que se cierren los arietes sobre la tubería de perforación, eliminando el movimiento vertical y por lo tanto, el desgaste de los elementos de empaque de los arietes y/o del preventor anular.

1.7 Operaciones misceláneas.

El uso del CMV permite realizar operaciones que podrían no llevarse a cabo, ser obstaculizadas o suspendidas porque la sarta de perforación se mueve simultáneamente con la unidad de perforación.

1.8 Métodos básicos del funcionamiento del compensador de movimiento vertical.

Todos los CMV de equipos marinos de perforación son aparatos tensionadores que operan por medio de aire, funcionan con la diferencial de peso suspendido de la sarta de perforación y el nivel de tensión calibrado en el CMV. EL peso de la barrena es igual al peso de la sarta de perforación, menos el ajuste de la tensión en el CMV. Los niveles de la tensión son controlados en la misma forma que en los tensionadores del conductor marino.



FIGURA 13. DISPOSITIVO COMPENSADOR DE MOVIMIENTOS VERTICALES.

Las técnicas y tecnologías básicas desarrolladas para los tensionadores del conductor marino fueron aplicadas en los compensadores de la sarta de perforación. Durante la operación de perforar, el peso de la sarta está soportado por los cilindros hidroneumáticos del CMV y el de la barrena sobre fondo del pozo. Los cilindros están intercomunicados a tanques de aire de alta presión (lo mismo que en los tensionadores del conductor). El control de la presión de aire en los tanques de alta presión determina el nivel de tensión. Las técnicas apropiadas de perforación con el CMV siempre requieren que el ajuste de tensión sea menor que el peso de la sarta de perforación.

Cuando la plataforma se mueve hacia abajo, los cilindros de soporte retienen al CMV. El movimiento hacia abajo tiende a poner más peso sobre la barrena, pero como los cilindros conservan la presión preseleccionada, éstos retraen al CMV manteniendo a tensión y, en consecuencia el peso de la barrena. Durante la retracción del CMV, el aire se expande de los tanques a los cilindros, lo que conserva el nivel de presión deseado.

1.9 Compensador montado en la polea viajera.

Entre la polea viajera y el gancho, se encuentra el dispositivo tensionador con la función de soportar la sarta de perforación y anular el movimiento vertical. Su nivel de tensión es controlado por técnicas idénticas al tensionador del conductor marino.

1.10 Cilindro tipo Compresión.

Esta técnica aplica aire de alta presión al lado ciego del cilindro, entre la polea viajera y el gancho. La lubricación y el control de seguridad se obtienen por la conexión de un tanque de baja presión de aire y aceite en el lado del vástago del cilindro. Una cadena guarnida en los cilindros genera una carrera de compensación del doble de la carrera del cilindro. En otras palabras, una carrera de 2.7m del cilindro proporciona 5.4m de compensación de movimiento.

1.11 Operación de un compensador de movimientos verticales, Comienzo o inicio de la perforación.

Después de ajustar el nivel de tensión deseado en el CMV y hacer las conexiones en la sarta de perforación, se baja la sarta en el agujero hasta que la barrena toca fondo. Al hacer contacto con el fondo se continúa bajando la polea viajera para que la carrera del CMV llegue a su punto medio. Se podrá observar que el nivel de tensión del CMV siempre es menor que el peso total de la sarta de perforación. Por tanto el compensador se extenderá a su longitud total antes que la sarta se levante de las cuñas. Cuando se llega al fondo con la barrena, el compensador se retrae y empieza a soportar el peso de la sarta igual a su nivel de tensión. Esta diferencia de peso y tensión es regulada por el CMV sobre la barrena al bajar la polea viajera aproximadamente la mitad de la carrera total. El perforador baja la polea viajera para mantener al CMV recíprocamente cerca de la mitad de su carrera y el peso sobre la barrena será controlado por el CMV conservando la carga preseleccionada.

El uso del CMV se puede sentar suavemente al conjunto de Preventores en el cabezal submarino. La técnica consiste en ajustar el nivel de tensión del CMV unos cientos de libras menos que el peso del paquete que se va a sentar en el fondo del mar. Cuando comienza a levantarse la sarta de la araña, se levanta la polea viajera y se extiende el CMV a su carrera completa (el peso del conjunto excede el ajuste de tensión). Cuando se llega al fondo del mar con el arreglo de Preventores, el contacto inicial sobre el cabezal del pozo permitirá al compensador retraerse en su carrera. Sin embargo, el compensador continuará soportando casi toda la carga (una cantidad igual al ajuste de tensión), dejando que el cabezal cargue solamente la diferencia entre el ajuste de tensión y el peso del conjunto de Preventores. Esta técnica permite el sentado (instalación) y la recuperación

del conjunto de Preventores en condiciones adversas del oleaje, lo que sería imposible de otra manera.

1.12 Sentado de la tubería de revestimiento.

El procedimiento es similar al descrito para sentar el conjunto de Preventores. Esta maniobra de sentar lentamente la TR, permite llevar a cabo la operación en condiciones de movimiento vertical bastante amplio, sin que ocurran daños a los colgadores y sus sellos.

1.13 Sistema de tensionadores de líneas guía en plataformas semisumergibles.

Para que sean efectivos los cables guía del cabezal submarino deben estar tensionados. Para mantenerlos a un nivel de tensión preseleccionado, se aplican tensionadores hidroneumáticos a cada uno de los cuatro cables guías del cabezal y normalmente, a las líneas de control del conjunto de Preventores (ver figura 4).



FIGURA 14. TENSIONADORES DE LÍNEAS GUÍAS.

Los tensionadores de los cables guías operan de la misma manera que los tensionadores del conductor marino y están diseñados igual, excepto que son más pequeños. La operación normal de los tensionadores de los cables guía es a niveles de alta tensión para guiar el cabezal submarino, por ejemplo 4.5 y 7 toneladas (10mil y 16mil libras) son comunes, aunque después de asentar el equipo en el cabezal los niveles de tensión se reducen a 1 o 4 toneladas (2mil u 8mil lb) para reducir desgaste y fatiga en el cable de acero.

1.14 Base guía temporal y permanente.

La base guía temporal es una estructura soldada con un círculo central, en donde se aloja el housing del cabezal de 30pg (ver figura 5). Esta estructura se utiliza para guiar la barrena al iniciar la perforación.

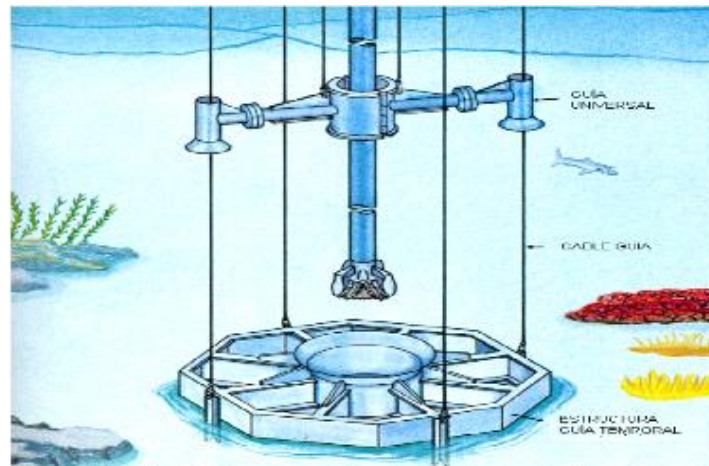


FIGURA 15. ESTRUCTURA GUÍA TEMPORAL

La base guía permanente es un armazón estructural que contiene cuatro postes guías removibles (ver figura 6), cuya función principal es proporcionar una guía rígida para sentar el conjunto de Preventores y posteriormente el cabezal de 30pg, colocándola sobre la estructura temporal.

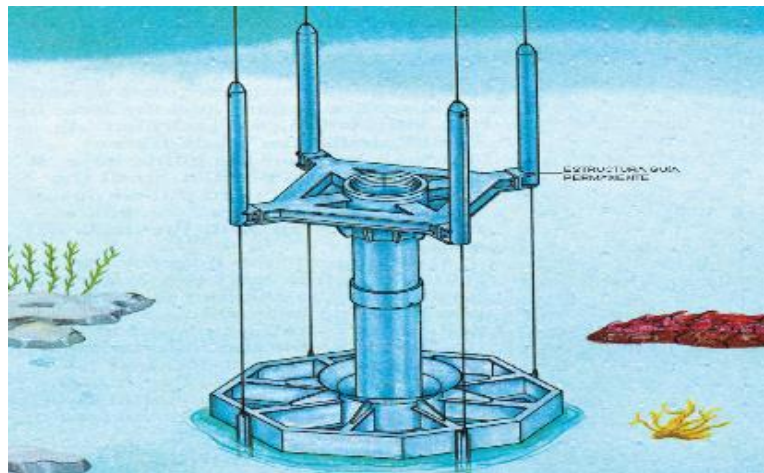


FIGURA 16. ESTRUCTURA GUÍA PERMANENTE.

El círculo central tiene una hendidura para el anillo de retención en el cual se ancla el housing del cabezal de 30pg.

Los postes guía están asegurados en su receptáculo por medio de clavijas de 2pg (51mm), para su fácil instalación y remoción. Una clavija tiene un perno para prevenir la rotación. Cuando son tensionadas las líneas guías, los postes salen 6pg (152mm) hacia arriba de la base guía, lo que proporciona una amortiguación al anclar el equipo.

La unidad se lleva al fondo marino por el housing del cabezal de 30pg, usando 4 seguros, los cuatro le sujetan en el interior de éste e impiden que la base guía rote. Los cuatro postes guía tienen una ranura especial para la línea guía, alojan y sostienen a ésta y prevén su fácil reemplazo ya sea por un buzo o un vehículo de operación remota (ROV).

Las bases guías permanentes también pueden ser usadas para sentar los árboles de producción submarina y para guiar la herramienta de los riser del Tie Back. La base cuenta con un extremo para alojar la brújula de balancín (nivelación horizontal).

1.15 Conductores Marinos (RISER)

Un conductor marino o riser se puede describir como un conducto desde la plataforma al fondo del mar, por medio del cual circula el lodo de perforación y sirve como guía a la sarta de perforación (Ver figuras 17 y 18). Existen dos clases de conductores marinos: los usados para operaciones de perforación y los usados para operaciones de producción.



FIGURA 17. CONDUCTOR MARINO (RISER)

1.16 Componentes básicos de un sistema conductor marino para perforación.

La sarta del conductor para una unidad de perforación flotante está compuesta normalmente de tramos de 15.25m de largo, almacenados en cubierta durante el tránsito hacia la localización. Los extremos de cada tramo tienen juntas integrales de acoplamiento rápido. La junta telescópica, que se encuentra en el extremo superior del conductor, normalmente se diseña para un movimiento vertical entre 4.57 a 9.14m.

El sistema de tensionadores se conecta al extremo fijo del barril exterior de la junta telescópica, para proporcionar la fuerza axial suficiente y prevenir que la sarta del conductor se flexione. El barril exterior y la sarta del conductor marino tienen movimientos laterales, inducidos por el movimiento lateral y longitudinal de la unidad, pero no tienen movimiento vertical. Cuando ésta se mueve verticalmente, se mueve junto con la camisa interior de la junta telescópica. Las juntas esféricas colocadas en cada extremo del conductor marino permiten la rotación en cualquier dirección entre 7 y 10 grados. Por lo regular, pocos operadores instalan dos juntas esféricas, lo que es más confiable, pero resulta más costoso y su instalación toma tiempo de equipo.

El arreglo más común es usar una junta esférica en la parte superior del conjunto de Preventores, que se sienta en el cabezal del pozo. Esto se une a la base guía, la que queda colocada en el conductor de 30pg.

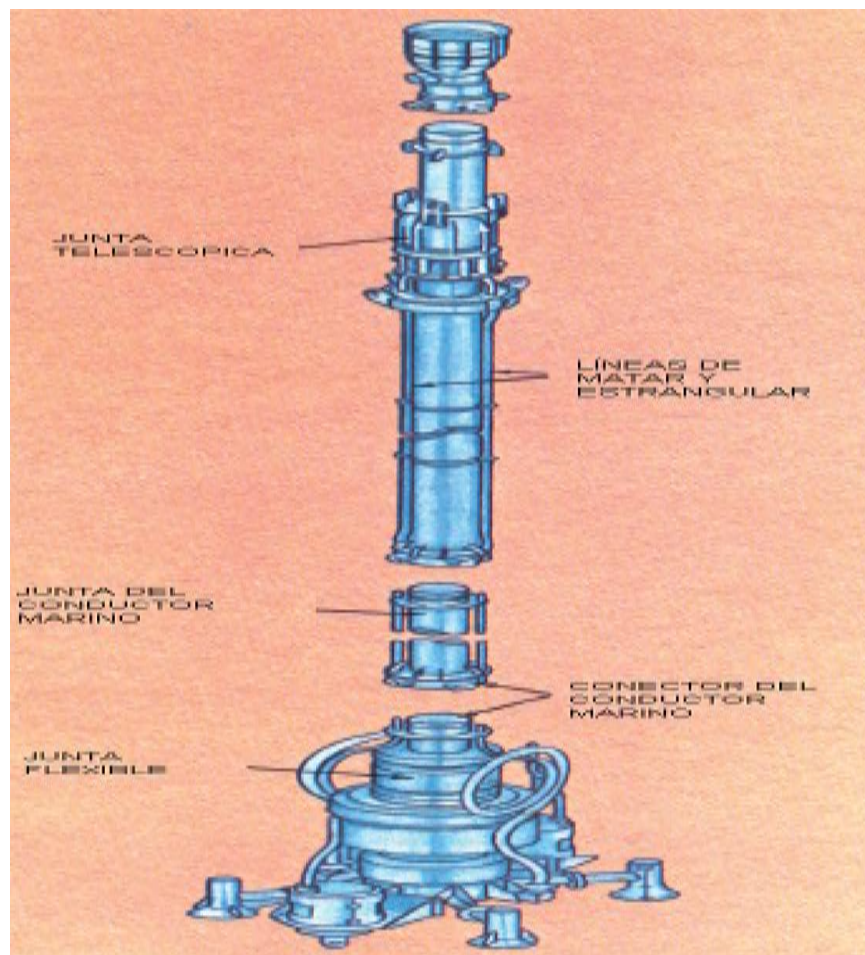


FIGURA 18. SISTEMA DEL CONDUCTOR MARINO

1.17 Juntas del conductor marino.

Los sistemas actuales usan línea de matar y estrangular integradas al tubo conductor. Cuando los tramos del conductor se están armando al sentar y conectar un tramo con otro, las líneas de matar y estrangular se conectan automáticamente. Los requerimientos del conjunto de Preventores han sido el factor decisivo para mantener el diámetro y características del conductor marino y la fuerza requerida de los tensionadores.

1.18 Líneas de matar y estrangular.

Estas líneas corren a lo largo del conductor hasta el conjunto de Preventores a la altura de la junta esférica. Existen varios diseños, pero el más utilizado consta de tubos con vueltas de 360° para dar la flexibilidad requerida al extremo inferior del conductor marino. Las líneas de matar y estrangular ayudan a controlar los cabeceos evitando que éstos se conviertan en reventones.

Cuando se detecta un brote potencial, se bombea lodo por la línea de matar hasta el conjunto de Preventores para restablecer el equilibrio de presiones en el agujero. Cuando se presenta gas en exceso, se cierra el preventor esférico y el de arietes alrededor de la tubería de perforación. El gas en el múltiple de estrangulación se elimina usando la línea de estrangulación.

1.19 Junta telescópica.

Existen dos tipos de juntas telescópicas usadas en los conductores marinos. La más común es la del sistema de tensión constante, debido a que su mantenimiento es más fácil y porque mantiene una fuerza igual en los cables de acero conectados a la camisa exterior de la junta telescópica. Este método utiliza un sistema de guarnido debajo del piso de perforación.

Otro tipo de junta usa el sistema tensionador axial directo. Este es un mecanismo donde los sellos y el anillo guía de la junta telescópica, están diseñados para compensar por presión interna y tienen la doble función de permitir el movimiento vertical de la unidad de perforación y actuar como un pistón tensionador directo.

En el extremo superior de la junta telescópica, se instala un desviador de flujo mediante el cual, dependiendo de la magnitud del cabeceo, se envía el lodo gasificado a la temblorina a través de la línea de flote o las líneas de venteo a babor, estribor, a popa o proa de la unidad.

1.20 Efecto de flotación en conductores marinos (RISER)

En el conductor marino la máxima tensión ocurre en el extremo superior y disminuye con la profundidad del agua. En aguas muy profundas se requiere de algún tipo de flotación adicional para mantener al sistema tensionador dentro de los límites prácticos. Se debe recordar que la fuerza de arrastre de la corriente aumenta con el cuadrado de la velocidad y el diámetro del conductor marino. Esto quiere decir que el diámetro exterior de los cilindros adicionales de flotación debe reducirse al máximo.

Se han usado cilindros de espuma y cámaras de acero asegurados al conductor marino, aunque los primeros se deterioran rápidamente y requieren mantenimiento constante.

Uno de los requerimientos para los sistemas de conductores en aguas profundas, es que floten neutralmente o ligeramente positivo, con la flotación distribuida a lo largo de una sección del conductor. Si una sección del sistema de conductor flota en exceso, la falla en una junta del mismo, lo enviará hacia arriba, como un cohete, a través del piso de perforación.

1.21 Determinación de la longitud del Riser

El tirante de agua se debe medir antes de iniciar la operación mientras que la elevación del cabezal por arriba de la línea del lodo se mide en el momento en el que el cabezal es cementado en el lugar.

La longitud del riser normalmente se diseña para que la junta telescópica esté casi en la mitad de la longitud de su carrera cuando el conjunto de Preventores se afiance al cabezal y el equipo esté en su posición de perforación normal.

En la posición media, parte de la carrera de la junta telescópica, puede compensar el incremento de la longitud del riser resultante del movimiento del sistema flotante. Si la junta telescópica se extiende hasta sus límites, las cargas de tensión se incrementarán drásticamente; si la junta telescópica se retrae hasta su límite, el riser podría pandearse. Ambas condiciones deben ser evitadas.

Cuando se calcula la longitud del riser se deben considerar las siguientes dimensiones:

- (A) Altura del cabezal desde el fondo marino.
- (B) Altura del conjunto de Preventores y del paquete inferior del riser marino.
- (C) Longitud Requerida del riser.
- (D) Longitud de la junta telescópica, a la mitad de su carrera.
- (E) Distancia desde la base del desviador a la parte superior del buje.
- (F) Distancia desde el buje al fondo marino.
- (G) Longitud de la sarta instaladora de 20”.

Las dimensiones (B), (D) y (E) son fijas mientras que las dimensiones (A), (F) y (G) son medidas en la localización del pozo.

Así, la longitud del riser, Dimensión C, puede ser calculada de las siguientes formas.

$$C = F - (A+B+D+E) \quad \text{o} \quad C = G - (B+D+E)$$

Dependiendo de si es utilizada la profundidad del agua o la longitud de la sarta instaladora de 20" (ver Figura 19).

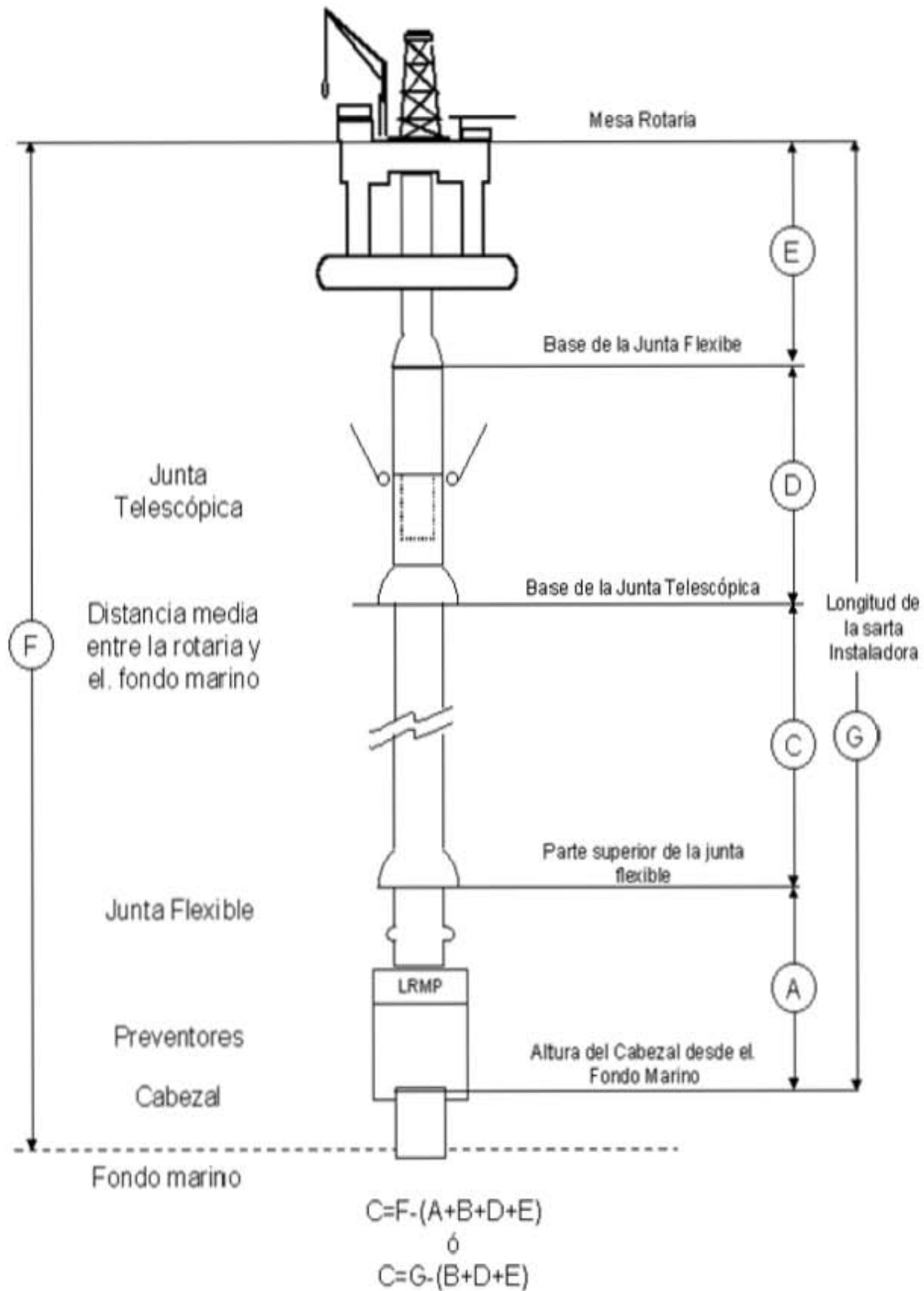


FIGURA 19. DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DEL RISER MARINO.

Ejemplo: Una plataforma semisumergible se encuentra perforando un pozo a 2,000 [pies] (MLW) de tirante. El cabezal ha sido cementado en un lugar por arriba del fondo marino medido. Se tienen que tomar en cuenta equipo, medio ambiente y datos de operación para introducirlos en la hoja de cálculo del análisis del riser. Determinar la longitud del riser utilizando el tramo apropiado.

Solución:

$$\text{Longitud del riser} = C = F - (A+B+D+E)$$

Dónde: F= (Tirante de agua) + (Cambio promedio de la marea) + (Distancia desde la superficie del agua hasta el buje de impulso)

$$= 2,000 \text{ pies} + 2.5 \text{ pies} + 85.5 \text{ pies} = 2,088 \text{ [pies]}$$

- A=Altura del cabezal desde el fondo marino. =4.8 [pies]
- B = (Altura del conjunto de Preventores inferior) + (Altura del LMRP)
= 22.7 pies + 20.0 pies = 42.7 [pies]
- D = (Longitud máxima de la junta telescópica en posición descendente) + ½ (Carrera)
= 61.2 pies + ½ (111.2 - 61.2) pies = 86.2 [pies]
- E = (Parte superior de la unión flexible/bola, debajo del buje de impulso [piso de perforación]) + (Longitud compuesta de la junta flexible/bola)
= 10.1 pies + (1.0 + 3.3) pies = 14.4 pies
- C = 2088 pies - (4.8 + 42.7 + 86.2 + 14.4) pies = 1,939.9 [pies]

Utilizar 38 tramos de riser de 50 pies, más un tramo corto de 15 y uno de 25 pies, ver Figura 4.5. Esto hace que la junta telescópica se encuentre casi en la mitad de su carrera.

Todas las longitudes y pesos están basadas en dimensiones supuestas.

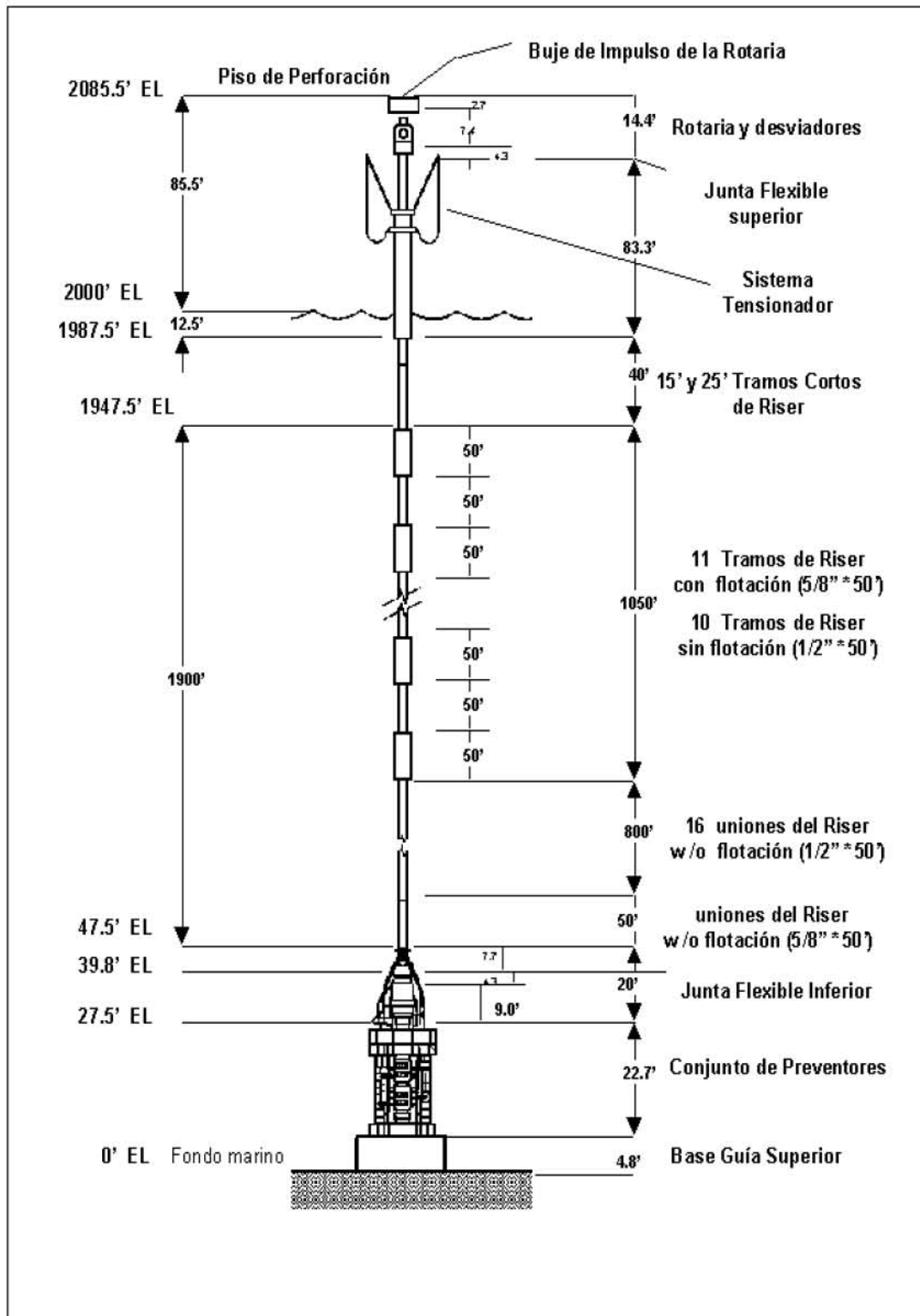


FIGURA 20. SEMISUMERGIBLE "SPICED JAR" EJEMPLO DE CONFIGURACIÓN DE RISER

1.22 Revisión analítica de sistemas de conductores.

Los análisis para el diseño de conductores marinos deben considerar que los esfuerzos a que están sometidos:

- Axial, que se debe a la carga de los tensionadores, flotación del conductor, peso del conductor, densidad del lodo, fuerzas por corrientes marinas y fuerzas originadas por las olas.
- Radial, es causado por la presión interna de la columna de lodo y por la diferencial de presión de los cabeceos.
- Fuerzas externas, resultan de la presión hidrostática del agua.
- Sistema tensionador de riser marino en una plataforma semi sumergible.
- El sistema normalmente cuenta con 8 tensionadores de conductor marino (80k) con carrera de 12.5x4 ft y capacidad de 80mil lb cada uno con poleas de 52pg y cables de 1¾pg.
- Un conductor marino operado en un equipo de perforación marina flotante fallará o se colapsará en tirantes de agua de 60 a 91m., si no es soportado parcial o totalmente.

El conductor está unido al fondo marino por medio del conjunto de Preventores y no se puede unir firmemente a la unidad de perforación flotante debido a los movimientos de la misma. El soporte tiene que ser por tensión axial aplicada a la parte superior del conductor y/o flotación a lo largo de la longitud del conductor. Al incrementarse el tamaño del conductor marino, la profundidad del agua, las condiciones del mar, la densidad del lodo, etc., también aumentan los requerimientos de tensión axial para proporcionar el soporte adecuado.

El cálculo de la tensión axial requerida es un problema complejo de flexión de una viga con algunas variables. Esta solución matemática debe utilizarse en todas las aplicaciones de campo; sin embargo, como regla general, para determinar una aproximación de la magnitud de la tensión se utiliza el peso del riser sumergido en agua y se considera la densidad del lodo como factor de seguridad. La tensión nominal es la siguiente:

$$T_{\text{nominal}} = (\text{peso del conductor marino en agua} + \text{peso del lodo de perforación en agua}) * 1.20$$

Este nivel de tensión mantendrá el tramo inferior del conductor marino tensionado, al exceder el peso del conductor.

Los tensionadores normales que se usan son de 27 ay 36 toneladas (60mil y 80mil lb) de capacidad por tensión. Estos son usados en sistemas que se componen de 4,6 y 8 tensionadores (ver figura 9). Los tensionadores del conductor marino son operados mediante un mecanismo y el sistema debe de tener capacidad para monitorear continuamente (sistema redundante) y funcionar eficientemente inclusive con un tensionador fuera de servicio.

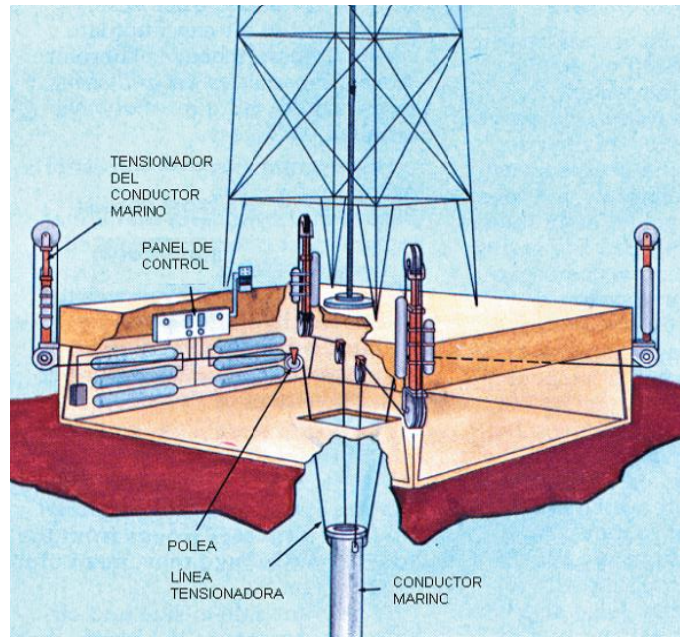


FIGURA 21. SISTEMA TENSIONADOR DEL RISER.

1.23 Capacidad de Tensión.

Esta se determina para el máximo requerimiento de tensión. Varios tensionadores se utilizan en todos los sistemas de Risers. Las unidades de tensionadores múltiples cuentan con gran capacidad y permiten la operación segura con una unidad fuera de servicio o en mantenimiento.

1.24 Carrera del cable de acero.

La carrera del cable de acero del tensionador debe exceder el máximo movimiento vertical esperado de la unidad de perforación flotante, mientras el conductor marino esté conectado al cabezal del pozo o a los Preventores. Hay que considerar los movimientos de mareas, ajustes al conectar el conductor marino y cambios en la condición de lastre de la unidad.

1.25 Velocidad de respuesta

El tensionador debe tener la capacidad para responder a la máxima respuesta pico del movimiento vertical de la unidad flotante. Esta respuesta será igual o mayor a la máxima velocidad vertical instantánea del movimiento del equipo, que excede el promedio de la velocidad vertical del equipo.

La máxima velocidad V , puede ser calculada suponiendo que las olas son senoidales:

$$V = (\text{Movimiento vertical [ft]}) (k) \sqrt{\text{periodo [seg]}}$$

1.26 Cilindro doble acción, tipo compresión.

Este cilindro hidroneumático es de doble acción. La presión actúa en el área del pistón y lo obliga a extenderse. La fuerza de extensión es igual a la presión multiplicada por el área del pistón. Por ejemplo, un cilindro con diámetro inferior de 14pg, presiona sobre las 154pg del área del pistón a 2mil lb/pg², la fuerza de extensión sería de 308 mil lb.

1.27 Vehículo de operación (ROV)

El vehículo de operación remota es una de las herramientas indispensables para la perforación de un pozo en aguas profundas en una unidad flotante de perforación (figura 10). A continuación se describen las principales características técnicas del ROV Scorpio“:

- Capacidad de trabajo: 1000-1500m.
- Dimensiones Alto: 1.57m, Ancho: 1.49m, Largo: 2.74m.
- Cuenta con 5 propulsores.
- Potencia Hidráulica: 75HP a 2500psi, 36 GPM, 1000 VCA, 3 fases, 50/60Hz.
- Televisión: Video cámara SIT de alta resolución con un nivel bajo de luz, la cámara suministra 525 líneas a 60HZ.
- Tiene un lente con corrección de enfoque y mecanismos para sus movimientos verticales y laterales.
- Cuenta con 6 lámparas de yoduro de cuarzo de intensidad variable.
- Panel de control de movimientos verticales y horizontales: Con rotación a 320° y movimiento Vertical, con lectura de posición a control remoto en superficie.

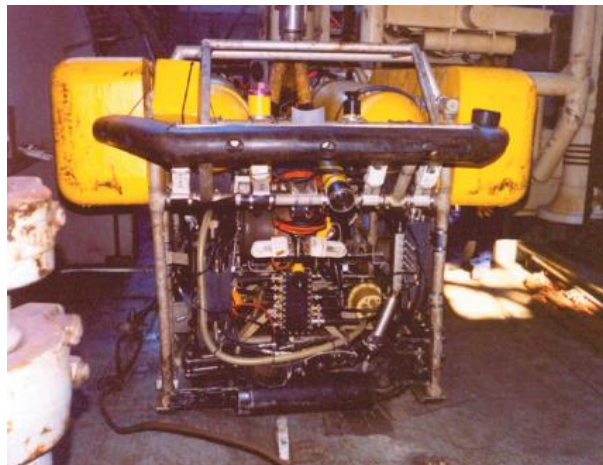


FIGURA 22. VEHÍCULO DE OPERACIÓN REMOTA (ROV S.S MATA REDONDA).

1.28 Selección del sistema de explotación.

Por lo antes mencionado, un punto clave en el desarrollo de campos de aguas profundas es determinar cuál sistema utilizar: Flotante o Submarino. El sistema Flotante se ha desarrollado mucho en los últimos años, aunque la industria petrolera está aceptando que el sistema submarino o el submarino combinado con el flotante tendrán que ser el medio para alcanzar los campos ultra profundos.

El auge de los proyectos en aguas profundas se debe a que de éstos, frecuentemente se pueden obtener gastos de producción impresionantes, lo cual compensa evidentemente los altos costos de operación y desarrollo. La industria se está enfocando a obtener los mayores beneficios de sus actividades de exploración y producción, y factores tales como la producción por pozo, son los que están conduciendo a la industria al desarrollo de campos en aguas profundas, a pesar de los riesgos involucrados.

Por ejemplo Shell señala que la mayor parte de sus desarrollos en el Golfo de México tienen pozos que producen un promedio de 20mil [bl/día]; con el desarrollo del campo Bonga, en África, se espera que algunos pozos lleguen a tener producciones de más de 40mil [bl/día]. Esto ha sido fuertemente apoyado por los avances que ha logrado la industria en materiales de diseños de terminaciones, perforación horizontal y multilateral.

Debido al número creciente de equipos de perforación para aguas profundas disponibles para explotar estas áreas y al avance continuo en las tecnologías de perforación, se predice por ejemplo, la llegada de la perforación sin Risers en un futuro cercano.

Conceptos tales como la perforación sin Risers y los equipos de perforación submarinos pueden parecer ciencia-ficción en este momento, pero se dijo alguna vez lo mismo acerca de los sistemas LWD y MWD (registros y medición durante la perforación, respectivamente).

La capacidad de realizar mejores caracterizaciones y predicciones subsuperficiales también hace menos riesgosas estas operaciones, y posiblemente los estudios sísmicos para encontrar y caracterizar yacimientos y reservas sea la herramienta más efectiva para la explotación en aguas profundas.

1.29 Problemas de perforación en aguas profundas y ultraprofundas.

En aguas ultra profundas los pozos serán perforados con equipos de posicionamiento dinámico. Aproximadamente se han perforado 58 pozos en aguas con tirantes mayores a los 5mil ft. Aunque este tipo de perforación ha sido, en general, de tipo exploratorio, esto cambiará conforme más compañías empiecen a desarrollar las grandes reservas descubiertas.

1.30 Problemas de posicionamiento del equipo.

Para mantener el equipo en su localización se utilizan sistemas redundantes computarizados de posicionamiento dinámico, que reducen el riesgo de costosas interrupciones provocadas por incapacidad para mantener la posición. Los sistemas de posicionamiento dinámico más refinados cuentan con procedimientos de redundancia triple y están basados en múltiples referencias de posicionamiento. Los generadores, los alimentadores de combustible y de agua de enfriamiento, así como los sistemas de manejo de energía, distribuidores y generadores de energía continua deben estar diseñados para ser confiables y configurados para la redundancia.

Todos los equipos deben tener la capacidad de identificar y estar preparados en cualquier momento si se presenta una falla en el sistema de posicionamiento dinámico. Los problemas más serios de los sistemas de posicionamiento dinámico son el drive-off (desviación) y el drift-off (la deriva). Durante el drive-off, el equipo es accionado hacia una posición lejos del pozo, ocurre cuando el sistema de posicionamiento dirige al equipo lejos de la localización. Puede ser provocado por una mala interpretación del sistema. El drift-off sucede cuando el equipo pierde potencia y las fuerzas ambientales lo empujan fuera de la localización. En ambas situaciones, los Preventores deben cerrar el pozo y al Riser antes que el sistema del Riser, el cabezal o la tubería de revestimiento sufran daños.

1.31 Manejo de energía.

El manejo de energía es clave para minimizar la posibilidad de un apagón que el drift-off pueda provocar. Este sistema ha sido diseñado para que, automáticamente, ponga en línea a los motores cuando sea necesario, debido a variaciones de corriente. El sistema de manejo de energía está configurado para darle preferencia a los sistemas de posicionamiento antes que a cualquier otro, como podría ser el piso de perforación o las bombas de lodo. El sistema de manejo de energía debe identificar efectivamente la potencia disponible y la consumida, con el fin de mantener un margen de la primera adecuado para mantener el equipo en la localización.

1.32 Sistemas de posicionamiento dinámico.

Los sistemas de posicionamiento dinámico utilizan procedimientos de referencia de posición acústicos y satélites. Los acústicos incluyen líneas de fondo largas (long-baseline, LBL), de líneas cortas (SBL) y de líneas ultra cortas (USBL). Generalmente, los LBL son más precisos y tienen menos variaciones conforme se incrementa la profundidad. Pueden proporcionar una precisión de un círculo de 3ft comparados con los SBL o USBL, que tienen precisiones de 0.5 por ciento respecto a la profundidad del agua. Sin embargo, en aguas profundas, los LBL tienen un ritmo de actualización más lento que SBL o USBL. Todos los sistemas de referencia de posiciones acústicas requieren múltiples hidrófonos y transductores para una adecuada redundancia del sistema. Los de referencias acústicas también son sensibles a las capas termales que hay en las columnas de agua o a cambios significativos en salinidad. El ruido generado por el movimiento de la embarcación (provocado por el oleaje) o por otras fuentes acústicas puede provocar falla operativas.

Los de posicionamiento operados vía satélite utilizan una tecnología llamada “Sistema Diferencial de Posicionamiento Global” (DGPS). Un proveedor comercial debe proporcionar un factor de corrección o “diferencial” para interpretar las señales de los satélites. Por lo general, estas señales llegan al equipo por medio de dos diferentes trayectorias. Además, normalmente los equipos cuentan con dos receptores DGPS para redundancia.

1.33 Posicionamiento.

Aunque se pone mayor énfasis en el diseño y la regulación de los sistemas de redundancia, la mayor parte de los problemas de posicionamiento son errores humanos. La experiencia, el entrenamiento, los procedimientos y el ambiente de trabajo son más importantes que el equipo o los sistemas para evitar estos problemas.

1.34 Problemas ambientales.

1.34.1 Corrientes Cíclicas

En el Golfo de México, es una zona de fuertes corrientes, cercanas a la superficie se han encontrado corrientes mayores a los cuatro nudos. La corriente cíclica provoca problemas de posicionamiento y de manejo de Risers. La mayor fuerza ambiental resulta cuando el viento y la corriente cíclica se encuentran desfasados 90°. Aún si el equipo se mantiene en posición, la corriente cíclica puede generar un ángulo en el riser, el cual no permite perforar.

1.34.2 Abandono por huracán.

Cuando se está operando en aguas profundas el abandono por huracán es preocupación importante. Por lo general, los equipos de posicionamiento dinámico se moverán de la localización, alejándose de la trayectoria de la tormenta. El tiempo que se necesita para asegurar el pozo y recuperar el Riser puede obligar a comenzar los procedimientos de abandono antes de tener la seguridad de que la tormenta afectará la localización.

1.35 Problemas de control de los Preventores.

Los equipos para aguas ultraprofundas requieren de Preventores eficientes. En una falla del sistema de posicionamiento, aquellos deben asegurar el pozo y liberar el riser antes de que las condiciones meteorológicas hagan fallar a éste o al pozo mismo. Los equipos para aguas ultraprofundas utilizan un sistema electrohidráulico múltiplex para control de los Preventores. Las funciones del arreglo se controlan por medio de una señal eléctrica enviada para liberar la presión hidráulica almacenada en los acumuladores de los Preventores submarinos. Durante una desconexión de emergencia, se pueden realizar 47 operaciones del arreglo en 30 segundos. En el diseño y fabricación del sistema de control de los Preventores, es importante analizar por completo fallas y efectos a fin de eliminar puntos potenciales. El mejor método para minimizar los problemas en el campo es comprobar de manera rigurosa el sistema, lo que incluye: pruebas de precalificación de cada uno de los componentes; así como del sistema, simulando condiciones ambientales.

1.36 Conector inferior del Riser (LMRP)

El componente más crítico del arreglo que debe funcionar durante una desconexión de emergencia es el conector LMRP. Si esta conexión no se libera cuando el equipo se mueve de la localización, puede dañarse al Riser, al arreglo de Preventores, al cabezal y a la tubería de revestimiento conductora. Para evitarlo es necesario realizar, previamente, una prueba de campo del sistema de conexión de emergencia. Otro aspecto crítico es el alineamiento para una reconexión del conector.

1.37 Otros sistemas para el control de Preventores.

La mayor parte de los arreglos de Preventores para aguas ultraprofundas cuentan con el apoyo de vehículos operados a control remoto (ROV) para intervenir. Normalmente, ambos conectores y de dos a tres Preventores simultáneamente pueden operarse a través de línea hidráulica temporal proporcionada por el ROV. Esto suministra redundancia, aunque se pueden requerir varias horas para lanzar el ROV.

Existen sistemas de control, llamados de “hombre muerto”, que cierran el pozo si se pierde potencia eléctrica, hidráulica y comunicación con la superficie. EL beneficio de este control es asegurar al pozo y proteger el ambiente si hay una falla catastrófica del sistema del riser.

Con frecuencia, como un sistema de respaldo o emergencia, se proponen los controles acústicos para los Preventores. Aunque estos sistemas han sido diseñados para funcionar bajo condiciones normales de aguas profundas, existe preocupación de que el ruido provocado por un reventón en el pozo, enmascare la señal acústica de control y haga inútiles a estos sistemas.

1.38 Problemas de manejo de los Risers.

El sistema de manejo de Risers para aguas ultraprofundas debe desplegar, controlar y recuperar el riser, el cual puede tener un periodo axial natural cercano al periodo de tirón del equipo. Al igual que los otros sistemas de los equipos para aguas ultraprofundas, éste está diseñado para desconexiones de emergencia. Además, después de la desconexión, el riser debe quedar liberado y sin carga hidrostática generada por la densidad del lodo. Los tensionadores del equipo, deben mantener un ángulo mínimo del riser para reducir el desgaste potencial del mismo y del equipo de perforación en general.

Otro gran problema es la predicción exacta del comportamiento del riser liberado y colgado, especialmente durante tormentas. El arrastre ejercido sobre el riser depende del movimiento de la embarcación y del perfil de las corrientes, lo que varía significativamente en toda su longitud. El indicador de peso con un riser libre de 6mil ft varía de 800 a 1,200 kip (1 kip=1000 lbs). Además, como la tensión acumulada en el riser se libera rápidamente durante una operación de desconexión de emergencia, la secuencia de desconexión se diseña para permitir que los tensionadores levanten el LMRP del arreglo de Preventores y evitar que estén en contacto.

Pérdidas de presión por fricción. En pozos en aguas ultraprofundas, las pérdidas de presión por fricción provocadas por la circulación a través de estranguladores y líneas de matar, son mayores

que las generadas en pozos de aguas someras, esto se debe a la mayor longitud de la línea de matar y a las mayores viscosidades del fluido, provocadas por las temperaturas más bajas. Muchos de los nuevos equipos diseñados para perforar en tirantes de agua mayores a los 10mil ft, utilizarán estranguladores y líneas de matar con diámetros internos de 4 pg en lugar de 3pulg, que son los que se utilizan actualmente. Las líneas con diámetros internos mayores reducen la contrapresión aplicada al pozo cuando se circula y permiten mayores gastos de circulación.

1.39 Formación de Hidratos.

Los pozos en aguas ultraprofundas son más susceptibles a la formación de hidratos por sus temperaturas más bajas que las encontradas en los tirantes convencionales de perforación costa fuera y la mayor columna hidrostática generada hace más difícil inhibir las condiciones de formación de hidratos. Los hidratos pueden ser un problema tanto en el agujero como en el exterior del arreglo en pozos ultra profundos. La mayor parte de los problemas por formación de hidratos que se enfrentan durante la perforación, ocurren después de un periodo en que no exista circulación. El método del perforador para circular brotes, que no requiere esperar para densificar el fluido de control puede reducir la posibilidad de que se formen. Circular el agujero proporciona una verdadera inhibición cinética y agrega calor proveniente del equipo y de las bombas.

Los diseños del sistema de cabezal y de las conexiones han sido mejorados para minimizar la formación de hidratos en y alrededor de los Preventores.

También el fluido caliente circulando en los Preventores a un gasto máximo ha derretido los hidratos que se habían congelado en el conector de los Preventores. Sin embargo, algunos pozos se han tenido que abandonar permanentemente, cortando la tubería de revestimiento, porque el conector no pudo ser liberado debido a los hidratos.

1.40 Problemas con la tubería de revestimiento.

La pegadura de tuberías de revestimiento representa un gran problema para cualquier equipo flotante, aunque es más crítico en equipos de posicionamiento dinámico para aguas profundas. Por tal razón, estos equipos toman precauciones especiales cuando se van a introducir tuberías de revestimiento, como mantener un técnico electrónico en el cuarto de control del posicionamiento dinámico, un electricista en el cuarto de control del generador, el técnico de perforación en el piso y al capitán monitoreando las condiciones climatológicas. Los arietes de corte para tuberías de 13 5/8 pg, 88 lb/ft, reducen los riesgos de desconexión de emergencia cuando se tiene tubería de revestimiento dentro del arreglo submarino.

El colapso de la tubería de revestimiento también ha sido un problema en aguas profundas. En ocasiones, debido a que fue introducida sin llenar la sarta de tubería de perforación utilizada para introducirla. Normalmente, esto ocurre cuando la tubería de revestimiento es llenada pero a tubería de perforación se mantiene vacía.

1.41 Requerimientos de personal.

La construcción de equipos para aguas ultraprofundas está en su apogeo, lo que incrementará utilización en los próximos años. Podrían llegar a requerirse entre 5mil y 6mil personas para operar la flota de 25 a 30 equipos para aguas ultraprofundas. Por tanto será necesario entrenamiento especializado, aun cuando muchas de las operaciones en estos nuevos equipos sean similares a las que se realizan en los ya existentes. La industria debe reconocer que es necesario un enfoque de capacitación para asegurar que el personal tenga las habilidades de realizar operaciones en aguas ultraprofundas de manera segura y eficiente.

1.42 Costos.

Por otro lado, resulta indispensable reducir los costos actuales de desarrollo de campos en aguas ultraprofundas. Sin embargo, el que algunas compañías puedan producir ahora de manera económica en aguas de cas 2mil m de tirante quizá no siga siendo sorprendente, en tanto que los principales proyectos mundiales, como el DeepStar en el Golfo de México, el PROCAP 2000 en Brasil, el AMJIG (Atlantic Margin Joint Industry Group) en el Reino Unido y el Norwegian Deepwater Programme (Programa Noruego de Aguas Profundas), están actualmente enfocados a calificar tecnología y técnicas para uso en tirantes de agua de hasta 3mil m.

La realidad no es tan simple, en tanto las condiciones de aguas profundas no son las mismas en todo el mundo. Las condiciones encontradas en el margen del Atlántico frecuentemente con proyectos no tan profundos como los del Golfo de México, Brasil o el Oeste de África pueden ser extremadamente difíciles de manejar, en términos de viento, oleaje y corrientes, ya que generan fuerzas sobre los sistemas flotantes de producción, en los Risers asociados y en los cabezales submarinos. Por ejemplo, en el invierno estas fuerzas son mayores 10 veces a las generadas en el Golfo de México. Brithish Pretroleum tiene experiencia de primera mano sobre estas condiciones en los campos Foinaven y Schiehallion, al oeste de Shetland. Sin embargo, esta compañía experimentada aún está aprendiendo de lo que esta región es capaz.

Además, alrededor del mundo, las condiciones del fondo marino en áreas activas de aguas profundas presentan otros serios problemas de equipo submarino y también los acuíferos someros han representado serios problemas de estabilidad.

Uno de los principales aspectos aún en estudio es hacer fluir hidrocarburos multifásicos “calientes” por medios de líneas localizadas en aguas frías, a veces casi congeladas, a través de grandes distancias, lo que resulta frecuentemente inevitable. La formación de hidratos y parafinas en las líneas ha provocado problemas de flujo y taponamientos; pero la industria se encuentra aún en busca de métodos de limpieza, aunque varias soluciones por medios químicos, métodos de calentamiento/aislamiento de la tubería y otras investigaciones están tratando de vencer el problema.

Sin embargo, en términos de sistemas de producción, la industria sigue confiando en la viabilidad tanto de los sistemas flotantes de producción, tales como las barcazas flotantes de producción y almacenamiento (FPSO), las plataformas con piernas tensionadas (TLPs) y semisumergibles; así como en los sistemas submarinos. Los avances sistemáticos que han tenido en los últimos años

estos dos campos de tecnología, frecuentemente interrelacionadas, tienen un efecto directo en la capacidad de los operadores para acceder las reservas en aguas profundas.

1.43 Expansión del mercado

Todos los nuevos desarrollos en estas tecnologías, han fomentado el interés de las compañías petroleras por desarrollar campos en aguas profundas y ultraprofundas. Como resultado, el mercado ha crecido masivamente en un periodo relativamente corto, creando nuevas oportunidades de desarrollo, al mismo tiempo que muchas de las operaciones convencionales costa fuera han ido decreciendo.

Los hechos hablan por sí mismos. En 1998, existían cerca de 28 campos en aguas con tirantes de agua mayores a los 500m alrededor del mundo, produciendo conjuntamente alrededor de 935mil bl/día. De acuerdo a un reporte confiable, tan sólo las reservas recuperables totales de esos mismos campos eran de 8mil 400 millones de barriles. Aún más importante, las reservas mundiales de yacimientos descubiertas en aguas profundas son de casi 43 mil millones de barriles con una tendencia a ser de 100 mil millones de barriles.

Estas cifras son impresionantes y nos muestran que los desarrollos en aguas profundas no son una frontera irreal, sino que representan el futuro de la industria costa fuera.

Hace veinte años, la perforación costa fuera no enfrentaba problemas como la corriente cíclica y los flujos en aguas someras que provocan gran impacto en el éxito y los costos de la exploración y desarrollo de campos en aguas profundas. Todo parece indicar que la nueva actividad de perforación en aguas ultraprofundas enfrentará, de igual manera, nuevos problemas. Pero la industria se beneficiará mejorando la seguridad y compartiendo nuevas experiencias.

En las siguientes tablas 5, 6 y 7 se muestran algunas cifras relevantes relacionadas con los desarrollos en aguas profundas.

AGUAS PROFUNDAS

Tabla 5. Pronóstico de campos produciendo en aguas profundas entre 1998-2004

Año	Golfo de México (USA)	Brasil	Africa Occidental	Lejano Oriente	Resto del Mundo	Total
1998	16	11	0	0	1	28
1999	26	13	0	0	1	40
2000	35	15	2	0	2	54
2002	45	18	8	3	4	78
2004	53	21	12	5	5	96

Fuente: Deepwater Oil & Gas Monthly/SREA

Tabla 6. Estimación de reservas mundiales probadas y probables en aguas profundas (MMBls)

	Golfo de México (USA)	América del Sur	Africa Occidental	Lejano Oriente	Antártida	Otros
Probadas	6,500	17,000	8,500	8,000	-	3,500
Probables	12,000	15,000	15,000	21,000	18,000	5,500

Fuente: SREA

Tabla 7. Porcentaje de campos futuros por método de desarrollo

Prof. (m)	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1,000	1,500	2,000	2,500
Plataformas	7	5	7	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0
Plat. y equipo submarino	0	5	0	0	0	0	0	0	9	10	0	0	0
Perforación de Alcance Extendido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sistemas flotantes de producción y almacenamiento (FPS)	50	55	86	25	50	62	71	83	73	90	91	100	100
Plat. y FPS	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sistemas submarinos a plataformas	36	30	7	75	50	23	14	17	18	0	9	0	0

Fuente: Douglas-Westwood's World Deepwater Report

FIGURA 23. TABLAS 5-6-7 MUESTRAN ALGUNOS DE LOS POZOS DE CANTARELL EN DONDE SE HAN EMPLEADO ESTE TIPO DE CEMENTOS ULTRALIGEROS (ESPUMADOS).

Plataforma	Pozo	Colgador con cuñas escondidas	Centradores	Cementación	Resultado	
					COLG	CEM
Akal "TJ"	Sihil-14	7 5/8" x 9 5/8"	No	Ultraligero	Ok	S/CBL
Akal "Q"	Cant-3003	7 5/8" x 9 5/8"	No	Ultraligero	Ok	S/CBL
Akal "O"	Cant-58	5 1/2" x 7 5/8"	No	Ultraligero	Ok	S/CBL
Akal "TGP"	Cant-475	7 5/8" x 9 5/8"	No	Ultraligero	Ok	S/CBL
Akal "BN"	Cant-1088d	7 5/8" x 9 5/8"	No	Ultraligero	Ok	S/CBL
Akal "Q"	Cant-3030	7 5/8" x 9 5/8"	No	Ultraligero	Ok	S/CBL
Akal "FO"	Cant-431	7 5/8" x 9 5/8"	No	Ultraligero	Ok	S/CBL

FIGURA 24. CEMENTOS ESPUMADOS EMPLEADOS EN EL POZO CANTARELL.

Capítulo II. Historia del cemento.

INTRODUCCIÓN.

El cemento es sin lugar a dudas el aglutinante más utilizado en el mundo, la civilización moderna fundamenta su desarrollo básicamente en el concreto. En los inicios de la cementación de pozos petroleros, el cemento utilizado era el mismo de construcción, pero en la medida que los pozos fueron ganando en profundidad, las condiciones geofísicas encontradas diferían radicalmente de las condiciones ambientales presentadas en la construcción civil, donde se utiliza cemento de construcción. Por consiguiente en el servicio de cementación se han desarrollado cementos especiales llamados cemento "Petroleros", con características físicas y composición química diferentes a los cementos de construcción, con la finalidad de contrarrestar los inconvenientes causados por las condiciones de fondo de pozo.

En este capítulo vamos a estudiar cómo ha sido la evolución histórica de los aglutinantes hasta llegar a los cementos portland petroleros utilizados en los pozos, seguidamente presentaremos la definición de cemento portland, su composición química, el proceso de manufactura, resaltando la diferencias entre el proceso seco y el húmedo, luego estudiaremos el proceso de hidratación y Analizaremos los diagramas Térmicos, seguidamente presentaremos los efectos físicos que se generan debido a la hidratación. Resaltaremos el efecto físico del encogimiento y por último presentaremos la clasificación de los cementos petroleros API.



FIGURA 25. MATERIA PRIMA PARA ELABORACIÓN DEL CEMENTO.

2.1 HISTORIA DEL CEMENTO.

La cal grasa apagada, cuyo origen se remonta a la noche de los tiempos, es por su naturaleza y versatilidad uno de los materiales más nobles que ha empleado la arquitectura histórica. De la época neolítica se han encontrado huellas de la utilización de la cal, las más antiguas y conocidas son los de esa antiquísima y misteriosa cultura de Anatolia en la actual Turquía, en Catal Hüyük (6000 a. J.C.), donde James Mellaart, en su clásica obra "Earl est Civilizations of the Near East" describe que cada una de las viviendas de la ciudad estaba provista de dos niveles; el más bajo de los dos estaba dotado de pilares de madera recubiertos con una mezcla de cal pintada de rojo y de igual manera se trababa el piso.

El pueblo egipcio utilizaba un mortero (mezcla de arena con materia cementicio) para unir bloques y losas de piedra al erigir sus asombrosas construcciones. Los constructores griegos y romanos descubrieron que ciertos depósitos volcánicos, mezclados con caliza y arena producían un mortero de gran fuerza, capaz de resistir la acción del agua, dulce o salada. Un material volcánico muy apropiado para estar aplicaciones lo encontraron los romanos en un lugar llamado Pozzuoli con el que aun actualmente lo conocemos como puzolana.

El descubrimiento de los aglomerantes hidráulicos se remonta al siglo XVIII (1756.) "Smeaton", encargado de dirigir la construcción del faro de Eddyston (Plymouth) se propuso encontrar una cal que pudiera resistir la acción del agua del mar.

Los ensayos efectuados con una caliza de "Averthan" dieron resultados positivos.

Los análisis químicos habían demostrado la presencia de arcilla y él concluyó que la presencia de arcilla en la caliza debe ser uno de los factores principales, si no el único que determina la capacidad hidráulica.

La influencia de la tradición romana ha retrasado probablemente el descubrimiento de los aglomerantes hidráulicos, ya que en la literatura romana se insiste en el hecho de que para tener una buena cal hay que partir de una caliza muy pura. Por tanto, las calizas arcillosas eran sistemáticamente desechadas.

Hacia 1812, "Vicat" estudió las mezclas de calizas puras y arcillosas y demostró definitivamente que las propiedades hidráulicas dependen de los componentes que se forman durante la cocción entre la cal y los constituyentes de la arcilla. En efecto, bajo la acción del calor, primero se produce una deshidratación de la arcilla, después una descomposición de la caliza y por fin una combinación entre la cal, la sílice y los óxidos de aluminio. Dependiendo de la temperatura y la duración de la cocción, la reacción es más o menos completa y los productos obtenidos más o menos hidráulicos.

Los primeros aglomerantes así fabricados tenían las características de los cementos rápidos actuales. Generalmente eran ricos en aglutinatos y esto los caracterizaba para una compactación rápida. Esto último no se debe a la desecación del mortero y a la carbonatación de la cal, sino a la reacción de los aglutinatos y los silicatos con el agua, ésta puede ser muy buena al abrigo del aire. Los trabajos de "Vicat" se separan del empirismo de sus predecesores, constituyendo las verdaderas bases científicas que fijan las reglas de fabricación y empleo de la cal hidráulica. Los que pueden ser

considerados como productos intermedios entre la cal hidratada y el cemento "Portland" actual. En efecto, los constituyentes hidráulicos siempre presentan un elevado grado de cal libre y de hecho deben ser sometidos a extinción.

Esta operación, que consiste en hidratar el óxido de cal libre, debe ser hecha con una cantidad moderada de agua, para evitar la hidratación de constituyentes hidráulicos. Se trata de un proceso que era mal comprendido por los predecesores de "Vicat"

El término cemento Portland se empleó por primera vez en 1824 por el fabricante inglés de cemento Joseph Aspdin, debido a su parecido con la piedra de Portland, que era muy utilizada para la construcción en Inglaterra. El primer cemento Portland moderno, hecho de piedra caliza y arcillas o pizarras, calentadas hasta convertirse en carbonilla (o escorias) y después trituradas, fue producido en Gran Bretaña en 1845. En aquella época el cemento se fabricaba en hornos verticales, esparciendo las materias primas sobre capas de coque a las que se prendía fuego. Los primeros hornos rotatorios surgieron hacia 1880. El cemento Portland se emplea hoy en la mayoría de las estructuras de hormigón.

Desde finales del siglo XIX los principios generales de la fabricación del cemento "Portland" no han sufrido cambios. Sin embargo, han sufrido una evolución técnica y científica muy importante. Esta evolución aumentó los conocimientos científicos básicos y ha permitido descubrir una gama de aglomerantes derivados del Portland (Portland especiales), aglomerantes de mezcla (cementos puzolánicos, metalúrgicos, etc.) y los aglomerantes especiales (de aluminio), lo que, por un lado, puede paliar ciertas insuficiencias del cemento Portland y por otro satisfacer mejor otro tipo de exigencias, pero crean otros problemas.

La mayor producción de cemento se produce, en la actualidad, en los países más poblados y/o industrializados, aunque también es importante la industria cementera en los países menos desarrollados. La antigua Unión Soviética, China, Japón y Estados Unidos son los mayores productores, pero Alemania, Francia, Italia, España y Brasil son también productores importantes.

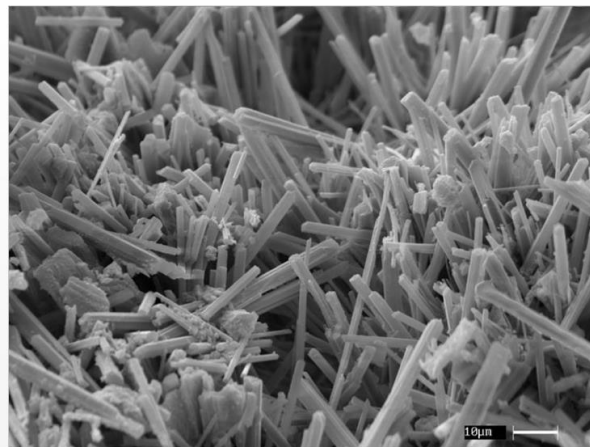


FIGURA 26. QUÍMICA DEL CEMENTO.

2.2 DEFINICION DE CEMENTO PORTLAND.

Los “cementos hidráulicos” desarrollan resistencia como consecuencia de un proceso de hidratación el cual puede ocurrir al aire libre o bien inmerso en un fluido y no como consecuencia de un proceso de deshidratación o secado, como normalmente se cree.

El desarrollo de dureza es predecible, uniforme y relativamente rápido. El cemento fraguado es prácticamente insoluble en agua, posee baja permeabilidad y puede exponerse a diversos fluidos sin pérdida de resistencia. Estos atributos son esenciales para mantener un aislamiento zonal en un pozo.

El cemento es una mezcla compleja de caliza u otros materiales con alto contenido de carbonatos de calcio, sílice, fierro y arcilla, molidos y calcinados, que al entrar en contacto con el agua forman un cuerpo sólido.

Esta mezcla de ingredientes se muelen, y se calcina en hornos horizontales con corriente de aire y se convierte en clinker, el cual contiene todos los componentes del cemento, excepto el sulfato de calcio dihidratado, que se le agrega como componente final.

Los componentes que forman son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al enfriarse.

El cemento “portland” consiste principalmente de cuatro componentes:

- I. Silicato Tricálcico (C3S)
- II. Silicato Dicálcico (C2S)
- III. Aluminio Tricálcico (C3A)
- IV. Ferrito aluminato Tetracálcico (C4AF)

2.3 Fabricación y composición del cemento.

2.3.1 Materias primas.

Las materias primas están divididas en dos tipos principales: “calcáreas” y “arcillosas”.

Los materiales calcáreos son esencialmente “Lima” y su composición es similar a la del cemento. Pueden ser naturales o no. Las principales fuentes de suministro de material calcáreo son: Las rocas metamórficas y sedimentarias y algunos residuos alcalinos de otras industrias.

Los materiales arcillosos contienen alúmina; sílica y óxido de hierro. Las fuentes naturales frecuentemente utilizados en la fabricación del cemento “Portland” son: Bentonitas; sílica flour y arcillas cenizas volcánicas.

Hoy en día se utilizan materiales arcillosos sintéticos como “blast furnace slag” material residual de las acerías o el “fly ash” cenizas residual de las plantas volcánicas

2.3.2. Impurezas

Al seleccionar las materias primas es importante considerar las impurezas que pueden generar cambios drásticos en el comportamiento del cemento. Estas impurezas pueden ser:

1. Magnesio
2. compuestos fluorinicos.
3. fósforo
4. óxidos primarios
5. óxido de zinc
6. álcalis

Las impurezas producen un cambio de reactividad de los componentes del cemento, tales como:

- a) Exceso de magnesio (>5%): causa una expansión retardada disruptiva en el cemento fraguado.
- b) Exceso de fluorine (>01%): (fluoruro de calcio): causa una disminución de la resistencia a la compresión.
- c) Fosfatos: los fosfatos pueden ser beneficiosos (hasta un 0.25%) para la resistencia, pero un exceso puede ser muy perjudicial.
- d) Exceso de Óxidos de zinc y de plomo generan efectos dañinos en las propiedades del cemento.
- e) Exceso de Álcalis causan efectos variables, (>0.6%) reacciona adversamente con ciertos elemento de sílice.

2.3.3. Selección de los materiales.

Materia prima:

**2/3 De material calcáreo
(Piedras calizas)**

**1/3 De material arcilloso
(aluminio), sílice y óxido de
hierro)**



FIGURA. 27. MATERIA PRIMA

Los cementos están hechos de caliza u otro material con alto contenido de carbonato de calcio, arcillas o pizarras y algunos óxidos de hierro y aluminio, si éstos no se encuentran en cantidades suficientes en arcillas o pizarras.

Antes de comenzar la calcinación de la materia prima, esta debe ser pulverizada hasta alcanzar el tamaño de finos (< 200 micrones), luego se mezclan uniformemente en proporciones específicas de forma que el volumen total de la mezcla tenga la composición adecuada para producir el tipo particular de cemento “portland API”. Como veremos en la lámina siguiente, existen dos métodos en la industria para ejecutar la mezcla de los materiales ya pulverizados.

Los materiales secos se muelen y mezclan vigorosamente en las proporciones requeridas por cualquiera de los dos procesos. Esta mezcla cruda se alimenta en la parte más elevada del horno rotatorio inclinado, a un gasto uniforme y viaja lentamente por gravedad a la parte más baja del mismo. El horno se calienta con carbón de piedra, diesel o gas a temperaturas de 1,430 a 1,540 °C (2,606 a 2,804 °F). Estas temperaturas originan reacciones químicas entre los ingredientes de la mezcla cruda, resultando un material llamado Clinker.

El Clinker se deja enfriar a temperatura ambiente con corriente de aire en un área próxima al horno, una vez frío, se muele en molinos de bolas, dándole el tamaño deseado de las partículas y agregándole una determinada cantidad de agua. En la salida del molino se le adiciona al Clinker, por vías separadas, una cantidad de yeso (sulfato de calcio) con lo que se obtiene el producto terminado: cemento Portland. En la Figura 2.3.3.1, se muestra el proceso de fabricación del cemento Portland. A continuación se describen los principales compuestos del cemento, así como sus funciones.

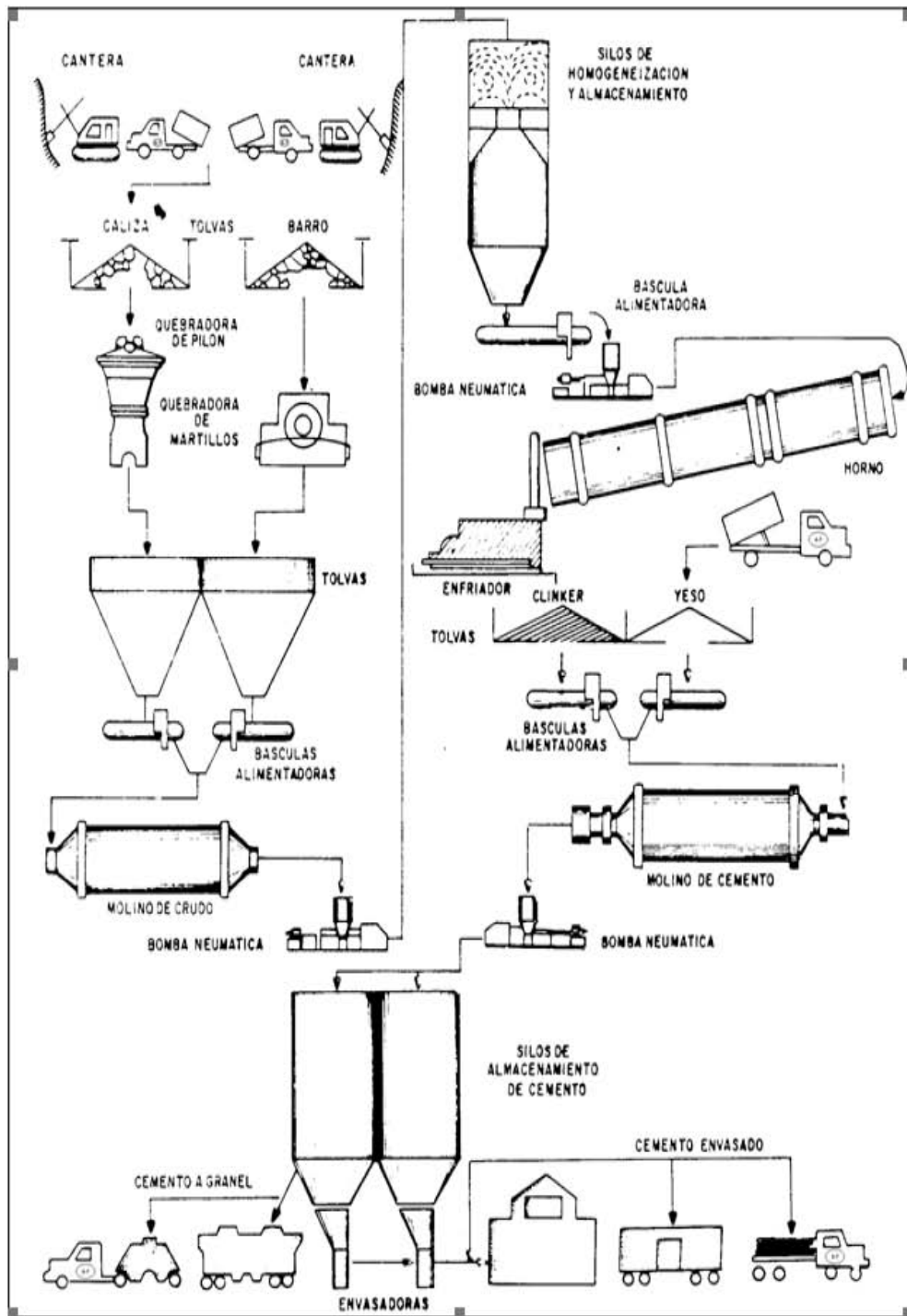


FIGURA 28. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO

2.4 Procesos de fabricación del cemento.

2.4.1 Proceso de mezcla de las materias primas.

La materia prima previamente seleccionada y pulverizada se mezcla siguiendo un patrón de dosificación que permitirá producir finalmente el tipo de cemento “portland” requerido.

Aunque cada planta tiene su método específico, existen dos procesos generales de mezcla los cuales tienen sus ventajas y desventajas. Estos métodos son:

1. Proceso seco.
2. Proceso húmedo.

El proceso seco fue el primer método empleado por la industria del cemento, sin embargo la poca precisión en la dosificación no permitía la obtención de propiedades homogéneas en el cemento “portland”.

Durante muchos años el proceso húmedo fue el preferido porque resulta más exacto el control de la dosificación de la materia prima, sin embargo este proceso requiere una gran demanda de energía en el horno para poder evaporar el agua, lo cual resulta muy costoso en la actualidad.

Esta realidad ha forzado a la industria del cemento a retomar el proceso de mezclado en seco, el cual con el desarrollo de nuevas tecnologías ha perfeccionado el proceso de dosificación y por consiguiente la obtención de cementos “portland” de calidad.

2.4.2 Proceso Seco.

Inicialmente se preparan las materias primas y se dosifican después se pasan a un molino para homogeneizar el tamaño de las partículas y su cantidad. La dosificación se realiza siguiendo el patrón requerido según el tipo de cemento que se desea.



Pulverizar hasta alcanzar tamaño de polvo fino (<200 μm)!



La materia prima en polvo se almacena por separado antes de iniciar el proceso de mezcla dosificada !

FIGURA 29. PULVERIZACIÓN DE LA MATERIA.

Seguidamente, a través de cintas transportadoras los materiales ya dosificados se transportan hasta el “ciclón separador”. En este ciclón mediante el movimiento por aire se separan las partículas que están sobre medida, las cuales son nuevamente llevadas a un molino, de donde vuelven a ser entregadas a la cinta transportadora de materia prima.

Los finos salen del ciclón separador y alimentan a una bomba neumática, la cual los envía por encima dentro de los “silos de mezcla en seco” donde por medio de aire se termina de mezclar y homogeneizar la mezcla. Finalmente, la mezcla de materias primas molidas se transporta mediante sistemas neumáticos hasta los silos de almacén de material listo para ser calcinado.

Esta mezcla de materia cruda seca o húmeda, según el proceso de fabricación, se alimenta en la parte más elevada del horno rotatorio inclinado, a un gasto uniforme y viaja lentamente por gravedad a la parte inferior del mismo.

El horno se calienta con gas a temperaturas de 1430 a 1540°C, estas temperaturas originan reacciones químicas entre los ingredientes de la mezcla cruda, resultando un material llamado clinker.

Hoy en día algunas de las materias primas son obtenidas de otros procesos industriales, y ya vienen pulverizadas, lo que facilita esta etapa del proceso de fabricación del cemento “Portland”. Ejemplo de ello son la sílica y los óxidos de hierro. Se pasan por un separador de aire y se les lleva a silos mescladores para su almacenamiento antes de pasar al horno rotatorio.

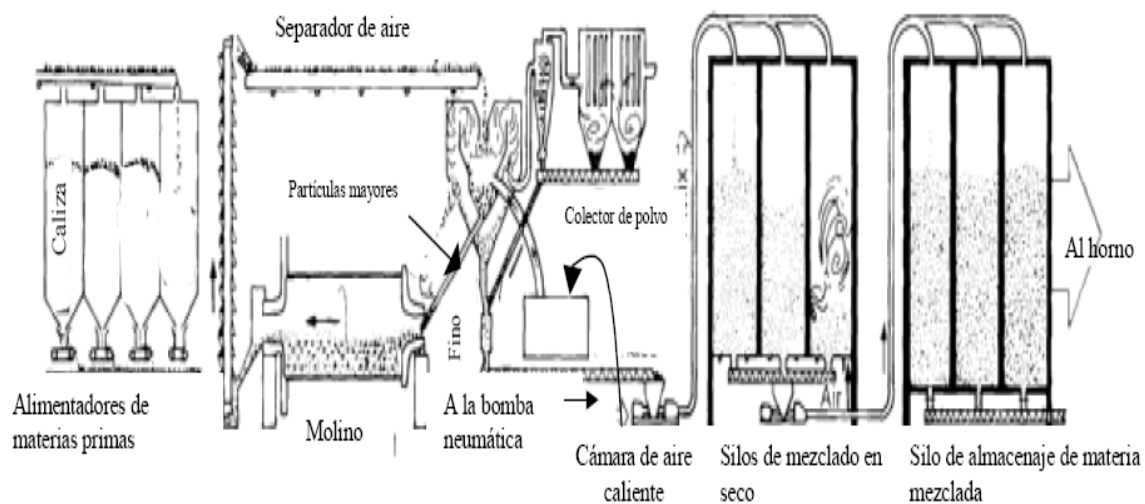


FIGURA 30. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO, PROCESO SECO.

2.4.3 Proceso Húmedo.

Igual que el método anterior, el proceso de mezcla húmedo se inicia con la dosificación de la materia prima. Luego se pasa por un molino que permite entonar el tamaño de las partículas de materia prima, y al cual se le agrega agua, para elaborar una lechada de materia prima.

Del molino, la lechada de materia prima es transportada a una zaranda con mallas específicas que tamizan las partículas de tamaño específico y se reenvían las que están fuera de especificaciones hasta el molino, para que nuevamente sean sometidas a la molienda, posteriormente se pasa a unos contenedores que mantienen en movimiento la mezcla antes de pasarla al horno rotatorio.

Vista posterior del Horno rotativo



Vista lateral del molino del "Clinker"

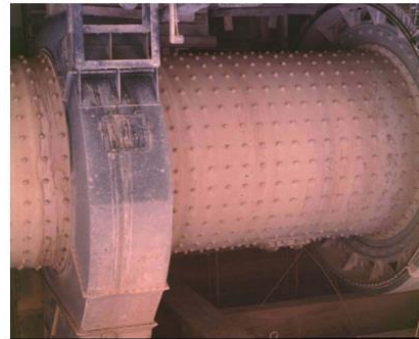


FIGURA 31. VISTA POSTERIOR Y LATERAL DEL HORNO ROTATIVO Y DEL MOLINO

La lechada de mezcla de partículas finas se transportan mediante bombas de lechadas hasta dentro de tanques homogeneizadores ("batch mixer"), donde se termina de homogeneizar de acuerdo a las especificaciones de la fabricación.

Finalmente la lechada se coloca en silos de almacenamiento previo a la calcinación.

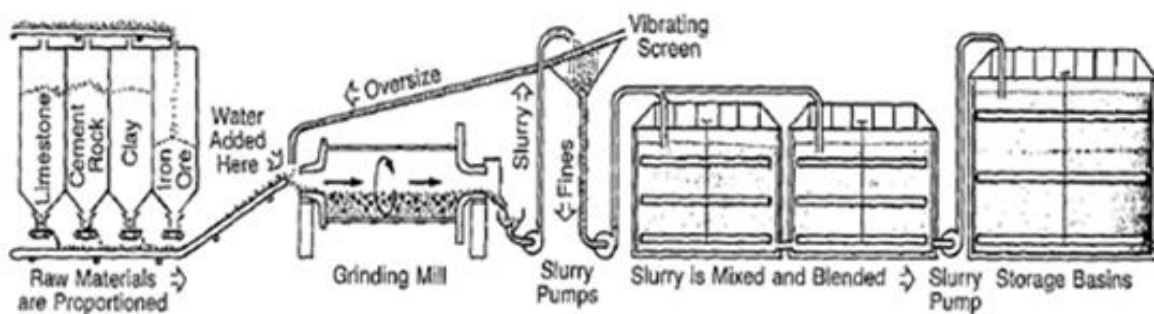


FIGURA 32 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO, PROCESO HÚMEDO.

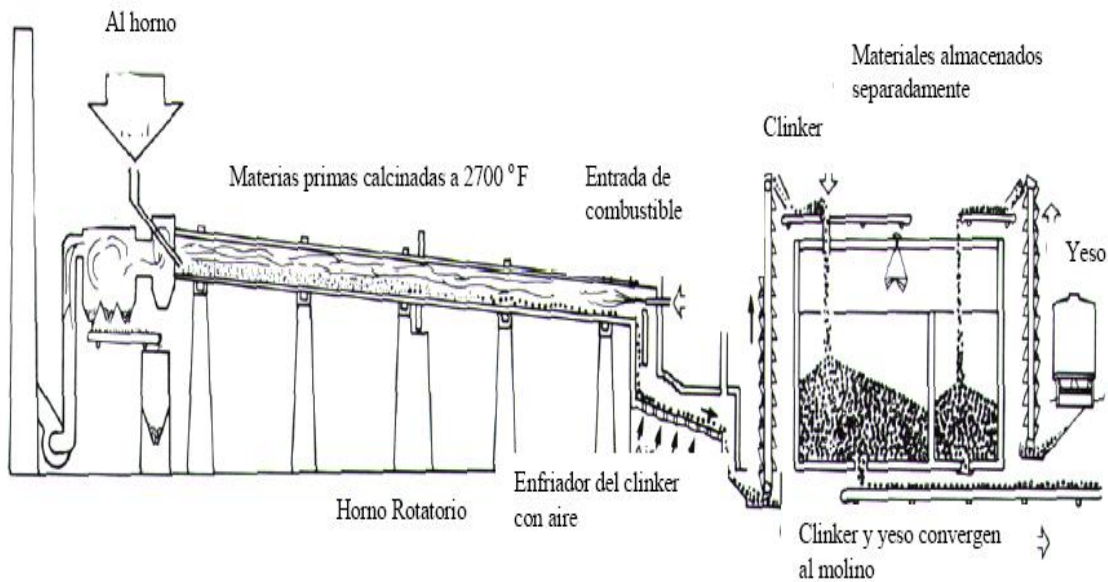


FIGURA 33. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO, PROCESO DE CALCINACIÓN DEL CLINKER.

2.4.4 Proceso de Calcinación.

Después de tener la materia prima pulverizada y mezclada, se inicia el proceso de calentamiento o "Calcinación de la materia prima". Esta etapa se desarrolla en un horno horizontal ligeramente inclinado hacia la salida, el cual se mantiene en baja rotación (Entre 1 a 4 RPM); como resultado se transmite movimiento a la mezcla mientras se calienta y pasa a través del horno.

Dependiendo del tipo de horno, se utiliza carbón; gas o combustible como combustible.

Una vez que la materia prima se encuentra sometida a temperatura en el horno, se desarrollan una serie de complejas reacciones hasta convertir la materia prima en "Clinker".

En el horno rotativo existen 6 zonas de calentamiento las temperaturas que se alcanzan en estas etapas y las reacciones que ocurren se pueden observar en la tabla mostrada en la lámina.

En la zona I ocurre la evaporización, donde se remueve toda el agua de la mezcla, cuando se utiliza el proceso de mezcla seca, la evaporización ocurre muy rápidamente. Sin embargo en los procesos húmedos, se requiere hasta casi la mitad de la longitud del horno para alcanzar la evaporización.

En la zona II se desarrolla la etapa de precalentamiento, donde ocurre un proceso de deshidrolización de las arcillas.

En las zonas III y IV ocurren una serie de eventos importantes. Primeramente se culmina la deshidrolización de las arcillas y el producto se cristaliza. El carbonato de calcio se descompone y convierte en cal libre, liberando una gran cantidad de dióxido de carbono. Se inicia también la formación de varios aluminatos de calcio y de ferritos.

La zona V o de sinterización, a pesar de ocupar una pequeña porción del horno es donde se forman prácticamente la mayoría de los elementos principales del cemento. En este punto, parte de la mezcla se licua. Cuando se alcanza la máxima temperatura de la zona de sinterización (temperatura del “clinker”) la formación de C3S y C2S es total. La cal libre que no ha reaccionado, conjuntamente con la alúmina y los óxidos de hierro, se mantiene en la fase líquida.

En la zona VI o de enfriamiento, los elementos líquidos se cristalizan formando C3A y C4AF.

La calidad del clinker y del cemento final dependerá directamente de la tasa de enfriamiento. EL mejor clinker se obtiene enfriándolo lentamente hasta una temperatura de 2282°F, seguido de un rápido enfriamiento a una velocidad de 32 a 36 °F/min. Cuando la tasa de enfriamiento es menor (7 a 9 °F/min) el C3A y C4AF desarrollan un alto grado de cristalización mientras que los C3S y C2S se convierten en materiales menos reactivos, también se forma el cristal de MgO (“periclase”). Finalmente obtenemos un cemento menos activo hidráulicamente, que desarrolla tempranamente resistencia a la compresión, pero que a largo plazo su resistencia es baja. También debido a los cristales de “periclase” el cemento fraguado tiende a desmoronarse.

Caso contrario, cuando el enfriamiento es rápido, la fase líquida formada durante la etapa V, se vitrifica. EL C3A y el C4AF se mantienen vitrificados y el C3S y el C2S son más reactivos. EL MgO también se mantiene vitrificado. Como resultado, tenemos un cemento que desarrolla una resistencia inicial tardía, pero una mayor resistencia final. Tampoco sufre de desmoronamiento ya que el “periclase” es menos reactivo.

Después que el clinker se enfría se coloca en un silo y después se dosifica con yeso y se envía mediante cinta transportadora a los molinos, para la molienda final.

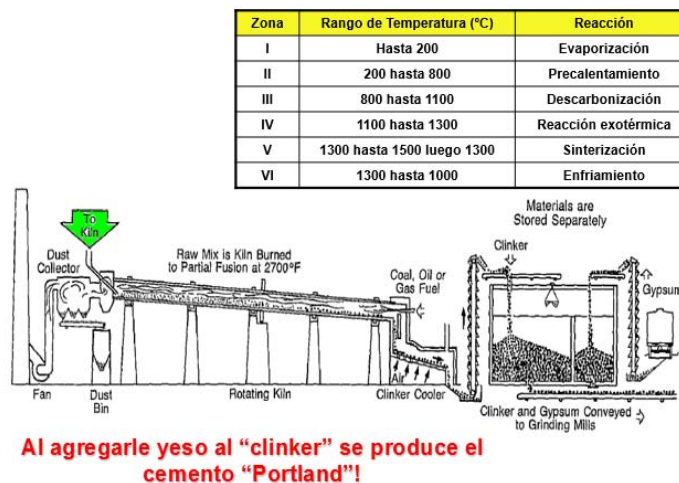


FIGURA 34. DIAGRAMA DEL PROCESO DE CALCINACIÓN DEL CLINKER.

2.4.5 Molienda del clinker

Como ya lo hemos expuesto, la molienda final se realiza después de agregar yeso al “clinker”, para evitar, tal como veremos después que el cemento sufra de fraguado prematuro “flash setting”.

El molino final normalmente es tipo tubular horizontal, que tiene en su interior un sistema de bolas que sirven de molino. Dependiendo del tipo de cemento el clinker se muele aun tamaño específico, generalmente el tamaño de las partículas varía entre 1 y 150 μm . El proceso de molienda genera mucho calor, por lo tanto se debe tener cuidado en que no se alcancen altas temperaturas, caso contrario, el yeso se puede convertir en sulfato de calcio semi hidratado, el cual aunque sigue previniendo el fraguado prematuro, puede generar otro fenómeno conocido como falso fraguado

El clinker se deja enfriar a temperatura ambiente con corriente de aire, en un área inmediata al horno, construida bajo diseño para controlar la velocidad de enfriamiento. Una vez frío, se almacena y se muele posteriormente en molinos de bolas, para darle el tamaño deseado a las partículas.

Figura 5, El clinker se alimenta al molino de cemento conjuntamente con una dosificación de sulfato de calcio dihidratado, con lo que se obtiene el producto terminado de cemento Portland.

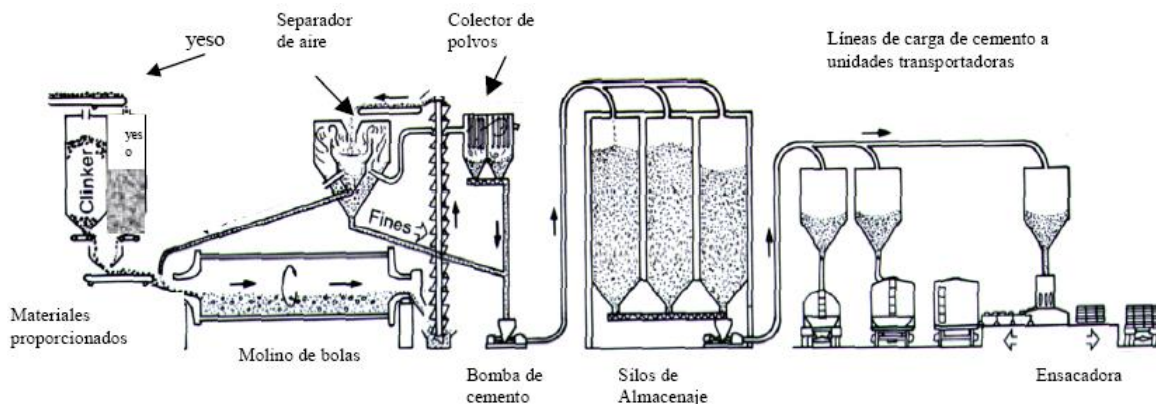


FIGURA 35. PROCESO DE ALMACENAMIENTO DEL CEMENTO

2.4.6 Efectos de la Hidratación de las fases del “CLINKER”.

Los cuatro (4) componentes principales del cemento presentan diferente cinética de reacción y forman diferentes productos hidratados. La interacción entre ellos tiene como resultado final el comportamiento particular de cada tipo de cemento.

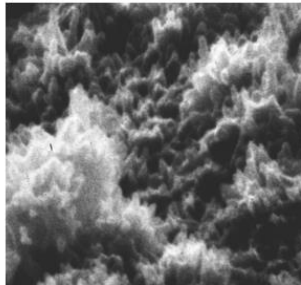
Las principales fases que se hidratan son:

- 1.- Fases silicatos (C2S y C3S)
- 2.- Fases de aluminatos (C4AF)

Las *fases de silicatos* son las más abundantes del orden del 80% del material total, el C3S es el principal con el 70% del total, y el C2S normalmente no excede del 20%.

Los productos de la hidratación para ambas fases son el silicato de calcio hidratado y el hidróxido de calcio (Portlan*dita). El primero no tiene la composición exacta de $C_3S_2H_3$, sino que las proporciones de C:S y H:S son variables y depende de varios factores como la concentración de calcio en la fase acuosa, temperatura, aditivos y añejamiento. Este material es casi amorfo y es conocido como "gel C-S-H". Este material es considerado como el origen del cemento fraguado.

Las zonas densas amorfas son los cúmulos de C-S-H los espacios oscuros son poros.



Cristales hexagonales de hidróxido de calcio. Perjudiciales para la integridad del cemento en ambientes agrios o en presencia de sulfatos.

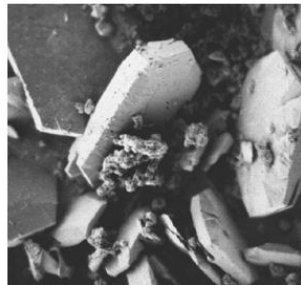


FIGURA 36. HIDRATACIÓN DE LAS FASES DEL CLINKER

2.4.7 Efectos de la hidratación del C3S y del C2S.

Al agregarse agua las fases de silicato se hidratan rápida pero brevemente y experimentan un periodo de baja reactividad (inducción). Esto no influye en la reología del cemento. Luego, al continuar el proceso de hidratación, la reacción del C3S excede a la del C2S por mucho (aquí comienza a formarse el gel c-s-h masivamente). Así, la hidratación del C3S es la responsable máxima del desarrollo del fragüe y la resistencia inicial.-

El mecanismo de hidratación del C2S es similar al del C3S. Esta reacción tiene ninguna importancia, salvo solo en términos de resistencia final del cemento endurecido.

Los cementos con concentración de C3S menores de 45% son considerados retardados. Mientras los que tienen hasta 70% son considerados acelerados de temprano y alto desarrollo de resistencia.

La hidratación del C2S no afecta el desarrollo temprano de resistencia a la compresión pero si lo afecta al final cuando su hidratación se acelera.

La velocidad de reacción del C₃S es mayor que la del C₂S:

Concentración de C ₃ S	Efecto en el cemento
40 -45%	Cemento retardado
60- 65%	Cemento con desarrollo Temprano y Alto de resistencia

Concentración de C ₂ S	Efecto en el cemento
< 20%	No afecta al fraguado inicial Incrementa el desarrollo de resistencia final

FIGURA 37. EFECTOS DE LA HIFRATACIÓN DEL C₃S Y C₂S

2.4.8 Comportamiento de la hidratación del C₃S y el C₂S en función de la temperatura y el tiempo.

Como puede observarse en la lámina, la hidratación del C₃S se inicia poco después de comenzar la mezcla independientemente de la temperatura, luego la rata de reacción se hace directamente proporcional a la temperatura, pero después de cierto tiempo (1 día) la hidratación se acelera y se hace independiente de la temperatura, alcanzando el valor final prácticamente al mismo momento.

El caso del C₂S la hidratación comienza en forma retardada, se observa también que la hidratación es función directa de la temperatura, siendo cero a temperatura baja por espacio de media día.

Seguidamente el comportamiento se acelera, pero en forma individual cada una a su velocidad, siendo más rápido a mayor temperatura. Al final todos los procesos convergen casi al mismo tiempo.

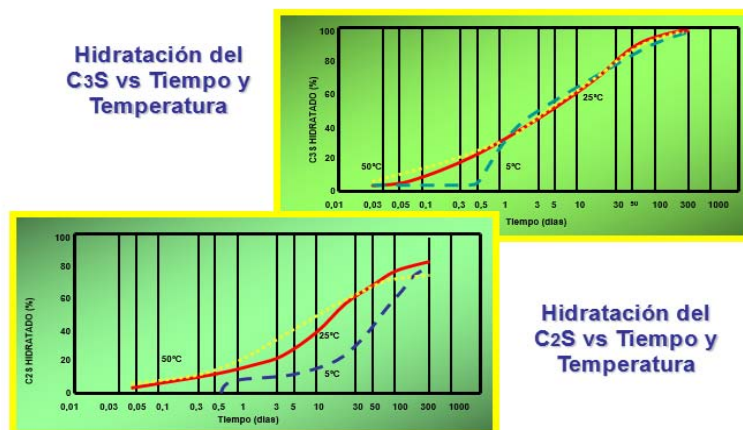


FIGURA 38. COMPORTAMIENTO DE LA HIDRATACIÓN DEL C₃S y C₂S

Desarrollo de los cristales amorfos de C-S-H.

El crecimiento de los cristales de C-S-H continúa en el tiempo mucho después del fraguado inicial del cemento, reduciendo la permeabilidad e incrementando la resistencia mecánica a la destrucción. Figura 2.4.8.1



FIGURA 39. ETAPA INICIAL DE HIDRATACIÓN

2.4.9 Diagrama Térmico de Hidratación del C₃S

La hidratación del C₃S es un proceso exotérmico por lo tanto la velocidad de hidratación se puede evaluar mediante la conducción calorimétrica.

La hidratación del C₃S puede utilizarse como el modelo de la hidratación del cemento ya que este es el principal elemento del cemento. El proceso puede ser dividido en cinco (5) etapas, a saber:

- 1.- Periodo de preinducción.
- 2.- Periodo de inducción.
- 3.- Periodo de aceleración.
- 4.- Periodo de desaceleración.
- 5.- Periodo de difusión.

**La reacción dura varios días y es fuertemente exotérmica.
En el gráfico pueden diferenciarse varias etapas:**

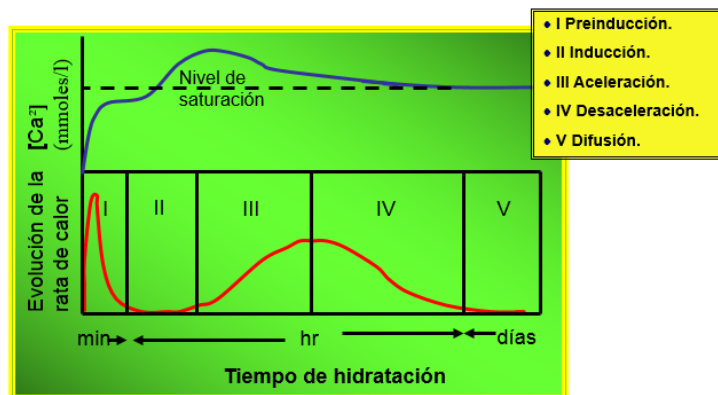


FIGURA 40. DIAGRAMA TÉRMICO DE HIDRATACIÓN DEL C₃S

2.5 Fases del Diagrama Térmico.

Del diagrama térmico se puede distinguir 5 fases que enunciaremos a continuación.

2.5.1 Periodo de preinducción

Su duración es de solo unos minutos, durante y luego de la mezcla con agua. Una reacción exotérmica se observa debido a la rápida hidratación inicial del polvo.

Desde el punto de vista químico, una capa de gel C-S-H se forma encima de la superficie del C3S anhidro. El mecanismo aceptado es el de una disolución / precipitación. La solución formada se sobresatura muy rápidamente, lo que origina la precipitación del gel c-s-h.

Este gel tiene una proporción C:S cercana a 1.0. Además, los iones de silicato son diméricos. Así, la precipitación tiene lugar en la interfase del cristal C3S/liquido, donde la concentración iónica es mayor.

Durante este periodo, la concentración de cal se incrementa a medida que la hidratación continúa.

2.5.2 Periodo de inducción

La hidratación es baja durante este periodo. La liberación de calor disminuye considerablemente. El gel c-s-h continúa precipitándose, y la concentración de iones Ca^{2+} y OH^- sigue incrementándose hasta alcanzar el nivel supercrítico. En este punto comienza la precipitación de hidróxido de calcio y por ende, la hidratación continua a un ritmo mayor, marcando el final de este periodo.

Para determinar el final del periodo de inducción, se modelaron dos teorías;

A.- Teoría de la capa de protección: como la permeabilidad del gel c-s-h precipitado es muy baja, la hidratación disminuye y así comienza el periodo de inducción. Para continuarla puede ocurrir una de las dos reacciones siguientes:

- 1.- Fuerzas de osmosis son generadas dentro del gel y ello reinicia la hidratación. Así, la capa de protección revienta, permitiendo una liberación de silicatos dentro de la solución.
- 2.- El gel C-S-H cambia morfológicamente, de tal manera que su permeabilidad se incrementa.

B.- Teoría de la nucleación retardada: la precipitación del hidróxido de calcio provoca una aceleración de la hidratación. Así, diferentes teorías se han formulado dentro de este modelo para explicar el fin del periodo.

1. Cuando los iones Ca^{2+} y OH^- superan un cierto nivel (de 1.5 a 2.0 veces el valor de saturación) la hidratación se dispara nuevamente

2.- Se produce una rápida absorción química del agua en sitios preferenciales del gel c-s-h. Los productos de la hidratación reaccionan nucleándose en esos sitios y una hidratación acelerada comienza cuando esos núcleos alcanzan un tamaño crítico.

2.5.3 Periodo de aceleración.

En esta etapa después de unas horas el momento de hidratación llega a su punto culminante máximo.

2.5.4 Periodo de desaceleración.

Después de varias horas el momento de hidratación ha concluido de tal forma que ahora está llegando a su punto de difusión.

2.5.5 Periodo de difusión.

Después de varios días, el tiempo de hidratación llega a su finalización.

2.6 Hidratación de las Fases del Clinker

2.6.1 Hidratación de la fase Aluminato C3A.

Las fases de aluminatos especialmente el C3A son las más reactivas al comienzo de la hidratación.-

Aunque su presencia es mucho menor que las de silicatos, tienen una significativa influencia sobre la reología de la lechada y la resistencia inicial del cemento fraguado.

La hidratación del C4AF es similar, pero mucho más lenta.

Como en la reacción de los silicatos, el primer paso de la hidratación del C3A es una reacción interfacial entre la superficie anhidra y el agua, hidroxilando los iones superficiales de AlO_2^- y O_2^-

en iones $[Al(OH)_4]^-$ y OH^- , resultando en una disolución de la superficie en una solución que pronto se sobresatura, precipitando aluminato de calcio hidratado.

Este producto es meta estable y cristaliza en forma octogonal, pero pronto se convierte en un cristal cúbico más estable (C3AH6). En condiciones ambientales, esta reacción tarda varios días en completarse.

El aluminato de calcio hidratado no es amorfo y por lo tanto no forma una capa protectora, luego, no se observa un periodo de inducción y la hidratación se completa muy rápida e incontroladamente. Este evento se manifiesta con severas dificultades reológicas de la lechada.

2.6.2 Fase Aluminato. Control de la reacción de hidratación con yeso.

El aluminato de calcio hidratado no es amorfo y por lo tanto no forma una capa protectora, luego, no se observa un periodo de inducción y la hidratación se completa muy rápida e incontroladamente. Este evento se manifiesta con severas dificultades reológicas de la lechada.

La hidratación del C3A es controlada mediante la adición de un 3 al 5% de yeso al "Clinker" antes de ser molido. Al contactarse con el agua, una parte del yeso (sulfato de calcio) se disuelve. Los iones de sulfato y calcio liberados reaccionan con los iones de aluminato e hidroxilos liberados por el C3A y forma trisulfoaluminato de calcio hidratado, más conocido como etringita.

La etringita tiene una forma de aguja cristalizada que se precipita en la superficie del C3A, retardando la posterior hidratación del mismo. Así se crea un "periodo de inducción" artificial.-

Durante este periodo el yeso se consume gradualmente y la etringita continúa precipitándose. Cuando el yeso se gasta totalmente, la hidratación continua normalmente, la etringita se inestabiliza y se convierte en mono sulfo aluminato hidratado.

El resto de C3A anhidro forma aluminato de calcio hidratado.

Utilizando un microscopio electrónico se puede observar la conformación de la micro estructura del cemento. En la primera foto con poca amplitud se observan zonas densas propias de los cristales hidratados de C3S y C2S, con zonas porosas. Incrementando la amplitud del microscopio, se pueden observar dentro de la zona porosa, los cristales de hidróxido de calcio y filamentos de etringita. Aumentando la potencia del lente podemos ver con mayor nitidez los filamentos de etringita rodeando los cristales de C3A.

2.6.3 Diagrama térmico de la hidratación del C3A.

La forma del cristal de C3A no amorfo permite la hidratación en forma violenta de todo el C3A sin que se inhiba las capas internas. Esta acción violenta genera una producción muy alta de calor sin que se forme un periodo de inducción como en el caso del C3S. Al añadirse el yeso, se produce inicialmente otro cristal llamado etringita, que recubre el resto del C3A inhibiéndole y formando una etapa de inducción falsa. El diagrama térmico así formado mantiene similitud al del C3S, permitiéndosele al cemento un tiempo de trabajo aceptable.

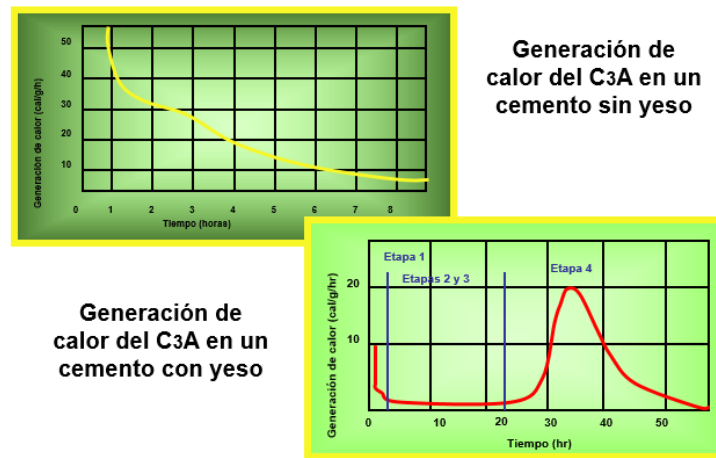


FIGURA 41. DIAGRAMA TÉRMICO DE HIDRATACIÓN DEL C₃A

Etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado).

Los cristales de Etringita, que se forman de la mezcla del yeso que se agregó al "clinker" antes de la molienda final y los iones de aluminio más los hidróxidos disueltos por la hidratación del C3A, son los encargados de retardar el proceso de hidratación del C3A. Generando una falsa etapa de inducción que permite la hidratación normal del C3S. Los cristales de etringita tienen forma de cerillas tal como se ve en la lámina.

2.6.4 Diagrama térmico del cemento "Portland".

La hidratación del cemento es una secuencia de reacciones químicas superpuestas entre el 'clinker', el yeso (sulfato de calcio) y el agua, que resulta en una lechada que continuamente se espesa y endurece.

Cada fase influye sobre las demás, así la hidratación del C3A es modificada por la presencia del C3S porque la producción de hidróxido de calcio refuerza la acción del yeso.

Tampoco la composición del "clinker" es pura. Las impurezas presentes también influyen en la velocidad de hidratación.

El termo grama del cemento Portland puede describirse brevemente como la suma de los correspondientes al C3S y al C3A.

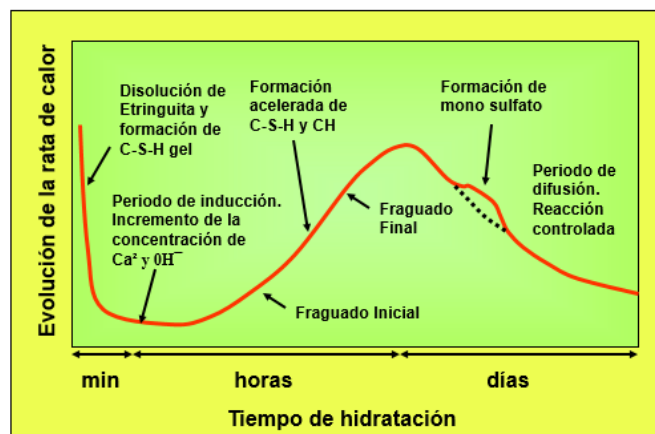


FIGURA 42. TERMOGRAMAS DEL CEMENTO PORTLAND C_3S y C_3A

2.7 Efectos físicos de la hidratación del cemento.

2.7.1 Variación del volumen

Cuando el cemento reacciona con el agua, el sistema así formado sufre de una disminución de volumen y ocurre porque la densidad absoluta del material hidratado es mayor que la de los reactivos iniciales.

A pesar de esta reducción volumétrica, las dimensiones externas del cemento fraguado son casi la misma o es ligeramente menor por la contracción volumétrica externa.

Esta disminución, llevada a las condiciones de un pozo puede ser perjudicial ya que afecta la transmisión de la presión hidrostática a la formación y afecta también la habilidad del cemento para prevenir el flujo de fluidos (canalización).

2.7.2 Efecto de la temperatura

Es uno de los mayores factores que afectan la hidratación del cemento ya que la velocidad de hidratación depende directamente de este parámetro.

A medida que la temperatura aumente, los periodos de inducción y fragüe se acortan y la velocidad de hidratación es mayor.

No obstante, el grado de hidratación y por ende la resistencia final son a menudo, menores. Esto puede deberse a la formación de una capa más densa de gel c-s-h sobre la superficie del C3S anhidro, dificultando la posterior hidratación.

Algunos cambios ocurren en la estructura del gel C-S-H a altas temperaturas, ya que el material se hace más fibroso e individualizado y se observa un alto grado de polimerización del silicato. Por encima de 238 °F el C-S-H es más estable y comienzan a formarse cristales de silicato de calcio hidratado.

Tampoco la etringita es estable por encima de 140 °F, se descompone en monosulfoaluminato y yeso, el primero de los cuales es estable hasta 374 °F

2.7.3 Fragües instantáneo y falso.

Fragüe instantáneo: se produce cuando el clinker es molido sin yeso por consiguiente el agua reacciona incontroladamente con el C3A. Esta es la razón por la que el yeso se agrega y muele junto con el "clinker". Para un comportamiento óptimo, la proporción de yeso debe balancearse de acuerdo a la reactividad del clinker

Fragüe falso: se produce por exceso de sulfatos (sulfato de calcio semihidratado (CSH1/2) o anhidrita (CS), los cuales son en algunos casos las únicas formas de sulfatos presentes.

Normalmente estos sulfatos presentan una solubilidad el doble mayor que la del yeso, por consiguiente, la fase acuosa del cemento se sobresatura rápidamente con respecto al yeso. En este momento un "yeso secundario" se precipita, gelificando la lechada y produciendo un "falso fragüe".

Esta situación puede revertirse con una agitación vigorosa o agregando dispersantes.

2.7.4 Efecto del envejecimiento.

El desempeño del cemento se ve afectado por su exposición a la atmósfera y/o a las altas temperaturas y humedad durante su almacenamiento. Los principales efectos son:

- 1) 1.- Se incrementa el tiempo de espesamiento
- 2) 2.- Disminuye la resistencia a la compresión
- 3) 3.- Disminuye el calor de hidratación
- 4) 4.- Incrementa la viscosidad de la lechada

Estos se producen principalmente por carbonización de las fases de silicato de calcio hidratado y por la hidratación parcial de la cal libre (cao).

Cuando es almacenado en silos en zona de clima caluroso, la temperatura del mismo puede ser tal que inicie el proceso de deshidratación del yeso. Así, este cemento tiende a presentar el fenómeno del "fragüe falso".-

Si hay suficiente sulfato de potasio como impureza, este puede reaccionar con el yeso formando "syngenita". El agua liberada puede prehidratar las fases de aluminatos, tendiendo a presentar el fenómeno del "fragüe falso".

2.7.5 Influencia de los álcalis

Los principales materiales alcalinos encontrados en el cemento son el potasio (k) y el sodio (Na). Estos afectan el fragüe y el desarrollo de la resistencia. Su concentración máxima no debe exceder del 1.0%.

Los efectos de los álcalis sobre la resistencia son impredecibles. Puede mejorarla como empeorarla. "Jawed y skainy (1978)" demostraron que los álcalis mejoran la resistencia inicial pero pueden ser negativos sobre la resistencia final.

2.7.6 Efecto de la distribución de partículas.

Los cementos con mejor distribución de partículas desarrollan valores más altos en las propiedades mecánicas porque tienen menos porosidad en sus intersticios y requieren menos agua.

2.7.7 Resistencia a los sulfatos

Los fluidos de completación comúnmente contienen sulfatos de sodio y magnesio lo cual es perjudicial para el cemento. Estos elementos reaccionan con el hidróxido de calcio precipitado para formar hidróxidos de magnesio y sodio y sulfato de calcio.

Este último reacciona con los aluminatos y forma "etringita secundaria". También una "hinchazón" ocurre debido al reemplazo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por $\text{Mg}(\text{OH})_2$

Cuando la etringita se forma después que el cemento desarrolla resistencia ocurre una expansión. Si es pequeña, la misma es beneficiosa pues mejora la adherencia del cemento al revestidor y a la formación, pero si es incontrolada, el resultado es una degradación del cemento, su rompimiento por insuficiencia de resistencia y el daño de los tubulares.

El cemento con bajo contenido de C3A son resistentes a los ataques de los sulfatos. Normalmente, los sulfatos suelen ser un problema por encima de los 140 °F debido a la baja solubilidad del Mg y el Na a bajas temperaturas.

El agregado de compuestos "puzolánicos" al cemento como la ceniza volcánica reduce sustancialmente el efecto de los sulfatos.

El siguiente diagrama representa esquemáticamente el comportamiento del cemento en función de su reactividad y la presencia de sulfatos. En los casos en que una de estas dos condiciones son altas, el cemento fragua en minutos. En el caso que ambas son altas, el sulfato puede generar etringita la cual cubre al C3A retardando su hidratación, dándole 1 hora de bombeabilidad. En el caso que ambas sean bajas se le permite un tiempo holgado de trabajo.













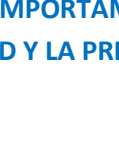
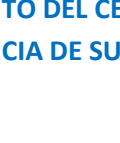
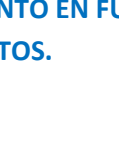






Clinker Reactivity	Sulfate Availability in Solution	Hydration Time		
		10 min	1 hr	3 hr
I Low	Low	Ettringite Recrystallization		
		Ettringite Coating  Workable	 Workable	 Set
		Ettringite Coating  Workable	 Set	 Set
		Ettringite Coating; C_2AH_3 and Monosulf. in Pores  Set	 Set	 Set
II High	High	Ettringite Coating  Set	 Set	 Set
		Ettringite Coating; C_2AH_3 and Monosulf. in Pores  Set	 Set	 Set
		Ettringite Coating; Secondary Gypsum in Pores  Set	 Set	 Set
		Ettringite Coating  Set	 Set	 Set

FIGURA 43. DIAGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO EN FUNCIÓN DE SU REACTIVIDAD Y LA PRESENCIA DE SULFATOS.

2.7.8 Influencia de la distribución del tamaño de partícula

Esta característica conocida como "fineza" es muy importante desde el punto de vista de la reactividad y el comportamiento reológico del cemento.

El tamaño de partícula se utiliza para calcular la relación área / volumen. Esta relación es una medida directa de la reactividad del cemento, ya que la cantidad de agua necesaria para hidratar completamente al cemento es proporcional a esta relación.

También la resistencia es proporcional al tamaño de partícula. Los cementos más finos son los más resistentes. La velocidad de hidratación es también proporcional a la relación área / volumen, lo cual afecta el tiempo de espesamiento de la lechada de cemento.

2.7.9 El encogimiento externo.


Esta etapa plástica en los pozos puede causar los siguientes problemas:

- 1) Desprendimiento de la adherencia.
- 2) Comunicación entre zonas.
- 3) Migración Matricial.



FIGURA 44. DIAGRAMA DEL ENCOGIMIENTO EXTERNO

2.8 Composición química del cemento



Nombre	Abreviatura	Descripción
Silicato Dicálcico	C_2S	Cristales Redondos, superficies áspera Responsable de la Resistencia final
Silicato Tricálcico	C_3S	Cristales Seudo-hexagonales o Angulares Responsable de la Hidratación Temprana
Aluminato Tricálcico	C_3A	Láminas grises como raya. Controla el fragüe inicial y tiempo de espesamiento
Alumino Ferrita Tetracálcico	C_4AF	Matriz blanca que rodea todos los cristales
Oxido de Magnesio	MgO	Pequeñas placas hexagonales Altas concentraciones causan la expansión del cemento
Oxido de Calcio	CaO	Pequeñas esferas lisas coloreadas generalmente agrupadas Concentraciones > 0.5% causan gelificación Prematura

FIGURA 45. MINERALOGÍA BÁSICA DEL CEMENTO.

2.9 Fases Cristalinas del Cemento.

Se le denomina Fases Cristalinas del Cemento a los 4 principales componentes del cemento Petrolero Clase H.

2.9.1 Aluminato Tricálcico (C_3A)

Es el compuesto que promueve la hidratación rápida, además de controlar el fraguado inicial y el tiempo de espesamiento del cemento. También es responsable de la susceptibilidad del cemento a ser atacado por los sulfatos, por lo que sirve como base para clasificarlos como de alta, mediana y baja resistencia en función del contenido de C_3A .

- El cemento de baja resistencia al ataque químico de los sulfatos debe tener un máximo de 15% de C_3A .
- Un cemento de mediana resistencia al ataque químico de los sulfatos debe tener un máximo de 8% de C_3A .
- Un cemento de alta resistencia al ataque químico de los sulfatos debe tener un máximo de 3% de C_3A .

2.9.2 Alúmino Ferrito Tricálcico (C₄AF)

Es un compuesto de bajo calor de hidratación en el cemento. La adición de un exceso de óxido de hierro incrementa la cantidad de C₄AF y decrece la cantidad de C₃A en el cemento.

2.9.3 Silicato Tricálcico (C₃S)

Es el compuesto de más proporción en la mayoría de los cementos y es el principal material que origina la consistencia. Éste proporciona resistencia a la compresión temprana inmediata (de 1 a 28 días); los cementos de alta resistencia inmediata, tienen más alto porcentaje de este compuesto que los cementos Portland y los retardados.

2.9.4 Silicato Dicálcico (C₂S)

Es un compuesto de hidratación lenta y de poca concentración, gana resistencia gradualmente durante un período prolongado, después de los 28 días. Todos los cementos son manufacturados esencialmente con los compuestos descritos y difieren únicamente en sus proporciones.

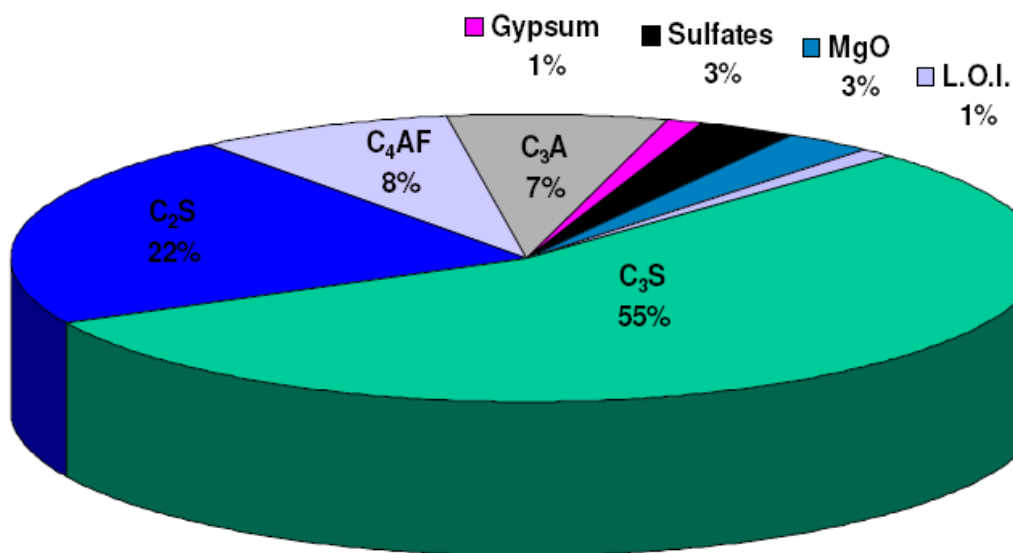


FIGURA 46. COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL CEMENTO PORTLAND

El requerimiento de agua de cada clase o tipo de cemento varía con la fineza de sus granos, es decir, de su área superficial (grano fino). Los cementos retardados tienen baja área superficial y los cementos Portland tienen área superficial ligeramente mayor que los retardados. Los retardadores químicos usados en los cementos retardados pueden ser adicionados al clinker durante la segunda etapa del molido, para darle una distribución uniforme sobre el producto terminado.

El cemento Portland común, puede usarse en pozos petroleros, desde la superficie hasta 1,830 m de profundidad, con temperatura de 16 a 77°C (61 a 171°F). La relación recomendada cemento-

agua, de acuerdo al API, es de 46 % por peso de cemento. Es el más económico de los cementos clasificados y deberá ser usado cuando no se requieran propiedades especiales, siempre y cuando las condiciones del pozo lo permitan.

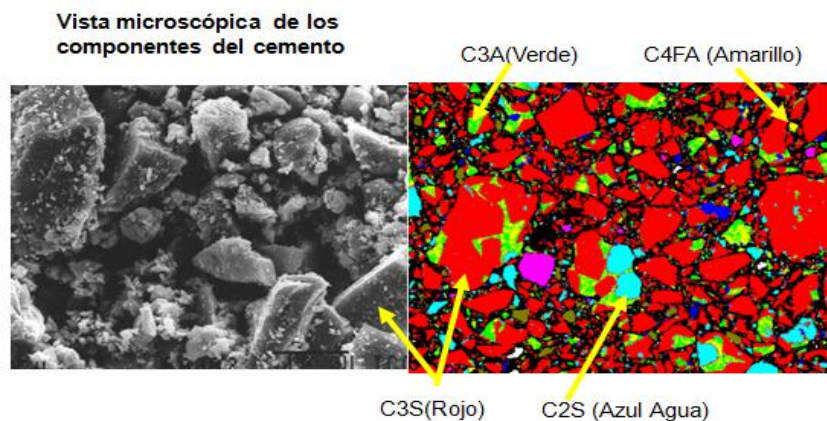


FIGURA 47. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO.

Estos productos se forman en un horno debido a una serie de reacciones que ocurren a altas temperaturas (1500°C) entre los elementos de la materia prima: lima; sílica, alúmina y óxido de hierro.

En el proceso de manufacturación la materia prima seleccionada es molida hasta alcanzar un tamaño muy fino, y su proporción es definida de manera que la mezcla de los componentes finales ya enunciados tengan una composición deseada.

Después de mezclada la materia prima es suministrada dentro de un horno donde se convierte en “Clinker”. El “clinker” se enfría y se le añade una pequeña cantidad de yeso (3% y 5%). Finalmente la mezcla se pulveriza el producto final es el “Cemento Portland”.

Los productos secundarios en concentraciones normales no afectan significativamente las propiedades del cemento fraguado. Pero si afectan la velocidad de hidratación, la resistencia al ataque químico, y las propiedades físicas de la lechada.

De todos los cementos, el Portland es el más importante en cuanto a términos de calidad. Es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos.

Algunos cementos Portland son de fabricación especial, debido a que las condiciones de los pozos difieren significativamente entre sí al variar su profundidad. En la solución de algunos problemas específicos de pozos se utilizan cementos de menor uso.

El cemento Portland es, además, el ejemplo típico de cemento hidráulico: fragua y desarrolla resistencia a la compresión como resultado de la hidratación, lo cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento.

El fraguado y endurecido no solamente ocurre si la mezcla de cemento y agua se deja estática al aire, también presenta si la mezcla se coloca en el agua. El desarrollo de la resistencia es predecible, uniforme y relativamente rápido.

El cemento fraguado tiene baja permeabilidad y es insoluble en agua, de tal forma que expuesto a ésta no se destruyen sus propiedades.

Tales atributos son esenciales para que un cemento obtenga y mantenga el aislamiento entre las zonas del subsuelo.

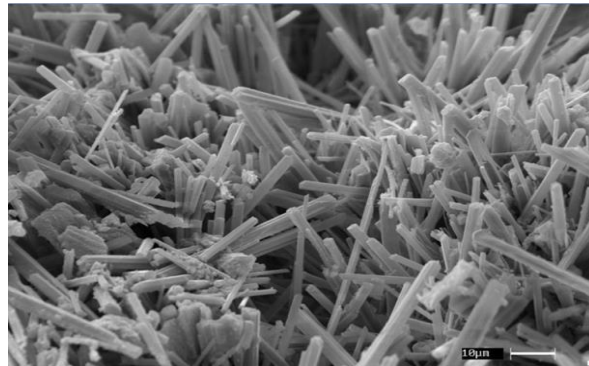


FIGURA 48. VISTA QUÍMICA DEL CEMENTO.

2.10 Propiedades físicas y químicas de los cementos

En la realización de las operaciones de cementación, los cementos se utilizan para desplazar el fluido de perforación y para llenar el espacio anular entre la tubería de revestimiento y el agujero descubierto. Para cumplir este propósito, los cementos deberán ser diseñados para las variaciones de los diferentes ambientes que se encuentran desde la superficie hasta profundidades de más de 3,000 metros, donde se encuentra un rango de temperaturas que van desde abajo del punto de congelación, hasta áreas de más de 370 °C, en pozos geotérmicos.

Las especificaciones no cubren todas las propiedades de los cementos de tales condiciones de profundidad y presión. Sin embargo se han creado unas listas de propiedades físicas y químicas para diferentes clases de cementos que llenen estas condiciones del pozo. Estas especificaciones incluyen un análisis químico y un análisis físico. Éstos a su vez incluyen: contenido de agua, fineza, resistencia a la compresión y tiempo de espesamiento. Aunque estas propiedades describen a los cementos para propósitos específicos, los cementos para pozos petroleros deberán tener otras propiedades y características para proporcionar las funciones necesarias del agujero.

Propiedades Físico-Químico del Cemento

Clase de Cemento	A	B	G	H
C ₃ S	53	47	50	50
C ₂ S	24	32	30	30
C ₃ A	8	5	5	5
FeAC ₄	8	12	12	12
Area (cm ² /g)	1600 a 1800	1600 a 1800	1600 a 1800	1600 a 1800
Lechada	355 Agua 772 Cemento	355 Agua 772 Cemento	349 Agua 792 Cemento	327 Agua 860 Cemento
Tiempo Espesam.	100 Bc 90 min. Mínimos	100 Bc 90 min. Mínimos	100 Bc 90 – 120 min	100 Bc 90 – 120 min
Ensayo Destructivo	8 y 24 hr 280 – 1800 psi	8 y 24 hr 200 – 1500 psi	8 y 24 hr 300 – 1500 psi	8 y 24 hr 300 – 1500 psi
Agua Mezcla	5.2 gal/sk	5.2 gal/sk	5.0 gal/sk	4.3 gal/sk
Densidad	15.6 lb/gal	15.6 lb/gal	15.8 lb/gal	16.4 lb/gal
Profund. - Temp	6000' – 170 °F	6000' – 170 °F	8000' – 200 °F	8000' – 200 °F
Uso	Sin Propiedades Especiales	Moderada y alta Res. a sulfatos	Alta Resistencia a Sulfatos	Alta Resistencia a Sulfatos

FIGURA 49. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL CEMENTO

Los cementos de clasificación API, tienen propiedades físicas específicas para cada clase de cemento, mismas que básicamente definen sus características.

Las principales propiedades físicas de los cementos son:

2.10.1 Ge= Gravedad Específica.

Denota el peso por unidad de volumen, sin tomar en cuenta en consideración otros materiales, tales como el aire o el agua; es decir, el peso de los granos de cemento específicamente. Sus unidades son [gr/cm³], [kg/lit] y [ton/mt³].

2.10.2 PV= Peso Volumétrico.

Denota el volumen por unidad de masa. Se toma en consideración el aire o el agua contenido entre los granos de cemento. Sus unidades son [gr/cm³], [kg/lit] y [ton/mt³].

2.10.3 Blaine.

Se refiere a la Fineza de los granos, su mayor afluencia se da sobre el requerimiento de agua para la preparación de la lechada. Esta característica es un factor determinante, pero no único para la clasificación de los cementos. Sus unidades son [cm²/gr] y [mt²/kg]. Representa el área expuesta al contacto con el agua y se determina como una función de permeabilidad al aire.

2.10.4 Distribución del tamaño promedio de las partículas.

Indica la eficiencia con la que se llevó a cabo la selección, la molienda y el resto del proceso de fabricación sobre la homogeneización de los materiales crudos molidos.

2.10.5 Tamaño promedio de las partículas.

Es el tamaño promedio que ocupa el 50% de un peso determinado de cemento, dentro de la gama de tamaños de grano que integran al cemento.

2.10.6 Requerimiento de agua normal.

Es el agua necesaria para la elaboración de una lechada solamente con cemento, es decir; sin aditivos. Debe de dar 11[Uc] a los 20min de agitarse en el consistómetro de Presión Atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en porciento por peso de cemento.

2.10.7 Requerimiento de agua mínima.

Denota el agua necesaria para la lechada de cemento, debe de dar 30[Uc] a los 20min de agitarse en el consistómetro de Presión Atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en porciento por peso de cemento.

2.10.8 Rendimiento de Lechada.

El rendimiento de la lechada es el número de lt/sk que rinde el cemento, con base en una cantidad dada de agua de mezcla.

2.10.9 Requerimiento de agua.

El volumen de agua requerida por saco de cemento.

2.10.10 Requerimiento de agua en pozo.

Agua de mezcla incluidos los aditivos con que se trabajaran en la operación de cementación del pozo.

2.10.11 Densidad de la lechada.

Es el peso de la mezcla del cemento con agua y está en función de la relación de agua por emplear. Sus unidades son $[\text{gr}/\text{cm}^3]$, $[\text{kg}/\text{lt}]$, $[\text{ton}/\text{mt}^3]$, $[\text{lb}/\text{gal}]$, $[\text{psi}/1000 \text{ ft}]$ y $[\text{lb}/\text{ft}^3]$.

2.10.12 Ángulo de talud natural del cemento.

Es el ángulo que forma el material granulado cuando se deposita en una superficie plana horizontal; sirve para el diseño de la planta dosificadora de cemento y para recipientes a Presión.

Los requerimientos químicos y físicos de las diferentes clases de cementos API están definidos en la especificación 10 del API (SPEC 10) y se muestran en las Tablas 1.1 y 1.2.

2.11 REQUERIMIENTOS QUÍMICOS DEL CEMENTO

1	2	3	4	5	6	7
	Clases de Cemento					
	A	B	C	D,E,F	G	H
Tipo Ordinario (O)						
Óxido de Magnesio (MgO), Máximo %	6.00		6.00			
Trióxido de Azufre (SO ₃), Máximo %	3.50		4.50			
Pérdida por Ignición, Máximo %	3.00		3.00			
Residuo Insoluble, Máximo %	0.75		0.75			
Aluminato Tricálcico (3CaO*Al ₂ O ₃) Máximo %			15.0			
Moderada Resistencia a los Sulfatos (MSR)						
Óxido de Magnesio (MgO), Máximo %		6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
Trióxido de Azufre (SO ₃), Máximo %		3.00	3.50	3.00	3.00	3.00
Pérdida por Ignición, Máximo %		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Residuo Insoluble, Máximo %		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato Tricálcico (3CaO*Al ₂ O ₃) Máximo %					0.58	0.58
Mínimo %					0.48	0.48
Aluminato Tricalcico (3CaO*Al ₂ O ₃) Máximo %		8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Contenido Total de Alcalis expresado como Oxido de Sodio (Na ₂ O) equivalente, Máximo %					0.75	0.75
Alta Resistencia a los Sulfatos (HSR)						
Óxido de Magnesio (MgO), Máximo %		6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
Trióxido de Azufre (SO ₃), Máximo %		3.00	3.50	3.00	3.00	3.00
Pérdida por Ignición, Máximo %		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Residuo Insoluble, Máximo %		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

Silicato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), Máximo %				65.0	65.0
Mínimo %				48.0	48.0
Aluminato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) Máximo %	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Aluminoferrita Tetracálcica ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) más dos veces el Aluminato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), máximo %	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
Contenido Total de Alcalis expresado como óxido de sodio (Na_2O) equivalente, máximo %				0.75	0.75

TABLA 50. REQUERIMIENTOS QUÍMICOS DEL CEMENTO.

2.12 REQUERIMIENTOS FÍSICOS DEL CEMENTO

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Clases de Cemento para Pozos				A	B	C	D	E	F	G	H	
Agua, Porcentaje por Peso de Cemento				46	46	56	38	38	38	44	38	
(expansión autoclave), Máximo por ciento. (sección 4)				0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	
Fineza* (superficie específica), Mínimo, m ² /kg				150	160	220	.....	.....	.....	.....	.....
Contenido de Agua Libre, Máximo en ml. (sección 6)				.....	.....	.....	.....	.....	.....	3.5**	3.5**
Prueba de Resistencia a la Compresión	Número de	Temp. de	Presión de	Mínima Resistencia a la Compresión, psi (Mpa)								
	Catálogo	Curado	Curado									
	Tabla 7.1	F(°C)	Psi (kpa)									
8 hr de	100(38)	Atmos.	250 (1.7)	200 (1.4)	300 (2.1)	300 (2.1)	300 (2.1)
Tiempo de Curado	140(60)	Atmos.	1500 (10.3)	1500 (10.3)
	6s	230(110)	3000(20700)	500 (3.5)
	8s	290(143)	3000(20700)	500 (3.5)

(sección 7)	9s	320(160)	3000(20700)	.....	.....	.....	.....	.....	500 (3.5)	.....	.....	.....
Prueba de Resistencia a la Compresión												339999
12 hr de Tiempo de Curado (sección 7)	8s	290 (143)	3000(20700)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Prueba de Resistencia a la Compresión	Número de	Temperatura de	Presión de	Mínima Resistencia a la Compresión, psi (Mpa)								
24 hr de Tiempo de Curado	Catálogo	Curado	Curado									
	Tabla 7.1	F(°C)	Psi (kpa)									
	.....	100(38)	3000(20700)	1800(12.4)	1500(10.3)	2000(13.8)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	4s	170(77)	3000(20700)	.....	.....	.....	.....	1000(6.9)	1000(6.9)	.....	.....	.....
	6s	230(110)	3000(20700)	.....	.....	.....	.....	2000(13.8)	1000(6.9)	.....	.....	.....
	8s	290(143)	3000(20700)	.....	.....	.....	.....	.....	2000(13.8)	.....	.....	.....
	9s	320(160)	3000(20700)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1000(6.9)	.....	.....

(sección 7)	10s	350(177)	3000(20700)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Presión, Temperatura y prueba De (sección 8)	Especificación de la Prueba Número de Catalogo Tabla 8.2	Periodo de Mezclado para una Consisten cia Máxima 15-30 min.	Mínimo Tiempo de Espesamiento en Minutos***							
	1	30	90	90	90	.....	.....	.....	.....	.....
	4	30	90	90	90	90	.....	.....
	5	30	.....	.....	.....	.....	.....	.....	90	90
	5	30	.....	.....	.....	.....	.....	.....	120	120
	6	30	.....	.....	.....	100	100	.....	.....	.....
	7	30	.....	.....	.....	.....	154	.....	.....	.....
	9	30	.....	.....	.....	.....	.....	190	.....	.....

TABLA 51. REQUERIMIENTOS FÍSICOS DEL CEMENTO.

2.13 Clasificación api de los cementos y su equivalente en ASTM.

Los cementos Portland son fabricados para reunir ciertos estándares químicos y físicos, los cuales dependen de su aplicación. En Estados Unidos hay varias agencias para el estudio y la estructuración para la especificación del cemento Portland. Estas agencias incluyen al ACI (Instituto Americano del Concreto, AASHTO (Asociación Americana de Caminos Oficiales del Estado), ASTM (Sociedad Americana para Pruebas de Materiales), API (Instituto Americano del Petróleo) y varios departamentos del gobierno federal de este país. De estos grupos, los que mejor conocen de la industria del petróleo son la ASTM, la cual negocia con cementos para la construcción y edificación y el API, el cual escribe las especificaciones para los cementos usados sólo en pozos, las especificaciones del cemento escritas para una u otra sociedad son preparados por representantes de ambos usuarios trabajador y fabricante.

La ASTM provee a la industria de cinco tipos de cemento Portland: Tipos I, II, III, IV y V. Los cementos fabricados para su uso en pozos petroleros están sujetos a un amplio rango de presión y temperatura, los que difieren considerablemente de los Tipos del ASTM, fabricados para utilizarse a condiciones atmosféricas. Por estas razones el API provee de especificaciones cubriendo ocho clases de cementos para pozos petroleros, designándoles clases A, B, C, D, E, F, G y H.

Clasificación API

- Cemento Portland (Clase A y B).
- Cemento de Alta Resistencia temprana (Clase C).
- Cemento Retardado (Clase D, E y F).
- Cemento Básico (Clase G y H).
- Cemento Especiales por pedido (Clase J).

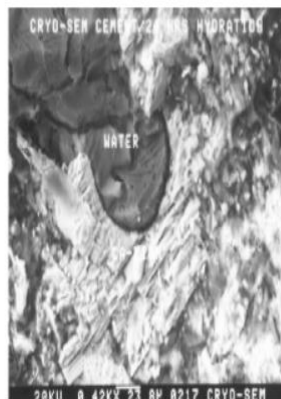


FIGURA 52. CLASIFICACIÓN API DE LOS CEMENTOS.

Las clases A, B y C del API, corresponden a los tipos I, II y III del ASTM, respectivamente; los tipos IV y V del ASTM no tienen correspondencia con las clases del API.

Cementos API

Propiedades de Cementos Comunes para Pozos Petroleros

Tipo	Rango de Uso	Temp. Estática	Req. Agua	Peso de Lechada	Aplicación
Clase A (Portland)	6000 ft	60 – 170 °F	5.2 gal/sk	15.6 lb/gal	Se utilizan cuando propiedades especiales no son requeridas y las condiciones del pozo lo permiten. No son resistentes a sulfatos
Clase B (Portland)	6000 ft	60 – 170 °F	5.2 gal/sk	15.6 lb/gal	Cuando se requiere una resistencia moderada o alta a los sulfatos
Clase C	6000 ft	60 – 170 °F	6.3 gal/sk	14.8 lb/gal	Disponible en tipo regular y de alta resistencia a sulfatos.
Clase G	8000 ft	200 °F	5.0 gal/sk	15.8 lb/gal	Cemento petrolero básico, compatibles con aditivos para utilizarse en una gama completa. Disponible en resistencia moderada y alta a los sulfatos
Clase H	8000 ft	200 °F	4.3 gal/sk 5.2 gal/sk	16.4 lb/gal 15.6 lb/gal	Cemento petrolero básico de mayor densidad, disponible en resistencia moderada y alta a los sulfatos

FIGURA 53. CLASIFICACIÓN API DE LOS CEMENTOS SEGÚN SUS PROPIEDADES.

La norma de calidad que rige el cemento Portland en la República Mexicana es la Norma Oficial Mexicana NOM-C-1-1980. El método más utilizado y aceptado es el Método Bogue, que data desde 1929 y nos ayuda para expresar las cantidades relativas de las fases principales del clinker está basada en unos cálculos relativos a la composición de los óxidos. Se basa en el equilibrio que debe haber entre los diferentes componentes de un cemento. A pesar de sus limitaciones, hoy se usan como base para la clasificación de los cementos, estas ecuaciones establecen límites para:

- A. Cantidad de álcalis
- B. Cal libre
- C. Magnesio y sodio libres
- D. Residuos insolubles
- E. Pérdida por ignición
- D. Residuos insolubles

Los parámetros físicos que aparecen en las especificaciones incluyen la fineza y comportamiento del cemento de acuerdo a unos parámetros preestablecidos. La prueba de comportamiento incluye:

- A. Consistencia Inicial.
- B. Tiempo de Espesamiento.
- C. Resistencia a la Compresión.
- D. Expansión.
- E. Agua libre.

Todas ellas están explícitamente expresadas en la especificación API 10.

2.14 CLASIFICACIÓN DEL API

La industria petrolera marca a los cementos fabricados de acuerdo con las especificaciones API. Estos estándares se publican anualmente por el API, en Dallas, Texas, desde 1953, cuando el primer estándar nacional en cementos para pozos petroleros fue usado. Estas especificaciones se revisan anualmente, acordes con las necesidades de la industria petrolera. Las diferentes clases de cementos API para su uso en el pozo a diferentes presiones y temperaturas, son los definidos a continuación:

- CLASE A:** Destinado para ser usado desde la superficie hasta profundidades de 1,830 m (6,000 pies), cuando no se requieren propiedades especiales. Disponible sólo en tipo ordinario (similar al ASTM C 150, Tipo I).
- CLASE B:** Destinado para ser usado desde la superficie hasta profundidades de 1,830 m (6,000 pies), cuando se requieren condiciones de resistencia a los sulfatos de moderada a alta. Disponibles en ambos tipos (similar al ASTM C 150 Tipo II).
- CLASE C:** Destinado para ser usado desde la superficie hasta profundidades de 1,830 m (6,000 pies), cuando se requieren condiciones de alta resistencia a la compresión. Disponible en los tipos ordinarios, de moderada a alta resistencia a los sulfatos (similar al ASTM C 150 Tipo III).
- CLASE D:** Destinado para ser usado a una profundidad de 1,830 a 3,050 m (6,000 a 10,000 pies), bajo condiciones de presión y temperatura moderadamente altas. Disponible en ambos tipos de resistencia moderada y alta a los sulfatos.
- CLASE E:** Destinado para ser usado a una profundidad de 3,050 a 4,270 m (10,000 a 14,000 pies), bajo condiciones de alta presión y temperatura, disponible en ambos tipos de resistencia moderada y alta a los sulfatos.
- CLASE F:** Destinado para ser usado a una profundidad de 3,050 a 4,880 m (10,000 a 16,000 pies), bajo condiciones de presión y temperatura extremadamente altas, disponible en ambos tipos de resistencia moderada y alta a los sulfatos.

CLASE G: Este es un cemento básico, fabricado para ser usado desde la superficie hasta una profundidad de 2,440 m (8,000 pies), o puede ser usado con aceleradores y retardadores para cubrir un amplio rango de profundidades y temperaturas, sin adicionar otros componentes como sulfato de calcio o agua, o ambos, los cuales pueden ser integrados o mezclados con el Clinker durante la fabricación de esta clase de cemento. Disponible en ambos tipos de resistencia moderada y alta a los sulfatos.

CLASE H: Este es un cemento básico, fabricado para ser usado desde la superficie hasta una profundidad de 2,440 m (8,000 pies), o puede ser usado con aceleradores y retardadores para cubrir un amplio rango de profundidades y temperaturas, sin adicionar otros componentes como sulfato de calcio o agua, o ambos, los cuales pueden ser integrados o mezclados con el clinker durante la fabricación de esta clase de cemento. Disponible en ambos tipos de resistencia moderada y alta a los sulfatos.

CLASE J: Esta clase de cemento es de designación provisional del API. Se recomienda utilizarlo para condiciones de profundidad de 3,660 a 4,880 m, en donde se presentan condiciones de presión y temperaturas extremadamente altas. Se puede utilizar también adicionándole aditivos aceleradores o retardadores. Este es utilizado en cementación de pozos geotérmicos, donde se encuentran temperaturas mayores de 315 °C.

Clase	Especificación
A	(0-6000'). no tiene requerimiento especial. Equivale al tipo ASTM I de construcción
B	(0-6000'). Es similar al ASTM II y tiene menor cantidad de C3S que el "A". Disponible en MSR y HSR
C	(0-6000'). Util cuando se requiere alta resistencia inicial. Tiene alto contenido de C3S. Disponible en los tres diferentes grados de resistencia a los sulfatos. Similar al ASTM III
D	(6000- 10000). Se recomienda en condiciones de presión y temperatura moderadas y/o altas. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos MSR y HSR. La relación área/volumen es alta.
E	(10000'-14000'). Se recomienda en condiciones de presión y temperatura altas. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos MSR y HSR.
F	(10000'-14000'). Se recomienda en condiciones extremas de altas temperatura. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos MSR y HSR.
D	(6000- 10000). Se recomienda en condiciones de presión y temperatura moderada y/o alta. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos MSR y HSR.
	Estos tres son conocidos como "cementos retardados", tienen una cantidad reducida de reactivos de rápida hidratación CS y CA.
G y H	(0-8000'). Estos cementos estan desarrollados para ser utilizados con aditivos (aceleradores y retardadores) para cubrir un amplio rango de temperatura. No debe agregar glycol ni acetato durante la manufactura, solamente se debe agregar yeso y agua. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos, MSR y HSR. Químicamente el G y el H son idénticos la diferencia esta en el tamaño del grano, el H es mas grande, como se evidencia por su menor requisito de agua

FIGURA 54. CLASIFICACIÓN API DE LOS CEMENTOS SEGÚN SUS PROPIEDADES DE ESPECIFICACIÓN.

La Figura 2.14.2 muestra la relación entre las profundidades y tiempos de cementación a que se deben usar las diferentes clases de cements, recomendada por el API.

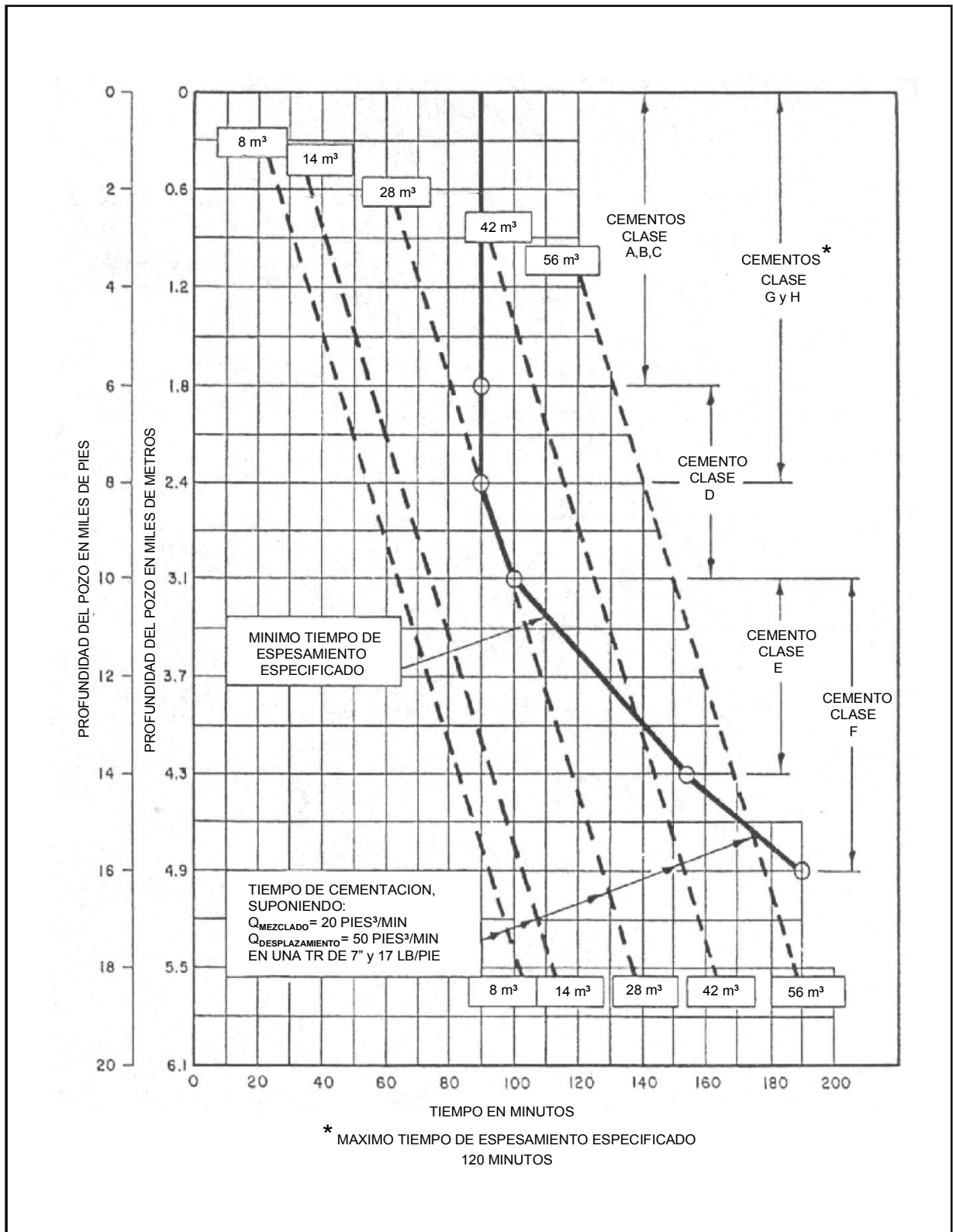


FIGURA 55. RELACIÓN ENTRE LA PROFUNDIDAD DEL POZO Y EL TIEMPO DE CEMENTACIÓN

2.15 COMPARACIÓN CON LOS CEMENTOS VENEZOLANOS.

API Class	ASTM Type	Typical Potential Phase Composition (%)				Typical Fineness (cm ² /g)
		C ₃ S	β-C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
A	I	45	27	11	8	1600
B	II	44	31	5	13	1600
C	III	53	19	11	9	2200
D		28	49	4	12	1500
E		38	43	4	9	1500
G	(II)	50	30	5	12	1800
H	(II)	50	30	5	12	1600

Composición potencial de las fases. Cementos API

Cemento	C3S	C2S	C3A	C4AF	Fineza (cm ² /gr)
A	53.3	20.4	8.7	9.7	3280
B	53.07	19.86	7.04	7.28	3300
G	53.02		5.55		3168
H	63.47	11.78	2.64	7.64	2818

Composición de los cementos venezolanos

FIGURA 56. COMPARACIÓN DE LOS CEMENTOS PETROLEROS vs CEMENTOS VENEZOLANOS

Todos los cementos venezolanos tienen mayor proporción de C3S que los cementos API, por lo tanto desarrollan mayor resistencia inicial que sus homólogos. Sin embargo todos están por debajo de 70% que es el límite de cemento "Portland".

En relación a la cantidad de C3A podemos decir, que:

1. El cemento B tiende a ser más acelerado por tener más C3A que su homólogo también resulta más débil al ataque de los sulfatos.
2. El G cumple con el estándar.
3. El H nacional es de alta resistencia al ataque de los sulfatos por su baja concentración de C3A.
4. En relación al tamaño de las partículas los cementos G y H cubren menos cantidad de área superficial que los B y A por lo tanto son granos más gruesos que requieren menos agua para alcanzar las propiedades de lechadas exigidas por API.
5. En general los granos de los cementos nacionales son más finos por lo tanto son más difíciles de mezclar con la cantidad de agua recomendado por API.

Well Cement Class	A	B	C	D	E	F	G	H				
Water, % by weight of well cement	46	46	56	38	38	38	44	38				
Soundness (autoclave expansion), maximum, %	0.80	0.30	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80				
Fineness* (specific surface), minimum, m ² /kg	150	160	220	—	—	—	—	—				
Free-water content, maximum, mL	—	—	—	—	—	—	3.5**	3.5**				
	Curing Schedule Number	Curing Temp. F° (°C)	Curing Pressure, psi (kPa)	Minimum Compressive Strength, psi (MPa)								
Compressive Strength Test, 3-Hour Curing Time	—	103 (38)	Atmos.	250 (1.7)	200 (1.4)	300 (2.1)	—	—	—	—	300 (2.1)	300 (2.1)
	—	141 (60)	Atmos.	—	—	—	—	—	—	—	1500 (10.3)	1500 (10.3)
	6S	233 (110)	3000 (20,700)	—	—	—	500 (3.5)	—	—	—	—	—
	8S	293 (143)	3000 (20,700)	—	—	—	—	500 (3.5)	—	—	—	—
	9S	323 (160)	3000 (20,700)	—	—	—	—	—	500 (3.5)	—	—	—
Compressive Strength Test, 12-Hour Curing Time	6S	290 (143)	3000 (20,700)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Curing Schedule Number	Curing Temp. F° (°C)	Curing Pressure, psi (kPa)	Minimum Compressive Strength, psi (MPa)								
Compressive Strength Test, 24-Hour Curing Time	—	103 (38)	Atmos.	400 (2.8)	1500 (10.3)	2030 (14.6)	—	—	—	—	—	—
	4S	170 (77)	3000 (20,700)	—	—	—	1000 (6.9)	1000 (6.9)	—	—	—	—
	6S	230 (110)	3000 (20,700)	—	—	—	2000 (13.8)	—	1000 (6.9)	—	—	—
	8S	290 (143)	3000 (20,700)	—	—	—	—	2000 (13.8)	—	—	—	—
	9S	330 (160)	3000 (20,700)	—	—	—	—	—	1000 (6.9)	—	—	—
	10S	350 (177)	3000 (20,700)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Maximum Specification Test Schedule Number	Consistency Test 15- to 30-min. Stirring Period, B ₁ *	Minimum Thickening Time, min.**									
Pressure Temperature Thickening Time Test	1	30	90	90	30	—	—	—	—	—	—	
	4	30	90	90	30	90	—	—	—	—	—	
	5	30	—	—	—	—	—	—	90	90	—	
	5	30	—	—	—	—	—	—	120 max*	120 max**	—	
	6	30	—	—	—	100	100	100	—	—	—	
	8	30	—	—	—	—	150	—	—	—	—	
	9	30	—	—	—	—	—	190	—	—	—	

FIGURA 57. TABLA DE ESFUERZO COMPRESIVO Y DE PORCENTAJE DE AGUA PARA DIFERENTES TIPOS DE CEMENTOS API

2.16 CEMENTOS ESPECIALES

Existen otros materiales que son utilizados muy eficientemente en la cementación de pozos petroleros, llamados cementos especiales, que no están incluidos en las especificaciones de API o la clasificación del ASTM. Este grupo de materiales cementantes está formado por:

- Cementos de Yeso
- Cementos Base Diesel
- Cementos Látex
- Cementos Plásticos
- Cementos para Ambientes Fríos
- Cementos Espumosos
- Cementos Tixotrópicos
- Cementos Antiácido
- Cementos Expansivos
- Cementos Portland-Puzolánicos
- Cementos Compresibles
- Cementos Fibrosos
- Cementos Epóxicos
- Cementos Ultrafinos
- Cementos Escoria
- **Cemento CLASE H-PEMEX**

2.16.1 Cementos de Yeso

Estos cementos son usados para trabajos de re cementación. Normalmente se obtienen con un tipo de yeso semihidratado ($\text{CaSO}_4 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), conteniendo un poderoso aditivo resinoso. La propiedad del cemento de yeso es la capacidad de fraguar rápidamente, obteniéndose una alta resistencia rápidamente y una buena expansión (aproximadamente de 0.3 por ciento). Se mezclan con los cementos API clase A, G, o H, en concentraciones de 8 a 10 por ciento para producir propiedades tixotrópicas.

A causa de la solubilidad del cemento de yeso, se considera un material de taponamiento temporal, a menos que se coloque en el fondo del agujero donde no hay movimiento de agua. En la lucha contra la pérdida de circulación, se mezclan con cemento Portland para que sea un material de taponamiento insoluble. Se deben mezclar y usar cuidadosamente, ya que son muy rápidos debido a sus propiedades y una vez colocados se ponen duros prematuramente.

2.16.2 Cementos Base Diesel

Los cementos base diesel son utilizados para aislar intervalos con presencia de agua. Estas lechadas se componen básicamente de cemento API clase A, B, G o H, mezclados con kerosena con un surfactante (aniónico). Los cementos base diesel, tienen un tiempo limitado de bombeo y tiene la característica de fraguar en presencia de agua exclusivamente. Una vez bombeada la lechada y colocada en la zona programada para aislar el agua; la lechada absorbe el agua y empieza a fraguar. La función de los surfactantes es la de reducir la cantidad de aceite para humedecer las partículas de cemento.

2.16.3 Cementos Látex

Los cementos látex son una mezcla de cemento API clase A, G ó H, con un látex, ya sea líquido o en polvo. Estos látex son identificados químicamente como acetato de polivinilo, cloruro de polivinilo o emulsiones de butadieno-estireno. Con estos cementos látex se mejora la solidez y el control de la pérdida de filtrado de la lechada en el agujero. El látex líquido se adiciona en una razón de aproximadamente 1 galón por cada saco de cemento. Estos cementos se emplean en zonas con presencia de gas y tienen la característica de expandirse evitando con esto el flujo de gas a través de la lechada y la creación de canales o fisuras que debilitan la resistencia a la compresión del cemento fraguado.

En 1957 "Rollins y Davisonn", registraron un comportamiento mejorado al agregar látex al agua de mezcla. Además de los atributos mencionados antes, se citaron los siguientes beneficios adicionales:

Beneficios principales:

Lechadas más fáciles de mezclar.

Menor permeabilidad.

Mayor resistencia a la tensión.

Menor encogimiento externo.

Mayor elasticidad.

Mayor adherencia en superficies acuosas y/o aceitosas.

Beneficios secundarios.

Menor desmenuzamiento al perforar,.

Mayor resistencia a la contaminación con los filtrados del pozo.

Menor pérdida de filtrado.

Mayor durabilidad.

Cuando se agrega Látex como parte de la fase líquida de un sistema de cemento Portland, se obtiene una lechada de color y consistencia normales. Después de curar, el producto fraguado consiste en cemento hidratado conectado por una película de partículas de Látex. Es esta partícula de Látex, la que imparte las propiedades físicas y químicas recién descritas. Mientras la lechada esta aún líquida las partículas de látex imparten excelentes propiedades reológicas, debido a una acción de lubricación.

Además las partículas de látex ofrecen un porcentaje en el control de pérdida de filtrado, al conectar físicamente algunos pequeños poros en la costra o revoque del cemento.

Primeros sistemas de cemento de Pozos Modificados con Cementos con Látex.

En 1954, "Eberhad y Park" patentaron el uso del látex de cloruro de Vinilideno en la cementación de pozos. Más tarde el látex de acetato de polivinilo se identificó como material adecuado. La concentración preferida de sólidos de látex varía desde el 2.5% de **BWOC**.

Sistema de Látex de Estireno-Butadieno.

Un mejoramiento en la tecnología de los cementos de látex ocurrió cuando se identificó el látex Estireno Butadieno como un aditivo efectivo para la prevención de la migración del gas a través del anular.

Los látex del Estireno-Butadieno imparten los mismos efectos benéficos descritos antes; sin embargo son efectivos a temperaturas superiores a los 350°F. Las lechadas puras a densidades normales requieren menos Látex para lograr un índice dado de pérdida de filtrad. Se necesita más Látex para las lechadas que contienen agentes Extendedores o de peso, especialmente aquellos con un menor contenido de sólidos, como las lechadas extendidas con Silicato de Sodio.

Efecto del Látex en el encogimiento.

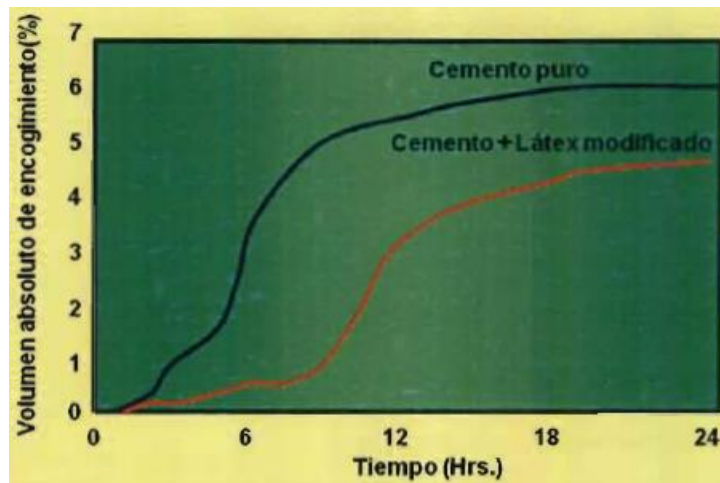


FIGURA 58. VOLUMEN ABSOLUTO DE ENCOGIMIENTO DE UN CEMENTO PORTLAND DE DENSIDAD 16.42 [LB/GAL] (PARCEVAUX Y SAULT, 1984)

El látex modificado de Estireno-Butadieno ayuda a reducir el encogimiento externo por lo tanto es de gran ayuda para reducir los micro anillos e incrementa la adherencia del cemento.

2.16.4 Cementos Plásticos

Los cementos plásticos o resinosos son usados para diversas operaciones, tales como cementación de pozos para abandono, taponamiento selectivo en agujero descubierto, taponamiento de los disparos. Estos cementos son usualmente mezclas de agua, resinas líquidas y un catalizador mezclados con un cemento API A, B, G, o H, los cuales tienen la propiedad de que al aplicarle presión a la lechada, la resina penetra en la zona de interés formando un sello dentro de la formación. Su utilización en los pozos es relativamente en volúmenes pequeños.

2.16.5 Cementos para Ambientes Fríos

Para condiciones de muy bajas temperaturas (glaciares, bloques de hielo, entre otras), es conveniente el uso de este tipo de cementos, con propiedades de fraguado rápido y bajo calor de hidratación, este último para evitar el derretir la zona fría o congelada. Para tales condiciones de baja temperatura son utilizados satisfactoriamente mezclas de cementos de yeso y cementos refractarios. Para la cementación de tuberías superficiales, la lechada se diseña para tiempos bombeables de 2 a 4 horas.

Lodos Cementantes

Los lodos cementantes son lodos de perforación base agua que se les proporciona capacidad cementante con la adición de escorias y agentes activadores.

Podemos definir escoria como el subproducto de fabricación del hierro que posee cualidades cementantes latentes.

Agentes activadores.

Existen dos tipos o clases:

1. Los que activan las cualidades cementantes de la escoria como NaCaO_3
2. Los que aceleran o controlan la reacción.

Ciertos problemas de completación de pozos tal como una pérdida de circulación, excesiva pérdida de filtrado, y migración de fluidos a través del anular se podrían evitar si el fluido de perforación fuese a la vez material cementicio. En efecto se podría lograr fácilmente un buen sello inter zonal, porque ya no se trataría de una remoción del lodo con una lechada de cemento incompatible.

En 1971, "Harrison y Goodwin" desarrollaron un cemento Portland mejorado con bentonita, el cual al ser retardado con D-gluco-D Glucoheptolactona se pudo usar indefinidamente como lodo de perforación.

Durante la completación de la perforación se agregó una sal metálica polivalente como CaCl_2 al fluido, activando el proceso de fraguado.

En 1991 la compañía "Shell" introdujo un sistema a base de escoria que es un sub producto de la fabricación del acero el cual se le agrega al lodo de perforación y que luego, al agregarse ciertos agentes activadores se le proporciona a la mezcla lodo-escoria, propiedades cementantes.

Ventajas del lodo cementante:

- ✓ Mejor comportamiento mecánico y mejores propiedades que el cemento a altas temperaturas.
- ✓ Potencial uso de lechadas a baja densidad en pozos profundos, con ahorros en los preflujos.
- ✓ Potenciales aplicaciones en tapones de desvío y/o abandono.
- ✓ Potencial producto al ser aplicado en zonas de inestabilidad mecánica por sus características elásticas.

Ejemplo de Aplicación.

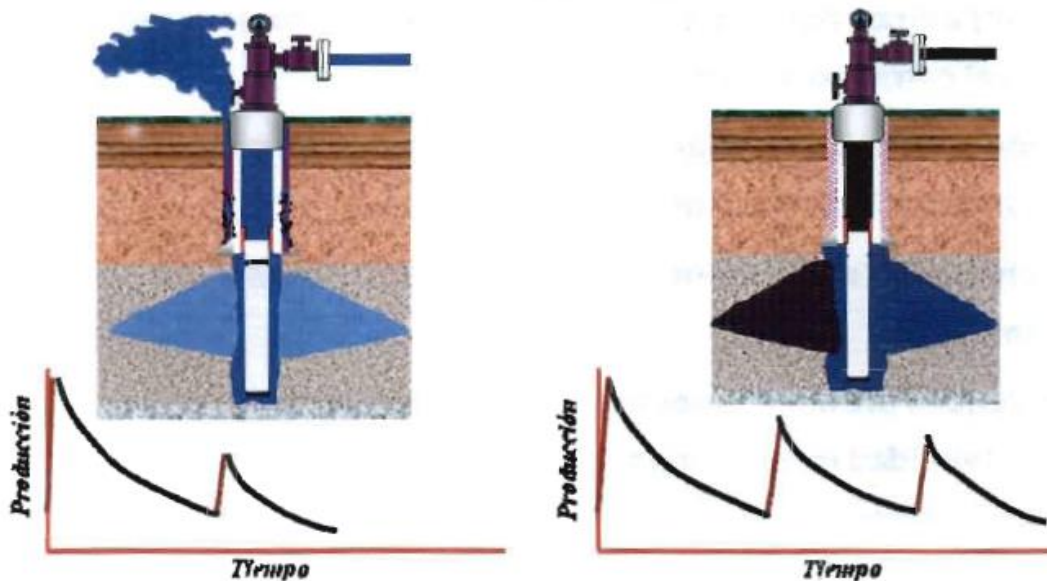


FIGURA 59. CEMENTACIÓN CON ESCORIA EN POZOS DE INYECCIÓN CON VAPOR.

Los lodos cementantes nos sufren los efectos de retrogresión térmica que son el principal enemigos de los cementos Portland en los pozos de alta temperaturas como lo son los de inyección de vapor. En la gráfica ilustrativa se obtuvo esta experiencia de empleo en la costa oriental del lago de Maracaibo, aquí se presenta un cemento Portland, en donde solamente se aguantó un ciclo y medio de vapor. Mientras que el pozo con lodo cementante aguantó tres ciclos y todavía está activo (2001).

2.16.6 Cementos Espumosos

El cemento espumado ofrece un medio versátil y económico de cementar pozos con material de baja densidad y alta resistencia, sus aplicaciones más comunes:

1. Se emplea en la colocación de un cemento de alta resistencia en zonas débiles o muy fracturadas sin obtener pérdida de circulación.
2. Para el llenado de cavernas o zonas ladronas muy porosas.

La necesidad de poder obtener lechadas con densidades menores a la del agua motivó a la búsqueda de un fluido cementante que pudiera permitir obtener con éxito los objetivos básicos de una cementación primaria:

- a) La colocación exitosa de la lechada en la sección anular a proteger.
- b) Evitar el movimiento de los fluidos entre zonas y/ o formar un sello hidráulico.

Dicho de otra forma, el cemento espumoso es un sistema en el cual el N_2 (reductor de densidad) se incorpora directamente dentro de la lechada para obtener un cemento ligero y además le proporciona propiedades tixotrópicas a la lechada.

La generación de cemento espumoso en el campo, requiere el uso de lechadas normales, una fuente de gas (compresor) y la adición de un surfactante para estabilizar la espuma. La disponibilidad de este tipo de cemento, ofrece un control instantáneo de la densidad de la lechada durante la operación. Regulando el gasto de gas inyectado y el gasto de la lechada de cemento, se pueden bombear lechadas espumosas a la densidad deseada. Las propiedades físicas del cemento espumoso van a depender de su densidad y esto necesita considerarse en un diseño de operación.

Razones del por qué utilizar cementos espumados.

Las razones fundamentales de su aplicación viene dada básicamente por las características del yacimiento: Gradiente de Fractura y de Poro (Ventanas operativas muy estrechas).

Si el pozo no es capaz de soportar una columna hidrostática mayor a la que se tiene con la colocación de lechadas convencionales y se presume además que puede haber pérdida de circulación durante la operación que ponga en riesgo la culminación exitosa del pozo, “es necesario la utilización de un Cemento Espumado”.

Una de las aplicaciones más importantes de los cementos espumosos, es en la cementación de tuberías de revestimiento superficiales en pozos con tirantes de aguas profundas, donde la inestabilidad del pozo represente un grave problema del control de las presiones de formación y de fractura.

Aditivos tradicionalmente empleados para reducir la densidad de la lechada.

Los aditivos empleados comúnmente son:

1. Bentonita
2. Metasilicatos
3. Gilsonite
4. Tierra de diatomea
5. Microesferas de Vidrio.

La adición de estos aditivos a la lechada nos pueden ayudar a obtener densidades menores de hasta 9.5 [lb/gal] con muy buena resistencia a la compresión por debajo de estas densidades hasta ahora no se ha logrado obtener lechadas con buena resistencia.

Ventajas del uso del Aire y Nitrógeno empleado en el cemento espumado.

El gas ayuda a mantener uniforme el tamaño de la partícula de cemento, en el proceso de dispersión de la lechada con el gas se ha demostrado que ésta mantiene las propiedades cementantes del fluido base, mientras se tiene baja densidad en la estructura molecular del cemento.

2.16.7 Cementos Tixotrópicos

La tixotropía es un término que se utiliza para describir la propiedad presentada por un sistema que es un fluido bajo esfuerzo pero que desarrolla una estructura de Gel y se torna firme en reposo.

El cemento tixotrópico se comporta como fluido cuando se expone a altos valores de cedencia, pero forma una estructura rígida de gel después de que el bombeo es suspendido. En términos prácticos las lechadas de cemento tixotrópicas, son fluidas durante el mezclado y desplazamiento, pero rápidamente se transforman en una estructura rígida auto-soportante cuando cesa el bombeo. Si se somete nuevamente al movimiento, la estructura de gel se rompe y la lechada se torna nuevamente fluida y Bombeable.

Sirven para meterlo en una fractura, o en una zona altamente permeable. El cemento tixotrópico es una mezcla de cemento Portland y sulfato de calcio semihidratado (yeso). La mezcla gelatinosa puede ser restituida o reversible a un estado líquido si se aplica una suficiente presión de bombeo. Generalmente el cemento tixotrópico es colocado encima de la zona a ser sellada.

Por regla las lechadas tixotrópicas se comportan bajo esfuerzo, como los fluidos plástico de Bingham; en consecuencia su conducta se define por un punto cedente (τ_y) y una viscosidad plástica (μ_y).

Los cementos con sistemas tixotrópicos, tienen varias e importantes aplicaciones:

1. A menudo se utilizan en pozos con excesiva caída de la columna del cemento.
2. Tales pozos poseen zonas débiles que se fractura sometidas a bajas presiones hidrostáticas. También en la reparación de revestidores rotor y corroídos.

- Como lechadas únicas, en circunstancias en las cuales es necesario que se inmovilice rápidamente.

Los cementos auto sostenidos reducen la presión hidrostática sobre la formación debido al aumento de la fuerza gel, evitando la caída. Las lechadas tixotrópicas poseen una notable característica, después de cada ciclo estático-dinámico, la fortaleza del Gel y el Punto Cedente tienden a aumentar, por esta razón la mayoría de los operadores tratan de evitar un cierre prolongado al bombear estos sistemas.

Conducta de los cementos tixotrópicos.



FIGURA 60. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LOS CEMENTOS TIXOTRÓPICOS

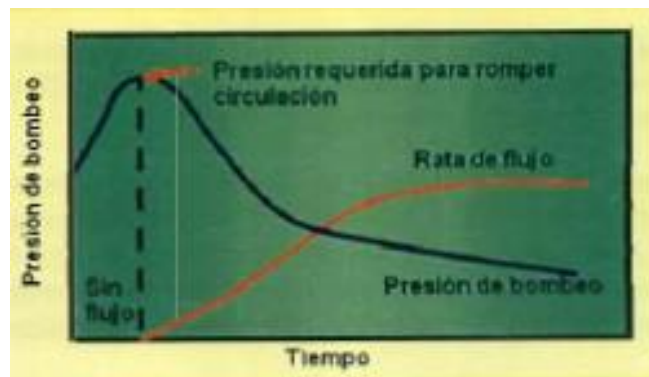


FIGURA 61. COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN Y EL CAUDAL DEL BOMBEO

En un fluido tixotrópico, el punto cedente se presenta solamente cuando se reduce a cero el esfuerzo de corte, es decir cuando se detiene el movimiento de la lechada. Si después de cierto tiempo se requiere mover nuevamente el cemento, se necesita mayor fuerza que la indicada por el punto cedente para poner el flujo en movimiento nuevamente. La diferencia entre la "fuerza de Gel" y el punto cedente de la medida del "grado de Tixotropía" de la lechada.

En general todos los cementos tienen este comportamiento porque todos desarrollan estructura de Gel cuando están en estado estático. El mayor grado de tixotropía y el menor tiempo de desarrollo es lo que diferencia a las lechadas verdaderamente tixotrópicas de los demás cementos. En relación a las variables presión y caudal observamos que se requiere un incremento importante de presión para romper la estructura tixotrópica y una vez alcanzado este punto comienza el movimiento. Luego la presión comienza a descender y a estabilizarse en la presión de bombeo mientras que el caudal comienza a incrementar hasta alcanzar el valor de bombeo estabilizado.

Por citar algunos de estos cementos tixotrópicos, tenemos:

- a. Sistema en base a Bentonita.
- b. Sistema en base a Sulfato de Calcio.
- c. Sistema en base a Sulfato de Hierro y Aluminio.
- d. Sistema en base a Polímeros Reticulados.
- e. Combinación de Bentonita y Sulfato de Calcio.

PROPIEDADES DEL CEMENTO TIXOTRÓPICO.

Propiedades de a Lechada y del cemento Fraguado preparado con Sulfato de Calcio semi hidratado (Yeso de París).

SYSTEM	DENSITY [lb/gal]	% WATER	WATER [gal/sk]	CALCIUM, SULFATE HEMIHYD RATE	% CaCl2	YIELD [ft ² /sk]	
1	15.6	46	5.20	0	0	1.18	
2	14.9	60	6.78	12	3	1.48	
3	14.5	64	7.20	10	2	1.50	
4	14.3	64	7.20	12	3	1.54	
5	14.2	70	7.90	10	0	1.50	
SYSTEM	WELL CONDITIONS [°F]		THICKENING TIME [hrs/min] AT BHCT	COMPRESSIVE STRENGTH [psi] AT BHHST			
	BHCT	BHST		7 hrs	18 hrs	24 hrs	96 hrs
1	113	170	4:00 ±	350	760	2900	-
2	70	60	3:10	100	-	300	1150
3	80	95	2:08	485	1165	1295	-
4	80	95	1:50	500	1250	1350	-
5	125	200	3:15	950	1750	2300	-

FIGURA 62. PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS TIXOTRÓPICOS

Propiedades mecánicas del cemento tixotrópico fraguado.

De la siguiente tabla podemos observar como el porcentaje de agua se incrementa en función de la concentración del plástico de París.

En relación a la resistencia a la compresión se observa un incremento inicial en la mayoría de las combinaciones tixotrópicas comparado con las lechadas convencionales, pero esta tendencia se revierte en el tiempo donde el valor de resistencia final de los cementos tixotrópicos es menor que la convencional.

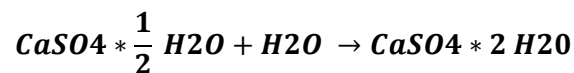
IMPORTANCIA DE LA ETRINGITA.

La etringita promueve una mayor asociación física entre las partículas de cemento, produciendo la formación de una red poco compacta o Gel.

Bajo agitación la red es fácilmente rota y la lechada vuelve al estado fluido.

ECUACIÓN QUÍMICA DE LA FORMACIÓN DE ETRINGITA.

Cemento tixotrópico base Sulfato de Calcio.



PLÁSTICO DE PARÍS + AGUA → YESO



YESO + ALUMINATO TRICÁLCICO → ETRINGITA

2.16.8 Cemento Antiácido

El cemento antiácido es una masa de cuarzo pulverizado y silicato de sosa, resistente a los ácidos; es un polvo a base de resinas sintéticas dotado de las mismas propiedades.

Sistema de cementos anti-congelantes

Son sistemas que poseen una baja velocidad de hidratación y pueden desarrollar suficiente resistencia a temperaturas bajo cero (0GC)., dentro de este sistema tenemos a los:

Cementos de Aluminato de Calcio.

Mezclas de Cemento Portland y Yeso (Preferible en las zonas poco profundas por tener menor temperatura de hidratación).

Un ejemplo de aplicación de estos sistemas es para las “zonas árticas” o zonas congeladas (“permafrost”) en Alaska y Canadá del Norte pues presentan ciertas dificultades únicas en la

cementación. El “Permafrost” se define como una formación de subsuelo permanentemente congelada, las profundidades de tales formaciones varían desde unos pocos pies hasta los 2000 pies (600m).

Cuando existe permafrost, se debe evitar el deshielo de la formación durante la perforación y la completación. El derretimiento puede hacer que se hunda la tierra deshelada, particularmente en la parte superior a los 200 pies (60m) del pozo. El sistema del cemento debe tener una baja temperatura de hidratación y poder desarrollar suficiente resistencia a la compresión (sin congelar) a temperaturas tan bajas como los 20°F (-3°C). Las sargas del revestidor se deben cementar hasta la superficie o poner un fluido no congelable en el anular, para evitar el colapso en el revestidor por la expansión del agua congelada.

Los cementos convencionales Portland no son satisfactorios en condiciones de Permafrost, por que se congelan antes de desarrollar suficiente resistencia compresiva. Se puede agregar sal, alcohol u otros materiales anticongelantes al agua de mezcla, sin embargo; esto ha demostrado tener efectos adversos en la calidad del cemento fraguado.

Dos tipos de cementos han demostrado un comportamiento exitoso en este severo ambiente:

- Cemento de aluminato de Calcio y
- Mezclas de Yeso y Cemento Portland

El cemento de Aluminato de Calcio es un material de uso especial de producción limitada y se utiliza para cementar In situ pozos de combustión térmica.

Tales cementos también fraguan y ganan fortaleza rápidamente a temperaturas bajas y casi de congelamiento. A menudo se agrega “Flyash” como diluyente para reducir el calor de hidratación del cemento, y por economía.

Las Mezclas de Yeso y Cemento Portland, con cloruro de sodio como anticongelante se utilizan ampliamente en las cementaciones a través de Permafrost. El yeso se fragua y obtiene firmeza rápidamente a temperaturas de congelamiento y evita que se congele el cemento portland más lento.

Tales sistemas de cemento también poseen una menor temperatura de hidratación que la del cemento de aluminato de calcio; por lo tanto, son aplicables especialmente en formaciones de “permafrost no consolidadas”. No se observa degradación de la resistencia.

Conducta del cemento portland más yeso.

Desarrollo de la resistencia a la compresión de la mezcla de cemento más yeso.

En la tabla se muestra el comportamiento del cemento con yeso utilizado en Permafrost, nótese que se pueden alcanzar valores aceptables de resistencia de compresión a los 7 días de fraguado.

TEMPERATURA [°F]	COMPRESSIVE STRENGTH [PSI]			
	16 hrs	24 hrs	3 days	7 days
20	300	350	1100	2000
40	340	450	1350	1950
60	700	800	1400	2450
80	750	1850	1850	2650

FIGURA 63. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA 50:50, YESO: PORTLAND.

2.16.9 Cementos Expansivos

El cemento expansivo es aquel, que al adicionarle sulfato de calcio y otras sustancias, aumenta ligeramente su volumen al fraguar.

Para ciertas condiciones del fondo del pozo es deseable tener un cemento que se pueda extender en sus propiedades, como protección contra condiciones problemáticas. Para tales casos, en la industria petrolera se han evaluado varios componentes que extienden las propiedades ligeramente cuando se aplican a los cementos.

La mayoría de los cementos expansivos se relacionan con la formación de la Etringita, después del fraguado del cemento. Normalmente hay cuatro tipos de cementos en la categoría de la Etringita.

- **Tipo K**, contiene como componente el sulfato aluminato de calcio que se mezcla con un cemento Portland. Cuando se prepara la lechada de cemento tipo K, la reacción creada por hidratación provoca una expansión de 0.05 a 0.20 % aproximadamente.
- **Tipo S**, sugerido por la Portland Cement Association, consiste de un cemento con alto contenido de Aluminato Tricálcico, similar al cemento API clase A, con aproximadamente 10 a 15 % de yeso.
- **Tipo M**, se obtiene con la adición de pequeñas cantidades de cemento refractario, al cemento Portland (Aluminato de Calcio refractario y sulfato de Calcio, o un producto hecho con una escoria de cemento Portland, es decir la escoria del Clinker del Aluminato de Calcio y sulfato de Calcio), para producir fuerzas expansivas.

Cemento a base de Etringita: Es la adición de Sulfato de Calcio semi hidratado a un cemento Portland que contenga por lo menos un 5% de C_3A , tales cementos también son tixotrópicos. Si esto no es deseable, se puede anular con un dispersante de cemento.

La principal limitación de los cementos a base de Etringita es su incapacidad por obtener una expansión significativa a temperatura de curado sobre los 170°F (76°C). La etringita no es estable a temperaturas mayores y se convierte en un calcio Sulfo aluminato hidratado y yeso.

La preparación de lechadas de cemento que contienen altas concentraciones de $NaCl$ y/o Na_2SO_4 se encuentran entre los primeros métodos utilizados para generar expansión en el cemento. La expansión ocurre durante la etapa de Gelificación, debido a la presión interna ejercida por los cristales de sal entre los poros y su reacción con los cloro silicatos.

Estos sistemas son igualmente efectivos a temperaturas superiores a los 400°F (204°C).

Expansión de los cementos tixotrópicos a base de sulfato de calcio.

La expansión alcanzada con estos sistemas es moderada, teniendo que esperar 5 días para tener un máximo de 0.18%. Esta es una propiedad complementaria de estos cementos tixotrópicos en base de Sulfato de Calcio. En los casos que no se desee la propiedad tixotrópica, se puede eliminar utilizando dispersantes.

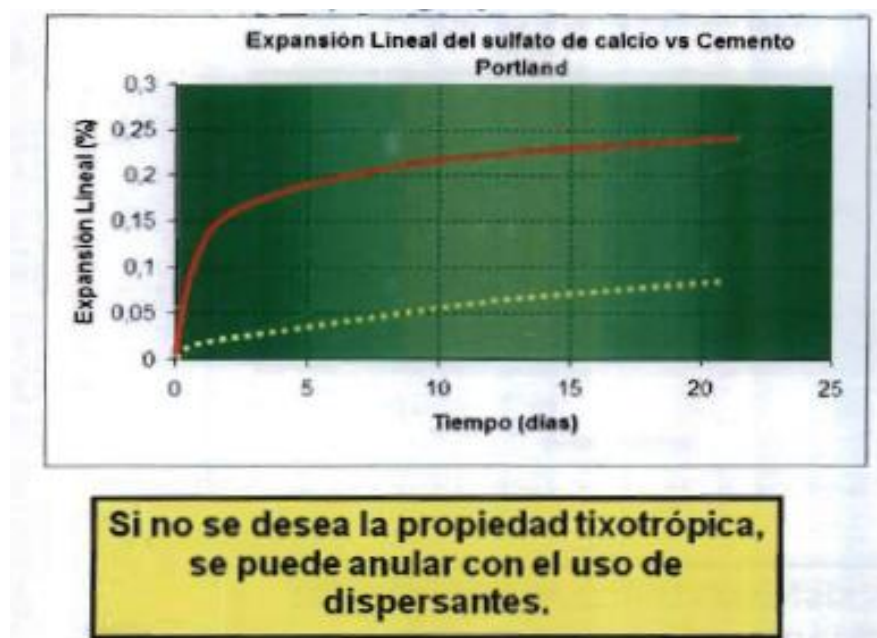


FIGURA 64. COMPORTAMIENTO DE LA ETRINGITA, EXPANSIÓN LINEAL vs TIEMPO.

Aditivos expansivos

Generadores de Gas In situ

Los aditivos expansivos generadores de gas in situ de mayor empleo son:

1. Hidróxido de Aluminio.
2. Hidróxido de Zinc

Pero el aditivo expansivo generador de gas en la matriz del cemento durante la etapa inicial de la Gelificación crítica o comienzo de la etapa de transición, es el Hidróxido de Aluminio.

El Hidróxido de Aluminio finamente molido reacciona con los álcalis del cemento generando pequeñas burbujas de nitrógeno como parte de la reacción.

El gas generado no permite que ocurra la reducción de presión poral o de la presión de poro, contra poniéndose al encogimiento inicial que causa el encogimiento plástico. Si la presión de la formación es baja (pozos someros), la presión de la burbuja será mayor que la presión de la formación resultando en un esfuerzo de empuje hacia afuera que desencadena en un incremento de volumen externo.

Para que la técnica sea efectiva, la producción de hidrógeno debe ocurrir durante la etapa de hidratación crítica, si ocurre antes la burbuja puede migrar hacia la parte superior de la columna hidrostática, o reducir la densidad de la columna hasta niveles de posibles insurgencia de los fluidos de formación.

Esta técnica es efectiva en pozos someros, donde la presión de la formación no vence la expansión producida por la presión de la burbuja.

La reacción es fuertemente afectada por la fineza del polvo de aluminio, la temperatura y a la presión; por lo que se requiere de un diseño muy cuidadoso.

El zinc, magnesio, hierro y aluminio en polvo se pueden utilizar para preparar cementos expansivos.

El aluminio en polvo fino reacciona con el álcali de la lechada de cemento produciendo pequeñas burbujas de gas de hidrógeno.

Esta técnica es efectiva en aplicaciones de pozos poco profundos debido a que la presión expansiva de las burbujas no es superada por la presión de la formación.

2.16.10 Cementos Portland-Puzolánicos

Las puzolanas incluyen un material silíceo o artificial que en presencia de cal y agua desarrollan cualidades cementantes. Las puzolanas naturales en su mayor parte son de origen volcánico. Las puzolanas artificiales son obtenidas principalmente por la calcinación de materiales naturales como las arcillas, lutitas y ciertas rocas silíceas. El producto de la combustión en el horno es una ceniza ligera muy usada en la industria petrolera como una puzolana. Del uso de cementos puzolánicos

resultan lechadas de cemento ligeras (poco densas), comparadas con lechadas de consistencia similar hechas con cementos Portland.

2.16.11 Cementos Compresibles

Las lechadas de cemento compresible fueron diseñados en un esfuerzo para mantener la presión de poro del cemento arriba de la presión de formación del gas. En teoría ésta debería de prevenir los movimientos del gas de la formación hacia el interior de lo cementado en el espacio anular. Los cementos compresibles dentro de dos categorías, los cementos espumosos y los cementos generadores de gas in-situ, es muy importante hacer una clara distinción entre ellos.

Los cementos espumosos se convierten en incompresibles a altas presiones, debido a la relativa incompresibilidad.

2.16.12 Cementos Fibrosos

Esta clase de cementos contienen fibras sintéticas que incrementan su durabilidad y resistencia a los esfuerzos mecánicos y de tensión.

2.16.13 Cementos Epóxicos

Los cementos epóxicos son utilizados comúnmente en ambientes donde el cemento estará expuesto a fluidos corrosivos. El cemento Portland, el cemento escoria y el puzolánico, son solubles en ácido. La solubilidad puede ser lenta, pero si se encuentran corrientes de flujo ácido se acelerará este proceso. La resina epóxica no es soluble en ácido, pero es costosa. Por lo tanto, ésta sólo se utiliza en pozos inyectoros o pozos de desechos en donde se manejarán fluidos de bajo pH. Los cementos epóxicos son productos puros y muy consistentes.

La resina epóxica está compuesta de dos partes, de una resina y un activador, formando una mezcla de líquido uniforme. El activador rompe el anillo de epóxica y forma un polímero de cadena larga proporcionando una resistencia superior a 10,000 psi. El compuesto puede hacerse dentro de la lechada incorporando estos materiales, los cuales no se disuelven en ácido. El volumen puede aumentar agregando un solvente de bajo costo. El solvente diluirá la epóxica y así disminuirá su resistencia. Las resinas epóxicas no son compatibles con el agua; ya que ésta forma una masa densa inbombeable si la resina y el agua se combinan. A diferencia de otros cementos, las resinas epóxicas son solubles en algunos solventes orgánicos.

2.16.14 Cementos Ultrafinos

Los cementos ultrafinos tienen un tamaño de sus partículas mucho más pequeño que el de los cementos Portland convencionales. El tamaño promedio de la partícula de los cementos ultrafinos es de 2 μ m, mientras que en los cementos convencionales pueden tener un tamaño que varía de 50 a 100 μ m. La principal aplicación de los cementos ultrafinos es en la cementación primaria para poder obtener lechadas ligeras con un rápido desarrollo de su resistencia. Esta clase de cementos

se usan también en cementaciones forzadas, en reparación de filtraciones de la tubería de revestimiento, para obturar flujos de aguas o en solución de problemas similares donde se necesite un tamaño de partícula tal que pueda penetrar en espacios más pequeños o reducidos.

2.16.15 Cementos Escoria

El cemento escoria de alto horno es un derivado de la industria del acero. El material que está en la parte superior de las fundidoras de acero se retira, enfría y se apaga con agua o tierra. El material se compone principalmente de silicato monocálcico, silicato dicálcico y aluminosilicato dicálcico.

Estos silicatos cambian muy lentamente (se requieren de días o semanas) en el cuarto de temperatura donde se procesan cuando se mezclan con agua. La escoria de alto horno normalmente necesita de altas temperaturas, del orden de 100 °C (200 °F) para reaccionar con el agua para formar hidratos de silicato cálcico. El pH de la lechada se incrementa con la escoria, además de que el proceso de fraguado puede ser acelerado haciendo que la lechada pase por el cuarto de temperatura como el cemento Portland. Los hidratos que se forman son similares a los formados con el cemento Portland, excepto que este producto es más frágil y se rompe con facilidad, pero es menos permeable cuando no ocurre esto.

El uso de la escoria para la cementación depende de su objetivo y la disponibilidad de una buena calidad en la escoria. La ventaja de la escoria es que ésta no tolera la contaminación del fluido de perforación cuando se diseña adecuadamente. Sin embargo, las variaciones en las propiedades de la escoria y del fluido de perforación demandan de más pruebas de laboratorio para poder optimizar las formulaciones cuando se usa este producto.

Los efectos de la temperatura y presión en el fraguado de la envoltura de cemento con escoria durante la explotación de hidrocarburos deberá ser evaluada para su durabilidad por largos períodos.

2.16.16 Cementos Salados

Son los cementos que contienen cantidades significativas de cloruro de sodio (Na Cl) o cloruro de Potasio (K Cl) llamados comúnmente “cementos salados”. La sal se utiliza ampliamente en cementaciones de pozos por tres razones principales:

- a) En ciertas áreas la sal está presente en el agua de mezcla disponible, por ejemplo en alta mar.
- b) La sal es un aditivo común y no costoso que al utilizarse como aditivo, puede modificar la conducta del sistema de cemento.
- c) La adición de grandes cantidades de sal ha demostrado ser necesaria al cementar a través de formaciones masivas de sal o zonas sensibles al agua.

El efecto del KCl y del NaCl en el comportamiento de las lechadas de cemento son básicamente similares; sin embargo, de acuerdo a la experiencia el KCl imparte excesiva viscosidad a la lechada en grandes concentraciones. Dentro de los sistemas que contienen gran porcentaje de cloruro de sodio o de potasio tenemos:

1. Agua salada como fluido de mezcla.
2. Sal como aditivo de cemento.
3. Cementación a través de formaciones arcillosas.
4. Cementación a través de formaciones salinas.

NaCl [% BWOW]	CELLUIOSE/ORGANIC ACID [% BWOC]	BHST [°F]	DENSITY [lb/gal]	COMPRESSIVE STRENGTH	
				8 hrs	24 hrs
5	-	200	15.8	1850	2600
15	-	200	15.8	1700	2300
30	-	200	16.6	2020	2650
30	0.8/0.1	200	16.6	0	250
30	-	200	16.6	1350	2100
30	0.8/0.1	200	16.2	0	2040
30	-	230	16.2	1450	2150

FIGURA 65. TABLA DE VALORES TÍPICOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS CEMENTOS SALADOS.

NaCl [% BWOW]	CELLULOSE ORGANIC ACID [% BWOC]	BHCT [°F]	FLUID LOSS [mL/30 min]	RHEOLOGICAL PROPERTIES AT BCHT	
				Ty [lbf/100ft ²]	μp [cp]
30	0.8/0.1	120	178	22	244
30	-	120	64	0.2	33.1
30	0.8/0.1	160	285	31.3	105
30	-	160	52	0.1	17.5

FIGURA 66. TABLA DE VALORES DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO Y PÉRDIDA DE FILTRADO DE LOS CEMENTOS SALADOS.

La sal como Aditivo del cemento.

La sal es un aditivo para el cemento extremadamente versátil, según su concentración en la lechada, la sal puede actuar como un acelerador o un retardador. La sal también se utiliza para dispersar las lechadas de cemento, induce la expansión del cemento fraguado y prepara cementos protegidos contra el congelamiento. Marginalmente la sal se puede utilizar como agente de peso y para aumentar la conductividad eléctrica del cemento.



FIGURA 67. SAL COMO EL ADITIVO DE MAYOR DEMANDA

Funciones de la sal como aditivo en una lechada de cemento:

- ✓ Acelerador.
- ✓ Retardador.
- ✓ Dispersante.
- ✓ Agente expansivo.
- ✓ Agente de peso.

Propiedades del Cemento Salado.

El efecto de la sal en el desarrollo de la resistencia a la compresión es variable, a las 8hrs la sal ayuda a desarrollar temprana resistencia si se agrega control de filtrado, se reduce el valor temprano de resistencia. El valor final de resistencia a las 24hrs, muestra que ha mayor concentración la resistencia es ligeramente menor.

En relación a la reología podemos decir lo siguiente. La sal dispersa el cemento aún a altas concentraciones. Si se agrega controladores de filtrado los valores reológicos suben radicalmente.

Cementos para ambientes corrosivos.

En el ambiente del pozo, el cemento portland está sujeto al ataque químico de ciertas formaciones y por las sustancias inyectadas desde la superficie. Las salmueras geotérmicas que contienen CO_2 son especialmente dañinas para la integridad del cemento fraguado.

Cementos para pozos de desperdicios de Químicos.

El aislamiento zonal es de gran importancia en el caso de un pozo de desperdicios químicos. Para asegurar el mantenimiento del aislamiento zonal a través de la vida de dichos pozos, el cemento y los componentes tubulares del pozo deben ser químicamente resistentes a los fluidos corrosivos.

Los sistemas de cemento se escogen dependiendo de la naturaleza del fluido inyectado.

Los cementos Portland modificados son generalmente apropiados para pozos de desperdicios que contengan ácidos orgánicos débiles, aguas servidas o soluciones con un pH 6 o superior.

La durabilidad del cemento fraguado se mejora agregando puzolanas, aumentando la densidad por la adición de dispersantes o agregando látex líquidos a la lechada. Estos métodos reducen sustancialmente la permeabilidad del cemento fraguado.

Los sistemas de cemento Portland no son compatibles con los ácidos orgánicos fuertes, tales como ácido sulfúrico, clorhídrico y nítrico. En tales ambientes, se pueden utilizar cementos orgánicos poliméricos, en general a base de epoxy, para obtener suficiente resistencia química. Tales sistemas se conocen también como cementos sintéticos.

Los cementos de epoxy se preparan al mezclar una resina epóxica como el bisfenol A con un agente endurecedor. El agente endurecedor puede ser un anhídrido, una amina alifática o poliamida, dependiendo de las propiedades finales deseadas. A menudo se utiliza un sólido tal como polvo de sílice para obtener una cierta densidad y para actuar como reductor del calor de la exotermia que ocurre durante el curado. Dependiendo de las temperaturas circulantes y estática del pozo, se pueden agregar varios catalizadores y aceleradores para controlar los tiempos de operación y fraguado. Los cementos de resina epóxica se caracterizan por su resistencia a la corrosión y alta resistencia a la compresión y al corte. Son compatibles con ácidos y bases fuertes (HCL hasta un 37%, H₂SO₄ 60% y Na OH 50%) a temperaturas de 200°F (93°C) durante largos periodos de exposición. Los Epóxicos también son resistentes a los hidrocarburos y el alcohol, pero no a los elementos orgánicos clarinados o acetona.

2.16.17 CEMENTO CLASE H-PEMEX

Antecedentes.

- En 1973 se inició el desarrollo del Mesozoico Tabasco-Chiapas con los descubrimientos de los campos Girdaldas, Cactus, Sitio Grande y Samaria, que detonaron la incorporación de las reservas de hidrocarburos del país.
- Durante 1986, PEMEX Exploración y Producción, llevó a cabo el desarrollo del complejo “Miguel Ángel Zenteno Basurto”, que incluía, entre otras actividades, la perforación de pozos a una profundidad promedio de 5,700 m, manejo de altas temperaturas (168°C) y aportaciones de gas amargo (H₂S).
- Debido a estas condiciones, PEMEX Exploración y Producción rediseñó tanto las tuberías de revestimiento, en cuanto al grado de acero, y buscó el desarrollo de un cemento de alta resistencia a los sulfatos.

La norma de referencia NRF-069-PEMEX-2012 cubre los requerimientos para la fabricación de los Cementos clase “H”, “G” y “H-PEMEX” en México, establece las especificaciones, los requerimientos físicos y químicos y hace referencia a los procedimientos de prueba.

Esta norma ha tenido su proceso de 5 fases, todo esto para llevar a cabo el proceso esquemático del desarrollo de la norma NRF-069-PEMEX.2012.

Fase del desarrollo de la norma:

- I. Estudio del comportamiento físico y químico realizado a 6 muestras de cemento nacional y a 4 de importación en marzo de 1992.
- II. Análisis de los resultados de las pruebas físicas y químicas realizadas, mayo de 1992.
- III. Norma tentativa para el aseguramiento de la calidad del cemento (PEMEX-IMP 1/92) agosto de 1992.
- IV. Proyecto CBD-1131 Norma de Control de Calidad del Cemento PEMEX-IMP 1/92 agosto de 1993.
- V. Análisis conclusiones y aplicación en áreas de la Subdirección de Perforación y Mantenimiento de Pozos 1993

¿Pero cuál ha sido el beneficio obtenido del desarrollo de esta norma?, un ahorro significativo por tonelada del 35%.

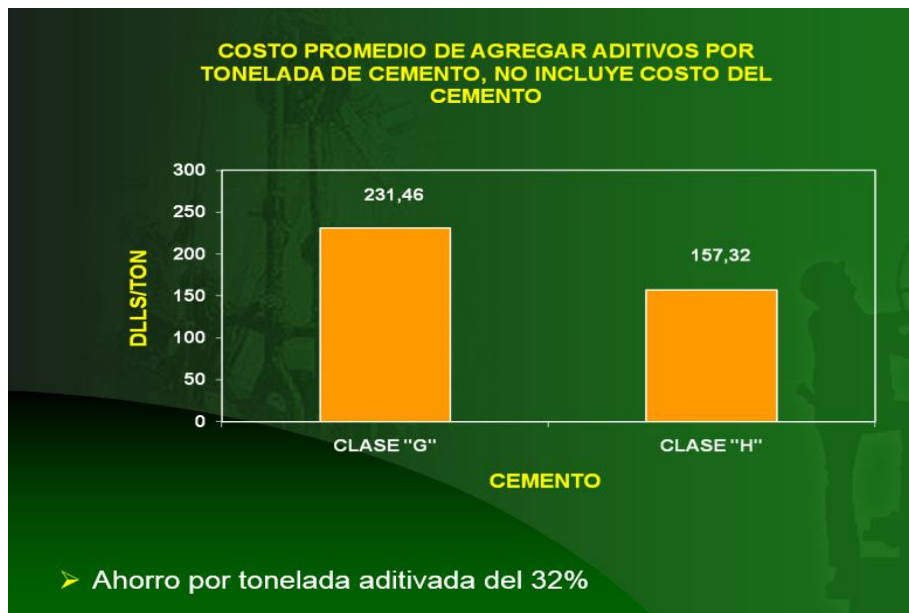


FIGURA 68. AHORRO POR TONELADA ADITIVA

Entre los años de 1993-2014, se han fabricado promedio de 1,000,000 toneladas de cemento clase H. Pero el costo promedio de tonelada aditiva con cemento G igual fue de 231,460, 000 dólares así como el costo promedio de tonelada a aditiva con cemento H fue de 157, 320,000.

Entonces el ahorro para PEMEX Exploración y Producción Fue de \$74,140,000 dólares.

Durabilidad.

Durabilidad del Cemento se define como la capacidad del material para resistir la acción envejecimiento, ataque químico, abrasión y otros procesos de deterioro. Entonces un Cemento es durable cuando después de su exposición al ambiente conserva su forma original, su calidad y su puesta en servicio.

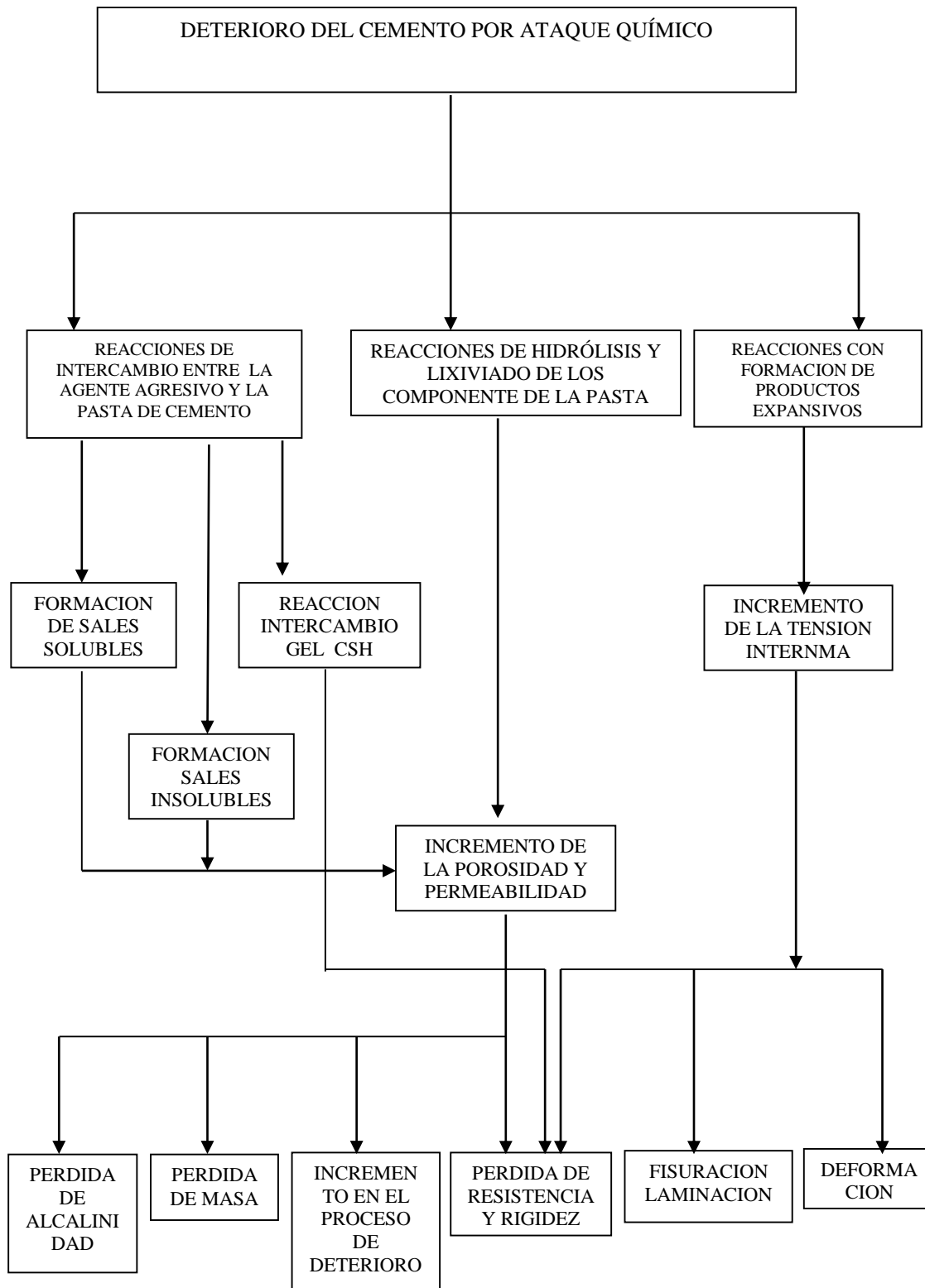


FIGURA 69. ESQUEMA QUE MUESTRA EL DETERIORO DEL CEMENTO POR EL ATAQUE QUIMICO

DETERIORO DEL CEMENTO POR ATAQUE QUÍMICO

Las consecuencias de la degradación de estas fases de la matriz de cemento, incrementa la porosidad y permeabilidad, decrece el esfuerzo compresivo, estos cambios afectan la protección de la tubería y el sello hidráulico. El objetivo de modificar la norma de referencia fue adicionar las especificaciones del cemento clase "H-PEMEX", el cual tiene entre sus principales cualidades: alta resistencia al ataque químico, buen sello hidráulico entre capas del subsuelo, bajo consumo de aditivos químicos, y proporciona alta resistencia temprana, lo que dará beneficios económicos al optimizar los tiempos de perforación, agregando valor al proceso.

Uno de los principales motivos del uso del cemento clase "H-PEMEX" es minimizar el uso de cloruros en tuberías de revestimiento superficiales.

Consecuencias: iones cloruros difundidos en el cemento, crea un medio propicio para la corrosión de la tubería. Este nuevo desarrollo del cemento clase "H-PEMEX" permite optimizar los tiempos de perforación, al requerirse un menor tiempo de espera de fraguado.

RESISTENCIA A LA COMPRESION

BHST=98°F

CED = API (2SG)

CTO= 860 grs + D065 0.15%, AGUA=327 ml

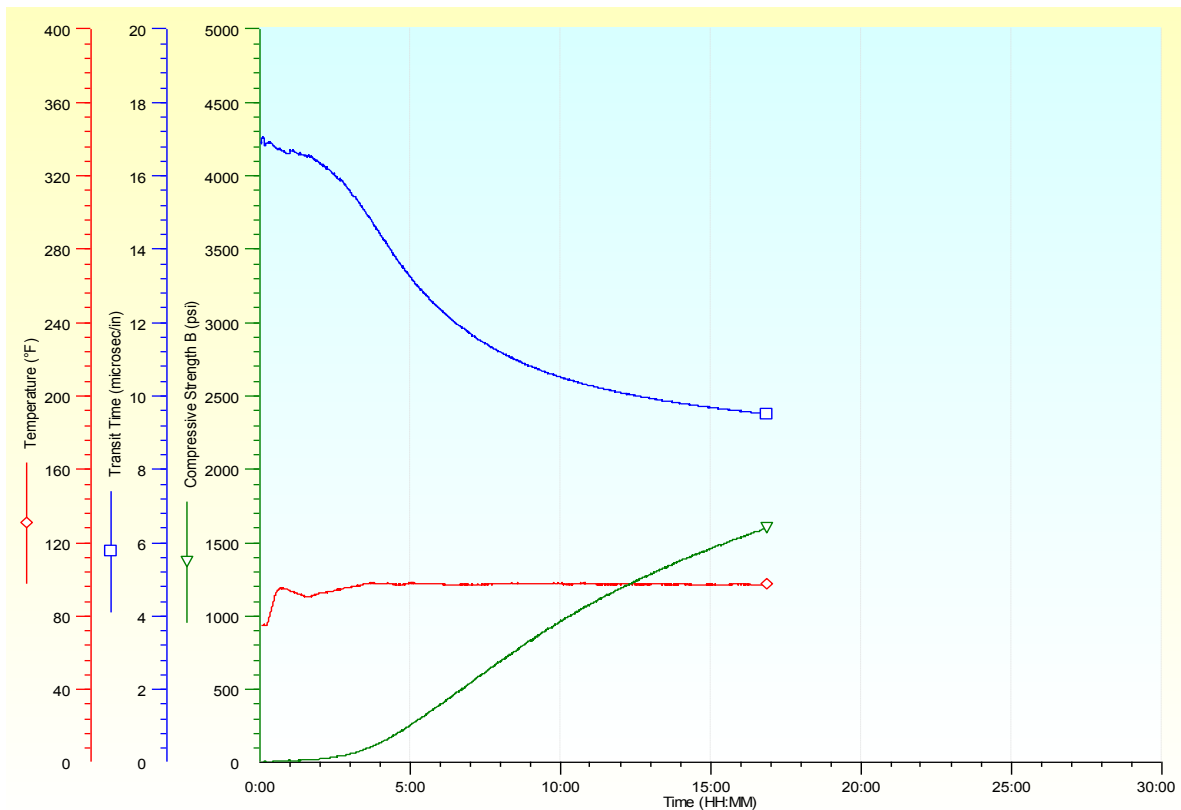


FIGURA 70. CARTA DE PRUEBA CORRIDA DE ESFUERZO COMPRESIVO A UN CEMENTO CONVENCIONAL.

RESISTENCIA A LA COMPRESION

SISTEMA DE CEMENTO: H-PEMEX, DENSIDAD: 1.9 g/cc, TIPO TEMPERATURA: 116 F @

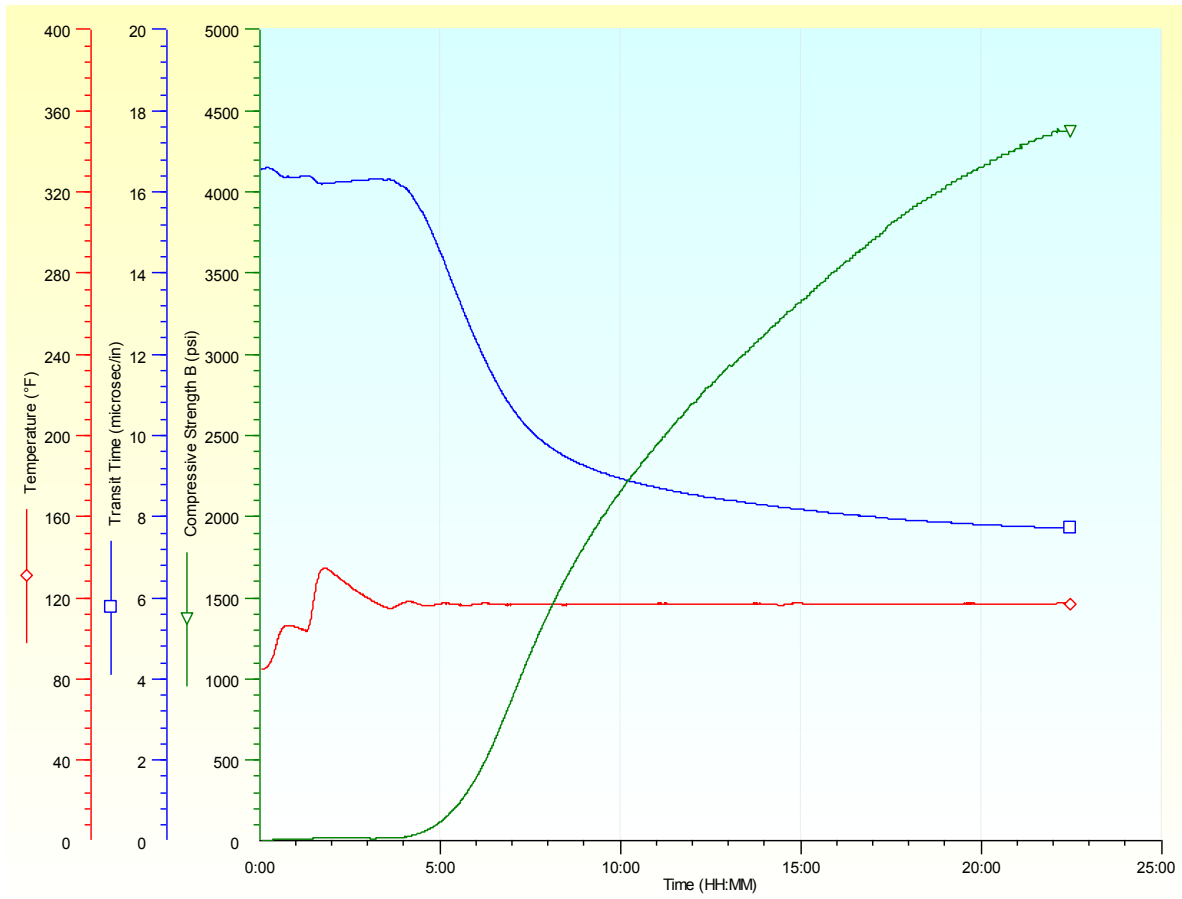


FIGURA 71. CARTA DE PRUEBA CORRIDA DE ESFUERZO COMPRESIVO AL CEMENTO H-PEMEX

Comparación mineralógica entre el cemento H, G y H-PEMEX, NRF-069-PEMEX-2012

PARÁMETROS	API SPEC-10A	NRF-069-PEMEX-2012		
		CLASE H	CLASE H-PEMEX	CLASE G
QUÍMICOS				
MgO % peso	6.0 % máx.	2.0 % máx.	2.0 % máx.	2.0 % máx.
SO ₃ % peso	3.0 % máx.	3.0 % máx.	3.0 % máx.	3.0 % máx.
P.I. % peso	3.0 % máx.	1.5 % máx.	1.5 % máx.	1.5 % máx.
R.I. % peso	0.75 % máx.	0.5 % máx.	0.5 % máx.	0.5 % máx.
CaO libre	NO RESTRINGE	0.5 % máx.	0.5 % máx.	0.5 % máx.
Alcalis % peso	0.75 % máx.	0.65 % máx.	0.65 % máx.	0.65 % máx.
MINERALÓGICOS				
C ₃ S	65.0 % máx. 48.0 % mín.	65.0 % máx. 58.0 % mín.	65.0 % máx. 58.0 % mín.	65.0 % máx. 58.0 % mín.
C ₃ A	3.0 % máx.	3.0 % máx.	3.0 % máx.	3.0 % máx.
C ₄ AF	24.0 % máx.	15.0 % máx.	15.0 % máx.	15.0 % máx.
FÍSICOS				
H ₂ O libre	5.9 % máx.	5.9 % máx.	5.9 % máx.	5.9 % máx.
Blaine	NO RESTRINGE	2700 (+/- 75)	2700 (+/- 75)	
Tiempo de espesamiento	90' min. 120' max.	90' min. 120' max.	90' min. 120' max.	90' min. 120' max.
Densidad Específica	NO RESTRINGE	3.14 gr/cm ³	3.14 gr/cm ³	3.14 gr/cm ³
Tamaño promedio de partícula	NO RESTRINGE	15 mín. 25 max.	15 mín. 25 max.	
Esfuerzo compresivo a temp. 38 °C	300 Lb/pulg ²	300 Lb/pulg ²	300 Lb/pulg ²	300 Lb/pulg ²
a temp. 60 °C	1500 Lb/pulg ²	1500 Lb/pulg ²	1500 Lb/pulg ²	1500 Lb/pulg ²
PROPIEDADES REOLÓGICAS				
Viscosidad plástica	NO RESTRINGE	35cp min 60cp max	35cp min 60cp max	
Punto de cedencia	NO RESTRINGE	0.293 kN/9.29 m ² máximo	0.293 kN/9.29 m ² máximo	
Densidad de Lechada	NO RESTRINGE	1.98 +/- 0.01 g/cm ³	1.93 +/- 0.01 g/cm ³	1.89 +/- 0.01 g/cm ³
Requerimiento de agua	38%	38%	42%	44%

FIGURA 72. COMPARACIÓN MINERALÓGICA ENTRE EL CEMENTO H, G Y H-PEMEX

El campo de aplicación de la NRF-069-PEMEX.2012 es general y de observancia obligatoria para la adquisición del material objeto de la misma, en las actividades de cementación de pozos petroleros que lleven a cabo los centros de trabajo de Pemex Exploración y Producción, a través de empresas de servicio o por administración; por lo que es incluida en los procedimientos de contratación como parte de los requisitos que debe cumplir el proveedor, contratista o licitante.

Beneficios de la Modificación de la Norma NRF-069-PEMEX-2002

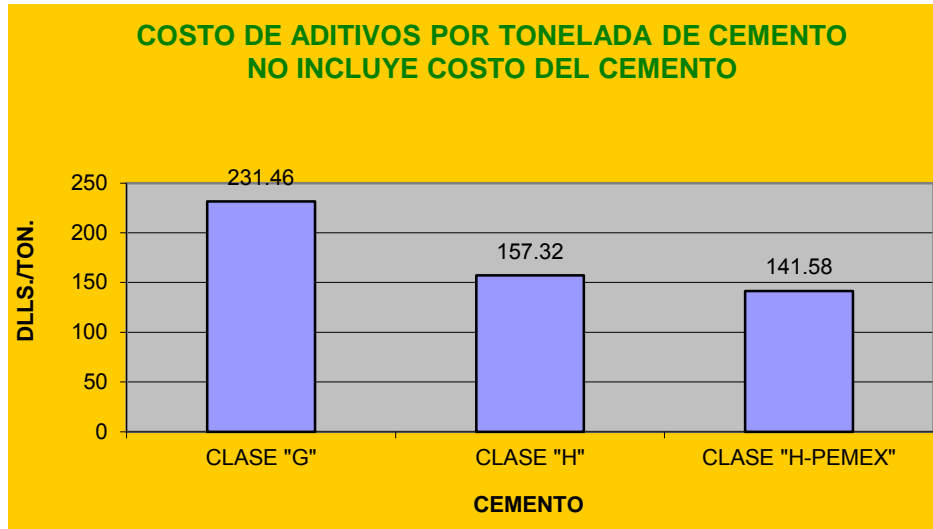


FIGURA 73. COMPARACIÓN COSTO ADITIVOS vs TONELADA DE CEMENTO PARA LOS CEMENTOS CLASE G, H y H-PEMEX.

- Con cemento clase "H PEMEX" se obtiene un 10% de ahorro

Cantidad de cemento requerido por la División Sur en los años 2014 y 2018: 164,312 toneladas

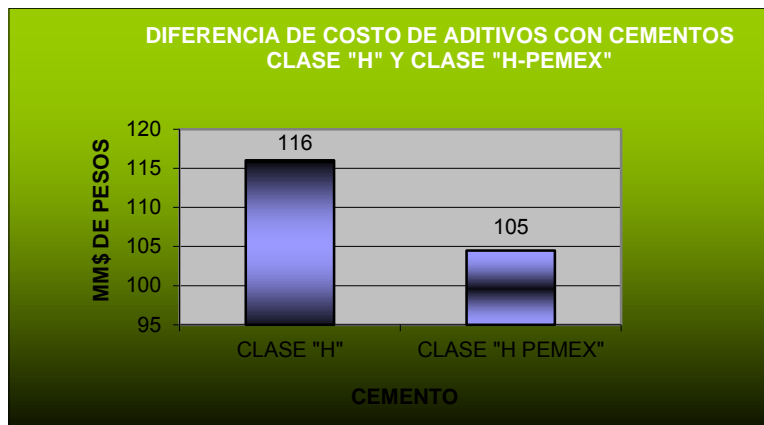


FIGURA 74. COMPARACIÓN ENTRE LA DIFERENCIA DE COSTOS ADITIVOS vs CLASE DE CEMENTOS

Ahorro para Pemex Exploración y Producción: 10%

- Optimización de los tiempos de perforación
- 1,242 operaciones de cementación para los años 2014 a 2018

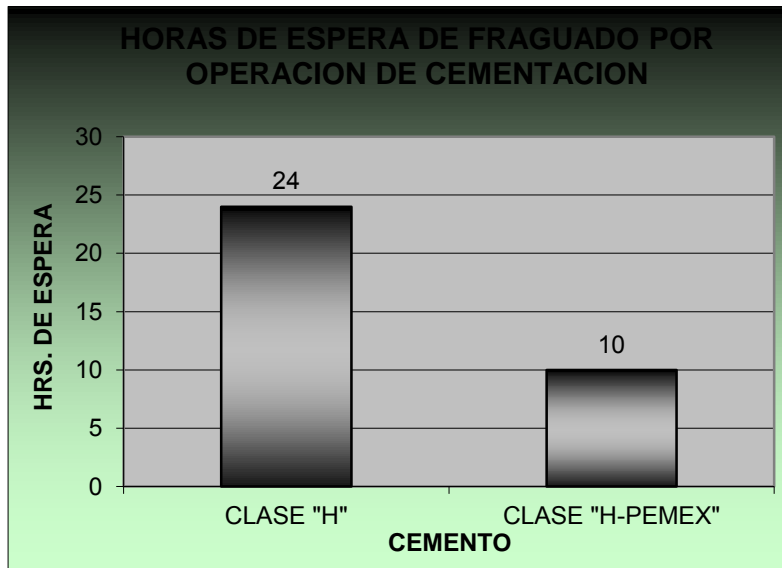


FIGURA 75. COMPARACIÓN ENTRE LAS HORAS DE FRAGUADO PARA LOS CEMENTOS CLASE H y H-PEMEX.

- Costo de la hora de espera \$5,900.00
- Ahorro en horas de las 1,242 operaciones: 17,388 horas
- Ahorro \$102'000,000 para PEP
- 17,388 hrs = 2 año producción

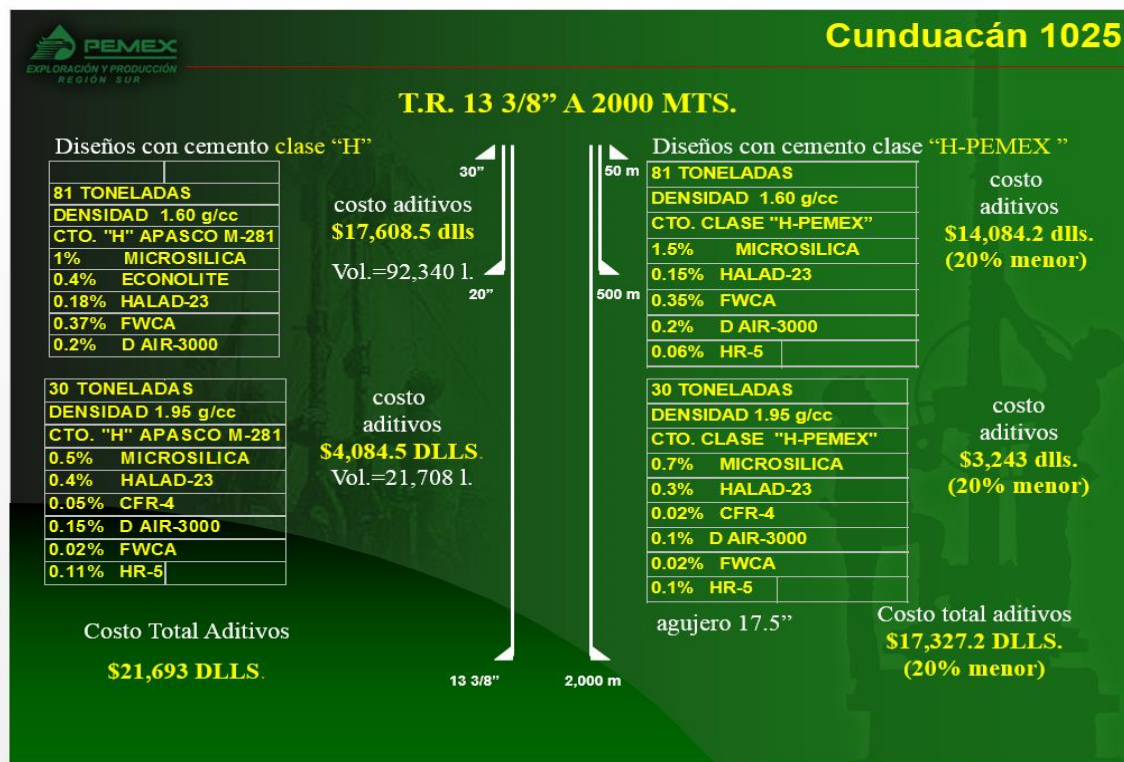


FIGURA 76. CONCLUSION DE RESULTADOS DEL EMPLEO DEL CEMENTO CLASE H-PEMEX PARA EL POZO CUNDUACAN 1025 A UNA PROFUNDIDAD DE 2000 mts.

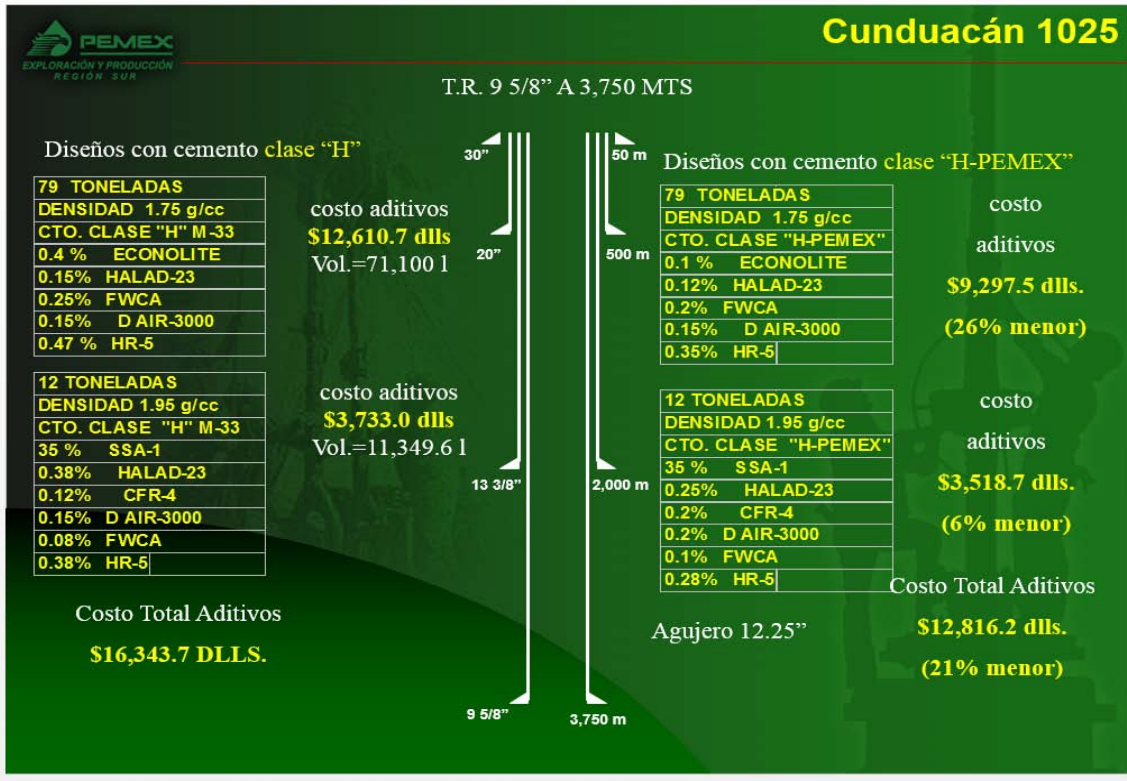


FIGURA 77. CONCLUSION DE RESULTADOS DEL EMPLEO DEL CEMENTO CLASE H-PEMEX PARA EL POZO CUNDUACAN 1025 A UNA PROFUNDIDAD DE 3,750 mts.

Beneficios Adicionales

- Controlar la calidad de los cementos petroleros nacionales e internacionales.
- Alta resistencia a los sulfatos y minimizar el uso de cloruros para incrementar la longevidad del pozo.
- Cero tiempos de espera por ajustes de lechadas en laboratorio
- Compatibilidad con más de 100 aditivos
- Ahorro en las operaciones de cementaciones al requerirse un menor consumo de aditivos

El cemento clase "H-PEMEX" fue diseñado para proporcionar alta resistencia temprana a la compresión, alta resistencia a los sulfatos, buen sello hidráulico entre capas del subsuelo y bajo consumo de aditivos químicos. En un producto con características técnicas aceptables y económicamente rentable, con el que se obtienen ahorros de hasta el 20% por Operación de Cementación.

Se advierte una tendencia a incrementar la perforación de pozos altamente desviados y horizontales. Se observa que los cementos utilizados en la cementación de tuberías de revestimiento seguirán teniendo un amplio uso a nivel mundial. En consecuencia, es necesario establecer si las normas que los rigen son las adecuadas para las distintas regiones en el mundo.

2.17 PRUEBAS FÍSICAS DE CALIDAD DEL CEMENTO

Al surtirse a granel cada lote de cemento, en las plantas dosificadoras se muestrea de manera selectiva. A estas se les efectúa una serie de pruebas físicas para comprobar su calidad y las variaciones entre ellas.

Las pruebas físicas para el control de la calidad del cemento son:

- Determinación del requerimiento de agua normal (en función de la granulometría).
- Tiempo de fraguado inicial en cédula 5 (de 90 a 120 minutos).
- Resistencia a la compresión en 8 horas a 38 y 60 °C (100 y 140 °F), a presión atmosférica debe ser de 300 y 1,500 psi como mínimo, respectivamente.
- Determinación del área de superficie específica, en función de la clase de cemento.
- Determinación de la gravedad específica del cemento solo.
- La consistencia de la lechada debe ser menor de 30 ABc en 30 minutos.

2.18 EQUIPO UTILIZADO PARA PRUEBAS DE LABORATORIO

El equipo utilizado en las diferentes pruebas de laboratorio efectuadas a los cementos y a las lechadas de cemento es muy variado. Hay diversas marcas y fabricantes. Lo importante es que dichos equipos cumplan con las especificaciones del API. Las figuras presentadas son cortesía de Ofiline, compañía que además de manufacturar equipo, también se encarga de remanufacturar y repararlo. De este modo, se tienen:

- 3 Balanzas
- 3 Consistómetros de presión atmosférica
- 3 Consistómetros de alta presión y alta temperatura
- 3 Cámaras de curado
- 3 Prensas de compresión
- 3 Filtro prensas
- 3 Mezcladoras
- 3 Viscosímetros
- 3 Permeámetros
- 3 Etc

Los equipos mencionados en esta sección se pueden utilizar para las pruebas físicas de calidad de muestras de cemento o bien para el diseño de lechadas, y se desarrollaran más adelante en los capítulos siguientes.

2.19 Cementación

Se denomina Cementación a todas las operaciones que se efectúan con fines específicos en los pozos petroleros. O al proceso de desplazar cemento dentro del espacio anular.

2.19.1 Clasificación de las cementaciones.

Se clasifican de acuerdo a los objetivos que se persiguen en:

- a) Cementación Primaria.
- b) Cementación Forzada.
- c) Tapones de cemento.

2.19.2 Descripción de la cementación Primaria.

La cementación primaria es el proceso que consiste en colocar cemento e el espacio anular, entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta del agujero, asegurando un sello completo y permanente.

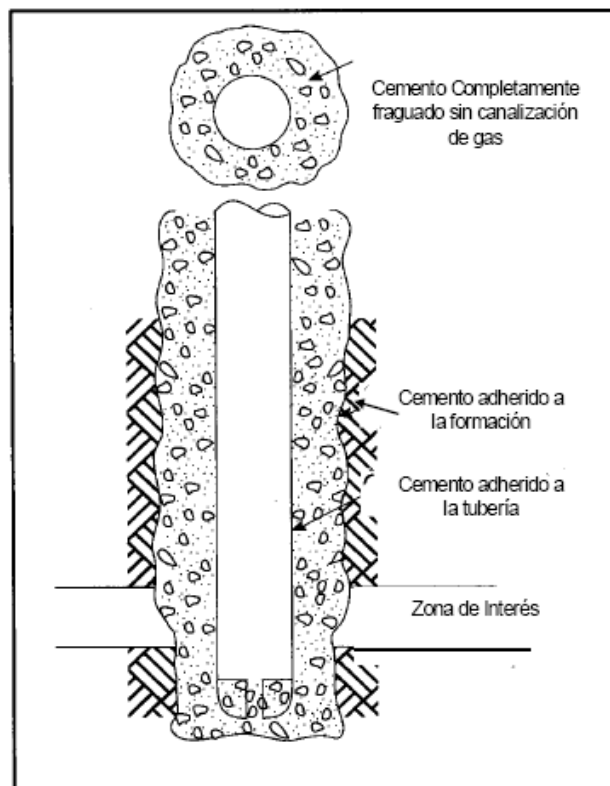


FIGURA 78. ESQUEMA GRAFICO DE UNA CEMENTACION PRIMARIA.

2.19.3 Objetivos de las cementaciones Primarias.

1. Proporcionar aislamiento entre las zonas del pozo que contienen gas, aceite y agua.
2. Soportar el peso de la propia tubería de revestimiento.
3. Reducir el proceso corrosivo de la tubería de revestimiento con los fluidos del pozo y con los fluidos inyectados de estimulación.
4. Evitar derrumbes de la pared de formaciones no consolidadas.
5. Obtener sellos hidráulicos efectivos en las zonas que manejan fluidos a presión, sin canalizaciones en las capas del cemento y con un llenado completo.

2.19.4 Descripción de la Cementación Forzada.

Es el proceso que consiste en inyectar cemento a presión a través de disparos o ranuras en la tubería de revestimiento al espacio anular. Esta es una medida correctiva a una cementación primaria defectuosa.

2.19.5 Objetivos de las cementaciones forzadas.

1. Mejorar el sello hidráulico entre dos zonas que manejan fluidos.
2. Corregir la cementación primaria en la boca de la tubería corta, o en la zapata de una tubería cementada, que manifieste ausencia de cemento en la prueba de goteo. **ANEXO**
3. Eliminar la intrusión de agua del intervalo productor.
4. Reducir la relación gas-aceite.
5. Sellar un intervalo explotado.
6. Sellar parcialmente un intervalo que se seleccionó incorrectamente.
7. Corregir una canalización en la cementación primaria.
8. Corregir una anomalía en la tubería de revestimiento.

2.19.6 Descripción de los tapones de cemento.

Los tapones de cemento comprenden un cierto volumen de lechada de cemento, colocado en el agujero o en el interior de la tubería de revestimiento.

2.19.7 Objetivos de los tapones de cemento.

1. Desviar la trayectoria del pozo arriba de un pescado o para iniciar la perforación direccional.
2. Taponar una zona del pozo o taponar el pozo.
3. Resolver un problema de pérdida de circulación en la etapa de perforación.
4. Proporcionar un amarre en la prueba del pozo.

2.20 Categorías de los aditivos y sus funciones.

2.20.1 Aceleradores.

Son productos químicos de compuestos naturales y/o sintéticos (inorgánicos) que se emplean en Cementaciones Superficiales, ya que reducen el tiempo de fraguado de los sistemas de cemento. Incrementan la velocidad de desarrollo de resistencia compresiva de los cementos, operan a temperaturas muy bajas, a tiempos bombeables muy cortos. Entre algunos ejemplos tenemos: Cloruro de Calcio, Cloruro de Sodio, Sulfato de Calcio.

ACELERADOR	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
CaCl₂	2-4 bwc	40-120	A bajas T disminuye la Vp 12-36% bwc aumenta la Vp y Aumenta la perdida x filtrado. Propiedades tixotrópicas.
NaCl	3-12 bw 1-5 bwc	50-120	Solo se usa cuando carecemos de CaCl ₂ . Disminuye la Vp y Aumenta la perdida x filtrado
KCl	1-3bwc	50-120	[12-36% bwc] retarda
CAL SEAL	5-90 bwc	> 32	Acelerador + fuerte TB mucho mas cortos, Vp y tixotropia muy altas
ECONOLITE	1-3 bwc	80-200	Extendedor que como efecto secundario acelera y por lo general debido a que aumenta la Vp solo se utiliza para lechadas de baja densidad. No es compatible con el CaCl ₂
SEA WATER	1.5 -2 c/r a los cloruros solubles	40-160	Aumenta la d , Vp, EC temprano
CEMENTO DENSIFICADO	[CFR-2 y CFR-3] dispersantes CFR-2 y 3: 0.5 -1%	40-150	Esta es otra vía para acelerar el fraguado al reducir el agua de mezcla, son usadas en operaciones superficiales a temp bajas. Reduce Vp, req. De agua , TB. Aumenta la d y EC.

FIGURA 79. TABLA DE ADITIVOS ACCELERADORES

2.20.2 Retardadores.

Son productos químicos orgánicos que prolongan el tiempo de fraguado de los sistemas de cemento dicho de otra forma, ayudan a aumentar el tiempo de fraguado retardando el desarrollo del esfuerzo compresivo de los sistemas de cemento, además de aumentar el tiempo bombeable, dicho aditivo trabaja en las operaciones a temperaturas de 170-500 o_F a profundidades de 6000-25000ft . Entre algunos ejemplos tenemos: Cloruro de Cítrico, Compuestos sacáridos, Derivados de la Celulosa, Organofosfonatos.

RETARDADOR	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
HR-4 Lignosulfonato de ca	0.1-2 bwc	110-170	A bajas [] disminuye el EC y da TB seguros Disminuye la Vp
HR-5 Lignosulfonato de Na	0.2-2 bwc	110-210	Disminuye la Vp y EC temprano
HR-6L Lignosulfonato de Na	2-20 Gal/100Sk 40% actividad	110-210	Disminuye Vp, y la actividad de los otros aditivos agregados al CMT
HR-12 Lignosulfonato de Ca + Acido Orgánico	0.1-2.5 bwc 1-6bwc	220-340 300-550	Disminuye Vp, EC y el efecto de los aditivos para la perdida por filtrado (degrada la celulosa)
HR-12L Lignosulfonato de Ca + Acido Orgánico	0.02-0.59 Gal/Sk 40% actividad	220-340	Disminuye Vp, EC y el efecto de los aditivos para la perdida por filtrado (degrada la celulosa)
HR-13L Lignosulfonato de Ca+ otros compuestos orgánicos	0.1-2.5% bwc 0.05-0.6% Gal/Sk 40% actividad	248-380	Disminuye Vp, EC, y el efecto de los demás aditivos en el cemento.
HR-15 Lignosulfonato de Ca	0.1-2.5 bwc	248-380	Disminuye Vp, EC y el efecto de los aditivos para la perdida por filtrado (degrada la celulosa)
HR-25 Compuesto orgánico primario	0.2-2 bwc	220-430	Es un intensificador del SCR100 Puede gelificar la lechada Disminuye ligeramente el EC
SCR100 Polímero Sintético	0.1-2 bwc	150-245 diseño tixotrópico 250-500 con HR25	Incrementa la tixotropía cuando se encuentra en el cemento aditivos para la perdida de filtrado. Degrada la celulosa. Aumenta el EC en comparación con los retardadores orgánicos.
SCR100 L Polímero Sintético	0.1-5 l/sk 40% de actividad	150-245 diseño tixotrópico	Incrementa la tixotropía cuando se encuentra en el cemento aditivos para la perdida de filtrado. Degrada la celulosa. Aumenta el EC en comparación con los retardadores orgánicos.
Diacel LWL Celulosa cementaciones Forzadas Retardador muy fuerte	0.1-1.5bwc	110-300	No es compatible con el CaCl ₂ Controlador de filtrado Aumenta la Vp

FIGURA 80. TABLA DE ADITIVOS RETARDADORES

2.20.3 Extendedores o Aligerantes.

Son materiales que bajan la densidad de los sistemas de cemento y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen del producto fraguado. En otras palabras son agentes cuya función principal es absorber volumen de agua y en consecuencia reducen la sedimentación de la lechada. Ayudan a prevenir perdida por filtrado y a evitar fracturas en formaciones débiles. Su empleo es útil para formaciones que requieren de varias etapas de cementación debido a su gradiente de fractura. Incrementan la cedencia de la lechada con impactos económicos favorables. Existen varios tipos de Extendedores: físicos (arcillas), puzolánicos (micro esferas), químicos (aniónicos, catiónicos) y gases (n2) entre algunos ejemplos tenemos: La Bentonita, las Puzolanas, Metasilicato de Sodio Anhidro.

ALIGERANTE	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
ECONOLITE Metasilicato de Na	1-3BWC	< 200	Difícil retardarlo, incompatible con sales, aumenta Vp
INYEKTROL Metasilicato de Na	0.635 Gal/Sk	<200	Difícil retardarlo, incompatible con sales, aumenta Vp
SILICALITE Silice	30 bwc	<500	Preventor de Retrogradación al EC
ESPHERILITE Esferas huecas inorgánicas de cerámica	10-190 bwc	<800	Presión <6000 psi Buen EC
PUZOLANA Ceniza del Carbón	50 bwc	80-320	Aligerante
MICRO-MATRIX CMT Cemento ultra fino 0.05 mm F	100-150 bw	40-350	Insoluble al agua baja la densidad del cmt hasta 1.32 gr/cc
CEMENTO ESPUMADO			Cemento dosificado con aligerantes y espumado con surfactante con mezclado especial, en pozo lleva N

FIGURA 81. TABLA DE ADITIVOS EXTENDEDORES

2.20.4 *Densificantes.*

Son materiales que incrementan la densidad de los sistemas de cemento y se emplean para contrarrestar las altas presiones del pozo. No reducen el esfuerzo compresivo de los sistemas de cementos pues solo le proveen peso a la lechada y son inertes y compatibles con otros aditivos. Entre algunos ejemplos tenemos: La barita y la limadura de fierro. Otro procedimiento que se emplea para aumentar la densidad de la lechada es reducir el agua de mezcla adicionando un agente reductor de fricción para disminuir el efecto de incremento de viscosidad.

DENSIFICANTE	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
HI DENSE-4 Hematita	20 bw	80-500	No precipita Disminuye la respuesta al Ec 90% de las partículas < malla 325
SSA-2 Arena Silica	35-100 bwc	230-700	Insoluble, reduce Vp y Yp, Estabiliza el EC
BARITA Sulfato de Bario	22 bw		Se usa en Espaciadores y Lavadores, causa Daño al Pozo a largo periodo en su lugar se ocupa el CaCO ₃
MICROMAX Oxido de Mg	40 bw		Requiere [Retardadores] muy alta, se agrega al agua de mezcla, rxn con el HCl, por el momento no se esta manejando en México.

FIGURA 82. TABLA DE ADITIVOS DENSIFICANTES

2.20.5 *Dispersantes o reductores de fricción.*

Son productos químicos que reducen la viscosidad de las lechadas de cemento, así como la tasa de bombeo para obtener un flujo turbulento dependiendo de las condiciones del pozo. También reducen la cantidad de agua de las lechadas densificadas, así también reducen la potencia y la presión para bombear la lechada, así como elevan la cantidad de sólidos en lechadas aligeradas. Entre algunos ejemplos tenemos: Sales de Ácidos Grasos.

DISPERSANTE	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
CFR-4	0.5-1.5 bwc	> 60	disminuye el Vp densifica pero fluidiza, controla perdida x filtrado, retarda ligeramente
CFR-3	0.3-1 bwc	> 60	disminuye el Vp densifica
HR-6L	2-20 Gal/100Sk 40% actividad	110-210	Disminuye Vp, y la actividad de los otros aditivos agregados al CMT
HALAD 413	0.2- 3 bwc	180-400	Disminuye Vp y la perdida por filtrado

FIGURA 83. TABLA DE ADITIVOS REDUCTORES DE FRICCIÓN

2.20.6 Controladores de filtrado.

Son materiales que controlan la pérdida de la fase acuosa de los sistemas de cemento, frente a zonas permeables, es decir previenen la deshidratación prematura o pérdida de agua en zonas permeables pues provee de una película para controlar el flujo de agua. Dichos aditivos son derivados de la celulosa. Entre algunos ejemplos tenemos: Materiales Pulverizados y Polímeros solubles en agua, Derivados de Celulosa, Polímeros sintéticos no iónicos, Polímeros sintéticos aniónicos, Polímeros Catiónicos.

ADITIVO CTRL DE FILTRADO	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
HALAD 344	0.3-1 bwc	60-250	No se recomienda su uso con NaCl, Aumenta Vp, [Retardadores] elevadas no se recomienda ya que inhiben su efecto
HALAD 413	0.2-3 bwc	80-400	Retarda y muy difícil que disperse en lechadas que contengan alguna sal. Disminuye Vp
HALAD 413L	0.08-1.20 Gal/Sk 25% actividad	80-400	Retarda y muy difícil que disperse en lechadas que contengan alguna sal. Disminuye Vp
HALAD 23 HALAD 23L	0.4- 2.5 bwc 0.11- 0.69 Gal/Sk 40% actividad	140-240	Incrementa la Vp retarda

FIGURA 84. TABLA DE ADITIVOS CONTROLADORES DE FILTRADO

2.20.7 Controladores de Pérdida de circulación.

Son materiales que controlan la pérdida de cemento hacia zonas débiles de la formación o fracturas. Es decir, controlan la pérdida por la inducción de fracturas propiciado por el fluido de perforación o la lechada de cemento. Para controlar la pérdida de circulación existen dos etapas:

1. Reduciendo la densidad de la lechada.
2. Agregando un agente obturante.
3. Agregar N2 al lodo de perforación.

ADITIVO PARA PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
THERMATEK LT		80-500	
THERMATEK HT	35-100 bwc	230-700	
SUPER FLUSH			
WELL LIFE			
FWCA	0.25-1 BWC	60-250	Agente Inixotrópica, incompatible con el HR-12, CFR-3, es un aditivo para controlar pérdida por filtrado.

FIGURA 85. TABLA DE ADITIVOS CONTROLADORES DE PERDIDA DE CIRCULACIÓN

2.20.8 Aditivos especiales.

Es la miscelánea de aditivos complementarios para la cementación, tales como antiespumantes, controladores de la regresión de la resistencia compresiva, Controladores de gas, Controladores de agua libre, Antidegradantes, Agentes expandidores del cemento fraguado: Cloruro de Sodio y Cloruro de Potasio, etc.

Los aditivos antiespumantes, previenen la formación de espuma causada por la agitación del cemento., estos son sales siliconas y poliglicoleter.

ADITIVO ANTIESPUMANTE	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
D-AIR 3000	0.1-0.45 bwc	<400	No afecta el comportamiento de las propiedades de la lechada.
D-AIR 3000 L	0.012-0.05 Gal/Sk 40% actividad	< 400	No afecta el comportamiento de las propiedades de la lechada

FIGURA 86. TABLA DE ADITIVOS ESPECIALES

2.20.9 Controladores de Gas.

Aditivos para controlar la migración de gas en el estado de transición de fluido a gel.

CTROL DE GAS	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
GAS STOP HT	1-2 bwc	350-500	compatible con dispersantes,aligerantes, silica retardadores y sustentantes. No retarda, solo dispersa ligeramente y es controlador de perdida por filtrado
GAS STOP LXP	0.4-1L/Sk	60-230	Controla Perdida x Filtrado y flujo de gas moderado incrementa Vp, retrasa el EC
Super CBL	0.15-0.6 bwc	60-400	Libera gas al mezclarse con el CMT, incrementa la compresibilidad, y controla flujo severo de gas también se usa para mejorar la adherencia del CMT al tubo y la formación, acelera fraguado gelifica.

FIGURA 87. TABLA DE ADITIVOS CONTROLADORES DE GAS

2.20.10 Controladores de agua libre.

La función principal de estos aditivos es la de absorber agua para evitar los problemas comunes por presión interna del pozo tanto en la formación o por la columna hidrostática del pozo en los diseños de aparejo horizontal, vertical, y de pata de perro.

ADITIVO CTROL DE AGUA LIBRE	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
FWCA	0.02-2	130-200	Suspensor de sólidos, previene precipitación.

FIGURA 88. TABLA DE ADITIVOS CONTROLADORES DE AGUA LIBRE

2.20.11 Antidegradantes.

La función de estos aditivos es la de darle más estabilidad a la lechada aportándole mayor esfuerzo compresivo a esta, aportando los silicatos necesarios al cemento.

ADITIVOS ANTIDEGRADANTES	%	RANGO T °F	ESPECIFICACIONES
SSA-1	35-100	230-700	incrementa la viscosidad
SSA-2	35-100	230-700	Reduce vp. y yp.

FIGURA 89. TABLA DE ADITIVOS ANTIDEGRADANTES

2.21 Lechadas de Cemento.

Las lechadas de cemento son suspensiones altamente concentradas de partículas sólidas en agua, pues su contenido de sólidos puede llegar hasta de un 70%, siendo así el resto del 30% de la fase acuosa.

Lo sólidos en una lechada están en función directa a su densidad. Esto depende del tipo de Lechadas que elaboremos.

2.22 Tipos de Lechadas.

1. El tipo de lechadas será clasificado de acuerdo al proceso de elaboración o método.
2. Lechada base.
3. Lechada de Diseño.

2.22.1 Lechada de Diseño.

No es más que la combinación o mezcla entre la cantidad mínima de agua o el requerimiento de agua normal para o con un saco de cemento.

2.22.2 Lechada tipo Base

La lechada de diseño es la mezcla entre un saco de cemento con su requerimiento normal de agua más un porcentaje de peso y agua de un aditivo empleado según sea las características del pozo.

2.22.3 Lechada de tipo de acuerdo al Proceso de elaboración o Método.

El proceso de elaboración de una lechada de Cemento es muy importante ya que de ésta depende su nombre, por ejemplo el Proceso Zone Sealant ya que éste será el tema que desarrollaremos más adelante en otro capítulo.

Debemos recordar siempre que una lechada de cemento debe presentar ciertas propiedades Físicas como brillo, consistencia, densidad, viscosidad, estabilidad y temperatura., así como 0% presencia de agua libre.

Capítulo III.- Evaluación de la calidad de los cementos

3.1 Pruebas de laboratorio.

El Comité API de Cementación fue fundado en el año 1948, con el objetivo de establecer los procedimientos de pruebas que se debían utilizar para caracterizar los cementos y lechadas. También se desarrollaron los equipos que se debían utilizar para ejecutar las pruebas.

En el tiempo estas pruebas han ido evolucionando y el Comité de Cementación se mantiene permanentemente evaluando nuevos equipos y pruebas que se van desarrollando producto de estudios e investigaciones realizadas a nivel mundial.

Luego de un riguroso proceso de evaluación donde se involucra un gran número de usuarios y empresas de cementación, se aprueban los cambios en las normas.

En este capítulo veremos las normas vigentes.

3.2 Introducción a las normas API relacionadas con el servicio de cementación.

Las normas descritas en el Spec 10A y en el RP10B fueron establecidas por el comité API para homologar las pruebas experimentales y operativas que las empresas realizaban en la industria de la cementación de pozos petroleros. En otras palabras con estas normas se pretende establecer un mismo patrón de evaluación que permitiese la repetición de resultados independientemente de la localidad o empresa que la realice.

Ejemplo de especificación plasmada en el API SPEC 10A en lo relativo al cemento H petrolero tenemos por ejemplo:

Tiempo de fraguado, debe estar comprendido entre 90 minutos y 120 minutos.

Las condiciones de las pruebas de especificación son aplicables únicamente a ese producto para el cual se aplicó la especificación y el procedimiento de prueba no debe ser modificado bajo ninguna circunstancia.

Ejemplo de los procedimientos de pruebas operacionales descritos en el RP10B son las tablas de calentamiento para las pruebas de espesamiento, las cuales pueden ser modificadas por patrones reales en función de la rata de bombeo y profundidad.

3.3 Normas utilizadas en el servicio de cementación

SPEC 10A: “Especificaciones del cemento y materiales para cementaciones de pozos”.

Básicamente se describen las especificaciones aprobadas para los productos. Las condiciones de pruebas de la especificación y el procedimiento “No deben ser modificadas bajo ninguna circunstancia”.

RP-10B: “Prácticas recomendadas para cementos petroleros”.

Documento que describe procedimientos de inspección o pruebas de un producto. “Los procedimientos pueden ser alterados para simular condiciones específicas de fondo de pozo”.

3.4 Preparación de una Lechada de Cemento.

Equipo de lab. (Especificaciones requeridas para la elaboración de Lechadas de Cemento)

Balanzas.- La lectura indicada en las balanzas deberá tener una exactitud con una tolerancia de 2gr para pesos de 2000 gr o más y de 0.1 por ciento del peso indicado para pesos menores de 2,000 gr., excepto para balanzas modernas para las cuales la tolerancia en la exactitud debe ser la mitad de estos valores. El recíproco de la sensibilidad*, no debe ser mayor que el doble de la tolerancia permitida en la exactitud de la balanza.



FIGURA 90. BALANZA ELECTRÓNICA

Pesos.- Los pesos deberán tener una exactitud dentro de la tolerancia mostrada en la tabla 5.1, excepto para pesos de fabricación reciente que deberán tener exactitudes de la mitad de estas tolerancias. En balanzas tipo brazo donde los pesos se colocan en el brazo, los pesos indicados deberán cumplir los requerimientos dados en la tabla 1.

TABLA 1**Variación de Pesos Permisible**

1	2
Peso g	Variación. Más o menos g
1000	0.50
500	0.35
300	0.30
200	0.20
100	0.15
50	0.10

FIGURA 91. PESOS REQUERIDOS-ESTABLECIDOS EN LA BALANZA ELECTRÓNICA

Probeta de cristal graduada.- Las probetas de cristal graduadas deberán ser suficientemente grandes para medir y proporcionar en una sola operación, el volumen requerido de agua para efectuar la mezcla a 20 ° C (68 ° F). Las variaciones en el volumen no deberán exceder el +/- 0.2 por ciento. Las graduaciones deberán tener subdivisiones de al menos 5 ml. Las graduaciones principales deberán ser círculos completos y deberán estar numeradas. Las graduaciones intermedias deberán cubrir un mínimo de un quinto de la circunferencia y las graduaciones más pequeñas deberán de cubrir un mínimo de un séptimo de la circunferencia.

Equipo para Mezclar.- El equipo para mezclar utilizado en la preparación de lechadas de cemento deberá tener una capacidad de al menos de ¼ de galón (aproximadamente de 1lt), con una mezcladora tipo propela de dos velocidades, capaz de girar a 4,000 rpm. (66.7 rev./seg.) o mayor cuando no tenga carga en " baja " velocidad y a 12,000 rpm (200 rev./seg.) o mayor en la velocidad más " alta " cuando no tenga carga. Algunos equipos normalmente utilizados para mezclar, se muestran en la **figura 3.4.2**. La propela debe ser construida de un material resistente a la corrosión. El vaso para mezclar, deberá estar construido de un material resistente a la corrosión o de cristal.



FIGURA 92. MEZCLADORA INDUSTRIAL CHANDLER 2 VELOCIDADES

Una pérdida de peso del 10 % o mayor de las hojas de la propela metálica resistente a la corrosión, dará como resultado un cambio en el tiempo bombeable de la lechada de cemento en un 10 % o mayor. Se recomienda que las propelas desgastadas sean reemplazadas por nuevas, cuando se observe una pérdida del peso especificado.

Un mezclador alterno de $\frac{1}{4}$ de galón de capacidad (aproximadamente 1 lt), deberá consistir de un motor eléctrico, capaz de girar a 20,000 rpm (333 rev./seg.) o más cuando no tenga carga. La potencia del motor debe ser regulada por un mecanismo de control, capaz de ajustar la velocidad del agitador a la requerida.

La potencia del regulador de control, debe estar ensamblada a un cronómetro el cual puede suministrar potencia en forma continua o puede cortar la potencia del regulador en 35 segundos cuando sea activado. Un tacómetro conectado permanentemente al motor debe ser capaz de marcar la velocidad del motor durante su operación con una exactitud de ± 100 rpm (± 1.7 rev./seg.).

Procedimiento.

Cribado.- La muestra de cemento que va a ser probada debe pasar por una malla de 850 micrones (No. 20). Cumpliendo con el requerimiento dado en la norma ASTM E 11: " Mallas de alambre para propósitos de prueba ", para romper terrones y remover partículas extrañas. El material retenido en la malla debe ser pesado y su peso deberá ser registrado como un porcentaje del peso total del cemento cribado, y se debe anotar como una característica del material.

Agua para la Mezcla.- Para pruebas de referencia, debe usarse agua destilada reciente o agua destilada libre de bióxido de carbono. Para pruebas de rutina, puede usarse cualquier agua potable. El agua para las mezclas debe medirse en probetas de cristal graduadas o pesadas por medio de balanzas y pesos.

Temperatura del Agua y del Cemento.- La temperatura del agua y del cemento antes de la mezcla debe ser 22.8 +/- 1.1 °C (73 +/- 2 ° F).

Porcentaje de Agua.- El porcentaje de agua por peso, debe añadirse para cada clase de cemento de acuerdo a los valores presentados en la tabla 2. No debe añadirse agua para compensar la evaporación, humedad, etc.

Clase de cemento API	% de agua en peso de cemento	Agua	
		Galones por saco	Litros por saco
A y B	46	5.19	19.6
C	56	6.32	23.9
D, E, F y H	38	4.29	16.2
G	44	4.97	18.8

FIGURA 93. TABLA 2 COMPOSICIÓN DE LA LECHADA DE CEMENTO.

Mezclado del Cemento y el Agua.- El mezclado del cemento y el porcentaje de agua requerido a la temperatura especificada deberá hacerse de acuerdo al siguiente procedimiento de mezclado:

La cantidad de agua requerida debe de colocarse en el vaso de mezclado, y el agitador debe de encenderse y colocarse en la velocidad " baja " (4,000 +/- 200 rpm (66.7 +/- 3.3 rev/seg¹)), la muestra de cemento deberá añadirse en no más de 15 segundos. Después de que se ha añadido todo el cemento en el agua de mezclado, debe colocarse la tapa del vaso y continuar el mezclado a " alta " velocidad (12,000 +/- 500) rpm (200 +/- 8.3 rev/seg¹) durante 35 segundos.

Volumen de Lechada.- El volumen de lechada en el agitador por Norma API debe ser de 0.6 [lt], 600 [cm³] o en ml.

Vol. lechada (ml)	Comp.	Clases de cementos API			
		A y B (g)	C (g)	D, E, F y H (g)	G (g)
600	Agua	355	383	327	349
	Cemento	772	684	860	792

FIGURA 94. TABLA 3 REQUERIMIENTOS DEL VOLUMEN DE AGUA Y CEMENTO PARA UNA LECHADA.

3.5 DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE LA LECHADA.

Equipos y Calibración.- La densidad de la lechada de cemento debe determinarse mediante el uso de la balanza de lodo descrita en el API-RP-13B. Procedimientos Establecidos para Pruebas a Fluidos de Perforación.

Procedimiento.- El procedimiento recomendado para el uso de una balanza de lodo, deberá estar de acuerdo con la última edición del API-RP-13B, excepto que la lechada, una vez colocada en la copa de la balanza de lodo, deberá golpearse 25 veces para eliminar el aire atrapado.

Equipo Alternativo.- Se describe un método alternativo para medir con mayor seguridad la densidad de una lechada de cemento, utilizando la balanza para densidad de fluido presurizado. La Balanza para Densidad de Fluido Presurizado es similar operacionalmente a la balanza de lodos convencional, la diferencia está en que la muestra de lechada se coloca en una copa de volumen fijo sometida a presión.

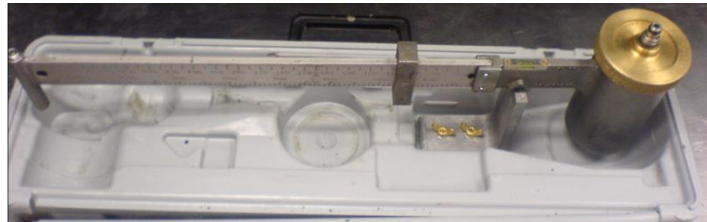


FIGURA 95. BALANZA DE LODOS PRESURIZADA

El propósito de someter la muestra a presión es el de minimizar el efecto del aire atrapado que normalmente se presenta en las mediciones de densidad, ya que las lechadas de cemento al mezclarse permiten la entrada de una cantidad considerable de aire. Al presurizar la copa, el aire que entró se reduce bastante, teniéndose mediciones de densidad más acordes con las condiciones de fondo del pozo

Calibración.- El equipo se calibrará de la misma forma que la balanza de lodo normal, midiendo agua o fluidos pesados de densidad conocida.

Instrucciones de Operación para el uso de la Balanza presurizada de Densidad de Fluidos.

- a. La copa de la balanza se llena con la lechada a la cual se le va a determinar la densidad. Se lleva a un nivel ligeramente abajo del borde, aproximadamente 1/4 de pulgada (6.4 mm). Se coloca la tapa sobre la copa con la válvula de retención fija en posición hacia abajo (abierta). Se empuja la tapa hacia la boca de la copa hasta que se logra el contacto entre el borde del extremo de la tapa y el borde superior de la copa. El exceso de lechada saldrá a través de la válvula de retención. Una vez que se coloca la tapa, se empuja la válvula hacia la

posición cerrada, se enjuaga externamente la copa con agua y se rosca, atornillándose la tapa sobre la copa.

- c. El émbolo de presurización es similar operacionalmente a una jeringa. El émbolo se llena sumergiendo la boquilla del ensamble en la lechada, con el pistón completamente hacia adentro. Después el pistón se jala hacia afuera, permitiendo el llenado del émbolo con la lechada.



FIGURA 96. BALANZA DE LODOS PRESURIZADA CON BOMBA DE CILINDRO PISTÓN (ANTES DE PRESURIZAR CON EL MISMO FLUIDO)

- d. La boquilla del émbolo se empuja dentro de la válvula de retención de la copa. La copa se presuriza manteniendo una fuerza descendente sobre la válvula de tal forma que se mantenga la válvula de retención en posición hacia abajo (abierto) y al mismo tiempo se fuerce el pistón hacia adentro. Se debe mantener una fuerza de aproximadamente 50 libras (225 N) o mayor sobre el pistón, figura C.2 de las Normas API.
- e. La válvula de retención de la tapa se activa a presión, lo que significa que una vez que se presuriza la copa, la presión empuja la válvula hacia arriba o a la posición de cerrada. Por lo tanto, la válvula se cierra gradualmente, mientras se mantiene la presión sobre el pistón. Una vez que se cierra la válvula de retención, se libera la presión en el pistón antes de desconectar el émbolo.
- f. La muestra de lechada está lista para la prueba. El exterior de la copa se deberá enjuagar con agua y secarse. El equipo se colocará sobre la cuchilla de acuerdo con la ilustración. El indicador se moverá hacia la derecha o hacia la izquierda hasta que la burbuja indicadora se balancee. Esto se logrará cuando la burbuja se centre entre las dos marcas negras. La densidad se obtiene leyendo cualquiera de las cuatro escalas marcadas sobre la flecha lateral. Se puede leer directamente en unidades de lb/gal, peso específico o gravedad específica kg/litro, psi/1000 ft y lb/cu ft. Estos valores se pueden convertir a gr/cc utilizando el factor adecuado.

- g. La presión se libera empujando la válvula de retención hacia abajo. Esto se hace reconectando el émbolo en la válvula y empujando el cilindro hacia abajo. Se vacía el contenido de la copa y todos los componentes se lavan bien con agua. Para que la válvula funcione bien, la tapa y el cilindro del émbolo deben engrasarse con frecuencia, con una grasa a prueba de agua

3.6 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS USANDO UN VISCOSIMETRO ROTACIONAL Y UN CONSISTÓMETRO ATMOSFÉRICO.

- 1.- **Equipo.-** El equipo o equipos alternos presentados en las secciones anteriores, deberán de utilizarse para determinar el contenido de agua libre (Sección 6). Además, los equipos descritos en esta sección pueden utilizarse para medir: 1) contenido de agua de la lechada (Apéndice B), 2) prueba de pérdida de fluido (Apéndice F) y 3) determinación de las propiedades reológicas (Apéndice H).

- a. Equipo.- Consistómetro a Presión Atmosférica (ver figura 3.6.1)
- b. Equipo alternativo.- Consistómetro Presurizado descrito en la Sección 8 e ilustrado en las figuras.



FIGURA 97. CONSISTÓMETROS PRESURIZADOS A ALTA PRESIÓN Y ALTA TEMPERATURA (HP-HT)

2.- Calibración.- El equipo debe calibrarse utilizando aceite de calibración " Paratone " o un aceite equivalente, del cual se conozcan las relaciones de viscosidad - temperatura para un intervalo de 5 a 100 unidades Bearden de consistencia (Bc) o (donde los instrumentos están equipados con un resorte de calibración, ver figura 3.6.2) se puede usar otro método tentativo utilizando un equipo de calibración que indique el momento peso – carga. El equipo debe recalibrarse al menos cada año, o cuando se note el desgaste de cualquier parte metálica en contacto con la lechada o cuando se reemplace alguna pieza. (El aceite "Paratone" deberá desecharse después de usarse, ya que existe la posibilidad de contaminación durante la calibración).

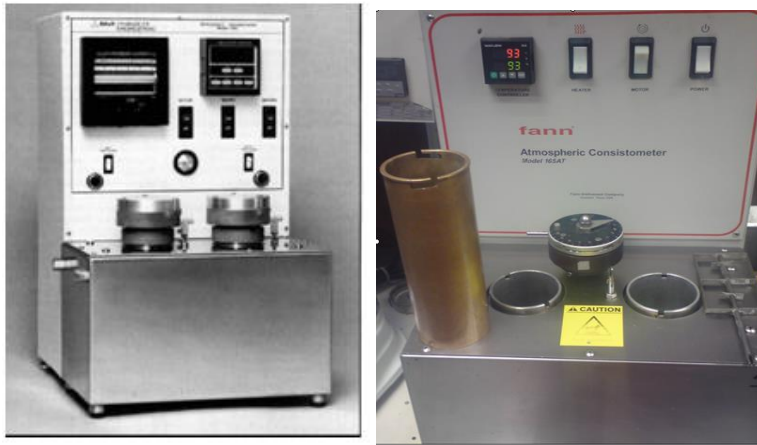


FIGURA 98. CONSISTÓMETROS ATMOSFÉRICOS

Preparación del Equipo.

3.- Limpieza y Lubricación.- Debe tenerse cuidado de que todas las superficies en contacto con la lechada de cemento estén limpias. Después de cada prueba, las superficies (particularmente la parte externa de las hojas de la propela) deben de limpiarse y cepillarse con un cepillo de elementos de bronce. A las superficies que comúnmente están en contacto con la lechada de cemento, se les debe poner una capa de grasa o aceite no soluble en agua antes de cada prueba. Los baleros de la flecha y los del indicador de momentos, deberán de mantenerse limpios y deben lavarse frecuentemente con kerosina y aceitarse con un lubricante ligero.

4.- Depósito del Agua.- Se debe de usar siempre agua como líquido para el baño. Por esta razón, todas las partes de acero en contacto con el agua deben de limpiarse y aceitarse o engrasarse.

El depósito del agua debe de llenarse hasta la parte media de la mirilla de cristal, después de colocar las celdas de la lechada y encender el equipo.

5.- Montaje.- El mecanismo del depósito de la lechada, deberá de montarse y las propelas deben de girarse a mano, a fin de asegurarse que ninguna de las partes roce. El puntero del indicador de momentos deberá marcar cero cuando el depósito de la lechada este vacío y este girando. Si no marca cero, se debe ajustar el puntero. El mecanismo del depósito de la lechada debe girar a una velocidad de 150 rpm (2.5 rev/seg) +/- 15 rpm (.25 rev/seg).

Procedimiento.

6.- Como Llenar el Equipo.- La lechada debe vaciarse rápidamente en la celda de la lechada hasta el nivel indicado, el cual está marcado por una muesca circular en el interior de la celda. La propela debe insertarse en la tapa, de tal forma que la ranura de la parte superior de la flecha enganche en el perno del brazo de momentos, localizado en el interior de la tapa.

Todo el ensamble debe colocarse en el baño en tal forma que, los pernos que aseguran la tapa con la celda de la lechada también entren en las ranuras del cilindro giratorio, y que el cordón indicador de momentos quede enredado alrededor de la polea de momentos y el extremo de éste quede enlazado en el perno. Debe tenerse cuidado que el cordón esté alineado apropiadamente en las dos poleas de 1 3/4 de pulgada (44.5 mm), en la polea del anillo indicador de momentos y en la polea para medir los momentos, asegurando un radio constante de tiro.

En instrumentos equipados con resorte de calibración y cuadrante para el puntero, las lecturas se hacen directamente y no se requiere usar un cordón para conectar el indicador de momentos. En este punto el motor ya puede arrancarse. El intervalo de tiempo entre la terminación del mezclado de la lechada y el arranque del equipo no debe exceder de 1 minuto.

7.- Control de Temperatura*.- Cuando se prueban lechadas en el intervalo de temperaturas de 27 a 38 ° C , 27 a 49 ° C y 27 a 60 ° C (80 a 100 ° F, 80 a 120 ° F y 80 a 140 ° F), la rapidez de incrementar la temperatura debe ser de 0.5 ° C (1 ° F) por minuto. Cuando se efectúan pruebas en el intervalo de 27 a 71 ° C, 27 a 82 ° C y 27 a 93 ° C (80 a 160 ° F, 80 a 180 ° F y 80 a 200 ° F), la rapidez de incrementar la temperatura debe ser de 1 ° C (2 ° F) por minuto. La temperatura final debe mantenerse con una precisión de +/- 1 ° C (+/- 2 ° F).

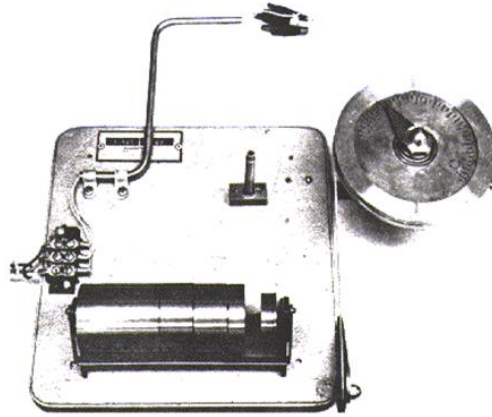


FIG. 9.2
DISPOSITIVO DE CALIBRACION DE POTENCIOMETRO MODIFICADO TIPICO DE
CONSISTOMETRO DE PRESION ATMOSFERICA

FIGURA 99. DISPOSITIVO DE CALIBRACIÓN DEL POTENCIÓMETRO MODIFICADO PARA EL CONSISTÓMETRO ATMOSFÉRICO

DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS

1.- Equipo.- Un equipo de la siguiente descripción será utilizado para determinar las propiedades reológicas de las lechadas de cemento.

- a. Un viscosímetro rotacional capaz de medir esfuerzos de corte contra velocidad de corte en un intervalo cercano a cero [1/seg] hasta 511 [1/seg]. Equipos comúnmente usados proporcionan un mínimo de cinco lecturas en este intervalo. Equipos que proporcionen menos de cinco lecturas en ese intervalo de velocidad de corte no podrán usarse. Una descripción y algunas especificaciones para los equipos usados comúnmente son:



FIGURA 100. VISCOSÍMETRO RORTACIONAL FANN 35-a

Un viscosímetro tipo rotacional de lectura directa, con potencia proporcionada por un motor con o sin caja de reducción de velocidades. El cilindro exterior o rotor es movido a una velocidad rotacional constante para cada lectura de rpm ([rev/seg]). La rotación del cilindro exterior dentro de la lechada produce un torque en el cilindro interior o péndulo. Un resorte de torsión restringe el movimiento. Una escala adherida al péndulo indica el desplazamiento de éste.

Cilindro exterior:

Diámetro interior 1.450 pulgadas (36.83 mm).

Longitud total 3.425 pulgadas (87.00 mm).

Con una marca a 2.30 pulgadas (58.4 mm) arriba del fondo. Con dos hileras de orificios de 1/8 de pulgada (3.18 mm) espaciados 120° 2.09 radianes), colocados alrededor del rotor, arriba de la marca.

Péndulo:

Diámetro 1.358 pg (34.49 mm).

Longitud del cilindro 1.496 pulgadas (38.00mm).

b. Medidor de Intervalos.- Cronómetro mecánico o eléctrico.

c. Mediciones de la Temperatura.- Un termómetro capaz de medir la temperatura con precisión de $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ($\pm 0.10^\circ\text{F}$).

H.2.- Calibración.- El procedimiento de calibración para un viscosímetro dado, debe ser el sugerido por el fabricante para su correcta operación.

a. La operación adecuada para un viscosímetro de lectura directa depende, entre otras cosas, del mantenimiento de la correcta tensión del resorte. Procedimientos para probar la tensión del resorte por el método de pesos muertos o midiendo la viscosidad de un fluido Newtoniano conocida a una temperatura específica, proporcionados por el fabricante.

- b. Aunque los equipos vienen generalmente con un resorte de torsión, con factor de rango de 1 como estándar, se dispone de otros resortes para mediciones de fluidos de viscosidad más alta o más baja. Cuando el equipo está constituido por un resorte de torsión que tiene un factor de rango diferente a 1, las lecturas obtenidas deberán multiplicarse por el factor de rango apropiado.
- c. Se debe verificar que el conjunto rotor – péndulo, esté centrado antes de usar el equipo. Esto puede hacerse operando el equipo y colocando un pequeño espejo bajo el conjunto rotor-péndulo. Severa desviación del centrado deberá ser corregida ajustando la posición del rotor a mano hasta obtener el mejor centrado.

H.3.- Procedimiento.- La determinación de las propiedades reológicas de las lechadas de cemento, es una operación delicada que debe de efectuarse con estricto apego a los procedimientos de prueba. Para obtener mejores resultados, el procedimiento completo debe repetirse (de tres a cinco veces) usando cada vez muestras de lechadas preparadas recientemente. Las lecturas que caigan fuera de +/- una desviación estándar, deberán ser desechadas. Cada lectura del equipo debe reportarse como el promedio de todas las mediciones aceptables. El equipo (péndulo, vaso) deberá de limpiarse y secarse antes de cada prueba.

- a. La lechada de cemento deberá prepararse de acuerdo con las instrucciones de la Sección 1 del API SPEC 10, con las excepciones siguientes:
 - 1. El agua para la mezcla deberá ser medida cuidadosamente por peso y no por volumen, empleando el vaso de la mezcladora para evitar pérdida de líquido.
 - 2. Las aspas de la mezcladora deberán de verificarse por desgaste y deberán reemplazarse de acuerdo a lo recomendado en la Sección 5 parte 5.4. Si existe alguna fuga de agua alrededor del balero, el conjunto de las aspas de la mezcladora deberá reemplazarse totalmente o repararse de acuerdo a la parte L.4, del Apéndice L de la Norma API SPEC 10, no incluida aquí.
 - 3. Deberá añadirse un antiespumante líquido al agua para la mezcla, antes de adicionarse los sólidos al agua, para minimizar la producción de espuma. (Esto debe hacerse, además de añadir cualquier agente antiespumante seco, agregado al cemento).

- b. La lechada de cemento, ya preparada, deberá vaciarse inmediatamente a la celda del consistómetro a presión atmosférica o del consistómetro presurizado el cual debe haberse precalentado a la temperatura de prueba deseada $\pm 2^\circ \text{C}$ ($\pm 5^\circ \text{F}$).
- c. La lechada de cemento debe agitarse durante 20 minutos a la temperatura de prueba deseada.
- d. La lechada de cemento deberá ser transferida al vaso del viscosímetro (el vaso y el péndulo deberán de mantenerse a la temperatura de prueba, con una precisión de $\pm 2^\circ \text{C}$ ($\pm .5^\circ \text{F}$). Antes de vaciar la lechada al vaso del viscosímetro, quite la propela y agite la lechada a mano con una espátula durante 5 segundos, a fin de minimizar la segregación de sólidos, debido al asentamiento, asegurándose que se dispersen los sólidos posiblemente asentados en el fondo del vaso. La lechada debe vaciarse en el vaso del viscosímetro hasta la línea de nivel inscrita.

El vaso para la muestra y la lechada, deberán de mantenerse a la temperatura de prueba deseada, con una precisión de $\pm 2^\circ \text{C}$ ($\pm 5^\circ \text{F}$) durante la prueba. Con el rotor apagado y el vaso precalentado deberá de llenarse con la lechada hasta el nivel marcado en la línea inscrita en el rotor. Esta operación deberá ejecutarse lo más rápido posible. Inmediatamente, se tomarán las lecturas en el equipo en orden decreciente. Las lecturas no deberán tomarse a velocidades de corte mayores de 511 ($[1/\text{seg}$ o $\text{seg}^{-1}]$).

- e. Antes de tomarse las lecturas se debe registrar la temperatura de la lechada en el vaso del viscosímetro. La lectura inicial en el equipo a la velocidad de corte de 511 $[1/\text{seg}$ o $\text{seg}^{-1}]$ deberá de tomarse después de agitar a esa velocidad durante 60 segundos. Las lecturas siguientes deberán hacerse en orden decreciente a intervalos de 20 segundos*. Cada lectura deberá de tomarse inmediatamente antes de hacer el cambio a la siguiente velocidad inferior. La temperatura de la lechada al final de esta parte de la prueba deberá de registrarse.
- f. Si el viscosímetro rotacional tiene una caja de velocidades, el cambio de velocidad de rotación, usando la caja de velocidades, deberá hacerse inicialmente. El resto de las lecturas se tomarán en orden decreciente a intervalos de 20 segundos.
- g.- Las mediciones reológicas de la lechada deberán ser reportadas a la temperatura promedio de las registradas en los pasos e y f.

3.7 Pérdida de Fluido por Filtrado

Equipo 1.

a. **Filtro prensa** (temperatura ambiente, 100 psi (700 kPa)). El filtro prensa deberá consistir de un bastidor y un ensamble de celda. La celda debe tener un diámetro interior de 3 ± 0.07 pg. (76.2 \pm 1.8 mm) y una altura mínima de 2.5 pg. (63.5 mm). El ensamble de la celda debe estar construido de materiales resistentes al contacto con soluciones alcalinas y pueda soportar convenientemente presión interna, ser purgado por la parte superior. El fondo de la celda debe estar cerrado con una tapa que tenga un tubo de drene y los empaques necesarios para proporcionarle un sello efectivo. El área de filtración debe ser de 7.1 pg² (4580 mm²). El ensamble completo debe estar soportado en posición adecuada.



FIGURA 101. AUTOCLAVE DE ACERO, O-RINGS, ANILLO DE SEGURIDAD Y UNA MALLA DE 325 MESH SOPORTADA POR OTRA MALLA DE 60 MESH

b. **Filtro prensa² (Alta presión, alta temperatura)**. El filtro prensa debe consistir de un bastidor y un ensamble de celda similar al equipo típico que se muestra en las Figs. F.2 y F.3. La celda debe tener un diámetro interior 2.130 ± 0.005 pg. (54.1 \pm 0.01 mm) con la altura mínima interna de 2.5 pg. (63.5 mm) y 8.5pg. (215.9 mm) como se indican para los equipos mostrados en las figs. F.2 y F.3 respectivamente.

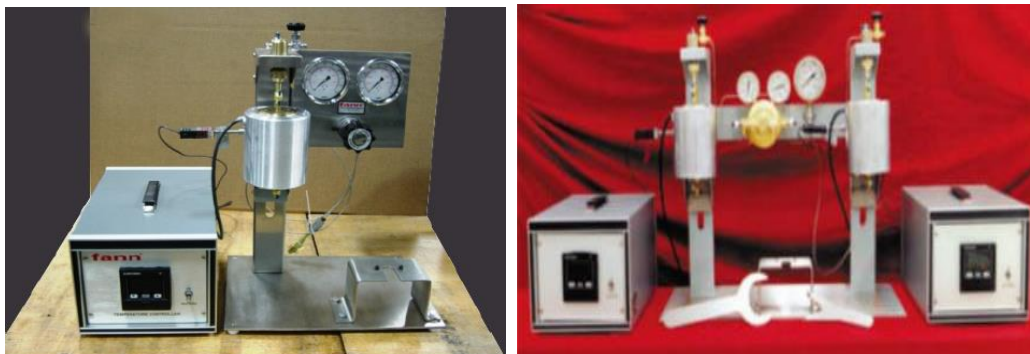


FIGURA 102. FILTRO PRENSA FANN DE 1 Y 2 CELDAS

El ensamble de la celda debe construirse de materiales resistentes a soluciones alcalinas y pueda soportar con seguridad presión interna, pueda ser purgado por la parte superior. El fondo de la celda debe estar cerrado con una tapa que tenga un tubo de drene y los empaques necesarios para proporcionarle un sello efectivo. El área de filtración debe ser de 3.5 pg.2 (2258 mm²).

El ensamble completo debe estar soportado en una posición conveniente y construido de tal manera que la celda descansa en una camisa térmica con control de temperatura para su calentamiento y filtración.

c. Medio de presurización. La presión deberá ser suministrada por aire comprimido, nitrógeno o cualquier otro medio seguro y adecuado para mantener una presión de gas constante.

2 Preparación del filtro prensa y lechada. Con anterioridad a la colocación de la lechada en el filtro prensa, éste y la lechada de cemento deberán prepararse como se indica a continuación:

a. Filtro prensa. La celda del filtro prensa, debe ensamblarse estando seca.

b. Lechada. Luego de que la lechada se ha preparado de acuerdo a la sección 1, se coloca en un consistómetro presurizado o en un consistómetro atmosférico y agitado durante 20 minutos. La lechada es colocada en el filtro prensa tan rápidamente como lo permita un manejo adecuado.

El tiempo entre el cese de la agitación y la aplicación de la presión no debe exceder de 2 minutos. Se deberá determinar la temperatura de la lechada, °C (°F).

c. Lechada especial. Cuando la prueba sea aplicada sobre lechadas preparadas para el campo, estas estarán sujetas a mayor temperatura y/o presión, entonces deberá establecerse un método especial de preparación y manejo.

d. Prueba de simulación de pozo (abajo de 90°C (194°F)). Cuando la prueba de filtración es para ser conducida bajo condiciones simuladas de fondo de pozo, abajo de 90°C (194°F), la lechada debe prepararse de acuerdo con la sección 1, colocada en un consistómetro presurizado para la simulación de alta presión o simulación de presión atmosférica, y seguirse una cédula adecuada de prueba.

Puede usarse un consistómetro atmosférico para la simulación de presión atmosférica. A la terminación de la cédula, la celda de la lechada es removida de la cámara, y la lechada es vaciada en el filtro prensa precalentado. El filtro prensa y la lechada se mantienen a la temperatura final de la cédula durante el período de la prueba de pérdida de fluido.

e. Prueba para simulación de pozo. (Arriba de 90°C (194°F), y menor 121°C (250°F). Cuando la prueba de filtrado se va a llevar a cabo bajo condiciones simuladas de temperatura de fondo de pozo arriba de 90°C (194 °F), pero menor de 121°C (250°F), deberá observarse el siguiente procedimiento:

1. Precalentar la celda de pérdida de fluido a 90°C (194°F).
2. Preparar la lechada de acuerdo con la sección 1.
3. Vaciar la lechada en la copa del consistómetro presurizado.
4. Seguir la cédula de calentamiento y presurización de prueba de la lechada conforme a la Tabla F.2.
5. Después de un periodo de 20 minutos de precalentamiento, desfogar cuidadosamente la presión y abrir el consistómetro presurizado.
6. Remover la celda de pérdida de fluido de la chaqueta de calentamiento. Girar el termostato para calentar la chaqueta a la temperatura final de prueba. Cerrar la válvula del fondo de la celda de pérdida de fluido antes de vaciar la lechada en la celda invertida.
7. Remover la lechada del consistómetro, agitarla y vaciarla en la celda de pérdida de fluido dejando 3/4 pg. (19 mm) en la parte superior de la celda para permitir la expansión, insertar la malla, O-ring y tapa. Apretar los tornillos Allen y cerrar tanto la válvula de fondo como la superior de la celda de pérdida de fluido.
8. Invertir la celda y conectar la línea de presión a la parte superior de la celda. Abrir únicamente la válvula superior y aplicar 100 psi (700 kPa) a la celda.
9. Conectar el receptor de presión de fondo y asegurarlo en su lugar. Aplicar 100 psi al receptor de presión de fondo. **NO ABRIR LA VÁLVULA INFERIOR.**
10. Después de 15 minutos de que se ha presurizado a 100 psi, elevar la presión en la válvula superior a 1100 psi. **ABRIR LA VÁLVULA INFERIOR.**
11. Colectar el filtrado durante un período de 30 minutos. Si la contrapresión se eleva más de 100 psi durante la prueba, purgar cuidadosamente el filtrado.
12. Al final de la prueba, cerrar ambas válvulas y desfogar la presión de ambos reguladores de presión.
13. Enfriar la celda a temperatura ambiente. Luego desfogar la presión cuidadosamente antes de limpiar la celda.
14. Todos los resultados deben de registrarse conforme al párrafo F.5.

f. Medio de filtrado. El medio de filtrado debe ser una malla de la serie US Standard (ASTM E11) del No 325, soportada por una malla del No 60 (250 micrómetros) o de menor número, ambas fabricadas de acero inoxidable en una unidad integral.

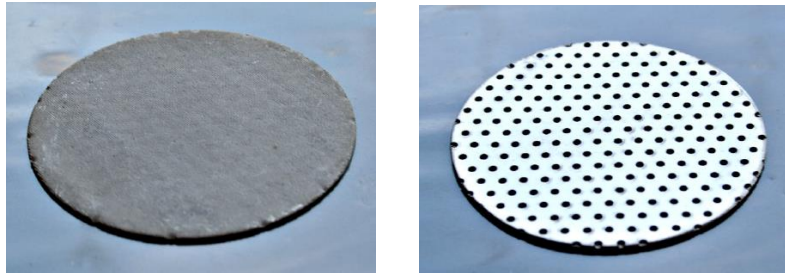


FIGURA 103. MALLA DE 325 MESH (44 MICRONES) SOPORTADA POR UNA MALLA DE 60 MESH (250 MICRONES)

g. Probeta graduada de vidrio. Las probetas graduadas de vidrio deben ser lo suficientemente largas para contener y medir el volumen esperado de filtrado.

F.3 Colocación de la lechada en el filtro prensa e inicio de la prueba. La probeta debe llenarse con la lechada de manera tal que se deje por lo menos 3/4 pg de espacio libre (19.0 mm) desde el sello O-ring. Cubrirse y asegurarse en el bastidor. Deberá colocarse una probeta graduada seca bajo el tubo de drenaje para coleccionar el filtrado, con la válvula de alivio cerrada, aplicarse una presión de gas de 100 +/- 5 psi (700 +/- 35 kPa) durante 5 segundos, después de haber cerrado la válvula de alivio. Cuando la prueba se realiza de acuerdo a los Párrafos F.2d y F.2e, la presión diferencial debe ser de 1000 +/- 10 psi (6900 +/- 70 kPa).



FIGURA 104. PROBETA CON FILTRADO DE UNA LECHADA DE CEMENTO

F.4 Periodo de prueba. El período de prueba deberá cronometrarse desde el instante de la aplicación inicial de la presión con la válvula inferior abierta. Las lecturas de filtrado deberán tomarse a 1/4, 1/2, 1, 2, y 5 minutos y luego a intervalos de 5 minutos, hasta transcurridos 30

minutos. Si la deshidratación se presenta antes de los 30 minutos del periodo de prueba, deberá medirse el tiempo requerido para la deshidratación de la muestra. Al finalizar la prueba, la válvula de la línea de presión debe cerrarse y la válvula de alivio abrirse.

F.5 Registro de resultados. Registrar la temperatura inicial de la lechada en °C o °F. Cuando la prueba se realiza de acuerdo al párrafo F.2d, la cantidad de filtrado obtenida de la celda que tiene un diámetro interior de 2.130 +/- 0.005 pg. (54.1 +/- 0.01mm) deberá ser multiplicada por 2. Esto se aplica tanto a la prueba de 30 minutos, como a las pruebas de periodos más cortos. El volumen del filtrado debe registrarse como sigue:

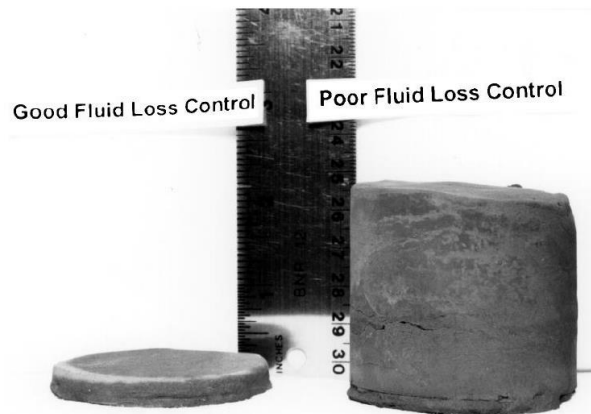


FIGURA 105. DETERMINACIÓN DEL ENJARRE DE LA PRUEBA DE PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO EXCESIVO

a. Para períodos de prueba \geq de 30 minutos. Reportar el volumen de filtrado como la pérdida de fluido a presión diferencial de prueba de 100 psi (700 kPa) o a 1000 psi (6900 kPa).

b. Para periodos de prueba más cortos. Para las lechadas que se deshidratan en menos de 30 minutos, y duración de prueba más corto, obtenerse un valor hipotético de prueba a 30 minutos, con propósitos comparativos por:

1. Graficando los resultados en papel log-log y extrapolando el valor de 30 min. ó
2. Multiplicando la cantidad de filtrado a un tiempo particular por 5.477 dividida por la raíz cuadrada del tiempo en minutos. Esta relación se muestra en la **Ecuación F.1.**

$$Q_{30} = 2Q_t * \frac{5.477}{\sqrt{t}} \text{ ECUACIÓN F. 1}$$

Donde:

- Q₃₀ = cantidad de filtrado a los 30 min.
- Q_t = cantidad de filtrado al tiempo t
- t = tiempo en minutos al final de la prueba

Todos los valores de pérdida de fluido calculados para 30 minutos deberán ser así anotados y no deberán ser interpretados como valores de pérdida de fluido ciertos.

c. Cédula empleada. Cuando la prueba de filtrado es conducida de acuerdo al párrafo F.2d, la cédula de tiempo de espesamiento empleada, debe registrarse.

PRUEBA A ALTA TEMPERATURA

Equipo

Precaución: Cuidadosamente observe las recomendaciones del fabricante sobre las limitaciones del volumen de muestra, la presión y la temperatura a emplearse en la prueba.

1	2	3	4	5
Temperatura ° C	Temperatura (° F)	Presión de vapor del agua psi	Presión de vapor del agua kPa	Coefficiente expansión vol. para agua a pres. sat.
100	212	14.7	100	1.04
121	250	30	210	1.06
149	300	67	460	1.09
177	350	135	930	1.12
204	400	247	1700	1.16
*232	450	422	2910	1.21
260	500	680	4690	1.27
288	550	1044	7200	1.36
316	600	1541	10,620	1.47

FIGURA 106. TABLA F1 PRESIÓN DE VAPOR Y VOLUMEN DE EXPANSIÓN DEL AGUA A TEMPERATURAS ENTRE 100 °C (212 °F) Y 316 °C (600 °F)

TIEMPO MIN	PRESION		TEMPERATURA	
	PSI	kPa	°F	°C
0	1500	10300	80	26.7
2	2200	15100	91	32.8
4	3000	20700	103	39.4
6	3700	25500	114	45.6
8	4400	30300	126	52.2
10	5100	35200	137	58.3
12	5900	40700	148	64.4
14	6600	45500	160	71.1
16	7300	50300	171	77.2
18	8000	55200	183	83.9
20	8800	60700	194	90.0

Precaución.- Para pruebas a alta temperatura y presión se deberán de tomarse medidas de seguridad adicionales. Sistemas presurizados y celdas receptoras de filtrado, deberán equiparse con válvulas de desfogues de seguridad. Las chaquetas de calentamiento deberán equiparse con termostatos de bloqueo automático. Presión de vapor en la fase líquida en ambos lodos a base agua y aceite, incrementan críticamente los factores de diseño a medida que la temperatura de prueba se eleva. Presión de vapor de agua a varias temperaturas se muestran en la Tabla F-1.

FIGURA 107. TABLA F-2 CÉDULA DE PRUEBA DE SIMULACIÓN DE POZO PARA PRUEBA DE FILTRADO ARRIBA DE 90 °C (194 °F) Y DEBAJO DE 121 °C (205 °F)

3.8 Tiempo de Espesamiento o Tiempo Bombeable. Consistómetro Presurizado (HP-HT)

Las pruebas de tiempo de espesamiento están diseñadas para determinar el tiempo en que una lechada de un cemento dado permanece en estado fluido bajo condiciones dadas de laboratorio, para servir así, como método de comparación entre varias composiciones de cementsos. En seguida se da una descripción de los métodos de prueba recomendados.

CONSISTÓMETRO PRESURIZADO

Equipo

- a Para la realización de la prueba de tiempo de espesamiento debe usarse un consistómetro presurizado. Este equipo consiste básicamente de una celda cilíndrica rotatoria para la lechada de cemento equipada con un ensamble de propela estacionaria, todo incluido en una cámara presurizada, capaz de resistir las presiones y temperaturas a que se hace referencia en esta sección. El espacio entre la celda de la lechada y las paredes de la cámara de presión debe llenarse completamente con un aceite derivado del petróleo con un punto de ignición que cumpla satisfactoriamente las normas de seguridad aplicables. El aceite seleccionado debe tener además las siguientes propiedades físicas:

Viscosidad = 49-350 SSU @ 100°F (7 - 75 centistokes)
 Calor específico = 0.28-0.32 Cal/g °C (0.5-0.58 Btu/lb °F)
 Conductividad térmica = 0.0196-0.0220 Cal/s-cm °C (0.0685-0.077 Btu/hr pie °F)
 Gravedad específica = 0.85 - 0.91 [kg/lit]



FIGURA 108. CONSISTÓMETRO PRESURIZADO HP-HT

El equipo debe tener una resistencia eléctrica capaz de elevar la temperatura de este baño de aceite a una velocidad de por lo menos 3°C (5°F) por minuto. Debe tener termocoples para determinar la temperatura del baño de aceite y también para la de la lechada de cemento*. La celda de la lechada gira con una velocidad de 150 +/-15 rpm. La consistencia de la lechada de cemento se indica por el valor de la deformación de un resorte en espiral que conecta la propela de agitación y una cabeza estacionaria. La propela de agitación y todas las partes metálicas de la celda expuestas a la lechada están hechas de aleaciones resistentes a la corrosión.

b. Cronómetro

2 Calibración. El mecanismo del potenciómetro y el circuito de medición del voltaje que indica la consistencia de la lechada deben calibrarse usando un dispositivo de calibración de potenciómetro del tipo de peso muerto. El dispositivo aplica un torque al resorte del potenciómetro, al usar el radio del bastidor del potenciómetro (generalmente de 52 mm) como brazo elevador. El potenciómetro debe calibrarse fuera de la cámara de presión, pero con conexiones eléctricas que se extiendan del calibrador a los 3 contactos del potenciómetro localizados fuera de la cámara de presión. El mecanismo del potenciómetro debe calibrarse con frecuencia y, debe calibrarse también si el resorte, o el brazo de contacto, o la resistencia son ajustados o reemplazados. El consistómetro debe calibrarse por lo menos una vez al año. Los termocoples y el pirómetro indicador deben calibrarse frecuentemente con un termómetro estándar de referencia u otro medio adecuado para asegurar precisión en la medición de la temperatura. Si la temperatura indicada por el pirómetro se desvía de la temperatura verdadera, deben hacerse ajustes ya sea del instrumento o de las temperaturas impuestas durante las pruebas de tiempo de espesamiento para compensar el error.

- a) El dispositivo de calibración de peso muerto a producido un juego de valores equivalentes de torsión para varios niveles de consistencia los cuales pueden definirse por la siguiente ecuación:

$$T = 78.2 + 20.02 Bc$$

donde:

T = torque, g. cm

Bc = Unidades Bearden de consistencia de la lechada.

La Tabla 8.1 muestra valores de torque equivalente y peso de varios niveles de consistencia de la lechada. La consistencia de lechada estará expresada en Unidades Bearden, Bc, donde 100 unidades Bearden son equivalentes a la deflexión del resorte observada con 2080 g-cm de torque cuando se usa el mecanismo de calibración de peso cargado.

- b) Un método alternativo para calibrar el mecanismo del potenciómetro es con el uso del aceite de calibración "Paratone", cuya relación viscosidad-temperatura se conoce en un intervalo de 5 a 100 unidades de consistencia. (El aceite "Paratone" debe desecharse después de ser usado, ya que puede contaminarse durante la prueba de calibración).



FIGURA 109. POTENCIÓMETRO, ACCESORIOS DE ENSAMBLE PARA ELABORAR LA CELDA PRESURIZADA

Procedimiento

3 Instrucciones de operación. Las instrucciones detalladas de operación proporcionadas por el fabricante, son aplicables bajo este método y deberán seguirse apropiadamente.

1	2	3
Torque Equivalente	Peso [gr]	Consistencia Bc de la lechada en unidades Bearden
260	50	9
520	100	22
780	150	35
1040	200	48
1300	250	61
1560	300	74
1820	350	87
2080	400	100

FIGURA 108. TABLA 8.1 TORQUE EQUIVALENTE VS CONSISTENCIA

Las unidades Bearden de consistencia son unidades adimensionales [Uc].

BC.- Unidades Bearden de consistencia obtenidas en un consistómetro presurizado, definidas según la sección 8 de la Spec 10 de API y calibradas según la misma sección.

ABc.-.Unidades Bearden de consistencia obtenidas en un consistómetro atmosférico, definidas según la sección 9 de la Spec 10 de API y calibradas según la misma sección.

La relación entre Bc y ABc es aproximadamente $Bc \times 0.69 = ABc$. Esta relación es válida únicamente para unidades de consistencia menores de 30 Bc, para un mecanismo de potenciómetro con un radio de 52 mm.

4 Llenado del equipo. La lechada (preparada de acuerdo a la sección 5) debe vaciarse rápidamente en la celda de la lechada en posición invertida. La lechada debe ser agitada ligeramente durante esta operación de llenado para evitar su segregación. Cuando la celda de la lechada está completamente llena, la base debe enroscarse con cuidado para asegurar que el aire sea excluido. El tornillo del centro debe entonces atornillarse fuertemente, colocarse la celda en la cámara de presión y la cámara llenarse con aceite. En seguida, el ensamble superior de cierre del equipo debe ponerse en su lugar, la celda de la lechada ponerse a girar y arrancar la bomba de presión del aceite. Con la bomba en operación, cualquier cantidad de aire en la parte superior de la cámara se purgará a través de la purga superior. La operación de llenado, colocación de la celda en la cámara de presión, cerrado y purgado de la cámara de presión y la

puesta en operación del equipo deberá completarse dentro de 5 minutos después de la terminación del periodo de mezcla de la lechada.

5 Procedimiento para el llenado de la celda de lechada desde la parte superior.- Un diafragma de hule plano es una alternativa aceptable para ensamblar el diafragma con el eje, mostrado en las figuras 3.8.6 y 3.8.7. La celda de la lechada debe colocarse en posición vertical sin la propela. La lechada (preparada de acuerdo a la Sección 5) debe vaciarse en la celda hasta 1.6 mm (1/16") abajo de la marca localizado en la parte inferior de las cuerdas. Debe instalarse entonces el ensamble de propela, consistente de la propela, anillo de soporte del diafragma, diafragma de hule y collarín superior del diafragma. La lechada debe salir ligeramente alrededor de los extremos del diafragma de hule. El anillo superior es entonces puesto en su lugar. Se coloca la celda en la cámara de presión. Continúe con el mismo procedimiento antes mencionado desde este punto.

6 Control de temperatura y presión. Durante el periodo de prueba, la temperatura de la lechada de cemento, determinada con el termocople en su posición en el centro de la celda, y la presión en ésta, deben incrementarse de acuerdo con las cédulas de especificación dadas aquí.

7 Cédulas de cementación para tuberías de revestimiento. Las cédulas de especificación de pruebas de cemento para pozos petroleros se dan en la figura 3.8.5 Tabla 8.2 (Cédulas 1, 4, 5, 6, 8 y 9). Las cédulas de especificación de prueba del cemento (figura 3.8.4 cédula 5) se basan en las densidades de lodos mostradas en la Tabla 8.2.

8 Intervalos de temperatura y presión. El tiempo de espesamiento para diferentes clases de cemento de pozos estará determinado en las siguientes especificaciones de prueba de los cementos:

- a) **Clases A, B y C.**- cedulas de especificación 1 y 4
- b) **Clase D.**-Cedulas 4 y 6 de cementación primaria
- c) **Clase E.**-Cedulas 6 y 8 de cementación primaria
- d) **Clase F.**-Cedulas 6 y 9 de cementación primaria
- e) **Clase G y H.**-Cedula 5 cementación primaria

9 Tiempo de espesamiento. El tiempo comprendido entre la aplicación inicial de presión y temperatura al equipo y la elevación de la consistencia a 100 Bc se reportará como el tiempo de espesamiento para el cemento en la cédula de especificación particular de la prueba. Para las cédulas que implican temperaturas de hasta 93°C (200 °F) o mayores, se permite parar la prueba a una consistencia de aproximadamente 70 Bc y extrapolar al valor de Bc graficando los resultados.

10 Registro de resultados. Los resultados de las pruebas de tiempo de espesamiento se registrarán en formas similares a aquella mostrada en la Tabla 8.2. Los resultados se reportarán en Bc para cada intervalo de tiempo.

11 Los requisitos de aceptación serán los mostrados en la figura 3.8.4 Tabla 5.4.

Tiempo min	Presión		Temperatura	
	psi	kPa	° C	(° F)
	1	2	3	
0	1000	6900	27	80
2	1300	9000	28	83
4	1600	11000	30	86
6	1900	13100	32	90
8	2200	15200	34	93
10	2500	17300	36	96
12	2800	19300	37	99
14	3100	21400	39	102
16	3400	23400	41	106
18	3700	25500	43	109
20	4000	27600	44	112
22	4300	29600	46	115
24	4600	31700	48	119
26	4900	33800	50	122
28 (PFP)	5260	35600 (TFP)	52	125

Los valores finales de presión y temperatura deberán mantenerse constantes hasta la terminación de la prueba, dentro de 1°C (2°F) y 100 psi (700 kPa), respectivamente.

PFP = Presión de fondo de pozo
TFP = Temperatura de fondo de pozo

FIGURA 110. CEDULA 5, PRUEBA DE ESPECIFICACIÓN PARA CEMENTOS CLASE H Y G

REQUERIMIENTOS DE ACEPTACIÓN			
Cemento Clase	Consistencia máxima	Tiempo de consistencia mínima (100 Bc) Minutos	Tiempo de consistencia máxima (100 Bc) Minutos
	período de agitación de 15-30 min. Bc		
G	30	90	120
H	30	90	120

FIGURA 111. TABLA 5.4, REQUERIMIENTOS DE ACEPTACIÓN DE LOS CEMENTOS CLASE G Y H

Cedula		Profundidad		Densidad del Lodo				Presión en Superficie		Temperatura de Circulación de Fondo		Presión de Fondo		Tiempo llegar a Fondo
No.	Pies	m	lb/gal	kg/L	lb/pie ²	Prot.	kPa/m	psi	kPa	°F	°C	psi	(kPa)	min
1	1000	(305)	10	(1.2)	74.8	519	(0.120)	500	3400	80	(27)	1020	7000	7
4	6000	(1830)	10	(1.2)	74.8	519	(0.120)	750	5200	113	(45)	3870	26700	20
5	8000	(2440)	10	(1.2)	74.8	519	(0.120)	1000	6900	125	(52)	5160	35600	28
6	10000	(3050)	12	(1.4)	89.8	623	(0.144)	1250	8600	144	(62)	7480	51600	36
8	14000	(4270)	16	(1.9)	119.7	831	(0.192)	1750	12100	206	(97)	13390	92300	52
9	16000	(4880)	17	(2.0)	127.2	883	(0.204)	2000	13800	248	(120)	16149	111300	60

¹La densidad del lodo se obtuvo de la revisión de datos de campo.

²La presión en la superficie se obtuvo de la revisión de datos de campo.

³La temperatura de circulación en el fondo pozo fue promediada de pruebas con datos reales de campo a varias profundidades.

⁴La presión de fondo del pozo fue calculada considerando la presión superficial, la densidad del lodo y la profundidad como se muestra en la tabla.

⁵El tiempo de llegada al fondo es basado sobre investigaciones de operaciones de campo y reflejando condiciones severas en el 75 % de los trabajos estudiados.

FIGURA 112. TABLA 8.2 BASES PARA LAS CELDAS DE PRUEBA PARA CEMENTACIÓN PRIMARIA

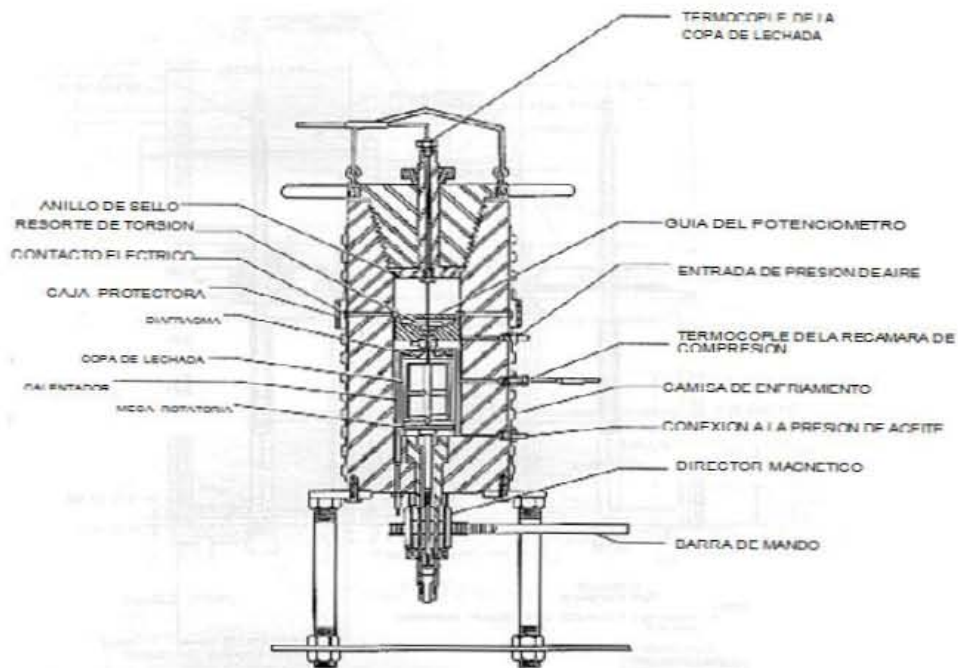
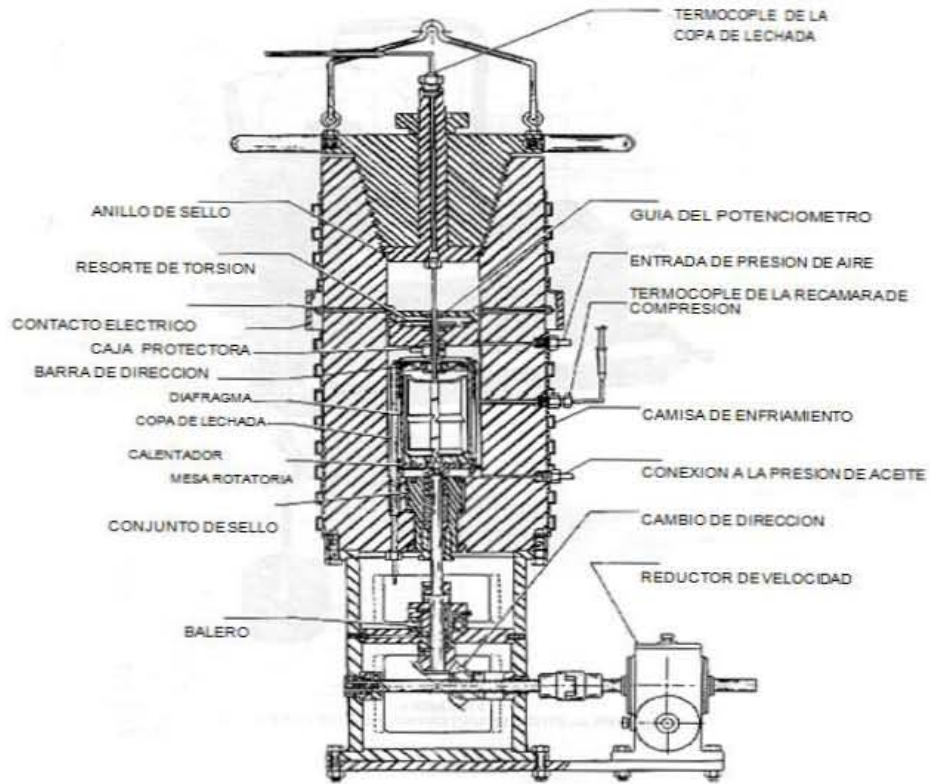


FIGURA 113. ESQUEMAS TÍPICOS DEL CONSISTÓMETRO PRESURIZADO HP-HT DE DIRECCIÓN MAGNÉTICA PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE ESPESAMIENTO

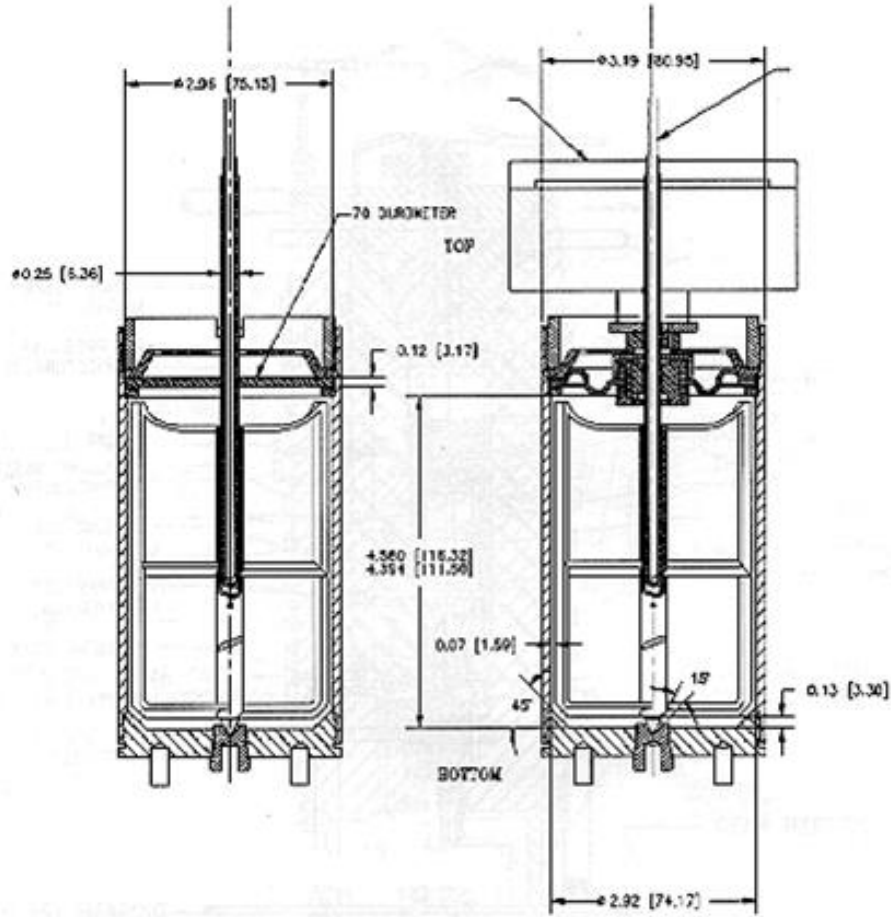


FIGURA 114. ENSAMBLE DE LA COPA CONTENEDORA DE LECHADA DEL CONSISTÓMETRO PRESURIZADO HP-HT

3.9 Esfuerzo compresivo.

Tamiz.- El tamiz será de 850 micrómetros (No. 20), de las Series " U.S. Standard Sieve ", que reúne los requerimientos del método ASTM-E 11: " Tamices de Tela Metálica para Propósitos de Prueba".

Moldes cúbicos de dos pulgadas y equipo para la prueba de resistencia a la compresión.- Los moldes y el equipo para la prueba de resistencia a la compresión, estarán sujetos a los requerimientos del método ASTM - C 109: " Resistencia a la Compresión de la Mezcla de Cemento Hidráulico ", excepto que el equipo de prueba debe ser de tipo hidráulico y que los moldes pueden separarse en más de dos partes. Los moldes se revisarán por la tolerancia y el equipo se calibrará, para ajustarlo dentro de +/- 1 % de los límites de la carga, al menos una vez cada dos años, o con mayor frecuencia si se tiene la sospecha de error. El equipo deberá trabajar con seguridad, si la carga indicada está dentro de la variación permisible.



FIGURA 115. MOLDES CÚBICOS PARA PRUEBA DE RESISTENCIA COMPRESIVA

Base y cubre placas.- Deberán usarse placas de vidrio o de metal no corrosivo, que tengan un espesor mínimo de 1/4 de pulgada (6 mm).



FIGURA 116. MOLDES CÚBICOS CON CUBRE PLACAS

Baño de Agua para Curado.- Deberá emplearse un baño de curado o tanque, que tenga las dimensiones recomendables para la inmersión completa de los moldes de la prueba de resistencia a la compresión en el agua, y que sea operable dentro de $\pm 1.7^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3^{\circ}\text{F}$) de las temperaturas de prueba descritas. Los dos tipos de baños de agua para curado son:

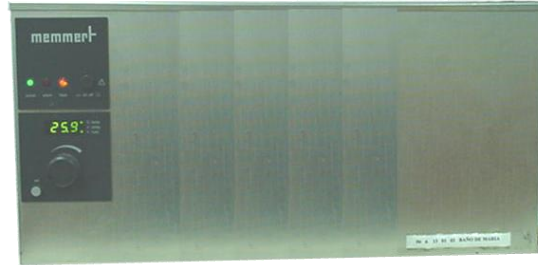


FIGURA 117. CAMARA DE BAÑO MARÍA

Presión Atmosférica.- Un equipo a presión atmosférica es utilizado para curar especímenes a temperaturas de 82°C (180°F) o menor, que tenga un sistema de agitación o circulación para asegurar una temperatura uniforme en el recipiente.

Presurizado.- Un equipo presurizado (figura 7.1), es recomendable para curar especímenes a temperaturas de 193°C (380°F) o mayores, y a presiones que puedan ser controladas a 3000 ± 50 psi ($20,700 \pm 345$ kPa). El equipo deberá tener suficiente capacidad de calentamiento, para incrementar la temperatura del agua contenida en él de manera uniforme, desde 27°C (80°F) hasta 174°C (340°F), en 75 minutos.

Baño de Enfriamiento.- Las dimensiones del baño deberán ser tales que, los especímenes puedan ser sumergidos completamente en agua a $27 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ($80 \pm 5^{\circ}\text{F}$)

Sistemas de Medición de Temperatura **.- El sistema de medición de temperatura se debe calibrar con una precisión de $\pm 1.7^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3^{\circ}\text{F}$). Esta calibración será tan frecuente, que el tiempo máximo entre una y otra no será mayor de un mes y deberá llevarse a cabo de acuerdo con el procedimiento descrito en el Apéndice A, Spec 10A.

- 1. Termómetro.-** Puede utilizarse un termómetro con una escala de -18 a 104°C (0 a 220°F), con divisiones mínimas, que no excedan 1°C (2°F). Este tipo puede emplearse en los recipientes de presión atmosférica.

2. **Pirómetro.-** Se utilizará un pirómetro con escala de -18 a 204 ° C (0 a 400 ° F), con divisiones mínimas, que no excedan 3 ° C (5 ° F), calibrado con precisión de ± 1 %. Este tipo se utilizará en recipientes presurizados.

3. **Termo coplee.-** Puede usarse un sistema de termocople con una escala apropiada.

Varilla Sedimentadora.- La varilla sedimentadora puede ser de vidrio o de metal anticorrosivo, de aproximadamente 8 pg (203 mm) de longitud por $1/4$ pg (6 mm) de diámetro.

Grasa o Sellante.- Cualquier grasa que posea las siguientes propiedades de resistencia a las temperaturas y presiones especificadas. La grasa deberá tener una consistencia que permita su fácil aplicación, buenas propiedades de adhesión para prevenir fugas, y ser resistente al agua. La grasa deberá ser anticorrosiva a temperaturas entre 27 a 204 ° C (80 a 400 ° F) figura 3.9.4.

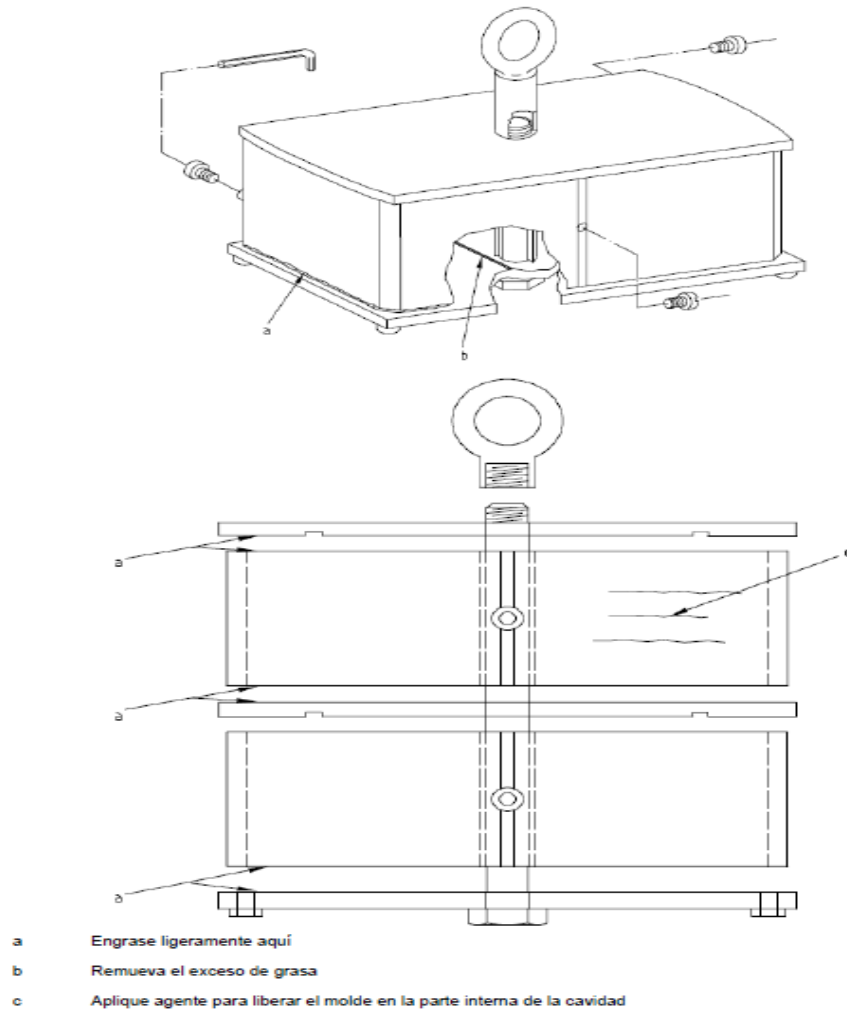


FIGURA 118. DIAGRAMA DE PREPARACIÓN DE MOLDES PARA FRAGUADO

Procedimiento

4.- Preparación de los Moldes.- Los moldes de los especímenes, usados en la prueba de resistencia a la compresión, se deben preparar de la siguiente manera:

El interior de las caras de los moldes, así como las superficies de contacto de las placas, se cubrirán ligeramente con grasa. Las superficies de contacto de las mitades de cada molde, también se cubrirán con grasa para hacer un sello hermético cuando se ensamblen. Una vez ensamblados los moldes, se removerá el exceso de grasa de las caras interiores, poniendo particular atención en las esquinas. Los moldes deben ser colocados sobre una placa ligeramente engrasada. Es necesario que la grasa se aplique a la línea de contacto exterior del molde y en la base de la placa.

5.- Preparación y Colocación de la Lechada.

- a. **Lechada.-** La lechada de cemento se preparará de acuerdo a la Sección 3.4 de este Capítulo III.
- b. **Colocación de la Lechada en los Moldes.-** La lechada se colocará en los moldes preparados, hasta la mitad de éstos y se golpeará ligeramente 25 veces por cada espécimen con la varilla sedimentadora. La lechada se colocará a todo lo largo y ancho de los moldes, antes de comenzar la operación de sedimentación. Después de la sedimentación, la lechada remanente se agitará manualmente, usando la varilla o una espátula, para eliminar la posible segregación de sólidos, los moldes se deben llenar hasta el rebose y se golpearan de la misma manera que se hizo en la primera capa. Después, el exceso de lechada se nivelará aún con la tapa del molde, usando una espátula. Los especímenes que muestren evidencia de fugas, se descartarán. Un cubre placa engrasado se colocará encima del molde. Para una determinación, se deberán emplear no menos de tres especímenes.
- c. **Tiempo Transcurrido desde el Mezclado hasta la Colocación en el Recipiente de Curado.-** Los especímenes se colocarán en el recipiente de curado, y se aplicará temperatura y/o presión, de acuerdo con la cédula de curado, 5 minutos +/- 15 segundos después del mezclado.



FIGURA 119. CÁMARA DE CURADO CON AUTOCLAVE, SISTEMA DE TEMPERATURA, Y MOLDES PARA FRAGUADO DE CEMENTO

6.- Períodos de Curado.

El período de curado es el tiempo transcurrido, desde que se somete el espécimen a temperatura en el recipiente de curado, hasta que se prueba por resistencia. Esta prueba se hará en el tiempo que se especifica en la tabla 4.1 +/- 15 minutos.

- a. Para especímenes curados a presión atmosférica, el período empieza cuando se colocan en el baño de curado, inmediatamente después que la lechada se vacía en los moldes. El período de curado termina cuando los especímenes se prueban por resistencia.
- b. Para especímenes curados a presiones arriba de la atmosférica, el período de curado empieza con la aplicación de presión y temperatura, las que se aplicarán inmediatamente después que los especímenes sean sellados en el recipiente de curado. El período de curado termina una vez que se realiza la prueba de resistencia.
- c. Los períodos de curado especificados para los especímenes son 8 y 24 horas.

Temperaturas y Presiones de Curado.

7.- Temperatura de Curado menor de 82 °C (180 °F) .- Para curado a presión atmosférica y temperaturas de 82 °C (180 °F) o menores, se recomienda una o más de las siguientes temperatura : 27 , 38, 49, 60, 71 y 82 °C (80, 100, 120, 140, 160 y 180 °F). Para curado a presiones por encima de la atmosférica y temperaturas de 77 °C (170 °F) o menores, se especifica en la cédula 4S figura 3.9.6



FIGURA 120. EQUIPO DE CÁMARA DE CURADO CONSISTÓMETRO HP-HT

8.- Temperatura de Curado mayor de 82 °C (180 °F) .- Para curados a temperaturas por arriba de 82 °C (180 °F) , se especifica una o más de las siguientes cédulas : 6S, 8S, 9S y 10 S (ver tabla 7.1).

8.1.- Curado a Presión Atmosférica.- Para curado a presión atmosférica los especímenes de prueba, inmediatamente después de colocarse en los moldes y cubrirlos, se sumergen en el baño de agua que es mantenida a la temperatura de curado.

- a. Cuando los especímenes se prueban a menos de 24 horas, se sacan del baño de curado aproximadamente **45 minutos** antes del tiempo en el cual se probarán, se sacan inmediatamente de sus moldes, y se colocan en un baño de agua que se mantiene a $27 \pm 3^\circ \text{C}$ ($80 \pm 5^\circ \text{F}$), por aproximadamente **35 minutos**.
- b. Cuando los especímenes se prueban a 24 horas o más, se sacan del baño de curado de 20 a 23 horas después del mezclado de la lechada. Se sacan de sus moldes y se regresan al baño de curado, donde permanecerán hasta aproximadamente 45 minutos antes del tiempo en que se probarán. En este momento se pasarán a un baño de agua manteniendo la temperatura de $27 \pm 3^\circ \text{C}$ ($80 \pm 5^\circ \text{F}$) por aproximadamente 35 minutos.

9.- Curado a Presiones mayor de la Atmosférica.- Para presiones de curado mayores que la atmosférica, los especímenes, inmediatamente después de amoldarse y cubrirse, se sumergirán en agua a $27 \pm 3^\circ \text{C}$ ($80 \pm 5^\circ \text{F}$), en el recipiente presurizado. La temperatura y la presión se aplicarán de acuerdo con la cédula apropiada como se recomienda en las partes 7.5 y 7.6 y en la tabla 7.2. La temperatura y presión máxima de la cédula, se mantendrán como se muestra en las notas 1 y 2 de la tabla 7.1, hasta 1 hora y 45 minutos antes del tiempo de prueba de los especímenes, en cuyo momento se interrumpirá el calentamiento. Durante los siguientes 60 minutos, la temperatura bajará a 93°C (200°F) o menos, sin que se libere más presión que la ocasionada por la contracción térmica. A 45 minutos antes de terminar la prueba, la presión remanente se liberará gradualmente (para evitar dañar los especímenes), y los especímenes se sacarán de los moldes, transfiriéndolos a un baño de agua, y manteniéndolos a 27°C (80°F) por aproximadamente 35 minutos.

Frotar cada espécimen hasta dejar la superficie seca, y remover cualquier material suelto en las caras que estarán en contacto con los porta cojinetes del equipo de prueba.

Aplicar la carga a las caras de los especímenes que estuvieron en contacto con las superficies planas del molde. Centrar el espécimen en el equipo de prueba abajo del cojinete superior. Antes de probar cada cubo, se asegurará que el asiento esférico de la base del equipo esté plano. Las superficies donde se aplicará la carga deberán estar limpias. No se deben utilizar amortiguadores o empaques. Deberán emplearse procedimientos de manipulación y seguridad apropiados en la prueba.

Aceptación del Especímen.- Los especímenes, que estén dañados se descartarán sin probarlos. Si se cuenta con menos de 2 especímenes para determinar la resistencia a la compresión a cualquier período dado, deberá comprobarse el resultado.

10.- Espécimen de prueba.- Los cubos o especímenes se probarán inmediatamente después de sacarlos del baño de enfriamiento. El procedimiento de prueba estará acorde con el método ASTM C 109 - 89 : Resistencia a la Compresión de Mezclas de Cemento Hidráulico, Secciones 10.6.2, 10.6.3, 11 y 12, excepto que :

- Se usará un equipo hidráulico y la velocidad de carga para especímenes de resistencia normal será de 4000 psi (16,000 lbf) (71.7 kN) por minuto. Para especímenes de baja resistencia, 500 psi (3.5 MPa) o menos, se usará una velocidad de 1000 psi (4000 lbf) (17.9 kN) por minuto. Cuando se aproxime la resistencia final, no se debe reajustar ningún control del equipo.
- Para el cálculo de la resistencia a la compresión, no se considerarán las variaciones del área transversal especificada (4 pg^2 (2580 mm²)), a menos que se reporten desviaciones de 1/16 pg (1.6 mm) o más de la dimensión lineal especificada de 2.00 pg. (50.8 mm). La resistencia a la compresión de todos los especímenes aceptables (ver ASTM C 109), hechos a partir de la misma muestra y probados en el mismo periodo se promediará y reportará con aproximación de 10 psi (0.1 MPa).

11.- Los requerimientos físicos para determinar la resistencia a la compresión se muestran en la tabla de especificaciones de procedimientos de prueba de curado de especímenes figura 3.9.6.

1	2	3	TEMPERATURA F(°C)									
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CEDULA	PRES. ft (m)	PRESION psi (kpa)	TIEMPO DE LA 1ra. APLICACION DE CALOR, PRESION: HORAS : MIN									
			0:30	0:45	1:00	1:15	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00
4S	6,000 (1830)	3000 (20700)	116 (47)	120 (49)	124 (51)	128 (53)	131 (55)	139 (59)	147 (64)	155 (68)	162 (72)	170 (77)
Programa 4S esta especificado para cementos clase D y E												
6S	10,000 (3050)	3000 (20700)	133 (56)	148 (64)	154 (68)	161 (72)	167 (75)	180 (82)	192 (89)	205 (96)	218 (103)	230 (110)
Programa 6S esta especificado para cementos clase D y F												
8S	14,000 (42700)	3000 (20700)	153 (67)	189 (87)	210 (99)	216 (103)	223 (106)	236 (113)	250 (121)	263 (128)	277 (136)	290 (143)
Programa 8S esta especificado para cementos clase E y J												
9S	16,000 (4880)	3000 (20700)	164 (73)	206 (97)	248 (120)	254 (123)	260 (127)	272 (133)	284 (140)	296 (147)	308 (153)	320 (160)
Programa 9S esta especificado para cemento clase F												
*La presión de prueba será aplicada tan pronto como los especímenes sean colocados en el recipiente de presión y mantenidos a la presión dada dentro de los sig. límites y para la duración del periodo de curado												
Cedulas 4S a la 10S. 3000 +/- 500 psi (20700) +/- 3400 kPa												
*La temperatura final columna 13 se mantendrá con +/- 3°F (+/- 2°C a través del periodo de curado												

CEMENTOS

TABLA 4.2

Cemento Clase	Cedula No.	Temperatura de Curado		Presión de Curado		Esfuerzo a la Compresión-psi (kPa)			
		F	(°C)	psi	(kPa)	Al tiempo de curado indicado		Verificados	
						Cada Hora		Horas	
A	--	100	(38)	Atmos.	--	250	(1.7)	1800	(12.4)
B	--	100	(38)	Atmos.	--	200	(1.4)	1500	(10.3)
C	--	100	(38)	Atmos.	--	300	(2.1)	2000	(13.8)
D	4S	170	(61)	3000	(20700)	--	--	1000	(6.9)
	6S	230	(87)	3000	(20700)	500	(3.5)	2000	(13.8)
E	4S	170	(61)	3000	(20700)	--	--	1000	(6.9)
	8S	290	(105)	3000	(20700)	500	(3.5)	2000	(13.8)
F	6S	230	(87)	3000	(20700)	--	--	1000	(6.9)
	9S	320	(117)	3000	(20700)	500	(3.5)	1000	(6.9)
G,H	--	100	(38)	Atmos.	--	300	(2.1)	--	--
	--	140	(50)	Atmos.	--	1500	(10.3)	--	--

FIGURA 121. TABLA DE ESPECIFICACIONES DE PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA DE CURADO DE ESPECÍMENES PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

3.10 DETERMINACION DEL CONTENIDO DE AGUA LIBRE DE LA LECHADA (Especificaciones de prueba)

Equipos.- Deberán ser usados para la determinación del contenido de agua libre el consistómetro de presión atmosférica o el consistómetro presurizado (efectuar a presión atmosférica).

Consistómetro Presurizado.- El consistómetro presurizado se describe y se ilustra en los capítulos anteriores a este tema.

Consistómetro de Presión Atmosférica.- El equipo consiste de una celda cilíndrica rotatoria para la lechada, equipada con un ensamble de propela estacionaria, dentro de un baño de temperatura controlada. La celda de la lechada es rotada a una velocidad de 150 +/- 15 rpm (2.5 +/- 0.25 rev/sec.). La propela y todas las partes de la celda de la lechada expuestas a la lechada, deben ser construidas de materiales resistentes a la corrosión.

Calibración.- El sensor y el controlador de temperatura deben ser calibrados a una exactitud de +/- 1.7 °C (+/- 3 °F). La calibración debe ser con una frecuencia mensual y debe ser realizada de acuerdo al procedimiento descrito en el Apéndice A, del Spec 10A

Sistema de Medición de Temperatura.- La temperatura especificada de prueba, debe ser determinada con el uso de un termopar especial tipo J, de acuerdo a la clasificación ASTM. La calibración del sistema de medición de temperatura debe realizarse cada mes y deberá estar de acuerdo al procedimiento descrito en el Apéndice A del Spec 10A, o de acuerdo con los procedimientos del fabricante los cuales cumplen o exceden estos requerimientos.

Controlador de Temperatura.- La calibración debe realizarse cada mes y deberá ser efectuada de acuerdo al procedimiento descrito en el Apéndice A² del Spec 10A.

Velocidad del Motor.- La rotación de la celda de la lechada, debe ser de 150 +/- 15 rpm (2.5 +/- 0.25 rev/sec) y debe ser verificada trimestralmente.

Reloj .- El Reloj (timer) debe ser verificado cada seis meses para su exactitud. Estos deben tener una exactitud de +/- 30 sec/hr.

Preparación del Equipo.

Limpieza.- Se debe tener cuidado para asegurar que todas las superficies con las que va a estar en contacto la lechada de cemento estén limpias.

Procedimiento.

- a. Prepare la lechada de acuerdo al procedimiento de la sección 5 y vacíe ésta dentro de la celda del consistómetro hasta el nivel de llenado más apropiado.
- b. Ensamble las partes asociadas a la celda de la lechada, coloque ésta dentro del consistómetro y encienda el motor de acuerdo a las instrucciones de operación del fabricante. El intervalo de tiempo entre la terminación de mezclado y el inicio de rotación del equipo no debe exceder a 1 minuto
- c. Agite para acondicionar la lechada a 27 ± 1.1 ° C (80 ± 2 ° F) por un periodo de 20 minutos \pm 30 segundos.
- d. Transfiera esencialmente toda la lechada de la celda del consistómetro al mezclador y agite por 30 segundos más del tiempo de acondicionamiento. Se debe tener cuidado para asegurar que cualquier sólido que haya sido separado durante el acondicionamiento sea transferido.
- e. Mezcle la lechada por un tiempo adicional de 35 ± 2 segundos a $12,000 \pm 500$ rpm (200 ± 8.3 rev/seg), en el equipo de mezclado.
- f. Transfiera la lechada en menos de 20 segundos a la línea de 250 ml + 0.2 ml de una probeta graduada de vidrio limpia y seca de 250 ml, entonces selle ésta para prevenir cualquier evaporación.



FIGURA 122. PROBETA DE 250 ml

- g. Coloque la probeta perpendicularmente sobre un nivel de superficie nominal y esencialmente libre de vibración. La temperatura a la cual la probeta graduada está expuesta, debe ser a 22.8 ± 1.1 ° C (73 ± 2 ° F). La porción de 0 - 250 ml de la probeta graduada, deberá ser no menor a 232 mm o mayor a 250 mm de longitud.



FIGURA 123. PROBETA DE 250 ml LIBRE DE CUALQUIER VIBRACIÓN.

- h. Remueva y mida con una exactitud de ± 0.1 ml, la cantidad de fluido desarrollado después de haber transcurrido 2 horas ± 5 minutos.
- i. Exprese el volumen en mililitros (ml) y designe éste como el contenido de agua libre.

Requerimientos de Aceptación.- Los cementos clases G y H, no deberán exceder de 3.5 ml o 1.4 % de agua libre.



FIGURA 124. PROBETA A 45° PARA PRUEBAS DE AGUA LIBRE EN POZOS DESVIADOS O INCLINADOS

Capítulo IV. LECHADAS ESPUMADAS

4.1 Definición de lechada espumada.

Una lechada espumada, es una mezcla de Lechada de cemento de tipo base, surfactante y estabilizador (Fase líquida continua) y nitrógeno o aire (fase de gas discontinua) que resulta en un sistema liviano de lechada homogéneo.

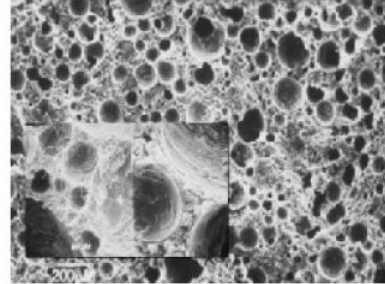


FIGURA 125. DEFINICIÓN Y MUESTRA DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO

4.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS LECHADAS ESPUMADAS.

- Primero que nada, la lechada de cemento espumado es un fluido compresible (contiene gas).
- La densidad variará debido a los cambios en presión y temperatura.
- La lechada estará sometida a diferentes cambios cuando la lechada espumada va al pozo y hacia arriba en el espacio anular.
- Las propiedades de la lechada de cemento espumado son difíciles de medir.
- Como el N₂ se considera inerte, todo el trabajo de laboratorio en sus pruebas típicas como lo son Diseño de Lechadas, Densidad, Esfuerzo Compresible, Tiempo bombeable, pérdida de fluido por filtrado, reologías, etc., será hecho en las lechadas de tipo base, pues al emplear nitrógeno éste se comporta de manera especial, para ello hay que conocer algunas propiedades de este elemento.
- Así también cabe señalar que el nitrógeno no influye en el tiempo bombeable de la lechada, como tampoco presenta incompatibilidad con otros aditivos.

4.3 Propiedades del Nitrógeno.

Símbolo Químico	N ₂
Punto de ebullición normal	- 320° F
Presión crítica	492.3 psi
Temperatura crítica	- 232.87° F
Punto Triple	- 345.9° F @ 1.82 psi
1 galón de N ₂ Líquido	= 93.12 SCF of gas

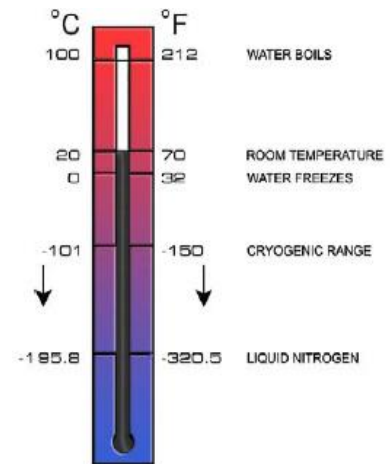


FIGURA 126. PROPIEDADES DEL NITROGENO (N₂)

4.4 ¿Pero, como se genera físicamente la espuma en las lechadas?

A continuación presento las prácticas recomendadas para la elaboración de Lechadas espumadas a condiciones atmosféricas.



FIGURA 127. TIPOS DE CEMENTO ESPUMADOS ELABORADOS EN LA PLANTA DE CEMENTACIÓN HALLIBURTON

4.5 Prácticas Recomendadas para la Preparación y Realización de Pruebas de Lechadas de Cemento Espumado a Presión Atmosférica.

4.5.1 Diseño de la Lechada.

La tecnología para la cementación de pozos profundos ha avanzado grandemente en años recientes. Condiciones operacionales calificadas como muy difíciles o imposibles de realizar, actualmente se practican con regularidad. En la actualidad se tienen muchos pozos con profundidades más allá de los 15, 000 pies, y temperaturas arriba de los 230 °F. A estos pozos siempre se les ha considerado como críticos. Los procedimientos básicos de cementación usados para pozos con alta temperatura y alta presión, son similares a los empleados para operaciones en pozos fríos o someros, pero los de alta presión y temperatura requieren gran énfasis en la elaboración de la lechada.

Cada pozo tiene ciertas características básicas que dictan los requerimientos de las propiedades de la lechada de cemento. Se debe de revisar cuidadosamente todas y cada una de las características del pozo resulta de esencial importancia, para diseñar una lechada efectiva. Una lechada de cemento deberá cumplir con algunas características como: ser económica, satisfacer los requerimientos del pozo, desarrollar y mantener las propiedades y características necesarias para aislar zonas, y soportar y proteger la tubería. Quien diseñe una lechada de cemento deberá saber combinar el resultado individual del examen de las variables de una cementación, para obtener una buena lechada.

Por ejemplo, para diseñar una lechada apropiada para un pozo con flujo de gas, el diseñador deberá entender perfectamente bien las consecuencias que causa el mecanismo que origina la pérdida de presión hidrostática en una columna de cemento.

En suma, ellos deberán:

1. Diseñar cuidadosamente para controlar la pérdida por filtrado, estabilidad del cemento y comportamiento de la precipitación.
2. Examinar las condiciones del fluido de perforación y del espaciador.

Esta sección examina los factores involucrados en el diseño de una lechada para pozos con alta presión y temperatura, a saber:

- Temperatura de fondo de pozo.
- Tiempo bombeable.
- Control de filtrado
- Esfuerzo compresivo.
- Viscosidad/suspensión.
- Teoría y control de la migración de gas.

Es muy importante antes de elaborar un diseño de Lechada, entender completamente las condiciones a las cuales las lechadas estarán sujetas, por ello comenzaremos con algunos conceptos básicos para posteriormente pasar al diseño de la densidad.

Temperatura BHCS y BHST

4.5.2 Temperatura de Fondo de Pozo.

Uno de los más importantes factores que controlan la reacción química y por ende los resultados de una mezcla de cemento, es la temperatura estática del fondo del pozo.

En la cementación de pozos petroleros, la lechada de cemento está sujeta a un progresivo incremento de temperatura, desde el momento mismo en que está siendo mezclada en la superficie y bombeada al pozo, hasta que el cemento se ha curado y la formación adyacente a la pared del pozo haya recuperado su última temperatura estática.

Ambas temperaturas, la estática y la circulante, afectan el diseño de cemento. La temperatura circulante se refiere a la temperatura que la lechada encuentra cuando está siendo bombeada dentro del pozo.

La temperatura circulante, se refiere al calor de formación que adquiere la lechada luego de ser detenido su bombeo durante un tiempo considerable.

Aunque la temperatura estática afecta las propiedades de curado del cemento, la temperatura de circulación también ha tenido una gran influencia.

4.5.3 Temperatura Circulante de Fondo.

La temperatura circulante de fondo (**BHCT**) es la temperatura que influye directamente sobre el tiempo de bombeabilidad de la lechada de cemento.

La BHCT es normalmente calculada de un archivo de cédulas de temperaturas publicadas por el API Specification 10.

Anexo

Recientemente, diferentes temperaturas submarinas han sido usadas en algunos pozos en los USA. Estos pozos han proveído información detallada no disponible cuando se desarrollaron las primeras correlaciones de temperaturas circulantes fueron desarrolladas.

Como resultado, el API ha usado este nuevo conjunto de datos para desarrollar una mejor correlación para calcular la BHCT. Diversas compañías han venido usando este método de cálculo alternativo, y actualmente está listado en el API RP 10B.

Es esencial estimar cuidadosamente la BHCT, el diseñador no deberá recurrir a las tablas del API únicamente cuando la profundidad del pozo es considerable. La temperatura circulante debe ser medida por alguno de los métodos actuales, preferentemente durante la fase de circulación.

4.5.4 Temperatura Estática de Fondo.

El conocimiento de la temperatura estática de fondo (**BHST**) es importante para poder evaluar la estabilidad de la resistencia compresiva desarrollada por la lechada de cemento. La determinación de la BHST es especialmente importante en pozos profundos donde la temperatura diferencial entre la cima y la base de la columna de cemento pueda ser alta.

Por ejemplo, la lechada de cemento que se ha diseñado para un tiempo seguro de colocación, puede ser sobre-retardada para la temperatura de la cima del cemento, dando como resultado un pobre desarrollo del esfuerzo compresivo.

Anexo

Generalmente si la temperatura estática en la cima de la columna de cemento excede la BHCT, la sobre-retardación no ocurrirá. Las lecturas precisas de temperatura son esenciales para propósitos de cementación.

Un error de tan sólo 5°F a 10°F puede afectar significativamente los resultados generados por los materiales elegidos para minimizar los efectos en la sensibilidad de la lechada. Las propiedades de algunos sistemas de cemento, y las condiciones en que ellos son aplicados, dictan la necesidad al diseñador, de conocer la temperatura estática de fondo.

Generalmente, el cemento es sensible a un incremento en la BHCT. Como una buena práctica, todas las pruebas de laboratorio instrumentadas para mejorar las propiedades de la lechada deberán ser corridas con el mismo lote de cemento, agua de mezcla, y aditivos químicos cementantes que serán usados en el trabajo. Las condiciones de fondo de pozo deberán ser reproducidas tan cerca como sea posible.

4.5.5 ¿Pero qué es el Cemento Espumado?

El cemento espumado es una mezcla de lechada de cemento, agentes espumantes y un gas. Cuando el proceso de mezcla es ejecutado apropiadamente, se forma una lechada extremadamente estable, de densidad baja, que parece crema de afeitarse gris.



FIGURA 128. CEMENTO ESPUMADO

Cuando las lechadas se mezclan y se le imparte suficiente energía de mezclado, contienen diminutas (frecuentemente microscópicas) burbujas que no coalescen o migran. Las burbujas formadas no están interconectadas, lo cual resulta en una matriz de cemento de baja densidad con baja permeabilidad y relativamente alta resistencia compresiva.

En cualquier trabajo normal de cemento espumado, el lodo y el enjarre deben ser removidos para mejorar la adherencia a la formación y a la tubería. El espumado de los espaciadores y lavadores pueden hacer más que simplemente disminuir las densidades; mediante la alteración de sus propiedades reológicas de éstos fluidos, la operación de espumado puede incrementar grandemente la efectividad de remoción de lodos.

Bajo circunstancias especiales, se puede utilizar aire comprimido en sustitución de nitrógeno para crear el cemento espumado.

Pero por lo general, debido al rango de presiones de trabajo, gastos, y volúmenes de gas involucrados en estas operaciones, el equipo de bombeo de nitrógeno proporciona un abastecimiento mucho más confiable, e indiscutiblemente será la fuente principal de abastecimiento de gas para las operaciones de cemento espumado.

Anexo

Históricamente, el uso inicial del cemento espumado era para disminuir la densidad de la lechada. Hay, sin embargo, otros usos y ventajas que imparte la estructura de la espuma por sí sola.

Una lechada de cemento de 15 lb/gal (1.80 g/cc) puede ser espumada a 4 lb/gal (0.48 gr/cc), pero tal cambio, además de ser drástico, no es por lo general siempre necesario. Por ejemplo, una lechada de 21 lb/gal (2.04 g/cc) puede ser espumada a 14 lb/gal (1.68 g/cc) y constituye una alternativa viable para utilizar en lugar de otros productos en un intento para prevenir la migración de gas.

¿Y cómo se le conoce a este proceso de elaboración de Lechadas espumadas?

Se le conoce con el nombre de Proceso "Zone Seal"



FIGURA 129. CEMENTO ESPUMADO PROCESO ZONE SEALANT, IMAGEN CORTESIA HALLIBURTON

4.5.6 PROCESO ZONE SEAL: "CEMENTO ESPUMADO"

El cemento espumado nos brinda una mejor alternativa de colocar correctamente el cemento en el espacio anular debido a su mayor y mejor eficiencia de desplazamiento que una lechada convencional. Puede mejorar grandemente las posibilidades de éxito mediante el desplazamiento de los lodos en el espacio anular.

También, cuando se logra una capa completa de cemento espumado en el anular se están previniendo los daños a la tubería debido a efectos de compresión a causa de la ductilidad del cemento.

El cemento espumado puede proporcionarnos una mejor oportunidad de alcanzar la cima deseada de cemento ya que podemos realizar cambios de densidad antes o durante el trabajo.

Esto llega a simplificar los materiales utilizados para el diseño de cemento ya que se usa un solo fluido base con la posibilidad de desarrollar múltiples densidades.

También, la habilidad de mantener la circulación a través de todas las operaciones de cementación puede afectar positivamente el éxito del trabajo.

La flexibilidad en las densidades ayuda a reducir las posibilidades de crear una invasión de agua somera posterior a la operación, por medio de que nos permite alcanzar cimas de cemento que de otro modo no se podría.

La alta resistencia a la compresión temprana, desarrollada por el cemento espumado, comparada con un cemento con altas proporciones de agua puede significar la diferencia entre tener suficiente resistencia compresiva en 48 hrs para continuar la perforación o el tener que esperar el fraguado.

Anexo

Los surfactantes que se añaden a la lechada base ayudan a mejorar la adherencia del cemento a la tubería y a la formación, porque reduce la tensión superficial de la fase, líquida del lodo. Esto contribuye la posibilidad de crear un microanulo que es intratable.

Los surfactantes también contribuyen a reducir la pérdida de filtrado de la lechada base.

La característica de dos fases del cemento espumado lo hace ideal para cementar por encima y a través de zonas caóticas ya que en estas áreas pueden tener lugar invasiones de agua.

El cemento espumado ayuda a mantener la presión hidrostática y garantiza el llenado del espacio anular por las propiedades expansibles y mantener la altura y el llenado a fin de mantener la hidrostática.

La lechada espumada tendrá virtualmente cero agua libre y una baja pérdida de filtrado.

En resumen Zone Seal ofrece:

1. Mejor eficiencia de desplazamiento y Flexibilidad en la densidad.
2. Menos posibilidad de daños a la tubería
3. Sistema Simplificado de materiales para Cemento.
4. Adherencia de cemento mejorada tanto a la formación como a la tubería.
5. Mayor oportunidad de obtener una buena prueba de presión en la zapata en el primer intento.
6. Reduce la posibilidad de tener invasiones de agua u otros fluidos posteriores a la cementación.
7. Cero agua libre y baja perdida de filtrado.

4.5.7 ¿Cómo se hace el cemento espumado en Campo?

Para un trabajo de cemento espumado, la lechada de cemento se mezcla de forma normal en un RCM (Recirculating Cement Mixer). A medida que la lechada es bombeada hacia el pozo, son inyectados proporcionalmente un agente espumante y un agente estabilizador en la parte de la succión de las bombas HT 400.

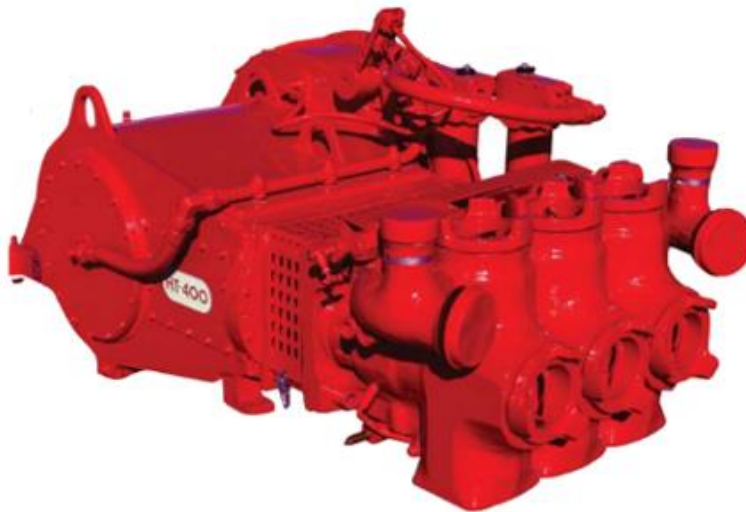


FIGURA 130. BOMBA HT-400 HALLIBURTON

Cuando ésta mezcla está siendo bombeada a través de la líneas de descarga, el nitrógeno se inyecta a alta presión a través de un estrangulador en una unión (foam generator) proporcionando suficiente energía de mezclado a la lechada y creando asimismo una espuma estable.

Los gastos de bombeo de las tres corrientes: lechada, espumante y nitrógeno se monitorean continuamente y son controladas para asegurar las proporciones correctas.

¿Cuáles espumantes?

En esta parte del tipo de espumantes, emplearemos los aditivos espumantes de la empresa Halliburton siendo los más comunes para la espumación de lechadas Zone Sealant 2000 y Zone Sealant 4000 que son agentes tensioactivos para la mezcla en una lechada de cemento y funcionan como Estabilizadores de la Espumación.



FIGURA 131. ADITIVO ZONE SEALANT 2000 (ESPUMANTE)

Anexo

Se utiliza asimismo un programa de volúmenes y gastos de bombeo generado por computadora que ayuda a mantener las densidades apropiadas a medida que el trabajo progresa.

Cuando se ha determinado el uso de una lechada espumada, los demás aditivos para la lechada base deben ser cuidadosamente seleccionados.

4.5.8 ¿Dónde y por qué se utiliza el cemento espumado?

Virtualmente casi cada oportunidad de trabajo de cementación en la vida de un pozo es considerada como candidato para aplicar la técnica de cemento espumado.

Esta técnica se aplica para reforzar las funciones de cementaciones remédiales en pozos en tierra y offshore (en alta mar o marino), así como pozos verticales o pozos horizontales.

Mientras que el diseño y la ejecución del trabajo encierran más complejidad que cualquier trabajo convencional, el cemento espumado cuenta con innumerables ventajas que pueden superar las preocupaciones de la creciente complejidad en cuanto a instalación de equipo.

La técnica de espumado no se limita únicamente a las lechadas de cemento. La siguiente es una lista de ventajas de ésta técnica para aplicarse en operaciones de cementación.

4.5.9 Cementos Ligeros

Un cemento espumado estable puede ser llevado a valores de densidad tan bajos como 0.48 g/cc o 4 lb/gal.

Durante la cementación primaria, el cemento espumado puede prevenir debilitaciones en la formación, pérdidas de circulación y otras fallas del cemento post-trabajo. En la mayoría de los casos, el uso del cemento espumado elimina la necesidad de herramientas multi-etapa.

La técnica de espumar los lodos o los espaciadores o lavadores ya sea por delante o por detrás del cemento ofrece opciones que no están disponibles con técnicas de no-espumado.

La capacidad del cemento espumado para obtener lechadas extremadamente ultraligeras es especialmente útil para taponos de pérdida de circulación donde ninguna otra técnica puede utilizarse.

4.5.10 Sistemas de Espaciadores.

Uno de los factores clave en la obtención de un trabajo exitoso de cementación primaria, es minimizar la contaminación de la lechada de cemento con el fluido de perforación.

El fluido de perforación deberá ser completamente desplazado del anular para conseguir que el cemento haga un efectivo sello hidráulico.

Una remoción pobre en el anular, generará entre otras cosas: una mala adherencia del cemento hacia la formación y el tubo, canalización, corrosión y colapso de la tubería (Figura 11.5). En pozos con alta temperatura y presión, estos factores se hacen más críticos. Un sistema adecuado de espaciadores, puede ayudarnos a efectuar un trabajo de cementación de calidad.

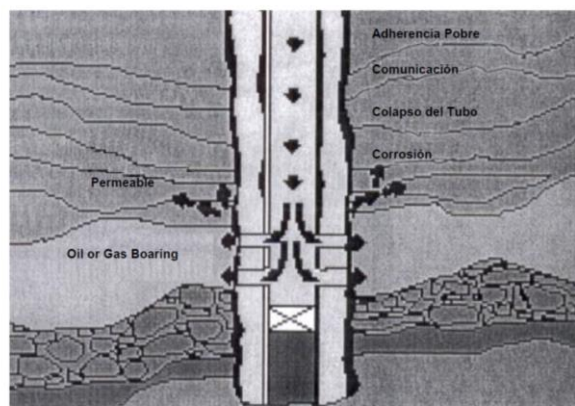


FIGURA 132. PROBLEMAS QUE SE PUEDEN ORIGINAR POR UNA INADECUADA REMOCIÓN DE LODO EN EL ANULAR

Un buen espaciador debe poseer las siguientes características:

- Separar fluidos.
- Remover el fluido de perforación y el exceso de enjarre sobre la formación y tubo.
- Proteger la formación.
- Controlar la presión de formación.
- Remover películas de aceite.
- Inhibir el daño hacia arcillas sensibles al agua.
- No afectar adversamente las propiedades de la lechada y/o fluido de perforación

Otros tópicos que deben ser considerados cuando se selecciona un sistema espaciador.

Esta sección examina los siguientes tópicos:

- Compatibilidad de fluidos
- Tipos de espaciadores y lavadores
- Tiempo de contacto y volumen de espaciador
- Aditivos adicionales
- Control de pérdida por filtrado

Esta sección también presenta algunas investigaciones sobre espaciadores dos sistemas son comúnmente usados- y sobre el uso de surfactantes y fluidos reactivos en pozos con alta temperatura y alta presión.

4.5.11 Compatibilidad de Fluidos

La incompatibilidad interfacial se refiere a la formación de una mezcla no homogénea, inestable o in-bombeable que se genera entre el fluido de perforación y la lechada, fluido de perforación y espaciador, espaciador y cemento, o fluido de perforación-lechada-espaciador.

La incompatibilidad también se refiere al efecto adverso sobre las propiedades de los fluidos de perforación o del cemento cuando se contaminan con fluido espaciador. Mezclas incompatibles entre fluidos de perforación y espaciadores, o espaciadores y lechada de cemento pueden comprometer el éxito de una operación de cementación.

Un problema de incompatibilidad dará como resultado un desplazamiento incompleto del fluido de perforación (columna de cemento acanalada) cemento no fraguado, fraguado prematuro de la lechada. El uso de un espaciador apropiado eliminará potencialmente tales problemas.

4.5.12 Tipos de Espaciadores.

Los espaciadores pueden ser separados en dos categorías. La mayoría son base agua, mientras unos pocos son base aceite. Ambos sistemas tienen ventajas y desventajas.

Tuned Spacer E.

Espaciador base agua, compuesto por una mezcla de agentes gelificantes y dispersantes. Todos los componentes son amigables con el medio ambiente y se puede preparar con agua dulce, de mar y salada al 18% de NaCl o más, y en un rango de densidades de 1.20 a 2.40 gr/cc. Para mejorar la capacidad de mojabilidad del espaciador, se puede adicionar uno o varios de los siguientes surfactantes: SEM-7, Pen 5M, Musol. También se le puede adicionar retardador de fraguado, tiene una excelente estabilidad hasta los 310 °F.

Todos los espaciadores convencionales afectan el tiempo bombeable y resistencia compresiva de la lechada; el Tuned Spacer E, no. El efecto sobre ambos parámetros es insignificante. La formulación típica del espaciador es: agua, Tuned Spacer E, Barita.

De acuerdo a los resultados de la prueba de mojabilidad, se define el tipo y concentración de surfactante a utilizar.

4.6 ¿Y qué características nos provee o proporciona un cemento espumado?

4.6.1 Provee una Excelente Proporción Resistencia Compresiva-Densidad

Las lechadas de cemento puro espumado son usualmente más resistentes si contienen menos agua.

Siendo el nitrógeno un gas inerte y empleándolo como material de llenado, las lechadas con densidad aún bajas pueden poseer un alto contenido de sólidos, y esto colabora grandemente para incrementar relativamente la resistencia compresiva.

4.6.2 Ductilidad

El cemento espumado es muy resistente a condiciones de debilitamiento causado por los disparos de producción. Las burbujas formadas tienden a distribuir más uniformemente las tensiones.

A medida que las tensiones son transferidas internamente, las burbujas permiten a la fase sólida deformarse ligeramente sin rompimientos mecánicos en las adhesiones intergranulares.

Por la misma razón, el cemento espumado ya fraguado es más resistente a fallas debidas a ciclos de cargas mecánicas y térmicas.

4.6.3 Mejora y Promueve la Remoción de Lodo

El espumado de espaciadores, pre-lavadores y cementos puede mejorar la eficiencia de las técnicas de desplazamiento.

La alta viscosidad aparente de éstos fluidos espumados promueve una mejor transferencia de energía a la baja movilidad de los lodos de perforación y los enjarres, resultando esto en una mejor remoción y en una habilidad mejorada para la suspensión y levantamiento de sólidos.

El movimiento de la tubería mientras ocurre el acondicionamiento del lodo siempre es muy recomendado.

Pero en algunos casos, el movimiento de la tubería durante una cementación espumada no es necesario o deseable.

4.6.4 Expandible

El cemento espumado se expande con la finalidad de llenar secciones derrumbadas, lavadas y zonas de pérdidas de circulación severas, sin rompimiento de la formación.

4.6.5 Prevención de la Migración de Gas

Ayuda a Prevenir La Migración de Gas. Las burbujas de gas comprimidas dentro del cemento espumado mantienen la presión y ayudan a prevenir una contracción de la columna, mientras el cemento inicia su etapa de hidratación, éste hecho resulta clave para prevenir la migración de gas.

A diferencia del gas que se libera en los cementos con Súper CBL o Gas Check, el nitrógeno es completamente inerte y no es inflamable.

4.6.6 Mejora la Aislación Zonal

Las propiedades de aislamiento zonal del cemento espumado se incrementan grandemente con las propiedades de eficiencia de remoción de lodos, de expansión y de presión sostenida en etapas de hidratación.

Esto incrementa las capacidades de aislamiento zonal a largo plazo. Estudios preliminares indican que los surfactantes con propiedades altas de mojabilidad acuosa, utilizados en los cementos espumados colaboran también a mejorar la adherencia del cemento tanto a la formación como a la tubería.

4.6.7 Imparte Mejor Control en Pérdidas de Fluido

La naturaleza estable de dos fases de los espaciadores espumados, lavadores y cementos resiste grandemente las pérdidas de filtrado a la formación. La pérdida de agua reducida de los materiales espumados protege las zonas sensitivas a influjos de agua, tales como arcillas y formaciones salinas.

4.6.8 Aislamiento

A causa de que el cemento espumado genera burbujas de gas estables, el cemento espumado tiene una conductividad térmica relativamente baja, lo cual minimiza pérdidas de calor innecesarias para aplicaciones de inyección de vapor. Durante la etapa de producción, la baja transferencia de calor puede ayudar a prevenir la deposición de parafinas mediante la minimización del enfriamiento del aceite que se produce a medida que éste se aproxima a la superficie.

4.6.9 Estable a Altas Temperaturas

El cemento espumado apropiadamente creado es estable y ha sido usado hasta 60°F. La arena sílica se requiere aún para temperaturas por encima de 23 °F, para ayudar a prevenir la retrogresión de la resistencia del cemento. La ductilidad impartida por el cemento espumado provee alta resistencia a fallas de ciclos térmicos, y particularmente aplicable en situaciones de alta temperatura.

4.6.10 Compatible con Cementos Diferentes al Portland

El proceso de espumado puede ser utilizado con cementos puzolánicos (fly-ash, slag), Lumnita (cementos Fondue), Ultrafinos, Calseal u otros materiales comunes.

4.6.11 Simplifica la Logística de Mezclado

Particularmente para operaciones de offshore, disminuye la necesidad de mezclas o diseños de lechada muy elaborados. Se pueden utilizar cementos no ordinarios para cumplir con una amplia variedad de aplicaciones.

4.6.12 Rendimiento de Volumen

El nitrógeno utilizado como material de llenado, es relativamente barato, especialmente en trabajos donde se requieren grandes volúmenes de cemento. El nitrógeno actúa como un aditivo extendedor de lechada, que económicamente incrementa el rendimiento de la lechada.

4.6.13 El Proceso de espumado no está limitado solo a las lechadas de cemento

La técnica de espumado puede ser aplicada a la mayoría de los lodos base aceite, espaciadores y pre-lavadores, cuando la calidad de aligeramiento de la espuma puede aportar ventajas. La mayoría de los espaciadores y lavadores base agua pueden espumarse usando surfactantes normales. Existen también tecnologías para espumar sistemas resinosos y poliméricos.

4.6.14 Baja Permeabilidad

Cuando se ejecuta correctamente, el espumado de cemento produce burbujas de nitrógeno en la matriz de cemento que no coalescen ni migran. Como resultado, la permeabilidad del cemento espumado fraguado que es apropiadamente creado puede ser relativamente bajo comparado a otros sistemas de aligeramiento de densidad en lechadas de cemento.

4.6.15 Estable a Invasiones de Fluido

Cuando se encuentra en la etapa de hidratación, la combinación de la presión mantenida en vía, las burbujas de gas y la viscosidad de la lechada convierten al cemento espumado en una fase bastante estable.

Debido a esto, el cemento espumado no es frecuentemente lavado como una lechada convencional lo sería cuando se encuentra con un flujo de agua intrusivo.

4.6.16 Sinergia en Operaciones de Mezclado.

Con algunos aditivos, el espumado crea un efecto de sinergia que mejora y promueve las propiedades del aditivo. Este efecto resulta evidente con algunos aditivos de pérdida de circulación, materiales contra pérdida de circulación o látex.

En casos de formaciones débiles en las que pueden presentarse problemas de fractura o pérdida de circulación, el cemento espumado es una muy buena alternativa para ejecutar los trabajos de cementación.

El éxito de un cemento espumado en una operación deriva del hecho de mantener la presión hidrostática de la columna de la lechada en un valor lo suficientemente por debajo de la presión de rompimiento de la formación.

4.7 Cálculo de la composición de una lechada de cemento base con o sin surfactante (tensoactivo).

La lechada de cemento base final o que se va a utilizar en última instancia para preparar una lechada de cemento espumado debe contener tensoactivo (s) o surfactante (s), que no puede ser añadido a la lechada de cemento tipo base en la mezcla inicial.

En las siguientes fotografías se muestra respectivamente los procedimientos de selección de los materiales para la realización de la lechada base a espumar.

Lab	Material	Test Amount
	Cement Blend	332.82
(MX-REF)	> Apasco CAD	99.85 g
(MX-REF)	> Apasco Class H (3.17 SG)	232.97 g
(MX-REF)	SSA-1 (Silica Flour) - PB	106.5 g
(MX-REF)	Microsilica A	9.98 g
(MX-REF)	Suspend HT (PB)	0.5 g
(MX-REF)	HGS 5000 (PB)	73.22 g
(MX-REF)	SCR-500L	8 g
(MX-REF)	ZoneSealant 2000	4.58 g
(MX-REF)	Fresh Water	248.99 g



FIGURA 133. CANTIDADES DE MATERIALES ADITIVOS NECESARIOS PARA UN DISEÑO DE LECHADA

El pesado de cada uno de los aditivos necesarios para la elaboración de la lechada sin el surfactante (s) o tensoactivo (s) contenido en las jeringas.



FIGURA 134. PESADO DEL CEMENTO Y DE LOS AGENTES ESPUMANTES

Material	Concentration	Test Amount
Cement Blend	100.000 % BWOB	332.815 g
> Apasco CAD (MX-REF)	30.000 % BWOB	99.845 g
> Apasco Class H (3.17 SG) (MX-REF)	70.000 % BWOB	232.971 g
SSA-1 (Silica Flour) - PB (MX-REF) Mexico, Reforma	32.000 % BWOC	106.501 g
Microsilica A (MX-REF) Mexico, Reforma	3.000 % BWOC	9.984 g
Suspend HT (PB) (MX-REF) Mexico, Reforma	.150 % BWOC	.499 g
HGS 5000 (PB) (MX-REF) Mexico, Reforma	22.000 % BWOC	73.219 g
SCR-500L (MX-REF) Mexico, Reforma	2.200 L/100kg	7.996 g
ZoneSealant 2000 (MX-REF) Mexico, Reforma	1.380 L/100kg	4.584 g
Fresh Water (MX-REF) Mexico, Reforma	74.960 L/100kg	248.985 g

FIGURA 135. PESO CORRECTO Y VALIDADO POR MEDIO DE UN SOFTWARE

El proceso de mezclado sugerido por el API de los cuales se requiere de 1min para la elaboración de una muestra de lechada, de los cuales 15seg para verter el cemento con los aditivos en el vaso de mezclado con el agua de mezcla a 4,000 rev/min y 35seg a 12,000 rev/min para el mezclado de los componentes.

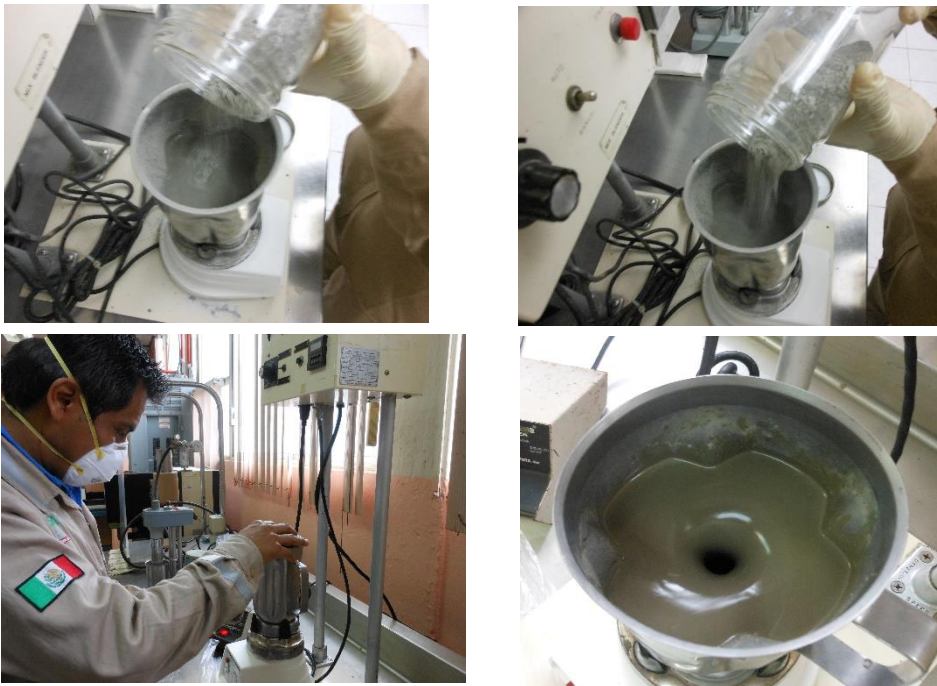


FIGURA 136. PROCESO DE MEZCLADO DEL CEMENTO CON LOS ADITIVOS EN LA MEZCLADORA CHANDLER

Cuidando que nuestro vórtice de mezclado sea el más óptimo para que nuestra lechada de diseño adquiera sus propiedades de mezclado correcto.

MIXABILITY STANDARD CHART		
	Vortice Largo, sobre 1/4 de tamaño o mas, mezcla homogénea.	Mixability 5
	Vortice del tamaño de una moneda (\$10) o mas, separación visible, buen mezclado.	Mixability 4
	Vortice pequeño del tamaño de una moneda de (\$5), es necesario adicionar comentarios en Viking y comunicar al ingeniero.	Mixability 3
	Vortice pequeño tamaño de un plumon, con mezclabilidad de 2 o menos requiere comunicación con el ingeniero.	Mixability 2
	No hay vortice, poca o ninguna mezclabilidad, puede agregarse el cemento y quedar suspendido en la parte superior o alta y no se mezcla.	Mixability 1

FIGURA 137. CARACTERÍSTICAS DEL MEZCLADO POR MEDIO DEL VORTICE GENERADO EN EL MIXER

Esto requiere el cálculo del porcentaje de masa relativa (fracción de masa) del tensioactivo o surfactante (s) contenido (s) en la lechada de cemento espumado. Esto se hace tomando la masa total del tensioactivo (s) y dividiendo este por la masa total de la lechada de cemento base. (Para estos cálculos, los aditivos son considerados aquellos materiales que se añaden al cemento y que no dan lugar a la formación de espuma del sistema).



FIGURA 138. ADITIVO ZONE SEALANT 2000, AGENTE TENSOACTIVO SURFACTANTE O ESPUMANTE

La fracción de masa (porcentaje) de agente tensioactivo o surfactante (s) puede ser calculado por la ecuación1:

$$ws = \left[\frac{ms}{mc + ma + ms + mv} \right] \times 100$$

De donde:

ws = es la fracción de masa de agente tensioactivo (s), expresado como un porcentaje;

ms = es la masa de agente tensioactivo (s), expresado en gramos;

mc = es la masa de cemento, expresado en gramos;

ma = es la masa de aditivo (s), expresado en gramos;

mw = es la masa de agua, expresada en gramos.

Si se desea, la densidad de la lechada de cemento base sin tensioactivo o surfactante (ρ_{bwos}) se puede calcular, en gramos por metro cúbico de la siguiente manera por la ecuación2:

$$\rho_{bwos} = \frac{mc + ma + mw}{vc + va + vw}$$

De donde:

mc = es la masa de cemento, expresado en gramos;

ma = es la masa de aditivo (s), expresado en gramos;

mw = es la masa de agua, expresada en gramos;

Vc = es el volumen absoluto del cemento, expresada en centímetros cúbicos;

Va = es el volumen absoluto de aditivo (s), expresado en centímetros cúbicos;

Vw = es el volumen de agua, expresada en centímetros cúbicos.

4.8 Determinación del volumen de lechada base y de su masa, sin espumar.

Volumen de Lechada.

Determine el volumen de la lechada de cemento base sin espumar que vaya utilizar. El volumen total de la lechada de cemento base sin espumar se debe de incluir en el volumen de tensioactivo o surfactante (s) que se añaden o agrega a la lechada de cemento base.



FIGURA 139. DETERMINACIÓN DE LA LECHADA DE DISEÑO ANTES DE SER ESPUMADA

Los tensioactivos son añadidos después de la mezcla inicial de la lechada de cemento base, mientras que el volumen de la lechada de cemento base sin espumar y sin tensioactivos que vaya a ser colocado (s) en el recipiente de mezcla se puede calcular por uno de los dos métodos:

- a) Método I. Cuando se conoce el contenido de gas.
- b) Método II. Cuando se conoce la densidad de la lechada de cemento espumado

4.8.1 Determinación del volumen de lechada y de su masa cuando se conoce el contenido de gas.

Método I. Cuando se conoce el contenido de gas.

Cuando se busque que una lechada o lechada (s) se espume (en) con una fracción de volumen específico de gas por volumen de la lechada (s) (la calidad de la espuma), la densidad resultante de la lechada de cemento espumado debe ser determinada.



FIGURA 140. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LECHADA Y DE SU MASA CUANDO SE CONOCE EL CONTENIDO DE GAS

Esta puede ser calculada de la siguiente manera por la ecuación 3:

$$\rho_{fs} = \left(\frac{100 - \phi g}{100} \right) (\rho_{ufss})$$

De donde:

ρ_{fs} = es la densidad de la lechada de cemento espumado, expresada en kilogramos por metro cúbico (libra-masa por galón);

ϕg = es la fracción de volumen de gas contenido en la lechada de cemento, expresado como un porcentaje;

ρ_{ufss} = es la densidad de la lechada de cemento base sin espumar con surfactante o tensioactivo (s), expresado en kilogramos por metro cúbico (libra-masa por galón).

4.8.2 Determinación del volumen de lechada y de su masa cuando se conoce la densidad de la lechada de cemento espumado.

Método II. Cuando se conoce la densidad de la lechada de cemento espumado

Cuando la densidad deseada de la espuma de lechada de cemento se conoce [o después de calcularla con la ecuación (3)], se determinará la masa en gramos de la lechada de cemento incluyendo tensioactivo (s) para ser colocado en el recipiente de mezcla para preparar la lechada de cemento espumado.



FIGURA 141. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LECHADA Y DE SU MASA CUANDO SE CONOCE LA DENSIDAD DE LECHADA ESPUMADA

La masa de lechada de cemento sin espumar base con tensioactivo (s) puede ser calculado por la ecuación4:

$$m_{ufss} = (V_{mc})(\rho_{fs})$$

De donde:

m_{ufss} = es la masa de lechada de cemento base sin espumar con tensioactivo (s) para ser colocado en la mezcla del recipiente, expresado en gramos;

V_{mc} = es el volumen del recipiente de la mezcla, expresado en centímetros cúbicos;

ρ_{fs} = es la densidad deseada de la lechada de cemento espumado, expresada en gramos por centímetro cúbico.

4.9 Masa del surfactante o Tensioactivo (s) y de la lechada.

Las masas del (los) tensioactivo (s) o surfactante (s) y de la lechada de cemento base sin -espumar requeridas o necesarias para realizar las pruebas se pueden calcular usando las ecuaciones (5) y (6).



FIGURA 142. DETERMINACIÓN DE LA MASA DE LA LECHADA Y DEL SURFACTANTE O TENSIATIVO

La masa de (los) agente (s) tensioactivo (s) van a ser colocados en la mezcladora con la lechada de cemento base sin espumar se determina de la siguiente manera con la ecuación5:

$$ms = (mufss)\left(\frac{ws}{100}\right)$$

De donde:

ms = es la masa del (los) agente tensioactivo o surfactante (s), expresado en gramos;

$mufss$ = es la masa de lechada de cemento tipo base espumar con tensioactivo o surfactante (s), expresado en gramos;

ws = es la fracción de masa de agente tensioactivo de los surfactantes, expresado como un porcentaje.

La masa de la lechada de cemento tipo base se determina de la siguiente manera con la ecuación6:

$$mufs = mufss - ms$$

De donde:

$mufs$ = es la masa de la lechada de cemento tipo base sin espumar y sin surfactante (s), expresado en gramos;

m_{ufss} = es la masa de la lechada de cemento tipo base sin espumar con surfactante (s), expresado en gramos;

m_s = es la masa de surfactante (s) que se añaden a la lechada o lechada de cemento tipo base sin espumar, expresado en gramos.

NOTA. El porcentaje de contribución de cada material en masa se determinó en el punto 4,1.

Cálculos adicionales

Si la densidad de la lechada de cemento espumado es conocido, la fracción de volumen (por ciento) de gas puede ser calculado por la ecuacion7:

$$\varphi g = \left(\frac{\rho_{ufss} - \rho_{fs}}{\rho_{ufss}} \right) (100)$$

De donde:

φg = es la fracción de volumen de gas en la lechada de cemento espumado final, expresado como porcentaje;

ρ_{ufss} = es la densidad de la lechada de cemento tipo base sin espumar con surfactante (s), expresado en kilogramos por metro cúbico;

ρ_{fs} = es la densidad de la lechada de cemento espumado, expresada en kilogramos por metro cúbico.

El volumen de lechada de cemento base sin espumar se puede calcular de la siguiente manera con la ecuación8:

$$V_{us} = (V_{mc}) - \frac{(V_{mc}) (\varphi g)}{(100)}$$

De donde:

V_{us} = es el volumen de la lechada de cemento sin espumar, expresada en centímetros cúbicos;

V_{mc} = es el volumen del recipiente de la mezcla, expresado en centímetros cúbicos;

ϕ_g = es la fracción de volumen de gas de lechada de cemento espumado final, expresado como porcentaje.

La masa de la lechada de cemento base sin espumar puede ser calculada de la siguiente manera con la ecuación 9:

$$m_{ufss} = (V_{us})(\rho_{ufss})$$

De donde:

m_{ufss} = es la masa de lechada de cemento base sin espumar con tensioactivo (s), expresado en gramos;

V_{us} = es el volumen de la lechada de cemento base sin espumar, expresada en centímetros cúbicos;

ρ_{ufss} = es la densidad de la lechada de cemento base sin espumar con surfactante, expresado en gramos por centímetro cúbico.

NOTA. Los términos de densidad contenidas en las ecuaciones (7) y (9) se pueden expresar en unidades de $[\text{kg}/\text{m}^3]$ o $[\text{g}/\text{cm}^3]$.

4.10 Aparatos y/o Dispositivos para la generación de Lechadas espumadas.

El recipiente de mezcla, Es un vaso de mezclado con una tapa que sella, para la preparación de la lechada de cemento espumado a presión atmosférica en el laboratorio



FIGURA 143. VASO DE MEZCLADO ESPECIAL PARA LA ELABORACIÓN DE LECHADAS ESPUMADAS

El recipiente de mezcla es similar al utilizado para la preparación de la lechada estándar, excepto que tiene una tapa roscada con un sello de junta teórica. La tapa tiene un pequeño agujero de un diámetro de ± 19 mm ($\pm 0,75$ pulgadas) en el centro equipado con un tapón extraíble con un orificio de ventilación. Un envase convencional de mezcla que no tiene o cuenta con un sello como este, no puede ser utilizado para estas pruebas. (Véase la Figura 10.2).



FIGURA 144. RECIPIENTE DE MEZCLA Y MONTAJE DE CUCHILLAS MÚLTIPLES. CONJUNTO MULTI-CUCHILLA (STACKED-BLADE).

4.11 Conjunto multi-cuchilla (stacked-blade).

Conjunto de la cuchilla mezcladora, ya sea que cuente con una sola hoja o cuchilla de mezcla tal como se suministra por el fabricante, o un conjunto múltiple apilados de varias cuchillas.

A la fecha, las pruebas no han identificado una diferencia significativa o importante en las lechadas mezcladas con la cuchilla de dos diferentes ensamblados con el recipiente de mezcla sellado, es decir; con dos conjuntos de cuchillas distintos.



FIGURA 145. CONJUNTO DE HOJAS O CUCHILLAS SIMPLES (DE CONFORMIDAD CON LA NORMA ISO 10426-2:2003, CLÁUSULA 5.)

El Conjunto multi-cuchilla (stacked-blade) de montaje o de cuchillas apiladas, construido de una serie de conjuntos, cada cuchilla está regulada según la norma ISO 10426-2:2003, ver Figura anterior.

El conjunto consta de cinco hojas estándar unida a un eje central, y espaciados por igual a lo largo del eje figura 4.11.2.

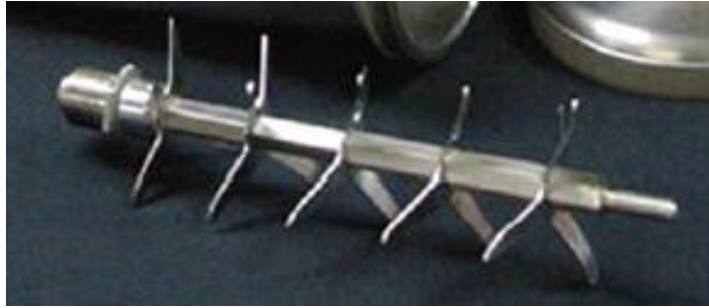


FIGURA 146. CONJUNTO MULTI-CUCHILLA (STACKED-BLADE)

4.12 Preparación de la pasta o lechada base de cemento. Determinación del volumen del recipiente de mezcla

Este método asume que la lechada de cemento base como se describe en 4.1 se preparó en un recipiente de mezcla separado o independiente y esta lechada preparada se transfirió al recipiente de mezcla que cuenta con una tapa sellada. La determinación precisa del volumen del recipiente de mezcla es crítico o muy importante para este procedimiento, ya que los cálculos del volumen de la lechada, la densidad y espumado de lechada de cemento a gas se basa en la determinación de este volumen de este recipiente, dicha relación se basa de la siguiente manera.



FIGURA 147. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DEL RECIPIENTE DE MEZCLA PARA AMBOS VASOS DE MEZCLADOS (ESPUMADO Y CONVENCIONAL)

Limpie, seque y pese el recipiente de mezcla en seco (incluido el montaje o conjunto de mezcla, la tapa con rosca y el tornillo de plug-in, es decir; el tapón con rosca de la tapa). Retire la tapa de rosca del recipiente de mezcla y también el tornillo con el tapón de la tapa. Llene el recipiente de mezcla con agua y atornille la tapa con fuerza. Y vierta más agua adicional en el agujero u orificio de la tapa hasta que el contenedor está completamente lleno, para luego enroscar y colocar el tapón de la tapa.

Limpie el exceso de agua que sale por el orificio de ventilación del tapón y volver a pesar el recipiente. La masa del agua dentro del recipiente es entonces dividida por la densidad del agua para determinar un volumen exacto del recipiente de mezcla.

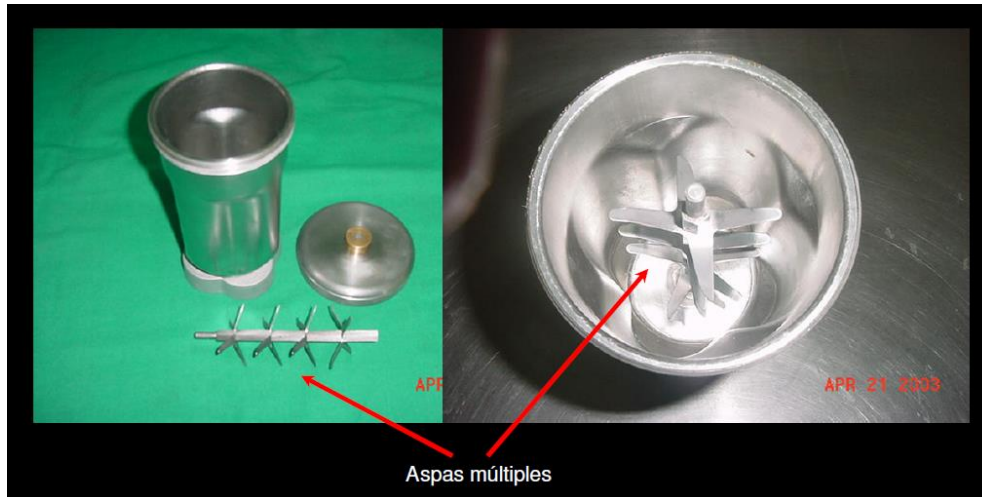


FIGURA 148. CONJUNTO DE ASPAS MÚLTIPLES DE 5 Y 6 CUCHILLAS

El volumen del recipiente de mezcla se debe comprobar en cualquier momento cuando las cuchillas se sustituyan, o después de cualquier daño del recipiente que puede afectar el volumen; dicho volumen debe ser verificado por lo menos cada 6 meses.

NOTA Es posible que para preparar un volumen suficiente de la lechada de cemento base pueda requerir realizar múltiples mezclas que usen el procedimiento estándar de mezclado, o bien el uso de un gran mezclador de laboratorio industrial. Consulte el Anexo A y véase la preparación de grandes volúmenes de lechada en la norma ISO 10426-2:2003.

4.13 Preparación de la lechada de Cemento Base.

General.

Las lechadas tipo base contienen todos los aditivos excepto que la espuma del (los) tensioactivo (s) se preparan de acuerdo con la cláusula 6 de la ISO 10426-2:2003.

Consideraciones de temperatura

Si es posible, las temperaturas de la muestra de cemento, aditivos y agua de la mezcla deben estar dentro del rango $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3,5\text{ }^{\circ}\text{F}$) de las respectivas temperaturas grabadas o anticipadas en la superficie del pozo. (Esta no es la temperatura esperada en el pozo, sino las condiciones de la superficie del mismo en el sitio.) La temperatura del recipiente de mezcla debe de aproximarse a la del agua de mezcla que se utiliza en el diseño de la lechada.



FIGURA 149. OBTENCIÓN Y MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE MEZCLA

El conjunto de recipiente de mezcla se calibrará anualmente para girar o rotar a una tolerancia de ± 200 r/min a 4 000 r/min y de ± 500 r/min a 12,000 r/min.

4.14 Medición de la Densidad.

Densidad.

Para cementar a través de zonas de gas y alta presión, sistemas de fluidos de perforación de alta densidad deberán ser usados para controlar el gas hasta que el pozo pueda ser cementado en el anular. Estas secciones de gas con alta presión requieren de fluidos de perforación pesados arriba de 2.4 gr/cc.

Anexo

Con excepción de diseños para cementaciones forzadas, las lechadas de cemento deberán tener siempre una densidad mucho mayor que el fluido de perforación, evitando la pérdida de circulación.

La densidad de la lechada nunca deberá ser menor que la del fluido de perforación.

Altas densidades incrementarán la presión de sobre-balance adyacente a la zona de gas, que nos ayuda a prevenir la migración de gas.

Idealmente, la densidad de la lechada deberá ser al menos 0.12 gr/cc más pesada que el lodo de perforación.

Para diseños de lechadas de cementos altamente pesadas, se usan materiales con alta densidad y bajo requerimiento de agua tales como el SSA-2 y el Hidense 3.

Mientras que el Hidense es químicamente inerte, alguna forma de sílica (SSA-2) es requerida en cementaciones con alta temperatura para evitar el fenómeno de degradación del cemento.

El dispersante CFR-3 también puede ser usado en diseños pesados de cemento para mejorar el mezclado de la lechada en la superficie o a baja relación agua-sólidos, para incrementar la densidad de la lechada.

Para un desempeño apropiado de la lechada, esta deberá ser mantenida correctamente a la densidad programada.

Aunque las lechadas pesadas son frecuentemente viscosas cuando se mezclan a condiciones de superficie, y tienden a entrapar aire, especialmente cuando se utiliza agua salada o agua de mar.

Anexo

Estas características pueden dificultar la obtención de la densidad correcta de la lechada si no se usa el agente anti-espumante correcto.

Las siguientes propiedades tienen el mayor efecto sobre la densidad:

- Volumen de la lechada
- Características del fluido
- Tiempo bombeable
- Agua libre
- Suspensión
- Control de pérdida por filtrado

Cualquier otra de estas características puede afectar el resultado de un trabajo de cementación primaria.

La densidad de la lechada base de cemento sin espumar puede ser determinada por métodos encontrados en la norma ISO 10426-2:2003, Cláusula 6.



FIGURA 150. BALANZA PRESURIZADA

4.15 Método y Desarrollo de la elaboración de Pruebas atmosféricas a lechadas de Cemento Espumado.

Debido al gran volumen de gas de las lechadas de cemento espumado, es necesario modificar algunos de los procedimientos de prueba estándar para evitar resultados erróneos en las pruebas.

4.16 Preparación de la lechada de cemento espumado a presión atmosférica

Con base en la masa calculada en el punto 4.2, se pesa la cantidad correspondiente de la lechada base preparada en el recipiente de mezcla.



FIGURA 151. PREPARACIÓN DE LA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO A CONDICIONES ATMOSFÉRICAS

Añada la cantidad calculada de agente tensioactivo o surfactante (s).



FIGURA 152. COLOCACIÓN DEL AGENTE SUSTENTANTE SOBRE EL DISEÑO DE LECHADA A ESPUMAR

La masa final de la lechada de cemento base y surfactante añadido o agregado (s) deberá cotejarse o compararse con la última base de masa deseada de la lechada de cemento calculado en el punto 4.2.1.3.

4.17 Generación de la lechada de Cemento Espumado.

Coloque la tapa y el tapón en el recipiente y asegúrese de que el recipiente de mezcla está sellado. Usando el montaje de las cuchillas descrito en cualquiera de los puntos 5.2.1 o 5.2.2, mezcle la lechada a 12,000 r/min durante 15 seg.



FIGURA 153. SELLADO DEL VASO DE MEZCLADO Y GENERACIÓN DE LA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO

Debido al aumento o incremento en el volumen y la viscosidad de la lechada, es posible que las máximas revoluciones por minuto que alcancen las cuchillas del contenedor en la mezcla puedan ser inferiores a 12,000 r/min. Las revoluciones máximas alcanzables por minuto dependen de la potencia del motor del recipiente de mezcla, de la densidad de la lechada y de la calidad de la espuma. Usted debe registrar y reportar las revoluciones finales por minuto de las cuchillas de la mezcladora.

Durante el mezclado, habrá un cambio notable en el sonido (tono o timbre) del recipiente de mezcla. Después del proceso de mezcla, es posible que puede haber alguna ligera presión en el recipiente de mezcla, debido a un incremento en la temperatura y en la energía impartida a la espuma durante el proceso de espumación. Se debe tener cuidado al retirar la parte superior del recipiente de mezclado. Después de mezclar, abra el puerto de muestreo o la tapa del recipiente, y compruebe que la lechada llene completamente el recipiente de mezcla.



FIGURA 154. GENERACIÓN DE LA ESPUMA EN LA LECHADA DE CEMENTO

Si la lechada no llena el recipiente de mezclado al final del período de los 15 seg, queda en duda si la lechada espumará de manera apropiada o correctamente bajo condiciones de campo. Por lo que la lechada debe ser rediseñada.



FIGURA 155. GENERACIÓN DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO

Al preparar la lechada de cemento espumado en el recipiente de mezcla sellado y retirado, es común que la densidad final de la lechada de cemento espumado sea inferior o menor que la del diseño. Este es entonces, el resultado de la presión generada por la expansión debido a la energía de mezclado, debido a la relajación del tensioactivo o surfactante que produce un aumento en el tamaño relativo de las burbujas. Asimismo, es posible que la lechada de cemento espumado se puede expandir después de retirarla del recipiente de mezcla. Un método para obtener una lechada de cemento espumado que tiene una densidad más cerca de la densidad de diseño es como sigue:

- a) Diseñar la densidad de la lechada de cemento a espumar, por ejemplo: 1 893 kg/m³ de lechada de cemento base espumado a 1 318 kg/m³ (15,8 lbm / gal espumado a 11,0 lbm / gal);
- b) Prepare 1 318 kg/m³ (11,0 lbm / gal) de lechada de cemento espumado en el laboratorio de acuerdo con el diseño;
- c) Mida la densidad de la lechada de cemento espumado, por ejemplo, 1 246 kg/m³ (10,4 lbm / gal);
- d) Si la densidad medida es menor que la densidad del diseño, revise los cálculos de este último diseño;
- e) Si los cálculos son correctos, reste la densidad medida de la densidad de diseño para obtener una "corrección offset" o corrección de compensación, por ejemplo, 1 318 kg/m³ - 1 246 kg/m³ = 72 kg/m³ corrección compensación {corrección de offset} (11,0 lbm / gal - 10,4 lbm / gal = 0.6 lbm / gal corrección offset);

f) Vuelva a calcular la densidad de la lechada usando la corrección de offset, por ejemplo, $1\,318\text{ kg/m}^3 + 72\text{ kg/m}^3 = 1\,390\text{ kg/m}^3$ ($11,0\text{ lbm / gal} + 0,6\text{ lbm / gal} = 11,6\text{ lbm / gal}$);

g) Prepare una nueva lechada espesa de cemento espumada de conformidad con la densidad corregida, por ejemplo, $1\,893\text{ kg/m}^3$ espumada a $1\,390\text{ kg/m}^3$ ($15,8\text{ lbm / gal}$ espumada a $11,6\text{ lbm / gal}$);

h) Mida la densidad de la lechada de cemento espumado, dicha densidad de esta espuma de lechada de cemento debe ser cercana a la densidad deseada o de objeto, es decir de $1\,318\text{ kg/m}^3$ ($11,0\text{ lbm / gal}$);

i) En caso, de que si esta densidad no es todavía aceptable, busque u obtenga una nueva corrección de compensación {o de offset} y prepare una nueva lechada de cemento espumado;

j) Si la densidad de la espuma medida es superior o rebasa la del diseño, será difícil obtener la densidad correcta para el cemento espumado en el campo, por tanto la lechada debe ser rediseñada.

4.18 Ejemplo de cálculo para la preparación de la lechada de cemento espumado a presión atmosférica

Los siguientes cálculos demuestran el uso de las ecuaciones en 4,1 y 4,2 para determinar las cantidades apropiadas de una lechada de cemento base y de agente tensioactivo o surfactante.

Ejemplo:

Problema;

Se requiere la espumación de una lechada de cemento base de densidad de $1,737\text{ kg/m}^3$ ($14,5\text{ lbm / gal}$) con una fracción de volumen de gas al 31%.

- a) Diseño de lechada = Cemento + $0,017\,75\text{ m}^3$ /por tonelada de surfactante (o cemento + $0,2$ galones/costal surfactante).
- b) Densidad de la lechada de cemento base = $1,737\text{ kg/m}^3$ ($14,5\text{ lbm / gal}$).
- c) Densidad del Surfactante = $1,198\text{ kg/m}^3$ (10 lbm / gal).
- d) Fracción de Volumen del gas deseado = 31%.
- e) Volumen del recipiente = $1\,170\text{ cm}^3$
- f) **NOTA:** Una tonelada es igual a 1000 kg .

Cálculo de los porcentajes de Masa

Se calcula la contribución o aportación en porcentaje de masa relativa para el (los) tensioactivo (s) o surfactante (s) (los cálculos entre paréntesis se basan en la medición por masa de saco o costal en EE.UU., y no se pretende que sean equivalentes a los valores del sistema métrico.)

Balance de materia.

MATERIAL	Masa kg	Volumen m ³	(masa lbm)	(volumen gal)
Cemento	1 000 kg			
0.017 75 m3/tonelada surfactante				
Agua				
Total				

DATOS ADICIONALES:

CEMENTO CLASE H.

Peso por saco de Cemento= 1000 [kg]

Requerimiento de agua=38%

$\rho = 3.1377470$ [kg/lit]

SURFACTANTE.

2.13% por peso de saco de Cemento.

Requerimiento de agua=59%

$\rho = 1.2$ [kg/lit]

AGUA.

$\rho = 1$ [kg/lit]

VOLUMEN POR NORMA API.

Volumen del recipiente = 1 170 cm³

SOLUCIÓN:

Con la información dada procedemos a calcular los porcentajes y valores de la tabla en sus unidades respectivas para el diseño de lechada.

Si el $W_{\text{CEMENTO}} = 1000$ [kg] entonces:

$W_{\text{H}_2\text{O PARA EL CEMENTO}} = (1000[\text{kg}]) (0.38) = 380$ [kg]

$W_{\text{SURFACTANTE}} = (1000[\text{kg}]) (0.0213) = 21.3$ [kg]

$W_{\text{H}_2\text{O PARA EL CEMENTO}} = (21.3[\text{kg}]) (9.86) = 210.018$ [kg]

Para el Rendimiento de cada material, empleamos la siguiente fórmula:

$$Rend = \frac{W_{material}}{\gamma_e \text{ material}}$$

De donde:

W material= Peso del material.

γ_e = Gravedad específica del mismo material con el que se está trabajando en peso.

Entonces:

$$Rendimiento \text{ del cemento} = \frac{1000 [kg]}{3.1377470 [kg/lt]} = 318.6971 [lt]$$

$$Rendimiento \text{ del surfactante} = \frac{21.3 [kg]}{1.2 [kg/lt]} = 17.75 [lt]$$

$$Rendimiento \text{ del agua} = \frac{590 [kg]}{1 [kg/lt]} = 590 [lt]$$

Para la obtención de las fracciones individuales de cada material empleamos la siguiente fórmula:

$$Fracción = \frac{W \text{ de cada material}}{Total \text{ del material}}$$

$$Fracción \text{ del cemento} = \frac{1000 [kg]}{1611.3 [kg]} = 0.620616893 [1]$$

$$Fracción \text{ del surfactante} = \frac{2.3 [kg]}{1611.3 [kg]} = 0.013219139 [1]$$

$$Fracción \text{ del agua} = \frac{590 [kg]}{1611.3 [kg]} = 0.366163967 [1]$$

Cálculo de las aportaciones de fracción de masa (en porcentaje):

Cemento	(1 000 kg/1 611 kg) 62,1%	[(94 lbm/151,39 lbm) 62,1%]
Surfactante	(21,3 kg/1 611 kg) 1,3%	[(2 lbm/151,39 lbm) 1,3%]
Agua	(590 kg/1 611 kg) 36,6%	[(55,39 lbm/151,39 lbm) 36,6%]

Finalmente queda nuestro balance de materia para nuestra tabla de la siguiente forma:

Material	Masa kg	Agua lt	Volumen m ³	Fracción
Cemento	1,000	380	0.3187	0.620616893
0.017 75 m3/tonelada surfactante	21.3	210.018	0.017 75	0.013219139
Agua	590	0	0590	0.366163967
Total	1 ,611.3	590.018	0.926 45	0.99999

O de esta otra forma:

Material	Masa kg	Volumen m ³	(masa)	(volumen)
Cemento	1,000 kg	0.318 7 m ³	(94 lbm)	(3.59 gal)
0.017 75 m3/tonelada surfactante	21.3 kg	0.017 75 m ³	(2 lbm)	(0.2 gal)
Agua	590 kg	0.590 m ³	(55.39 lbm)	(6.65 gal)
Total	1,611.3 kg	0.926 45 m ³	(151.39 lbm)	(10.44 gal)

Procedemos entonces a obtener las cantidades de cemento, surfactante y agua necesarios para elaborar una muestra de lechada de 1170 cm³.

- 1- Primero, obtenemos la densidad del diseño de la lechada.

$$\text{Si la densidad se define como } \rho = \frac{m}{v}$$

Entonces:

$$\rho \text{ del diseño de lechada} = \frac{1611.30 [kg]}{926.45 [lt]} = 1.739219602 \text{ gr/cm}^3$$

$$1.739219602 \frac{kg}{lt} \left(\frac{1000gr}{1 kg} \right) \left(\frac{1 lt}{1000 cm^3} \right) = 1.739219602 \frac{gr}{cm^3}$$

- 2- Como segundo paso, calculamos la masa total de la lechada.

$$M \text{ total del diseño de lechada} = v \rho$$

$$M \text{ total del diseño de lechada} = v \rho = (1170 \text{ cm}^3)(1.739219602 \frac{gr}{cm^3}) = 2,034.886934 [gr]$$

- 3- Y finalmente por medio de las fracciones, obtenemos de forma individual cada una de las masas respectivas de cemento, surfactante y agua necesarios para elaborar una muestra de lechada de 1170 cm³.

$M \text{ respectiva de material} = (M \text{ total de la lechada}) (\text{Fracción de cada componente})$

$$M \text{ cemento} = (2,034.886934 \text{ [gr]})(0.620616893) = 1,262.885207 \text{ [gr]}$$

$$M \text{ surfactante} = (2,034.886934 \text{ [gr]})(0.013219139) = 26.89945323 \text{ [gr]}$$

$$M \text{ agua} = (2,034.886934 \text{ [gr]})(0.366163967) = 745.1022723 \text{ [gr]}$$

Cálculo de la densidad de la lechada sin tensioactivo (s) o surfactante (s).

MATERIAL	Masa kg	Volumen m ³	(masa lbm)	(volumen gal)
Cemento	1 000 kg			
Agua				
Total				

La densidad de la lechada de cemento base sin tensioactivo (pbwos) se calcula mediante:

SOLUCIÓN:

$$W_{\text{CEMENTO}} = 1000 \text{ [kg]}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O PARA EL CEMENTO}} = (1000[\text{kg}]) (0.59) = 590 \text{ [kg]}$$

Para el Rendimiento de cada material, empleamos la siguiente fórmula:

$$Rend = \frac{W_{\text{material}}}{\gamma_{\text{e material}}}$$

De donde:

W material= Peso del material.

γ_{e} = Gravedad específica del mismo material con el que se está trabajando en peso.

Entonces:

$$Rendimiento \text{ del cemento} = \frac{1000 \text{ [kg]}}{3.1377470 \text{ [kg/lt]}} = 318.6971 \text{ [lt]}$$

$$\text{Rendimiento del agua} = \frac{590 \text{ [kg]}}{1 \text{ [kg/lt]}} = 590 \text{ [lt]}$$

Para la obtención de las fracciones individuales de cada material empleamos la siguiente fórmula:

$$\text{Fracción} = \frac{W \text{ de cada material}}{\text{Total del material}}$$

$$\text{Fracción del cemento} = \frac{1000 \text{ [kg]}}{1590 \text{ [kg]}} = 0.628930 \text{ [1]}$$

$$\text{Fracción del agua} = \frac{590 \text{ [kg]}}{1590 \text{ [kg]}} = 0.371069 \text{ [1]}$$

Finalmente queda nuestro balance de materia para nuestra tabla de la siguiente forma:

Material	Masa kg	Agua lt	Volumen m ³	Fracción
Cemento	1,000	590	318.70	0.628930
Agua	590	0	590	0.371069
Total	1,590	590.0	908.70	0.99999

O de esta otra forma:

Material	Masa kg	Volumen m ³	(masa lbm)	(volumen gal)
Cemento	1,000	3187	94	3.59
Agua	590	590	55.39	6.65
Total	1,590	590.0	149.39	10.24

Procedemos entonces a obtener las cantidades de cemento, surfactante y agua necesarios para elaborar una muestra de lechada de 1170 cm³.

- 1- Primero, obtenemos la densidad del diseño de la lechada.

$$\text{Si la densidad se define como } \rho = \frac{m}{v}$$

Entonces:

$$\rho \text{ de la lechada base} = \frac{1,590 \text{ [kg]}}{908.7 \text{ [lt]}} = 1.749752 \text{ gr/cm}^3$$

$$1.749752 \frac{\text{kg}}{\text{lt}} \left(\frac{1000 \text{ gr}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ lt}}{1000 \text{ cm}^3} \right) = 1.749752 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{bwos} = 1,590 \text{ [kg]}/0.9087 \text{ [m}^3\text{]} = 1.749 \text{ [gr/cm}^3\text{]} \text{ o } 149.39 \text{ [lbm] } / 10.24 \text{ [gal]} = 14.60 \text{ [lbm/gal]}$$

2- Como segundo paso, calculamos la masa total de la lechada.

$$M \text{ total del diseño de lechada} = v \rho$$

$$M \text{ total del diseño de lechada} = v \rho = (600 \text{ cm}^3)(1.749752 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}) = 1,049.851436 \text{ [gr]}$$

3- Y finalmente por medio de las fracciones, obtenemos de forma individual cada una de las masas respectivas de cemento, surfactante y agua necesarios para elaborar una muestra de lechada de 600 cm³.

$$M \text{ respectiva de material} = (M \text{ total de la lechada}) (\text{Fracción de cada componente})$$

$$M \text{ cemento} = (1,049.851436 \text{ [gr]})(0.628930) = 660.2830636 \text{ [gr]}$$

$$M \text{ cemento} = (1,049.851436 \text{ [gr]})(0.371069) = 389.5673225 \text{ [gr]}$$

Cálculo de la densidad de espuma de lechada de cemento con la fracción de volumen conocido de gas, por ejemplo, utilizando la ecuación (3) en 4.2.1.2:

$$\rho_{fs} = \left(\frac{100 - \phi g}{100} \right) (\rho) = \left(\frac{100 - 0.31}{100} \right) \left(1.74952 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] \right) = 1.20732888 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\rho_{fs} = 1.20732888 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Cálculo de los gramos requeridos de lechada de cemento tipo base sin espumar

Por ejemplo, utilizando la ecuación (4) en 4.2.1.3:

$$m_{ufss} = (\text{Vol recipiente})(\rho_{fs}) = 1,170 \text{ [cm}^3\text{]}(1.207328 \text{ [gr/cm}^3\text{]}) = 1,412.57376 \text{ [gr]}$$

Cálculo de los gramos necesarios de agente tensioactivo o surfactante y lechada.

Por ejemplo, utilizando la ecuación (5) en el punto 4.2.2:

$$ms = (mufss) \left(\frac{\rho fs}{100} \right) = (1,412.57376 [gr]) \left(\frac{1.20732888 \left[\frac{gr}{cm^3} \right]}{100} \right) = 18.36345888 [gr]$$

Por ejemplo, utilizando la ecuación (6) en el punto 4.2.2:

$$MUF lechada base = mufss - ms = 1,412.57376 [gr] - 18.36345888 [gr] = 1,394.210301 [gr]$$

Resumen de cálculos de ejemplo.

Para preparar una muestra de lechada de cemento espumado a partir de la lechada ejemplo del recipiente de 1,170 cm³ se requiere:

R = 1,394 [gr] de pasta de cemento base o de lechada base con 18.36 [gr] de surfactante o tensioactivo.

4.19 Determinación de la densidad de la lechada de cemento espumado.

La densidad de la lechada de cemento espumado se determinará mediante el vertido de la lechada de cemento espumado en un recipiente con una parte superior abierta grande (o en un recipiente con una boca ancha) que tiene un volumen conocido cuando está completamente lleno.



FIGURA 156. RECIPIENTE PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE UNA LECHADA ESPUMADA

Pese el envase, verter la lechada de cemento espumado dentro del recipiente y ponga el nivel de la lechada de la parte superior a ras con una cuchilla recta. Limpie el exterior del contenedor o recipiente limpio y de nuevo pese el recipiente con la lechada.



FIGURA 157. VACEADO DE LA LECHADA ESPUMADA EN EL RECIPIENTE DE DENSIDAD

La densidad de la lechada de cemento espumado en el interior del recipiente se determinará dividiendo la masa de la lechada entre el volumen del recipiente y se harán respectivamente la conversión de estas cifras a las unidades de densidades correspondientes o apropiadas.



FIGURA 158. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA LECHADA ESPUMADA.

Nunca debe emplearse una balanza de densidad de fluidos presurizada para determinar la densidad de una lechada de cemento espumado preparado a presión atmosférica, ya que esto puede comprimir las burbujas de gas y el registro de indicación de la densidad de la lechada será demasiado alta. Así mismo no es recomendable utilizar una balanza de lodos no presurizada, debido a que el pequeño agujero en el centro de la tapa puede causar una restricción, lo que puede resultar es la presurización parcial de la lechada. Esto puede causar errores en la determinación de la densidad.

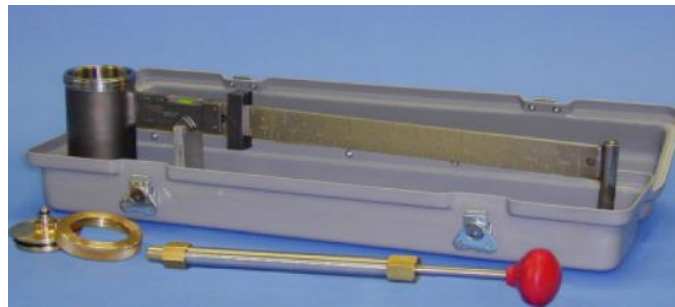


FIGURA 159. BALANZA PRESURIZADA, NUNCA DEBE DE SER EMPLEADA EN EL CÁLCULO DE UN FLUIDO ESPUMADO



FIGURA 160. MUESTRAS DE LECHADAS DE CEMENTO FRAGUADAS Y MEDIDAS EN SU DENSIDAD.

4.20 Determinación de la estabilidad de la base de la lechada de cemento espumada.

Esta Prueba de Estabilidad de lechada espumada se debe realizar previamente a una mezcla de lechada de tipo base en una cámara de curado o en Consistómetro Presurizado HT-HP, es decir; con ésta prueba vamos a comprobar primero la estabilidad de la base de una lechada espumada.

Entonces debemos primero de acondicionar la celda BP y colocar una pequeña capa de grasa en las paredes y en la base.



Al mezclar la lechada, viértala en la celda. Termine de ensamblar.

FIGURA 161. ENSAMBLADO Y MONTAJE DE LA CELDA BP DE UN CONSISTÓMETRO HP-HT

Colóquela en la cámara de curado o baño maría a la temperatura y presión de prueba.

Al cumplir el tiempo de curado, coloque la celda BP en agua a 80°F hasta enfriar.



FIGURA 162. MONTAJE DE LA CELDA BP EN LA CAMARA DE CURADO A LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DE PRUEBA

Retire el cilindro de cemento e identifique la parte superior e inferior. Seccione aproximadamente 20 milímetros de la parte superior e inferior del cilindro; el resto debe ser seccionado en partes iguales (mínimo dos secciones).



FIGURA 163. MOLDES DE FRAGÜE PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE UNA LECHADA ESPUMADA

Determine la gravedad específica de cada segmento aplicando la siguiente formula:

$$\text{Gravedad Especifica} = \frac{\text{Peso Segmento Seco}}{\text{Peso Segmento en Agua}}$$

Determine el porcentaje de diferencia de densidad por cada segmento:

$$\%D\ell = \frac{(\ell \text{ del Segmento} - \ell \text{ de la Lechada})(100)}{(\ell \text{ de la Lechada})}$$

4.21 Estabilidad de la lechada de cemento espumado sin preparar (sin fraguar).

La estabilidad de la espuma se puede evaluar mediante el vertido de una muestra de la lechada de cemento espumado en un cilindro graduado estándar de 250 ml, u otro recipiente de tamaño adecuado. Selle la parte superior del cilindro para evitar la deshidratación. Coloque el cilindro en una superficie estable y sin vibraciones encima y déjelo reposar durante un período de 2 horas. Examine periódicamente la lechada durante este período de 2 horas. El propósito de esta prueba es comprobar que la solución no presente asentamiento así como la estabilidad de la lechada de cemento espumado, y para registrar también la apariencia visual de la espuma de lechada de cemento (por ejemplo, líquido libre, sedimentación o asentamiento, burbujas concentradas en un área específica, etc.) Los contenidos del cilindro no se pueden curar a temperaturas por encima o superiores a las de la temperatura ambiente porque un aumento de la temperatura aumentará el tamaño de burbuja y volumen de lechada, lo que puede afectar a la estabilidad de lechada.

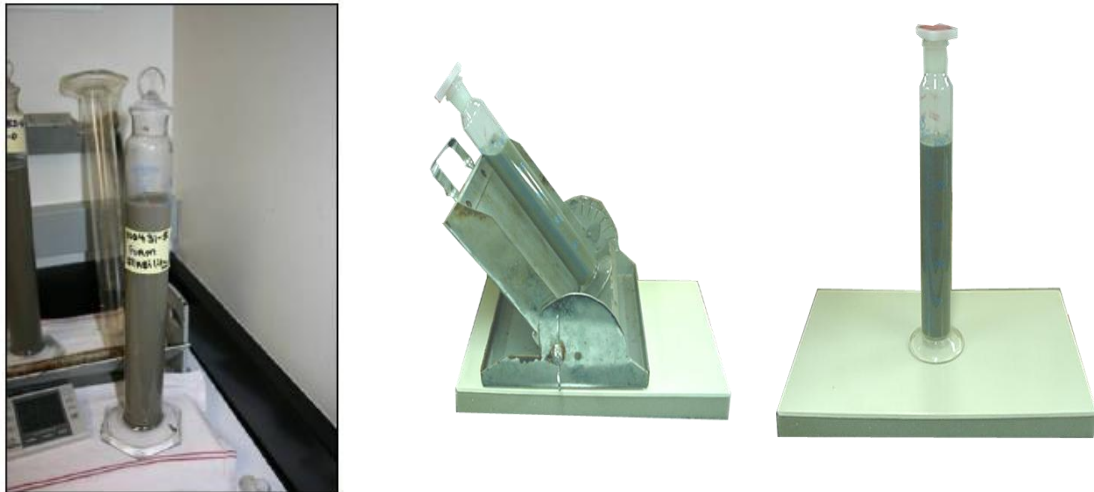


FIGURA 164. MODELADO DEL EFECTO DE AGUA LIBRE EN UNA LECHADA ESPUMADA PARA DIFERENTES TIPOS DE POZOS.

Las mediciones de densidad de la espuma se pueden hacer en múltiples lugares en el cilindro después del período de 2 horas, si así se desea. Para determinar la densidad de la lechada en varios lugares en el cilindro, use una jeringa grande con un tubo flexible unido o bien una manguera fija para eliminar pequeñas porciones de la parte superior, media e inferior. (El uso de un catéter o jeringa de irrigación de este tipo se recomienda.) La lechada removida puede ser transferida a un cilindro más pequeño graduado para determinar la masa de un volumen conocido de la lechada, con lo que la densidad se puede determinar.

4.22 Prueba de Agua Libre.

La prueba de agua libre determina si una lechada de cemento puede tener problemas con la separación de agua después de que esta ha sido colocada en el fondo del pozo.

De igual forma preparamos una base de lechada y sometemos ésta a consistencia, una vez pasado los 20min por norma extraemos la muestra de lechada base del Consistómetro Atmosférico 165 AT y la vertemos en un cilindro de 250 [cm] de capacidad.



FIGURA 165. CONSISTOMETRO ATMOSFÉRICO 165-AT

Posteriormente tapamos la boca del cilindro con un pedazo de plástico y una liga o con un tapón.



FIGURA 166. ACCESORIOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL AGUA LIBRE

“El agua libre que se acumula en el tope de la columna de cemento puede dejar puntos débiles o fisuras a lo largo de la columna”

Por último colocamos nuestra muestra base en nuestro equipo de Fluido libre a 45°.



Si la lechada libera agua, el resultado será la presencia de áreas acanaladas en el cemento fraguado, agua o cemento ligero en la cima de la columna de cemento, o asentamiento de sólidos a través de la columna de cemento.

FIGURA 167. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE AGUA LIBRE PARA UN POZO DESVIADO A 45°

Agua libre excesiva es dañina para el cemento fraguado porque genera debilidades de adherencia en las zonas de contacto. Mientras la lechada permanece estática el agua tiende a colocarse en la parte superior de la columna debido a que las partículas tienden a sedimentar, durante este proceso de sedimentación las partículas tienden a formar tapones, la zona justo por debajo de estos tapones, tiende a fracturar dejando una fisura sin partículas. Ésta fractura permanece en la columna hasta que el cemento fragua. Si en la columna se generan varias fisuras, existe la posibilidad de crear un canal de comunicación para los fluidos de la formación o pueden hacer que el cemento fraguado falle bajo presión.

Adicionalmente en los pozos inclinados el problema se complica porque el agua libre crea un canal de agua en la parte superior a lo largo de la columna por donde fácilmente pueden migrar los fluidos del pozo además de que nos genera canales de agua en la parte superior bien definidos que evitan el sello hidráulico total del anular.

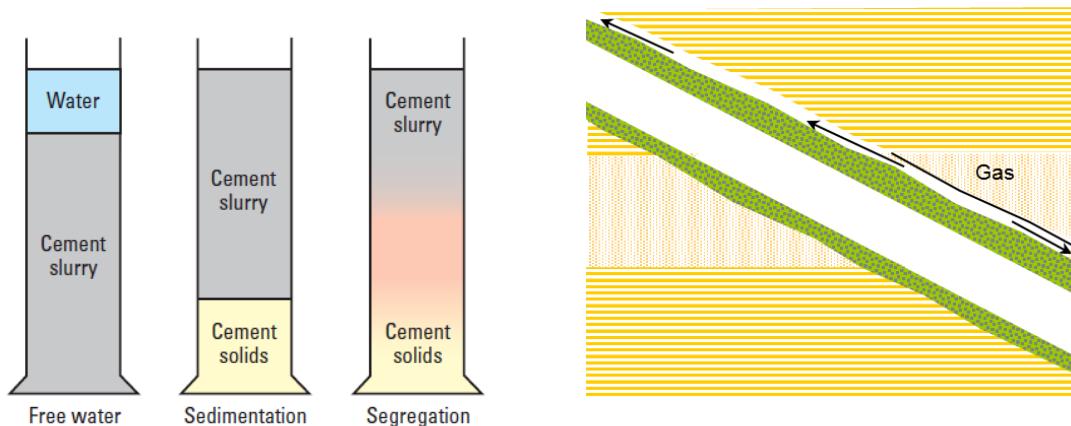


FIGURA 168. RAZONAMIENTO SOBRE EL EFECTO DE AGUA LIBRE EN UNA LECHADA DE CEMENTO Y SUS CONSECUENCIAS EN POZOS.

El valor máximo de agua libre aceptado por API es 1.4% en una columna de 250 cc de cemento. Pero en casos de pozos verticales o cementaciones de zonas presurizadas, el valor debe ser cero en pruebas realizadas a la temperatura circulante.

4.23 Estabilidad de la lechada de cemento espumado preparado (fraguado).

Compruebe la estabilidad de lechada de cemento espumado por las muestras de curado hasta que estén preparadas establecidas (estables) y determine el gradiente de densidad en toda la muestra o a lo largo de la muestra.

Las muestras pueden ser curadas en cilindros cubiertos no engrasados de un diámetro de 50,8 mm × 101,6 mm de altura (2 × 4 en pulgadas) o en cualquier otro recipiente adecuado y cubierto. El uso de grasa u otros agentes de liberación del molde debe evitarse, ya que estos materiales pueden afectar la estabilidad de la lechada de cemento espumado.



FIGURA 169. DISPOSITIVO PARA DETERMINAR LA ESTABILIDAD DEL FRAGUADO DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO

Deje que la lechada se cure por 24 horas o hasta que cuaje o se fragüe. Retire el cemento del tubo. La longitud de la muestra de cemento fraguado debe ser medida. Marque la muestra en al menos tres segmentos de longitud aproximadamente igual. Corte la muestra en secciones y márkelos desde la parte superior hasta la parte inferior. La muestra no se debe de cortar con una sierra que utilice el agua, ya que la muestra puede absorber agua y la densidad de la muestra puede cambiar.

Si se presentan grandes variaciones en la densidad a lo largo de arriba a abajo de la muestra, estas son un indicativo de la inestabilidad.



FIGURA 170. LECHADA FRAGUADA PARA DETERMINACIÓN DE SU ESTABILIDAD

-Determine la masa de cada sección en aire y en agua de la siguiente manera: Coloque un vaso de agua fresca (por ejemplo un vaso de precipitado con agua dulce) en una balanza o báscula y tare la balanza a cero.



FIGURA 171. DETERMINACIÓN DE LA MASA DE CADA SECCIÓN

Colocar una sección sobre el equilibrio al lado del vaso de precipitados. Registrar la masa y eliminar la sección de la balanza. Tare la balanza a cero. Coloque un lazo de línea delgada alrededor de la sección. Recoja o levante la sección por la línea o lazo y suspenda la sección en el agua del vaso de precipitado de modo que la muestra está totalmente sumergida en el agua y que no toque el fondo o los lados del vaso de precipitado.

Obtenga la masa de la muestra sumergida en el agua tan rápidamente como sea posible para evitar la absorción excesiva de agua. Retirar (sacar) la muestra fraguada del agua y repita el procedimiento para cada sección de cemento fraguado. Aplicando el principio de Arquímedes, el cálculo de la densidad de cada muestra de cemento puede ser obtenido por la siguiente ecuación:

$$\rho_s = \frac{m_a}{m_w}$$

De donde:

ρ_s = es la densidad de la muestra, en gramos por centímetro cúbico;

m_a = es la masa de la muestra en el aire, expresada en gramos;

m_w = es la masa de la muestra en agua, expresado en gramos.

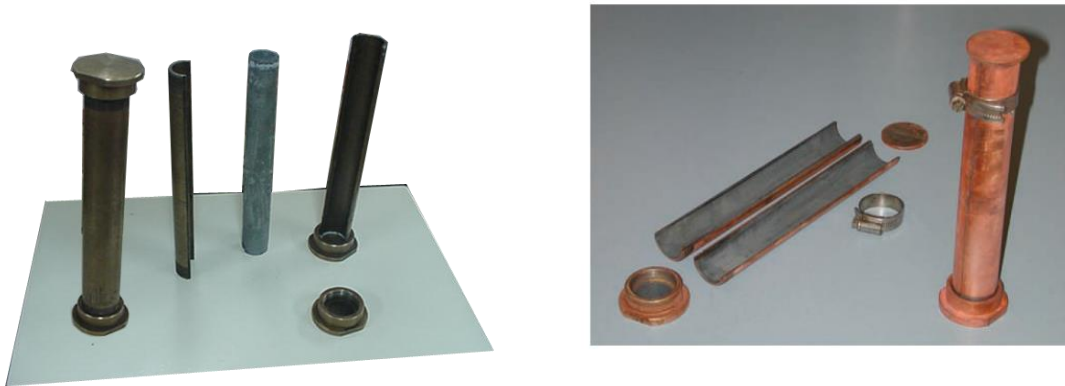


FIGURA 172. DESMONTAJE DE LOS MOLDES DE LA DETERMINACIÓN DE ESTABILIDAD DE UNA LECHADA ESPUMADA

4.24 Evaluación de la estabilidad de la lechada de cemento espumado a una temperatura < a 90°C (194 ° F).

Prepare un molde apropiado para el curado de la muestra de la lechada de cemento espumado. Por ejemplo, se pueden preparar un molde de curado de PVC aplicando una imprimación/limpiador y pegamento a las partes de PVC y ensamblando el montaje de ellas (Figura 4.12.1). Deje tiempo suficiente para que el pegamento se endurezca. Aplique cinta aislante (de aislar) a los casquillos de bronce (a las partes de metal). PVC u otro material plástico se recomienda usar debido a que la lechada de cemento espumado no se adherirá al material del molde. Así mismo se pueden utilizar otros materiales (son aceptables) siempre y cuando proporcionen un compuesto de desmoldeo o un compuesto de liberación del molde que no se utilice en la superficie del mismo molde.

Vierta la lechada de cemento espumado en el molde y atornille el latón grande o la parte grande de metal (o de otro material resistente a la corrosión) que se ajusta en la parte superior. La lechada debe de salir del agujero central de la parte (guarnición) de cobre amarillo grande. A continuación, atornille el tapón de metal pequeño en la guarnición (parte) de cobre amarillo grande y apriete los dos. Cure a la temperatura deseada hasta que cuajado. La muestra puede ser curada en una posición vertical o en un ángulo específico, si así lo desea.

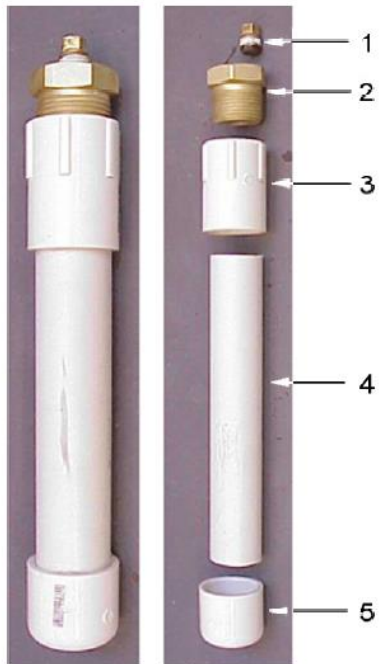


FIGURA 173. EJEMPLO DEL MOLDE DE CURACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LA LECHADA CEMENTO ESPUMADO.

De donde:

- 1- Tapón de latón o metal de 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ in).
- 2- Reductor de latón o metal de 25,4 mm x 6,35 mm (1 in x $\frac{1}{4}$ in).
- 3- Cuello de PVC de 25.4 mm (1 pulgada).
- 4- Tubería de PVC del 40, de 25, 4mm (1 pulgada) con una longitud de 152 mm a 203 mm (6 a 8 pulgadas).
- 5- Tapa de PVC de 25.4 mm (1 pulgada).

Después del curado, la muestra se enfría a temperatura ambiente, quite o retire el accesorio de latón y el enchufe (tapón) de la parte superior, y examine la muestra. Tenga en cuenta (observe) los problemas obvios en la parte superior de la muestra. Corte el molde de PVC en al menos 3 piezas, marcando cada pieza para referirse a la posición relativa (es decir, parte superior, media e inferior). La muestra no se debe de cortar con una sierra que utiliza el agua, ya que el agua puede ser absorbida por la muestra y cambiar su densidad. Cortar cuidadosamente el PVC longitudinalmente a lo largo de cada segmento hasta que el PVC se puede quitar. Examine el conjunto de secciones espumadas en busca de signos de inestabilidad. Las muestras entonces se pueden poner a prueba para la densidad mediante el principio de Arquímedes que se ha descrito anteriormente. También se puede determinar la Resistencia a la compresión de cada sección, esto; si la muestra es un cilindro uniforme y los extremos son lisos y planos. La relación de longitud a diámetro (de largo a diámetro), así como el uso de cubos vs cilindros, puede tener un efecto dramático o muy importante en la resistencia determinada.

NOTA. La geometría de la pieza de espécimen, afecta a los valores determinados de la resistencia a la compresión, es decir, que la resistencia determinada con la geometría de la probeta (o de cierta geometría) no puede corresponder a la de una muestra con geometría diferente.

4.25 Los signos de inestabilidad en la espuma.

Estos signos incluyen los siguientes:

- I. Existe más de un trazo del rastro de líquido o agua libre,
- II. Se observan grandes burbujas de ruptura en la parte superior de la muestra.
- III. Se presenta la existencia de una diferencia excesiva en la parte superior de la muestra (los efectos menores de meniscos leves son normales).
- IV. Existen signos Visuales de segregación de la densidad como se indica por el estriado (manchas), el cambio de color de la luz de claro-oscuro, de arriba abajo,.
- V. Existen grandes variaciones en la densidad de la parte superior (arriba) a la parte inferior (abajo) de la muestra.



FIGURA 174. MUESTRA DE INESTABILIDAD EN UNA LECHADA ESPUMADA

4.26 Determinación de la resistencia a la compresión a una lechada espumada.

Vierta la lechada de cemento espumado en un molde de curado que pueda ser sellado. (La tapa de sellado impide que la lechada de cemento espumado se expanda cuando esta se caliente). La expansión puede resultar en una disminución de la densidad deseada u objetivo.) Puede usar un molde adecuado estándar de 50,8 mm (2 pulgadas) en forma o molde de cubo (descrito en la norma ASTM C 109 [1]) con una tapa (sin ranuras) y con su junta o empaque fijado en el mismo. También se han empleado moldes cilíndricos de Plástico, de 50,8 mm de diámetro x 101,6 mm de altura (2in x 4 in) con un tapón sellante (que también se han utilizado). La relación de longitud a diámetro, es decir; de largo a diámetro así como el uso de cubos, en comparación con los cilindros, puede tener un efecto importante o dramático en la resistencia determinada. Los extremos de la muestra deben ser paralelos, lisos y planos.

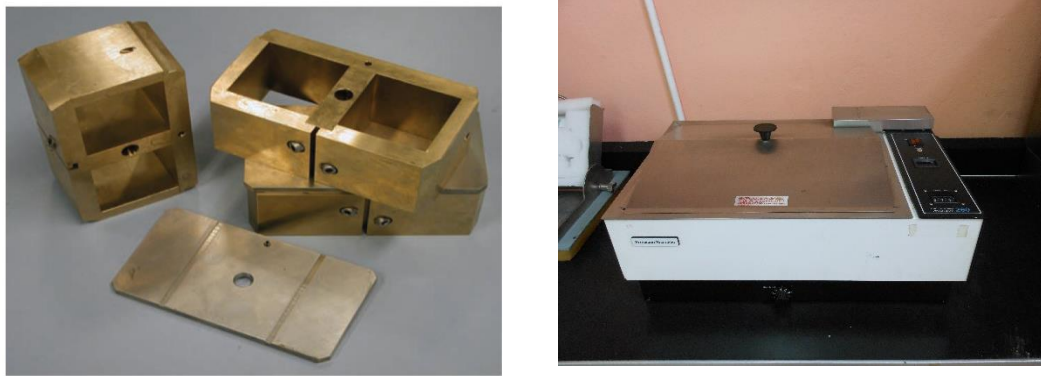


FIGURA 175. MOLDES DE FRAGUADO Y CAMARA DE BAÑO MARIA PARA LA COMPROBACIÓN DE RESISTENCIA COMPRESIVA EN UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO.

Coloque el molde cerrado que contiene la lechada de cemento espumado en un baño de agua a presión atmosférica, cure la muestra y determine la resistencia a la compresión de acuerdo con la norma ISO 10426-2:2003.



FIGURA 176. MOLDES PARA LA PRUEBA DE RESISTENCIA AL ESFUERZO COMPRESIVO EN UNA LECHADA ESPUMADA.

La prueba para determinar el esfuerzo compresivo, nos indica qué tan grande es el tiempo de espera necesario, entre la colocación de una lechada y la siguiente operación a desarrollar en el pozo.

Esta prueba también se hace para regular ciertos requerimientos.

Los laboratorios deben realizar este tipo de pruebas, de acuerdo a las dos opciones recomendadas por el API, prueba destructiva y prueba no destructiva.

Los estándares para la prueba destructiva señalan que, un espécimen de cemento debe ser curado para una temperatura y tiempo dados (10 a 400°F) y presión (atmosférica hasta 3,000 psi), luego llevado a una prensa hidráulica para someterlo a presión con tal fuerza hasta que físicamente se destruya.

La prueba no destructiva es realizada en un Analizador Ultrasónico de Cemento -UCA- (Figura 11.4). En esta prueba, una lechada es curada bajo temperatura y presión mientras una señal es transmitida a través del espécimen para medir el tiempo de tránsito.

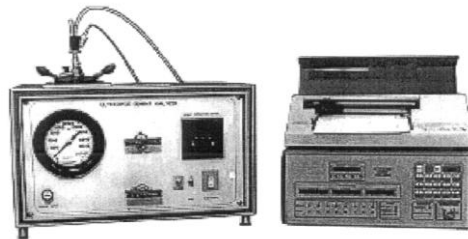


FIGURA 177. ANALIZADOR ULTRASÓNICO DE CEMENTO (UCA).

Este tiempo de tránsito es trasladado a valores de resistencia al esfuerzo compresivo (psi).

Un display del UCA muestra permanentemente el comportamiento actual de la lechada, grabando dos resultados específicos, 50 y 500 psi, y genera una gráfica de tiempo vs resistencia en cualquier tiempo mientras dure la prueba. La lechada de prueba es preparada usando uno de los dos métodos.

El método principal involucra el mezclado de la lechada de cemento poniendo ésta en dos cubos de 2 pulgadas por lado, para la prueba destructiva, o una celda del UCA para la prueba no destructiva. Para la prueba atmosférica destructiva, el cubo o molde es colocado dentro de un baño de agua mantenido a la temperatura de prueba, y curado por el tiempo deseado antes de que se proceda a su destrucción.

Para una prueba curada a presión, la lechada es colocada dentro de la cámara de curado del UCA, inmediatamente presurizada a la presión de prueba del API, y calentada a temperatura de prueba incrementándose hasta alcanzar la BHCT a una velocidad constante, para luego incrementar la temperatura más lentamente hasta alcanzar la BHST y mantenida por el tiempo deseado.

El segundo método consiste en usar un consistómetro para pre-acondicionar la lechada antes de ponerla en el molde o celda de curado.

La presión de curado de la muestra de cemento es colocada en un consistómetro atmosférico o presurizado después de mezclarla. La temperatura y presión en la lechada será incrementada a condiciones circulante de fondo de pozo.

Luego la lechada será enfriada a 194 °F (si fuese necesario) y transferida a una cámara de curado pre-calentada.

Anexo

La lechada es entonces calentada o enfriada a la temperatura de prueba deseada mientras se mantiene la presión de prueba. La presión y temperatura finales se mantendrán por el tiempo de prueba deseado. La temperatura de prueba para este método usualmente es la misma temperatura que se encuentra en la cima de la columna de cemento, tal como ocurre con los liners.

Este método pre-acondicionará la lechada de cemento a las condiciones de fondo de pozo, antes de que este alcance las condiciones existentes en la zona donde quede la cima del cemento. El resultado de los valores de resistencia al esfuerzo compresivo, es más realista que con una lechada sin pre-acondicionamiento especial.



FIGURA 178. MUESTRAS DE CUBOS FRAGUADOS DE LECHADAS ESPUMADAS A DIFERENTE DENSIDAD, LISTAS PARA COMPROBAR SU ESFUERZO COMPRESIVO.

4.27 Determinación de la permeabilidad.

Para la determinación de la permeabilidad de la lechada de cemento espumado, se vierte la lechada de cemento espumado en moldes de ensayo de permeabilidad y se dejan curar en dichos moldes. Tenga cuidado de no dañar la muestra si la lechada de cemento espumado se vierte en un molde, de la cual al ser curada debe ser extraída o retirada de los moldes de curado, con calma, corte el sellado en el aparato de prueba. El curado debería llevarse a cabo bajo presión atmosférica, de igual forma como se realiza para la determinación de la resistencia a la compresión.



FIGURA 179. DISPOSITIVO PARA EL FRAGUADO DE UNA MUESTRA DE LECHADA ESPUMADA PARA POSTERIORMENTE DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DE LA MISMA.



FIGURA 180. CUBOS FRAGUADOS DE LECHADAS ESPUMADAS A DENSIDADES MENORES QUE EL AGUA PERO CON ALTA RESISTENCIA COMPRESIVA.

4.28 Determinación de otras propiedades de la base de la lechada de cemento sin espumar.

Una lechada de cemento espumado a presión atmosférica no se someterá a pruebas bajo presión. La aplicación de presión a una lechada de cemento espumado preparado a presión atmosférica puede comprimir la espuma, presentándose cambios en la densidad y en la relación de gas. Esto también puede permitir la contaminación en las pruebas para el tiempo de espesamiento en una prueba de alta presión-alta temperatura (HP-HT) en un consistómetro presurizado para cementos.

Para las pruebas siguientes, se debe preparar la lechada de cemento base sin espumar es decir sin el tensioactivo (s) de acuerdo con la norma ISO 10426-2:2003, en la Cláusula 5.

Después de haberse preparado y mezclado la lechada, se detiene el mezclador y se añade el tensioactivo (s) y se agita suavemente con una espátula para distribuirlo de manera uniforme en la lechada. Se recomienda que la lechada se transfiera suavemente desde el recipiente de mezcla a un vaso de precipitados y volver a agitar tres veces para asegurar una distribución uniforme del agente tensioactivo (s). El uso de una pequeña cantidad de un material destinado a la prevención o destinado a romper el arrastre de aire en los lodos que no se espuman, está permitido en estas pruebas.

4.29 Determinación del tiempo de espesamiento.

Como el tensioactivo (s) puede afectar el tiempo de espesamiento, la prueba de tiempo de espesamiento se realiza normalmente utilizando un consistómetro HT-HP estándar sobre la lechada de cemento base sin espumar que contendrá el tensioactivo (s).

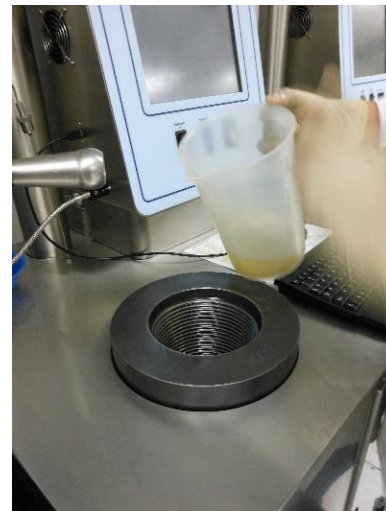


FIGURA 181. CONSISTÓMETRO DE ALTA PRESIÓN Y ALTA TEMPERATURA PARA LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE ESPESAMIENTO EN UNA LECHADA ESPUMADA.

Pruebas de Tiempo Bombeable.

El tiempo bombeable de una lechada, es aquel en el que ésta permanece en estado fluido a condiciones de prueba, a temperatura y presión de fondo del pozo.

Esta prueba es desarrollada en un consistómetro para alta temperatura y alta presión HP-HT (Figura 11.3. Celda BP, Potenciómetro). Algunos laboratorios pueden practicar pruebas arriba de 5000 °F Y 27,500 psi, y 750°F y 50,000 psi.



Figura 11.3 : Consistómetro Presurizado

FIGURA 182. TIPOS DE CONSISTOMETROS HP-HT CON SU CELDA, POTENCIÓMETRO Y CON UNA MUESTRA DE LECHADA ESPUMADA DESPUES DE SU TIEMPO DE ESPESAMIENTO.

Anexo

Para correr una prueba de tiempo bombeable es indispensable contar con los siguientes datos:

- a) Temperatura Circulante de Fondo -BHCT -, o Temperatura Estática de Fondo - BHST -, o Gradiente de Temperatura GT.
- b) Profundidad a la que se va a hacer la operación.
- c) Tipo de operación.
- d) Tiempo bombeable requerido.
- e) Densidad de la lechada.
- f) Cédulas de calentamiento API.
- g) Presencia de gas.
- h) Presencia de arcillas.
- i) Tipo de fluido de perforación.
- j) Zona salada (domo salino).

4.30 Determinación de la pérdida de fluido por Filtrado.

Los ensayos o pruebas realizados para obtener la Pérdida de fluido sobre una lechada de cemento espumado preparado a la presión atmosférica, pueden no dar resultados fiables. Los valores de pérdida de fluido obtenidos de una lechada de cemento espumado son más bajos que los de una lechada de cemento base sin espumar. La pérdida de fluido de la lechada base de cemento sin espumar se utiliza normalmente como un indicativo de la pérdida de fluido de la lechada de cemento espumado.



FIGURAS 183. CONSISTÓMETRO ATMOSFÉRICO 165-AT, EQUIPO FILTRO PRENSA FANN, MUESTRA DE FILTRADO EN UNA PROBETA POR PRESIÓN EXCESIVA Y CRONOMETRO A 30MIN COMO LO INDICA LA NORMA API 10-B2 PARA REALIZAR ESTA PRUEBA.

Realizar la prueba de pérdida de fluido estático en la lechada base de cemento sin espumar que contiene el tensioactivo (s) de acuerdo con la norma ISO 10426-2:2003, Cláusula 10.

Prueba de Pérdida por Filtrado.

Una prueba de pérdida por filtrado determina la relativa efectividad de una lechada de cemento para retener su fase acuosa, o para perder una porción de esta fase como filtrado hacia la formación.

Un control insuficiente de pérdida de filtrado da como resultado una lechada deshidratada y puenteada, evitando que esta pueda ser bombeada hasta su posición final; y dejando un exceso de cemento dentro del casing o revestidor que deberá ser molido durante operaciones de cementación forzada.

La prueba de pérdida por filtrado se desarrolla en una celda estática de prueba (Figura 11.2). La prueba de pérdida de filtrado usualmente es desarrollada con N₂ a una presión de 1,000 psi, aplicada a la lechada de cemento mientras esta contacta con una malla 325 mesh.

El filtrado es forzado a salir de la lechada de cemento a través del filtro y recuperado durante un máximo de 30 minutos. La malla 325 es usada como una medida estándar para simular un promedio de la formación, si se tiene muestra de los especímenes estos se pueden utilizar.

Antes de que los valores de la pérdida por filtrado se vayan a reportar, la cantidad de filtrado recuperada se debe de multiplicar por 2, para convertir el área de filtrado de la malla o formación a 7.1 pulgada² (4,580 mm²), superficie estándar establecida por el API.

La prueba estática de pérdida por filtrado es desarrollada de acuerdo a los procedimientos establecidos por el API. La celda para prueba de pérdida por filtrado estática, está disponible en dos tamaños, largo y corto.

La celda larga almacena mayor volumen de lechada de cemento, siendo una prueba más larga. Este tipo de celda puede generar resultados más confiables en algunos casos para lechadas con un mínimo o sin controlador de filtrado.

La lechada de cemento es preparada y colocada dentro de un consistómetro atmosférico o presurizado, incrementando la temperatura a la circulante de pozo (194°F máxima para condiciones atmosférica).

Anexo

En el caso del consistómetro presurizado, también se incrementará la presión.

Si la temperatura es superior a 194 °F, la lechada será enfriada a 194 °F y entonces transferida a la celda del equipo de pérdida por filtrado la que deberá estar precalentada a 194 °F, se le aplicará una presión diferencial de 1,000 psi y se recuperará el filtrado en la parte inferior a través de un tubo de drene o en su caso en una probeta graduada.

La temperatura y presión se mantendrán todo el tiempo que dure la prueba, máximo de 30 minutos.

Filtro de Prensa Estático

En cualquier trabajo de cementación en pozos profundos, la lechada deberá contener aditivo para controlar la pérdida por filtrado a alta temperatura de una manera eficiente.

Los aditivos para controlar la pérdida por filtrado mantienen las propiedades del diseño de la lechada, para evitar la deshidratación del cemento.

Un buen control de la pérdida por filtrado ofrece importante protección durante la cementación primaria, particularmente cuando el espacio anular de la T.R. es reducido, o donde se encuentran secciones altamente permeables.



FIGURA 184. FILTRO PRESNA, EQUIPO PARA LA REALIZACIÓN DE LA PRUEBA DE PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO EXCESIVO.

Anexo

El control del filtrado también puede prevenir los siguientes problemas potenciales de cementación:

- Alta presión de fricción o cierre prematuro.
- Daño en formaciones sensibles al agua.
- Migración de gas a través del anular.

Los lineamientos para el control de la pérdida por filtrado varía con el área y experiencia. Para cementación de la T.R., una pérdida por filtrado de 150 a 300 cc/min es típicamente usada.

Para liner y sistemas de cementación forzada, una pérdida de filtrado de 50 a 100 cc/30 minutos es común. En áreas donde existe una potencial migración de fluido, un valor de la pérdida por filtrado menor a 50 cc/30 minutos es práctica normal.

Estos valores son recomendados para únicamente: experiencia en áreas específicas que dicten un control apropiado del filtrado. Un buen control de la pérdida por filtrado también es necesario para una exitosa cementación forzada.

En este caso, un mal control de la pérdida por filtrado puede dar como resultado una rápida deshidratación del cemento, antes de ni siquiera haber iniciado a forzar la lechada. Si la pérdida de filtrado es controlada, el cemento podrá contactar completamente el intervalo, formando pequeños nodos de cemento deshidratado a través de zonas permeables que nos permitirán desarrollar una presión de forzamiento.

En trabajos de cementación en pozos con alta temperatura, los aditivos: HALAD-413, HALAD-361 A, HALAD-567, HALAD-600 LE, HALAD-700 ofrecen todos ellos excelentes propiedades para el control de la pérdida por filtrado. El aditivo LÁTEX 2000, también puede ser usado para proveer excelente control de filtrado en el fondo del pozo.

4.31 Determinación de las propiedades reológicas.

El uso de un viscosímetro rotacional empleado en una lechada de cemento espumado puede dar como resultado la separación del gas en la lechada, proporcionándonos resultados erróneos. Una correlación puede ser usada o empleada para convertir las propiedades reológicas de la lechada base no espumada a la de una lechada de cemento espumado con diferentes calidades de espuma para simular las condiciones de campo.



FIGURA 185. VISCOSÍMETRO ROTACIONAL FANN 35-A EQUIPO PARA EL DESARROLLO DE LA PRUEBA DE COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA LECHADA.

Realice la prueba reológica en la lechada base de cemento sin espumar que contiene el tensioactivo (s) de acuerdo con la norma ISO 10426-2:2003, Cláusula 12.

Prueba de Reología.

Un viscosímetro rotacional, coaxial, tipo cilindro, es usado para determinar las propiedades reológicas de las lechadas de cemento de acuerdo a lo establecido por el API.

Para esta prueba, la lechada de cemento se acondiciona por 20 minutos en un consistómetro atmosférico (Figuras 4.31.2), el que ha sido precalentado a la temperatura de prueba (no exceder los 190° F).

El consistómetro presurizado también puede ser usado para preacondicionar la lechada. Luego de que la lechada ha sido pre-acondicionada, esta es llevada a la copa precalentada del viscosímetro, colocada bajo el bob y camisa giratoria, y levantada a un nivel especificado.



FIGURA 186. CONSISTÓMETROS ATMOSFÉRICOS 165-AT EQUIPO NECESARIO PARA EL DESARROLLO DE LA PRUEBA DE COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA LECHADA.

Anexo

La rotación de la camisa se inicia, y el viscosímetro tomará las lecturas a varias velocidades de acuerdo al API o especificaciones del cliente.

Los datos podrán entonces ser ingresados a una computadora junto con los datos pertinentes del pozo, para calcular el gasto de bombeo para alcanzar un régimen de flujo turbulento o tapón, el gasto máximo que se puede alcanzar sin fracturar la formación, el caballaje hidráulico requerido para el trabajo, la presión de fricción, y el tiempo requerido para efectuar la operación.

[1] ASTM C 109, Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (usando 2 in o [50-mm] en probetas cúbicas).

Capítulo V. CEMENTACIÓN ESPUMADA

5.1 Historia del Cemento espumado.

¿Pero cómo se ha desarrollado esta tecnología?, a continuación presento un cuadro sinóptico del avance en el desarrollo de esta tecnología.

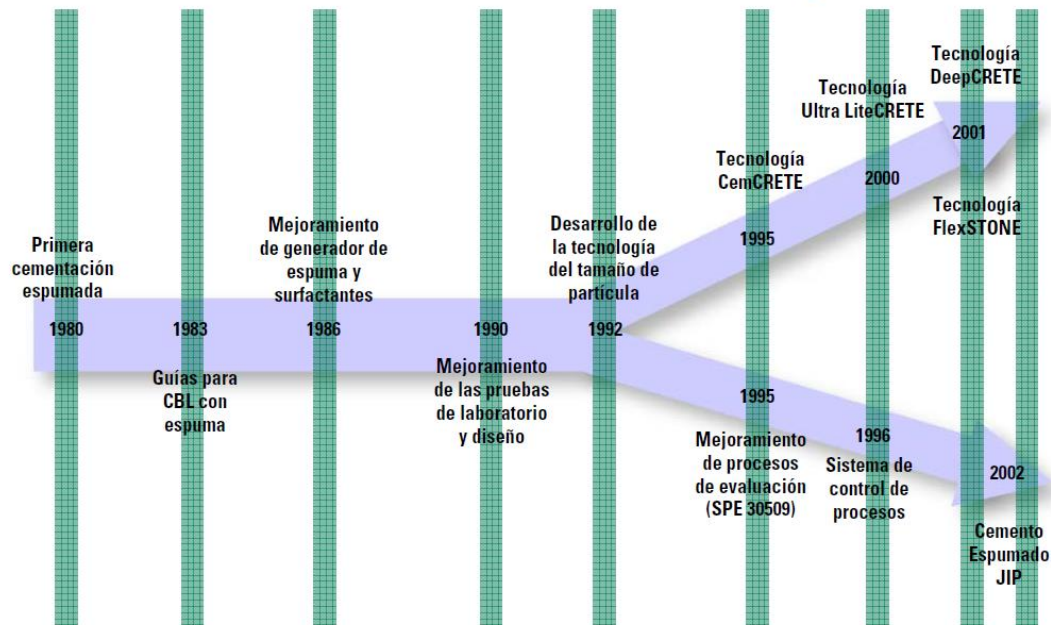


FIGURA 187. DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA ESPUMADA A TRAVÉS DEL TIEMPO

5.2 Como se genera la espuma en la Cementación.

El nitrógeno en forma de gas se introduce en un flujo de lechada de cemento conteniendo un agente o aditivo espumante y un estabilizador de espuma a través de un disco dispersante que presenta una serie de pequeños orificios para crear una caída de presión de al menos 250-300 [psi], dicha presión debe ser alcanzada a lo largo del disco con el objeto de producir suficiente energía de corte que resulta en una espuma estable con pequeñas burbujas.

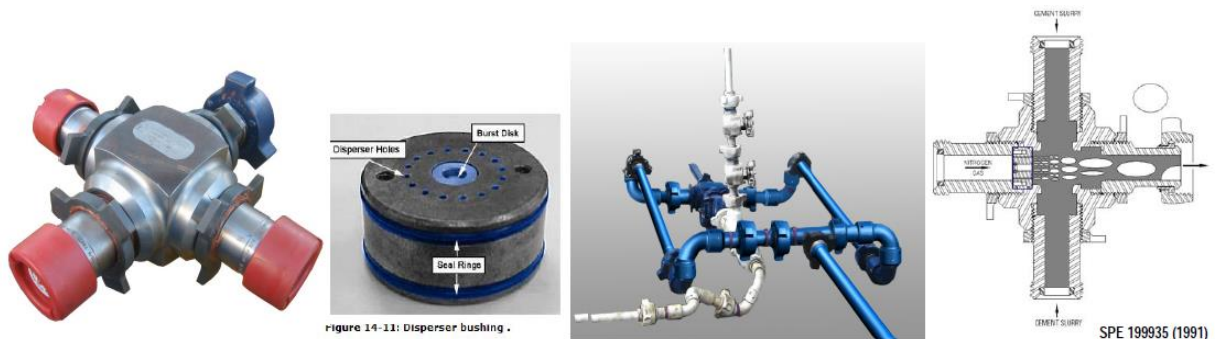


FIGURA 188. DISPOSITIVOS ENCARGADOS DE LA GENERACIÓN DE ESPUMA EN LAS LECHADAS DE BAJA DENSIDAD.

5.3 Ejecución de la operación de Cementación en el campo.

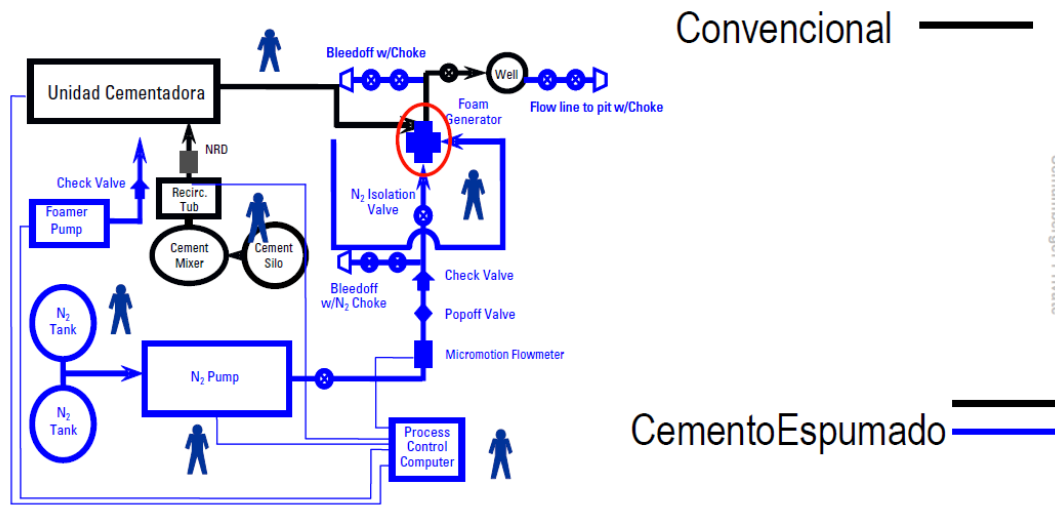


FIGURA 189. OPERACIÓN DE CEMENTACIÓN ESPUMADA EN EL CAMPO.

Explicación:

5.4 Propiedades del Cemento espumado.

Si bien la calidad de la espuma afecta notablemente las pruebas estándares o convencionales establecidas en el API, veremos a continuación como se generan ahora en las lechadas espumadas o en los cementos espumados.

5.4.1 Prueba de Densidad.

La densidad de la espuma depende de la densidad de la lechada base y de la calidad de la espuma. La calidad de la espuma (QE) depende del gasto del nitrógeno, presión y temperatura. Por otra parte es fácil comprender y entender que a más nitrógeno más alta calidad de espuma, resultando más baja densidad en la lechada.

5.4.2 Estabilidad.

Con el diseño correcto, espumante/estabilizador y procedimiento de mezcla, se puede producir un cemento espumado estable.

5.4.3 Prueba de Reología.

- I. La espuma no es reproducible, pues no posee una descripción reológica única.
- II. La geometría del sistema influye en el comportamiento.
- III. La reología está continuamente cambiando en el pozo.

La viscosidad de la espuma generalmente incrementa con la calidad, exhibiendo un incremento rápido cuando la calidad llega arriba de 25%.

5.4.4 Espuma y Presión (Definición de QE)

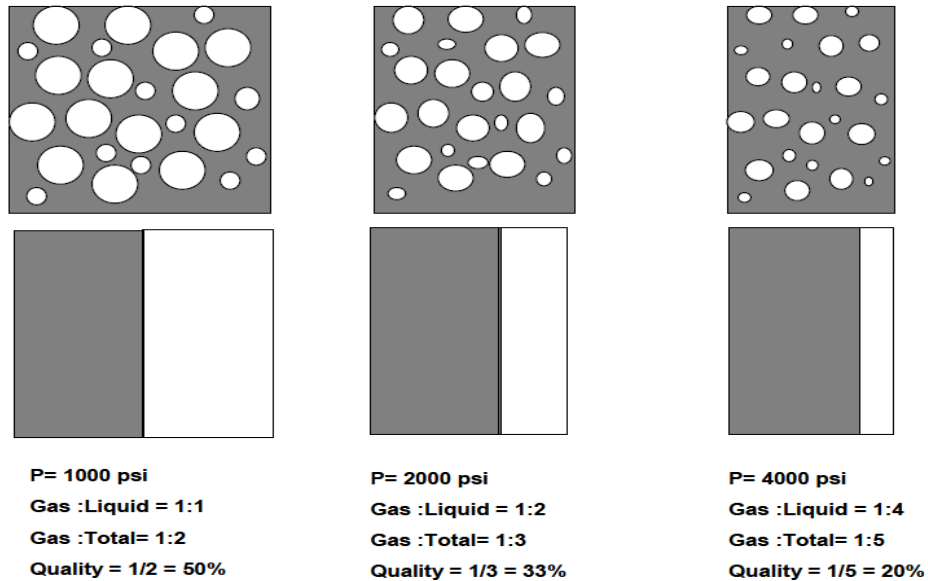


FIGURA 190. DEFINICIÓN GRÁFICA DE LA CALIDAD DE ESPUMA EN UNA LECHADA ESPUMADA O DE BAJA DENSIDAD.

5.4.5 Prueba en la Pérdida de Filtrado.

Se presenta un incremento en la tasa de gas (Calidad) que lleva a disminuir la pérdida de Filtrado, comparado con la lechada base.

- I. Las pruebas requieren equipo especial de laboratorio para mezclar y manejar la espuma presurizada.
- II. Poca pruebas se han hecho para cuantificar la pérdida de filtrado de la espuma.
- III. La pérdida de filtrado de una lechada espumada es al menos tan buena como la exhibida por el sistema base.

5.4.6 Resistencia a la compresión.

- I. El desarrollo del esfuerzo depende de la lechada base y de la calidad del cemento.
- II. El desarrollo de resistencia es relativamente bueno comparado con otras tecnologías de baja densidad.
- III. La resistencia disminuye rápidamente si la calidad es mayor a 50%.

5.4.7 Permeabilidad.

- I. Depende de la lechada base y de la calidad del cemento.
- II. Depende del tamaño de la burbuja y la interconectividad de la misma.
- III. La permeabilidad incrementa rápidamente cuando la calidad está arriba de 35%.

5.4.8 Agua libre.

El mismo mecanismo que resulta en agua libre y segregación en la lechada base también contribuyen en segregar las lechadas espumadas.

La relación entre propiedades FÍSICAS ESPECÍFICAS (Resistencia a la compresión, permeabilidad, gravedad específica, peso volumétrico, ductibilidad, etc) y el tamaño de burbuja & distribución no están bien documentadas ni definidas. Sin embargo el pensamiento de la industria actual es que las mejores propiedades como: más alta resistencia, más baja permeabilidad, mas ductibilidad, etc son obtenidas de un cemento espumado con:

- a. Pequeños tamaños de burbujas < 100 microns día.
- b. Distribución angosta del tamaño de burbuja.
- c. Inter conexión mínima de burbujas.
- d. Estas propiedades también varían dependiendo de la calidad de la espuma.

5.4.9 Estabilidad.

La estabilidad puede ser directamente influenciada por los siguientes parámetros:

- a) Fluido base-químicos y propiedades físicas (Surfactante y estabilizador de espuma).
- b) Calidad de la espuma.
- c) Energía de mezcla y método.
- d) Historia y medio ambiente (Corte, Presión y Temperatura).
- e) Contaminación.
- f) Efecto U.

5.5 Beneficios del cemento espumado.

- a) Bajas densidades pueden ser alcanzadas fácilmente.
- b) Buena resistencia a la compresión y permeabilidad moderada.

- c) Buenas propiedades de pérdida de filtrado.
- d) Baja el módulo de Young del sistema de cemento base.
- e) Récorcs probados para la mitigación de flujo de aguas someras.
- f) Nitrógeno en la lechada mantiene la presión sobre la formación mientras el cemento va a través de su etapa de transición y por lo tanto controlando el flujo de agua en la lechada.
- g) Flexibilidad de densidad.
- h) Puede ser ajustada fácilmente debido a cambios de último minuto.
- i) Reduce las pruebas de laboratorio.

5.6 Compatibilidad / versatilidad.

1. Espumar diferentes composiciones de cemento (incluyendo lodos & espaciadores)
2. Lechadas que rinden bastante.
3. Logística, espacio en el taladro o capacidad.

5.7 Tipos de trabajo.

5.7.1 Gasto de N2 Constante.

La densidad bombeada a pozo no es constante. La densidad en el tope será menor que la densidad en el fondo. La densidad resultante puede ser promediada como sigue:

$$\rho \text{ Promedio} = (\rho \text{Tope} + \rho \text{Fondo})/2$$

5.7.2 Gasto de N2 por etapas.

La columna de cemento espumado es dividida en varias etapas, cada una con un gasto de nitrógeno diferente dando resultado en una densidad constante relativa del tope al fondo.

Esto se logra usando concentraciones de nitrógeno diferentes a través del área de interés. El diseño es calculado usando el módulo de cemento Espumado CemCADE.

5.7.3 Proceso controlado.

La lechada base, espumante y la relajación del gasto de nitrógeno son controlados por una computadora central.

5.7.4 Proceso no controlado.

Las tasas son monitoreadas y controladas por operadores y cualquier cambio es comunicado por radio.

Tipos de trabajo de Cementación Espumada.

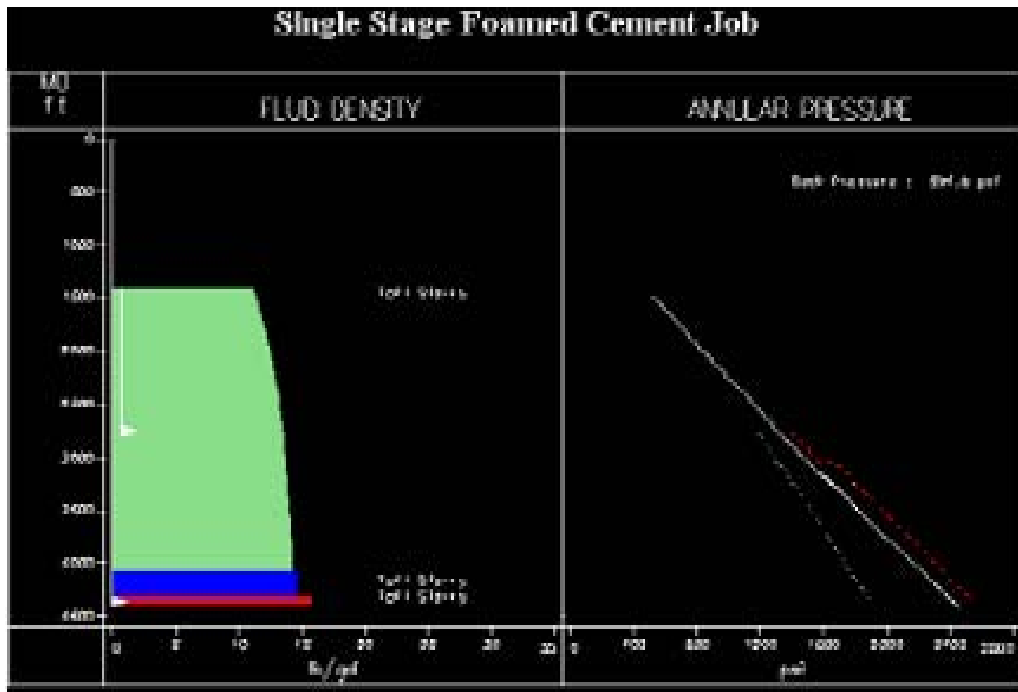


FIGURA 191. TASA CONSTANTE DE NITRÓGENO.

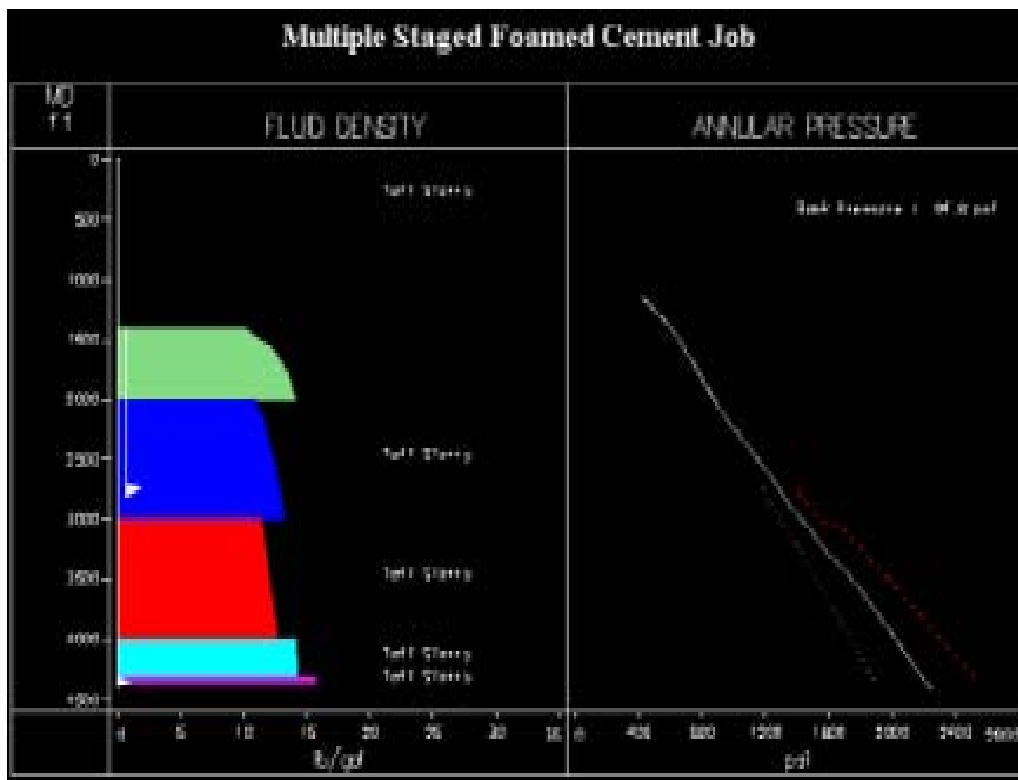


FIGURA 192. VARIACIÓN DE LA TASA DE NITRÓGENO.

5.8 Parámetros claves del cemento espumado.

5.8.1 La calidad de la espuma.

Cementos espumados son usualmente caracterizados por su calidad (FQ) la cual es la relación del volumen del gas a el volumen del sistema total expresado en porcentaje.

$$FQ = \frac{(Densidad Lechada base - Densidad Lechada Espumada)}{Densidad Lechada base}$$

5.8.2 Densidad de la Espuma.

La densidad de una lechada de cemento espumado es constante en superficie pero varía en el pozo puesto que el gas nitrógeno es afectado por cambios de presión y temperatura en el pozo.

$$Densidad promedio = \frac{(Densidad Tope del cemento + Densidad base del cemento)}{2}$$

5.8.3 Rendimiento de la espuma.

El rendimiento de la espuma determina el volumen total de la lechada base en la espuma y la densidad de la lechada base.

$$Rendimiento lechada espumada = \frac{(Rendimiento lechada base * Densidad Lechada Base)}{Densidad promedio}$$

SCF* OF NITROGEN PER BARREL OF SPACE															
PRESSURE	TEMPERATURE DEGREES FARENHEIT														
	PSIG	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
900.010	100.	40.	38.	37.	35.	34.	33.	32.	31.	30.	29.	28.	28.	27.	26.
	200.	79.	76.	74.	71.	69.	66.	64.	62.	60.	58.	57.	55.	54.	52.
	300.	119.	115.	110.	106.	103.	99.	96.	93.	90.	88.	85.	83.	81.	78.
	400.	159.	153.	147.	142.	137.	132.	128.	124.	120.	117.	114.	110.	107.	105.
	500.	199.	191.	184.	177.	171.	166.	160.	155.	151.	146.	142.	138.	134.	131.
	600.	241.	231.	221.	213.	205.	198.	191.	185.	179.	173.	168.	163.	159.	155.
	700.	281.	269.	258.	248.	239.	230.	222.	215.	208.	202.	196.	190.	185.	180.
	800.	321.	307.	295.	283.	273.	263.	254.	245.	237.	230.	223.	217.	211.	205.
	900.	361.	346.	332.	319.	306.	295.	285.	275.	266.	258.	250.	243.	236.	230.
	1000.	401.	384.	368.	353.	340.	328.	316.	305.	295.	286.	277.	269.	262.	255.
	1100.	441.	422.	404.	388.	373.	360.	347.	335.	324.	314.	304.	295.	287.	279.
	1200.	480.	460.	441.	423.	407.	392.	378.	365.	353.	341.	331.	321.	312.	304.
	1300.	520.	497.	477.	457.	440.	423.	408.	394.	381.	369.	358.	347.	337.	328.
	1400.	559.	535.	512.	492.	473.	455.	438.	423.	409.	396.	384.	373.	362.	352.
	1500.	598.	572.	548.	526.	505.	486.	469.	452.	437.	423.	410.	398.	387.	376.
	1600.	637.	609.	583.	559.	537.	517.	498.	481.	465.	450.	436.	423.	411.	400.
	1700.	675.	645.	618.	593.	570.	548.	528.	510.	492.	477.	462.	448.	436.	424.
	1800.	713.	682.	653.	626.	601.	579.	558.	538.	520.	503.	487.	473.	460.	447.
	1900.	751.	718.	687.	659.	633.	609.	587.	566.	547.	529.	513.	498.	483.	470.
	2000.	788.	753.	721.	692.	664.	639.	616.	594.	574.	555.	538.	522.	507.	494.

Reference conditions for the SCF of gas are 60°F and 14.7 psi

FIGURA 193. GRÁFICA DEL FACTOR DE VOLUMEN DE NITRÓGENO, COMPORTAMIENTO DEL GAS.

5.8.4 Efectos sobre el cemento espumado por efecto U.

Puede ocurrir cuando la presión hidrostática dentro del revestidor excede la suma de la hidrostática en el espacio anular más todas las presiones de fricción.

$$P_{hidrostática\ Revestidor} > P_{hidrostática\ Anular} + P_{fricción\ Revestidor} + P_{fricción\ Anular}$$

Ocurre durante la cementación solo cuando:

$$La\ \rho\ de\ la\ lechada\ y/o\ \rho\ del\ espaciador > \rho\ lodo,\ y\ el\ espaciador\ y/o\ lechada\ estan\ dentro\ del\ revestidor$$

Problemas potenciales para la espuma en condiciones de caída libre, donde la baja presión conduce a una sobre-expansión:

1. Muy alta FQ.
2. Espuma Inestable.
3. Las burbujas se expanden, se rompen o se juntan.

5.9 Requerimientos del Equipo de cementación Espumada y del Personal.

Lista de equipo y personal extra, pero necesarios para la operación de un trabajo espumado:

Equipo.

1. Caja Marina (Control de Proceso).
2. Espumante/Estabilizador, Patín de Bombeo.
3. Bomba(s) de Nitrógeno.
4. Tanques de Nitrógeno (usualmente 2).
5. Tubería de Tratamiento.

Personal.

1. Coordinador de Cemento Espumado.
2. Operador de Bomba de Nitrógeno.
3. Ayudante de Cemento Espumado.
4. Cementador.
5. Ayudante de Cementador.

5.10 Equipo.

5.10.1 Caja Marina.

La caja marina provee de un sistema de control automatizado de cemento espumado, es decir; Nos proporciona un gasto de N2 y Espumante/Estabilizador que dependes del gasto de la lechada base.

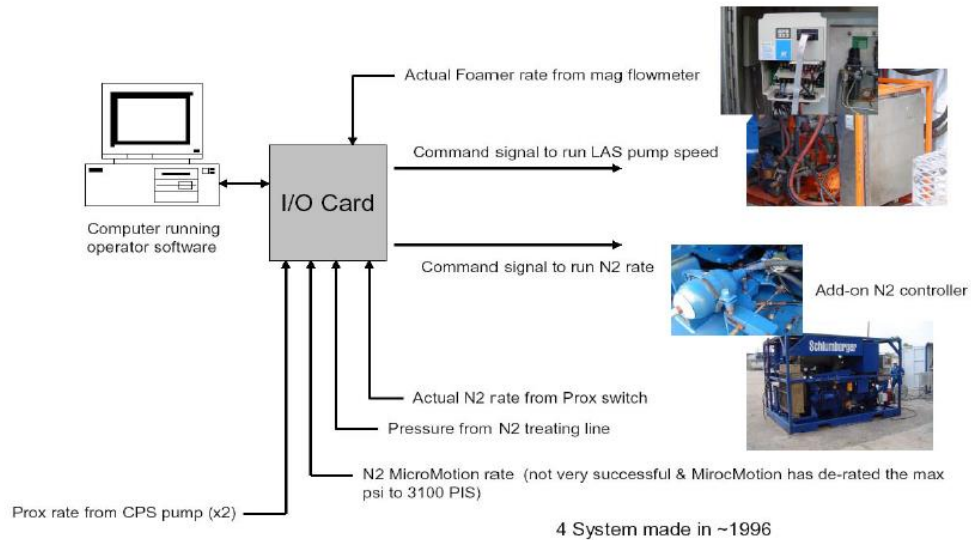


FIGURA 194. REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO DE CEMENTACIÓN ESPUMADA

Ventajas:

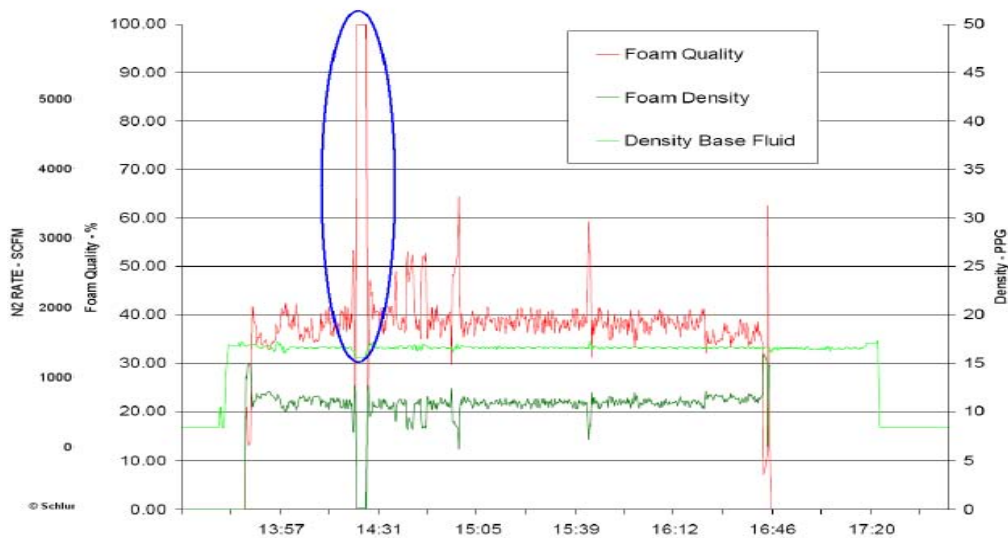


FIGURA 195. REQUERIMIENTOS DEL SOFTWARE DEL EQUIPO DE CEMENTACIÓN ESPUMADA

5.10.2 Inyección de Espumante & Estabilizador.

Requerimientos Generales.

- 1) ~ 1 gal/barril (0.1 gal/sack por aditivo)
- 2) Medición de precisión.
- 3) Bombas de Aire no recomendadas (cavitación)

5.10.3 Métodos de inyección de Espumante.

- 1) Bomba de Alta presión en líneas de AP.
- 2) Adición de espumante en la succión de la bomba cementadora (más común).

5.10.4 Unidades Eléctricas con Control de Procesos.

- 1) CMP 713.
- 2) CUP 104.

5.10.5 Unidades Hidráulicas con Control de Procesos.

SUP 51X, 52X o 53X

5.10.6 Bomba de nitrógeno.



FIGURA 196. REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO DE CEMENTACIÓN ESPUMADA (BOMBA DE N2)

La comba convierte el nitrógeno líquido a gas y lo bombea al pozo.

1. 11' X 8' X 8'
2. 18,500 lbs.
3. Requiere aire, agua, diesel.
4. 3,000scf/min máxima.
5. Capacidad Real: 2,600scf/min.

5.10.7 Tanques de Nitrógeno.



FIGURA 197. REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO DE CEMENTACIÓN ESPUMADA (TANQUE DE N₂)

Los tanques nos ayudan a almacenar el Nitrógeno Líquido empleado. Su interior es de hacer inoxidable. Su cubierta tiene un aislante especial y además nos soporta presiones negativas.

Son dispositivos de seguridad para el alivio de presión. Estos tanques están montados en un patín con un marco de levante 15.25'x8'x8.5', 20,000 lbs, 2,000 gal cada uno= 160,000 SCF.

5.11 Personal.

5.11.1 Generador de Espuma y Accesorios de Alta Presión.

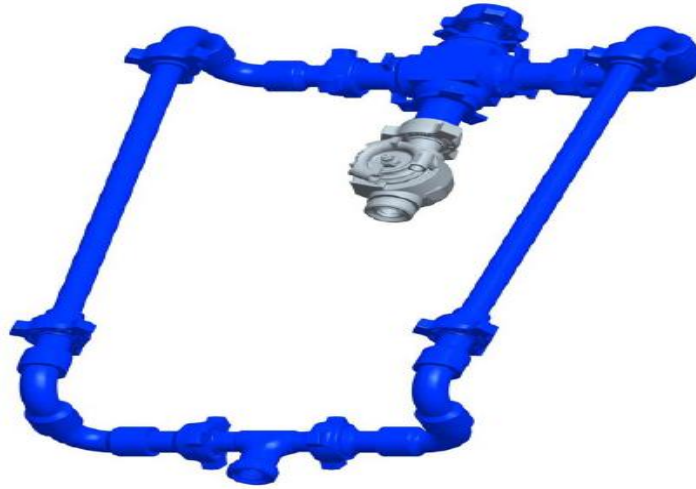


FIGURA 198. REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO DE CEMENTACIÓN ESPUMADA (GENERADOR DE ESPUMA)

Accesorios de Alta Presión.

1. Manifold de la cruceta de Espuma.
2. Cruceta de Espuma
 - I. Woods Machine.
3. Disco Dispersante.
 - a) Disco de Ruptura
 - b) Mantenimiento.
 - c) Distribuidor de Burbujas.
 - d) Diferencial de 250 [psi] requerido
 - e) Diferencial de 500 [psi] recomendado.
 - f) Selección: 3/64" y 3/32"

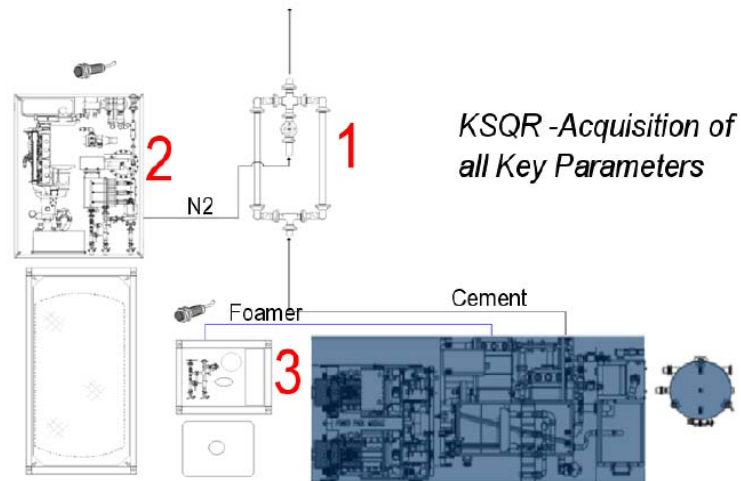


FIGURA 199. ACCESORIOS DE ALTA PRESIÓN DEL EQUIPO DE CEMENTACIÓN ESPUMADA

5.11.2 Inyección de Espumante y Estabilizador.

Requerimientos Generales.

1. ~1 gal/barril (0.1 gal/sack por aditivo)
2. 1-10 GPM
3. Medición de Precisión
4. Bombas de Aire no recomendadas.

5.11.3 Métodos de Inyección de Espumante.

- 1) Bomba de Alta presión en Líneas de AP.
- 2) Adición de espumante en la succión de bomba cementadora (más común)

5.11.4 Unidades Eléctricas con Control de Procesos.

- a. CMP 713.
- b. CUP 104.

5.11.5 Unidades Hidráulicas con Control de Procesos.

SUP 51X, 52X, o 53X

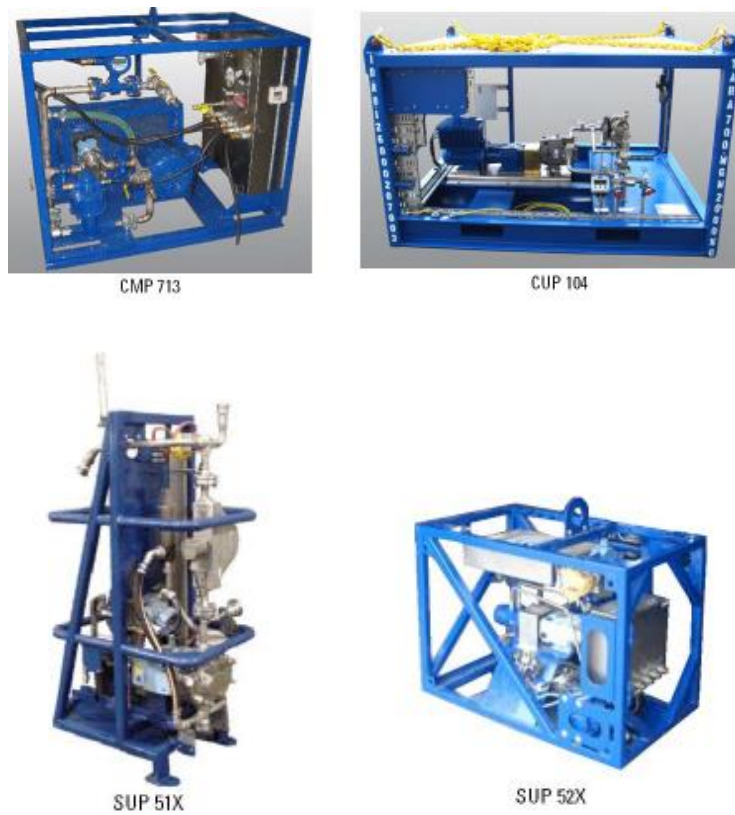


FIGURA 200. TIPOS DE UNIDADES HIDRÁULICAS PARA EL CONTROL DE PROCESOS.

5.12 Manifold Removedor de Espuma.

- I. Removedor de espuma inyectado tan cerca como sea posible detrás de la válvula #1
- II. Distancia entre la válvula #1 y #2 >+ 10 [ft] para permitir la mezcla adecuada del removedor de espuma con la lechada de cemento espumada.
- III. Abrir la válvula #1 a una diferencial ~ 500 [psi] (máximo 700 [psi])
- IV. Abrir la válvula #2 a una diferencial ~ 200 [psi]

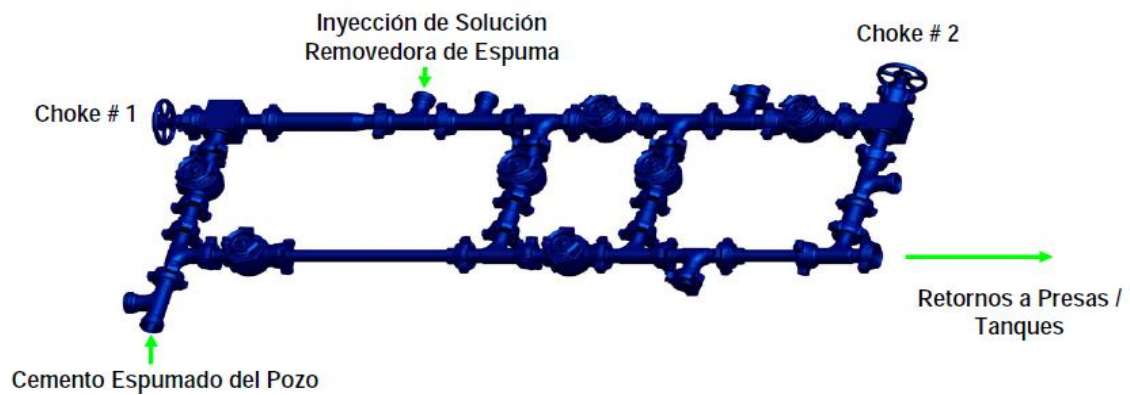


FIGURA 201. ACCESORIOS DE ALTA PRESIÓN DEL EQUIPO DE CEMENTACIÓN ESPUMADA

5.13 Permeabilidad del cemento espumado generado a diferentes presiones.

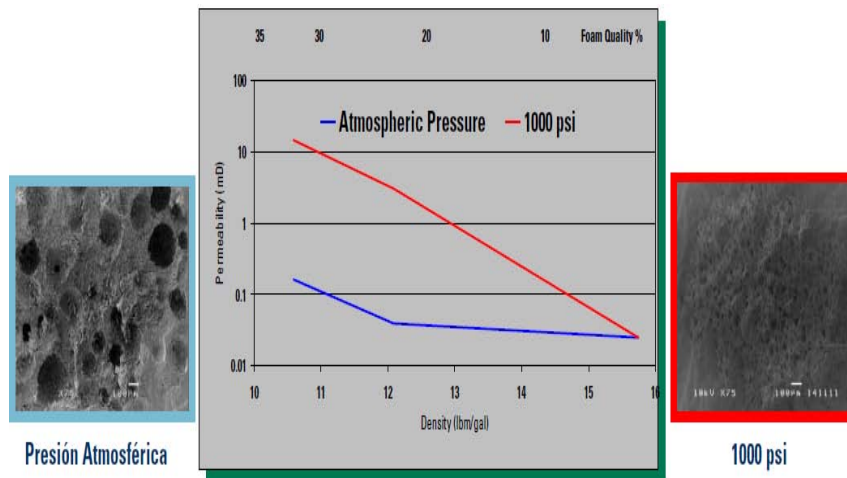


FIGURA 202. GRAFICA DE PERMEABILIDAD DEL CEMENTO ESPUMADO A DIFERENTES PRESIONES.

La estabilidad es afectada por la estructura de las burbujas y las propiedades de la lechada base.

La estructura de la burbuja es afectada por:

- Corte y Presión.
- Tasa de gas.
- Química y concentración del surfactante.
- Propiedades de la lechada base.

La permeabilidad depende de la distribución del tamaño de poro, lo cual no es controlada.

5.14 Conclusiones.

- La cementación con lechadas espumadas es una solución probada para muchas aplicaciones.
- Factible para revestidores sin Riser no profundos.
- Comprobado para controlar flujos de aguas someras.
- Reconocido por API en cementación con flujo de aguas someras.
- Flexibilidad en densidad pues es factible para perforación exploratoria con presiones de poro y fractura inciertas.
- Dificultad para correlacionar laboratorio a propiedades en el pozo.
- Agrega complejidad a la ejecución del trabajo.
- Agrega riesgos de HSE a las operaciones de cementación.
- Schlumberger es un proveedor líder de servicios de cementación espumada en el Golfo de México, USA.

BP Exploratory Drilling Programs
BHP Shenzi Development,
BHP Big Foot North
BHP Cascade
Total Matterhorn, Great White
Chevron Caterpillar Deep
Chevron Blind Faith
Chevron Bigfoot 1, 2, 3
Chevron Clear Leader & Inspiration
Kerr McGee Andros Deep
Anadarko Tonga



FIGURA 203. IMPLEMENTACIONES DE LA CEMENTACIÓN ESPUMADA EN EL GOLFO DE MÉXICO COLINDANDO CON LOS USA.

Capítulo VI. GRADIENTE TÉRMICO

6.1 Definición y obtención del gradiente térmico.

El gradiente Térmico se define de la siguiente forma:

$$GT = \frac{\text{Temperatura Estática de Fondo } [^{\circ}F] - \text{Temperatura Ambiente } [^{\circ}F]}{\frac{\text{Profundidad } [ft]}{100}}$$

6.2 Ejercicio: Caso de ejemplo para la obtención de los grados y presiones por cada metro de gradiente.

Se tiene una Solicitud de Diseño de una Lechada de cemento por parte de PEMEX para el pozo ARTESA 352 en el activo MUSPAC, en donde se solicita al Laboratorio de Ingeniería de Cementaciones y Estimulaciones de la Región Sur de Reforma, Chiapas: elabore el diseño de esta lechada de densidad de 1.90 [gr/cm³] a 1.60 [gr/cm³] por donde se hará circular por una TR de 7" a una Profundidad de 2170[mt].

Calcular:

- GT= Gradiente Térmico [°C] a los 2,244 [mt].
- TEF=Temperatura Estática de Fondo [°F/100ft] a la profundidad requerida a cementar.
- El número de Cédula API con la que se someterá el diseño de lechada en el Consistómetro Presurizado.
- Así como la Tcirculación y Pcirculación= Temperatura y Presión Circulante Real.
- Calcule el Rendimiento de la lechada para ambos casos de densidades.

HOJA DE SOLICITUD DEL DISEÑO DE UNA LECHADA DE BAJA DENSIDAD A ESPUMAR.




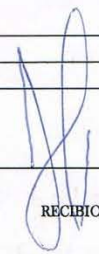
 <p>PEMEX EXPLORACION Y PRODUCCION ®</p>	<p>PETROLEOS MEXICANOS REGION SUR PERFORACION Y MANTENIMIENTO DE POZOS BASE OPERATIVA DE SERVICIO A POZOS SECC. CEMENTACIONES Y ESTIMULACIONES REFORMA CHIAPAS</p>	
LABORATORIO DE INGENIERIA DE CEMENTACIONES Y ESTIMULACIONES		
SOLICITUD DE DISEÑO DE LECHADA DE CEMENTO		
TRABAJO SOLICITADO <u>DISEÑO DE CEMENTO PARA TR 7" A 2170 M.</u>		
DATOS DEL POZO:		
POZO: <u>ARTESA 352</u>	ACTIVO <u>MUSPAC</u>	FECHA <u>21-ene-13</u>
TIPO DE LODO <u>EMULSION INVERSA</u>	DENSIDAD <u>1.31</u>	VP. <u>17</u> cp. <u>YP 20</u> lb/100pies ²
GEL <u>18/27</u>	SALINIDAD <u>S/D</u> ppm	TEMP. <u>67°</u> A <u>2244</u> m
TEMP. TOMADA DE: <u>ARTESA 351 (ESPEC.DE GR. 06/08/2012).</u>	GRAD. FRAC. <u>1.8</u>	GRAD. PORO <u>1.40</u>
DIAMETRO DE T.R. <u>7"</u>	PROF. <u>2170</u> m	
DISEÑO DE LA LECHADA		
DENSIDAD 1 <u>1.90</u> gr/cm ³	MOL : <u>67</u>	TIEMPO BOMBEABLE <u>5:00:00</u> hrs.
DENSIDAD 2 <u>1.60</u> gr/cm ³	MOL : <u>67</u>	TIEMPO BOMBEABLE <u>5:30:00</u> hrs.
DENSIDAD 3 <u>0.00</u> gr/cm ³	MOL : <u>0</u>	TIEMPO BOMBEABLE <u>0:00:00</u> hrs.
OBSERVACIONES <u>PREPARAR CON ADITIVOS DE HALLIBURTON</u>		
PREPARAR CON AGUA DE: _____		
ESFUERZO COMPRESIVO		
REALIZAR ESFUERZO COMPRESIVO EN ANALISADOR SONICO DE CEMENTO A DISEÑO		
DENSIDAD 1 _____ gr/cm ³	MOL : _____	TIEMPO _____ hrs.
TEMPERATURA : _____		
OBSERVACIONES _____		
 _____ ING. MARÍA GUADALUPE ESCAMILLA DURÁN. SOLICITÓ	 _____ RECIBIO	
La vida importa... ¡Cuidala!		

FIGURA 204. PROGRAMA DE SOLICITUD DEL DISEÑO DE UNA LECHADA DE BAJA DENSIDAD A ESPUMAR.

6.3 Obtención del Gradiente Térmico.

SOLUCIÓN:

a) GT= Gradiente Térmico [°C] a los 2,244 [mt].

A la profundidad de 2,244 [mt] se tiene una temperatura de 67 °C, convirtamos esa temperatura a [°F] y esa profundidad a [ft].

$$\begin{aligned}\text{°F} &= [(\text{°C})(1.8) + 32] \therefore \\ &= [(67)(1.8) + 32] \\ &= 152.6\end{aligned}$$

$$1[\text{mt}] = 3.28[\text{ft}] \therefore 2,244[\text{mt}] \left(\frac{3.28 [\text{ft}]}{1 [\text{mt}]} \right) = 7,360.32[\text{ft}]$$

NOTA: La temperatura ambiente en reforma Chiapas es de 25.5 °C

Sustituyendo en el Gradiente Térmico

$$GT = \frac{\text{Temperatura Estatica de Fondo } [^{\circ}\text{F}] - \text{Temperatura Ambiente } [^{\circ}\text{F}]}{\frac{\text{Profundidad } [\text{ft}]}{100}}$$

Se tiene:

$$GT = \frac{156 [^{\circ}\text{F}] - 80 [^{\circ}\text{F}]}{\frac{7,360.32 [\text{ft}]}{100}}$$

$$GT = \frac{72.6 [^{\circ}\text{F}]}{73.6032 [^{\circ}\text{F}]}$$

$$GT = 0.9863 [^{\circ}\text{F}/100\text{ft}]$$

NOTA: La temperatura ambiente en reforma Chiapas es de 25.5 °C

6.4 Obtención de la BHST.

b) TEF=Temperatura Estática de Fondo [°F/100ft] a la profundidad requerida a cementar.

La profundidad requerida para cementar una TR de 7" es a los 2170 [mt], entonces de la ecuación de Gradiente Térmico despejo la Temperatura Estática de Fondo, y substituyo los datos de interés.

De la ec. de:

$$GT = \frac{\text{Temperatura Estatica de Fondo } [^{\circ}F] - \text{Temperatura Ambiente } [^{\circ}F]}{\frac{\text{Profundidad } [ft]}{100}}$$

Despejamos Temperatura Estática de Fondo:

$$\therefore \text{Temperatura Estatica de Fondo } [^{\circ}F] = [(GT) \left(\frac{\text{Profundidad } [mt]}{100} \right) + 80 \text{ } ^{\circ}F]$$

NOTA: Convertimos la profundidad de interés a [ft].

$$1[mt] = 3.28[ft] \therefore 2,170[mt] \left(\frac{3.28 [ft]}{1 [mt]} \right) = 7,117.60[ft] \text{ substituyendo:}$$

$$TEF [^{\circ}F] = [(GT) \left(\frac{\text{Profundidad } [ft]}{100} \right) + 80 \text{ } ^{\circ}F]$$

$$TEF [^{\circ}F] = [(0.9863 [^{\circ}F/100ft]) \left(\frac{7117.60 [ft]}{100} \right) + 80 \text{ } ^{\circ}F]$$

$$TEF [^{\circ}F] = 69.7524[^{\circ}F] + 80[^{\circ}F]$$

$$TEF [^{\circ}F] = 149.7524 [^{\circ}F]$$

NOTA: Convirtamos la TEF a °C.

$$\text{De } ^{\circ}F = [(^{\circ}C)(1.8) + 32]$$

$$\therefore ^{\circ}C = \frac{{}^{\circ}F - 32}{1.8}$$

$$^{\circ}C = \frac{149.7524 - 32}{1.8}$$

$$^{\circ}C = 65.418$$

Esquema:

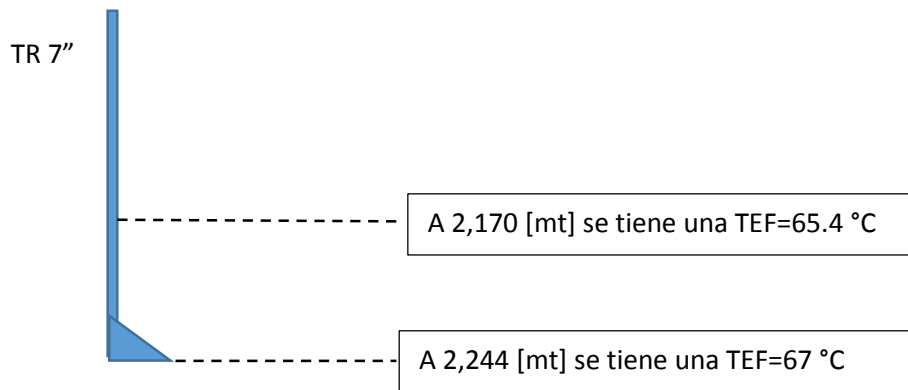


FIGURA 205. GRAFICA VISUAL DE LOS METROS EN DONDE SE TIENE LA TEMPERATURA ESTÁTICA DE FONDO REQUERIDA EN EL PROGRAMA DE SOLICITUD DE DISEÑO DE UNA LECHADA ESPUMADA.

6.5 Cálculo del número de Cédula del API para realizar la prueba de Bombeabilidad.

- c) El número de Cédula API con la que se someterá el diseño de lechada en el Consistómetro Presurizado.

Esta parte del cálculo de la cédula a emplear para la prueba de consistencia a alta presión y alta Temperatura es de sumo cuidado ya que de este cálculo depende el éxito no solo del diseño de la lechada sino de la operación de cementación de la TR 7''. Entendamos pues, que está pasando en realidad.

Tenemos una **TR de 7''** que se va a cementar una profundidad de 2170 [mt] a 2244 [mt], a esta última profundidad se tiene una temperatura de 67 [°C] con un $GT=0.98 [^{\circ}F/100ft] \sim 1[^{\circ}F/100ft]$, es decir: que a cada 100 [ft] perforados existirá un cambio en su temperatura aproximadamente de un 1 °F alrededor.

Con estos datos vamos a la norma "**RECOMMENDED PRACTICE FOR TESTING WELL CEMEN**" API **RECOMMENDED PRACTICE 10B, TWENTY-SECOND EDITION, DECEMBER 1997** y observemos la siguiente información que nos proporciona en la **página 26 y página 27 del Anexo IX Apéndice II:**

6.6 Obtención de los Grados y Presiones por cada metro.

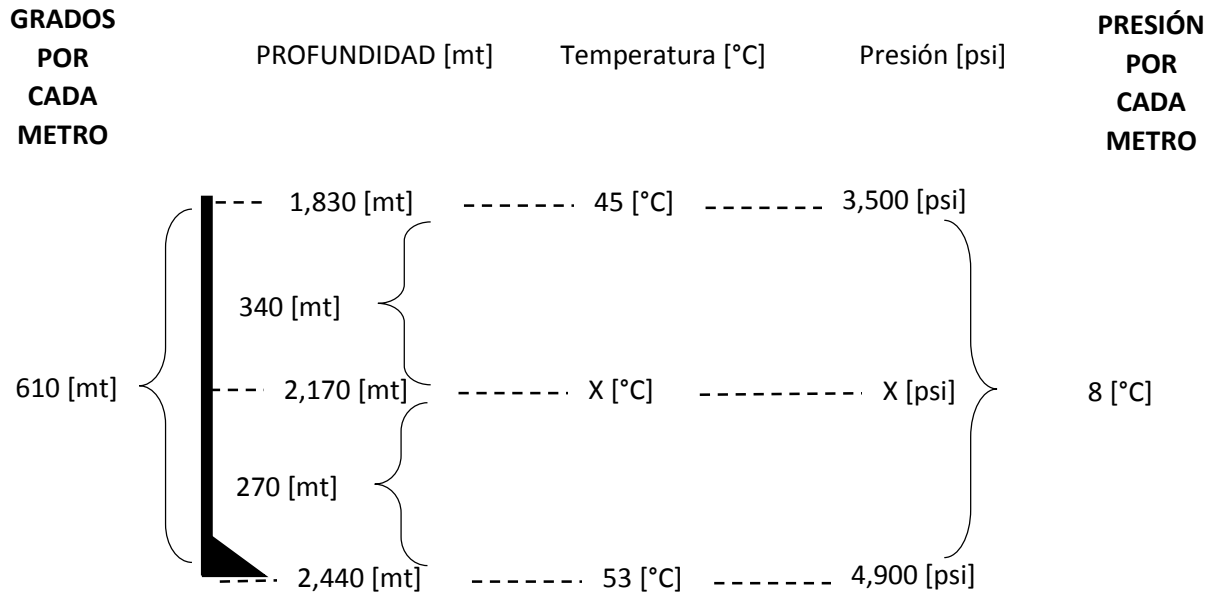


FIGURA 206. GRAFICA VISUAL DE LA OBTENCIÓN DE LOS GRADOS Y PRESIONES POR CADA METRO.

NOTA 1: no confundir la TEF (Temperatura Estática de Fondo) con la Time min (Temperatura Mínima Requerida en minutos) para las Pruebas de Simulación en Tubería a Pozo.

NOTA 2: Siempre vamos a escoger el máximo tiempo mínimo de la Prueba de Simulación en minutos.

6.7 Temperatura y Presión de Circulación Real.

- d) Ahora empecemos en la página 27, a una Profundidad de 2,440 [mt] (que es a la profundidad máxima a la cual vamos a cementar nuestra TR de 7" y a bombear nuestra lechada de $\rho=1.6$ [gr/cm³]), con un $GT=0.98$ [°F/100ft].

Observemos que nuestro $GT=0.98$ [°F/100ft] calculado, se encuentra comprendido entre los valores de $GT=0.9$ [°F] y $GT = 1.1$ [°F] para los cuales les corresponde a un Tiempo Mínimo de 41 min una TEMPERATURA de entre 126 [°F] y 129 [°F], y si lo requiriéramos en °C nuestros valores de TEMPERATURA estarían comprendidos entre 52 [°C] y 54 [°C].

Por lo tanto la media para ambos sería:

$$\bar{T} [°F] = [(126+129)/2] = 127.5 [°F]$$

$\bar{T} [^{\circ}\text{C}] = [(52+54)/2] = 53 [^{\circ}\text{C}]$ que es la que corresponde a nuestro ejemplo a una presión de 4,900[psi].

Ahora comencemos en la página 26, a una Profundidad de 1830 [mt] (que es la profundidad que le antecede a la máxima profundidad de asentamiento de nuestra TR de 7" a 2,240 [mt] la cual vamos a cementar y a bombear con una lechada de $\rho = 1.6 [\text{gr}/\text{cm}^3]$, con un $\text{GT} = 0.98 [^{\circ}\text{F}/100\text{ft}]$.

NOTA: Siempre vamos a escoger el máximo tiempo mínimo de la Prueba de Simulación en minutos.

De nueva cuenta observemos que nuestro $\text{GT} = 0.98 [^{\circ}\text{F}/100\text{ft}]$ se encuentra comprendido entre los valores de $\text{GT} = 0.9 [^{\circ}\text{F}]$ y $\text{GT} = 1.1 [^{\circ}\text{F}]$, para los cuales les corresponde a un Tiempo Mínimo de 33 min una TEMPERATURA de entre 112 [°F] y 114 [°F], y si lo requiriéramos en °C nuestros valores de TEMPERATURA estarían comprendidos entre 44 [°C] y 46 [°C].

Por lo tanto la media para ambos sería:

$$\bar{T} [^{\circ}\text{F}] = [(112+114)/2] = 113 [^{\circ}\text{F}]$$

$\bar{T} [^{\circ}\text{C}] = [(44+46)/2] = 45 [^{\circ}\text{C}]$ que es la que corresponde a nuestro ejemplo a una presión de 3,500[psi].

e) Una vez obtenidos los datos de P_c y T_c = Temperatura y Presión de Circulación Real.

Esta Presión y Temperatura de circulación, son las condiciones a la cual va a ser sometida nuestra lechada de cemento de $\rho = 1.6 [\text{gr}/\text{cm}^3]$ en el consistómetro Presurizado a alta Presión y a alta Temperatura (HP-HT) para cementos.

Primero identificamos la profundidad (diferencia de profundidades) a la cual va estar sometida nuestra lechada a esas T_c y P_c en el consistómetro presurizado para el cálculo de su Tiempo bombeable.

$$\begin{array}{r} 2,2240 [mt] \\ - 1,830 [mt] \\ \hline 610 [mt] \end{array}$$

Ahora identificamos la presión (diferencia de presiones) a la cual va estar sometida nuestra lechada a esas T_c y P_c en el consistómetro presurizado para el cálculo de su Tiempo bombeable.

$$\begin{array}{r} 4,900 [psi] \\ - 3,500 [psi] \\ \hline 1400 [psi] \end{array}$$

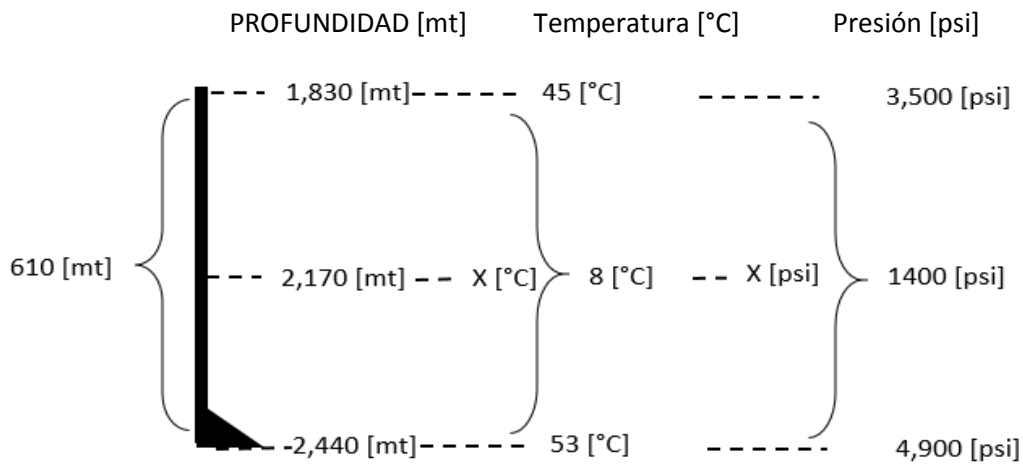


FIGURA 207. GRAFICA VISUAL DE LA DIFERENCIA DE PROFUNDIDADES A LAS CUALES SE CALCULARÁ LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DE CIRCULACIÓN REAL.

Así llegamos a un doble sistema de ecuaciones de 2x3 uno para el cálculo de la T_c (Temperatura de Circulación) y el otro respectivamente para el cálculo de la P_c (Presión de Circulación).

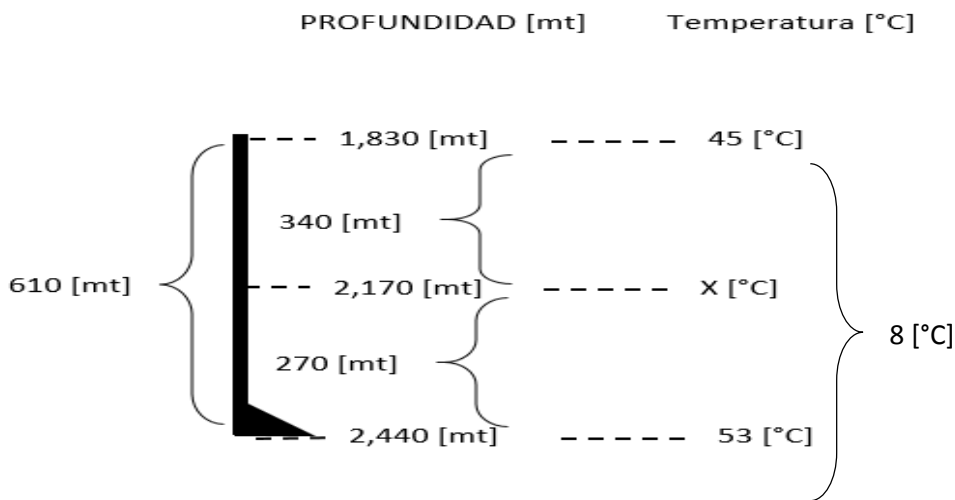


FIGURA 208. SISTEMA DE ECUACIONES DE 3x3 GENERADO PARA EL CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE CIRCULACIÓN REAL.

Para el cálculo del sistema de la Temperatura de Circulación, tenemos:

$$A \cdot B \cdot C = 610 \begin{vmatrix} 1830 & 45 & 3500 \\ 2170 & x & x \\ 2440 & 53 & 4900 \end{vmatrix} 8$$

$$T_c = (8[°C]) \div (610[mt])(340[mt]) + (45[°C])$$

$$T_c = \left(0.13 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{mt}}\right)(340[\text{mt}]) + (45[^{\circ}\text{C}])$$

$$T_c = (4.4590 [^{\circ}\text{C}]) + (45[^{\circ}\text{C}])$$

$$T_c \approx 49.5[^{\circ}\text{C}]$$

Para el cálculo del sistema de la Presión de Circulación, tenemos:

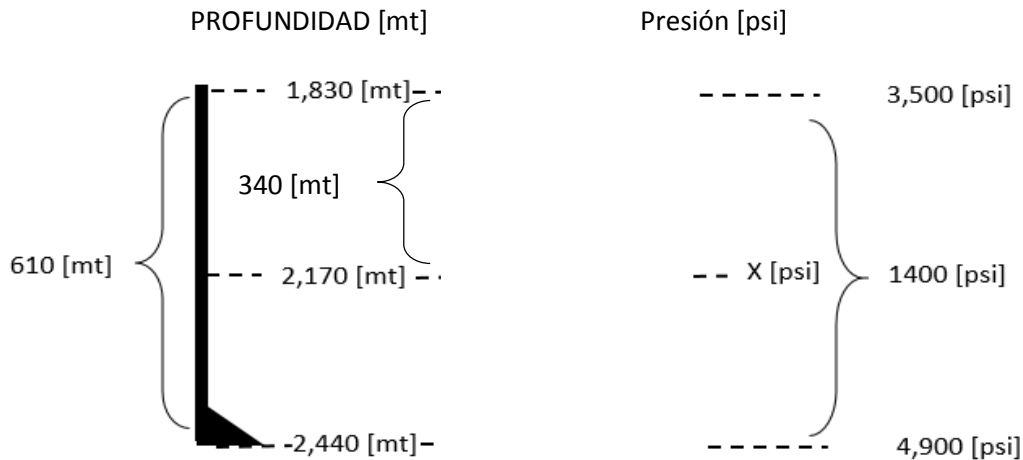


FIGURA 209. SISTEMA DE ECUACIONES DE 3x3 GENERADO PARA EL CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE CIRCULACIÓN REAL.

$$\mathbf{A \cdot B \cdot C = 610 \begin{vmatrix} 1830 & 45 & 3500 \\ 2170 & x & x \\ 2440 & 53 & 4900 \end{vmatrix} 1400}$$

$$P_c = (1,400[\text{psi}]) \div (610[\text{mt}]) \cdot (340[\text{mt}]) + (3,500[\text{psi}])$$

$$P_c = \left(2.2950 \frac{\text{psi}}{\text{mt}}\right)(340[\text{mt}]) + (3,500[\text{psi}])$$

$$P_c = (780.3278 [^{\circ}\text{C}]) + (3,500\text{psi})$$

$$P_c = 4,280.3278 [\text{psi}]$$

R= cédula 9.6 Casing

Entonces en conclusión, la cédula que se emplearía para esta lechada es la de la profundidad mayor a una presión de soporte mayor a los 2,440 [mt], que en este caso la Schedule 9.6 soporta a los 41 min 4,900 [psi], página 27 del API RECOMMENDED PRACTICE 10B, "RECOMMENDED PRACTICE FOR TESTING WELL CEMENTS TWENTY-SECOND EDITION", DECEMBER 1977.

6.8 Tiempo Bombeable de Lechada de Cemento.

Es necesario presentar las conclusiones de soporte de la prueba a las condiciones de P y T de Circulación, que son las condiciones a la que la Lechada se sujetará en todas las pruebas de Laboratorio en el Consistómetro Presurizado (HP-HT) para cementos y el Atmosférico 165-AT, pues recordemos que a cambios bruscos de temperatura cambios bruscos de Presión.

TR1= 41 [min].

Es el tiempo requerido en la cédula 9.6 es de 41 min, tiempo en el cual se presentara una Pérdida de Fluido por Filtrado en esta lechada, tiempo en que se activaran los aditivos necesarios para su diseño en detener esta deshidratación.

SP1=49.5 [°C]

Es la Temperatura de Circulación a la cual será bombeada nuestra lechada de cemento para que no se presenten cambios bruscos en la temperatura dentro de ese mismo Gradiente de Presión en el Pozo.

TB= 318 [min]

El Tiempo Bombeable solicitado en la Solicitud del diseño de la lechada de cemento por parte de PEMEX para la $\rho=1.60$ [gr/cm³] es de 5:30 hrs, solo hay que pasarlo a minutos.

$$TB = 5.30 [hrs]$$

$$TB = (5.30 [hrs])\left(\frac{60 [min]}{1 [hrs]}\right)$$

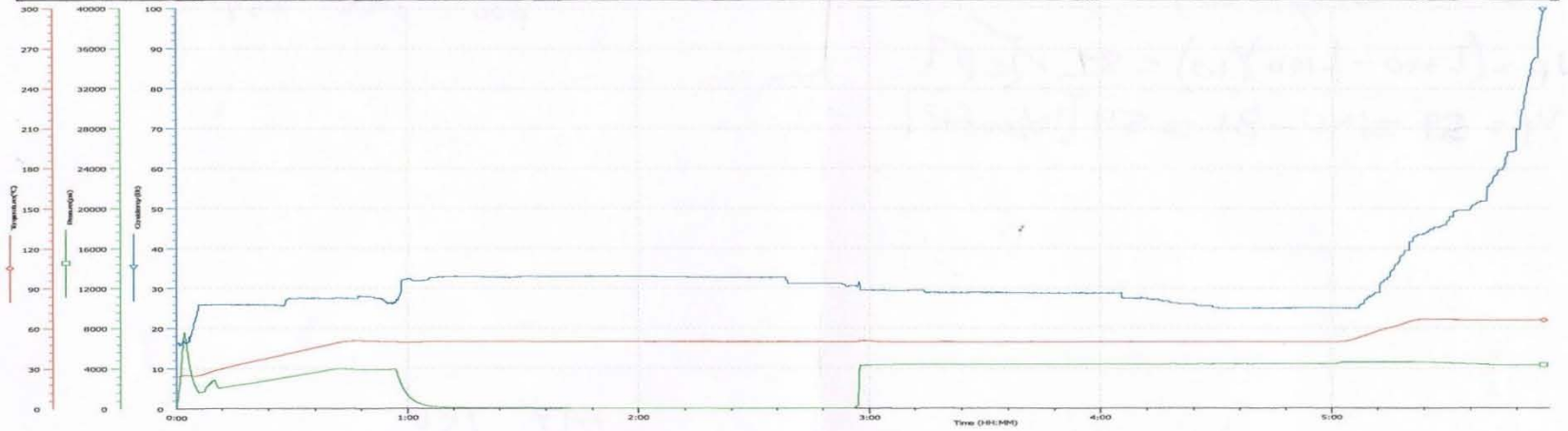
$$TB = 318 [min]$$

- f) Calcule el Rendimiento y el Requerimiento de agua de la lechada para ambos casos de lechadas con densidades, $\rho=1.60$ [gr/cm³] y $\rho=1.90$ [gr/cm³].

Primero debemos de tomar en cuenta los materiales empleados en nuestro diseño o tipo base de lechada, y que 1[sc] de cemento pesa 50[kg] y que su gravedad específica es de 3.14 [kg/lit].

NOTA: Consulte los volúmenes absolutos de los diferentes materiales, tabla 11.3 Anexo IV del Apéndice II.

POZO:	ARTESA 352	TEMP (BHST):	65.4 °C	AGUA:	21.94 L/S
PROFUNDIDAD:	2,170 MTS	TEMP (BHCT):	49.5 °C	RENDIMIENTO:	37.86 L/S
OPERACIÓN:	TR 7"	CEDULA:	9.6 CASING	DENS. CAL:	1.90 GR/CC
ACTIVO:	MUSPAC	PRESION:	4,280 PSI	DENS. MEDIDA:	1.90 GR/CC
MUESTRA DE:	LABORATORIO	V. P.:	76.5	DENS. V.C.D.:	1.60 V.C.D.
INICIO T.B.:	ANA LORENA NUÑEZ VARGAS	T.Y.:	30	LECT. FINAL:	10.0 V.C.D.
FINALIZO T.B.:	J. CARLOS PEREZ MORALES	Q30:	119.6	T. B. REAL:	5:55 HRS
FRAGUO:	BIEN	AGUA LIBRE:	0	SE BUSCA:	5:00 HRS
FECHA:	22 DE ENERO DEL 2013	CEMENTO:	"H" CEMEX L - 67	AGUA DE:	REFORMA



DISEÑO	
ADITIVO	%
HALAD-23	0.30
D AIR 3000	0.20
FWCA	0.05
CFR-4	0.25
KCI	2.00

COMENTARIOS DEL LABORATORIO

LA META ES CERO

ING. JUAN A. ANDRADE LOPEZ
ENC DEL LABORATORIO

RECIBIO

FIGURA 210. GRÁFICA DEL PROGRAMA DE PRUEBAS CONVENCIONALES EFECTUADAS BAJO LA NORMA API PARA EL DISEÑO DE LECHADAS DE BAJA DENSIDAD A ESPUMAR.

6.9 Cálculo del Volumen del Rendimiento y del Requerimiento de agua para el caso de ejemplo de las densidades propuestas $\rho=1.60$ [gr/cm³] y $\rho=1.90$ [gr/cm³].

El volumen absoluto de cualquier material más su requerimiento de agua es su contribución al rendimiento de la lechada.

El rendimiento de la lechada es igual a la suma de los volúmenes absolutos de cada material seco más el volumen de agua utilizado.

Como se puede ver el volumen absoluto, el rendimiento de la lechada, la densidad y el requerimiento de agua están interrelacionado. La densidad es una variable crítica en las cementaciones, Se requiere conocer el rendimiento para determinar la cantidad de sacos de cemento ha utilizar. También es necesario conocer la cantidad de gal/saco de agua para determinar la correcta cantidad de agua según la densidad requerida. En forma indirecta si se incrementa el agua, se reduce la densidad y se incrementa el requerimiento.

Quedando nuestro balance de materia de la siguiente forma:

MATERIAL	W	ρ	V
CEMENTO	50	3.14	
AGUA	X	1	

Y como calculamos el Volumen de Cemento?, solo hacemos un pequeño despeje y sustituimos:

$$\text{si } \rho = \frac{m}{V} \text{ entonces:}$$

$$V = \frac{m}{\rho} \text{ sustituyendo valores:}$$

$$V = \frac{50}{3.14} = 15.92$$

De esta forma nuestro sistema de balance de materia queda de la siguiente forma:

MATERIAL	W	ρ	V
CEMENTO	50	3.14	15.92
AGUA	X	1	X

Cálculo del Rendimiento de la lechada a una $\rho=1.60$ [gr/cm³].

Del balance de materia obtenemos las siguientes ecuaciones:

MATERIAL	W	ρ	V
CEMENTO	50	3.14	15.92
AGUA	X	1	X
<u>TOTAL</u>	50+X		15.92+X

$$\text{si } \rho = \frac{m}{V} \text{ entonces:}$$

$$\rho = \frac{50 + X}{15.92 + X}$$

Pero además de esto conocemos la densidad con la cual estamos trabajando:

$$1.60 = \frac{50 + X}{15.92 + X}$$

Despejando a X, se tiene la siguiente ecuación:

$(15.92+X)(1.60)=(50+x)$ despejamos haciendo terminos semejantes:

$$25.47+1.60X = 50 + X$$

$$1.60X - X = 50-25.47$$

$0.60X = 24.53$ despejando X, tenemos:

$$X = \frac{24.53}{0.60}$$

$$X = 40.8833 \text{ [lt/sc] } \textbf{REQUERIMIENTO DE AGUA}$$

$X = 40.88$ [lt/sc] Sustituyendo este valor en la ecuación de densidad $\rho=1.60$ [gr/cm³].

$$V = 15.92 + X$$

$$V = 15.92 + 40.8833 \left[\frac{\text{lt}}{\text{sc}} \right]$$

$$V = 56.8033 \text{ [lt/sc] } \textbf{RENDIMIENTO}$$

Para su masa tenemos:

$$w = 50 + X \text{ [lt/sc]}$$

$$w = 50 + 40.8833 \text{ [lt/sc]}$$

$$w = 90.8833 \text{ [lt/sc]}$$

Comprobando la densidad, tenemos que: $\rho = \frac{90.8833}{56.8033} = 1.5999 \sim 1.60$ [gr/cm³]

Cálculo del Rendimiento de la lechada a una $\rho=1.90$ [gr/cm³].

Si $\rho = m/v$ entonces:

$$\rho = \frac{50 + X}{15.92 + X}$$

Pero además de esto conocemos la densidad con la cual estamos trabajando:

$$1.90 = \frac{50 + X}{15.92 + X}$$

Despejando a X, se tiene la siguiente ecuación:

$(15.92+X)(1.90)=(50+x)$ despejamos haciendo terminos semejantes:

$$30.248+1.90X = 50+ X$$

$$1.90X - X = 50 - 30.248$$

$0.90X = 19.752$ despejando X, tenemos:

$$X = \frac{19.752}{0.90}$$

$$X = 21.9466 \text{ [lt/sc] } \mathbf{REQUERIMIENTO DE AGUA}$$

$X = 40.88$ [lt/sc] Sustituyendo este valor en la ecuación de densidad $\rho=1.60$ [gr/cm³].

$$V = 15.92 + X$$

$$V = 15.92 + 21.9466 \left[\frac{\text{lt}}{\text{sc}} \right]$$

$$V = 37.8666 \text{ [lt/sc] } \mathbf{RENDIMIENTO}$$

Para su masa tenemos:

$$w = 50 + X \text{ [lt/sc]}$$

$$w = 50 + 21.9466 \text{ [lt/sc]}$$

$$w = 71.9466 \text{ [lt/sc]}$$

Comprobando la densidad, tenemos que: $\rho = \frac{71.9466}{37.8666} = 1.90001 \sim 1.90$ [gr/cm³]

6.10 Criterios para correr pruebas de Tiempo Bombeable según el Tipo de Operación.

6.10.1 Cementación de TR

Como nota importante, SIEMPRE se deben de correr estas pruebas a la Temperatura Circulante de Fondo BHCT.

Para calcular la temperatura de prueba se deberán utilizar las cédulas 9.2 a 9.13, escogiendo una de acuerdo a la profundidad de nuestro pozo. Para tal efecto hay dos hojas de cálculo que nos ayudaran a definir nuestra temperatura. Si se tiene registro de la herramienta BHCT II, esta será la temperatura circulante de prueba para cualquier profundidad, en caso contrario se procederá de la siguiente manera:

- a) Si la PTV es > 10,000 [ft] la temperatura de prueba será:
Temperatura Circulante = $BHCT_{API} + 16.6 \text{ } ^\circ\text{F}$
- b) Si la PTV es < 10,000 [ft] la temperatura de prueba será:
Temperatura Circulante = $BHCT_{API}$ (según tablas del API 10 B 1997)
Tiempo Bombeable = Top + X

Donde X varía desde 1hr hasta el 50% adicional al Top (Tiempo de Operación), según el tipo de TR a cementar. Esto será definido por el ingeniero de operaciones o por el Ingeniero de diseño.

6.10.2 Cementación de Linner

La temperatura de prueba se definirá haciendo las mismas consideraciones que para una TR con la siguiente variable.

$$\textit{T tiempo Bombeable} = \textit{Top} * 1.5 + 20\textit{min} + X$$

Donde:

TB = Tiempo Bombeable

Top = Tiempo de Operación según el simulador.

1.5 = Factor de seguridad de un 50%

20min = Tiempo Estimado en que la lechada permanecerá estática simulando la desconectada de la TP y el Linner.

X = Tiempo no mayor de 30 minutos después del estático para que la lechada alcance los 100 °Bc

Por ejemplo; si nuestro tiempo bombeable solicitado es de 4.0 a 4.5 horas, los 20 min de tiempo estático iniciarían a las 3 hrs con 40min, y la X serían los 30 min para alcanzar los 100 °Bc, pero si la lechada no alcanza este valor antes de los 30min, entonces habrá que re-dosificar un aditivo retardador y repetir la prueba.

6.10.3 Operaciones de TxC inyectado.

Una herramienta posible y fácil para esta operación es la herramienta BHCT II, si en caso se disponga; el valor de la temperatura que registre a la profundidad deseada, cualquiera que este sea, se tomará como la temperatura circulante. Pero de ser no posible emplear esta herramienta, entonces calcularemos la temperatura circulante de prueba utilizando las tablas API 10B. El Tiempo Bombeable para un TxC inyectado será:

$$\textit{Tiempo Bombeable} = \textit{TopTxC} + (1 \textit{ hr} + 40\textit{ min}) + \textit{TopCF}$$

De donde:

TB = Tiempo Bombeable

T_{op(TxC)} = Tiempo de Operación según el simulador.

1hr = margen de seguridad

40 min = Tiempo a Condiciones estáticas para la lechada según el lapso necesario para que la TP esté por encima del tapón de cemento.

T_{op(CF)} = Tiempo necesario para inyectar el volumen de la lechada deseada, y que será definido (tiempo) por el ingeniero de operaciones y/o el ingeniero de diseño. En este punto la lechada será sometida a intervalos regulares de 5 a 10 min de agitación y reposo respectivamente, hasta alcanzar los 100 °Bc.

Los 40min se les restarán al límite inferior de TB solicitado procediéndose igual que para los lanners.

6.10.4 Operaciones de TxC con TF

Para este caso en particular, la temperatura de prueba **SIEMPRE SERÁ la BHST**, independientemente del valor que esta tenga.

$$\textit{Tiempo Bombeable} = 20 \textit{ min} + 1.5 + 1.5\textit{ hrs} + 20\textit{ min} + 1.5\textit{ hrs} + x$$

De donde:

TB = Tiempo Bombeable

20min = Tiempo de agitación a temperatura ambiente, simulando la circulación de la lechada a través del carrete de la TF.

1.5hrs = Tiempo necesario para llevar la lechada desde la superficie hasta el extremo inferior de la TF y colocar un volumen de lechada para cubrir 300 metros lineales de espacio anular.

20min = Tiempo a condiciones estáticas para la lechada, simulando la levantada de la TF hasta hacer coincidir el extremo inferior de esta con la cima de cemento.

1.5hrs = Tiempo necesario para desplazar la lechada y alcanzar los 100 °Bc.

X = Tiempo adicional requerido como margen de seguridad determinado por el ingeniero de diseño o de operaciones.

NOTA:

- a) Después de los 20min de agitación constante a temperatura ambiente, se inicia el calentamiento de la lechada hasta alcanzar la temperatura de prueba que siempre será la estática.
- b) El tiempo bombeable reportado incluirá los 20min previos al calentamiento.

6.10.5 Operaciones con CF.

6.10.5.1 Para casos en que la BHCT sea menor de 300 °F.

Para determinar la temperatura de prueba utilizaremos las tablas del API 10B 1997. La prueba se programará con dos rampas de calentamiento, de tal suerte que justo al iniciarse la etapa **Tsqueeze** comience a incrementarse la temperatura de prueba hasta alcanzar 13°F más. La lechada se mantendrá con esta nueva temperatura hasta que concluya la prueba. Entonces el tiempo bombeable para una CF será:

$$\textit{T tiempo Bombeable} = T \textit{ BHCT API} + 1hr + T \textit{ squeeze}$$

De donde:

TB = Tiempo Bombeable

T_{BHCT} = Tiempo para alcanzar la temperatura circulante de fondo.

1hr = Tiempo durante el que la lechada estará a condiciones de BHCT de fondo.

TBHCT = Tiempo durante el que la lechada permanecerá en agitación y reposo a intervalos regulares de 5 y 10 minutos respectivamente.

6.10.5.2 Para casos en que la BHCT sea igual o mayor de 300°F.

En estos casos la BHST se tomará como BHCT, y el mecanismo para correr la prueba consistirá en dejar pasar una hora después de haberse alcanzado la BHST, para iniciar con los periodos de agitación y reposo **Tsqueeze** hasta alcanzar los 100°Bc.

6.11 Cálculo del Requerimiento de Agua y Rendimiento para una Lechada con Densidad Conocida.

MÉTODO DE VOLUMEN ABSOLUTO.

El método que se utiliza para este cálculo se conoce como “Método de volumen absoluto”. Este término se refiere al volumen ocupado por un material sin incluir el espacio entre las partículas del mismo. Este método es adecuado ya que ese volumen de aire no contribuye en nada al volumen total de la lechada de cemento y por consiguiente a su densidad.

Ejemplo 1:

Se necesita conocer la cantidad en porcentaje de agua que debe emplearse por peso de cemento para tener una lechada con densidad de 1.93 [gr/cm³].

Composición:

Cemento clase H
SSA-1 40%
SSA-2 25%
HR-4 0.5%

1. De los aditivos antes mencionados que se encuentran en este diseño de lechada, debemos de buscar en tablas de requerimiento de agua cuáles de ellos necesitan agua adicional para su mezclado y la cantidad necesaria por saco de cemento., **Tabla 11.1 ANEXO IV.**
2. De la **Tabla 11.2 ANEXO IV** de propiedades físicas del cemento y aditivos, obtener el factor de volumen absoluto de cada componente.
3. Hacer una tabla de balance de materia como se muestra a continuación la cual debe incluir la masa, el factor de volumen absoluto y el volumen de cada componente de la lechada.

MATERIAL	MASA [kg]	FACTOR DE VOL. ABS [lt/kg]	VOLUMEN [lt]
<i>Cemento</i>	50	0.3185	15.925
<i>SSA-1</i>	20	0.3802	7.604
<i>SSA-2</i>	12.5	0.3802	4.752
<i>HR-4</i>	-----	-----	-----
<i>AGUA</i>	W	1.0000	W
TOTAL	82.5+W		28.2815+W

4. Una vez realizadas nuestras sumas algebraicas del balance de materia, obtenemos las siguientes ecuaciones:

PESO: 82.5+W

VOLUMEN: 28.2815+W

5. Si $\rho = m/v$ entonces $\Rightarrow \rho = \frac{82.5+W}{28.2815+W}$ y sabemos además que la $\rho = 1.93 \text{ [gr/cc}^3\text{]}$

Sustituyendo valores:

$$1.93 = \frac{82.5 + W}{28.2815 + W}$$

Despejando de ambos lados se tiene;

$$\begin{aligned} 1.93 (28.2815 + W) &= 82.5 + W \\ 1.93 (28.2815) + 1.93 (W) &= 82.5 + W \\ 54.58 + 1.93W &= 82.5 + W \end{aligned}$$

Haciendo términos semejantes:

$$\begin{aligned} 1.93W - W &= 82.5 - 54.58 \\ 0.93W &= 27.92 \end{aligned}$$

Despejando a W tenemos:

$$W = \frac{27.92}{0.93}$$

$$W = 30.0 \text{ [lt/sc]} = \text{REQUERIMIENTO o VOLUMEN DE AGUA}$$

Con este valor se obtiene el peso total y el volumen de lechada de cemento al utilizar un saco de cemento. A continuación se obtiene el porcentaje de cada componente por peso total de la lechada y el porcentaje de agua que se debe emplear por peso de cemento.

$$\begin{array}{ll} \text{Total de masa} = 82.5 + W & \text{Total de Volumen} = 28.2815 + W \\ = 82.5 + 30 & = 28.2815 + 30 \\ = 112.5 \text{ [kg]} & = 58.2815 \text{ [lt]} \end{array}$$

$$\% \text{ Cemento} = \frac{50[\text{kg}]}{112.5 \text{ [kg]}} = 0.44 \text{ [1]}$$

$$\% \text{ SSA} - 1 = \frac{20[\text{kg}]}{112.5 \text{ [kg]}} = 0.17 \text{ [1]}$$

$$\% \text{ SSA} - 2 = \frac{12.5[\text{kg}]}{112.5 \text{ [kg]}} = 0.11 \text{ [1]}$$

$$\% \text{ Agua} = \frac{30[\text{kg}]}{112.5 \text{ [kg]}} = 0.26 \text{ [1]}$$

El porcentaje de porcentaje por peso de cemento es:

$$\begin{aligned} \% \text{ Agua} &= \frac{\% \text{ Agua [1]}}{\% \text{ Cemento [1]}} * 100 \\ &= \frac{0.26 \text{ [1]}}{0.44 \text{ [1]}} * 100 \\ &= 59 \% \end{aligned}$$

Ejemplo 2.

Calcular en lt/sc el requerimiento de agua y rendimiento para la siguiente lechada:

DATOS

Cemento H "Apasco m-11" con:

1.0% de Econolite

0.8% de Halad-9

0.15.0% de Dair-1

35.0% de SSA-1

0.4% de HR-4

DENSIDAD REQUERIDA=1.60 [gr/cm³]

NOTA. Considerar un saco de cemento de 50.0 [kg] para efectos de cálculo, y busquemos en tablas de cementación los Volúmenes Absolutos de los Aditivos. **APENDICE TABLA 11.2 Propiedades Físicas de materiales cementantes y aditivos.**

SOLUCIÓN:

a) Empleando el siguiente planteamiento se puede calcular fácilmente el requerimiento de agua de nuestra lechada.

MATERIAL	PESO [kg]	VOL. ESPECÍFICO [kg/lt]	VOLUMEN [lt]
Cemento	50	0.3144	15.72
AGUA	X	1.0	X
TOTAL	50+X		15.72+X

El volumen lo obtuvimos multiplicando nuestro valor de Volumen Específico (de tablas) por el peso de un saco de cemento.

$$VOLUMEN = 50[kg](0.3144[lt/kg]) = 15.72 [lt]$$

b) Una vez realizadas nuestras sumas algebraicas obtenemos las siguientes ecuaciones:

PESO: 50+X

VOLUMEN: 15.72 +X

Si $\rho = m/v$ entonces $\Rightarrow \rho = \frac{50+X}{15.72+X}$ y sabemos además que la $\rho = 1.60 [gr/cc^3]$

Sustituyendo valores:

$$1.60 = \frac{50 + x}{15.72 + X}$$

Despejando de ambos lados se tiene;

$$1.60 (15.72 + X) = 50 + X$$

$$1.60 (15.72) + 1.60 (X) = 50 + X$$

$$25.152 + 1.60X = 50 + X$$

Haciendo términos semejantes:

$$1.60X - X = 50 - 25.152$$

$$0.60X = 24.848$$

Despejando a X

$$X = \frac{24.848}{0.60}$$

$$x = 41.413333 \text{ [lt/sc]} = \text{REQUERIMIENTO o VOLUMEN DE AGUA}$$

c) Conociendo ahora el volumen de agua necesario para la mezcla de 41.413333 [lt/sc] y sumádoselo ahora al volumen de cemento obtenemos el Rendimiento de la lechada.

$$\text{RENDIMIENTO} = \text{VOLUMEN DE CEMENTO} + \text{VOLUMEN DE AGUA}$$

Entonces:

$$\begin{aligned}\text{RENDIMIENTO} &= 15.72 + X \\ &= 15.72 + 41.413333 \\ &= 57.13333 \text{ [lt/sc]}\end{aligned}$$

Ejemplo 3.

Calcular en lt/sc el requerimiento de agua y rendimiento para la siguiente lechada:

DATOS

Cemento HTLD con:

30% de Cemento H

57.0% Pozmix

13.0% cal

35.0% de SSA-1

1.0% HALAD-22A

0.6% de HR-12

0.2% de DAIR-1

0.3% de GAS-STOP

0.2% SUSPEND HT

DENSIDAD REQUERIDA=1.50 [gr/cm³]

NOTA. Considerar un saco de cemento de 50.0 [kg] para efectos de cálculo.

SOLUCIÓN:

a) Primero que nada busquemos en tablas de cementación los Volúmenes Absolutos de los Aditivos, del Cemento y el Peso de 1 [sc] de cemento.

Entonces se tiene que;

1 [sc] de Cemento = 50 [kg]

Volumen Absoluto del Cemento = 0.3144 [lt/kg]

Volumen Absoluto del Pozmix = 0.5407 [lt/kg]

Volumen Absoluto de la Cal = 0.4545 [lt/kg]

Volumen Absoluto de SSA-1 = 0.3802 [lt/kg]

Volumen Absoluto del Agua = 1 [lt/kg]

DENSIDAD REQUERIDA=1.50 [gr/cm³]

b) Hacemos una tabla para comprender nuestro sistema y encontrar las variables solicitadas en el texto del problema:

MATERIAL	PESO	VOL. ESPECÍFICO	VOLUMEN
<i>Cemento</i>	15	0.3144	4.7160
<i>POZMIX</i>	28.5	0.5407	15.4099
<i>CAL</i>	6.5	0.4545	2.9542
<i>SSA-1</i>	17.5	0.3802	6.6535
<i>AGUA</i>	X	1.0	X
TOTAL	67.5+X		29.7336+X

c) Una vez realizadas nuestras sumas algebraicas obtenemos las siguientes ecuaciones:

PESO: 67.5+X

VOLUMEN: 29.7336 +X

Si $\rho = m/v$ entonces $\Rightarrow \rho = \frac{67.5+X}{29.7336+X}$ y sabemos además que la $\rho = 1.50$ [gr/cc³]

Sustituyendo valores:

$$1.50 = \frac{67.5 + x}{29.7336 + X}$$

Despejando de ambos lados se tiene;

$$1.50 (29.7336 + X) = 67.5 + X$$

$$1.50 (29.7336) + 1.50 (X) = 67.5 + X$$

$$44.60 + 1.50X = 67.5 + X$$

Haciendo términos semejantes:

$$1.50X - X = 67.5 - 44.60$$

$$0.50X = 22.8996$$

Despejando a X

$$X = \frac{22.8996}{0.50}$$

$$x = 45.79 \text{ [lt/sc]}$$

6.653

MATERIAL	PESO	VOL. ESPECÍFICO	VOLUMEN
Cemento	15	0.3144	4.7160
POZMIX	28.5	0.5407	15.4099
CAL	6.5	0.4545	2.9542
SSA-1	17.5	0.3802	6.6535
AGUA	45.79	1.0	45.79
TOTAL	67.5+X		29.7336+X

Sustituimos este valor de X en la tabla de balance de materia y en la ecuación de PESO y VOLUMEN.

PESO= $67.5 + X = 67.5 + 45.79 = 113.29$ [lt/sc]

VOLUMEN= $29.7336 + X = 29.7336 + 45.79 = 75.53$ [lt/sc]

El Requerimiento de Agua = 45.79 [lt/sc]

El Volumen de Agua necesario para la mezcla es:

$$\text{Rendimiento} = 29.7336 + X = 29.7336 + 45.79 = 75.53 \text{ [lt/sc]}$$

Entonces nuestro balance de materia en la Superficie quedaría de la siguiente forma:

La Densidad de nuestra lechada sería de:

$$\text{Densidad} = \frac{113.29}{75.53} = 1.499933 \text{ [gr/cm}^3\text{]} \text{ que es la sugerida.}$$

Ejemplo 4.

Calcular en lt/sc el requerimiento de agua y rendimiento, así como la cantidad necesaria de Esferilita (en %) para la siguiente lechada en donde se desea tenga una densidad de 1.35 [gr/cm³]:

DATOS

Cemento Apasco H con:
35% de SSA-1
10.0% cal
1.0% HALAD-22A
1.2% de HR-12
0.2% de DAIR-1
0.53% de SUPER CBL
0.2% SUSPEND HT
2.0% de KCL
X% de ESFERILITA.

NOTA. Considerar una presión Estática de presión Hidrostática de 5,000 [psi] y un saco de cemento de 50.0 [kg] para efectos de cálculo.

SOLUCIÓN:

a) Primero que nada busquemos en tablas de cementación los Volúmenes Absolutos de los Aditivos, del Cemento y el Peso de 1 [sc] de cemento.

Entonces se tiene que;

1 [sc] de Cemento = 50 [kg]
Volumen Absoluto del Cemento = 0.3144 [lt/kg]
Volumen Absoluto de la Esferilita = 1.0559 [lt/kg]
Volumen Absoluto de la Cal = 0.4545 [lt/kg]
Volumen Absoluto de SSA-1 = 0.3802 [lt/kg]
Volumen Absoluto del Agua = 1 [lt/kg]
Densidad Requerida en el fondo = 1.35 [gr/cm³]

b) Hacemos una tabla para comprender nuestro sistema y encontrar las variables solicitadas en el texto del problema:

MATERIAL	PESO	VOL. ESPECÍFICO	VOLUMEN
<i>Cemento</i>	50.0	0.3144	15.72
<i>AGUA para el Cemento</i>	19.0	1.0	19.0
<i>CAL</i>	5.0	0.4545	2.2725
<i>AGUA para la CAL</i>	7.0	1.0	7.0
<i>SSA-1</i>	17.5	0.3802	6.6535
<i>AGUA para el SSA-1</i>	7.0	7.0	7.0
<i>ESFERILITA</i>	X	1.0559	1.0559X
<i>AGUA para la ESFERILITA</i>	0.85X	1.0	0.85X
TOTAL	105.5 + 1.85X		57.646 + 1.9059X

c) Una vez realizadas nuestras sumas algebraicas obtenemos las siguientes ecuaciones:

PESO: $105.5 + 1.85X$

VOLUMEN: $57.646 + 1.9059X$ donde X representa el PESO DE LA ESFERILITA buscado.

Si $\rho = m/v$ entonces $\Rightarrow \rho = \frac{105.5+1.85X}{57.646+1.9059X}$ y sabemos además que la $\rho = 1.35 [gr/cc^3]$

Sustituyendo valores:

$$1.35 = \frac{105.5 + 1.85x}{57.646 + 1.9059x}$$

Despejando de ambos lados se tiene;

$$\begin{aligned} 1.35 (57.646 + 1.9059x) &= 105.5 + 1.85x \\ 1.35 (57.646) + 1.35 (1.9059x) &= 105.5 + 1.85x \\ 77.8221 + 2.572965X &= 105.5 + 1.85X \end{aligned}$$

Haciendo términos semejantes:

$$\begin{aligned} 2.572965X - 1.85X &= 105.5 - 77.8221 \\ 0.722965X &= 27.6779 \end{aligned}$$

Despejando a X

$$\begin{aligned} X &= \frac{27.6779}{0.722965} \\ x &= 38.28387266 [kg/sc] \end{aligned}$$

Requerimiento de Esferilita = 76.55%

MATERIAL	PESO	VOL. ESPECÍFICO	VOLUMEN
<i>Cemento</i>	50.0	0.3144	15.72
<i>AGUA para el Cemento</i>	19.0	1.0	19.0
<i>CAL</i>	5.0	0.4545	2.2725
<i>AGUA para la CAL</i>	7.0	1.0	7.0
<i>SSA-1</i>	17.5	0.3802	6.6535
<i>AGUA para el SSA-1</i>	7.0	7.0	7.0
<i>ESFERILITA</i>	38.28387266	1.0559	40.423941
<i>AGUA para la ESFERILITA</i>	32.5412	1.0	32.5412
TOTAL	176.3251644		57.646 + 1.9059X

Sustituimos este valor de X en la ecuación de PESO y VOLUMEN para obtener el 100% de nuestro sistema y saber qué porcentaje es el que ocupa la **ESFERILITA**.

PESO= $105.5 + 1.85 (38.28387266) = 176.3251644 [kg/sc]$

Ahora para la Esferilita

VOLUMEN: $57.646 + 1.9059(38.28387266) = 130.6112329$

El volumen de agua necesario para la mezcla es:

$$\text{Agua} = 19 + 7 + 7 + (38.27 * 0.85) = 65.53 \text{ [lt/sc]}$$

El rendimiento en el Fondo será de:

$$\text{Rendimiento} = 57.646 + 1.9059X = 57.646 + (1.9056 * 38.87) = 130.58 \text{ [lt/sc]}$$

Entonces nuestro balance de materia en la Superficie quedaría de la siguiente forma:

MATERIAL	PESO	VOL. ESPECÍFICO	VOLUMEN
Cemento	50.0	0.3144	15.72
AGUA para el Cemento	19.0	1.0	19.0
CAL	5.0	0.4545	2.2725
AGUA para la CAL	7.0	1.0	7.0
SSA-1	17.5	0.3802	6.6535
AGUA para el SSA-1	7.0	7.0	7.0
ESFERILITA	42	1.4598	61.3116
AGUA para la ESFERILITA	36.14	1.0	36.14
TOTAL	176.29		146.017

Con un Rendimiento= 146.01 [lt/sc]

La Densidad en la superficie es de:

$$\text{Densidad} = 176.29 + 146.17 = 1.20 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$$

Capítulo VII. Análisis de Conclusiones y Resultados. (Ventajas y Desventajas)

7.1 Ventajas y Desventajas de los Cementos Espumados.

Los Sistemas de lechadas espumadas tienen tantas ventajas sobre los cementos convencionales que se pueden agrupar en categorías:

1. Durante la colocación.
2. Durante la hidratación del cemento.
3. Y una vez que el cemento se establece.
4. Las propiedades efectivas del resultado del cemento espumado son la mejora del aislamiento por zonas y el soporte de la tubería para la vida productiva del pozo.

7.2 Ventajas de los sistemas de espumados en Conjunto.

1. Son la clave para prevenir la presión anular.
2. Son sistemas compresibles con propiedades elásticas:
 - a. Las burbujas permiten enlaces cristalinos que se flexionan sin romper
 - b. Los enlaces se mantienen intactos.
 - c. Elimina la aparición o creación de micro-anillos.
 - d. Mayor resistencia al agrietamiento por tensión.

La clave para la prevención de la estabilidad de la presión anular se puede encontrar en las propiedades únicas de los sistemas espumados una vez que se establecen. Las lechadas espumadas son sistemas compresibles, con burbujas pequeñas estables e inertes de gas distribuidos de manera uniforme por toda la matriz del cemento.

Estas burbujas permiten que la estructura cristalina del cemento se flexione ligeramente sin romper los enlaces cristalinos. Por lo tanto, el resultado neto es un cemento fraguado que exhibe propiedades elásticas y se mueve o desplaza con la tubería o la formación. Esta flexibilidad del cemento permite que permanezca la unión intacta cuando la tubería se expande y/o se contrae. Debido a que es más resistente, la lechada de cemento espumado tiene una mayor tenacidad de resistencia al agrietamiento por tensión que se produce bajo presión cíclica extrema y de condiciones de temperatura.

Esto evita que un micro espacio anular se forme manteniendo el aislamiento por zonas durante la vida del pozo. Cuando está bien mezclada la lechada de cemento espumado se establece y exhibe propiedades elásticas.

El Cemento espumado contiene burbujas de gas discretas que hacen que el fluido sea compresiblemente espumado, pues dichas burbujas de gas se comprimen a la presión estática por que el espumado se hace circular en el pozo. Estas burbujas de gas reducirán o ampliarán la presión, pero no van a migrar o fusionarse, pues tienden a mantener la presión hidrostática de los hidratos de cemento. Este mecanismo ha demostrado gran eficacia para combatir la migración de gas de formación.

En los sistemas espumados, las burbujas se depositan y se deforman contra la formación, ya que actúan como un agente de micro puente y naturalmente nos ayudan a la reducción de la pérdida de fluido. Prevenir o minimizar la pérdida de fluido minimiza la contracción de la suspensión, ya que éste es otro mecanismo que permite la intrusión de gas durante la hidratación del cemento.

Halliburton siempre ha predicado que la clave más importante para obtener un buen trabajo de cementación es quitar lodo y enjarre del fluido de perforación a fin de reemplazarlos con una lechada de cemento espumado. La Espumación de líquidos como lodos de perforación, fluidos separadores, preflushes y lechadas de cemento aumentó significativamente las viscosidades de estos fluidos. Este aumento de viscosidad considerable transmite energía de corte para el lodo y baja filtración en un pozo durante la circulación, lo que mejora el uso o la eliminación del lodo de perforación. Esto resulta en la mejora de relleno anular y adherencia del cemento, minimizando la necesidad de trabajos de reparación y proporcionando buen aislamiento zonal para la vida útil del pozo.

El almacenamiento de Cemento espumado en plataformas en alta mar por lo general es limitado, la lechadas de cementación Espumado suele requerir unos aditivos distintos de los tensioactivos requeridos, y la mayoría de éstos están disponibles solo como aditivos líquidos preferentemente. Dicha espuma permite el uso ampliado de cemento puro para adaptarse a una gama más amplia de uso y aplicaciones correctivas, sin necesidad de mezclar, transportar y almacenar mezclas específicas para aplicaciones especiales.

Estas propiedades del cemento de la espuma dan la capacidad para llenar estos vacíos sin dañar cualquiera de la permeabilidad de la matriz de depósito. La estabilidad es clave para el desarrollo de la espuma adecuada de un cemento.

Peso de los Rangos en sistemas de cementación.

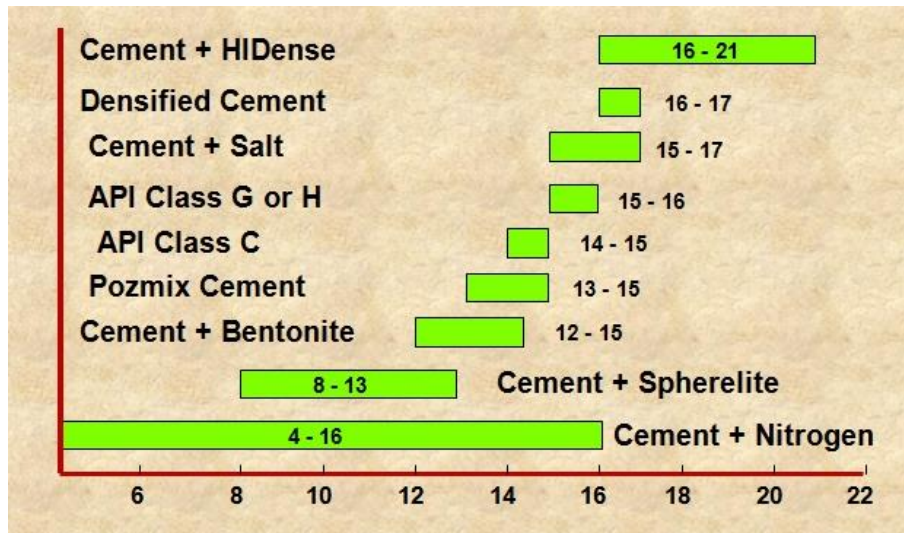


FIGURA 210. RANGO DE DENSIDADES EN DIFERENTES SISTEMAS DE DISEÑOS DE LECHADAS.

Resistencia a la compresión

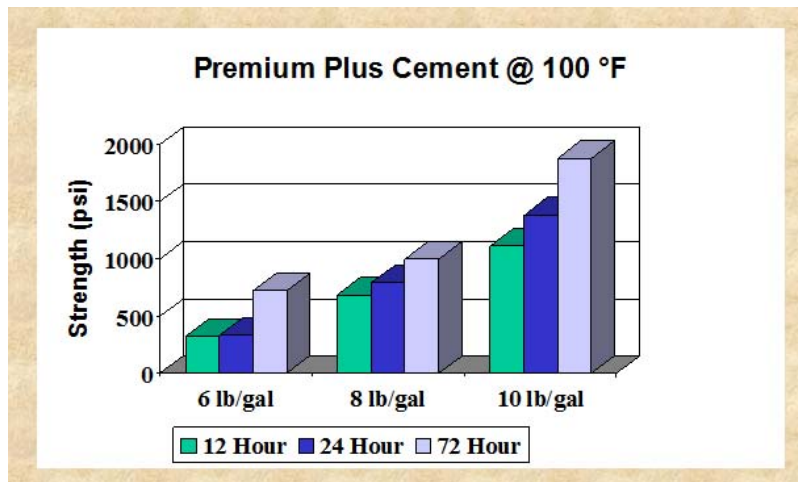


FIGURA 211. RANGO DEL ESFUERZO COMPRESIVO (T vs PSI) A DIFERENTES DENSIDADES DE LECHADAS

Con un cemento más superior o con un plus mayor (calidad) y con un cemento muy similar al cemento Clase C, vemos arriba la resistencia a la compresión significativas de 1.000 psi a 8 bls / gal y la fuerza, incluso significativa a los 6 lbs / gal.

7.3 Las permeabilidades típicas de la lechada de cemento espumado como una función de la densidad

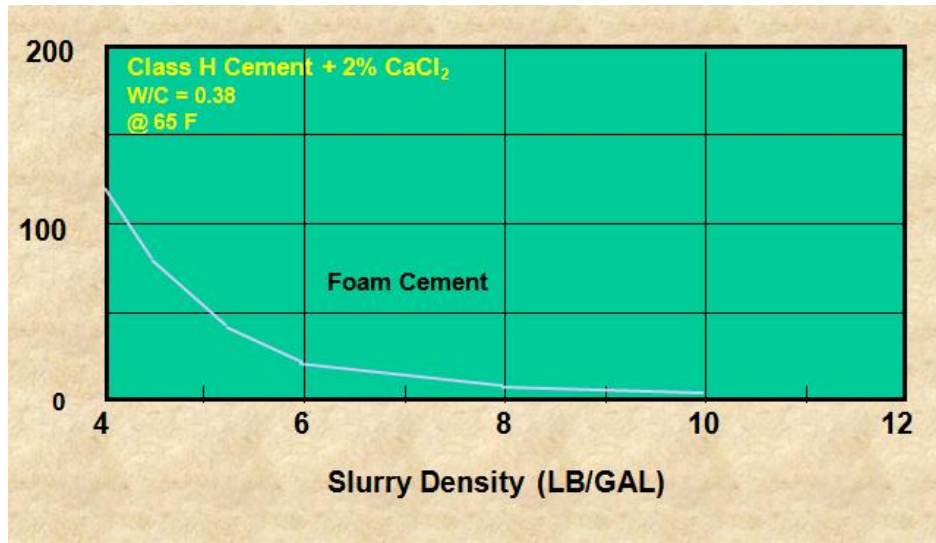


FIGURA 212. GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO DE PERMEABILIDAD vs RANGO DE DENSIDADES EN LAS LECHADAS.

7.4 La Conductividad Térmica de las lechadas de Cemento Espumado.

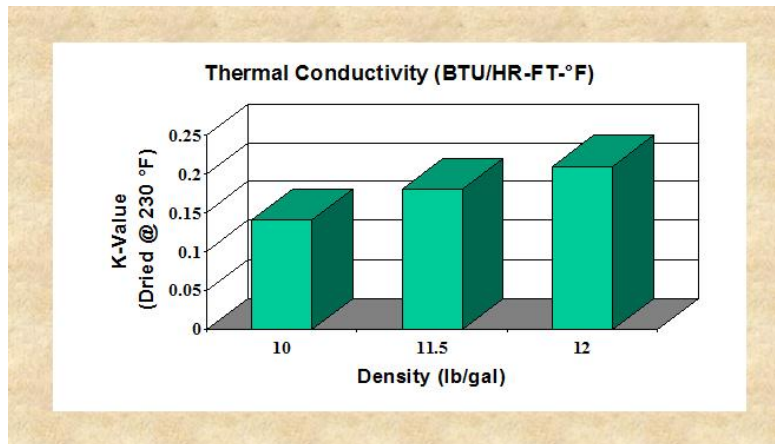


FIGURA 213. COMPORTAMIENTO DEL RANGO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN LECHADAS CON DIFERENTES DENSIDADES.

La conductividad térmica del cemento espumado es bastante baja. Como se puede ver en estos datos de cemento de la espuma seca a 230 grados F, vemos una conductividad térmica por debajo de los 0.15 BTU grados centígrados y que la conductividad térmica disminuye a medida que disminuye la densidad de la espuma.

7.5 Migración de Gas.

Las lechadas de cemento espumado ante la presencia de migración de gas:

1. Un cemento espumado no debe presentar baja calidad de espuma (5 - Calidad 23%).
2. Debe de Soportar afluencia de gas, ya sea en estado estático o dinámico.
3. No presentar cambios de transición o pérdidas en su estado de integridad de la lechada, durante la fase líquido-sólida en la formación.
4. Ofrecer flexibilidad en el cemento fraguado para evitar la pérdida de la integridad de los pozos con el cambio de las condiciones de presión

Pérdida de presión hidrostática

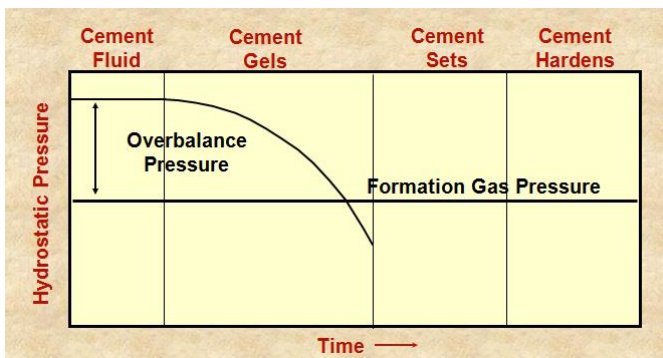


FIGURA 214. GRÁFICA QUE MUESTRA LA PÉRDIDA DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA POR DEBAJO DEL POTENCIAL DE LA PRESIÓN DE FORMACIÓN.

Cemento energizado

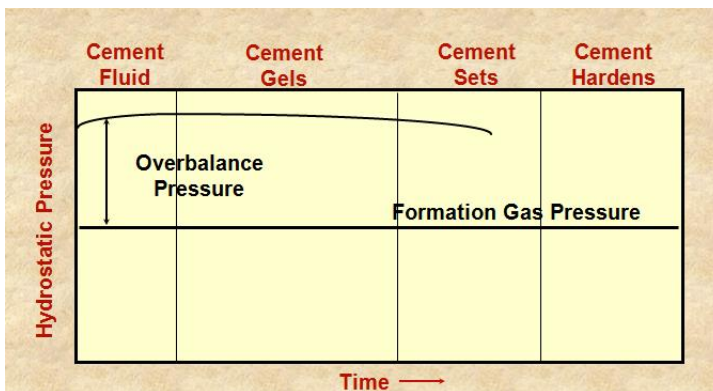


FIGURA 215. GRÁFICA QUE MUESTRA EL TIEMPO DE PRESIÓN DE FORMACIÓN vs LA PRESIÓN DE HIDROSTÁTICA.

Una suspensión de energía se mantiene por encima de la presión de la formación debido a su energía interna

7.6 Ventajas de los sistemas de Cemento energizados.

- Mayor resistencia al agrietamiento por tensión causada por la perforación, comunicados de energía.
- Desarrollados para servir y dar estabilidad a una excelente perforación y producción.
 - Las pruebas han demostrado que un cemento energizado, es una de las mejores suspensiones perforantes.
 - No ocurrencia de fallas o rompimiento (estallamiento) del cemento debido a la energía de perforación.

Si el cemento espumado mantiene sus propiedades, nos proporciona los atributos necesarios para servir como una suspensión de producción con calidad.

7.7 Prueba de Estrés o esfuerzo a gran Escala a una lechada de cemento convencional

- El cemento se convirtió en frágil
- Se presentaron grietas radiales
- Ocurrió un fallo de comunicación Longitudinal
- La creación de un micro anillo en un espacio anular

El fracaso típico para los cementos no espumados; fue que el cemento se convirtió en quebradizo y formado grietas radiales, se produjo la comunicación longitudinal, y el cemento presento desligadura (se rompió el sello hidráulico) de la tubería interior, y se produjo la creación de un micro espacio anular.

7.8 Prueba de esfuerzo a gran escala a una lechada de cemento espumado.

- Sin grietas radiales.
- pequeña desunión o pérdida de adherencia.
- El cemento espumado se deforma y absorbe la energía expansiva sin fallo, debido a su naturaleza elástica

Cuando se utilizó un cemento espumado en el anillo de la carcasa y se ensayó de la misma manera, la misma a presión interna tan alta como 10,000 psi no causó grietas radiales en el revestimiento de cemento. Sólo una pequeña cantidad de pérdida de adherencia se indica mediante el empleo de ensayos de permeabilidad. El cemento espumado era capaz de deformarse y absorber la energía expansiva sin fallos debido a su naturaleza elástica.

7.9 Ventajas de los sistemas de espuma durante la hidratación del cemento

- Evita la migración de gas.
 - La presión hidrostática se mantiene como los hidratos de cemento
 - La expansión de las burbujas minimiza la pérdida de fluido a la formación

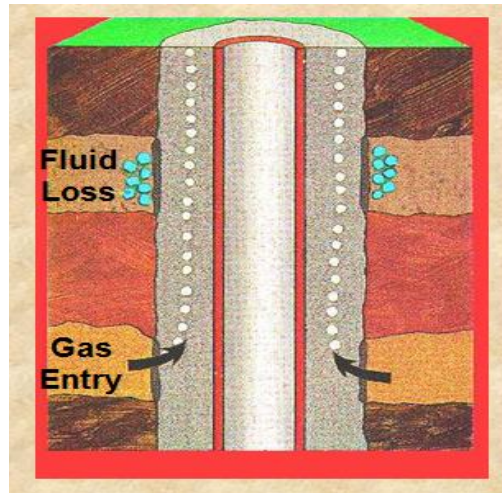


FIGURA 216. MUESTRA EL EFECTO DE LA PÉRDIDA DE FLUIDO BAJO EL EFECTO DE MIGRACIÓN DE GAS EN UNA LECHADA DE CEMENTO CONVENCIONAL.

Debido a los sistemas de espuma que contiene burbujas de gas, el cemento se comprime a la presión estática que se hace circular en el pozo. Las burbujas se contraen o se expanden con la presión, pero no migran. Esto significa que la presión hidrostática se mantiene, tanto la hidratación de cemento como las burbujas del gas, no pueden migrar del cemento mientras se está fijando.

Estas burbujas también se han encontrado recubriendo afuera en contra de la formación y servir como agente de puente para que reduzca la pérdida de fluido. Reducir al mínimo la pérdida de fluido, mientras que al mismo tiempo el mantenimiento de la presión hidrostática garantiza que no se produzca la intrusión de gas durante la hidratación del cemento.

7.10 Estabilidad a los Intercambios de energía interna..

Imagen que muestra los efectos de equilibrio de la energía interna.

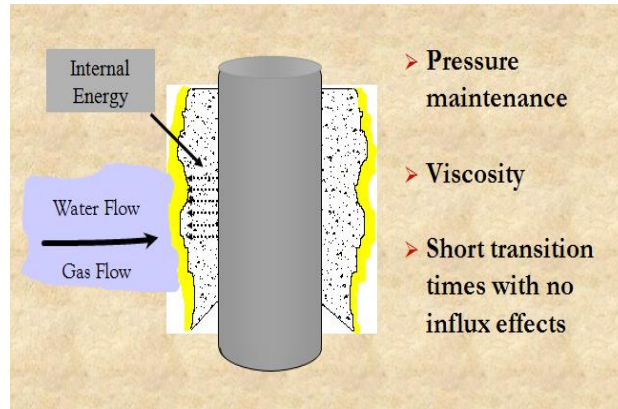


FIGURA 217. EFECTO DE LA ESTABILIDAD EN UN POZO BAJO LA ENERGÍA INTERNA DE UNA LECHADA ESPUMADA.

7.11 Aplicaciones de los cementos espumados.

- Realiza trabajo de cementación en una sola etapa a través de formaciones débiles
 - Evita y previene la pérdida de circulación
 - Ahorro en el tiempo del empleo de equipo
 - Ahorrar económicamente.
- Compresión de toda formación débil
 - Evitar pérdidas de circulación durante la compresión
 - Mantener indicación de presión en la superficie a lo largo del trabajo durante la
 - Cumplimiento de estabilidad conformada

Una de las principales aplicaciones de las lechadas de cemento espumado es un trabajo de cementación en una etapa en formaciones débiles. Esto se hace para evitar la pérdida de circulación, ahorrar tiempo de equipo y ahorrar dinero. Las lechadas de Cemento espumado también se pueden utilizar para la compresión a través de formaciones débiles. Esto evita la pérdida de circulación durante los trabajos de compresión y mantiene un indicador de presión en toda la superficie de trabajo. Cementos de espuma también se pueden utilizar para la conformidad de inyección o para los tratamientos de control de agua.

7.12 Gas y Agua, Problemas de Afluencia.

La gran afluencia de agua o gas han convertido a muchas operaciones de un buen trabajo a uno malo. A menudo, la capacidad de mantener una columna hidrostática nos lleva a trabajar con muchos flujos debido a la pérdida de control. La mayoría de los flujos de agua tienen altas propiedades corrosivas. Pero los problemas de estabilidad en la columna hidrostática se dan por:

- Los intervalos con gran afluencia de agua o gas
- La capacidad de carga hidrostática y consideraciones bajo la presión de poro
- Las duras condiciones, mientras que la corrosión es un problema.

Problemas de Formación de canales de gas en un cemento convencional.

Las causas o problemas que nos aporta la formación de canales son que:

1. El equilibrio de la Presión de sobre balance se pierde.
2. La pérdida de líquido o de fluido continúa en la zona de presión más baja.
3. El gas entra al pozo y se filtra hasta formar un anillo.

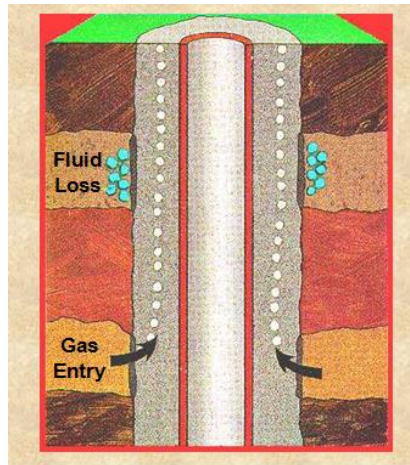


FIGURA 218. EFECTOS Y DAÑOS QUE GENERA LA FORMACIÓN DE CANALES EN LA ESTABILIDAD DE UN POZO.

Las lechadas de Cemento espumado proveen muchos atributos y soluciones para resolver problemas

7.13 Las lechadas de cemento espumado una opción para el desarrollo de pozos en aguas Profundas y Ultraprofundas.

Las lechadas de cemento espumado se emplean para controlar la acción de estos tipos de problemas de formación. Pero una simulación computacional nos proporcionaría una valiosa asistencia de planificación y realización de este tipo de trabajo, ya que nos ayudaría a determinar:

- Los cambios en la densidad.
- De la viscosidad.
- De compresibilidad y / o expansión.
- La fricción durante una operación dinámica en tiempo real.
- Las capacidades de monitoreo de su colocación.

7.14 Terminaciones históricas con cemento Espumado.

7.14.1 Pozo de la cuenca del Pérmico con disparos en el Revestidor y con Finalización del agujero abierto.

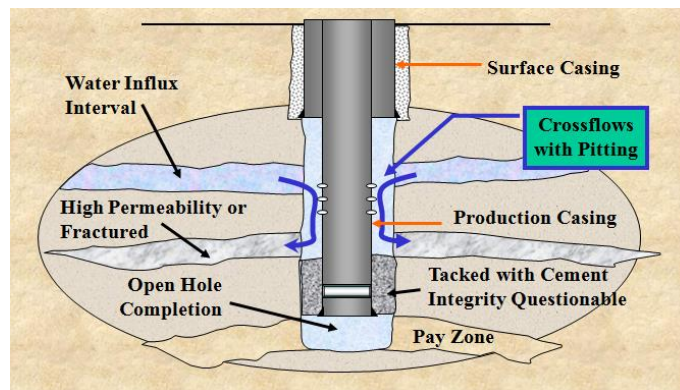


FIGURA 219. IMAGEN DE UN POZO CON LA TERMINACIÓN ESPUMADA DE POZO ABIERTO

Una cadena de disparos de producción en una zona de influjo con agua expuesta en el espacio anular, junto a una zona capaz de pérdida debido a la alta permeabilidad, con baja presión de poro, y posiblemente con fracturas y cavidades. Generalmente existen Intercambios de flujo cruzado en el espacio anular que pueden causar fallos corrosivos como picaduras en la tubería de revestimiento.

7.14.2 Condiciones Posibles encontradas Durante la cementación de Revestidores.

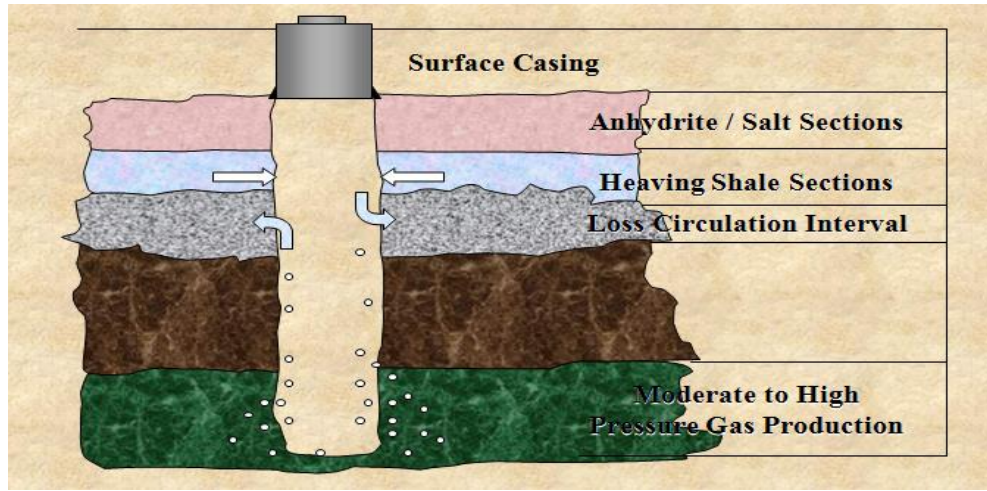


FIGURA 220. CONDICIONES PERJUDICIALES QUE SE ENCUENTRAN EN LOS POZOS DE LA CUENCA DEL PÉRMICO.

Construcción típica de pozos en la Cuenca del Pérmico con los tipos de condiciones perjudiciales que se pueden encontrar.

7.15 Cemento Espumado con Pérdida de Circulación Durante las operaciones de cementación de tuberías de revestimiento primarias.

7.15.1 Cementación primaria con Intervalo de Pérdida de Circulación e influjo de Gas - SE Nuevo Mexico

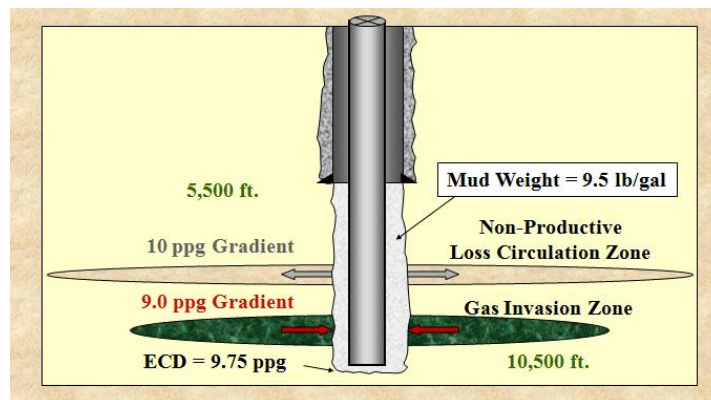


FIGURA 221. ESQUEMA QUE MUESTRA EL EMPLEO OPTIMO DE UNA LECHADA DE BAJA PRESIÓN A UN SISTEMA CON UNA VENTANA OPERATIVA MUY ESTRECHA.

Pozos como éste en el sureste de Nuevo México pueden circular con un lodo de 9.5 [ppg] o [lb/gal] con ligeras pérdidas. Pero si el peso del lodo va a unos 10 ppg, hay una pérdida total de retorno. Pero si se permite que el lodo se pueda aligerar a 9.0 ppg, el pozo fluirá.

Esta es una ventana muy estrecha de los gradientes de presión. Los Métodos de cementación primaria Convencionales con desplazamiento de tapón no pueden resolver los problemas por que superan la presión de fractura de las afluencias de la zona y la pérdida de tiempo de tránsito de gas de la zona productiva.

7.15.1.1. Cementación Primaria con intervalo de Pérdida de Circulación y Afluencia de gas 1ra Fase.

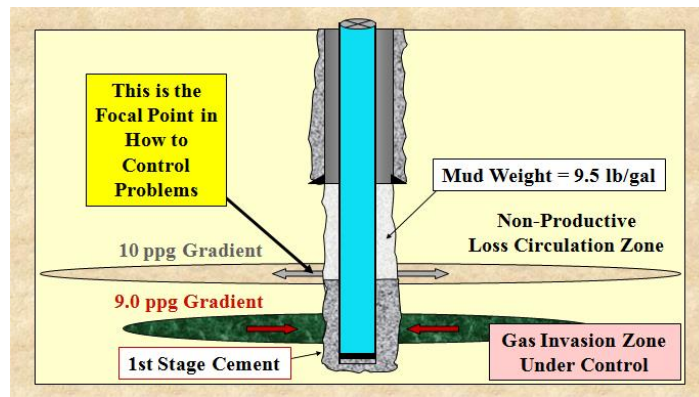


FIGURA 222. ESQUEMA DE UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA CON PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN Y AFLUENCIA DE GAS.

La determinación y el uso de un Punto Focal.

La Primera etapa de cementación se lleva hasta una circulación con exceso de pérdida. Este cemento cubre la zona de afluencia de gas y es generalmente un cemento espumado densificado en el rango de 12.5 a 13.5ppg.

7.15.1.2. Cementación Primaria con Pérdida de Circulación en un intervalo y Afluencia de gas - 2ª etapa - Compresión Anular

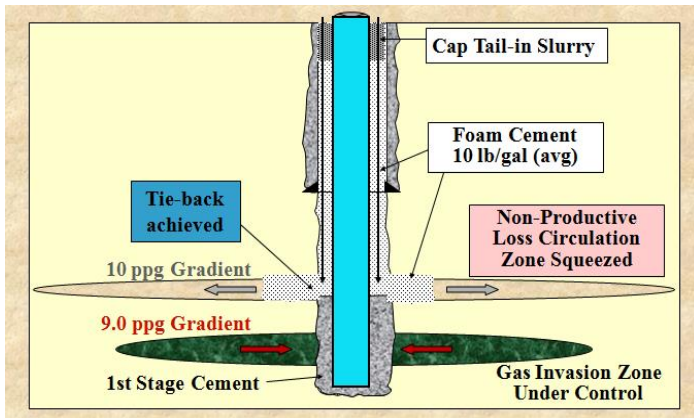


FIGURA 223. ESQUEMA DE UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA CON PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN Y AFLUENCIA DE GAS EN UN INTERVALO.

El punto focal (intervalo de pérdida de Circulación) se utiliza para comprimir el cemento espumado energizado por el espacio anular en la segunda etapa. Se lleva a cabo inmediatamente después de golpear el tapón en la primera etapa generalmente. El cemento energizado tiene la viscosidad para desplazarse por el espacio anular hacia abajo al intervalo de pérdida de circulación y ganar un relleno de fondo en el espacio anular.

7.15.1.3. Cementación Primaria w / con Pérdida de Circulación en intervalo y Afluencia Gas - Registros de evaluación de la Cementación.

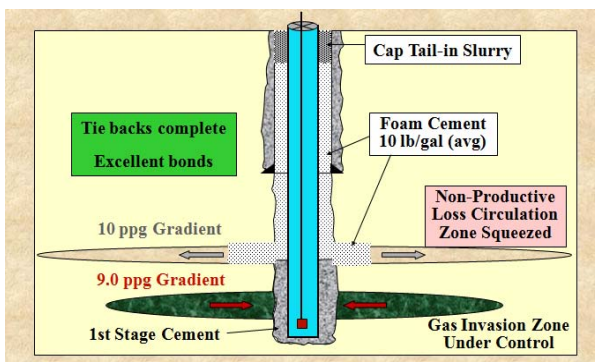


FIGURA 224. ESQUEMA DE UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA CON PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN Y AFLUENCIA DE GAS DETALLADA EN UN INTERVALO DE LA CEMENTACIÓN.

Posteriormente de los Registros de cemento (emisión V) nos muestran los excelentes vínculos y lazos completamente en conjunto de la primera y segunda etapa.

Permeabilidad bajo condiciones de presión de fractura:

Algunos aspectos que intervienen en la colocación del cemento en los espacios anulares, donde:

- existen gradientes bajos de fractura
- fracturas naturales presentes
- baja presión de poro en varios intervalos
- alta permeabilidad presente en intervalos
- Existencia de fisuras
- La afluencia de agua o gas en intervalos de presión superiores, que pueden presentar problemas como en la integridad del espacio anular.

7.16 Cemento energizado empleado Durante la Pérdida de Circulación para un Linner completo o una sarta de producción en las operaciones de cementación, Casos Históricos.

7.16.1 Circulación Inversa.

- Método Opcional en cementación profunda con Agujero estrecho de Liners
- Cemento Energizado utilizado para desplazarse dentro del anular en un liner o en un revestidor.
- Capacidad debido a la viscosidad del cemento energizado
- Reduce los problemas asociados a la fricción y la sobre presión de una formación
- Un disparo por cambios de temperatura
- Es una solución probada y verdadera en pozos que no se pueden hacer circular por mucho tiempo. El secreto está en la viscosidad del cemento espumado para desplazarse de manera eficiente y efectiva por el anular. La Fricción ahora se convierte en uno de sus aliados y el tiempo establecido de que el cemento puede ser el más adecuado, ya que no tiene que viajar todo el camino a la zapata y luego ser desplazado hacia atrás hasta la estructura a una temperatura mucho más baja. La lechada puede tener tiempos de fraguado muy largos en profundidades menores debido a tener que protegerla de la temperatura de la Zapata. Permite que el punto de enfoque sea la zapata pues le dará a uno la capacidad de colocar el cemento espumado por el espacio anular a través de baja presión y en los intervalos de alta presión sin perder el control del pozo.

7.17 Problemas de cementación en sartas de Producción y Linner:

- Los Liners y sartas de producción tienen espacios anulares muy delgados o estrechos con agujeros u hoyos que son muy difíciles de cementar porque la mayoría de las condiciones son adversas:
 - Los Espacios anulares usualmente suelen ser muy pequeños
 - El Linner es generalmente mal centralizado debido a pequeños espacios.
 - contaminación del lodo generalmente presente
 - percolación de gas causando una matriz panal (porosa) con el cemento
 - La hidrostática es necesario abordar que normalmente cabe o encaja en una estrecha ventana
 - > presión de poro
 - < presión de fractura

Los revestimientos pueden ser utilizados para obtener la producción en pozos profundos generalmente con un mayor potencial de presión de producción, muchos son en zonas de gas.

En otras condiciones, se utilizan trazadores de líneas de producción para colocar las entradas en intervalos en donde la presión de poro es muy baja por que los cambios se realizan en las condiciones de perforación y con fluidos en la dirección de estos.

7.17.1 Cementación de un Linner o sarta de Producción con Intervalo Pérdida de Circulación y con presencia de influjo de Gas – Cuenca del Pérmico.

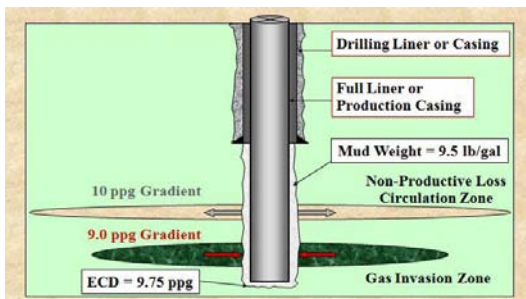


FIGURA 225. ESQUEMA DE CEMENTACIÓN DE UN LINNER CON PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN E INFLUJO DE GAS EN UN INTERVALO.

Estos son pozos que se están circulando de forma inversa con cemento energizado.

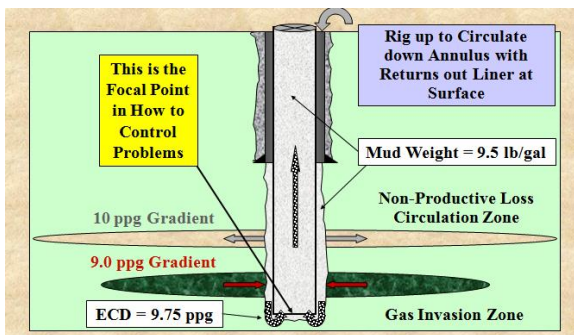


FIGURA 226. ESQUEMA DE CEMENTACIÓN INVERSA DE UN LINNER CON PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN E INFLUJO DE GAS EN UN INTERVALO.

Siendo de forma segura la circulación en ambos sentidos, a menudo una solución marcada (con un volumen del revestidor excedido) se inyecta por delante del cemento para que el operador sepa cuando el cemento se encuentra en la zapata.

En algunas operaciones, conectarse a una herramienta de registro puede ser corrida hacia abajo de la tubería de revestimiento y puede permitir seguir marcando una parte de la posición de la lechada para que a el operador le permita saber cuando el cemento ha llegado a la zapata.

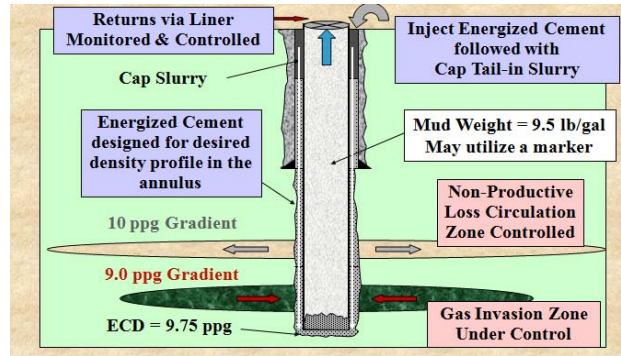


FIGURA 227. ESQUEMA DE INYECCIÓN DE UNA CEMENTACIÓN ENERGIZADA O ESPUMADA CON UNA LECHADA DE COLA.

El pozo no es fracturado y está bajo control durante toda la colocación. Una vez que un registro se hace circular fuera de la carcasa o del revestidor, se puede cerrar el anular hasta el tope y se comprime. La energía del cemento espumado puede soportar la afluencia de agua y gas y tiene la energía para crear una unión excelente entre la tubería y la formación.

Puede ser posible correr una sarta de tubo intermedio para recoger el exceso de la lechada que entra en la Zapata. La interesante puede ser entonces el retirar hacia arriba el cierre de una válvula de la Zapata y el exceso de cemento invertido fuera de la tubería sin dejar de perforar la salida requerida.

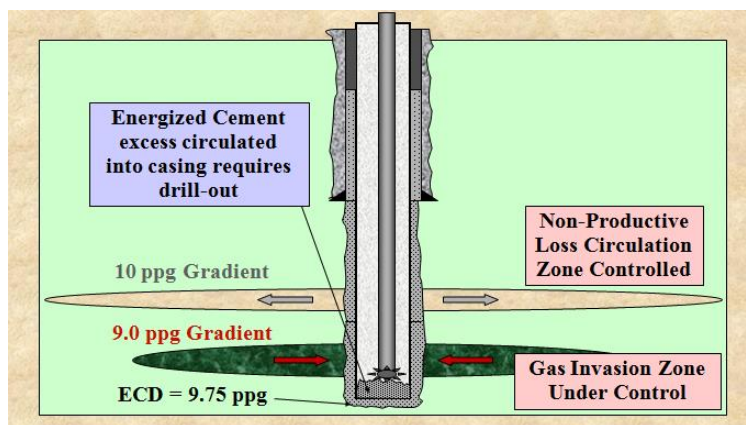


FIGURA 228. ESQUEMA DEL BALANCE DE UNA CEMENTACIÓN ENERGIZADA O ESPUMADA CON UNA LECHADA DE COLA ESTABLE EN TODA SU COLUMNA HIDROSTÁTICA.

Siguiendo los retornos, lo que nos indica que el cemento energizado ya esta en la Zapata, encerrado en la tubería y con compresión en la tapa; el siguiente paso es una operación de perforación limpia hacia fuera o de salida con exceso de cemento en la zapata de la tubería.

7.18 Cementación en pozos Horizontales

- Se logra una eficiencia de desplazamiento de alta de lodo
 - El desplazamiento adecuado de lodo en los pozos Horizontal se complica debido a la:
 - La formación de un canal con sólidos secundarios, en la parte baja formado con sólidos de perforación y material de lastre pesado del lodo
 - Excentricidad en la tubería con las fuerzas gravitacionales
 - Distribuciones de la velocidad de flujo en el pozo.

Las propiedades de cemento de espumado hacen que sea la mejor solución necesaria para las operaciones en los pozos horizontales. Tienen todos los atributos y propiedades que pueden hacer frente a la Pérdida de fluido y el desplazamiento de la eficiencia de fluido necesario para lograr una buena colocación.

- El desplazamiento adecuado del lodo en los pozos Horizontales también se complica debido a las:
 - Diferencias de densidad entre lodo, espaciadores y lechadas de cementos.
 - Las propiedades reológicas de los fluidos
 - Descompensaciones críticas en las presiones

Conseguir un buen trabajo en los pozos horizontales y desviados requiere una excelente eficiencia de desplazamiento.

Sólidos sedimentables en la cementación Convencional

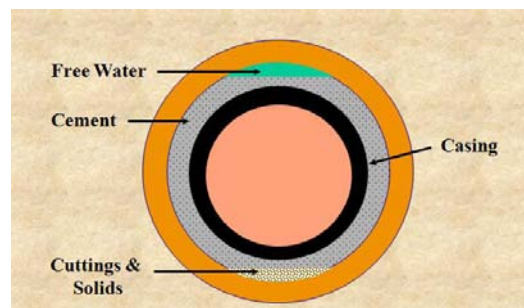


FIGURA 229. ESQUEMA DEL EFECTO DE AGUA LIBRE QUE SE PROVOCA EN UNA LECHADA CONVENCIONAL Y EL RECURSO DE EMPLEAR SISTEMAS ESPUMADOS ENERGIZADOS.

El agua libre que se rompe de una lechada de cemento va hacia la parte alta de la corona circular de la lechada, ésta es también una preocupación importante al cementar pozos horizontales o altamente desviados. Halliburton a través de sus investigaciones ha sido capaz de confirmar que el exceso de agua en el diseño de la lechada (la mala construcción en el diseño de la lechada) puede resultar en un canal de agua en la parte superior del anillo cementado en un pozo horizontal.

Para evitar este problema, una lechada de cemento con 0% de agua libre y sin sedimentación debe ser obtenido para cementar un pozo horizontal. Las pruebas de laboratorio deben hacerse con el cilindro fraguado y colocado en un ángulo de 45 grados para determinar el agua libre y los aspectos de pérdida de fluido. Los Cemento Espumados tiene las propiedades reológicas necesarias para abordar estos problemas y condiciones en donde dicho efecto de agua libre y sedimentación no se presentaran.

7.19 Cementación Horizontal de un Liner para integridad y futuras Remediaciones

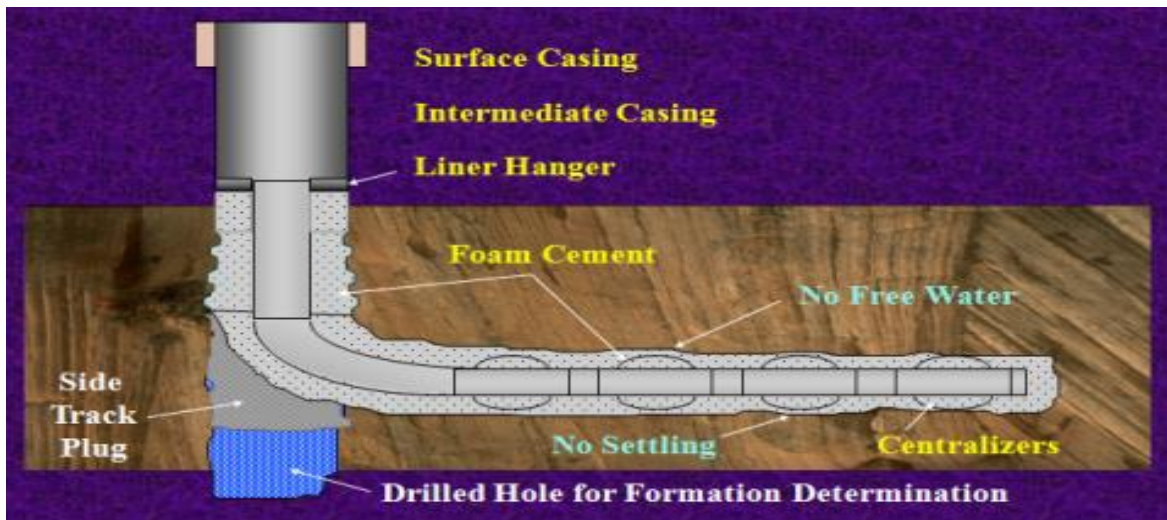


FIGURA 230. ESQUEMA DEL EFECTO DE AGUA QUE NO SE PRODUCE EN LAS LECHADAS ESPUMADAS Y SU RECURSO COMO OPERACIONES DE REMEDIACIÓN.

Se sugiere generalmente para realizar o correr un Liner en pozos horizontales si ha de ser después una estimulación o si a la formación se le requiera tener un control y si se necesitara cambiar la producción no deseada, de esta forma se podría encontrar en alguna parte el bloqueo o a lo largo de la entrada.

7.20 Atributos y Propiedades de la cementación espumada.

- El Cemento espumado ha demostrado ser eficaz para ayudar al flujo de gas de tope anular después de la cementación
- Cemento espumado no pasa por el alivio hidrostática que se muestra por los cementos convencionales durante su período de transición (líquido a estado sólido)
- El Cemento espumado ha demostrado ser una de las mejores tecnologías de cementación para los pozos horizontales y Desviados.
- Provee de un buen seguimiento de Estimulación, mejor controlado y menos orientación de deflexión.

Una lista de los atributos y propiedades del cemento espumado que provee en la cementación horizontal de pozos, sería referida a lo siguiente. El Cemento espumado es una de las soluciones que nos provee de una ventana de oportunidades cuando reúnen todos los criterios y necesidades con los cuales estamos tratando. Sistemas fracturados, condiciones fisuradas, gran afluencia de gas o agua, y todas las variaciones de la presión de poro se pueden abordar con estos cementos. A menudo, las suspensiones microfinas y las de base de aceite se pueden espumar también.

7.21 Simulador Computarizado de trabajos compresivos, SQZSIM 1 & 2

El simulador modela la influencia de la reología del cemento, la geometría del pozo, la presión hidrostática y las tasas de bombeo en los puntos donde las presiones de compresión son más críticos. Permite el diseño de trabajo para establecer y protegerse contra el rebasamiento de los límites de presión de operación y la colocación de nuevos límites. El programa puede modelar el uso de fluidos nitrificados y cementos espumados.

Los fluidos nitrificados son fluidos multifásicos que incorporan una base líquida y nitrógeno en estado gaseoso. Los fluidos nitrificados se utilizan con frecuencia en tratamientos de estimulación para aumentar el rendimiento del fluido de tratamiento y mejorar el proceso de limpieza después del tratamiento.

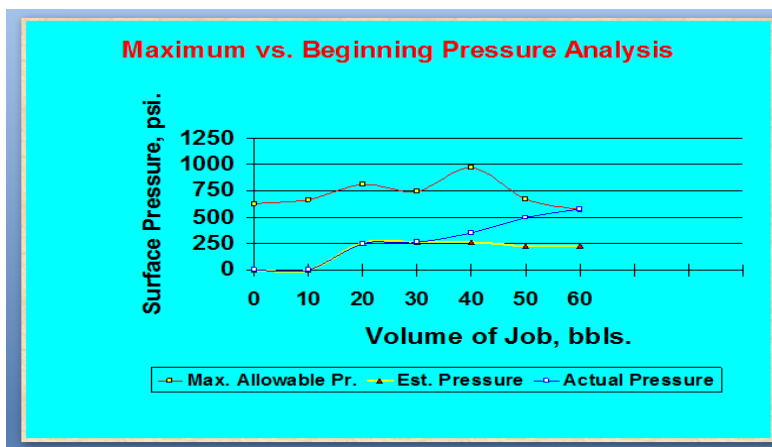


FIGURA 231. GRÁFICO DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN CON TRES ANÁLISIS A DIFERENTES LECHADAS.

La línea amarilla es la puesta en funcionamiento BHIP, la línea roja es la BHIP máximo deseado en la ejecución del trabajo, y la línea azul representa que se realiza el trabajo real. Tenga en cuenta que el trabajo se detuvo una vez alcanzado este punto. Esta gráfica viene de un tratamiento donde se comprimio una zona adyacente (producción de agua) y la limitación de no fracturar el gasto (donde habia petróleo) no se ha superado o sobrepasado. Esto permitió que el operador comprima sólo lo necesario sin dañar el intervalo deseado para la producción.

Atributos Necesarios para las lechadas con cemento Espumado.

- Los cementos espumados cuentan excepcionalmente con alta resistencia a la compresión a razón de su densidad
- Presenten Baja pérdida de líquidos y de agua libre
- Intermezclado Estable.
- Viscosidad y/o tixotropía previniendo fluidos e influjo de gas.
- Capacidad para soportar la degradación de CO2.

7.22 Costos y Beneficios

Analisis y Beneficios de la compresion de cementos espumados y en sartas de tuberías en la reparación de pozos.

- Beneficio:
 - Costo para Halliburton: \$ 969,065
 - Ahorros de costos a los clientes 5,238,835 dólares
 - Reducción del Costo de elevación: \$ 756,000
 - Pérdidas reducidas de CO2 y Agua \$ 819,000
 - Mejora en el barrido 7,597,500 dólares
- Valor para el Cliente (1er año) 8,203,435 dólares

Halliburton Energia y Servicios, Valor Económico: (Espuma de cementación)

(No incluye los juegos de accesorios como las Herramientas de Servicio Tuberías Elicoidales, acidificación, etc).

- I. *Los ingresos netos para los 12 primeros puestos de trabajo realizados: \$90,710 dolares*
- II. *Los ingresos netos procedentes de los actuales 31 puestos de trabajo realizado: \$234,330*
- III. *Valor neto de Reducción de Costos de Atención al Cliente: (primeros 12 trabajos) \$346,210*
- IV. *Valor neto de Reducción de Costos de Atención al Cliente: (actuales 31 trabajos) \$1,164,570*

Sobre la base de Reducción de Costos de elevación:

*(50 pozos) (Reducciones de un promedio de 2500 BWPD)
(125.000 BWPD @ coste eléctrico de \$63,000 dólares por mes) \$756,000
(Basado en las reducciones de 1500 BWPD por pozo siendo ciclico) (Por año)*

Sobre la base de la reducción de pérdidas de inyectado CO2 y agua Manejo:

*(13 pozos) (Reducciones de media de \$63,000 dólares /pozo) \$819,000
(Basado en reducciones cíclicas de 150 MCF / al día de CO2 por pozo) (Por año)*

Basado en la mejora de barrido con una mayor recuperación de petróleo:

(50 pozos) (Mejora de la recuperación de la media de 22 barriles por día cada una)

(1.100 barriles al día @ \$ 15.00 por bbl.) \$6,022,500

(Basado en el precio promedio del petróleo de medio semestre de 1995) (Por año)

Valor económico de los clientes:

La mejora de la producción y menores costos: \$7,597,500 (por primera Año)

El costo de los servicios a pozo: (\$644,560)

Valor económico de los clientes: \$6,952,940 (por primera Año)

7.23 Terrenos Ubicación Diseño de disposición.

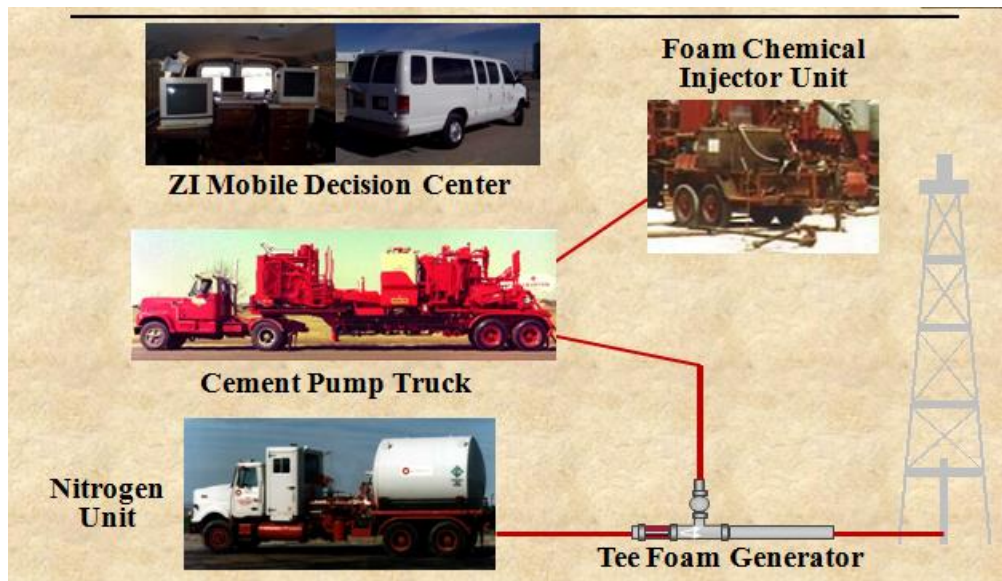


FIGURA 232. ESQUEMA DE LOS DISPOSITIVOS EMPLEADOS PARA LLEVAR ACABO UNA CEMENTACIÓN ESPUMADA Y LA DIMENSIONALIDAD DE LA UBICACIÓN DEL TERRENO PARA ESTAS PRUEBAS DE CEMENTACIÓN.

Ahora, para hacer realidad un trabajo de cementación espumada, es necesario un diseño de ubicación típica:

Tendremos un camion de alta con una bomba de cemento donde mezclaremos nuestra base de lechada de cemento, a continuación: junto vamos a tener una unidad de inyección, donde inyectaremos nuestro espumante y/o estabilizador o nuestros productos químicos de espuma en el lado de succión de la bomba de fondo de pozo. Esta lechada de cemento se bombea al generador de espuma.

Tendremos nuestra unidad de nitrógeno donde se vaporizara y se midiran las cantidades de nitrógeno especificado. Este fluido se bombea a través del generador de espuma donde pasará a 1/4" o 3/8" de chorro con una caída de presión de más de 350 psi.

A continuación una lechada de cemento de espuma se genera y luego esta suspensión se bombea al pozo. Actualmente se esta empleando y utilizando una nueva unidad de inyección denominada ZoneSealant que tiene capacidades de automatización.

7.24 Ingeniería de Diseño.

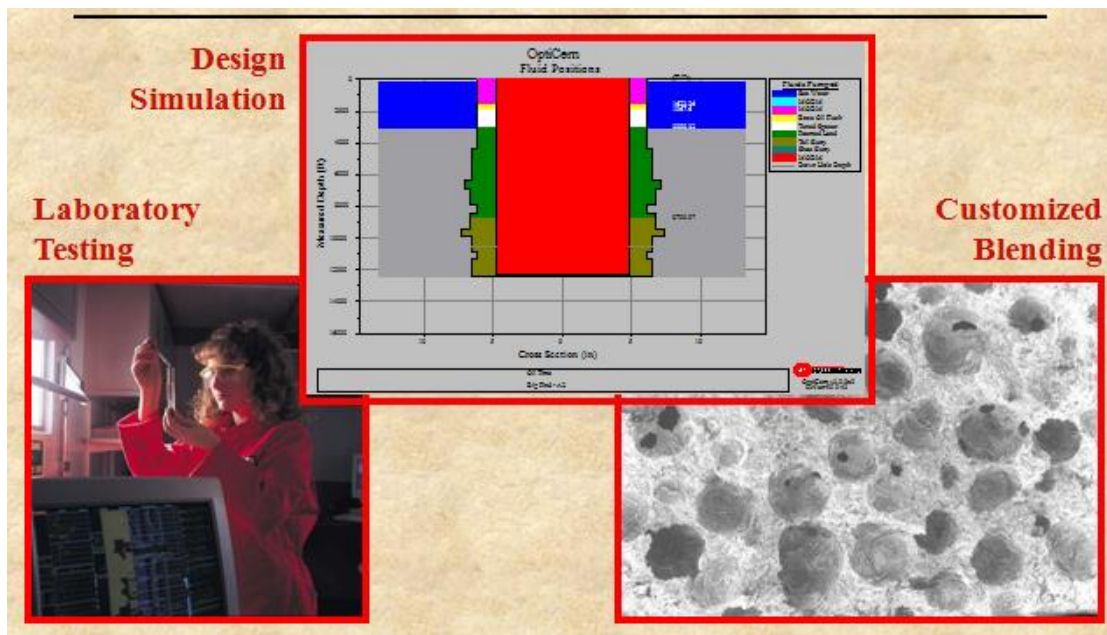


FIGURA 233. ESQUEMA DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA ELABORACIÓN DE LA INGENIERÍA DE DISEÑO DE LECHADAS ESPUMADAS.

La Mezcla personalizada es lo más a menudo empleado, y es simplemente cemento puro y los surfactantes necesarios para mantener una espuma estable en la lechada.

El nuevo ZoneSealant 2000 ha demostrado una eficacia para generar burbujas muy redondas en el cemento que le dan una excelente estabilidad.

7.25 Ventajas de Empleo del software OPTICEM 3.1

- Realiza cálculos estáticos y dinámicos
- Capacidad de fluidos mezclados
- Permite la colocación de la lechada, sin descompensación de la formación en diferentes escenarios
- Simulador de pozos y gráficos
- Excentricidad y Análisis Fuerza erosionabilidad
- Opción en tiempo real

El Programa Opticem de Halliburton es una herramienta de diseño interactivo que realiza ambos cálculos estáticos y dinámicos. El modelo estático ignora la fricción debido al bombeo y se utiliza para determinar las relaciones de nitrógeno, densidad de la suspensión a un volumen de profundidad y materiales para el trabajo. La versión anterior de FMCEM hizo un diseño estático y el OptiCem puede realizar esto en el modo de diseño estático.

El modelo dinámico toma esta salida y los factores de las presiones dinámicas como la fricción dinámica. Trabajar con ambos modelos permite ir y venir para afinar el trabajo para cumplir con las condiciones reales así., la ECD (densidad de circulación equivalente) puede ajustarse y rediseñarse para asegurar la colocación lisa con factores de seguridad adecuados y sin desglose de la formación.

7.26 Control a través de la adquisición de datos y monitorización de empleo.

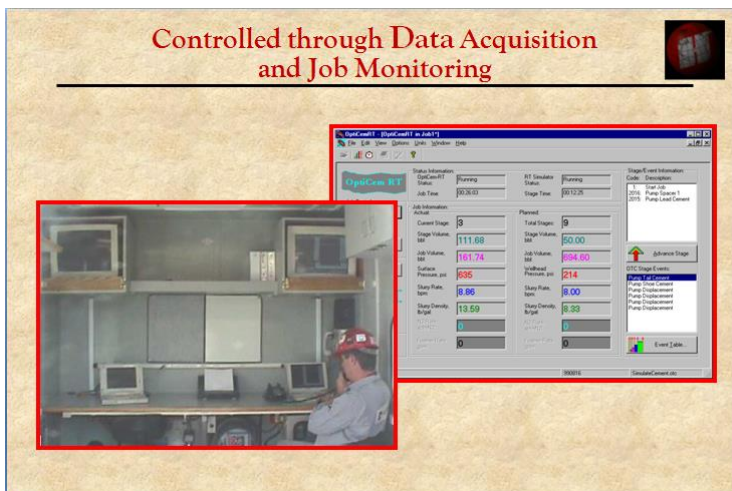


FIGURA 234. EMPLEO DE SOFTWARE COMPLEJO PARA EL MONITOREO DE OPERACIONES DE CEMENTACIÓN CON LECHADAS ESPUMADAS.

Los Sistemas automatizados de cemento nos proporcionan:

- El control automático de velocidad de nitrógeno.
 - Proporción de nitrógeno al caudal de la bomba de cemento.
 - Elimina errores del operador.
 - Puede proporcionar dosis de nitrógeno en una rampa continua.
- Control de la densidad del cemento automatizada (ADC).
 - Regula la entrega de cemento a granel.
 - Regula tasa de agua de la mezcla.
- Sistema de control de surfactante.
 - Metros de surfactante para una mezcla estabilizante a base del caudal de la bomba

Algunos de los recientes avances que han sido capaces de hacer con la tecnología de cementación con espuma incluyen la automatización y control de la tasa de nitrógeno, nuestro control de la densidad del cemento y la inyección de surfactante.

Ahora existe la capacidad de automatizar la tasa de nitrógeno de manera que podamos proporcionar de una determinada cantidad de nitrógeno del camión de alta con una bomba de nitrógeno. El diseño puede llamar para una relación de N₂ en rampa y la unidad de nitrógeno es capaz de ofrecer esta opción.

Esto elimina cualquier error del operador que se podría encontrar cuando se basa en la comunicación verbal sencilla durante el trabajo. También podemos automatizar el control de densidad de la lechada de cemento. Esto regula el suministro de cemento a granel y la mezcla de las cantidades de agua, así como elimina errores del operador. También podemos automatizar la cantidad y la velocidad de inyección de nuestros agentes tensioactivos en la suspensión sin espumar.

Capítulo I. Perforación en Aguas Profundas.

Figura 1. Ilustración de los equipos de perforación en aguas profundas.	III
Figura 2. Margen estrecho entre el gradiente de Fractura y la Presión de Poro.	V
Figura 3. Ventana operativa estrecha en zonas de Aguas Profundas.	VI
Figura 4. Representación de aguas profundas Pemex.	1
Figura 5. Delimitación de aguas profundas.	1
Figura 6. Ubicación de AP en el Golfo de México.	2
Figura 7. Áreas monitoreadas de AP por PEMEX.	2
Figura 8. Estructura de los Yacimientos en Aguas Profundas.	3
Figura 9. Comparación de las Ventanas Operativas entre Campos Someros vs AP.	4
Figura 10. Gráfica del Efecto de Temperatura sobre una lechada en AP.	5
Figura 11. Esquema de Posicionamiento Dinámico.	6
Figura 12. Sistema Compensador de Movimientos Verticales.	7
Figura 13. Dispositivo Compensador de Movimientos Verticales.	8
Figura 14. Tensionadores de Líneas Guías.	10
Figura 15. Estructura Guía Temporal.	11
Figura 16. Estructura Guía Permanente.	11
Figura 17. Conductor Marino (Riser).	12
Figura 18. Sistema del Conductor Marino.	13
Figura 19. Determinación de la Longitud del Riser Marino.	16
Figura 20. Semisumergible “Spiced Jar” ejemplo de configuración de riser.	18
Figura 21. Sistema Tensionador del Riser.	20
Figura 22. Vehículo de Operación Remota (Rov S.S Mata Redonda).	21
Figura 23. Tabla 5-6-7 Muestran algunos de los pozos de Cantarell en donde se han empleado este tipo de Cementos Ultraligeros (espumados).	29
Figura 24. Cementos Espumados empleados en el pozo Cantarell.	29

Capítulo II. Historia del Cemento.

Figura 25. Materia prima para Elaboración del Cemento.	30
Figura 26. Química del Cemento.	32
Figura 27. Materia Prima.	35
Figura 28. Proceso de Fabricación del Cemento.	36
Figura 29. Pulverización de la Materia.	37
Figura 30. Proceso de Fabricación del Cemento, Proceso Seco.	38
Figura 31. Vista Posterior y Lateral del Horno Rotativo y del Molino.	39
Figura 32. Proceso de Fabricación del Cemento, Proceso Húmedo.	39
Figura 33. Proceso de Fabricación del Cemento, Proceso de Calcinación del Clinker.	40
Figura 34. Diagrama del Proceso de Calcinación del Clinker.	41
Figura 35. Proceso de Almacenamiento del Cemento.	42
Figura 36. Hidratación de las Fases del Clinker.	43
Figura 37. Efectos de la Hidratación del c_3s y c_2s .	44
Figura 38. Comportamiento de la Hidratación del C_3S y C_2S .	44
Figura 39. Etapa inicial de Hidratación.	45
Figura 40. Diagrama Térmico de Hidratación del C_3S .	45
Figura 41. Diagrama Térmico de Hidratación del C_3A .	49
Figura 42. Termogramas del Cemento Portland C_3S y C_3A .	50
Figura 43. Diagrama del Comportamiento del cemento en Función de su Reactividad y la Presencia de Sulfatos.	53
Figura 44. Diagrama del Encogimiento Externo.	54
Figura 45. Mineralogía Básica del Cemento.	55
Figura 46. Composición Porcentual del Cemento Portland.	56
Figura 47. Composición Química del Cemento.	57
Figura 48. Vista Química del Cemento.	58
Figura 49. Propiedades Físicas y Químicas del Cemento.	59
Figura 50. Requerimientos Químicos del Cemento.	62
Figura 51. Requerimientos Físicos del Cemento.	65
Figura 52. Clasificación API de los Cementos.	66
Figura 53. Clasificación API de los Cementos según sus Propiedades.	67
Figura 54. Clasificación API de los Cementos según sus Propiedades de Especificación (continuación).	69
Figura 55. Relación entre la Profundidad del Pozo y el Tiempo de Cementación.	70
Figura 56. Comparación de los Cementos Petroleros vs Cementos Venezolanos.	71
Figura 57. Tabla de Esfuerzo Compresivo y de Porcentaje de Agua para Diferentes Tipos de Cementos API.	72
Figura 58. Volumen Absoluto de Encogimiento de un Cemento Portland de Densidad 16.42 [lb/gal] (Parcevaux y Sault, 1984).	75
Figura 59. Cementación con Escoria en Pozos de Inyección con Vapor.	77
Figura 60. Comportamiento Reológico de los Cementos Tixotrópicos.	80
Figura 61. Comportamiento de la Presión y el Caudal del Bombeo.	80
Figura 62. Propiedades de los Cementos Tixotrópicos.	81
Figura 63. Resistencia a la Compresión de la Mezcla 50:50, Yeso: Portland.	84
Figura 64. Comportamiento de la Etringita, Expansión Lineal vs Tiempo.	85
Figura 65. Tabla de Valores Típicos de Resistencia a la Compresión de los Cementos Salados.	89
Figura 66. Tabla de Valores del Comportamiento Reológico y Pérdida de Filtrado de los Cementos Salados.	89
Figura 67. Sal como el Aditivo de Mayor Demanda.	90
Figura 68. Ahorro por Tonelada Aditiva.	92

Figura 69. Esquema que muestra el Deterioro del Cemento por el Ataque Químico.	93
Figura 70. Carta de Prueba Corrida de Esfuerzo Compresivo a un Cemento Convencional.	94
Figura 71. Carta de Prueba Corrida de Esfuerzo Compresivo al Cemento H-PEMEX.	95
Figura 72. Comparación Mineralógica entre el Cemento H, G y H-PEMEX.	96
Figura 73. Comparación Costo Aditivos vs Tonelada de Cemento para los Cementos Clase G, H y H-PEMEX.	97
Figura 74. Comparación entre la Diferencia de Costos Aditivos vs Clase de Cementos.	97
Figura 75. Comparación entre las Horas de Fraguado para los Cementos Clase H y H-PEMEX.	98
Figura 76. Conclusión de resultados del Empleo del Cemento clase H-PEMEX para el Pozo Cunduacan 1025 a una Profundidad de 2000 mts.	98
Figura 77. Conclusión de resultados del Empleo del cemento clase H-PEMEX para el pozo Cunduacan 1025 a una Profundidad de 3,750 mts.	99
Figura 78. Esquema Grafico de una Cementación Primaria.	101
Figura 79. Tabla de Aditivos Aceleradores.	103
Figura 80. Tabla de Aditivos Retardadores.	104
Figura 81. Tabla de aditivos Extendedores.	105
Figura 82. Tabla de Aditivos Densificantes.	106
Figura 83. Tabla de Aditivos Reductores de Fricción.	106
Figura 84. Tabla de Aditivos Controladores de Filtrado.	107
Figura 85. Tabla de Aditivos Controladores de Perdida de Circulación.	107
Figura 86. Tabla de Aditivos Especiales.	108
Figura 87. Tabla de Aditivos Controladores de Gas.	108
Figura 88. Tabla de Aditivos Controladores de Agua Libre.	109
Figura 89. Tabla de Aditivos Antidegradantes.	109

Capítulo III. Evaluación de la calidad de los cementos.

Figura 90. Balanza Electrónica.	112
Figura 91. Pesos Requeridos-Establecidos en la Balanza Electrónica.	113
Figura 92. Mezcladora Industrial Chandler 2 Velocidades.	114
Figura 93. Tabla 2 Composición de la Lechada de Cemento.	115
Figura 94. Tabla 3 Requerimientos del Volumen de Agua y Cemento para una Lechada.	115
Figura 95. Balanza de Lodos Presurizada.	116
Figura 96. Balanza de Lodos Presurizada con Bomba de Cilindro Pistón (antes de presurizar con el mismo fluido).	117
Figura 97. Consistómetros Presurizados a Alta Presión y Alta Temperatura (HP-HT o APAT).	118
Figura 98. Consistómetros Atmosféricos.	119
Figura 99. Dispositivo de Calibración del Potenciómetro Modificado para el Consistómetro Atmosférico.	121
Figura 100. Viscosímetro Rotacional FANN 35-a.	121
Figura 101. Autoclave de Acero, o-Rings, Anillo de Seguridad y una Malla de 325 Mesh Soportada por otra Malla de 60 Mesh.	125
Figura 102. Filtro Prensa FANN de 1 y 2 Celdas.	125
Figura 103. Malla de 325 Mesh (44 micrones) Soportada por una Malla de 60 Mesh (250 micrones).	128
Figura 104. Probeta con Filtrado de una Lechada de Cemento.	128
Figura 105. Determinación del Enjarre de la Prueba de Pérdida de Fluido por Filtrado Excesivo.	129
Figura 106. Tabla F1 Presión de Vapor y Volumen de Expansión del Agua a Temperaturas entre 100 °C (212 °F) y 316 °C (600 °F).	130
Figura 107. Tabla F-2 Cédula de Prueba de Simulación de Pozo para Prueba de Filtrado arriba de 90 °C (194 °F) y debajo de 121 °C (205 °F).	131
Figura 108. Consistómetro Presurizado HP-HT.	132
Figura 109. Potenciómetro, Accesorios de Ensamble para Elaborar la Celda Presurizada.	133
Figura 110. Tabla 8.1 Torque Equivalente vs Consistencia.	134
Figura 111. Cedula 5, Prueba de Especificación para Cementos Clase H y G.	136
Figura 112. Tabla 5.4, Requerimientos de Aceptación de los Cementos Clase G y H.	137
Figura 113. Tabla 8.2, Bases para las Celdas de Prueba para Cementación Primaria.	138
Figura 114. Esquemas Típicos del Consistómetro Presurizado HP-HT de Dirección Magnética para Determinar el Tiempo de Espesamiento.	139
Figura 115. Moldes Cúbicos para Prueba de Resistencia Compresiva.	140
Figura 116. Moldes Cúbicos con Cubre Placas.	140
Figura 117. Cámara de Baño María.	141
Figura 118. Diagrama de Preparación de Moldes para Fraguado.	142
Figura 119. Cámara de Curado con Autoclave, Sistema de Temperatura, y Moldes para Fraguado de Cemento.	143
Figura 120. Equipo de Cámara de Curado Consistómetro HP-HT.	144
Figura 121. Tabla de Especificaciones de Procedimientos de Prueba de Curado de Especímenes para la Resistencia a la Compresión.	146
Figura 122. Probeta de 250 ml.	148
Figura 123. Probeta de 250 ml Libre de Cualquier Vibración.	149
Figura 124. Probeta a 45° para Pruebas de Agua Libre en Pozos Desviados o Inclinados.	149

Capítulo IV. Lechadas Espumadas.

Figura 125. Definición y Muestra de una lechada de cemento espumado.	150
Figura 126. Propiedades del Nitrógeno (N ₂).	151
Figura 127. Tipos de Cemento Espumados Elaborados en la Planta de Cementación Halliburton.	151
Figura 128. Cemento Espumado.	154
Figura 129. Cemento Espumado Proceso Zone Sealant, Imagen Cortesía Halliburton.	155
Figura 130. Bomba HT-400 Halliburton.	157
Figura 131. Aditivo Zone Sealant 2000 (Espumante).	158
Figura 132. Problemas que se Pueden Originar por una Inadecuada Remoción de Lodo en el Anular.	159
Figura 133. Cantidades de Materiales Aditivos Necesarios para un Diseño de Lechada.	165
Figura 134. Pesado del Cemento y de los Agentes Espumantes.	165
Figura 135. Peso Correcto y Validado por Medio de un Software.	165
Figura 136. Proceso de Mezclado del Cemento con los Aditivos en la Mezcladora Chandler.	166
Figura 137. Características del Mezclado por Medio del Vórtice Generado en el Mixer.	166
Figura 138. Aditivo Zone Sealant 2000, Agente Tensoactivo Surfactante o Espumante.	167
Figura 139. Determinación de la Lechada de Diseño antes de ser Espumada.	168
Figura 140. Cálculo del Volumen de Lechada y de su Masa cuando se conoce el Contenido de Gas.	169
Figura 141. Cálculo del Volumen de Lechada y de su Masa cuando se conoce la Densidad de Lechada Espumada.	170
Figura 142. Determinación de la Masa de la Lechada y del Surfactante o Tensioactivo.	171
Figura 143. Vaso de Mezclado Especial para la Elaboración de Lechadas Espumadas.	173
Figura 144. Recipiente de Mezcla y Montaje de Cuchillas Múltiples. Conjunto Multi-Cuchilla (stacked-blade).	174
Figura 145. Conjunto de Hojas o Cuchillas Simples (de conformidad con la norma ISO 10426-2:2003, cláusula 5).	174
Figura 146. Conjunto Multi-Cuchilla (stacked-blade)	175
Figura 147. Determinación del Volumen del Recipiente de Mezcla para ambos Vasos de Mezclados (Espumado y Convencional)	175
Figura 148. Conjunto de Aspas Múltiples de 5 y 6 cuchillas.	176
Figura 149. Obtención y Medición de la Temperatura del Agua de Mezcla.	177
Figura 150. Balanza presurizada.	179
Figura 151. Preparación de la Lechada de Cemento Espumado a Condiciones Atmosféricas.	180
Figura 152. Colocación del Agente Sustentante sobre el Diseño de Lechada a Espumar.	180
Figura 153. Sellado del Vaso de Mezclado y Generación de la Lechada de Cemento Espumado.	181
Figura 154. Generación de la espuma en la lechada de cemento.	181
Figura 155. Generación de una Lechada de Cemento Espumado.	182
Figura 156. Recipiente para la Determinación de la Densidad de una Lechada Espumada.	191
Figura 157. Vaceado de la Lechada Espumada en el Recipiente de Densidad.	191
Figura 158. Determinación de la Densidad de la Lechada Espumada.	192
Figura 159. Balanza Presurizada, Nunca debe de ser Empleada en el Cálculo de un Fluido Espumado.	192
Figura 160. Muestras de Lechadas de Cemento Fraguadas y Medidas en su Densidad.	193
Figura 161. Ensamblado y Montaje de la Celda BP de un Consistómetro HP-HT.	193
Figura 162. Montaje de la Celda BP en la Cámara de Curado a la Temperatura y Presión de Prueba.	194
Figura 163. Moldes de Fragüe para la Determinación de la Estabilidad de	

una Lechada Espumada.	194
Figura 164. Modelado del efecto de agua libre en una lechada espumada para diferentes tipos de pozos.	195
Figura 165. Consistómetro atmosférico 165-AT.	196
Figura 166. Accesorios para la Determinación del Agua Libre.	196
Figura 167. Determinación del Efecto de Agua Libre para un Pozo Desviado a 45°.	197
Figura 168. Razonamiento Sobre el Efecto de Agua Libre en una Lechada de Cemento y sus Consecuencias en Pozos.	197
Figura 169. Dispositivo para Determinar la Estabilidad del Fraguado de una Lechada de Cemento Espumado.	198
Figura 170. Lechada Fraguada para Determinación de su Estabilidad.	199
Figura 171. Determinación de la Casa de Cada Sección.	199
Figura 172. Des montaje de los Moldes de la Determinación de Estabilidad de una Lechada Espumada.	200
Figura 173. Ejemplo del Molde de Curación para la Evaluación de la Estabilidad de la Lechada Cemento Espumado.	201
Figura 174. Muestra de Inestabilidad en una Lechada Espumada.	203
Figura 175. Moldes de fraguado y Cámara de Baño María para la Comprobación de Resistencia Compresiva en una Lechada de Cemento Espumado.	204
Figura 176. Moldes para la Prueba de Resistencia al Esfuerzo Compresivo en una Lechada Espumada.	204
Figura 177. Analizador Ultrasónico de Cemento (UCA).	205
Figura 178. Muestras de Cubos Fraguados de Lechadas Espumadas a Diferente Densidad, Listas para Comprobar su Esfuerzo Compresivo.	206
Figura 179. Dispositivo para el Fraguado de una Muestra de Lechada Espumada para Posteriormente Determinar la Permeabilidad de la misma.	207
Figura 180. Cubos Fraguados de Lechadas Espumadas a Densidades Menores que el Agua pero con Alta Resistencia Compresiva.	207
Figura 181. Consistómetro de Alta Presión y Alta Temperatura para la Determinación del Tiempo de Espesamiento en una Lechada Espumada.	208
Figura 182. Tipos de Consistómetros HP-HT con su Celda, Potenciómetro y con una muestra de Lechada Espumada después de su Tiempo de Espesamiento.	209
Figura 183. Consistómetro Atmosférico 165-AT, Equipo Filtro Prensa FANN, muestra de Filtrado en una Probeta por Presión excesiva y cronometro a 30min como lo indica la Norma API 10-b2 para realizar esta Prueba.	210
Figura 184. Filtro Prensa, Equipo para la Realización de la Prueba de Pérdida de Fluido por Filtrado Excesivo.	212
Figura 185. Viscosímetro Rotacional FANN 35-A, Equipo para el Desarrollo de la Prueba de Comportamiento Reológico de una Lechada.	213
Figura 186. Consistómetros Atmosféricos 165-AT, Equipo necesario para el Desarrollo de la Prueba de Comportamiento Reológico de una Lechada.	214

Capítulo V. Cementación Espumada.

Figura 187. Desarrollo de la Tecnología Espumada a través del Tiempo.	215
Figura 188. Dispositivos Encargados de la Generación de Espuma en las Lechadas de Baja Densidad.	215
Figura 189. Operación de Cementación Espumada en el Campo.	216
Figura 190. Definición Grafica de la Calidad de Espuma en una Lechada Espumada o de Baja Densidad.	217
Figura 191. Tasa Constante de Nitrógeno.	220
Figura 192. Variación de la Tasa de Nitrógeno.	220
Figura 193. Gráfica del Factor de Volumen de Nitrógeno, Comportamiento del Gas.	221
Figura 194. Requerimientos del Equipo de Cementación Espumada.	231
Figura 195. Requerimientos del Software del Equipo de Cementación Espumada.	231
Figura 196. Requerimientos del Equipo de Cementación Espumada (Bomba de N2).	232
Figura 197. Requerimientos del Equipo de Cementación Espumada (Tanque de N2).	233
Figura 198. Requerimientos del Equipo de Cementación Espumada (Generador de Espuma).	234
Figura 199. Accesorios de alta presión del equipo de cementación espumada.	215
Figura 200. Tipos de Unidades Hidráulicas para el Control de Procesos.	216
Figura 201. Accesorios de Alta Presión del Equipo de Cementación Espumada.	216
Figura 202. Gráfica de Permeabilidad del Cemento Espumado a Diferentes Presiones.	217
Figura 203. Implementaciones de la Cementación Espumada en el Golfo de México Colindando con los USA.	218

Capítulo VI. Gradiente Térmico.

Figura 204. Programa de Solicitud del Diseño de una Lechada de Baja Densidad a Espumar.	232
Figura 205. Grafica Visual de los Metros en donde se tiene la Temperatura Estática de Fondo requerida en el Programa de Solicitud de Diseño de una Lechada Espumada.	235
Figura 206. Gráfica Visual de la Obtención de los Grados y Presiones por cada Metro.	236
Figura 207. Gráfica Visual de la Diferencia de Profundidades a las cuales se Calculará la Temperatura y Presión de Circulación Real.	238
Figura 208. Sistema de Ecuaciones de 3x3 Generado para el Cálculo de la Temperatura de Circulación Real.	238
Figura 209. Sistema de Ecuaciones de 3x3 Generado para el Cálculo de la Presión de Circulación Real.	239
Figura 210. Gráfica del Programa de Pruebas Convencionales efectuadas bajo la Norma API para el Diseño de Lechadas de Baja Densidad a Espumar.	241

Capítulo VII. Análisis de Conclusiones y Resultados (Ventajas y Desventajas).

Figura 211. Rango de Densidades en Diferentes Sistemas de Diseños de Lechadas.	259
Figura 212. Rango del Esfuerzo Compresivo (T vs PSI) a diferentes Densidades de Lechadas.	259
Figura 213. Gráfica de Comportamiento de Permeabilidad vs Rango de Densidades en las Lechadas.	260
Figura 214. Comportamiento del Rango de la Conductividad Térmica en Lechadas con Diferentes Densidades.	260
Figura 215. Gráfica que muestra la Pérdida de Presión Hidrostática por debajo del Potencial de la Presión de Formación.	261
Figura 216. Gráfica que muestra el Tiempo de Presión de Formación vs la Presión de Hidrostática.	261
Figura 217. Muestra el Efecto de la Pérdida de Fluido bajo el Efecto de Migración de Gas en una Lechada de Cemento Convencional.	263
Figura 218. Efecto de la Estabilidad en un Pozo bajo la Energía Interna de una Lechada Espumada.	264
Figura 219. Efectos y Daños que genera la Formación de Canales en la Estabilidad de un Pozo.	265
Figura 220. Imagen de un Pozo con la Terminación Espumada de Pozo Abierto.	266
Figura 221. Condiciones Perjudiciales que se encuentran en los Pozos de la Cuenca del Pérmico.	267
Figura 222. Esquema que Muestra el Empleo Óptimo de una Lechada de Baja Presión a un Sistema con una Ventana Operativa muy Estrecha.	267
Figura 223. Esquema de una Cementación Primaria con Pérdida de Circulación y Afluencia de Gas.	268
Figura 224. Esquema de una Cementación Primaria con Pérdida de Circulación y Afluencia de Gas en un Intervalo.	269
Figura 225. Esquema de una Cementación Primaria con Pérdida de Circulación y Afluencia de Gas detallada en un Intervalo de la Cementación.	269
Figura 226. Esquema de Cementación de un Linner con Pérdida de Circulación e Influjos de Gas en un Intervalo.	271
Figura 227. Esquema de Cementación Inversa de un Linner con Pérdida de Circulación e Influjos de Gas en un Intervalo.	271
Figura 228. Esquema de Inyección de una Cementación Energizada o Espumada con una Lechada de Cola.	272
Figura 229. Esquema del Balance de una Cementación Energizada o Espumada con una Lechada de Cola Estable en toda su Columna Hidrostática.	272
Figura 230. Esquema del Efecto de Agua Libre que se provoca en una Lechada Convencional y el Recurso de Emplear Sistemas Espumados Energizados.	273
Figura 231. Esquema del Efecto de Agua que no se Produce en las Lechadas Espumadas y su Recurso como Operaciones de Remediación.	274
Figura 232. Gráfico de la Prueba de Compresión con tres Análisis a Diferentes Lechadas.	275
Figura 233. Esquema de los Dispositivos Empleados para llevar a cabo una Cementación Espumada y la Dimensionalidad de la Ubicación del Terreno para estas pruebas de Cementación.	277
Figura 234. Esquema de los Factores que Intervienen en la Elaboración de la Ingeniería de Diseño de Lechadas Espumadas.	278
Figura 235. Empleo de Software Complejo para el Monitoreo de Operaciones de Cementación con Lechadas Espumadas.	279

APENDICE I.

ANEXO I. EJEMPLO DE CEMENTACIÓN ESPUMADA EN EL GOLFO DE MÉXICO.

RESUMEN

Las formaciones débiles o con bajas presiones deben cementarse cuidadosamente para asegurar su aislamiento zonal y la protección ambiental. Hoy se dispone que nuevas lechadas de cemento ultraligeras que evitan el fracturamiento de la formación y las pérdidas de circulación durante las operaciones de perforación y terminación de pozos. Una vez fraguado, el cemento ultraligero alcanza la baja permeabilidad y la alta resistencia a la compresión necesaria para asegurar la integridad del pozo y el aislamiento de las formaciones.

En la etapa de diseño de la cementación espumada, se discuten aspectos como las restricciones para llevar a cabo la operación de cementación espumada, la planeación de cuales fluidos involucrados en la cementación serán espumados (lavador, espaciador y cemento), los métodos o técnicas para la inyección del gas, la secuencia operativa de la cementación para tubería de revestimiento larga y para tubería de revestimiento corta (liner), incluyendo en cada secuencia imágenes de cada paso de la cementación. Así como la explicación de la circulación de los fluidos en cada una de ellas.

DESCRIPCIÓN

En este documento se presenta una recomendación técnica para Cementar la Tubería de Revestimiento Corta Liner 7", a la profundidad de 5390 md operación próxima a realizarse en el pozo Juspi 1003. Esta propuesta se elaboró en base a la información proporcionada por PEMEX y a los resultados de las pruebas efectuadas el laboratorio de HALLIBURTON una lechada de cemento FracSeal™ Cement de 1.35 g/cc espumada a 1.07 g/cc con el proceso ZoneSeal y una lechada BondCem™ Cement de 1.95 g/cc para amarrar la zapata del liner de 7".

Como fluido espaciador se propone el uso de bache Tuned Spacer III densidad 1.08 g/cc, espumado a 0.67 g/cc con la finalidad de reducir la carga hidrostática en el pozo y el cemento pueda cubrir el espacio anular, limpiar la superficie de la tubería y paredes de la formación, así como prevenir la contaminación del cemento con el fluido de perforación. También se describe la corrida del programa iCem, el cual tiene la capacidad de calcular la densidad equivalente de circulación y compararla con los gradientes de poro y fractura obtenidos en la circulación del tiempo de atraso, en tiempo real durante la cementación, pudiendo así ajustar en base a las condiciones reales del pozo, los parámetros operativos.

Este programa se presenta considerando diámetro de agujero promedio 9.13" del registro Caliper, sin exceso, cima de cemento @ 4,700 m para la lechada FracSeal™ Cement de 1.35 g/cc y cima @ 5,210 m de amarre de BondCem™ Cement de 1.95 g/cc.

INDICE

- I. Antecedentes e Información del Pozo
- II. Estado Mecánico
- III. Fluidos a Bombear
- IV. Diseño de la Cementación
- V. Resultados de Laboratorio
- VI. Diseño del bache espaciador
- VII. Resultados del simulador
- VIII. Procedimiento operativo
- IX. Consideraciones de seguridad
- X. Recomendaciones generales

ANTECEDENTES E INFORMACION DEL POZO

El pozo Juspi 1003 actualmente perforado hasta la profundidad de 5,390 m con barrena de 8.5" y equipo direccional donde suspendió por recomendaciones de Pemex, para perforar se empleó lodo E.I. de 0.95 g/cc nitrogenado para una densidad equivalente de circulación de 0.87 g/cc, durante la perforación se tiene registrado una pérdida de lodo de 115 m³, el programa es tomar registros, evaluar, bajar y cementar liner de 7"

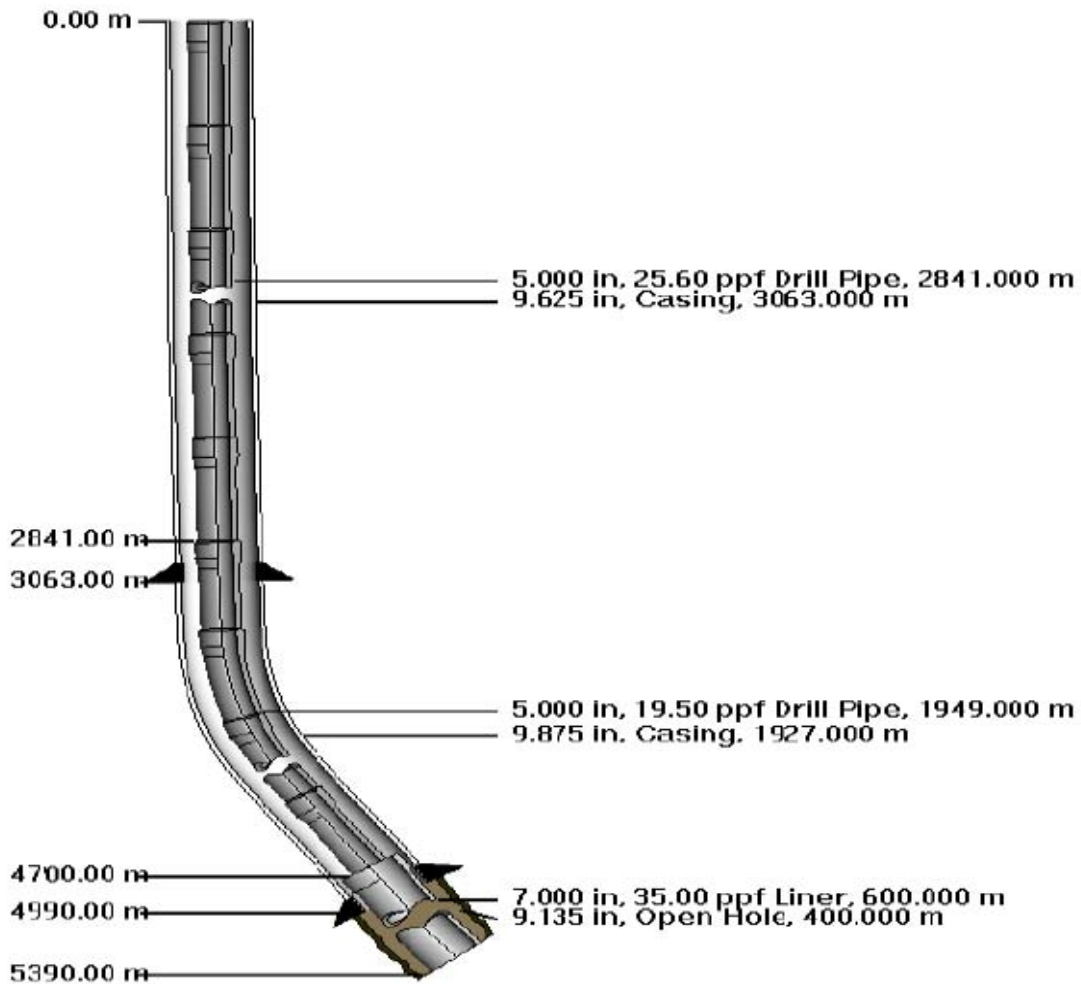
El día 3 de Diciembre se corrió el registro Caliper obteniendo un diámetro promedio 9.13" y se midió una temperatura estática de fondo de 139°C.

Con disparo de

Ecometro se detectó el nivel de fluidos a 462 m, para un gradiente de 0.86 g/cc.

Diámetro de la TR	7"	
Profundidad asentamiento de la TR	5390 m	
Profundidad de BL	4700 m	
Diámetro del Agujero:	9.13" (Promedio)	
Ultima TR Cementada:	9 5/8"	
Cima Teórica del cemento:	Sin TP	Con TP
	4700 m	4700 m
Gradiente de Fractura :	0.90 g/cc (Valor estimado)	
Presión de Poro:	0.77 g/cc (Valor estimado)	
Temperatura de fondo:	282°F (Registros Eléctricos)	
Angulo de Desviación	37°	
Fluido del pozo:	E.I. 0.95 sg, 462 m Nivel Fluidos con Ecometro	

ESTADO MECANICO



DISEÑO DEL TRABAJO

Objetivo de Operación:

Cementar el liner de producción 7" con un cemento consistente que aisle el espacio anular del agujero perforado.

Evaluación de Resultados del Trabajo.

En acuerdo con el cliente, ejemplo: Evaluación de cementación con Registros Pruebas de Hermeticidad.

Análisis de Flujo Potencial de Gas (en caso de aplicar).

El pozo ya llegó a ser perforado hasta la formación Cretácico Medio (formación productora de hidrocarburos) el potencial de flujo de gas es un factor a considerar para la cementación, se

requiere que ambas lechadas estén diseñadas con aditivos para evitar la migración de gas. En el simulador iCem el potencial de influjo es “Moderado”.

FLUIDOS A BOMBEAR

Para realizar este servicio y en base a los antecedentes e información disponible, se presenta a su consideración los siguientes sistemas de fluidos:

Volumen (m ³)	Sistemas	Densidad Base (g/cm ³)	Densidad Espuma (g/cm ³)
9.82	Foam Spacer Espumado	1.08	0.77
5.58	FracSeal™ Con Estático	1.35	1.07
3.65	BondCem™ Sin Estático	1.95	NA

Bache Espaciador Tuned Spacer III $\rho = 1.08 \text{ g/cm}^3$.

Volumen: 9.82 m³ (61.82 bbl)

Objetivo: Separar el fluido de control del cemento. Remover mecánicamente y químicamente el enjarre de lodo adherido tanto a la formación como a la tubería.

Primera Lechada de Cemento **FracSeal™** $\rho = 1.35 \text{ g/cm}^3$. Espumado a $\rho = 1.07 \text{ g/cm}^3$

Volumen: 3.3 Ton - 5.58 m³ de lechada (35.11 bbl)

Objetivo: Cemento de Baja Densidad para un sello hidráulico de cemento de calidad para aislar la zona productora.

Segunda Lechada Cemento **BondCem™** $\rho = 1.95 \text{ g/cm}^3$.

Volumen: 3.7 Ton - 3.65 m³ de lechada (23 bbl)

Objetivo: Colocar un sello hidráulico de cemento de calidad para aislar la zapata.

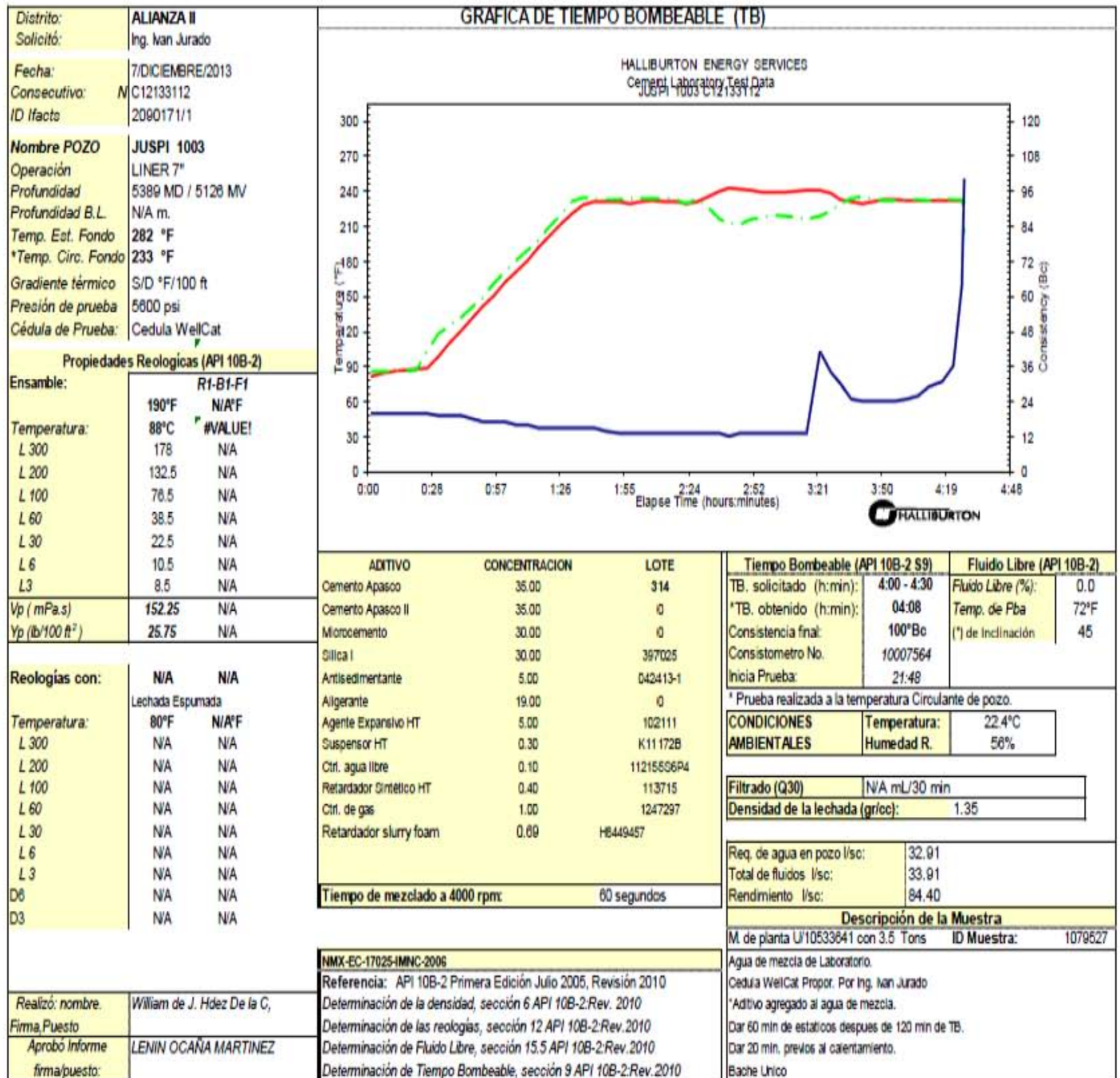
Desplazamiento **Fluido de Control Lodo E.I** $\rho = 0.95 \text{ g/cm}^3$.

Volumen: 6.3 bls de Espaciador más 323.91 bls de lodo 0.95 g/cc. Volumen necesario para desplazamiento hasta el cople de retención. El volumen final será función de la distribución de la tubería utilizada para bajar el liner.

Objetivo: Desplazar el cemento hasta su posición final.

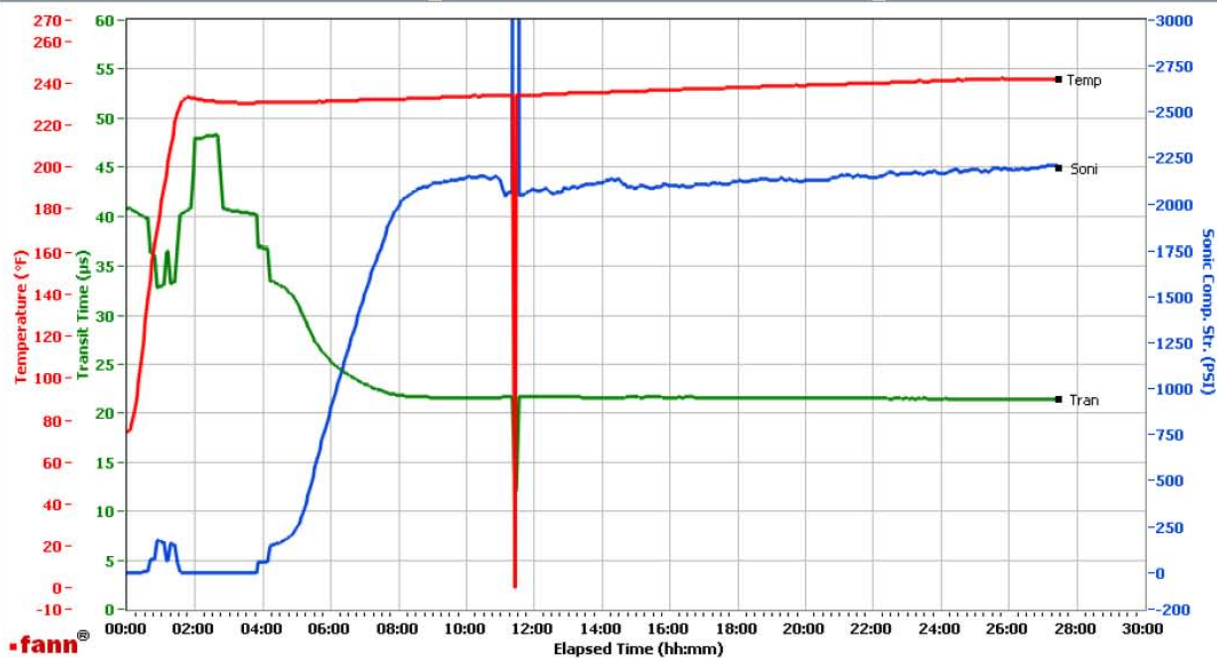
RESULTADOS DE LABORATORIO

Planta: Primera Lechada FracSeal™ de 1.35 gr/cc Con estático de 60 min.



REFORMA CHIAPAS FO-MX-HAL-CMT-LAB150Ag2

Fields	Values	Fields	Values	Events	Results
Project Name	juspi 1003	Job Type	LINER	50.00 PSI	03h:52m
Test ID	C12133112	Cement Type	APASCO	100.00 PSI	04h:12m
Request ID	2090171-1	Cement Weight	Light Weight	500.00 PSI	05h:28m
Tested by	WILLIAN HERNADEZ	Test Date	12/7/2013	1000.00 PSI	06h:12m
Customer	PEMEX/REFORMA	Test Time	9:58 PM	06h:00m	897.35
Well No	1003	Temp. Units	degF	12h:00m	2075.89
Rig	N/A	Pressure Units	PSI	24h:00m	2167.93
Casing/Liner Size	7			48h:00m	NaN



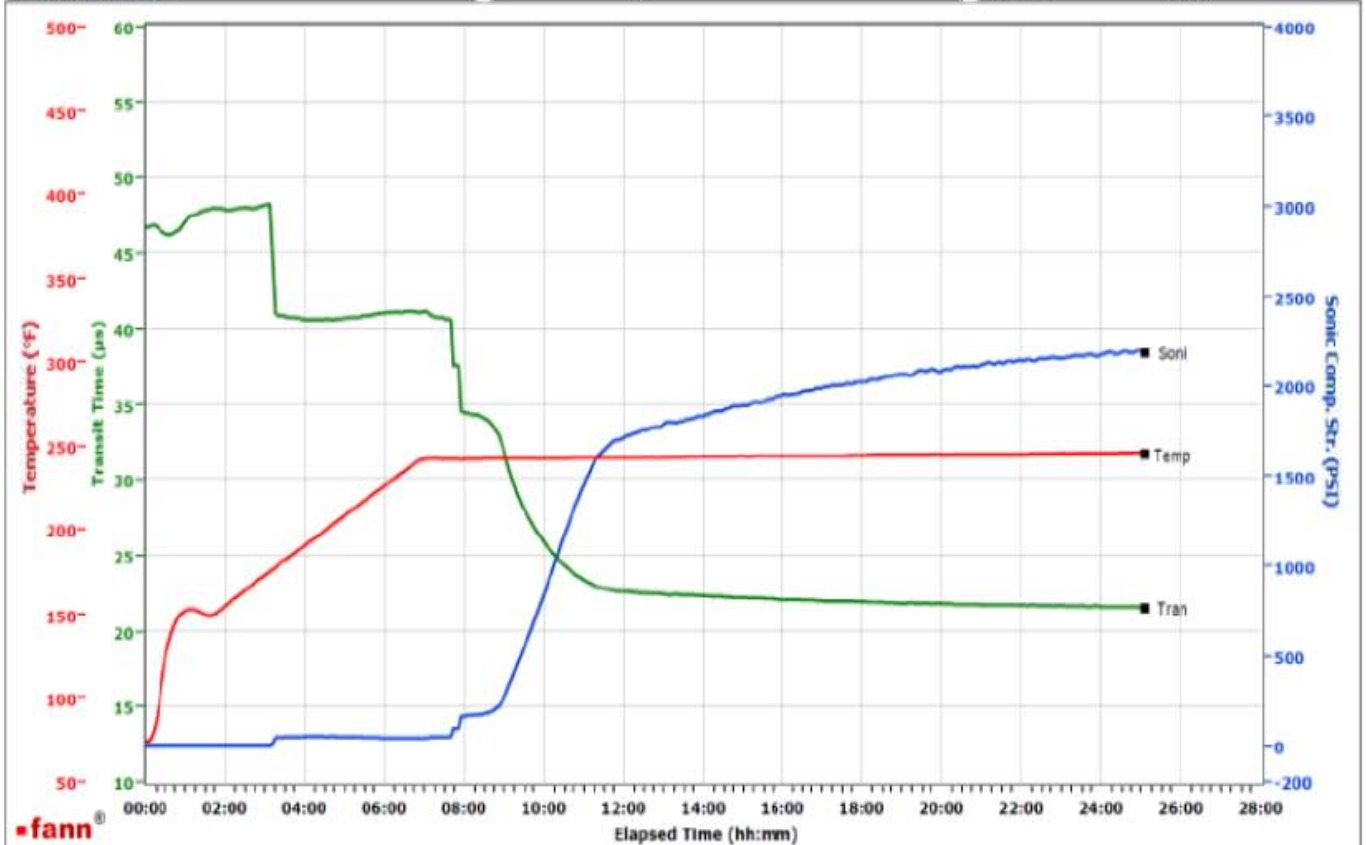
Data File C:\Documents and Settings\UCA\My Documents\ESF. COMPRESIVOS 2013\REFORMA\JUSPI 1003 C12133112.tdms

Comments 100% FracSeal 0.4 % SCR 500 (PB) Req de Agua 32.91 l/sc Rendimiento 84.40 l/sc Densidad 1.35 gr/cc

Piloto: Primera Lechada FracSeal™ de 1.35 gr/cc Prueba de esfuerzo compresivo.

REFORMA CHIAPAS FO-MX-HAL-CMT-LAB150Ag2

Fields	Values	Fields	Values	Events	Results
Project Name	JUSPI 1003	Job Type	PRODUCTION LINER	50.00 PSI	07h:44m
Test ID	C11133027	Cement Type	APASCO CLASE H	100.00 PSI	07h:56m
Request ID	2086210/3	Cement Weight	Light Weight	500.00 PSI	09h:20m
Tested by	CARLOS ISRAEL	Test Date	11/23/2013	1000.00 PSI	10h:16m
Customer	PEMEX / REFORMA	Test Time	11:42 PM	06h:00m	43.19
Well No	1003	Temp. Units	degF	12h:00m	1711.43
Rig	5/D	Pressure Units	PSI	24h:00m	2174.20
Casing/Liner Size	7"			48h:00m	NaN

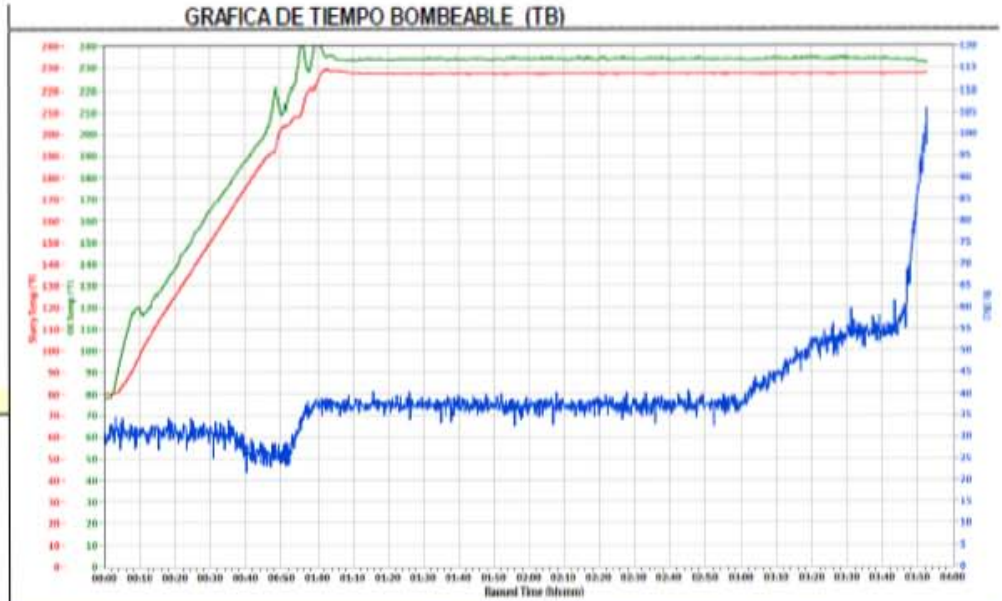


Data File C:\Documents and Settings\UCA\My Documents\ESF. COMPRESIVOS 2013\REFORMA\JUSPI 1003 C11133027.tdms

Comments 100% de FracSeal con 0.50 de SCR-500 (Retardador Sintetico HT), Requerimiento: 32.22 l/sc, Rendimiento: 84.44 l/sc, Total de Fluidos: 33.91 l/sc ,Densidad: 1.35 gr/cc

Planta: Segunda Lechada BondCem™ de 1.95 gr/cc

Distrito:	ALIANZA II	
Solicitó:	Ing. Ivan Jurado	
Fecha:	7/DICIEMBRE/2013	
Consecutivo:	M C12133114	
ID Ifacts:	2060172/1	
Nombre POZO:	JUSPI 1003	
Operación:	LINER 7"	
Profundidad:	5488 m.d / 5200 m.d	
Profundidad B.L.:	N/A m.	
Temp. Est. Fondo:	282 °F	
*Temp. Circ. Fondo:	227 °F	
Gradiente térmico:	S/D °F/100 ft	
Presión de prueba:	6020 psi	
Cédula de Prueba:	Cedula WellCat	
Propiedades Reológicas (API 10B-2)		
Ensamble:	R1-B1-F1	
Temperatura:	190°F	N/A°F
	88°C	#VALUE!
L 300	175	N/A
L 200	129.5	N/A
L 100	80.5	N/A
L 60	ND	N/A
L 30	ND	N/A
L 6	20.5	N/A
L 3	15.5	N/A
Vp (mPa.s)	141.75	N/A
Yp (lb/100 ft ²)	33.25	N/A
Reologías con:	N/A	N/A
	Lechada Espumada	
Temperatura:	N/A°F	N/A°F
L 300	N/A	N/A
L 200	N/A	N/A
L 100	N/A	N/A
L 60	N/A	N/A
L 30	N/A	N/A
L 6	N/A	N/A
L 3	N/A	N/A
D6	N/A	N/A
D3	N/A	N/A
Realizó nombre:	William de J. Hdez De la C,	
Firma/Puesto		
Aprobó Informe	Lenin Ocaña Martínez	
firma/muestra:		



ADITIVO	CONCENTRACION	LOTE	Tiempo Bombeable (API 10B-2 S9)	Fluido Libre (API 10B-2)
Cemento Apasco	100.00	314	TB. solicitado (h:min): 2:30 - 3:30	Fluido Libre (%): 0.0
Silica I	32.00	397025	*TB. obtenido (h:min): 03:53	Temp. de Pba 72°F
Antisedimentante	3.00	042413-1	Consistencia final: 100°Bc	(*) de inclinación 45
Agente Expansivo HT	5.00	102111	Consistometro No. 10008875	
Antiespumante	0.15	2013072AC	Inicia Prueba: 01:48	
Controlador de filtrado 2	0.65	4091302	* Prueba realizada a la temperatura Circulante de pozo.	
Retardador Sintético L	0.40	H8450190	CONDICIONES AMBIENTALES	Temperatura: 22.9°C
Ctr. de gas	0.50	0		Humedad R. 54%
			Filtrado (Q30)	40 mL/30 min
			Densidad de la lechada (gr/cc):	1.95
			Req. de agua en pozo l/sc:	24.89
			Total de fluidos l/sc:	25.79
			Rendimiento l/sc:	49.39

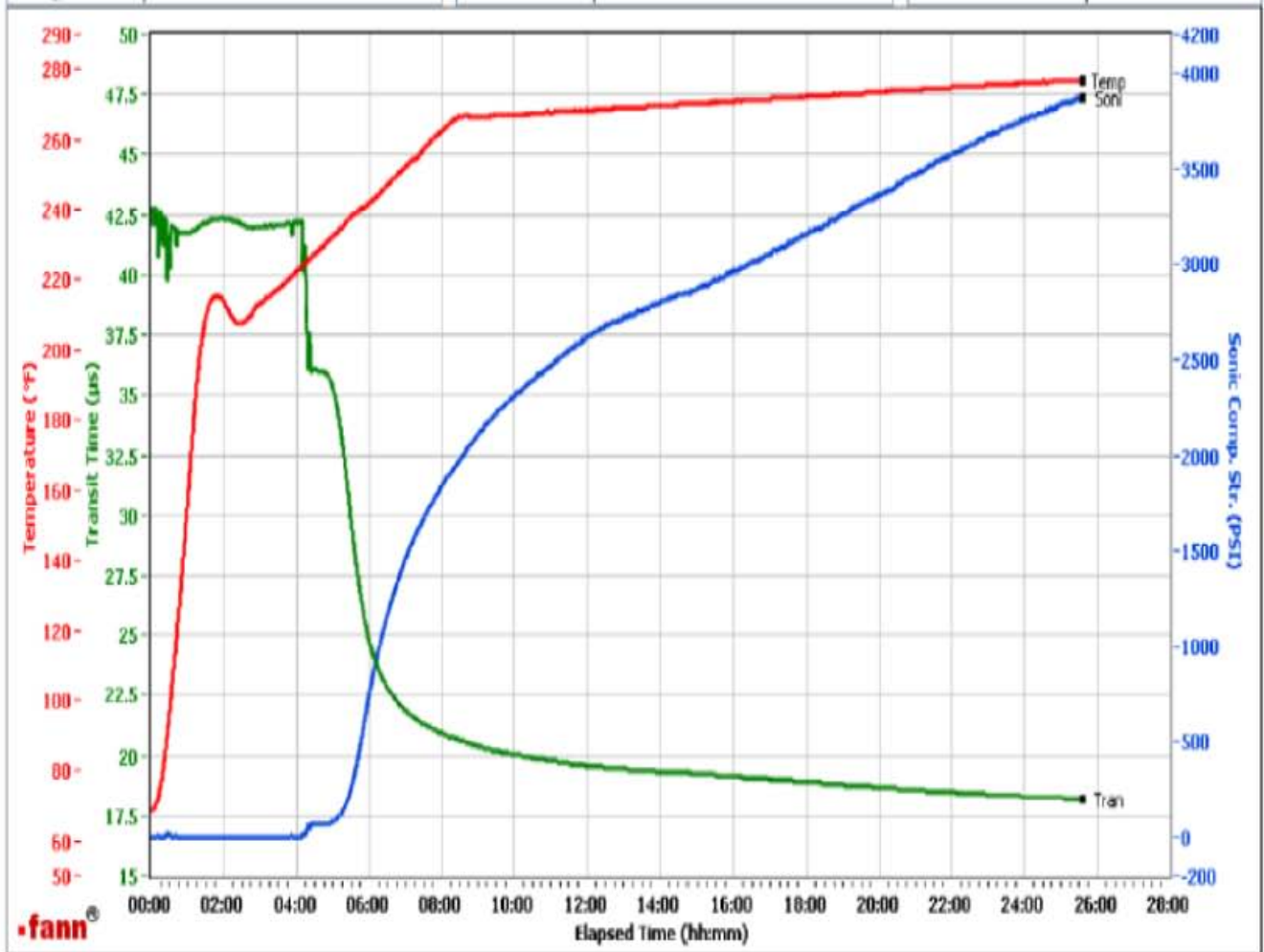
Descripción de la Muestra	
M. de planta U/11368287 con 4.5 Tons	ID Muestra:
Agua de Mezcla de Laboratorio.	
Cedula Wellcat proporcionada por el Ing. Ivan Jurado	
*Aditivo agregado al agua de mezcla.	
Bache Unico	

NMX-EC-17625-INNC-2006	
Referencia: API 10B-2 Primera Edición Julio 2005, Revisión 2010	
Determinación de la densidad, sección 6 API 10B-2.Rev. 2010	
Determinación de las reologías, sección 12 API 10B-2.Rev.2010	
Determinación de Fluido Libre, sección 15.5 API 10B-2.Rev.2010	
Determinación de Tiempo Bombeable -sección 9 API 10B-2.Rev 2010	

Piloto: Lechada BondCemTM de 1.95 gr/cc Prueba de esfuerzo compresivo.

REFORMA CHIAPAS FO-MX-HAL-CMT-LAB150Ag2

Fields	Values	Fields	Values	Events	Results
Project Name	JUSPI 1003	Job Type	PRODUCTION LINER	50.00 PSI	04h:21m
Test ID	C11133050	Cement Type	APASCO CLASE H	100.00 PSI	05h:07m
Request ID	2086211/15	Cement Weight	Standard	500.00 PSI	05h:46m
Tested by	CARLOS ISRAEL	Test Date	12/2/2013	1000.00 PSI	06h:17m
Customer	PEMEX / REFORMA	Test Time	11:05 AM	06h:00m	739.98
Well No	1003	Temp. Units	degF	12h:00m	2615.04
Rig	5/D	Pressure Units	PSI	24h:00m	3754.03
Casing/Liner Size	7			40h:00m	NaN



Data File C:\Documents and Settings\UCA\My Documents\ESF. COMPRESIVOS 2013\REFORMA\JUSPI 1003 C11133050.tdms

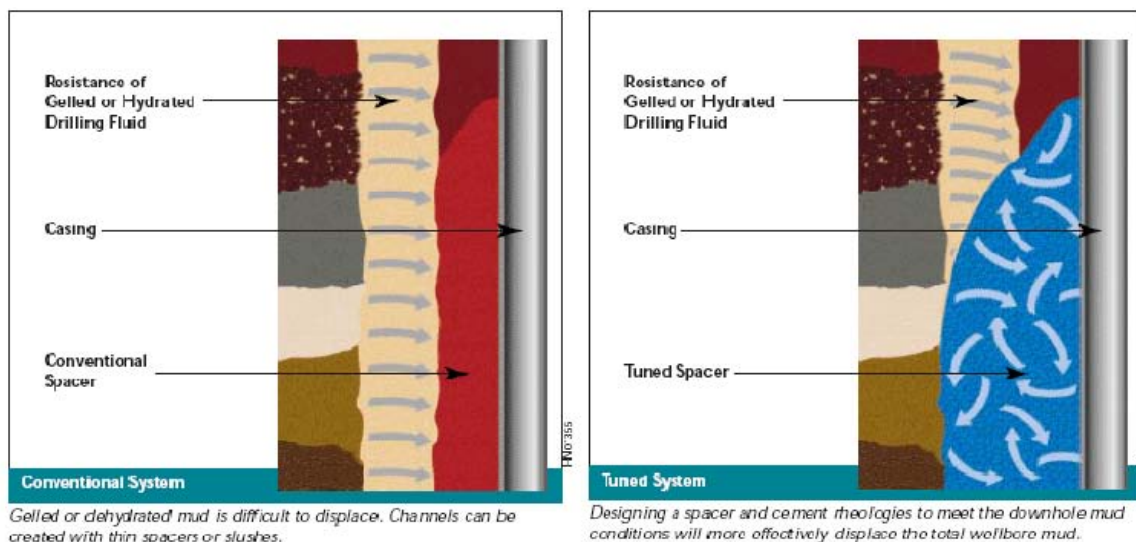
DISEÑO DEL BACHE ESPACIADOR. TUNED SPACER III

El sistema Tuned Spacer IITM es un fluido base agua capaz de desplazar fluidos de perforación base agua o aceite durante el proceso de cementación de una manera efectiva y que puede ser modificado para satisfacer requerimientos específicos del pozo en cuestión. Puede usarse en temperaturas circulantes de entre 60 °F y 325 °F y su viscosidad puede ser adaptada de acuerdo a lo que demande el fluido de control que se planea remover, aumentando o reduciendo la concentración del aditivo base en la mezcla.

Los procedimientos de desplazamiento recomendados dependen de las propiedades del fluido de perforación bajo las condiciones de fondo del hoyo, determinado por los siguientes factores:

1. Tipo de Fluido de perforación
2. Propiedades del fluido de perforación
3. Pérdida de fluido a la formación
4. Presión de fondo
5. Temperatura de fondo
6. Presión diferencial dentro de la formación
7. Periodo de cierre
8. Historia de Perforación

Para crear el ambiente adecuado de fondo para el cemento y protegerlo de las influencias de contaminación del fluido de perforación, la industria petrolera, a través del paso de varias décadas, a desarrollando agentes llamados espaciadores y lavadores. Estos dos fluidos son similares en varios aspectos: (1) ayudan en el desplazamiento efectivo del fluido de perforación con el cemento, (2) actúan como agentes limpiadores en el fondo del agujero, (3) ayudan a asegurarse que tanto el lodo como el cemento permanezcan sin contacto directo a través del proceso de desplazamiento, y (4) son bombeados dentro del fondo del pozo en el intervalo entre las otras dos mezclas. La caída presión generada por la diferencia de densidades y las reologías manejadas son un parámetro a ser ajustado de acuerdo con las propiedades aquí señaladas. OptiCem es capaz de ajustar los valores tomando en cuenta la geometría del pozo y las propiedades de fluido de perforación.



El volumen requerido ha sido optimizado con simulaciones en iCem para lograr mejor eficiencia de desplazamiento, considera parámetros como compatibilidades, volúmenes, reologías, gastos de bombeo, rotación, etc.

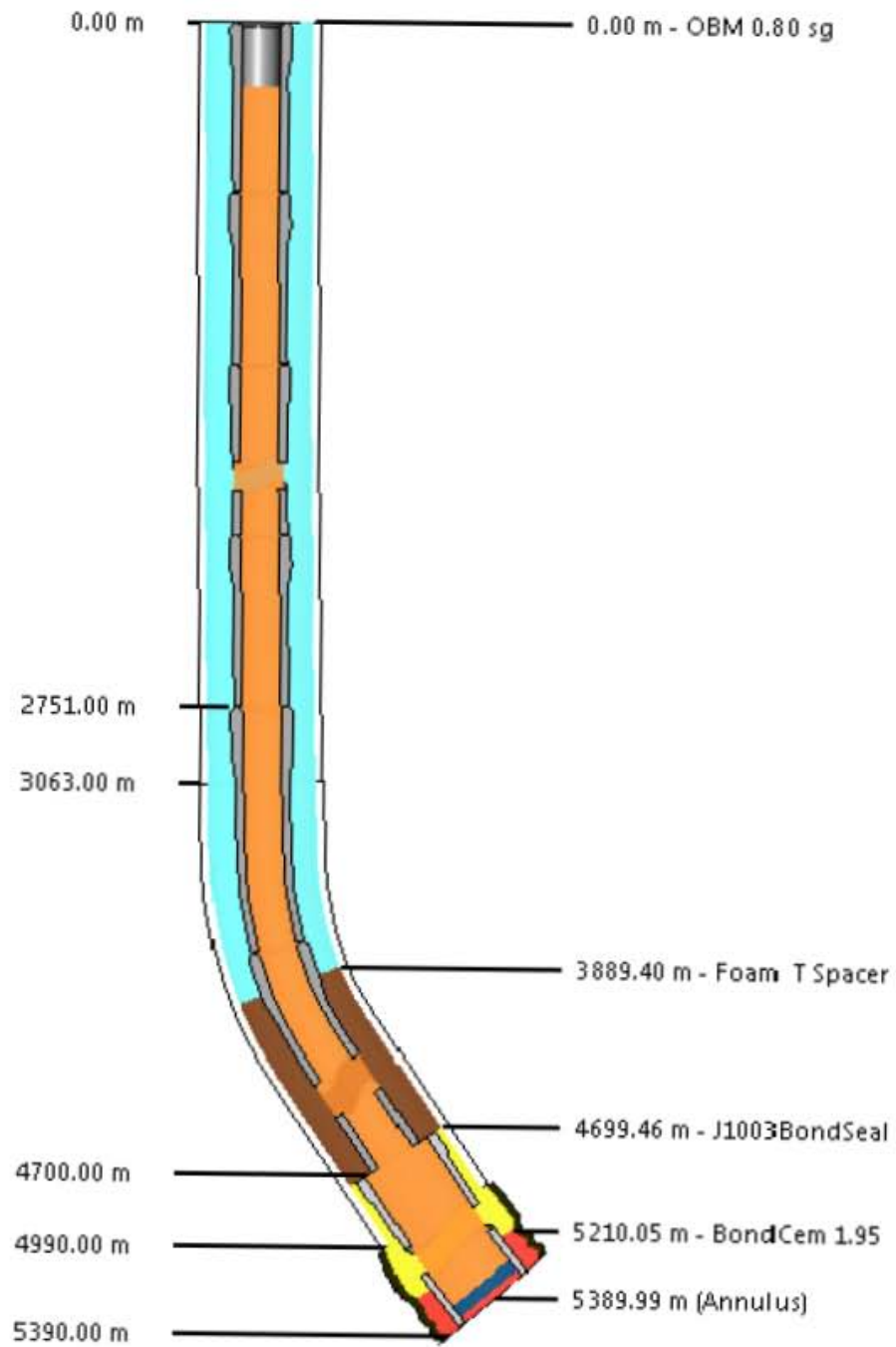
LABORATORIO DE CEMENTACIONES						REFORMA						
Pozo: JUSPI No 1003			Fecha: 5 - DICIEMBRE - 2013									
Operación: LINER 7"			Solicitó: Ing. Ivan Jurado									
Profundidad: 5488 M,D / 5200 M,V m			Consecutivo: L12130233									
Distrito: Alianza II			ID Solicitud:									
Realizó: A. Hernandez			Supervisó: Lenin Ocaña									
FLUIDOS	CONTAMINACION	L600	L300	L200	L100	L60	L30	L6	L3	VP	YP	
LODO/ESPACIADOR Reologías a: 190 °F	95	5	22	13	10	7	6	4	3	2	9	4.0
	75	25	28	17.5	14	9.5	7.5	5.5	3.5	3	12	5.5
	50	50	39	26.5	19	13	10	8	5	4	20.25	6.3
	25	75	36	26.5	22	15	10.5	7	3	2	17.25	9.3
	5	95	39	32.5	26.5	22.5	20.5	17	12	9	15	17.5
LODO/LAVADOR Reologías a: 0	95	5	0	0	0	0	0	0	0	0		
	75	25	0	0	0	0	0	0	0	0		
	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0		
	25	75	0	0	0	0	0	0	0	0		
	5	95	0	0	0	0	0	0	0	0		
CMTO/ESPACIADOR Reologías a: 0	95	5	0	0	0	0	0	0	0	0		
	75	25	0	0	0	0	0	0	0	0		
	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0		
	25	75	0	0	0	0	0	0	0	0		
	5	95	0	0	0	0	0	0	0	0		
ESPACIADOR	80°F	45	34.5	29	22.5	19.5	16	11	9	18	16.5	
Den. (gr/cc) :	1.08	190 °F	37	30	27	18.5	19	17	12	10	17.25	12.75
LODO	80°F	47	27	20	13	9.5	7	4	3	21	6.0	
EI	0											
Den. (gr/cc) :	0.95	190 °F	19	15	11	8.5	7	5	4	3	9.75	5.3

Resultados del Simulador Icem.

Simulador de cementaciones.

- Diagrama esquemático de fluidos al final del trabajo.
- Análisis comparativo de presión de circulación contra presiones de fractura y yacimiento.
- Perfil de presiones en el fondo
- Comparación de gastos de entrada y salida.
- Presión en superficie durante toda la operación.

Posición de los fluidos



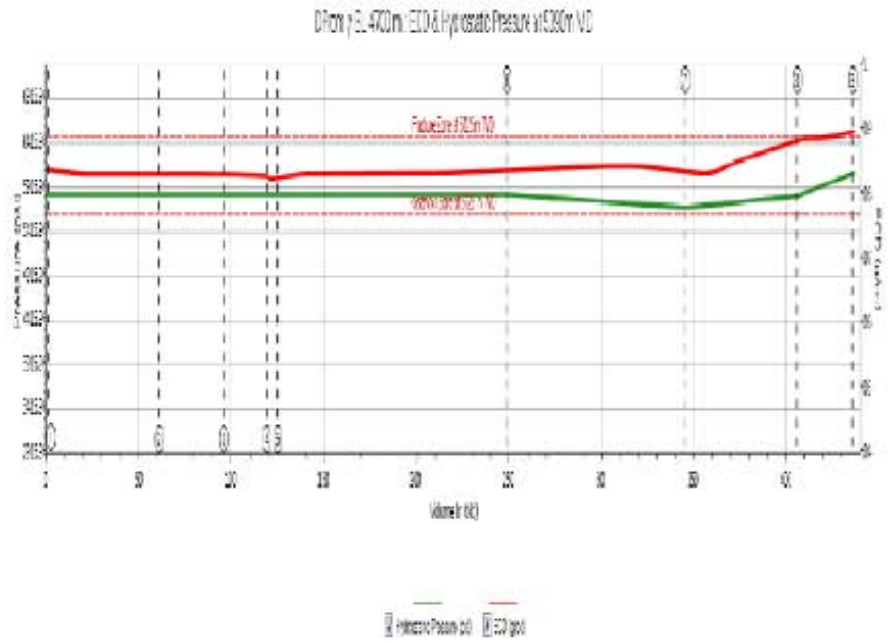
Pump Schedule

Description	Stage No.	Density (g/cc)	Rate (bbl/min)	Yield (L/50kg)	Water Req. (L/50kg)	Volume (bbl)	Bulk Cement (tonne)	Duration (min)
OBM 0.80 sg	1	0.800	4.00			0.00		0.00
Foam T Spacer - Foamed	2	1.080	1.50			61.81		41.52
J1003BondSeal - Foamed	3	1.350	3.00	84.440	32.22	35.11	3.301	11.70
BondCem 1.95	4-1	1.950	3.00	49.380	24.93	19.76	3.1814	6.59
BondCem 1.95	4-2	1.950	3.00	49.380	24.93	3.22	0.5179	1.07
Shutdown	4-3			49.380	24.93		0.0000	5.00
Top Plug/Start Displacement								
Foam Spacer	5	1.080	2.00			6.00		3.00
OBM 0.95	6-1	0.950	5.00			220.00		44.00
OBM 0.95	6-2	0.950	2.00			15.00		7.50
OBM 0.95	6-3	0.950	4.50			50.00		11.11
OBM 0.95	6-4	0.950	2.50			20.00		8.0
OBM 0.95	6-5	0.950	1.50			18.91		12.61
Total:						437.66		151.80

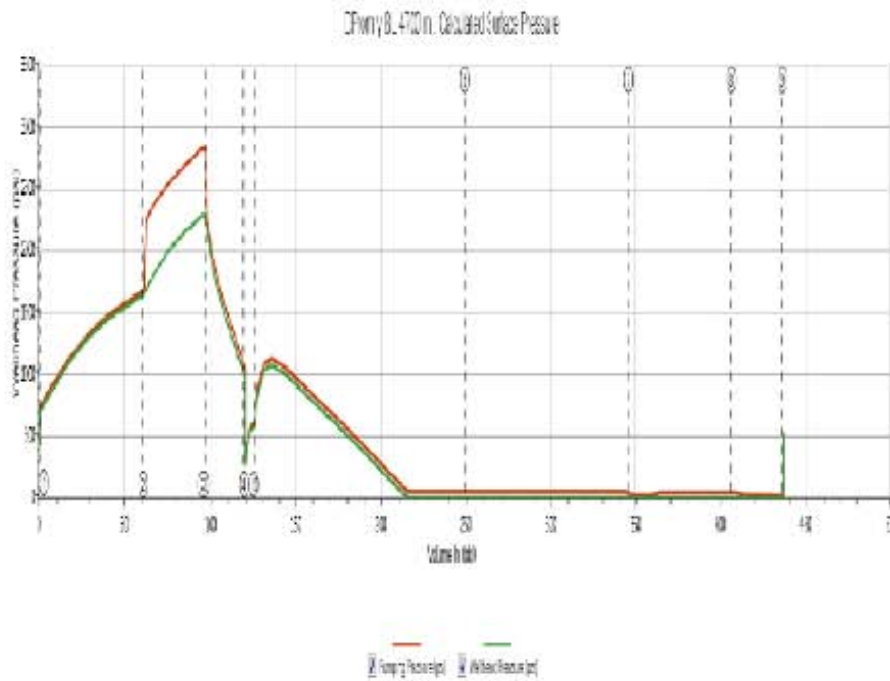
Foam Slurry Data

Description	Stage No.	Base Slurry Vol. (bbl)	Foam Slurry Vol. (bbl)	Bulk Cement (tonne)	Water Req. (L/50kg)	Yield (L/50kg)
OBM 0.80 sg	1	0.00	0.00			
Foam T Spacer	2	60.78	125.30			
J1003BondSeal	3	29.73	47.62	3.301	32.22	84.440
BondCem 1.95	4-1	19.76	19.76	3.1814	24.93	49.380
BondCem 1.95	4-2	3.22	3.22	0.5179	24.93	49.380
Foam Spacer	5	6.00	6.00			
OBM 0.95	6-1	220.00	220.00			
OBM 0.95	6-2	15.00	15.00			
OBM 0.95	6-3	50.00	50.00			
OBM 0.95	6-4	23.00	23.00			
OBM 0.95	6-5	10.16	10.16			

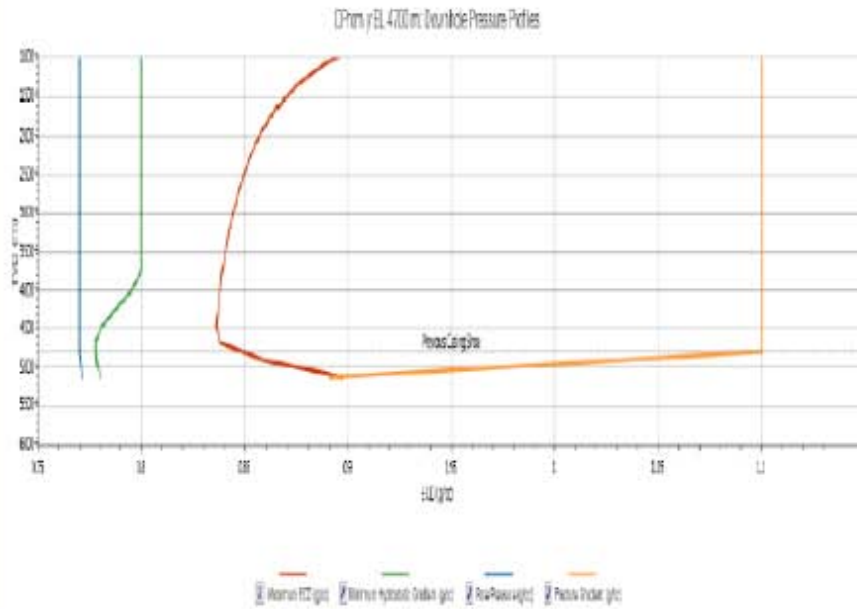
DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACION VS. GRADIENTE DE FRACTURA MINIMO



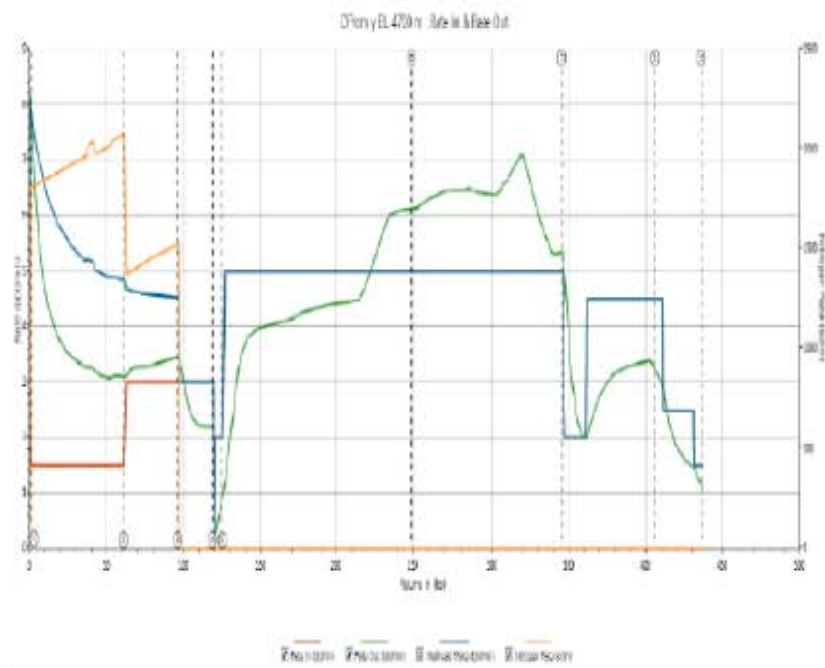
PRESION DE BOMBEO Y EN CABEZA



PERFIL DE PRESIONES EN EL POZO



GASTOS DE ENTRADA Y SALIDA



VISTA 3D

X



2.00767E+08 1.0000000000000000

100% Foam Spacer

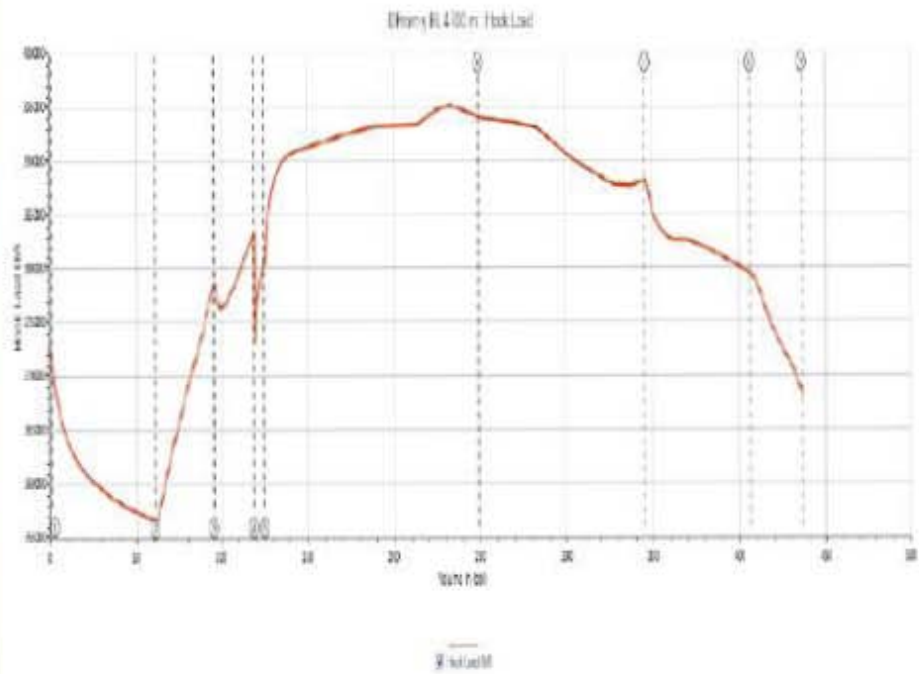
100% J1003BondSeal

100% BondCem 1.95

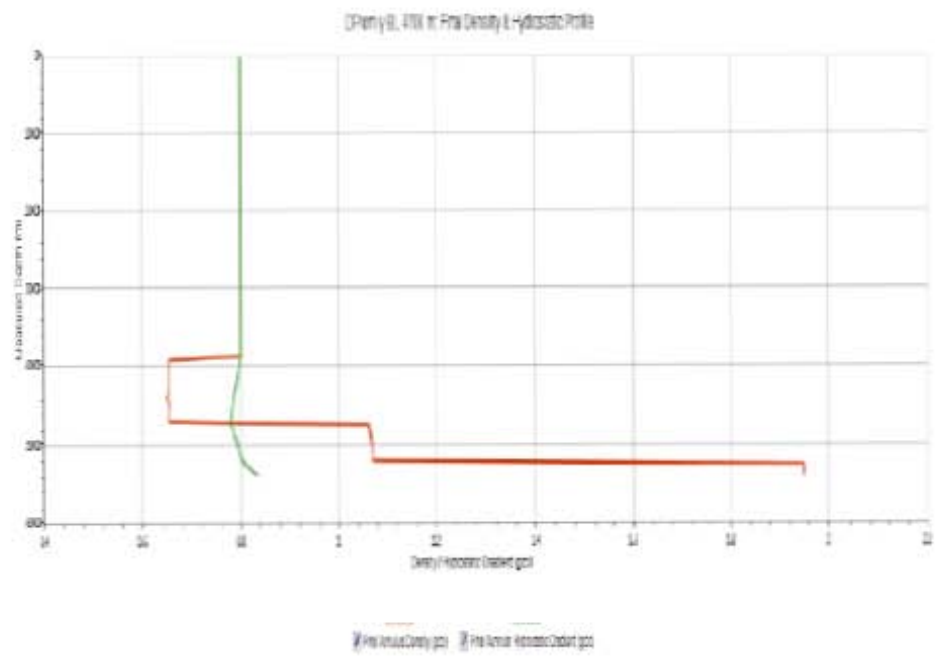
100% N2 Mud 0.85 sg

CARGA EN EL GANCHO

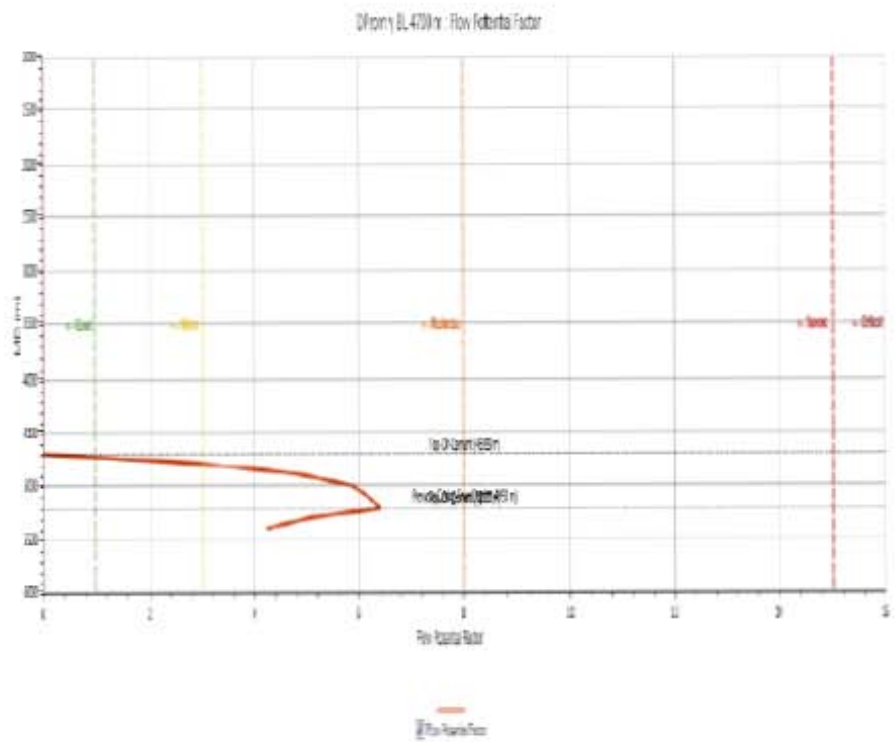
X



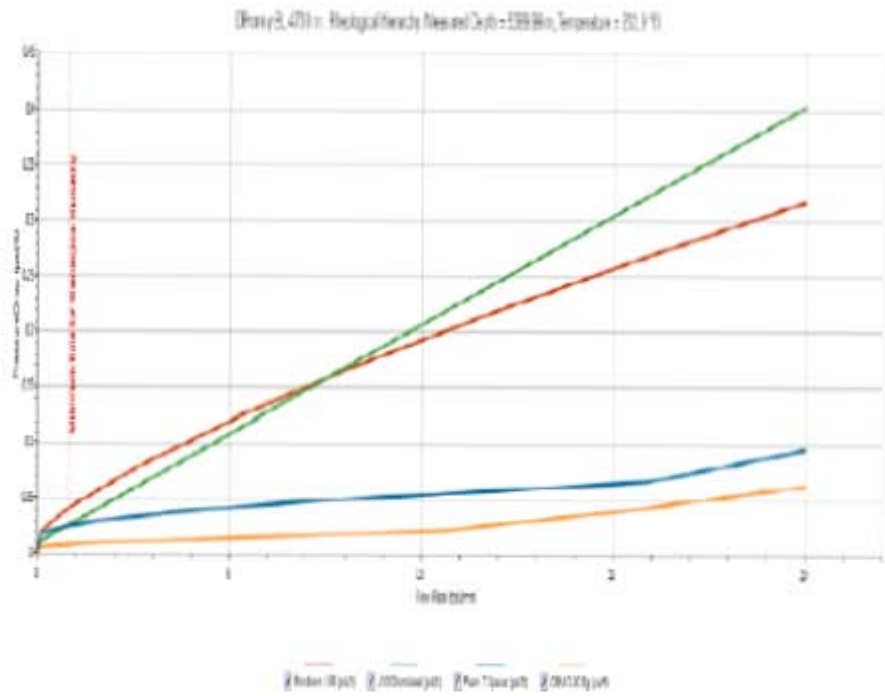
**DENSIDAD FINAL
Y PERFIL
HIDROSTÁTICO**



**GAS FLOW
POTENTIAL X**

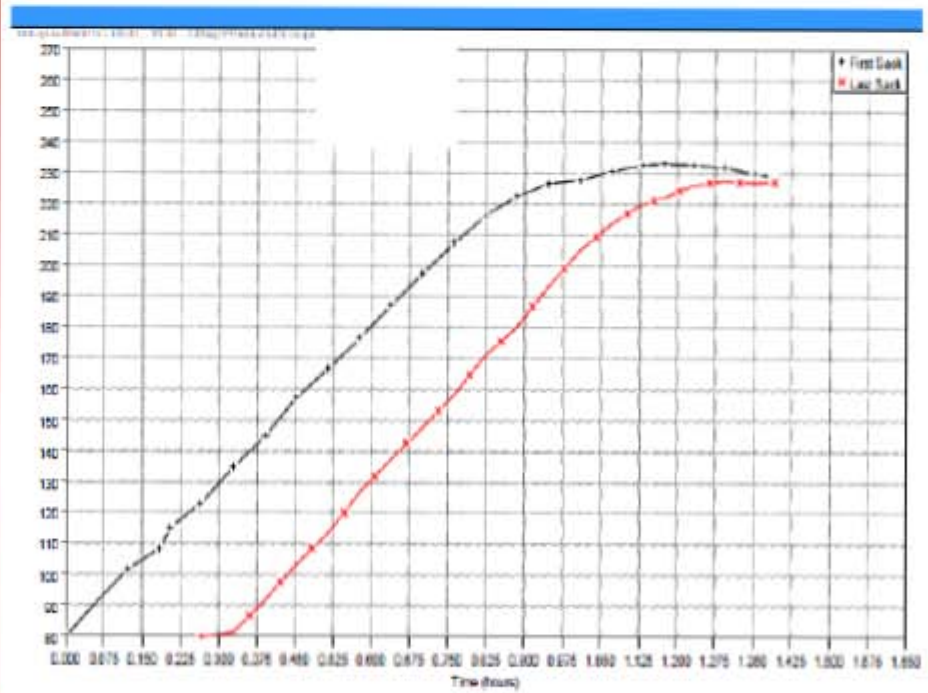


**JERARQUÍA
REOLÓGICA DE
LOS FLUIDOS.
X**

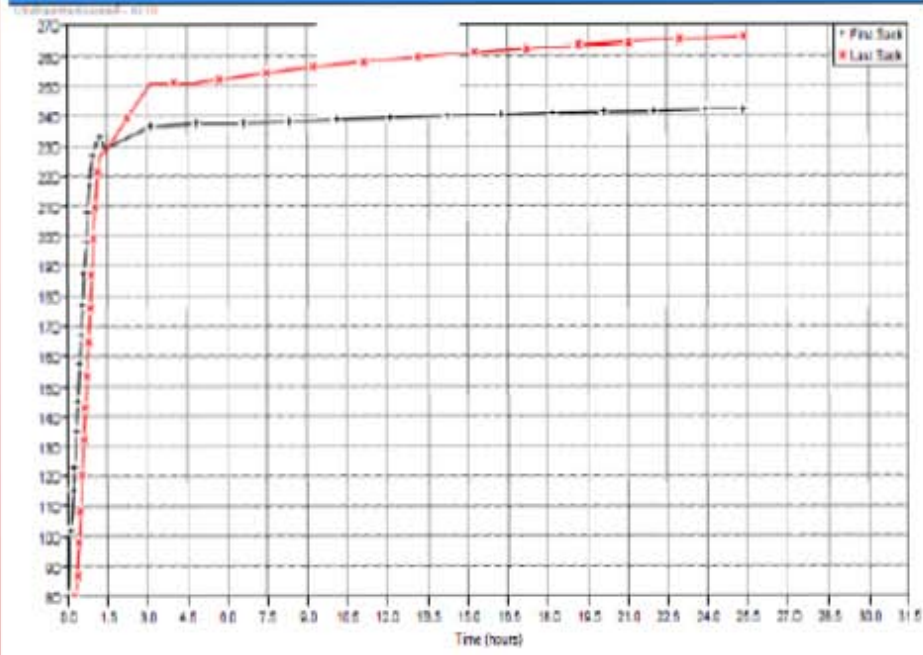


TEMPERATURA DINAMICA EN WellCat™

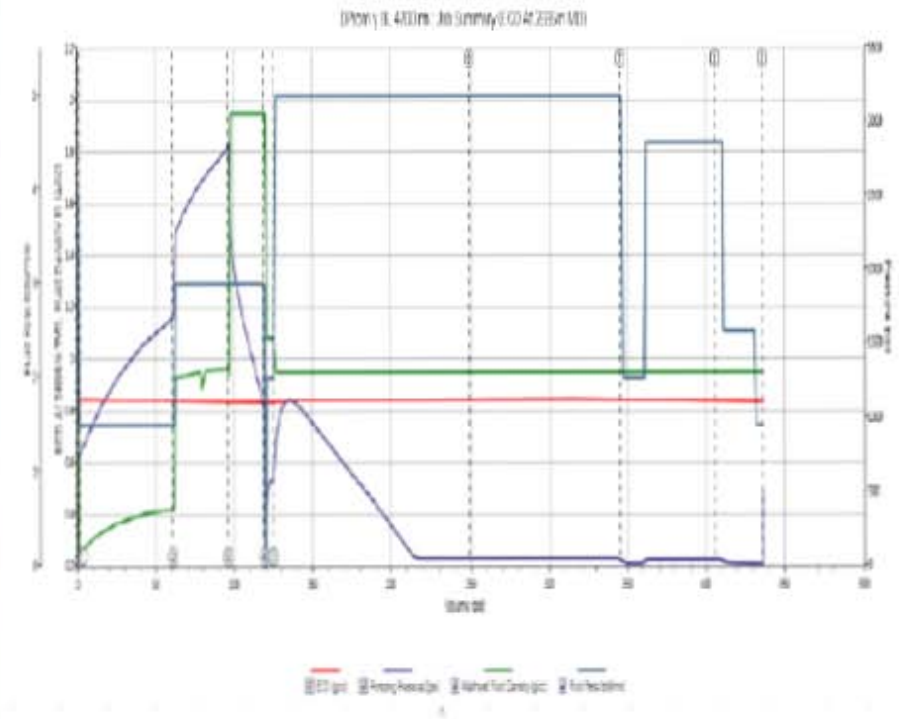
**TEMPERATURAS
vs TIEMPO.**

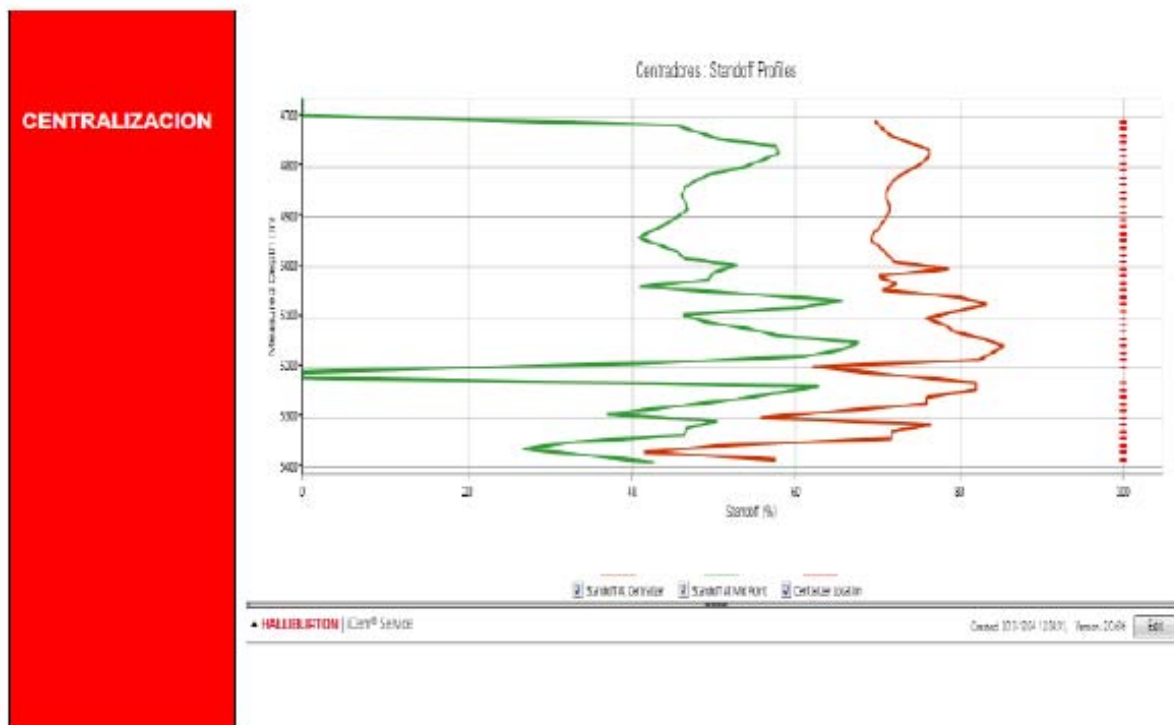


TIEMPO DE FRAGUADO.



GRAFICA RESUMEN





En la empresa HALLIBURTON se apoyan del programa: DISPLACE 3D (I CEM)

Es un simulador computacional el cual posee la característica de modelar múltiples aspectos del desplazamiento de fluidos de durante la cementación.

Las operaciones de cementación proveen aislamiento zonal para prevenir la comunicación de fluidos del pozo entre las diferentes zonas perforadas. Nuestra meta es proporcionar a los clientes la más competente cementación primaria para la vida del pozo, evitando con esto, cementaciones remediales y retrasos en la puesta a producción del pozo.

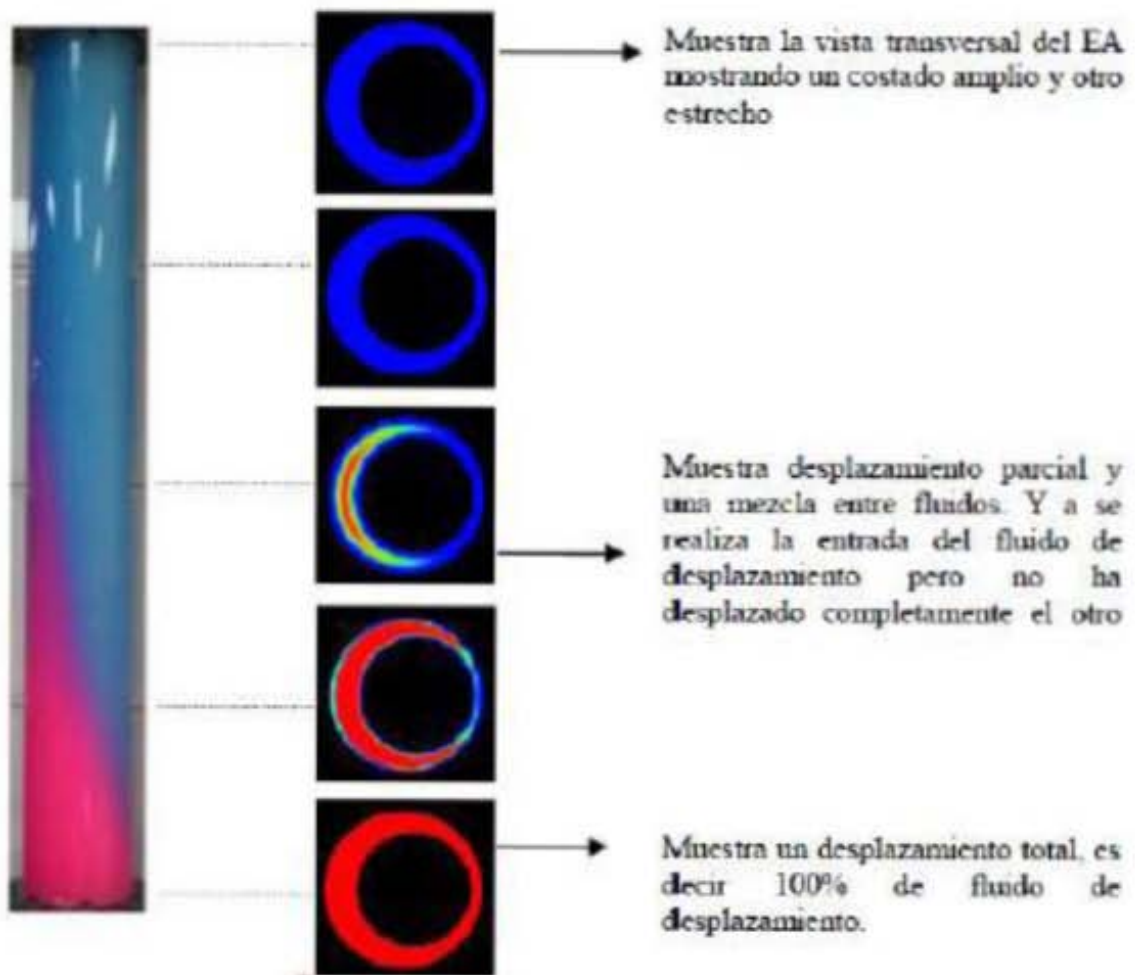
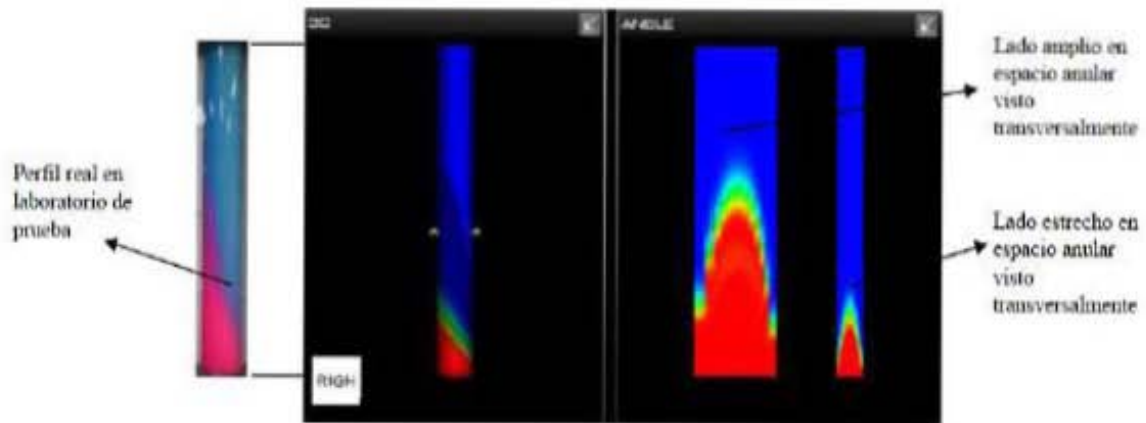
Con la finalidad de mejorar la confiabilidad y efectividad del proceso de remoción del lodo, sea creado el único simulador que modela completamente en perspectiva tridimensional proporcionando referencias acerca de la contaminación de fluidos, canalización y pobre remoción del lodo.

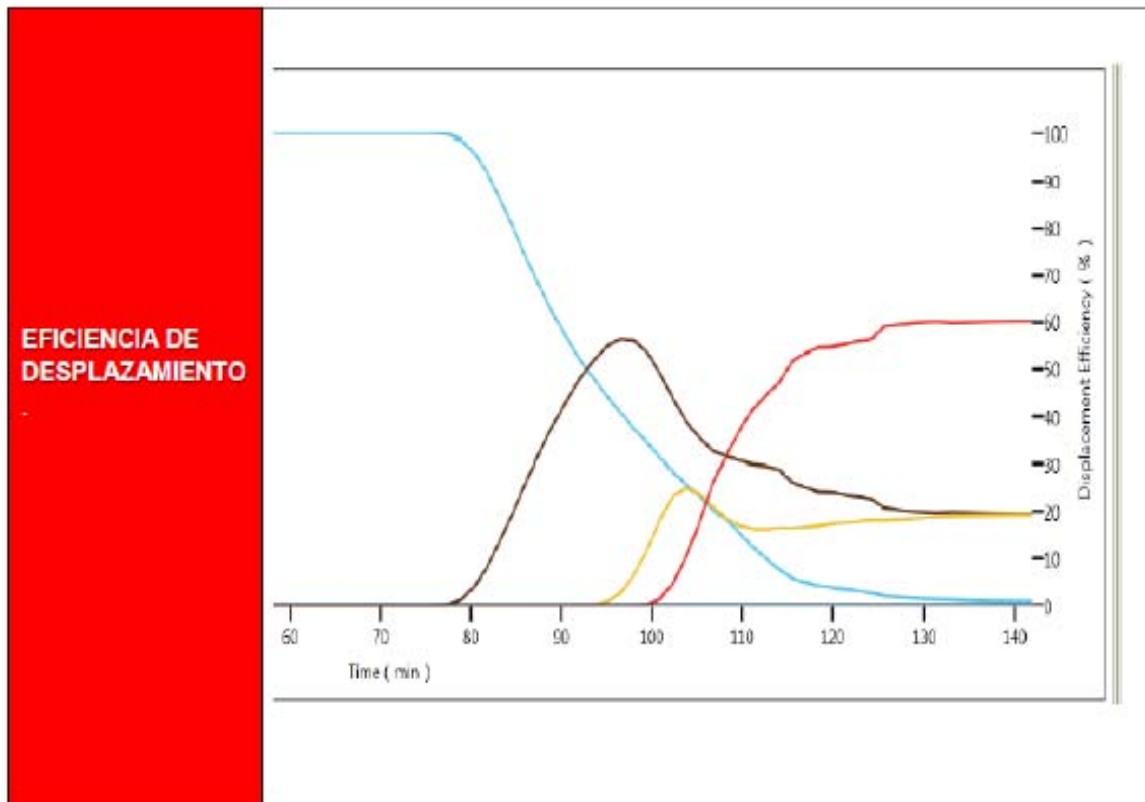
La mezcla de un fluido durante la operación puede llegar a inhibir el propósito del mismo, de acuerdo a propiedades reológicas y compatibilidades mostradas llevando a la contaminación del cemento. El modelado de este programa permite a las operadoras predecir en el pozo, simulando las causas de contaminación o canalización y prevenir el suceso en el pozo real.

Este modelador es caracterizado por un optimizador de parámetros reológicos, el cual es capaz de tomar en cuenta viscosidades interfaciales de los fluidos en el ambiente del pozo. Lo anterior, permite la determinación de una cima de cemento real, el efecto causado en la presión por la mezcla de fluidos incompatibles y la extensión de una canalización.

A continuación se presentan las imágenes de un experimento realizado para la prueba del simulador. A la izquierda se muestra el perfil real del fluido del experimento y a la derecha los perfiles simulados por Displace 3D. Estos perfiles muestran un pozo con tubería excéntrica

resultando en un lado amplio y un lado estrecho en el espacio anular creado por el stand off respectivo.





PROCEDIMIENTO OPERATIVO

Equipo: PM-336

Pozo: Juspi 1007

Operación: Cementación de Liner 7" @ 5,390 mD – 5,127 mV

1. Bajar el Liner de 7", equipado con 12 centradores CRBs 7x 8.375" + 36 Centradores CENTEK 7" x 8.5"; Llegando a la zapata anterior, romper circulación para eliminar el esfuerzo de gel, continuar bajando y asegurarse que un tramo antes de llegar al fondo requerido, se verifique sarta libre hacia arriba y hacia abajo. **Asegurarse de romper circulación para eliminar el esfuerzo de gel en el lodo, de esta manera la Densidad Equivalente de Circulación aplicada al pozo será menor que cuando este en el fondo.**
2. Instalar cabeza de cementar, asegurarse de la colocación del dardo verificando el buen funcionamiento del mecanismo de liberación del mismo
3. Una vez que el liner se encuentre en el fondo, anclar el mismo con el procedimiento del especialista de la herramienta del conjunto colgador.
4. Instalar una línea 'Y' en el piso de perforación colocando una línea hacia la unidad de alta presión y la otra hacia Stand Pipe, con pozo alineado por ensamble de estrangulación y desgasificador circular con bombas del equipo y con el equipo de "Bajo Balance" homogenizar el sistema bifásico en una densidad equivalente a 0.84 g/cc, con una contrapresión 80 psi en superficie.

5. Circular por lo menos 1 ciclo completo de acuerdo a las condiciones del pozo. (En caso de no observar circulación ajustar el programa de cementación en conjunto con el cliente Pemex) para limpiar el agujero y obtener lecturas de densidad del fluido de control de entrada igual a las de salida. Realizar prueba de circulación a diferentes gastos para corroborar los gastos propuestos para la operación. **Disminuir la Vp y la Yp tanto como sea posible sin comprometer la estabilidad del fluido de control. Asegurarse de tener el pozo perfectamente controlado. De ser necesario, discutir estos valores con el personal de fluidos para no comprometer la estabilidad del pozo.**

6. Realizar junta de seguridad y operativa con todo el personal involucrado en la operación. Realizar AST y Análisis de riesgos así como documentarlo en el formato correspondiente.

Nota: Si las condiciones del pozo/instalaciones son diferentes a las consideradas en este programa, si hay cambios en los equipos/materiales o hay desviaciones a los procesos que puedan afectar el resultado del servicio, o pongan en riesgo la operación, invariablemente documentar en el formato MOC "Management Of Change" así como solicitar las aprobaciones correspondientes

7. Conectar equipo de registro y monitoreo de parámetros así como las líneas superficiales de UAP, de Unidad de Nitrógeno y probar mismas con 6,000 psi.

8. Pre mezclar en el RCM de la UAP las lechadas de cemento, posteriormente homogenizar en el Bach Mixer.

9. Iniciar con Bache Espumado Foam Spacer, seguido cemento Espumado FracSeal a las siguientes condiciones:

Fluido	Volumen Líquido	Volumen N2	Densidad Base	Gasto Líquido	Volumen Espuma	Densidad Espuma	Calidad Espuma	Rampa Nitrógeno
Bls	Bls	m3-std	g/cc	bpm	Bls	g/cc	%	m ³ -std/min
Bache	61.82	2279	1.08	1.5	125.21	0.67	50	50.2 - 58
Cemento	35.11	487	1.35	3	47.62	1.07	25	38.7 - 43

10. Continuar con el bombeo de 3.65 m3 (23 bls) de Lechada de Cemento BondCem™ $\rho=1.95\text{g/cm}^3$, @ 3-4 bpm.

11. Parar bombeo y liberar el dardo de desplazamiento

12. Bombear con 1 m3 (6.3 bls) Bache Espaciador Tuned Spacer III, $\rho= 1.08\text{g/cm}^3$ @ 3 bpm.

13. Continuar con el desplazamiento bombeando 323 bls de Lodo E.I. de 0.85g/cm^3 @ 4-5 bpm y disminuir el gasto @ 2 bpm antes de acoplar el dardo con el tapón de desplazamiento y acoplamiento final. Referirse a la cédula recomendada de bombeo, la cual será ajustada con la distribución final de tubería. Es importante resaltar de bombear el volumen teórico para evitar correr el riesgo de lavar la zona de la zapata*.

* Se debe tomar en cuenta también el volumen de compresibilidad del lodo para hacer los ajustes en el desplazamiento.

14. Terminar el bombeo y descarga presión en la TP, descargando la presión hacia las cajas de la UAP.

15. En acuerdo con el representante de PEMEX en pozo y de acuerdo de las condiciones de circulación evaluar si empacar o no el elemento sello del empacador de la BL bajo el procedimiento del especialista de la herramienta (tomar en cuenta previamente los tiempos de operación en función del tiempo estático del cemento = 60 min)

Nota: En caso de cementar con circulación normal se va empacar la BL 7", por el contrario si la cementación se efectúa con pérdida de circulación severa o pérdida total evaluar si/no empacar la BL, para posteriormente efectuar un forzamiento de cemento.

16. Continuar sacando a superficie llenando por E.A el volumen del acero extraído.

17. Esperar un tiempo de fraguado en base a los resultados de las pruebas de Esfuerzo a la compresión realizadas con el analizador ultrasónico de cemento.

Nota: Este procedimiento es de carácter preliminar y será ajustado de acuerdo a la información disponible y a las condiciones de operación dominantes, al momento de efectuar el servicio.

Tomar en cuenta la compresibilidad del lodo tomando en cuenta la siguiente ecuación:

$$\Delta V_t = \Delta P * V * [2.8 \times 10^{-4} F_w + 5 \times 10^{-4} F_o + 0.2 \times 10^{-6} F_s]$$

Donde:

V_t= Cambio en el Volumen resultante por el incremento de Presión, bbl.

ΔP= Cambio de presión aplicado en el Fluido, psi.

V= Volumen del lodo en cero psig, bbl.

F_w= Porcentaje de fracción del por ciento del agua, adimensional [1]

F_o= Porcentaje de fracción del por ciento del aceite o fluido sintético, adimensional [1].

F_s= Porcentaje de fracción del por ciento de sólidos, adimensional [1]

CONSIDERACION DE SEGURIDAD

Realizar Junta de Seguridad, Calidad, Cuidado al medio ambiente y Operativa con todo el personal presente en la Locación.

Realizar a la llegada a la locación nuestro análisis de riegos para posteriormente iniciar a efectuar labores de acomodo, instalación y operación.

Después de instalar las líneas superficiales de bombeo realizar las pruebas de presión correspondientes con una presión acorde a la que se piensa manejar durante la operación.

Deberán señalarse y acordonar las zonas de alto riesgo durante la operación.

Todo el personal que intervenga en la operación deberá contar con equipo de protección personal básico requerido adecuado como guantes, botas, lentes, overol, barbiquejo y casco.

Todo el personal que intervenga en la operación y tenga injerencia en el manejo de fluidos de tratamiento, deberá contar además del equipo de protección antes señalado con mascarillas y lentes de protección personal.

Designar un punto de reunión seguro y asignar ruta de escape.

Ubicar un vehículo ambulancia con un conductor designado.

Definir el Hospital más cercano a la locación con ruta específica.

Contar con Personal y Equipo capacitado contra Incendios.

Mantener la locación limpia.

Recuperar muestras de agua de mezcla, cemento en polvo y mezclado de ambas lechadas así como de los baches.

ANÁLISIS DE INCIDENTES POTENCIALES

	Incidente	Posible Causa	Plan de Acción
1	Abatimiento de Presión durante la prueba de líneas	Fugas en las tuberías o conexiones superficiales	Descargue la presión hacia la UAP y repare fuga.
2	Incremento abrupto de presión en la línea de cementación.	Incorrecta abertura de una válvula Lo Torc de entrada al pozo.	Descargar presión y abrir totalmente la válvula para proseguir con la operación
3	Presión excesiva de bombeo	Caudal excesivo para las condiciones del pozo	Reducir el caudal de bombeo para evitar inducir una pérdida de circulación
4	Retrasos/Suspensión de Operación	Varias (se deberán preestablecer planes de contingencia en caso de paros de bombeo una vez que el cemento se haya bombeado al pozo)	Verificar con el Ing. De Proyecto/Técnico/Superintendente el plan a seguir.
5	Taponamiento de líneas	Fluido con excesiva concentración de sólidos	Cambiar mangueras o líneas
6	No se alcanzaron los gastos programados	Insuficiente abastecimiento de Cemento de los Silos a la Unidad Cementadora	Parar y revisar causas, reparar si es posible y reanudar.
		Insuficiente abastecimiento de agua hacia la Unidad Cementadora	Verificar antes de la operación el gasto máximo de suministro de agua a la UAP, en caso de ser muy bajo gasto, considerar estrangular

RECOMENDACIONES GENERALES

Para asegurar el éxito en la cementación del liner de 7", se deben seguir las siguientes recomendaciones: Asegurar el control completo del pozo, sin gasificación ni pérdida de circulación.

Se recomienda acondicionar el lodo y circular el pozo hasta estabilizar las propiedades de entrada y salida del lodo antes de la cementación.

Se recomienda que en el momento de iniciar la cementación el lodo tenga las propiedades reológicas lo más bajas permisible. Verificar la presión de circulación y simular los caudales de desplazamiento para obtener una idea de los valores de presión durante el desplazamiento. Se buscan valores de desarrollo de Gel a 10 seg y 10 min lo más cercanos uno del otro, así como un espesor de enjarre reducido, lo mismo que la pérdida por filtrado. En caso de que el lodo no reúna las mejores características para cementar, acondicionarlo antes de proceder a bajar el liner.

Recomendamos el uso de un bache espaciador con un volumen equivalente de 300 m lineales y/o 10 min., de contacto en el área a cementar, para de esta manera lograr el efecto químico y mecánico, obteniéndose una mejor remoción del enjarre de lodo y asegurar una mejor adherencia del cemento al revestidor.

Bajar la cantidad de centradores recomendados para cumplir una buena centralización y así poder evitar una posible canalización sobre la boca del liner. Halliburton recomienda un 80% de stand off mínimo si las condiciones geo mecánicas las permiten.

Verificar la cabeza de cementar, cuantificar el número de vuelta del vástago y medir las geometrías del dardo para garantizar el buen estado del mismo.

Durante la totalidad del bombeo de fluidos, mantener a una persona observando el retorno y cuantificando volúmenes retornados en cada etapa.

Los procedimientos de la cementación deberán definir y delegar responsabilidades de cada una de las partes de las cuales consistirá la operación.

Calibrar (Conejear) el diámetro interno de la TP de trabajo por lingadas para garantizar el paso del dardo durante el desplazamiento. Este valor debe ser suministrado por la CIA que supe el colgador

Se deberá contar con un procedimiento de respaldo en caso de que algo inesperado ocurra durante la cementación:

- Los tapones no asentaron – considerar compresibilidad del fluido del pozo, porcentaje de espesor mínimo de la tubería, verificar eficiencia de las bombas de lodos previo a la cementación en caso de tener que desplazar con las mismas.

- Presiones anormales de desplazamiento – considerar un fraguado prematuro del cemento – pasar por alto todos los pasos innecesarios.

PROFUNDIDADES DE COLOCACIÓN DE CENTRADORES CENTEK Y CBRS.

Centralizer Part Number	Type*	COD (m)	Hole Dia. (m)	Nom. Dia. (m)	Min. Dia. (m)	Rest. Force (kgf)	Bows	Total No. Required
CENTEK	BS	7.000	8.500	8.500	7.780	2,650.0	0	36
CRB	R(S)	7.000	8.500	8.375	8.375	0.0	0	12

Measured Depth (m)	Deviation (°)	Azimuth (°)	Restoring Force (kgf)	Standoff at Centralizer (°)	Standoff Between Centralizer (°)
4,710.00	34.5	65.5	973	69.7	0.0
4,724.00	34.3	65.7	932	70.7	45.3
4,738.00	34.2	65.4	894	71.6	48.0
4,752.00	34.1	65.6	780	74.2	50.6
4,766.00	34.3	64.1	692	76.2	57.6
4,780.00	34.6	64.3	693	76.2	57.9
4,794.00	34.7	64.1	734	75.3	55.9
4,808.00	34.8	64.3	796	73.8	53.6
4,822.00	34.7	64.5	863	72.3	49.4
4,836.00	34.7	64.7	895	71.5	47.6
4,850.00	34.6	65.3	913	71.1	46.4
4,864.00	34.5	65.5	912	71.1	46.0
4,878.00	34.4	66.1	898	71.5	46.6
4,892.00	34.3	66.3	900	71.4	46.8
4,906.00	34.2	66.8	921	70.9	45.7
4,920.00	34.0	67.0	948	70.3	44.3
4,934.00	33.8	67.5	989	69.3	42.4
4,948.00	33.5	67.7	995	69.2	40.7
4,962.00	33.2	67.9	942	70.4	42.8
4,976.00	33.0	68.1	906	71.3	45.4
4,990.00	32.8	68.2	874	72.0	46.3
5,004.00	32.7	66.3	781	78.7	52.8
5,018.00	32.9	66.5	761	70.0	50.0
5,032.00	32.9	65.5	900	72.2	49.3
5,046.00	32.5	65.6	970	70.6	40.8
5,060.00	32.2	63.4	728	79.8	51.1
5,074.00	32.8	63.6	584	83.4	65.7
5,088.00	33.3	62.0	774	79.7	60.3
5,102.00	33.0	62.1	928	75.8	46.1
5,116.00	32.7	62.3	831	78.2	48.8
5,130.00	32.7	64.3	783	79.4	54.1
5,144.00	32.8	64.5	639	83.0	57.7
5,158.00	33.6	63.4	543	85.4	67.7
5,172.00	34.4	63.6	598	84.0	65.7
5,186.00	35.0	64.1	665	82.4	61.0
5,200.00	35.5	64.3	1,222	61.9	41.3
5,231.00	36.0	65.3	1,189	82.0	0.0

Measured Depth (m)	Deviation (°)	Azimuth (°)	Restoring Force (kg)	Standoff at Centralizer (%)	Standoff Between Centralizer (%)
5,245.00	37.2	66.5	633	82.0	62.8
5,259.00	38.5	66.7	755	76.0	57.2
5,273.00	38.8	65.0	862	76.0	51.7
5,287.00	39.1	65.1	880	65.2	43.7
5,301.00	39.3	64.5	892	55.7	36.9
5,315.00	39.5	64.6	903	76.6	50.4
5,329.00	39.6	64.3	912	71.7	46.7
5,343.00	39.7	64.4	917	71.7	46.4
5,357.00	39.8	64.6	921	50.9	32.8
5,371.00	39.9	64.8	924	41.5	26.6
5,385.00	40.0	64.9	464	57.4	36.6

BIBLIOGRAFIA

HALLIBURTON MÉXICO para PEMEX DE LA REGIÓN SUR DISTRITO REFORMA, TABASCO.

Campo: Juspi

ANEXO II
HALLIBURTON

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

Nombre comercial del producto: **ZoneSealant 2000**

Fecha de Revisión: 02-ene-07

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA

Nombre comercial del producto: ZoneSealant 2000
 Sinónimos: Ninguno
 Familia química: Agente tensoactivo Mezcla
 Aplicación: Estabilizador de espuma
 Fabricante/Proveedor: Halliburton Energy Services
 P.O. Box 1431
 Duncan, Oklahoma 73536-0431
 Teléfonos de emergencia: (281) 575-5000

Preparado por: Servicio de cumplimiento de los requisitos sobre productos químicos
 Teléfono 1-580-251-4335

2. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS INGREDIENTES

Sustancia	Número del CAS	Porcentaje (%)	Valor umbral límite (ACGIH)	Límite de exposición permisible (OSHA)
Isopropanol	57-63-0	5 - 10%	200 ppm	400 ppm

3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Resumen de riesgos: Puede causar irritación de los ojos, la piel y las vías respiratorias. Puede causar dolor de cabeza, mareo y otros efectos sobre el sistema nervioso central. Puede resultar peligroso si se ingiere. La sobre exposición repetida puede ocasionar efectos en el hígado y los riñones. Inflamable.

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Si el producto se inhala, traslade la víctima a un sitio bien ventilado. Si ésta no respira, practique respiración artificial, preferentemente boca a boca. Si respira con dificultad, administre oxígeno. Procure atención médica.

Contacto con la piel: Lave con agua y jabón. Si la irritación persiste procure atención médica.

Ojos: En caso de contacto o posible contacto lave de inmediato los ojos con un chorro de agua abundante durante al menos 15 minutos y procure atención médica inmediatamente después de lavar.

Ingestión: No induzca el vómito. Diluya lentamente con 1-2 vasos de agua o leche y procure atención médica. No administre nada por vía oral a una persona inconsciente.

Notas para el personal médico: Ninguno conocido.

5. MEDIDAS DE EXTINCIÓN DE INCENDIOS

Intervalo/Temperatura de Ignición (F):	87
Intervalo/Temperatura de ignición (C):	33
Método para temperatura de ignición:	SETA CC
Temperatura de Autoignición (F):	No determinada
Temperatura de Autoignición (C):	No determinada
Limites de inflamabilidad en aire - Inferior (%):	No determinado
Limites de inflamabilidad en aire - Superior (%):	No determinado

Medios para la extinción del fuego	Niebla de agua, dióxido de carbono, espuma, polvo químico seco.
Riesgos especiales por exposición	Utilice agua por aspersión para enfriar las superficies expuestas al fuego. Los recipientes cerrados pueden explotar en el fuego. La descomposición en el fuego puede producir gases tóxicos. Evite rociar agua directamente en los recipientes de almacenamiento para que no se derramen.
Equipo protector especial para bomberos	Los bomberos deben usar traje protector completo y equipo de respiración autónomo.
Calificaciones de la Agencia Nacional de Protección de Incendios (NFPA):	Salud 2, Inflamabilidad 3, Reactividad 1
Calificación del sistema de información de materiales peligrosos (HMIS):	Inflamabilidad 3, Reactividad 1, Salud 2

6. MEDIDAS POR DERRAME ACCIDENTAL

Medidas preventivas personales	Use equipo de protección adecuado
Medidas de prevención ambiental	Evite que entre en drenajes, vías de agua y áreas bajas.
Procedimiento de limpieza/absorción	Aísle el derrame y detenga la fuga donde resulte seguro Elimine las fuentes de ignición y trabaje con herramientas que no produzcan chispas. Contenga el derrame con arena u otro material inerte Recoja con pala y deseche.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Precauciones de manejo	Evite el contacto con los ojos, la piel o la ropa. Evite respirar los vapores. Lávese las manos después de usar. Lave la ropa contaminada antes de volver a usarla. Asegure los recipientes al suelo cuando transfiera de un recipiente a otro.
Información de almacenamiento	Almacene lejos de los oxidantes. Proteja del calor, las chispas y las llamas abiertas. Mantenga cerrado el recipiente cuando no lo use. Almacene a temperaturas entre 50 y 100 F (10 y 37.8 C). No congele. El producto tiene una vida de almacenamiento de 24 meses.

8. CONTROL DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

Controles Industriales	Utilice en un sitio bien ventilado. Se debe utilizar extracción local en áreas que no tengan buena ventilación cruzada.
Protección respiratoria	Respirador para vapores orgánicos. En concentraciones altas, equipo de respiración alimentado o autónomo.
Protección para manos	Guantes de hule impermeables.
Protección para la piel	Delantal de hule.

Protección para ojos	Visor químico, use también una careta si hubiera riesgos de salpicaduras.
Otras precauciones	Los lavaojos y las regaderas de seguridad deben estar en lugares accesibles.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico:	Líquido
Color:	Amarillo claro
Olor:	Dulce
pH:	6.0-7.5
Gravedad específica a 20 C (Agua=1):	1.06
Densidad a 20 C (lb/galón):	8.83
Densidad a granel a 20 C (lb/ft3):	No determinada
Punto/Intervalo de ebullición (F):	No determinado
Punto/Intervalo de ebullición (C):	No determinado
Intervalo/punto de congelación (F):	No determinado
Intervalo/punto de congelación (C):	No determinado
Presión de vapor a 20 C (mmHg):	No determinada
Densidad del vapor (Aire=1):	No determinada
Porcentaje de compuestos volátiles:	45
Velocidad de evaporación (acetato de butilo = 1):	No determinada.
Solubilidad en agua (g/100ml):	Soluble
Solubilidad en disolventes (g/100ml):	No determinada
Compuestos orgánicos volátiles (lb/galón):	No determinado
Viscosidad dinámica a 20 C (centipoise):	No determinada
Viscosidad cinemática a 20 C (centistokes):	No determinada
Constante de reparto: n-octanol/agua:	No determinado
Peso molecular (g/mol):	No determinado

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Datos de estabilidad:	Estable
Polimerización Peligrosa:	No ocurrirá
Condiciones que se deben evitar	Manténgase alejado del calor, las chispas y llamas.
Incompatibilidad (materiales a evitar)	Oxidantes fuertes.
Productos de descomposición peligrosos	Monóxido y dióxido de carbono.
Pautas adicionales	No se aplica

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Principales vías de exposición	Contacto con ojos o piel, inhalación
Inhalación	Puede causar irritación respiratoria. Puede causar depresión del sistema nervioso central incluyendo dolor de cabeza, mareo, somnolencia, falta de coordinación, tiempo de reacción más lento, habla balbuceante, vahído y pérdida de conocimiento. Explicación: Úsese si la inhalación puede
Contacto con la piel	Puede producir una irritación leve en la piel.
Contacto con los ojos	Puede producir irritación ocular grave.
Ingestión.	Puede causar dolores abdominales, vómitos, náusea y diarrea

Condiciones médicas agravadas. Afecciones de la piel.

Efectos crónicos/carcinógenos La sobre exposición repetida puede ocasionar efectos en el hígado y los riñones.

Información adicional Ninguno conocido.

Pruebas de toxicidad

Toxicidad oral:	No determinada
Toxicidad dérmica:	No determinada.
Toxicidad por inhalación:	No determinada
Efecto primario de irritación:	No determinado
Carácter cancerígeno:	No determinada
Genotoxicidad:	No determinada
Toxicidad reproductiva y del desarrollo	No determinada

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Movilidad (Agua/Suelo/Aire) No determinada

Persistencia/carácter degradable No determinado

Acumulación en sistemas biológicos No determinada

Información eco-toxicológica

Toxicidad aguda en peces:	No determinada
Toxicidad aguda en crustáceos:	No determinada
Toxicidad aguda en algas:	No determinada

Información del destino químico: No determinado

Información adicional: No se aplica

13. CONSIDERACIONES DE DESECHO

Método de desecho La eliminación de residuos se hará según las reglamentaciones locales, estatales y federales.

Embalaje contaminado Siga todos los reglamentos nacionales o locales aplicables.

14. INFORMACIÓN DE TRANSPORTE

Transporte Terrestre

Departamento de transporte (DOT)
Líquido inflamable, S.N.O., 3, UN1993, III, (33.3 C)
(Contiene isopropanol)
NAERG 128

ANEXO III

HALLIBURTON

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

Nombre comercial del producto: **Zoneseal 4000**

Fecha de Revisión: 03-ene-08

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA

Nombre comercial del producto: Zoneseal 4000
Sinónimos: Ninguno
Familia química: Agente tensoactivo Mezcla
Aplicación: Estabilizador de espuma
Fabricante/Proveedor: Halliburton Energy Services
P.O. Box 1431
Duncan, Oklahoma 73536-0431
Teléfonos de emergencia: (281) 575-5000

Preparado por: Servicio de cumplimiento de los requisitos sobre productos químicos
Teléfono 1-580-251-4335
e-mail: fdunexchem@halliburton.com

2. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS INGREDIENTES

Sustancia	Número del CAS	Porcentaje (%)	Valor umbral límite (ACGIH)	Límite de exposición permisible (OSHA)
Hexilenglicol	107-41-5	5 - 10%	25 ppm	No se aplica
Cocobetaina	61789-40-0	5 - 10%	No se aplica	No se aplica

3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Resumen de riesgos: Puede producir irritación ocular grave. Puede causar irritación de la piel y las vías respiratorias. Puede causar dolor de cabeza, mareo y otros efectos sobre el sistema nervioso central. Puede resultar peligroso si se ingiere. La sobre exposición repetida puede ocasionar efectos en el hígado y los riñones.

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Si el producto se inhala, traslade la víctima a un sitio bien ventilado. Si ésta no respira, practique respiración artificial, preferentemente boca a boca. Si respira con dificultad, administre oxígeno. Procure atención médica.

Contacto con la piel: Lave con agua y jabón. Si la irritación persiste procure atención médica. Quítese la ropa contaminada y lávela antes de volver a usarla.

Ojos: En caso de contacto o posible contacto lave de inmediato los ojos con un chorro de agua abundante durante al menos 15 minutos y procure atención médica inmediatamente después de lavar.

Ingestión Si se ingiere NO induzca el vómito. Dé a la víctima dos vasos de agua, llame de inmediato al médico. Nunca administre nada por boca a una persona inconsciente. Explicación: Use para materiales cáusticos que puedan causar mayor daño al esófago y que una

Notas para el personal médico No se aplica.

5. MEDIDAS DE EXTINCIÓN DE INCENDIOS

Intervalo/Temperatura de Ignición (F):	> 209
Intervalo/Temperatura de ignición (C):	> 98
Método para temperatura de ignición:	TCC
Temperatura de Autoignición (F):	No determinada
Temperatura de Autoignición (C):	No determinada
Limites de inflamabilidad en aire - Inferior (%):	No determinado
Limites de inflamabilidad en aire - Superior (%):	No determinado

Medios para la extinción del fuego Niebla de agua, dióxido de carbono, espuma, polvo químico seco.

Riesgos especiales por exposición Utilice agua por aspersión para enfriar las superficies expuestas al fuego. Los recipientes cerrados pueden explotar en el fuego. La descomposición en el fuego puede producir gases tóxicos. Los vapores son más densos que el aire y se pueden acumular en áreas bajas. Los vapores pueden viajar a ras del suelo e incendiarse en lugares distantes.

Equipo protector especial para bomberos Los bomberos deben usar traje protector completo y equipo de respiración autónomo.

Calificaciones de la Agencia Nacional de Protección de Incendios (NFPA): Salud 2, Inflamabilidad 1, Reactividad 0

Calificación del sistema de información de materiales peligrosos (HMIS): Inflamabilidad 1, Reactividad 0, Salud 2

6. MEDIDAS POR DERRAME ACCIDENTAL

Medidas preventivas personales Use equipo de protección adecuado Use respirador autónomo en áreas cerradas.

Medidas de prevención ambiental Evite que entre en drenajes, vías de agua y áreas bajas.

Procedimiento de limpieza/absorción Aísle el derrame y detenga la fuga donde resulte seguro Contenga el derrame con arena u otro material inerte Recoja con pala y deseche.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Precauciones de manejo Evite el contacto con los ojos, la piel o la ropa. Evite respirar los vapores. Lávese las manos después de usar. Lave la ropa contaminada antes de volver a usarla. Asegure los recipientes al suelo cuando transfiera de un recipiente a otro.

Información de almacenamiento Mantenga cerrado el recipiente cuando no lo use. Almacene lejos de los oxidantes. Almacenar a temperaturas inferiores a 140 F (60 C). El producto tiene una vida de almacenamiento de 24 meses.

8. CONTROL DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

Controles Industriales	Utilice en un sitio bien ventilado. Se debe utilizar extracción local en áreas que no tengan buena ventilación cruzada.
Protección respiratoria	Normalmente no se necesita. Pero si son posibles exposiciones significativas se recomienda el siguiente respirador. Respirador para vapores orgánicos.
Protección para manos	Guantes de hule impermeables.
Protección para la piel	Delantal de hule.
Protección para ojos	Visor químico, use también una careta si hubiera riesgos de salpicaduras.
Otras precauciones	Los lavaojos y las regaderas de seguridad deben estar en lugares accesibles.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico:	Líquido
Color:	Amarillo claro
Olor:	Dulce
pH:	6-8
Gravedad específica a 20 C (Agua=1):	1.091
Densidad a 20 C (lb/galón):	9.09
Densidad a granel a 20 C (lb/ft3):	68.08
Punto/Intervalo de ebullición (F):	No determinado
Punto/Intervalo de ebullición (C):	No determinado
Intervalo/punto de congelación (F):	No determinado
Intervalo/punto de congelación (C):	Máximo: < 45
Presión de vapor a 20 C (mmHg):	No determinada
Densidad del vapor (Aire=1):	> 1
Porcentaje de compuestos volátiles:	64-69
Velocidad de evaporación (acetato de butilo = 1):	No determinada.
Solubilidad en agua (g/100ml):	Soluble
Solubilidad en disolventes (g/100ml):	No determinada
Compuestos orgánicos volátiles (lb/galón):	No determinado
Viscosidad dinámica a 20 C (centipoise):	No determinada
Viscosidad cinemática a 20 C (centistokes):	No determinada
Constante de reparto: n-octanol:agua:	No determinado
Peso molecular (g/mol):	No determinado

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Datos de estabilidad:	Estable
Polimerización Peligrosa:	No ocurrirá
Condiciones que se deben evitar	Ninguna anticipada.
Incompatibilidad (materiales a evitar)	Oxidantes fuertes.
Productos de descomposición peligrosos	Óxidos de azufre. Monóxido y dióxido de carbono. Óxidos de nitrógeno.
Pautas adicionales	No se aplica

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Principales vías de exposición	Contacto con ojos o piel, inhalación
--------------------------------	--------------------------------------

Inhalación	Puede causar irritación respiratoria. Puede causar depresión del sistema nervioso central incluyendo dolor de cabeza, mareo, somnolencia, falta de coordinación, tiempo de reacción más lento, habla balbuceante, vahído y pérdida de conocimiento. Explicación: Úsese si la inhalación puede
Contacto con la piel	Puede causar irritación de la piel La exposición prolongada puede causar pérdida de grasa cutánea.
Contacto con los ojos	Puede producir irritación ocular grave.
Ingestión.	Puede causar dolor de cabeza, mareo, náusea, vómitos, irritación gastrointestinal y depresión del sistema nervioso central.
Condiciones médicas agravadas.	Afecciones de la piel. Dolencias oculares.
Efectos crónicos/carcinógenos	La sobre exposición repetida puede ocasionar efectos en el hígado y los riñones.
Información adicional	Ninguno conocido.
Pruebas de toxicidad	
Toxicidad oral:	No determinada
Toxicidad dérmica:	No determinada.
Toxicidad por inhalación:	No determinada
Efecto primario de irritación:	No determinado
Carácter cancerígeno:	No determinada
Genotoxicidad:	No determinada
Toxicidad reproductiva y del desarrollo	No determinada

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Movilidad (Agua/Suelo/Aire)	No determinada
Persistencia/carácter degradable	No determinado
Acumulación en sistemas biológicos	No determinada

Información eco-toxicológica

Toxicidad aguda en peces:	No determinada
Toxicidad aguda en crustáceos:	No determinada
Toxicidad aguda en algas:	No determinada

Información del destino químico: No determinado

Información adicional: No se aplica

13. CONSIDERACIONES DE DESECHO

Método de desecho	La eliminación de residuos se hará según las reglamentaciones locales, estatales y federales.
Embalaje contaminado	Siga todos los reglamentos nacionales o locales aplicables.

ANEXO IV

Requerimientos de agua y Factores de Volúmenes Absolutos de los diferentes Aditivos empleados en el Método de Volumen Absoluto.

TABLA 11.1
(Unidades Métricas)
Requerimientos de Agua

Material	Requerimiento de Agua
Cemento clase A y B	19.7 lt / 42.6 Kg sc.
Cemento clase C	23.85 lt / 42.6 Kg sc.
Cemento clase D y E	16.3 lt / 42.6 Kg sc.
Cemento clase G	18.9 lt / 42.6 Kg sc.
Cemento clase H	16.3 a 19.7 lt / 42.6 Kg sc
Atapulgita	Aprox. igual a Bentonita
Barita	10 lt / 45.5 Kg sc.
Bentonita	4.9 lt / 2 % en cemento
Cloruro de Calcio	Ninguna
Cal-Seal	18.2 lt / 45.5 Kg sc.
CFR-2	Ninguna
D-Air-1	Ninguna
Diacel A	Ninguna
Diacel D	12.5 - 28.0 lt / 10 % cetto
Gilsonita	7.6 lt / 22.7 Kg
Halad-9	Ninguna (hasta 0.5%)
Halad-14	1.5 a 1.9 lt / sc
Halad-22-A	Ninguna (hasta 0.5%)
Hi-Dense	1.5 a 1.9 lt / sc más de .5%
	1.4 lt / 45.4 Kg sc ó
	3 % por peso de cemento
HR-4	Ninguna
HR-5	Ninguna
HR-7	Ninguna
HR-12	Ninguna
HR-15	Ninguna
HR-20	Ninguna
Arena Ottawa	Ninguna
SSA-1	6.1 lt / 35 % en cemento
SSA-2	Ninguna
Tuf-Plug	Ninguna

TABLA 11.2
(Unidades Métricas)
Propiedades físicas de materiales cementantes y aditivos

Material	Peso 1 bulto Kg/ m ³	Gravedad Específica	Peso Abs.* lt.	Factor de Vol. Al lt/Kg
Cementos API	1506	3.14	42.6	0.3185
Bentonita	961	2.65	36.1	0.3776
Cloruro de Calcio**	903	1.96	26.7	-----
CFR-2**	689	1.30	17.7	-----
D-Air-1**	404	1.35	18.4	-----
Diacel-A**	966	2.62	35.7	-----
Diacel-D	268	2.10	28.6	0.4762
Flocele	240	1.42	-----	-----
Gilsonita	801	1.07	14.5	0.9346
Halad-9**	596	1.22	16.6	-----
Halad-14**	633	1.31	17.8	-----
Halad-22A**	376	1.32	16.3	-----
Hi-Dense	2995	5.02	68.3	0.1992
HR-4	561	1.56	21.1	-----
HR-5	615	1.41	18.6	-----
HR-7	481	1.30	17.7	-----
HR-12	372	1.22	16.6	-----
Arena Ottawa	1602	2.63	35.8	0.3802
SSA-1	1121	2.63	35.8	0.3802
SSA-2	1602	2.63	35.8	0.3802
Tuf-Plug	769	1.28	17.438	0.7813
Agua	1000	1.00	13.86	1.0000

* Equivalente a un saco de cemento de 94 lb en volumen.
** Cuando se usa en zenos del 5 % puede ser omitido de los cálculos sin error significativo.

TABLA 11.3

Material	Volumen de envase	Peso	Peso de envase (lbs/pie ³)	Gravedad específica	Volumen Absoluto (gal/lb)	Volumen Absoluto (lts/kg)
Cemento A;B;G;H	1saco	50kg	50	3.14	0.0382	0.3182
Bentonita	1 lb	1	60	2.65	0.0453	0.3773
Fly Ash	1 lb	1	74	2.46	0.0487	0.4057
CaCl ₂	1 saco	100	56.4	1.96	0.0612	0.5098
Sílica Flour	1 saco	100	70	2.63	0.0456	0.3798
Kolite	1 saco	50	50	1.07	0.1122	0.9346
Hematita silicato	1 saco	100	193	5,02	0.0239	0.1991

TABLA 11.4

Material	Peso por saco (lbs/saco)	Vol absoluto (gal/lb)	gal/saco
Cemento B	94	0,0382	3,5908
8% Gel	7,52	0,0453	0,340656
15% Fly Ash	14,1	0,0487	0,68667
3% Kolite	2,82	0,1122	0,316404
2% CaCl ₂	1,88	0,0612	0,115056

ANEXO V

**REQUERIMIENTOS DE AGUA Y PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES CEMENTANTES
[lb/ft³]-Red Book Halliburton.**

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk		Absolute Volume		Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
	Weight lbs/cuft	Specific Gravity	gals/lb	cu ft/lb				
API Cements	94	3.14	0.0382	0.0051	100	Dry		0.045 to 0.055
Trinity Lite-Wate	75	2.8	0.0429	0.0057	100	Dry		0.080 to 0.103
Micro-Matrix	50	3	0.0400	0.0053	100	Dry		0.120 to 0.180
Micro-Fly Ash	65	2.54	0.0473	0.0063	100	Dry		0.120 to 0.180
Micro-Matrix Cmt Ret		1.15	0.1044	0.0140	100	Liquid	Water	
PozMix A	74	2.46	0.0488	0.0065	100	Dry		0.049 to 0.053
SilicaLite	18	2.52	0.0476	0.0064	100	Dry		0.4
Attapulgate	40	2.58	0.0465	0.0062	100	Dry		0.69
Barite	135	4.23	0.0284	0.0038	100	Dry		0.0264
Bentonite	60	2.65	0.0453	0.0061	100	Dry		0.69
Calcium Carbonate	22.3	2.71	0.0443	0.0059	100	Dry		none
Calcium Chloride	50.5	1.96	0.0612	0.0082	100	Dry		none
CAHT-1	45	1.75	0.0686	0.0092	100	Dry		none
CFA-S		1.05	0.1143	0.0153	100	Liquid	Water	
Cal-Seal	75	2.7	0.0445	0.0059	100	Dry		0.048

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk		Absolute Volume		Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
	Weight lbs/cuft	Specific Gravity	gals/lb	cu ft/lb				
CFR-2	43	1.3	0.0923	0.0123	100	Dry		none
CFR-2L		1.18	0.1017	0.0136	33	Liquid	Water	
CFR-3	38	1.28	0.0938	0.0125	100	Dry		none
CFR-3L		1.17	0.1026	0.0137	33	Liquid	Water	
D-Air-1	25.2	1.35	0.0889	0.0119	100	Dry		none
D-Air-2		1.01	0.1189	0.0159	100	Liquid	Suspension	
D-Air-3		1	0.1200	0.0160	100	Liquid		
Diacel A	60.3	2.62	0.0458	0.0061	100	Dry		none
Diesel Oil		0.85	0.1412	0.0189	100	Liquid		
DSMA		1.006	0.1193	0.0160	40	Liquid	Water	
Econolite	75	2.4	0.0500	0.0067	100	Dry		Varies
Econolite Liquid		1.4	0.0857	0.0115	40	Liquid	Water	
EX-1		2.4	0.0500	0.0067	100	Dry		Varies
Flocele	15	1.42	0.0845	0.0113	100	Dry		none
FWCA	32	1.4	0.0857	0.0115	100	Dry		none

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk		Absolute Volume		Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
	Weight lbs/cuft	Specific Gravity	gals/lb	cu ft/lb				
GasCon 469		1.1	0.1091	0.0146	15	Liquid	Water	
GasStop	19	1.19	0.1009	0.0135	100	Dry		none
GasStop HT	19	1.43	0.0839	0.0112	100	Dry		none
GasStop LXP		0.994	0.1208	0.0161	42.3	Liquid	Suspension	
Gilsonite	50	1.07	0.1122	0.0150	100	Dry		0.04
Halad-9	37.2	1.22	0.0984	0.0132	100	Dry		none < 0.5%
Halad-9 LXP		0.987	0.1216	0.0163	42.6	Liquid	Suspension	
Halad-14	39.5	1.31	0.0916	0.0123	100	Dry		none
Halad-22A	23.5	1.32	0.0909	0.0122	100	Dry		none < 0.5%
Halad-22A LXP		1.003	0.1197	0.0160	41.9	Liquid	Suspension	
Halad-100A	15.62	1.36	0.0883	0.0118	100	Dry		none
Halad-100AL		1.034	0.1161	0.0155	10	Liquid	Water	
Halad-322	35.2	1.28	0.0938	0.0125	100	Dry		none
Halad-322 LXP		0.984	0.1220	0.0163	50	Liquid	Suspension	
Halad-344	19	1.19	0.1009	0.0135	100	Dry		none
Halad-344 LXP		1.01	0.1189	0.0159	42.3	Liquid	Suspension	

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk		Absolute Volume		Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
	Weight lbs/cuft	Specific Gravity	gals/lb	cu ft/lb				
Halad-413	42	1.48	0.0811	0.0108	100	Dry		none
Halad-413 Liquid		1.11	0.1082	0.0145	25	Liquid	Water	
Halad-447	55.8	1.64	0.0732	0.0098	100	Dry		none
Halad-361A		1.07	0.1122	0.0150	20	Liquid	Water	
Halad-600LE+		1.097	0.1094	0.0146	20	Liquid	Water	
Hi-Dense #4	165	5.2	0.0231	0.0031	100	Dry		varies
HR-5	38.4	1.6	0.0750	0.0100	100	Dry		none
HR-6L		1.21	0.0992	0.0133	40	Liquid	Water	
HR-7	30	1.28	0.0938	0.0125	100	Dry		none
HR-12	23.2	1.14	0.1053	0.0141	100	Dry		none
HR-12L		1.2	0.1000	0.0134	40	Liquid	Water	
HR-13L		1.24	0.0968	0.0129	40	Liquid	Water	
HR-25	45	1.76	0.0682	0.0091	100	Dry		none
HR-25L		1.2	0.1000	0.0134	40	Liquid	Water	
SCR-100	45	1.42	0.0845	0.0113	100	Dry		none
SCR-100 Liquid		1.16	0.1035	0.0138	40	Liquid	Water	

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk		Absolute Volume		Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
	Weight lbs/cuft	Specific Gravity	gals/lb	cu ft/lb				
Hydrated Lime	31	2.34	0.0513	0.0069	100	Dry		0.153
Hydromite	68	2.15	0.0558	0.0075	100	Dry		0.03
Iron Carbonate	114.5	3.7	0.0324	0.0043	100	Dry		none
KCl (in solution)								
3%		1.019	0.0443	0.0059	100	Dry		
5%		1.031	0.0450	0.0060	100	Dry		
Sat.		1.178	0.1019	0.0136	26.5	Liquid	Water	
LAP-1	50	1.33	0.0903	0.0121	100	Dry		none
LA-2		1.1	0.1091	0.0146	54	Liquid	Water	
Latex-2000		0.996	0.1205	0.0161	50	Liquid	Water	
Microbond	61	2.4	0.0500	0.0067	100	Dry		0.048
Microbond E		3	0.0400	0.0053	100	Dry		
Microbond HT	112	3.57	0.0336	0.0045	100	Dry		0.048
Microbond M	65	3.61	0.0333	0.0044	100	Dry		0.088
MicroBlock		1.4	0.0857	0.0115	50	Liquid	Water	
MicroMax	84	4.9	0.0245	0.0033	100	Dry		0.05

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk		Absolute Volume		Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
	Weight lbs/cuft	Specific Gravity	gals/lb	cu ft/lb				
MicroSand	38	2.65	0.0453	0.0061	100	Dry		0.05
Perlite (0 psi)	8	0.67	0.1792	0.0240	100	Dry		0.5
Perlite (3000 psi)		2.2	0.0546	0.0073	100	Dry		
Perlite Six (0 psi)	38	1.575	0.0762	0.0102	100	Dry		0.158
Perlite Six (3000 psi)		2.4	0.0500	0.0067	100	Dry		
NF-3		0.981	0.1224	0.0164	100	Liquid	Water	
NF-4		1.01	0.1189	0.0159	100	Liquid	Water	
NF-4E		0.998	0.1203	0.0161	100	Liquid	Water	
NF-5		0.94	0.1277	0.0171	100	Liquid	Water	
SA-541	47	1.4	0.0857	0.0115	100	Dry		none
Spherelite (0 psi)	25	0.685	0.1753	0.0234	100	Dry		0.95
Spherelite (500 psi)		0.759	0.1582	0.0211	100	Dry		
Spherelite (1000 psi)		0.785	0.1529	0.0204	100	Dry		
Spherelite (2000 psi)		0.828	0.1450	0.0194	100	Dry		
Spherelite (3000 psi)		0.864	0.1389	0.0186	100	Dry		
Spherelite (4000 psi)		0.902	0.1331	0.0178	100	Dry		

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight lbs/cuft	Specific Gravity	Absolute Volume		Activity %	Dry/ Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
			gals/lb	cu ft/lb				
Spherelite (5000 psi)		0.943	0.1273	0.0170	100	Dry		
Spherelite (6000 psi)		0.98	0.1225	0.0164	100	Dry		
SSA-1 (Silica Flour)	70	2.65	0.0453	0.0061	100	Dry		0.049
SSA-2 (Coarse Silica)	100	2.65	0.0453	0.0061	100	Dry		none
Sea Water		1.025	0.1171	0.0157		Liquid		
Salt (dry)	71	2.17	0.0553	0.0074	100	Dry		
Salt (in Solution)								
6% - 0.5 lb/gal		1.041	0.0372	0.0050	6	Dry		
12% - 1.0 lb/gal		1.078	0.0391	0.0052	12	Dry		
18% - 1.5 lb/gal		1.112	0.0405	0.0054	18	Dry		
24% - 2.0 lb/gal		1.145	0.0417	0.0056	24	Dry		
Sat.- 3.1 lb/gal		1.2	0.0458	0.0061	37.2	Dry		
Sand								none
35% porosity	106.6	2.63	0.0456	0.0061	100	Wet		
39% porosity	100	2.63	0.0456	0.0061	100	Dry		
Super CBL	56.9	2.6	0.0462	0.0062	100	Dry		none

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight lbs/cuft	Specific Gravity	Absolute Volume		Activity %	Dry/ Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
			gals/lb	cu ft/lb				
Suspend HT	55	1.53	0.0785	0.0105	100	Dry		varies
Tuf Plug	48	1.28	0.0938	0.0125	100	Dry		none
VersaSet	50	2.32	0.0517	0.0069	100	Dry		none
Water		1	0.1200	0.0160		Liquid		
ZoneSeal Retarder	29	1.36	0.0883	0.0118	100	Dry		none

ANEXO VI.

**REQUERIMIENTOS DE AGUA Y PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES CEMENTANTES
[kg/mt³]-Red Book Halliburton.**

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight Kg/m3	Specific Gravity	Absolute Volume L/Kg	Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements L/Kg
API Cements	1506	3.14	0.3190	100	Dry		0.376 to 0.459
Trinity Lite-Wate	1201	2.8	0.3578	100	Dry		0.668 to 0.859
Micro-Matrix	801	3	0.3339	100	Dry		1.001 to 1.502
Micro-Fly Ash	1041	2.54	0.3944	100	Dry		1.001 to 1.502
Micro-Matrix Cmt Ret		1.15	0.8711	100	Liquid	Water	
PozMix A	1185	2.46	0.4072	100	Dry		0.409 to 0.442
SilicaLite	288	2.52	0.3975	100	Dry		3.338
Attapulgite	641	2.58	0.3883	100	Dry		5.758
Barite	2162	4.23	0.2368	100	Dry		0.22
Bentonite	961	2.65	0.3780	100	Dry		5.758
Calcium Carbonate	357	2.71	0.3697	100	Dry		none
Calcium Chloride	809	1.96	0.5111	100	Dry		none
CAHT-1	721	1.75	0.5725	100	Dry		none
CFA-S		1.05	0.9541	100	Liquid	Water	
Cal-Seal	1201	2.7	0.3710	100	Dry		0.401
CFR-2	689	1.3	0.7706	100	Dry		none
CFR-2L		1.18	0.8490	33	Liquid	Water	

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight Kg/m3	Specific Gravity	Absolute Volume L/Kg	Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements L/Kg
CFR-3	609	1.28	0.7827	100	Dry		none
CFR-3L		1.17	0.8562	33	Liquid	Water	
D-Air-1	404	1.35	0.7421	100	Dry		none
D-Air-2		1.01	0.9919	100	Liquid	Suspension	
D-Air-3		1	1.0018	100	Liquid		
Diacel A	966	2.62	0.3824	100	Dry		none
Diesel Oil		0.85	1.1786	100	Liquid		
DSMA		1.006	0.9958	40	Liquid	Water	
Econolite	1201	2.4	0.4174	100	Dry		Varies
Econolite Liquid		1.4	0.7156	40	Liquid	Water	
EX-1		2.4	0.4174	100	Dry		Varies
Flocele	240	1.42	0.7055	100	Dry		none
FWCA	513	1.4	0.7156	100	Dry		none
GasCon 469		1.1	0.9107	15	Liquid	Water	
GasStop	304	1.19	0.8418	100	Dry		none
GasStop HT	304	1.43	0.7006	100	Dry		none
GasStop LXP		0.994	1.0078	42.3	Liquid	Suspension	

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight Kg/m³	Specific Gravity	Absolute Volume L/Kg	Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements L/Kg
Gilsonite	801	1.07	0.9363	100	Dry		0.334
Halad-9	596	1.22	0.8211	100	Dry		none < 0.5%
Halad-9LXP		0.987	1.0150	42.6	Liquid	Suspension	
Halad-14	633	1.31	0.7647	100	Dry		none
Halad-22A	376	1.32	0.7589	100	Dry		none < 0.5%
Halad-22ALXP		1.003	0.9988	41.9	Liquid	Suspension	
Halad-100A	250	1.36	0.7366	100	Dry		none
Halad-100AL		1.034	0.9689	10	Liquid	Water	
Halad-322	564	1.28	0.7827	100	Dry		none
Halad-322LXP		0.984	1.0181	50	Liquid	Suspension	
Halad-344	304	1.19	0.8418	100	Dry		none
Halad-344LXP		1.01	0.9919	42.3	Liquid	Suspension	
Halad-413	673	1.48	0.6769	100	Dry		none
Halad-413 Liquid		1.11	0.9025	25	Liquid	Water	
Halad-447	894	1.64	0.6109	100	Dry		none
Halad-361A		1.07	0.9363	20	Liquid	Water	
Halad-600LE+		1.097	0.9132	20	Liquid	Water	

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight Kg/m³	Specific Gravity	Absolute Volume L/Kg	Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements L/Kg
Hi-Dense #4	2643	5.2	0.1927	100	Dry		varies
HR-5	615	1.6	0.6261	100	Dry		none
HR-6L		1.21	0.8279	40	Liquid	Water	
HR-7	481	1.28	0.7827	100	Dry		none
HR-12	372	1.14	0.8788	100	Dry		none
HR-12L		1.2	0.8348	40	Liquid	Water	
HR-13L		1.24	0.8079	40	Liquid	Water	
HR-25	721	1.76	0.5692	100	Dry		none
HR-25L		1.2	0.8348	40	Liquid	Water	
SCR-100	721	1.42	0.7055	100	Dry		none
SCR-100 Liquid		1.16	0.8636	40	Liquid	Water	
Hydrated Lime	497	2.34	0.4281	100	Dry		1.277
Hydromite	1089	2.15	0.4660	100	Dry		0.25
Iron Carbonate	1834	3.7	0.2708	100	Dry		none
KCl (in solution)							
3%		1.019	0.9831	100	Dry		
5%		1.031	0.9717	100	Dry		
Sat.		1.178	0.8504	26.5	Liquid	Water	

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight Kg/m3	Specific Gravity	Absolute Volume L/Kg	Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements L/Kg
LAP-1	801	1.33	0.7532	100	Dry		none
LA-2		1.1	0.9107	54	Liquid	Water	
Latex-2000		0.996	1.0058	50	Liquid	Water	
Microbond	977	2.4	0.4174	100	Dry		0.401
Microbond E		3	0.3339	100	Dry		
Microbond HT	1794	3.57	0.2806	100	Dry		0.401
Microbond M	1041	3.61	0.2775	100	Dry		0.734
MicroBlock		1.4	0.7156	50	Liquid	Water	
MicroMax	1346	4.9	0.2044	100	Dry		0.417
MicroSand	609	2.65	0.3780	100	Dry		0.417
Perlite (0 psi)	128	0.67	1.4952	100	Dry		4.172
Perlite (3000 psi)		2.2	0.4554	100	Dry		
Perlite Six (0 psi)	609	1.575	0.6361	100	Dry		1.318
Perlite Six (3000 psi)		2.4	0.4174	100	Dry		
NF-3		0.981	1.0212	100	Liquid	Water	
NF-4		1.01	0.9919	100	Liquid	Water	
NF-4E		0.998	1.0038	100	Liquid	Water	

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight Kg/m3	Specific Gravity	Absolute Volume L/Kg	Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements L/Kg
NF-5		0.94	1.0657	100	Liquid	Water	
SA-541	753	1.4	0.7156	100	Dry		none
Spherelite (0 psi)	400	0.685	1.4625	100	Dry		7.927
Spherelite (500 psi)		0.759	1.3199	100	Dry		
Spherelite (1000 psi)		0.785	1.2762	100	Dry		
Spherelite (2000 psi)		0.828	1.2099	100	Dry		
Spherelite (3000 psi)		0.864	1.1595	100	Dry		
Spherelite (4000 psi)		0.902	1.1106	100	Dry		
Spherelite (5000 psi)		0.943	1.0624	100	Dry		
Spherelite (6000 psi)		0.98	1.0222	100	Dry		
SSA-1 (Silica Flour)	1121	2.65	0.3780	100	Dry		0.409
SSA-2 (Coarse Silica)	1602	2.65	0.3780	100	Dry		none
Sea Water		1.025	0.9774		Liquid		
Salt (dry)	1137	2.17	0.4617	100	Dry		

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight Kg/m3	Specific Gravity	Absolute Volume L/Kg	Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements L/Kg
Salt (in Solution)							
6% - 0.5 lb/gal		1.041	0.9623	6	Dry		
12% - 1.0 lb/gal		1.078	0.9293	12	Dry		
18% - 1.5 lb/gal		1.112	0.9009	18	Dry		
24% - 2.0 lb/gal		1.145	0.8749	24	Dry		
Sat.- 3.1 lb/gal		1.2	0.8348	37.2	Dry		
Sand							none
35% porosity	1708	2.63	0.3809	100	Wet		
39% porosity	1602	2.63	0.3809	100	Dry		
Super CBL	911	2.6	0.3853	100	Dry		none
Suspend HT	881	1.53	0.6548	100	Dry		varies
Tuf Plug	769	1.28	0.7827	100	Dry		none
VersaSet	801	2.32	0.4318	100	Dry		none
Water		1	1.0018		Liquid		
ZoneSeal Retarder	465	1.36	0.7366	100	Dry		none

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight lbs/cuft	Specific Gravity	Absolute Volume gals/lb	cu ft/lb	Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
Spherelite (5000 psi)		0.943	0.1273	0.0170	100	Dry		
Spherelite (6000 psi)		0.98	0.1225	0.0164	100	Dry		
SSA-1 (Silica Flour)	70	2.65	0.0453	0.0061	100	Dry		0.049
SSA-2 (Coarse Silica)	100	2.65	0.0453	0.0061	100	Dry		none
Sea Water		1.025	0.1171	0.0157		Liquid		
➔ Salt (dry)	71	2.17	0.0553	0.0074	100	Dry		
Salt (in Solution)								
6% - 0.5 lb/gal		1.041	0.0372	0.0050	6	Dry		
12% - 1.0 lb/gal		1.078	0.0391	0.0052	12	Dry		
18% - 1.5 lb/gal		1.112	0.0405	0.0054	18	Dry		
24% - 2.0 lb/gal		1.145	0.0417	0.0056	24	Dry		
Sat.- 3.1 lb/gal		1.2	0.0458	0.0061	37.2	Dry		
Sand								none
35% porosity	106.6	2.63	0.0456	0.0061	100	Wet		
39% porosity	100	2.63	0.0456	0.0061	100	Dry		
Super CBL	56.9	2.6	0.0462	0.0062	100	Dry		none

ANEXO VII

PROPIEDADES FISICAS DE LOS CEMENTOS Y ADITIVOS [lb/ft³]-IMP.

PHYSICAL PROPERTIES of CEMENTS and ADDITIVES

MATERIAL	Bulk Wt Lb/Cu Ft	Specific Gravity	Absolute Volume	
			Gal/Lb	Cu Ft/Lb
API Cements, Classes A, B, C, G, & H	94	3.14	.0382	.0051
Multidense, 1-1	84.5	2.97	.0406	.0054
Multidense, 1-2	87.7	3.03	.0398	.0053
Multidense, 2-1	81.3	2.92	.0413	.0055
Trinity Lite Wate (TLW)* Cement	75	2.78	.0432	.0058
Calcium Chloride (CaCl ₂)(dry)	56.4	1.96	.0612	.0082
Calcium Chloride (liquid)	82.18	1.317	.0910	.0122
Potassium Chloride (KCl) (dry)		1.984	.0604	.0081
Potassium Chloride, 68° F fresh water solutions				
3%		1.019	.0443	.0059
5%		1.031	.0450	.0060
Sodium Chloride (NaCl) (dry)	71.0	2.17	.0553	.0074
Attapulgate	40.0	2.89	.0415	.0053
Bentonite (gel)	60.0	2.65	.0453	.0060
Diacel D	66.7	2.1	.0572	.0076
Fly Ash	74.0	2.46	.0487	.0065
LW-6 (10% collapse @ 1500 PSI)	25	.70	.1712	.0229
LW-7-2 (10% collapse @ 2000 PSI)	15	.37	.3240	.0433
LW-7-4 (10% collapse @ 4000 PSI)	15	.38	.3155	.0422
Sodium Metasilicate (dry)	75	2.08	.0550	.0074
Sodium Silicate (liquid)	87.6	1.4	.0856	.0114

PHYSICAL PROPERTIES of CEMENTS and ADDITIVES

MATERIAL	Bulk Wt Lb/Cu Ft	Specific Gravity	Absolute Volume	
			Gal/Lb	Cu Ft/Lb
R-1	35.0	1.30	.0922	.0123
R-3	35.1	1.36	.0882	.0118
R-3L	73.62	1.18	.1017	.0136
R-6 (Diacel LWL)	29	1.36	.0882	.0118
R-7		1.86	.0645	.0086
R-8	35	1.20	.0999	.0133
R-8L	76	1.22	.0983	.0133
R-9	51	1.73	.0693	.0093
R-11	49	1.05	.1142	.0153
R-12L	79.25	1.27	.0944	.0126
R-15L	80.81	1.295	.0926	.0124
R-21	35.0	1.35	.0889	.0119
R-21L	72.38	1.16	.1034	.0138
FL-25	33.4	1.31	.0888	.0119
FL-32	15.6	1.26	.0952	.0127
FL-32L	66.14	1.06	.0881	.0151
FL-33	15.6	1.26	.0952	.0127
FL-33L	67.38	1.08	.1111	.0148
FL-52	31.0	1.40	.0856	.0114
FL-62	37.8	1.28	.0937	.0125
FL-63	19.0	1.25	.0959	.0128
FL-63L	69.25	1.11	.1081	.0144
FL-64	50.0	1.57	.0764	.0102
FL-64LT	52.5	1.63	.0736	.0098
Cellophane Flake	15	1.42	.0844	.0113
Flex Seal	50	1.15	.1043	.0139
Gilsonite	50	1.07	.1122	.0150
Gypsum	75.0	2.7	.0444	.0059
Kol-Seal	50	1.30	.0925	.0124
Nut Plug	48	1.28	.0938	.0125
Perlite	8			
0 PSI		.53	.2274	.0304
1,000 PSI		.81	.1474	.0197
3,000 PSI		.94	.1279	.0171
Sure Seal	35-40	1.22	.0983	.0131
FP-6L	61.65	.988	.1213	.0162
FP-11	65.79	2.60	.0461	.0062
FP-12L	60.52	.97	.1237	.0165
CD-31	41.6	1.35	.0284	.0038
CD-31L	73.0	1.17	.0889	.0118
CD-32	35.0	1.25	.0959	.0128
CD-32L	72.37	1.16	.1034	.0138
Hematite	193	5.02	.0239	.0032
Manganese Oxide	62	4.80	.0250	.0033
Silica Flour	70	2.63	.0456	.0061
Silica Sand, 100 Mesh	100	2.63	.0456	.0061
Sand	100	2.63	.0456	.0061
Water (Fresh)	62.4	1.00	.1199	.0160
Water (Sea)	63.96	1.025	.1169	.0153

BA-10	40.0	1.3	.0922	.0123
BA-10L	57.40	.92	.0895	.0120
B6	39.0	1.34	.0888	.0119
B8	37.50	2.20	.0545	.0073
B8L	84.54	1.35	.0888	.0119
B9		2.70	.0444	.0059
BA-61		.51	.0871	.0314
BA-86L	62.36	1.00	.1199	.0160
BA-90	16.00	2.20	.0545	.0073
BA-91	32.00	2.33	.0515	.0069
ASA-301	63.84	2.23	.0538	.0072
ASA-301L	56.77	.91	.1318	.0176
Barite	135	4.23	.0284	.0038
Diesel Oil, No. 1	51.1	.82	.1457	.0195
Diesel Oil, No. 2	53.0	.85	.1411	.0189
EC-1	50.0	2.60	.0161	.0062
FA-20	63.64	1.02	.1175	.0157
FS-1	39.0	1.34	.0895	.0120
Hydrated Lime	31.	2.2	.0545	.0073
LS-1L	66.13	1.06	.1132	.0151
LS-2L	72.37	1.16	.1034	.0138
LS-3L	64.88	1.04	.1153	.0154
MCS-AG	63.95	1.025	.1169	.0156

ANEXO VIII

PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES CEMENTANTES [lb/ft³]-PEMEX.

Dowell Schlumberger Material	Sp. Gr.	(lb/sk)	(lb/ft ³)	(ft ³ /sk)	(gal/lb)	(ft ³ /lb)
API Cement (U.S.) (except J)	3.16	94	94	1.00	0.0380	0.0051
API Cement (Canada) (except J)	3.16	80	94	0.85	0.0380	0.0051
API Class J (U.S.)	2.93	94	94	1.00	0.4100	0.0055
CW8, Chemical Wash	1.0	--	--	--	0.120	--
CW101, Chemical Wash	1.0	--	--	--	0.120	--
D8 or Diacel LWL†††. + D13R, Calcium Lignosulfonate††	1.35	50	29	1.72	0.0890	0.0119
D18, Ilmenite	4.45	100	150	0.67	0.0270	0.0036
D20, Bentonite	2.65	100	60	1.66	0.0454	0.0061
D24, Gilsonite	1.07	50	50	1.00	0.1123	0.0150
D28, High-Temperature Retarder†††	1.25	50	30	1.67	0.0962	0.0129
D29, Cellophane Flake	1.45	25	43	0.58	0.0829	0.0108
D30, Silica (Sand)	2.65	100	100	1.00	0.0456	0.0060
D31, Barite	4.33	100	135	1.35	0.0278	0.0037
D35 LITEPOZ™ 3 Cement Extender (LaDus) Denver	2.4-2.6 2.2-2.3	74 67	74 67	1.00 1.00	0.0481 0.0537	0.0065 0.0084
D42, KOLITE™ Cement Extender	1.30	75	50	1.50	0.0925	0.0124
D44, Salt (above saturation)	2.16	100	70	1.41	0.0556	0.0074
D44, Salt (below saturation)	--	--	--	--	0.0453	0.0061
D45, TIC™ II Dispersant††	1.5	100	58	1.72	0.0779	0.0104
D46, Antifoam Agent (Powdered)†††	1.50	50	51	0.98	0.0601	0.0080
D47, Antifoam Agent (Liquid)†††	1.00	--	62	--	0.1207	0.0161
D48, LITEPOZ 6 Cement Extender	2.06	60	60	1.00	0.0583	0.0078
D49, Trinity Lite-Wate †† Cement	2.80	75	75	1.00	0.0429	0.0057
D51, Lumnite + Cement	3.16	94	94	1.00	0.0380	0.0051
D52, Ciment Fondu + +	3.21	87.5	94	0.93	--	--
D53, Gypsum (Hemihydrate)	2.70	100	75	1.33	0.0445	0.0060
D58, Diacel D	2.10	50	17	3.00	0.0572	0.0077
D59, FLAC™ (Salt) Cement Additive†††	1.68	50	29	1.71	0.0714	0.0095
D60, FLAC (Fresh Water) Cement Additive†††	1.29	50	38	1.32	0.0932	0.0125
D61, LITEPOZ 7 Cement Extender	2.44	47	47	1.00	0.0493	0.0066
D65, TIC Dispersant†††	1.58	50	38	1.31	0.0760	0.0102
D66, Silica Flour	2.65	50	70	0.71	0.0456	0.0054
D71, Gelling Agent	2.26	5	--	--	0.0532	0.0071
D72, Expanded Perlite (0 psi)	-	31	7.5	4.0	0.2460	0.0329
D72 (3,000 psi)	2.40	31	--	--	0.0947	0.0127
D73, FLAC Cement Additive Liquid	1.05	--	--	--	0.1145	0.0153
D73.1, Liquid FLAC	1.07	--	--	--	0.112	--
D74, Retarder	5.47	50	--	--	0.0219	0.0029
D75, Liquid Extender	1.40	--	--	--	0.0859	0.0115
D76, Hematite	4.95	--	175	--	0.0244	0.0033
D77, Liquid Accelerator	1.38	--	--	--	0.0871	0.0116

* Trademark of DOWELL SCHLUMBERGER

† Trademark of Atlas Division of U.S. Steel Corporation

†† Trademark of General Portland Cement

††† These materials are normally used in small quantities which do not appreciably alter the density or yield of the cement slurry.

+ Drilling Specialties Incorporated

+ + Trademark of Cement LaFarge

Dowell Schlumberger Material	So Gr.	(lb/sk)	(lb/ft ³)	(ft ³ /sk)	(gal/lb)	(ft ³ /lb)
D79, Chemical Extender†††	2.40	100	--	--	0.0500	0.0066
D80, TIC Dispersant (Liquid)	1.23	--	--	--	0.0973	0.0130
D81, Liquid Retarder	1.26	--	--	--	0.0955	0.0127
D88, Synthetic Cement	1.16	--	--	--	0.103	--
D93, Retarder Aid†††	1.73	--	--	--	--	--
D94	--	50	--	--	--	--
D99, Retarder, Liquid†††	1.61	--	--	--	0.0749	0.0133
D104, Spacer 1000	--	--	--	--	--	--
D104.1, Spacer 1001	--	--	--	--	--	--
D104.C, Viscosity Builder	2.23	--	--	--	0.0537	--
D104.S, Viscosity Builder##	--	--	--	--	--	--
D108	1.10	--	--	--	0.1093	0.0146
D109, Liquid Retarder Concentrate	1.25-	--	--	--	0.096-	--
	1.27	--	--	--	0.094	--
D110, Liquid Retarder	1.13	--	--	--	0.1064	0.0142
D111, Liquid RFC	1.26	--	--	--	0.095	--
D112	1.15	50	--	--	0.1045	0.0143
D115, Viscosity Control	2.15	--	--	--	0.056	--
D120, Mid-Range Retarder	1.65	50	--	--	0.0730	0.0098
D121, TIC III	1.38	50	86	0.58	0.0870	0.0116
D122A, Mud Thinner	1.03	--	--	--	--	--
D124, Fillite	0.7-	--	24	--	0.171-	--
	0.85#	--	--	--	0.141	--
D125, Perlite	--	--	--	--	--	--
D127, Low-Temperature FLAC	1.29	--	45.89	--	0.0939	--
D129, Hardner	1.10	--	--	--	0.109	--
D130, Polyester FLakes	--	--	--	--	--	--
D131, (Salt) FLAC	1.17	--	--	--	0.102	--
D132, Cement Extender	2.67	--	80	--	0.0449	--
D600, GASBLOK*	1.02	--	--	--	0.117	--
D603.2, Liquid FLAC	1.09	--	--	--	0.110	--
D604, Liquid Dispersant	1.21	--	--	--	0.099	--
D607, Surfactant	0.99	--	--	--	0.121	--
D800, Mid-Temperature Retarder	1.26	--	40.6	--	0.045	--
D801, Liquid Mid-Temperature Retarder	1.20	--	--	--	0.100	--
D887, VERCEMIX* LT	2.83	--	85	--	0.0426	--
J59 Hydrated Lime	2.20	50	31	1.61	0.0545	0.0073
S1 CaCl ₂	1.75	100	50	--	0.0687	0.0092
S2 CaCl ₂	1.75	80	64	1.25	0.1169	0.0156
Sand (35% Porosity)	2.65	100	105	0.95	0.0454	0.0061

*ATM/3,000 psi

##Anticaking version for extended shelf life in hot, humid climates.

ANEXO IX

TABLAS DEL GRADIENTE DE TÉRMICO DE TEMPERATURA PARA EL CÁLCULO DE CÉDULA DEL CONSISTÓMETRO HP-HT.

STD-API/PETRO RP JOB-ENGL 1997 ■ 0732290 0604758 274 ■

Table 4—Casing Well-Simulation Tests (Continued)

1	2	3	4	5	6	7	8							
		Temperature Gradient, °F/100 ft depth (°C/100 m depth)												
		Temperature, °F (°C)												
Time, Min	Pressure		0.9	(1.6)	1.1	(2.0)	1.3	(2.4)	1.5	(2.7)	1.7	(3.1)	1.9	(3.5)
	psi	(kPa)	°F	(°C)	°F	(°C)	°F	(°C)	°F	(°C)	°F	(°C)	°F	(°C)
Schedule 9.5														
		Depth	6,000 ft	(1830 m)										
		Mud density: 9.9 lb/gal (1.19 kg/L)												
0	450	(3100)	80	(27)	80	(27)	80	(27)	80	(27)	80	(27)	80	(27)
2	600	(4100)	82	(28)	82	(28)	82	(28)	82	(28)	82	(28)	83	(28)
4	800	(5500)	84	(29)	84	(29)	84	(29)	85	(29)	85	(29)	86	(30)
6	1000	(6900)	86	(30)	86	(30)	87	(31)	87	(31)	87	(31)	88	(31)
8	1200	(8300)	88	(31)	88	(31)	89	(32)	89	(32)	90	(32)	91	(33)
10	1400	(9700)	90	(32)	90	(32)	91	(33)	92	(33)	92	(33)	94	(34)
12	1600	(11000)	92	(33)	92	(33)	93	(34)	94	(34)	95	(35)	97	(36)
14	1700	(11700)	94	(34)	94	(34)	95	(35)	96	(36)	97	(36)	100	(38)
16	1900	(13100)	96	(36)	96	(36)	97	(36)	98	(37)	99	(37)	102	(39)
18	2100	(14500)	97	(36)	99	(37)	100	(38)	101	(38)	102	(39)	105	(41)
20	2300	(15900)	99	(37)	101	(38)	102	(39)	103	(39)	104	(40)	108	(42)
22	2500	(17200)	101	(38)	103	(39)	104	(40)	105	(41)	107	(42)	111	(44)
24	2700	(18600)	103	(39)	105	(41)	106	(41)	108	(42)	109	(43)	113	(45)
26	2900	(20000)	105	(41)	107	(42)	108	(42)	110	(43)	112	(44)	116	(47)
28	3000	(20700)	107	(42)	109	(43)	111	(44)	112	(44)	114	(46)	119	(48)
30	3200	(22100)	109	(43)	111	(44)	113	(45)	115	(46)	116	(47)	122	(50)
32	3400	(23400)	111	(44)	113	(45)	115	(46)	117	(47)	119	(48)	125	(52)
33	3500	(24100)	112	(44)	114	(46)	116	(47)	118	(48)	120	(49)	126	(52)
Heating Rate - Deg/min			0.97	(0.54)	1.03	(0.57)	1.09	(0.61)	1.15	(0.64)	1.21	(0.67)	1.39	(0.77)
Pressure Rate (per min)			92 psi (636 kPa)											
Time to Final Conditions			33 Minutes											

Table 4—Casing Well-Simulation Tests (Continued)

		Temperature Gradient, °F/100 ft depth (°C/100 m depth)												
		Temperature, °F (°C)												
Time, Min	Pressure		0.9 (1.6)		1.1 (2.0)		1.3 (2.4)		1.5 (2.7)		1.7 (3.1)		1.9 (3.5)	
	psi	(kPa)	°F	(°C)	°F	(°C)	°F	(°C)	°F	(°C)	°F	(°C)	°F	(°C)
Schedule 9.6														
Depth		8,000 ft	(2440 m)											
		Mud density: 10.4 lb/gal (1.25 kg/L)												
0	550	(3800)	80	(27)	80	(27)	80	(27)	80	(27)	80	(27)	80	(27)
2	800	(5500)	82	(28)	82	(28)	83	(28)	83	(28)	83	(28)	84	(29)
4	1000	(6900)	84	(29)	85	(29)	85	(29)	86	(30)	86	(30)	88	(31)
6	1200	(8300)	87	(31)	87	(31)	88	(31)	89	(32)	90	(32)	92	(33)
8	1400	(9700)	89	(32)	90	(32)	91	(33)	92	(33)	93	(34)	96	(36)
10	1600	(11000)	91	(33)	92	(33)	93	(34)	95	(35)	96	(36)	100	(38)
12	1800	(12400)	93	(34)	94	(34)	96	(36)	98	(37)	99	(37)	103	(39)
14	2000	(13800)	96	(36)	97	(36)	99	(37)	100	(38)	103	(39)	107	(42)
16	2200	(15200)	98	(37)	99	(37)	101	(38)	103	(39)	106	(41)	111	(44)
18	2500	(17200)	100	(38)	102	(39)	104	(40)	106	(41)	109	(43)	115	(46)
20	2700	(18600)	102	(39)	104	(40)	107	(42)	109	(43)	112	(44)	119	(48)
22	2900	(20000)	105	(41)	106	(41)	110	(43)	112	(44)	115	(46)	123	(51)
24	3100	(21400)	107	(42)	109	(43)	112	(44)	115	(46)	119	(48)	127	(53)
26	3300	(22800)	109	(43)	111	(44)	115	(46)	118	(48)	122	(50)	131	(55)
28	3500	(24100)	111	(44)	113	(45)	118	(48)	121	(49)	125	(52)	135	(57)
30	3700	(25500)	114	(46)	116	(47)	120	(49)	124	(51)	128	(53)	139	(59)
32	3900	(26900)	116	(47)	118	(48)	123	(51)	127	(53)	132	(56)	142	(61)
34	4200	(29000)	118	(48)	121	(49)	126	(52)	130	(54)	135	(57)	146	(63)
36	4400	(30300)	120	(49)	123	(51)	128	(53)	133	(56)	138	(59)	150	(66)
38	4600	(31700)	123	(51)	125	(52)	131	(55)	136	(58)	141	(61)	154	(68)
40	4800	(33100)	125	(52)	128	(53)	134	(57)	139	(59)	144	(62)	158	(70)
41	4900	(33800)	126	(52)	129	(54)	135	(57)	140	(60)	146	(63)	160	(71)
Heating Rate - Deg/min			1.12	(0.62)	1.20	(0.67)	1.34	(0.74)	1.46	(0.81)	1.61	(0.89)	1.95	(1.08)
Pressure Rate (per min)			106 psi (732 kPa)											
Time to Final Conditions			41 Minutes											

Bibliografía.

1. Técnicas Especiales de Perforación. Revista Técnica Petroleum Engenieer International DeepWater Technology, 1997.
2. Recommend Practice for Testing Wells Cements. API Recommended Practice 10B Twenty-Second Edition, December 1997.
3. Prácticas Recomendadas para la evaluación de Cementos de Pozos. ANSI/API Recommended Practice 10B-2 First Edition, July 2005 to identical ISO 10426-2:2003.
4. Recommended Practice on Testing of DeepWater Well Cement Formulations. ANSI/API Recommended Practice 10B-3 First Edition, July 2004 to identical ISO 10426-3:2003.
5. Recommend Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. ANSI/API Recommended Practice 10B-4 First Edition, July 2004 to identical ISO 10426-4:2003.
6. Red Book Halliburton. Cementing Materials and Admixtures Physical Properties and Waters Requirements.
7. Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas Zona Poza Rica Tuxpan. Adición De compuestos Químicos para la Cementación de Pozos Petroleros en la Etapa de Producción.
8. Halliburton Fluid Sytems H04798. HT-400tm Pumps.
9. Publicación Aguas Profundas, Capítulo 22A, No de Revisión A-1.
10. Un siglo de la Perforación. Ingeniería de Cementaciones.
11. Recomendaciones Prácticas para ensayos de Laboratorio de cementación de pozos de Petróleo y/o gas. Norma Venezolana.
12. Curso Teórico Práctico de Lanoratorio, Halliburton Cementing, October 2007.
13. Well Cementing, Second Edition. Editors Erik B. Nelson and Dominique Guillot. Appendix B Laboratory Testing, Evaluation and Analysis of Well Cements.
14. Foam Cement and N2, Halliburton Laboratories.
15. Halliburton, Report Post Operative, 2013.
16. Halliburton, Estimulation of Wells I, 2001.
17. PEMEX Exploración y Producción Región Sur, Cemento Clase H-PEMEX, Ing. Juan Ángel Andrade. Gerencia de Servicios a Pozos.

18. Seminario de Cementación, Caracterización de los Cementos Tipo Portland. Norma NRF-069-PEMEX-2006 Cemento clase H-PEMEX.
19. Halliburton, Proceso Zone Seal. Nuevas Tecnologías en la Cementación.
20. PEMEX Exploración y Producción. Risers Marinos, División Marina de PEMEX, Julio 2002.
21. Overcoming Deep and Ultra Deepwater Drilling Challenges. Luis Alberto S. Rocha, P. Junqueira and J. L. Roque/Petrobras. OCT-15233.
22. Deepwater Cementing Challenges. Krishna Ravi, SPE, Ewout N, Biezen, SPE, Stephen C. Lightford, Halliburton Energy Services, Ashley Hibbert, BP Exploration Inc, and Chris Greaves, BP Exploration Colombia Ltd. SPE-56534.
23. Challenges on Drilling and Completion Operations of Deep Wells in Ultra-Deepwater Zones in the Gulf of México. J. C. Cunha and O. Moreira, Petrobras America Inc., G. H. Azebedo, B.C.M. Pereira, and L. A. S. Rocha, Petrobras S.A. SPE 125111.
24. Adequate Cementing Solutions for Deepwater Dual-Casing Running Systems Improves Operational Efficiency when Drilling Tophole Sections in Deepwater Wells. N. Moroni, SPE, D. Simeone, F. Parroza and S. Fazio, Eni E&P Division, and E. Therond, SPE, E. Belleggia, R. Connell, and M. Bogaerts, SPE, Schlumberger. SPE 146079.
25. Well Services Well Integrity. Principios de Cementación Espumada. Schlumberger.
26. Well Services Well Integrity. DeepCRETE Principios & DeepCRETE VS Cemento Espumado. Schlumberger.
27. PEMEX Exploración y Producción. Diplomado en Supervisión de Operaciones de Cementaciones Incluyendo Campos Depresionados Y Pruebas de Laboratorio.
28. Foam Cementing Solutions Zone Seal and Zone Squeeze, Prentice Creel, PE Conformance and Cementing, Halliburton.
29. Campo: Juspi. Ejemplo de Cementación Real, HALLIBURTON MÉXICO para PEMEX DE LA REGIÓN SUR DISTRITO REFORMA, TABASCO.