



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CEMENTACIÓN DE POZOS
PETROLEROS**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A N:

ANTONIO BOLAÑOS MONTER

FERNANDO GONZÁLEZ MARTÍNEZ



MÉXICO, D. F.

1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4 201
267369



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
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-053

SR. ANTONIO BOLAÑOS MONTER
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Juan Antonio Morales Díaz de Vivar y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero :

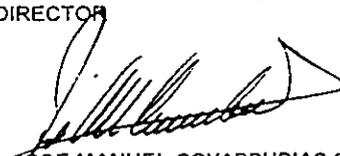
CEMENTACION DE POZOS PETROLEROS

- INTRODUCCION
- I ANTECEDENTES Y GENERALIDADES
- II TECNOLOGIA DEL CEMENTO
- III DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO
- IV EQUIPO, HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS PARA LA CEMENTACION
- V PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS
- VI EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA CEMENTACION
- VII ANALISIS DE COSTOS DE CEMENTACIONES
- VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA
- ANEXOS

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 26 de agosto de 1997
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*RLR*glg.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-052

SR. FERNANDO GONZALEZ MARTINEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Juan Antonio Morales Díaz de Vivar y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero :

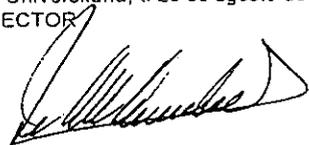
CEMENTACION DE POZOS PETROLEROS

- I INTRODUCCION
- II ANTECEDENTES Y GENERALIDADES
- III TECNOLOGIA DEL CEMENTO
- IV DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO
- V EQUIPO, HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS PARA LA CEMENTACION
- VI PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS
- VII EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA CEMENTACION
- VIII ANALISIS DE COSTOS DE CEMENTACIONES
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA
- ANEXOS

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 26 de agosto de 1997
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*RLR*gg.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Alumnos:

ANTONIO BOLAÑOS MONTER

FERNANDO GONZÁLEZ MARTÍNEZ

Tesis:

"CEMENTACIÓN DE POZOS PETROLEROS"

Director de Tesis:

ING. JUAN ANTONIO MORALES DÍAZ DE VIVAR

JURADO DEL EXÁMEN PROFESIONAL

PRESIDENTE:

ING. IGNACIO ALONSO CARDENAS

VOCAL:

ING. JUAN ANTONIO MORALES DÍAZ DE VIVAR

SECRETARIO:

ING. JORGE A. MANCILLA CASTILLO

1ER. SUPLENTE:

M.I. NÉSTOR MARTÍNEZ ROMERO

2DO. SUPLENTE:

M.I. MAXIMINO MEZA MEZA

The image shows five handwritten signatures, each written over a horizontal line. From top to bottom, the signatures correspond to: 1. Ignacio Alonso Cardenas (President), 2. Juan Antonio Morales Díaz de Vivar (Vocal), 3. Jorge A. Mancilla Castillo (Secretary), 4. Néstor Martínez Romero (1st Suplente), and 5. Maximino Meza Meza (2nd Suplente). The signatures are in dark ink and vary in style, with some being more cursive and others more blocky.

AGRADECIMIENTOS

**A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la
Facultad de Ingeniería por permitirnos formarnos
como profesionistas.**

**Al Ing. Juan Antonio Morales Diaz de Vivar por
brindarnos su valioso tiempo y conocimientos.**

AGRADECIMIENTOS

Con gratitud y cariño a mis Padres:

*Fabián Bolaños García
Victoria Monter González*

*A mis hermanos: Lourdes, Elena, Rocío, Ángel,
Esperanza, Leticia, Armando, Mauricio, Carlos, Lupe.*

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres

*Pedro González Carrión y Alicia Martínez
Hernández por su apoyo y sacrificios para poder
lograr esta meta
Muchas Gracias
Los Quiero Mucho*

A mis hermanos

*Norma Alicia, Elizabeth y Pedro
por su apoyo y comprensión*

CEMENTACIÓN DE POZOS PETROLEROS

CONTENIDO

	PÁGINA
<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>CAPÍTULO 1</i>	
<i>ANTECEDENTES Y GENERALIDADES</i>	4
1.1 DATOS HISTÓRICOS	4
1.2 CEMENTACIÓN DE POZOS CONVENCIONALES	5
1.2.1 Cementación Primaria	5
1.2.2 Cementación de Tubería de Revestimiento Corta (Liner)	5
1.2.3 Cementación Forzada	8
1.2.4 Cementación de Tapones	10
1.2.5 Cementación Por Etapas	11
1.2.6 Cementación Múltiple de Tuberías de Producción	12
1.3 CEMENTACIÓN DE POZOS NO CONVENCIONALES	13
1.3.1 Cementación con Tubería Flexible (TF)	13
1.3.2 Cementación de Pozos Horizontales	14
1.3.3 Cementación de Pozos en Aguas Profundas	15
1.3.4 Cementación de Pozos de Diámetro Reducido (Slim Hole)	15
1.3.5 Cementación de Pozos Multilaterales	16
<i>CAPÍTULO 2</i>	
<i>TECNOLOGÍA DEL CEMENTO</i>	17
2.1 EL CEMENTO	17
2.1.1 Cemento Portland	17
2.1.2 Clasificación de los Cementos	18
2.1.3 Clasificación del API	19
2.2 CEMENTOS ESPECIALES	22
2.3 FABRICACIÓN Y COMPOSICIÓN DEL CEMENTO	27
2.4 PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS CUBIERTAS POR LAS ESPECIFICACIONES DEL API	30

2.5	PRUEBAS A LOS CEMENTOS	32
-----	------------------------	----

CAPÍTULO 3

	<i>DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO</i>	34
3.1	DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO	34
3.2	DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO	39
	3.2.1 Presión, Temperatura y Tiempo de Bombeabilidad	40
	3.2.2 Viscosidad y Contenido de Agua de las Lechadas de Cemento	41
	3.2.3 Tiempo de Espesamiento	42
	3.2.4 Resistencia del Cemento para Soportar la Tubería	43
	3.2.5 Resistencia a la Compresión	43
	3.2.6 Agua de Mezclado	44
	3.2.7 Densidad de la Lechada	44
	3.2.8 Pérdida de Circulación	45
	3.2.9 Calor de Hidratación	45
	3.2.10 Permeabilidad	46
	3.2.11 Ángulo de Desviación	47
	3.2.12 Control del Filtrado	47
	3.2.13 Migración de Gas	48
	3.2.14 Calidad del Mezclado	50
	3.2.15 Proceso de Desplazamiento	51
3.3	REOLOGÍA DE LA LECHADA DE CEMENTO	51
3.4	ADITIVOS	54
	3.4.1 Aceleradores	55
	3.4.2 Retardadores	56
	3.4.3 Densificantes	56
	3.4.4 Reductores de la Densidad	56
	3.4.5 Dispersantes (Reductores de Pérdida de Presión por Fricción)	57
	3.4.6 Aditivos para la Pérdida de Filtrado	58
	3.4.7 Controladores de la Viscosidad	58
	3.4.8 Agentes de Control de la Regresión de la Resistencia a la Compresión	59
	3.4.9 Aditivos Especiales	59
	3.4.10 Aditivos para Impedir la Pérdida de Circulación	60
	3.4.11 Baches Lavadores y Espaciadores	60

CAPÍTULO 4

<i>EQUIPO, HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS PARA LA CEMENTACIÓN</i>	63
4.1 CABEZA DE CEMENTACIÓN (Tapón Sencillo)	63
4.2 CABEZA DE CEMENTACIÓN (Doble Tapón)	64
4.3 CABEZA DE CIRCULACIÓN	64
4.4 TAPONES DE CEMENTACIÓN DE ALUMINIO	65
4.5 TAPONES DE CEMENTACIÓN (Superior e Inferior)	65
4.6 TAPONES DE CEMENTACIÓN DE MADERA	66
4.7 SEGURO DE FONDO Y DEFLECTOR	67
4.8 EQUIPO DE FLOTACIÓN	68
4.9 COPLE DE CEMENTACIÓN MULTITETAPAS	74
4.10 EQUIPO DE INSERCIÓN	75
4.11 UNIDAD GIRATORIA DE LA TR	76
4.12 SISTEMA DE MEZCLADO TIPO JET	77
4.13 UNIDAD CEMENTADORA DE ALTA PRESIÓN	77
4.14 RASPADORES O LIMPIADORES DE PARED	79
4.15 CENTRADORES	80
4.16 DENSÍMETRO	81
4.17 CANASTA DE CEMENTACIÓN	81
4.18 TUBERÍA FLEXIBLE (COILED TUBING)	82

CAPÍTULO 5

<i>PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS</i>	85
5.1 CEMENTACIÓN PRIMARIA	85
5.2 CEMENTACIÓN FORZADA	87
5.3 CEMENTACIÓN DE UNA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA (LINER)	89
5.4 CEMENTACIÓN DE TAPONES	90
5.5 CEMENTACIÓN DE TR'S CORTAS EN AGUJERO REDUCIDO	93
5.6 CEMENTACIÓN FORZADA CON TUBERÍA FLEXIBLE	95
5.7 CEMENTACIÓN POR ETAPAS	97
5.8 CEMENTACIÓN DE POZOS HORIZONTALES	98
5.9 CEMENTACIÓN DE POZOS MULTILATERALES	104
5.10 CEMENTACIÓN DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO	105
5.11 CEMENTACIÓN DE POZOS EN AGUAS PROFUNDAS	106
5.12 EJEMPLOS DE CÁLCULO	109

CAPÍTULO 6

<i>EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA CEMENTACIÓN</i>	120
6.1 INTRODUCCIÓN	120
6.2 HERRAMIENTAS CBL-VDL	121
6.2.1 Anomalías del Registro CBL	125
6.2.2 Control de Calidad del CBL	129
6.3 HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE CEMENTO CET	129
6.3.1 Interpretación	133
6.3.2 Curvas del Registro CET	134

6.4	REGISTRO DE TEMPERATURA	137
6.4.1	Cimas de Cemento	138
6.4.2	Anomalías	139
6.5	TRAZADORES RADIACTIVOS	140
6.6	REGISTRO ULTRASONIC IMAGER (USI)	142
6.7	HERRAMIENTA DE ATENUACIÓN DE VELOCIDAD	144
6.8	HERRAMIENTAS DE ECO-PULSO	144
6.9	HERRAMIENTAS (SBT y MICRO CBL)	144
6.10	FUTUROS DESARROLLOS	147
<i>CAPÍTULO 7</i>		
<i>ANÁLISIS DE COSTOS DE CEMENTACIONES</i>		148
7.1	INTRODUCCIÓN	148
7.2	COSTOS DE UN POZO PETROLERO	149
7.3	COMPARACIÓN DE COSTOS DE UNA CEMENTACIÓN DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA	155
<i>CAPÍTULO 8</i>		
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>		157
8.1	CONCLUSIONES	157
8.2	RECOMENDACIONES	166
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>		169
<i>ANEXOS</i>		172

LISTA DE FIGURAS

<i>Nº DE FIGURA</i>	<i>PÁGINA</i>
1.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA CEMENTACIÓN	6
1.2 CEMENTACIÓN DE LINER	7
1.3 CEMENTACIÓN FORZADA	9
1.4 TAPÓN DE CEMENTO	11
2.1 RELACIÓN ENTRE LA PROFUNDIDAD DEL POZO Y EL TIEMPO DE CEMENTACIÓN	21
2.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO	28
4.1 CABEZA DE CEMENTACIÓN	63
4.2 CABEZA DE CIRCULACIÓN	64
4.3 TAPONES DE CEMENTACIÓN DE ALUMINIO	65
4.4 TAPÓN DE CEMENTACIÓN	66
4.5 TAPÓN DE CEMENTACIÓN DE MADERA	67
4.6 SEGUROS DE FONDO Y DEFLECTOR	67
4.7 NARIZ FLOTADORA	68
4.8 ZAPATA GUÍA Y NARIZ GUÍA	69
4.9 ZAPATAS DE CEMENTACIÓN TIPO A Y B	70
4.10 PLATO-DEFLECTOR	71
4.11 COPLE FLOTADOR DE BOLA	71
4.12 ZAPATA FLOTADORA TIPO CHARNELA	72
4.13 COPLE FLOTADOR TIPO CHARNELA	73
4.14 ZAPATA FLOTADORA DE LLENADO AUTOMÁTICO	73

4.15	COPLE FLOTADOR DE LLENADO AUTOMÁTICO	74
4.16	COPLE DE CEMENTACIÓN MULTITAPAS	75
4.17	EQUIPO DE INSERCIÓN	76
4.18	UNIÓN GIRATORIA	76
4.19	SISTEMA DE MEZCLADO TIPO JET	77
4.20	UNIDAD CEMENTADORA DE ALTA PRESIÓN	78
4.21	RASPADORES O LIMPIADORES DE PARED	79
4.22	CENTRADOR	80
4.23	CANASTA DE CEMENTACIÓN	82
4.24	UNIDAD DE TUBERÍA FLEXIBLE	83
5.1	CEMENTACIÓN PRIMARIA	87
5.2	CEMENTACIÓN DE UNA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA (LINER)	90
5.3	TAPÓN POR COLUMNAS BALANCEADAS	91
5.4	CUBETA DE VACIADO	92
5.5	CLASIFICACIÓN DE POZOS HORIZONTALES	99
5.6	PERFIL DE UN POZO DE ALCANCE EXTENDIDO	100
5.7	POZO HORIZONTAL CEMENTADO Y TERMINADO	102
5.8	POZO MULTILATERAL	105
6.1	HERRAMIENTA CBL-VDL	122
6.2	ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE MEDICIÓN	123
6.3	EFFECTO DE EXCENTRACIÓN DE LA HERRAMIENTA SOBRE LA MEDICIÓN DE AMPLITUD	123
6.4	RESPUESTA DEL REGISTRO CBL-VDL	124

6.5 LONGITUD MÍNIMA DE INTERVALOS PARA FORMAR UN SELLO	125
6.6 EFECTO DE ADHERENCIA NO UNIFORME	127
6.7 CONFIGURACIÓN DE CANALES	128
6.8 PRINCIPIO DE MEDICIÓN DE LA HERRAMIENTA CET	130
6.9 HERRAMIENTA CET	131
6.10 REGISTRO CET	135
6.11 PERFIL TÍPICO DE TEMPERATURAS	139
6.12 RESPUESTA TÍPICA DE UN TRAZADOR RADIACTIVO	141
6.13 HERRAMIENTA USI	143
6.14 REGISTRO DE ATENUACIÓN DE VELOCIDAD	145
6.15 RESPUESTA DE LA HERRAMIENTA DE ECO-PULSO	146
6.16 RESPUESTA DE LA HERRAMIENTA SBT	147
7.1 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE UN POZO PETROLERO	148
7.2 COSTOS DE UN POZO PETROLERO	151

LISTA DE TABLAS

<i>Nº DE TABLA</i>	<i>PÁGINA</i>
2.1 REQUERIMIENTOS QUÍMICOS DEL CEMENTO	31
2.2 REQUERIMIENTOS FÍSICOS DEL CEMENTO	32
3.1 PORCENTAJE DE AGUA PARA MEZCLADO Y RENDIMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO	37
3.2 CALCULO DE VOLÚMENES DE CEMENTO Y AGUA	37
3.3 CALCULO DE VOLÚMENES DE CEMENTO, AGUA Y ADITIVOS	38
3.4 DETERMINACIÓN DEL PESO DE HEMATITA PARA UN CEMENTO CLASE G	39
3.5 RELACIÓN ENTRE EL GASTO DE PÉRDIDA DE FILTRADO Y SU INTERPRETACIÓN	48
7.1 COSTOS EN PORCENTAJES DE UN POZO PETROLERO	150
7.2 COSTOS DE OPERACIÓN DE UNA CEMENTACIÓN DE UNA TR	153
7.3 PROBLEMAS TÍPICOS Y GASTOS ASOCIADOS CON LA CEMENTACIÓN DE UNA TR SUPERFICIAL	154
7.4 COSTOS RELATIVOS A LOS TRABAJOS CORRECTIVOS COMPARADOS CON LOS COSTOS DE TRABAJO DE CEMENTACIÓN ORIGINAL	155
7.5 CEMENTACIÓN DE TR CORTA CONVENCIONAL	156
7.6 CEMENTACIÓN DE TR CORTA OPTIMIZADA	156

INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es el de mostrar un estudio teórico de las variables utilizadas en el diseño y operación de la tecnología de cementaciones de pozos petroleros, así como el de realizar un análisis sobre las cementaciones convencionales y no convencionales, proporcionando los aspectos más relevantes para lograr el éxito de la operación, basados en información reciente y considerando los diferentes parámetros involucrados en el diseño de lechadas de cemento, ya que forma parte de todo un proceso integral, presentado con mayor amplitud y detalle.

Al igual que en todas las áreas de la industria petrolera, la cementación de pozos petroleros requiere de continuos desarrollos técnicos y operativos, ya que las condiciones de explotación cambian con la accesibilidad de los yacimientos, aunado a mayores profundidades de los pozos.

Una de las actividades fundamentales en el desarrollo y construcción de un pozo petrolero es la cementación de tuberías de revestimiento, ya que es una de las tareas más importantes y difíciles, tanto económica, como operativamente.

La tecnología de la cementación es una fusión de varias disciplinas científicas y de ingeniería, incluyendo éstas a la química, geológica, física, petrolera, mecánica y eléctrica, así como de algunas otras más. Los presentes adelantos técnicos y operativos, se han alcanzado gracias a la aplicación de ingeniería de grupos interdisciplinarios. Permitiendo examinar los avances tecnológicos y prácticas de cementación en el mundo, ya que éstas han cambiado debido al desarrollo de diferentes clases de pozos, generando nuevos retos para el Ingeniero Petrolero.

En la industria petrolera existe una gran necesidad de acelerar el aprendizaje de las técnicas y normatividades empleadas en la cementación de pozos petroleros, ampliando así, la experiencia y el estar en disponibilidad de efectuar la supervisión y evaluación de las mismas. Requiriéndose para esto de personal capacitado, equipo y material adecuado para cumplir todas sus metas.

Sin embargo, aún se hacen diseños de colocación deficiente, debidos quizá a una mala aplicación de técnicas, falta de experiencia o al factor humano, siempre presente.

Por lo cual se requieren de más estudios e investigaciones tomando en cuenta todas las variables que se presentan antes, durante y después de la operación de cementación.

El presente trabajo está integrado por ocho capítulos. El Capítulo 1 comienza con una serie de antecedentes y generalidades sobre la cementación de pozos petroleros en el que se mencionan las principales características para realizar:

- Cementación Primaria
- Cementación de TR Corta (Liner)
- Cementación Forzada
- Cementación de Tapones
- Cementación por Etapas
- Cementación Múltiple de Tuberías de Producción
- Cementación con Tubería Flexible
- Cementación de Pozos Horizontales
- Cementación de Pozos en Aguas Profundas
- Cementación de Pozos de Diámetro Reducido
- Cementación de Pozos Multilaterales

Del mismo modo, en el Capítulo 2 se tratan los aspectos más importantes del cemento Portland como son: composición, clasificación, fabricación, propiedades y características, así como de algunos cementos especiales.

Por otro lado, en el Capítulo 3 se definen los factores principales para realizar un diseño de la lechada de cemento, ya que a la fecha no existe integrado un material que proporcione la suficiente información; lo que toma su importancia y funcionalidad en el sentido de que si esta parte no ha sido planeada correctamente, repercutirá en una mayor inversión y pérdida de tiempo.

Posteriormente, en el Capítulo 4 se muestran los equipos, herramientas y accesorios que se utilizan en la cementación, como son: cabezas, tapones, coples, canasta, equipo de flotación, raspadores o limpiadores de pared, unidad cementadora de alta presión y tubería flexible. Siendo éstos más flexibles en su aplicación y más confiables en su operación.

En el Capítulo 5 se describen algunos de los conceptos básicos de los procesos operativos para llevar a cabo cementaciones convencionales y no convencionales,

descritas en el Capítulo 1, ya que hay una mayor gama de instalaciones, tanto en tierra como en el mar, determinando los principales aspectos de cada uno.

En el Capítulo 6 se presentan algunas de las nuevas técnicas disponibles, así como de las ya existentes, que permitirán una mejor evaluación de la calidad de las cementaciones realizadas.

Además, en el Capítulo 7 se hace un breve análisis sobre los costos de una cementación, considerando todos los costos de construcción de un pozo petrolero.

Finalmente, en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones y recomendaciones, las cuales constituyen las ideas principales del presente documento.

La intención con la que se ha preparado este trabajo y la secuencia que tiene el mismo, es para su mejor comprensión y manejo. Sirviendo esto, para marcar un precedente más, proporcionando una fuente de consulta y un apoyo para futuros desarrollos e investigaciones que se realicen en nuestro país o en otras partes del mundo.

1.1 DATOS HISTÓRICOS

En 1824 Joseph Aspdin, investigador inglés, desarrolló un tipo básico de material cementante, producido por el calentamiento de una mezcla de caliza y arcilla, moliendo el producto resultante hasta convertirlo en un polvo fino. Este tipo de cemento, es el conocido como "Cemento Portland", debido a la similitud que presenta este material después de hidratado, con ciertas canteras de caliza de la isla de Portland, Inglaterra.

La primera fábrica de cemento Portland fue establecida en Inglaterra por James Frost en 1825. Las primeras plantas que se establecieron fuera de Inglaterra se hicieron en Bélgica y Alemania en 1855. En Estados Unidos de América se fabricó cemento Portland hasta 1875 y en México a principios del siglo XX (1906).

En la industria petrolera de los E.E.U.U., la primera perforación fue en el pozo Drake en 1859; sin embargo, no fue hasta 1903 cuando fue usada una lechada de cemento para cerrar un pozo de agua, justo arriba de una arena que contenía aceite en el campo Lompac en California. Frank F. Hill, fue quien desarrolló la lechada la cual consistía de 50 sacos de cemento Portland. Después de 28 días el cemento fue perforado y terminado en arenas con aceite. La zona de agua fue aislada efectivamente. Esto se convirtió en una práctica aceptada y pronto se extendió para otros campos de California en donde se encontraron dificultades similares.

El vaciado y técnicas de entubamiento fue reemplazado por el método de cementación de dos tapones, introducido en campos de California donde se encontraron dificultades similares. Esto fue desarrollado por el método de Perkins. De esto nació un moderno proceso de cementación de pozos de aceite.

Al principio los tapones y escariadores fueron de hierro fundido y un recipiente con una banda de discos. Esto funcionaba como limpiadores de lodo en la TR.

Los servicios de la compañía Perkins no fueron aprovechables fuera del área de California. Así, en otra parte el proceso de cementación tuvo diferentes principios. En Oklahoma fue introducido por Erle P. Halliburton en 1920 en el campo Hewitt, condado Carter.

1.2 CEMENTACIÓN DE POZOS CONVENCIONALES

1.2.1 Cementación Primaria

La cementación primaria es el proceso de mezclar cemento con agua formando una lechada, misma que será bombeada a través de la tubería de revestimiento y depositada en el espacio anular formado por la tubería y la pared del agujero. Como se muestra en la Figura 1.1.

Las funciones principales de la cementación primaria, son:

- Controlar el movimiento de fluidos; gas, aceite o agua de tal manera que no ocasionen problemas durante la perforación y terminación del pozo.
- Proporcionar soporte a la tubería por medio de la adherencia de éstas y el agujero.
- Proteger la tubería de revestimiento de la corrosión.
- Proporcionar una base firme para el soporte del equipo de seguridad en la superficie.
- Sellar o aislar zonas de pérdida de circulación.
- Aislar zonas de presiones anormales.

1.2.2 Cementación de Tubería de Revestimiento Corta (Liner)

Las operaciones de cementación de tuberías de revestimiento cortas (liner) se evalúan en función del sello hidráulico obtenido tanto en la cima (boca de TR corta) como de la base de la misma (zapata), por lo que esta última operación se dificulta aún más y debe tenerse especial atención en su programación y ejecución.

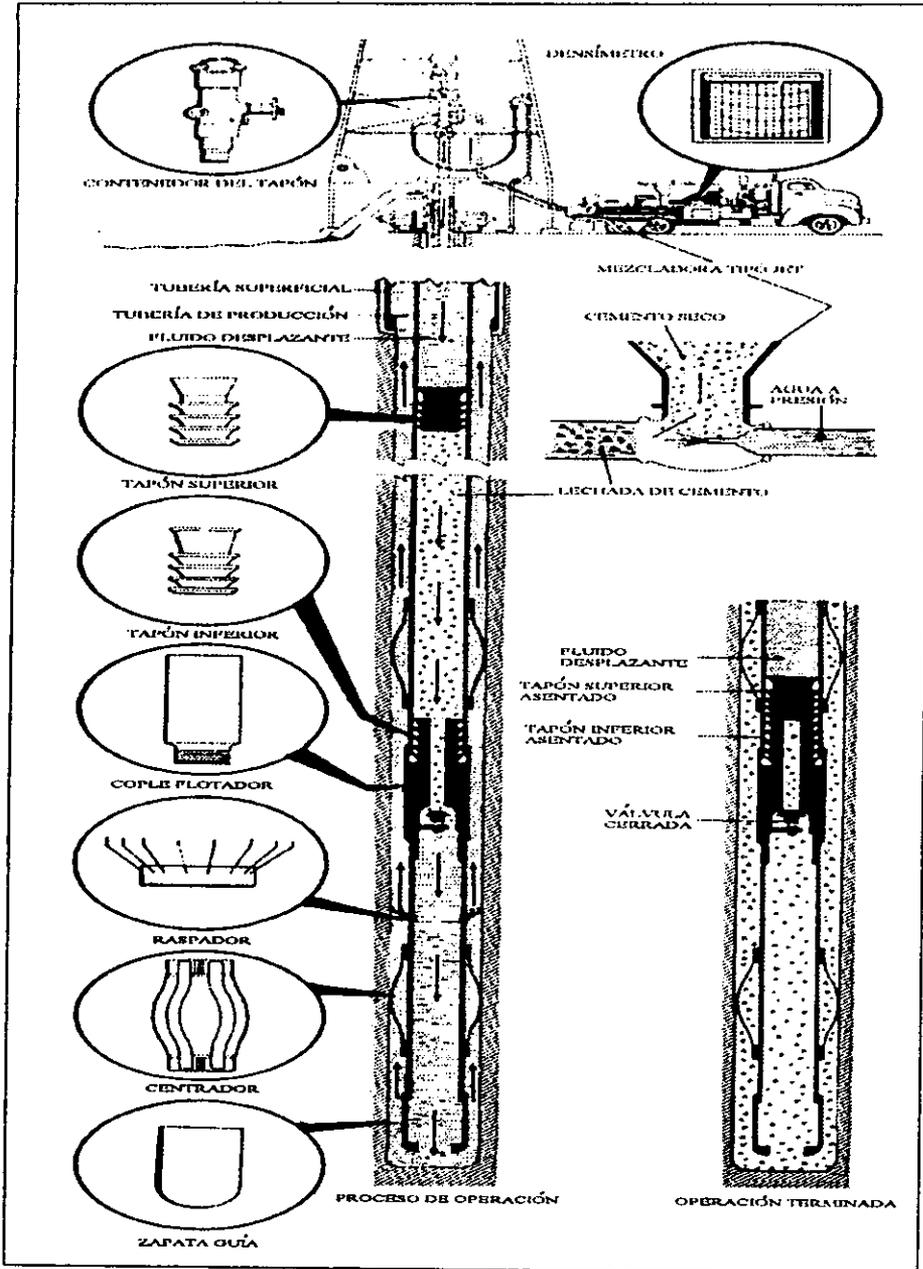


FIGURA 1.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA CEMENTACIÓN

Las tuberías de revestimiento cortas pueden ser de dos tipos: las que se cementan antes de la última etapa de perforación (TR corta de perforación) para aislar las zonas de presión anormal, zonas de pérdida de circulación o bien formaciones plásticas, las cuales se extienden generalmente hasta la superficie para posteriormente continuar perforando y aquéllas que se cementan en la última etapa de perforación (TR corta de explotación) para aislar formaciones productoras de hidrocarburos, para su correcta explotación. La cementación de liner se muestra en la Figura 1.2.

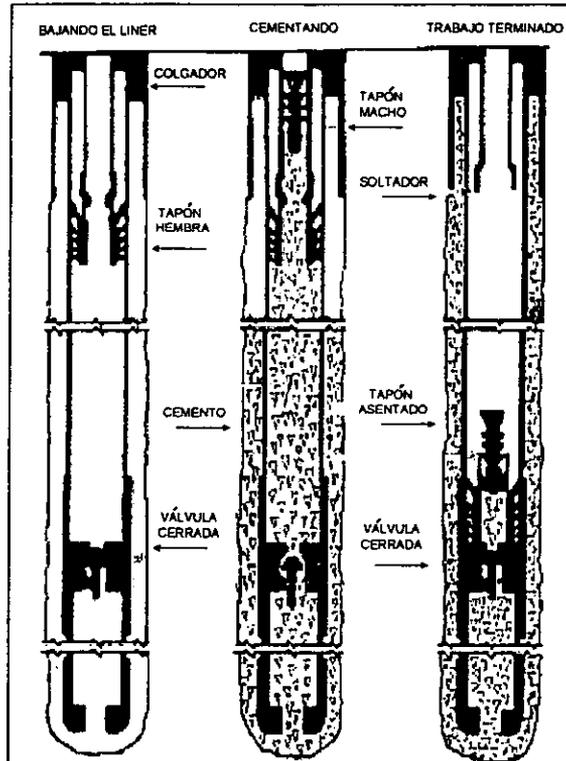


FIGURA 1.2 CEMENTACIÓN DE LINER

Son diversas las causas que obligan a cementar una tubería corta, entre las más comunes se tienen:

- por problemas en la perforación del pozo (pérdidas de lodo, intentos de pegaduras, etc.).
- por altas presiones al continuar perforando y como consecuencia, tener que incrementar la densidad del fluido de control.
- por capacidad del equipo de perforación para llegar al objetivo con menor diámetro de la barrena.

1.2.3 Cementación Forzada

Esta cementación es una operación donde la lechada de cemento es forzada a entrar con presión a un punto específico en el pozo con el propósito de corregir una mala cementación. El objetivo es el de taponar todos los disparos, o los canales detrás de la TR con cemento para obtener un sello entre ésta y la formación, como se observa en la Figura 1.3.

Para conseguir este objetivo se requiere relativamente poco volumen de cemento, pero el éste tiene que ser colocado en el punto exacto del pozo.

Las aplicaciones principales, son:

- Sellar los disparos no deseados o cambiar el intervalo productor.
- Taponar con cemento las canalizaciones para excluir el agua o gas de una zona de aceite.
- Reparar una TR dañada.
- Corregir el trabajo de una cementación primaria defectuosa.

Un punto importante en la cementación forzada es la solución de problemas de comunicación en el espacio anular entre la TR y el agujero. Pero no se puede resolver un problema de comunicación vertical dentro de la formación.

Generalmente son reconocidas dos técnicas para efectuar cementaciones forzadas.

- La técnica de presión alta implica fracturar la formación y bombear la lechada de cemento en la fractura hasta llegar a una presión en superficie y mantenerla. Normalmente se utiliza cemento puro (ya que hay mucha pérdida de fluido).
- En la técnica de presión baja, se coloca la lechada de cemento en los intervalos perforados y se aplica una presión suficiente para formar un enjarre. El cemento deshidratado es colocado en los disparos y en los canales o fracturas.

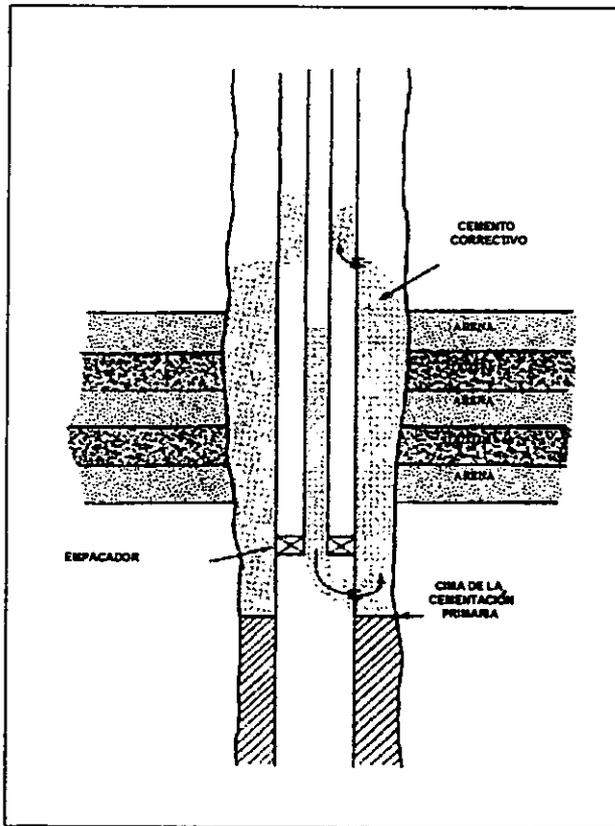


FIGURA 1.3 CEMENTACIÓN FORZADA

1.2.4 Cementación de Tapones

Los tapones de cemento pueden ser colocados en agujero abierto o bien, en TR. Los tapones son usados para prevenir la comunicación entre fluidos, o en la parte baja o superior de un pozo para ser abandonado. Los tapones también se utilizan para proveer un asiento para las herramientas de perforación direccional para desviar el pozo.

Los tapones de cemento son colocados usando tubería de perforación. Cuando un tapón se coloca en el fondo de un agujero descubierto, se usa un registro de calibración para localizar la parte no calibrada del pozo. Los centradores y raspadores son puestos en la parte baja de la tubería. El cemento se bombea a través de la tubería de perforación dentro del agujero. En la Figura 1.4 se muestra el método de columnas equilibradas.

Los tapones de cemento se colocan por varias razones, como son:

- Abandono.
- Desviación.
- Control de Pérdida de Circulación.
- Trabajo de remedio.

Se ha determinado que un tapón de cemento requiere del mismo grado de planeación que en el trabajo de una cementación primaria. Se debe tener una consideración especial para la estabilidad del tapón. Es muy importante que haya una comunicación entre el equipo de operación y la compañía de servicio para la evaluación de los problemas y el mecanismo de cementación de tapones.

Los factores de mayor importancia en un buen trabajo de cementación de tapones, son:

- Tiempo de Colocación
- Temperatura
- Hidráulica
- Densidad de la Lechada
- Presión
- Profundidad

- Litología
- Volumen a ser Bombeado

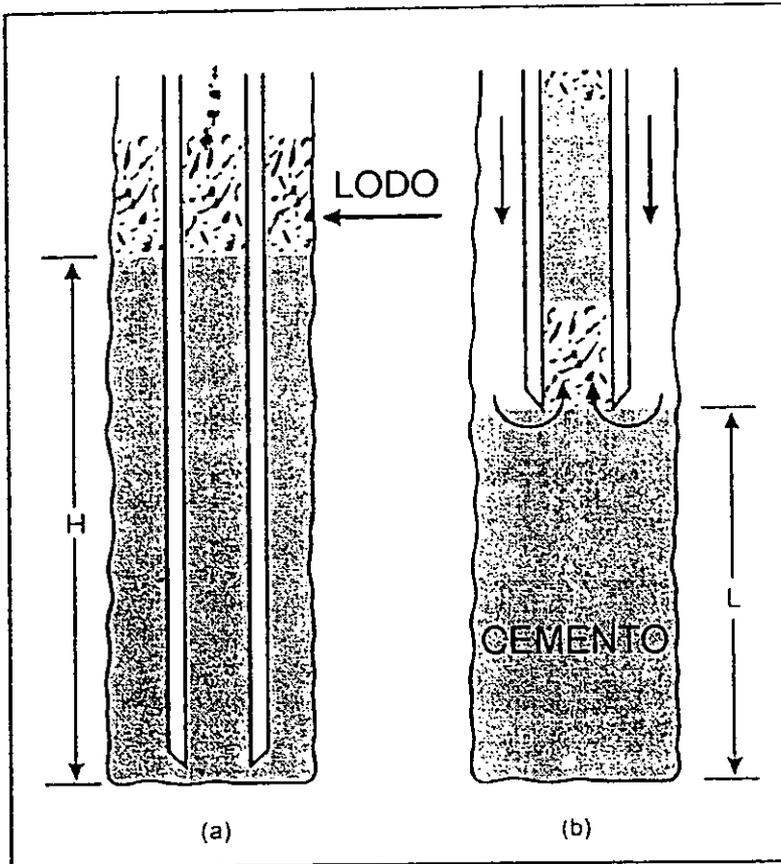


FIGURA 1.4 TAPÓN DE CEMENTO

1.2.5 Cementación Por Etapas

La cementación por etapas se efectúa en pozos donde se desea cubrir con cemento una gran longitud del espacio anular o donde se tienen zonas de interés con separaciones muy marcadas o con problemas de pérdidas en zonas débiles donde no se puede soportar una columna pesada.

La finalidad de la cementación por etapas, es:

- Colocar grandes columnas de cemento.
- Aminorar la presión sobre el pozo descubierto al reducir la columna.
- Dividir columnas de gran diámetro para mejorar la cementación.
- Colocar cemento sólo en el lugar deseado, sin hacer una columna continua de cemento.
- Cementar encima de zonas de pérdida de circulación.

1.2.6 Cementación Múltiple de Tuberías de Producción

La finalidad de la cementación múltiple de tuberías de producción, es:

- Cementando varias tuberías de producción se elimina la necesidad de terminaciones complejas con empacadores y equipos para zonas múltiples.
- El trabajo de mantenimiento puede ser llevado a cabo en una tubería sin cerrar las otras.
- Se simplifica el control de las zonas productoras durante los trabajos de reparación, porque de esta manera si en el pozo hay zonas de alta y baja presión, sólo se trabaja en una, sin el problema de las otras.

Características:

- Puede tener de dos a siete tuberías.
- Las más usadas son de $2 \frac{7}{8}$ pg, pero pueden ser de $3 \frac{1}{2}$ y $4 \frac{1}{2}$ pg o combinadas.
- El cemento puede bombearse a través de una tubería (la más profunda o de varias al mismo tiempo).

1.3 CEMENTACIÓN DE POZOS NO CONVENCIONALES

1.3.1 Cementación con Tubería Flexible (TF)

Los esfuerzos iniciales que se realizaron para la aplicación de la tecnología de tubería flexible en pozos petroleros, además del desarrollo de nuevos métodos y técnicas de cementación se efectuaron en Prudhoe Bay, Alaska, México y en el Mar del Norte. Debido a los beneficios que se tuvieron con estos trabajos, comparados con las operaciones con equipo convencional, las compañías de servicio se han dedicado desde entonces a desarrollar y promover su uso.

Aunque inicialmente la TF se utilizó como apoyo para los equipos convencionales, ahora su utilización es tan variada que por sí misma se aplica en operaciones de disparos, estimulación y pruebas de producción.

La tecnología de tubería flexible ha tenido una de sus mayores aplicaciones en operaciones de cementación forzada (la cual requiere tubería de diámetro reducido), colocar tapones y recementaciones. Se utilizó originalmente como una alternativa en los trabajos de terminación con equipo convencional debido a su fácil manejo, movilidad y a sus bajos costos de operación. Los procedimientos de trabajo con TF se han refinado y perfeccionado de tal forma que al evaluar los costos de operación se determinó que en general son alrededor de 25% menores a los erogados con equipo convencional.

El desarrollo de esta tecnología involucra tanto a los procedimientos de trabajo como a las herramientas utilizadas y a los materiales requeridos para la operación. Se han diseñado dispositivos de fondo especiales para favorecer una correcta distribución del cemento inyectado, además de una gran variedad de cementos que se adecuen a las condiciones de los pozos.

Muchas operaciones de cementación han sido diseñadas para aislar zonas de agua o gas, modificar los perfiles de inyección y de producción, arreglando imperfecciones en los trabajos de cementación realizados anteriormente y se aplica exitosamente a una gran variedad de condiciones de pozos y a temperaturas que pueden llegar a -7°C (-45°F).

Los trabajos de cementación utilizando TF fueron desarrollados inicialmente en Prudhoe Bay, Alaska (1983) y se han refinado al paso de los años en muchas áreas petroleras alrededor del mundo.

La utilización de la TF en operaciones de cementación forzada se utilizó primeramente en el norte de Alaska en 1983. Su éxito se debió a la movilidad, rapidez y economía, ya que el pozo estaba situado en una zona con duras condiciones climatológicas. El campo Prudhoe Bay se localiza en la zona ártica de Alaska.

Los trabajos utilizando la sarta flexible se han incrementado en todas las operaciones, cotidianas en Prudhoe Bay. El desarrollo y refinación de estas operaciones, han traído como resultado el perfeccionamiento de los procedimientos de cementación forzada mejorando su eficiencia, confiabilidad, reduciendo los costos efectivos y las rutinas de trabajo. Las ventajas de que gozan las operaciones de cementación con TF, incluyen:

- Incremento en la seguridad y eficiencia de las operaciones.
- El cemento puede ser mezclado con un sistema de bio-polímeros y circulado a través de la TF.
- El cemento puede ser circulado con seguridad, de forma inversa, a través de la tubería flexible.
- La cementación forzada puede ser terminada en 12 horas o menos. Una operación completa que incluye la cementación, pruebas y disparos puede ser realizada en tres días.

1.3.2 Cementación de Pozos Horizontales

Una de las finalidades de cementar pozos horizontales es la de evitar la inestabilidad mecánica y fisicoquímica del pozo, además de aislar zonas para que no haya comunicación de fluidos.

En pozos horizontales, uno de los problemas que afectan la cementación es la depositación de los recortes del lodo de perforación en la parte baja del pozo.

Esto se puede evitar haciendo un buen diseño del lodo, específicamente en el punto de cedencia. La depositación de sólidos evita el desplazamiento y frustra el propósito de la cementación que es el de rodear completamente la TR con una envoltura de cemento y afianzarla a la formación. Otro aspecto muy

importante también es el centrar la TR, ya que mejora el desplazamiento del lodo.

Para lograr una buena cementación es muy importante colocar uniformemente la lechada de cemento en el espacio anular y que en el diseño de la lechada de cemento haya cero de agua libre y que no haya asentamiento de partículas.

Dentro de los pozos horizontales existen las variantes de pozos de alcance extendido y pozos multilaterales.

1.3.3 Cementación de Pozos en Aguas Profundas

En los primeros pozos perforados desde una unidad flotante, se utilizó el mismo equipo de los pozos convencionales terrestres. Ahora ya no se utiliza, a menos que en una etapa de la cementación sea requerido. La cabeza de cementación marina es más ligera que la de tierra, lo que facilita su manejo.

La exploración para la producción de hidrocarburos se ha extendido hasta las perforaciones costa fuera en aguas profundas superiores a 600 pies y algunas veces arriba de 6,000 pies. Bajo estas condiciones, se encuentran durante las cementaciones formaciones débiles o no consolidadas, en donde las temperaturas son bajas y saturadas con agua salada. La densidad y el gasto de flujo de la lechada de cemento deberá ser tal que no sobrepase el gradiente de fractura. Sin embargo, la lechada se deberá desplazar cuidadosamente proporcionando así un buen aislamiento de la zona. Considerando las bajas temperaturas que se encuentran, la lechada de cemento debe desarrollar suficiente esfuerzo gel para resistir la migración de fluidos.

El diseño de la lechada de cemento debe ser especial, ya que se tienen temperaturas extremas, primero muy frías en el fondo del mar y después se eleva la temperatura con la profundidad.

1.3.4 Cementación de Pozos de Diámetro Reducido (Slim-Hole)

En los pozos que se perforan con diámetro reducido (slim-hole), las cementaciones primarias de tuberías de revestimiento, presentan una mayor dificultad, debido a que los espacios anulares se reducen considerablemente, provocando con esto que la presión y el gasto, deban ser controlados de manera más precisa.

La tecnología actual para perforar pozos a mayores profundidades requiere en ocasiones utilizar la técnica de agujeros de diámetro reducido y de esta manera lograr una reducción en el costo del pozo.

Pueden presentarse varios casos en los que se tenga que emplear este tipo de perforación, como pueden ser: la profundización de pozos cuya producción haya decaído por debajo de los límites económicos, teniéndose que perforar hacia objetivos más profundos, siempre y cuando, el estado mecánico de dichos pozos lo permita; o bien, de perforar pozos nuevos con un diseño especial en que se maneja TR de menor diámetro a las comúnmente utilizadas (diámetros menores de 4 ½ pg.).

Los problemas que pueden presentarse durante las operaciones de cementación primaria de TR en agujero de diámetro reducido, son entre otros: remoción deficiente del lodo, canalización del cemento en el espacio anular, migración de gas, fraguado excesivamente retardado del cemento, pérdidas de circulación totales o parciales. A nivel nacional, estos problemas representan la mayoría de las fallas en este tipo de cementaciones.

1.3.5 Cementación de Pozos Multilaterales

Los pozos multilaterales son una variante de pozos horizontales, pero éstos, tienen mejoras en cuanto a los otros, ya que usan más de una sección horizontal para producir y drenar un área mayor. Las ventajas de los multilaterales es que son más distantes horizontalmente y su capacidad de producir en una área mayor con un solo pozo. El sistema de pozos multilaterales tiene los siguientes beneficios:

- Mejora el drene del yacimiento
- Mejora la utilización de plataformas en la superficie
- Reduce el impacto ambiental
- Está disponible para nuevos pozos y los ya existentes
- Incrementa la economía del campo
- Ayuda a maximizar la exposición del yacimiento con un mínimo de pozos
- Reduce los costos por barril de producción
- Incrementa la cantidad de las reservas recuperables

2.1 EL CEMENTO

El cemento es una mezcla compleja de caliza, sílice y arcilla molida y calcinada, que al entrar en contacto con el agua forma un cuerpo sólido. Esta mezcla de ingredientes se muele, 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, que se le agrega como paso final.

2.1.1 Cemento Portland

Las lechadas de cemento bombeadas dentro de pozos petroleros incluyen cemento, aditivos especiales y agua. El cemento Portland es el que más comúnmente se usa. Los aditivos son usados para controlar ciertas características tales como tiempo de espesamiento, densidad y resistencia a la compresión. El agua es un agente importante en la cementación; la calidad depende del volumen de agua y cemento, entre otros. Las muestras de agua y cemento deben ser probadas antes de hacerse cualquier trabajo.

El cemento Portland es fabricado por calcinación de piedra caliza, arcilla y sílice. Se mezclan y se ponen en un horno a una temperatura de 1,100-1,500 °C, de donde se obtiene un material esférico (0.25 a 4 cm de diámetro), que recibe el nombre de "clinker"; se enfría y se le agrega un porcentaje de yeso para formar el cemento Portland. A este material se le agregan otros componentes tales como bauxita y óxido de hierro, para ajustar la composición química del clinker para los tipos diferentes de cemento Portland.

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 petroleros.

Algunos cementos Portland son de fabricación especial, ya que las condiciones de los pozos difieren significativamente en cuanto a las condiciones ambientales, durante las operaciones de perforación.

Por otro lado, el cemento Portland es el ejemplo más común de un cemento hidráulico; fragua y desarrolla resistencia a la compresión como resultado de la deshidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento.

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

El cemento fraguado también tiene baja permeabilidad y es insoluble en agua, de tal forma que expuesto a ésta no se destruye su dureza.

2.1.2 Clasificación de los Cementos

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, AASHO (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.

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.

La norma de calidad que rige el cemento Portland en la República Mexicana es la Norma Oficial Mexicana NOM-C-1-1980.

2.1.3 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.

A continuación la Figura 2.1 muestra la relación entre las profundidades y tiempos de cementación a que se deben usar las diferentes clases de cementos, recomendada por el API.

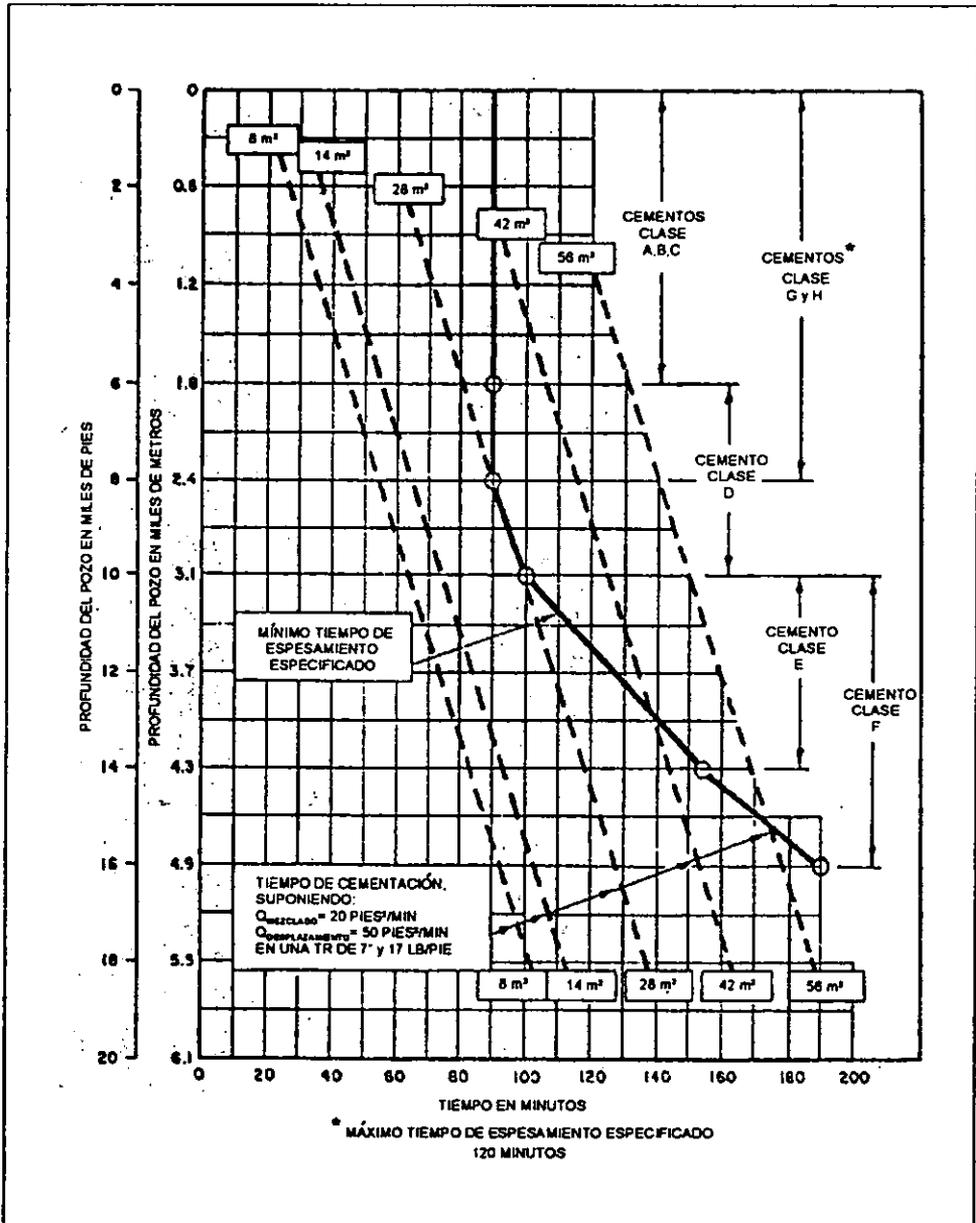


FIGURA 2.1 RELACIÓN ENTRE LA PROFUNDIDAD DEL POZO Y EL TIEMPO DE CEMENTACIÓN

2.2 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

Cementos de Yeso

Estos cementos son usados para trabajos de recementación. Normalmente se obtienen con un tipo de yeso hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4 2\text{H}_2\text{O}$), 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, ó 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.

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 ó 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.

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.

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, ó 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.

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.

Cementos Espumosos

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.

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.

Cementos Tixotrópicos

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. Sirve para meterlo en una fractura, 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 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.

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.

Cementos Expansivos

El cemento expansivo es aquel, que al adicionarle sulfato de calcio y otras sustancias, aumenta ligeramente de 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. Actualmente se manejan 3 tipos comerciales de cementos expansivos, los cuales son:

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, para producir fuerzas expansivas.

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.

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.

Cementos Fibrosos

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

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.

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 μm , mientras que en los cementos convencionales pueden tener un tamaño que varía de 50 a 100 μm . 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.

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.

2.3 FABRICACIÓN Y COMPOSICIÓN DEL CEMENTO

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

Los materiales secos se muelen y mezclan vigorosamente en las proporciones requeridas por cualquiera de los dos procesos, seco y mojado.

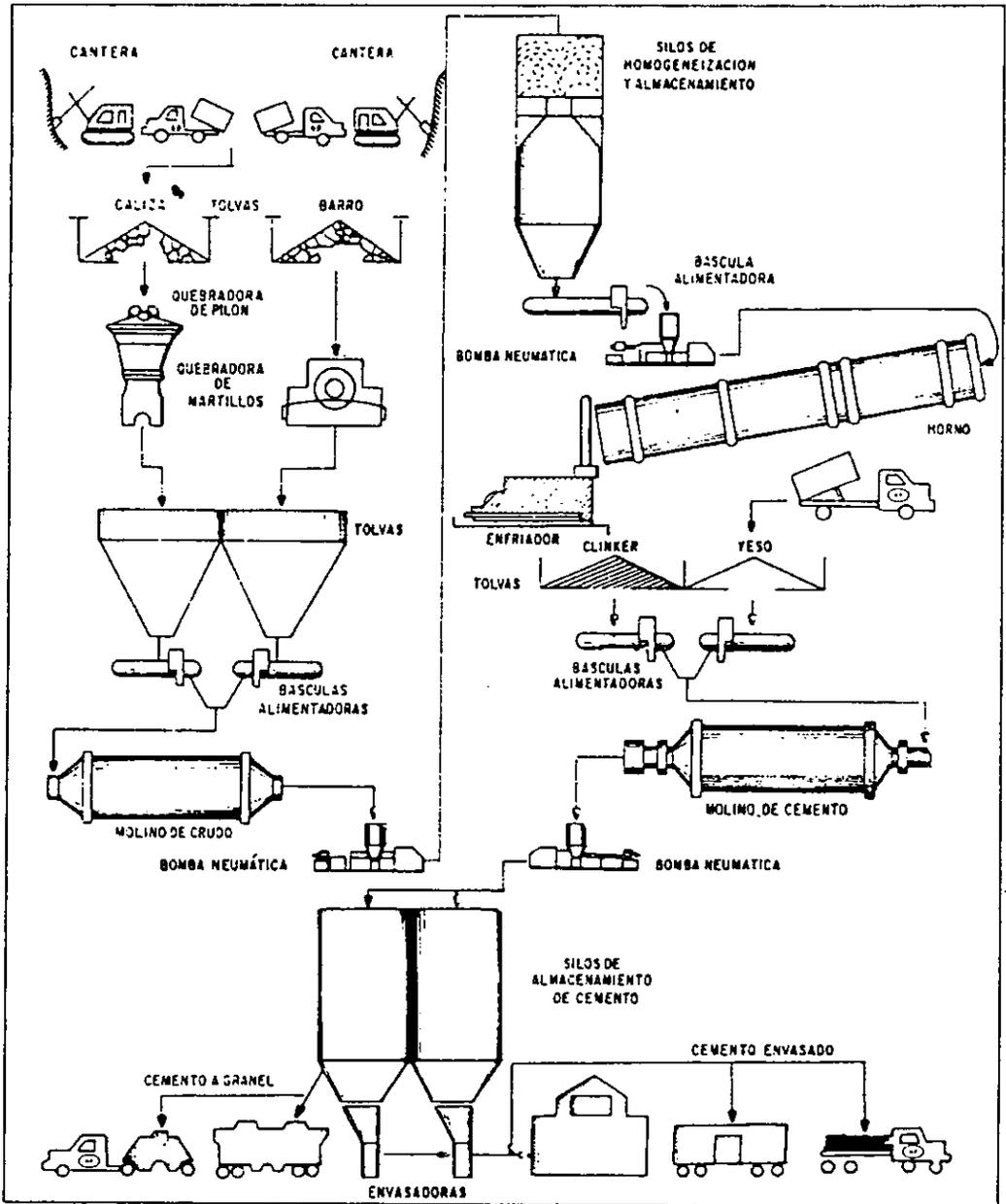


FIGURA 2.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO

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. A continuación se describen los principales compuestos del cemento, así como sus funciones.

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 cual sirve de 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 .

Alumino Ferrito Tricálcico (C_4AF)

Es un compuesto de bajo calor de hidratación en el cemento. La adición de un exceso de óxido de hierro incrementa la cantidad de C_4AF y decrece la cantidad de C_3A en el cemento.

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.

Silicato Dicálcico (C₂S)

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

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. En la Figura 2.2 se muestra el proceso de fabricación del cemento Portland.

2.4 PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS, CUBIERTAS POR LAS ESPECIFICACIONES DEL API

En la realización de las operaciones de cementación, los cementos son utilizados para desplazar el fluido de perforación y para llenar el espacio anular entre la TR y el agujero abierto. 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.

Los requerimientos químicos y físicos de las diferentes clases de cementos API están definidos en el API Specification 10 (SPEC 10) y se muestran en las Tablas 2.1 y 2.2.

TABLA 2.1 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 Tricálcico (3CaO*Al ₂ O ₃) Máximo %		8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Contenido Total de Alcalis expresado como Óxido 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 (3CaO*Al ₂ O ₃) Máximo %					65.0	65.0
Mínimo %					48.0	48.0
Aluminato Tricálcico (3CaO*Al ₂ O ₃) Máximo %		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Aluminoferrita Tetracálcica (4CaO*Al ₂ O ₃ *Fe ₂ O ₃) más dos veces el Aluminato Tricálcico (3CaO*Al ₂ O ₃), máximo %		24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
Contenido Total de Alcalis expresado como óxido de sodio (Na ₂ O) equivalente, máximo %					0.75	0.75

TABLA 2.2 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 (expansión autoclave), Máximo por ciento. (sección 4)				46	46	56	38	38	38	44	38	
Finza* (superficie específica), Mínimo, m ² /kg				0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	
Contenido de Agua Libre, Máximo en ml. (sección 6)				150	160	220	3.5**	3.5**
Prueba de Resistencia a la Compresión 8 hr de Tiempo de Curado (sección 7)	Número de Catalogo Tabla 7.1	Tempera. de Curado F(°C)	Presión de Curado Psi (kpa)	Mínima Resistencia a la Compresión, psi (Mpa)								
	.....	100(38)	Atmos.	250 (1.7)	200 (1.4)	300 (2.1)	.....	.....	.....	300 (2.1)	300 (2.1)
	6s	140(60)	Atmos.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1500 (10.3)	1500 (10.3)
	8s	230(110)	3000(20700)	.....	.....	.....	500 (3.5)	.....	.....	.....	.....
	9s	290(143)	3000(20700)	.....	.....	.....	.....	500 (3.5)	.....	.....	.....
Prueba de Resistencia a la Compresión 12 hr de Tiempo de Curado (sección 7)	8s	290 (143)	3000(20700)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Prueba de Resistencia a la Compresión 24 hr de Tiempo de Curado (sección 7)	Número de Catalogo Tabla 7.1	Tempera. de Curado F(°C)	Presión de Curado Psi (kpa)	Mínima Resistencia a la Compresión, psi (Mpa)								
	.....	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)	.....	.....
Prueba de Resistencia a la Compresión 24 hr de Tiempo de Curado (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 Consistencia Máxima 15-30 min.	Mínimo Tiempo de Espesamiento en Minutos***								
		1	30	90	90	90
		4	30	90	90	90
		5	30	90	90
5		30	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	120	120
6	30	.....	.....	.....	.....	100	100	.....	.....	.....
7	30	.....	.....	.....	.....	.....	154	.....	.....	.....
9	30	.....	.....	.....	.....	.....	.....	190	.....	.....

2.5 PRUEBAS A LOS CEMENTOS

Al surtirse a granel cada lote de cemento, en las plantas dosificadoras se muestrea de manera selectiva. A estas muestras 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 y uniformidad 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.

3.1 DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO

La lechada de cemento es un producto químico de composición compleja. Se puede modificar su comportamiento tan radicalmente como se quiera, con los sofisticados productos químicos disponibles en el mercado, ya sea para acelerar o retardar el fraguado, para aumentar o reducir la viscosidad, incluyendo otras propiedades, todo para un óptimo diseño de la lechada de cemento.

Inicialmente se delimita el uso u objetivo de la lechada de cemento. Propiamente dicho, en qué tipo de trabajo se aplicará el diseño. Determinando así, una faceta del diseño tomando en cuenta todos los parámetros involucrados para desarrollarlo y efectuarlo.

El diseño abarcará un plan o la descripción de la operación para la preparación de la lechada de cemento. Tal descripción podrá hacerse por escrito a través de una reunión con el grupo de trabajo. Para lograr un diseño correcto es menester proponer el proceso a seguirse y describirlo a detalle. El siguiente paso consistirá en llevar a cabo el plan antes desarrollado.

Se podrá apoyar el diseño con pruebas o trabajos anteriores disponibles tanto en la literatura como a nivel operativo. Para poder formular un juicio apoyado en pruebas fehacientes y confiables.

La planeación del pozo no estará completa hasta que se haya diseñado la lechada de cemento. Los principales aspectos de diseño, son:

- Diámetro del agujero
- Diámetro de la tubería de revestimiento
- Profundidad total
- Cima del cemento
- Profundidad de la última tubería de revestimiento cementada
- Densidad de la lechada de cemento
- Temperatura de fondo
- Densidad actual del fluido de perforación
- Densidad mínima de lodo permisible o presión de formación
- Presión de fractura
- Rendimiento de la lechada
- Clase de cemento a utilizar

- Requerimiento de agua para el mezclado
- Aditivos

Las compañías de servicio cuentan con una serie de manuales que proporcionan información para hacer estimaciones confiables en el diseño de las lechadas de cemento. Usualmente contienen datos como los siguientes:

- Volúmenes de tuberías de revestimiento, de perforación y producción
- Volumen entre la tubería de revestimiento y el agujero
- Volumen entre tubería de revestimiento y tubería de revestimiento
- Volumen entre sartas múltiples y tubería de revestimiento
- Propiedades de la tubería de revestimiento y tubería de producción
- Características del equipo de bombeo
- Características de la lechada de cemento (rendimiento, densidad, agua de mezclado, tiempo de espesamiento, resistencia a la compresión, pérdida de filtrado)
- Efectos de los aditivos sobre la lechada de cemento

Cada uno de los puntos anteriores tendrán que ser considerados para realizar el pronóstico de la cementación. También cada uno de los trabajos de cementación debe ser diseñado de manera tal que la densidad y la columna de cemento den por resultado suficiente presión hidrostática para controlar el movimiento de los fluidos evitando provocar fracturar la formación.

La determinación de variables, es imprescindible para lograr un buen diseño. Conocer, vigilar y regular todas las variables, determinará llevar un buen control de éstas. Para controlar las variables podemos suprimirlas o hacer que permanezcan constantes, unas con respecto a otras, o bien, fijar una y variar el comportamiento de las restantes y viceversa, haciendo esto, con todas y cada una de ellas. Este control es de capital importancia y tiene por objeto evitar que los resultados se vean afectados por factores que no se han tenido en cuenta y que, sin duda, llevarán a obtener resultados erróneos en el diseño o más grave aún, en el mismo trabajo de cementación. Logrando tener un diseño en donde se tendrán variables dependientes e independientes. Entre las variables involucradas están la temperatura, presión, viscosidad, tiempo de bombeabilidad, densidad, resistencia a la compresión, etc. Con la elaboración de este modelo de trabajo, se tomarán las medidas adecuadas para cada diseño. Ya que con estos datos, directamente se seleccionarán las propiedades básicas del cemento, así como de su régimen de desplazamiento.

Lo más importante de todo esto, es la afirmación final referente a la validez de todos y cada uno de los pasos dados para culminar el trabajo de diseño y obtener algunas conclusiones e incluso otras no previstas. En el caso de un fracaso es conveniente reflexionar sobre las posibles causas del error y tomarlas en cuenta para operaciones posteriores y no volver a caer en él.

Es entonces que al ingeniero de perforación le concierne la selección del cemento adecuado y la técnica de colocación para cada una de las aplicaciones que se requieran. La técnica de colocación y la composición del cemento deberán ser de tal modo que el cemento alcance una resistencia adecuada después de colocarlo en el lugar deseado. Con esto se minimiza el tiempo de espera, que es el tiempo que lleva la operación hasta que fragua el cemento después de la cementación. Sin embargo, deberá de bombearse un volumen suficiente de lechada que permita su colocación detrás del revestimiento. Una planeación apropiada de los programas de diseño de las lechadas de cemento proporcionan un factor esencial en la cementación de pozos petroleros.

Para asegurarse que cada fase del trabajo de cementación se está llevando a cabo según el programa establecido al inicio de las operaciones, se deberán verificar muchos detalles. Las palabras claves en un control de cualquier trabajo de cementación, las cuales se pueden extrapolar a otras tareas, son **“nunca suponer, siempre verificar; nunca estimar, siempre calcular”**. Al aplicar esta filosofía desde el comienzo del diseño y continuándolo durante la ejecución del trabajo, se podrán eliminar diversos errores o fallas que puedan causar una mala cementación.

En el caso de las lechadas de cemento para cementaciones no convencionales, es necesario un diseño más detallado que las lechadas de cemento convencionales.

Diseño

La cantidad y concentraciones de agua que se recomiendan para el diseño (tomando como densidad relativa del cemento Portland de 3.14 gr/cm^3), variará para cada lechada y para cada tipo de cemento en particular, el agua normal por emplear que recomienda el API de acuerdo a cada clase de cemento, se muestra en la Tabla 3.1.

Para determinar la densidad de la lechada, se deberán adicionar las masas de los componentes de la lechada de cemento y dividirlos por el volumen total que ocuparán dichos componentes. En otras palabras, para determinar la densidad de la

lechada en lb/gal, se dividirá las libras totales entre el total de galones, como se muestra en la Ecuación 3.1.

TABLA 3.1 PORCENTAJE DE AGUA PARA MEZCLADO Y RENDIMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO.

CLASE DE CEMENTO	AGUA PARA MEZCLADO (% X SACO)	DENSIDAD DE LA LECHADA (lb/gal)	DENSIDAD DE LA LECHADA (gr/cm ³)	RENDIMIENTO (pie ³ /saco)
A	46	15.6	1.87	1.18
B	46	15.6	1.87	1.18
C	56	14.8	1.77	1.32
D	38	16.45	1.97	1.05
E	38	16.45	1.97	1.05
F	38	16.45	1.97	1.05
G	44	15.8	1.89	1.15
H	38	16.45	1.97	1.05

$$\rho_{lechada} (lb / gal) = \frac{lb_{cemento} + lb_{agua} + lb_{aditivos}}{gal_{cemento} + gal_{agua} + gal_{aditivos}} \dots\dots(3.1)$$

El rendimiento o producción de la lechada será entonces el volumen que ocupe por unidad de cemento conjuntamente con el agua y sus aditivos. El cemento se medirá en sacos, por razones de cálculo se tendrá que un saco será igual a 94 libras. Este valor será usado para calcular el número de sacos requeridos para alcanzar a llenar el espacio anular. Para simplificar los cálculos las densidades de las lechadas de cemento se desarrollarán en base a un saco de cemento.

Ejemplos de Cálculo

Considerando el cemento clase G y observando la Tabla 3.1 se tendrá que para esa clase de cemento se necesitará un 44 % de agua por cada saco de cemento entonces:

TABLA 3.2 CALCULO DE VOLUMENES DE CEMENTO Y AGUA

COMPONENTE	PESO (lbs)	VOLUMEN ABSOLUTO (lb/gal)	VOLUMEN (gal)
Cemento	94	0.0382	3.59
Agua	41.36	0.1202	4.97
TOTAL	135.36		8.56

$$94 \text{ lb} \times 0.44 = 41.36 \text{ lbs de agua}$$

$$\rho_{\text{lechada}} = 135.36 \text{ lb}/8.56 \text{ gal} = 15.8 \text{ lb/gal}$$

El rendimiento se determina dividiendo el volumen total de la lechada por 94 lb-saco de cemento (8.56 gal) por el factor de conversión de 7.48 gal/ pie³.

$$\text{Rendimiento de la lechada} = 8.56 \text{ (gal/saco)} / (7.48 \text{ gal/pie}^3) = 1.14 \text{ pie}^3/\text{saco}$$

Otro cálculo importante es obtener la cantidad de agua que se necesita para el mezclado. Esto es para asegurar que se cuenta con bastante cantidad de agua para la operación de cementación. Los galones de agua se calcularán multiplicando 4.97, de la operación anterior, por el número de sacos de cemento para ser mezclados.

Cuando se manejan aditivos se calcularán de manera similar tal como se indicó anteriormente con el cemento y el agua. Sin embargo, cuando en los cálculos se utilizan aditivos y éstos se presentan en menor cantidad (menor que el 1 % del volumen total), se ignoran en los cálculos. Hoy en día, muchos laboratorios usan computadoras con avanzado software para el cálculo de las densidades de las lechadas de cemento y para así determinar la cantidad de sus aditivos.

Por ejemplo, si consideramos la clase G de cemento + 35 % de harina sílica + 1 % de aditivo para la pérdida de filtrado + 0.2 gal/saco de dispersante líquido PNS + 44 % de agua, entonces se tendrá:

TABLA 3.3 CÁLCULO DE VOLÚMENES DE CEMENTO, AGUA Y ADITIVOS

COMPONENTE	PESO (lbs)	VOLUMEN ABSOLUTO (gal/lb)	VOLUMEN (gal)
Cemento	94	0.0382	3.59
Harina Sílica	32.9	0.0454	1.49
Aditivo	0.94	0.0932	0.088
PNS	1.97	0.1014	0.20
Agua	41.36	0.1202	4.97
TOTAL	171.17		10.34

$$\rho_{\text{lechada}} = 171.17 \text{ lb}/10.34 \text{ gal} = 16.55 \text{ lb/gal}$$

$$\text{Rendimiento de la lechada} = (10.34 \text{ gal/saco}) / (7.48 \text{ gal/pie}^3) = 1.38 \text{ pie}^3/\text{saco}$$

Para un cemento clase G, ¿qué cantidad de hematita se necesitará para preparar una lechada con una densidad de 18.5 lb/gal?

TABLA 3.4 DETERMINACIÓN DEL PESO DE HEMATITA PARA UN CEMENTO CLASE G

COMPONENTE	PESO (lbs)	VOLUMEN ABSOLUTO (gal/lb)	VOLUMEN (gal)
Cemento	94	0.0382	3.59
Hematita	X	0.0244	0.0244X
Agua	41.36	0.1202	4.97
TOTAL	135.36 + X		8.56 + 0.0244X

$$\rho_{lechada} = 18.5 \text{ lb/gal} = \frac{(135.36 + X) \text{ lbs}}{(8.56 + 0.0244X) \text{ gal}}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} 18.5(8.56+0.0244X) &= 135.36 + X \\ 158.36 + 0.4514X &= 135.36 + X \\ 158.37 - 135.36 &= X - 0.4514X \\ X &= 23/0.5486 \end{aligned}$$

$$X = 41.92 \text{ lbs}$$

que es la cantidad de hematita necesaria por saco de cemento para obtener una lechada de cemento con una densidad de 18.5 lb/gal.

3.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO

El estudio del comportamiento de las lechadas de cemento es una tarea continua a fin de superar los resultados de las cementaciones de las TR's y por eso que al diseñar una cementación deben tomarse en consideración las profundidades, las temperaturas del fondo, las condiciones del pozo, así como también los problemas que se presentan durante la perforación del mismo. Cada uno deberá ser considerado en la preparación del pronóstico de la cementación. Los parámetros que afectan en menor o mayor medida el diseño de una lechada de cemento, son:

- Presión, Temperatura y Tiempo de Bombeabilidad
- Viscosidad y Contenido de Agua de las Lechadas de Cemento

- Tiempo de Espesamiento
- Resistencia del Cemento para Soportar la Tubería
- Resistencia a la Compresión
- Agua de Mezclado
- Densidad de la Lechada
- Pérdida de Circulación
- Calor de Hidratación
- Permeabilidad
- Ángulo de Desviación
- Control del Filtrado
- Migración de Gas
- Calidad del Mezclado
- Proceso de Desplazamiento

3.2.1 Presión, Temperatura y Tiempo de Bombeabilidad

Hay dos factores básicos que influyen en el diseño de una lechada de cemento en el pozo y son la temperatura y la presión. Éstos afectan el tiempo de bombeo de la lechada y la resistencia a la compresión que se desarrolla después de fraguar. De estos dos factores, la temperatura es el que tiene mayor influencia sobre el diseño de la lechada de cemento. A medida que la temperatura de la formación aumenta, la lechada de cemento se deshidrata más rápidamente, desarrollando así su resistencia con mayor rapidez.

La presión impuesta a una lechada de cemento, debido a la columna hidrostática de los fluidos del pozo, también reduce la capacidad de bombeo del cemento.

Para prevenir el retardo excesivo de la lechada de cemento es necesario considerar en el diseño las temperaturas circulante y estática de fondo, así como la diferencia de temperatura entre la cima y base de la tubería de revestimiento a cementar. La temperatura circulante de fondo es la temperatura a la cual teóricamente será expuesto el cemento durante la colocación en el pozo; por lo tanto, es la temperatura que se debe usar para pruebas de tiempo de espesamiento a alta presión y alta temperatura de las lechadas de cemento y la que rige la selección de los aditivos adecuados.

La temperatura estática de fondo es importante para el desarrollo de resistencia compresiva de un sistema de cemento dado. Normalmente se calcula a partir del

gradiente geotérmico promedio en el área, o bien, puede estimarse de mediciones hechas durante registros. Estudios previos muestran que el desarrollo de la resistencia compresiva inicial puede estar influenciado por el retardado excesivo del cemento. Sin embargo, el desarrollo de resistencia compresiva final parece no estar afectado relativamente por el sobreretardado. El tiempo que toma la lechada en alcanzar el fondo, depende del diámetro de la tubería de revestimiento, de la profundidad de asentamiento y del gasto empleado en el desplazamiento.

3.2.2 Viscosidad y Contenido de Agua de las Lechadas de Cemento

Durante la operación de cementación, la lechada de cemento deberá tener una viscosidad o consistencia tal que logre la máxima eficiencia de desplazamiento del lodo y permitir con esto una buena adherencia entre la formación y la tubería. Para lograr esto, muchas de las lechadas son mezcladas con una cantidad de agua que proporciona un volumen de cemento fraguado igual al volumen de la lechada sin separación de agua libre. El tamaño de la partícula, el área de la superficie y el tipo de aditivos influyen en la cantidad de agua de mezclado requerida para lograr una viscosidad determinada. A esas cantidades de agua se les han dado términos específicos y se definen a continuación:

Agua Libre

Se conoce como agua libre a la cantidad de agua que se separa de la lechada, después de haber sido agitada durante 20 minutos en un consistómetro de presión atmosférica a 27 °C (80 °F) y dejada en reposo por 2 horas y se expresa en cm³ o en por ciento. El contenido de agua libre en una muestra de lechada en el campo indicará que:

- La lechada no se agitó lo suficiente como para obtener un buen mezclado.
- Se usó agua en exceso.

En ambos casos el cemento se afecta enormemente; si la lechada se mueve hasta terminar su tiempo bombeable, el exceso de agua dará un producto fraguado permeable, este cemento fraguado será susceptible a la invasión de fluidos; si la lechada se mueve solamente un tiempo corto después de ser mezclada y posteriormente se mantiene estática, formará bolsas de agua libre (puentes de agua) y canalización. Por ello, es de suma importancia usar la cantidad de agua especificada por el API.

Agua Mínima

El API SPEC 10 establece que el agua mínima para un cemento es aquella que da 30 unidades ABc a los 20 minutos de agitarse en el consistómetro de presión atmosférica a 27 °C (80 °F).

Los valores de agua de mezclas máxima y mínima representan un rango y no son fijos, por ello no se consideran para las pruebas de laboratorio.

El agua especificada de acuerdo a los procedimientos de pruebas según el SPEC 10 del API se refiere al agua óptima y es la cantidad usada para todas las pruebas estándar API.

Agua Óptima

El agua óptima es la cantidad de agua que da a la lechada las mejores propiedades para su aplicación particular.

El SPEC 10 establece que el agua normal, nombre con el que también se le conoce al agua óptima de una lechada de cemento, es aquella que da 11 unidades ABc a los 20 minutos de agitarse en un consistómetro de presión atmosférica a 27 °C (80 °F).

NOTA:

Bc son las unidades Bearden de consistencia obtenidas en un consistómetro presurizado.

ABc son las unidades Bearden de consistencia obtenidas a presión atmosférica en un consistómetro presurizado.

La relación entre las unidades Bc y las ABc es de aproximadamente de una Bc X 0.69 = ABc. Esta relación es válida solamente para unidades de consistencia menores que 30 unidades Bc.

3.2.3 Tiempo de Espesamiento

El tiempo de espesamiento es la cantidad de tiempo en el que el cemento presenta las condiciones para ser bombeado con presiones razonables.

Se conoce también como el tiempo requerido por el cemento para alcanzar un grado establecido por el API de consistencia, o espesamiento. El tiempo de espesamiento comienza desde el mezclado inicial de la lechada de cemento. El tiempo mínimo de espesamiento es el tiempo requerido para mezclar y bombear la lechada al espacio anular seleccionado.

Esto es tal vez la propiedad más crítica en el proceso de desplazamiento. Varios factores afectan el tiempo de espesamiento incluyendo la composición del cemento y la temperatura. Un límite superior deberá ser puesto en el tiempo de espesamiento de modo que las operaciones de perforación puedan reanudarse.

Las recomendaciones específicas para el tiempo de espesamiento dependen en gran parte del tipo de trabajo, de las condiciones del pozo y volumen de lechada que va a bombearse.

3.2.4 Resistencia del Cemento para Soportar la Tubería

El cemento requiere de poca resistencia para soportar una sarta o una tubería de revestimiento. Algunos datos han demostrado que una envoltura de 10 pies en el espacio anular puede soportar más de 200 pies de tubería de revestimiento de diámetros pequeños a grandes, aún bajo pobres condiciones de adherencia. Las variables de campo (procedimientos de terminación, condiciones de curado), no pueden conocerse o controlarse lo suficiente como para establecer un tiempo de curado; el cuál es el tiempo transcurrido desde la introducción de las muestras en el autoclave hasta que se prueba la muestra para determinar su resistencia.

3.2.5 Resistencia a la Compresión

Es el grado de resistencia del cemento a una fuerza compresiva por unidad de área, de tal manera que tienda a colapsarlo; generalmente se expresa en libras sobre pulgada cuadrada.

El endurecimiento del cemento deberá desarrollar resistencia a la compresión para asegurar el revestimiento en el agujero y aguantar las diferenciales de presión a través del cemento. La resistencia a la compresión usualmente se incrementa con la densidad de la lechada. Una mínima resistencia a la compresión puede ser de 500 psi, que es generalmente recomendada antes de reanudar las operaciones de cementación, aunque se prefieren mayores resistencias.

La temperatura afecta la resistencia a la compresión del cemento. Altas temperaturas reducen el tiempo necesario para que la lechada de cemento pueda alcanzar los niveles de compresibilidad. Sin embargo, a temperaturas arriba de 110 °C (230 °F), la resistencia a la compresión comienza a disminuir. La proporción más usada para disminuir los efectos de las altas temperaturas sobre la lechada es usar arena ($\pm 35\%$), la que reacciona como un neutralizador.

3.2.6 Agua de Mezclado

Los requerimientos del agua de mezclado pueden variar, dependiendo principalmente de la clase de cemento y densidad de la lechada. Muchos trabajos de cementación utilizan agua de la misma localización. Si el agua necesita ser transportada a la localización donde hay escasez o mal suministro, se debe calcular el volumen exacto, ya que esto es importante para asegurar el adecuado suministro de agua. Los requerimientos de volumen pueden ser considerables si la densidad es baja.

La calidad del agua de mezclado es un importante parámetro para la planeación de la cementación. La hidratación y el curado de la lechada de cemento puede reaccionar diferente con la variación de la cantidad de sales, calcio, o magnesio en el agua de mezclado. Es recomendable que el laboratorio piloto desarrolle pruebas con una muestra actual de agua y de cemento para obtener una buena estimación del tiempo de bombeo y resistencia a la compresión. El laboratorio realizará más pruebas cuando haya condiciones de alta temperatura en pozos profundos que requieran una cantidad considerable de tiempo para el mezclado del cemento y su desplazamiento.

3.2.7 Densidad de la Lechada

La densidad del cemento es un importante criterio de diseño. Ésta deberá ser tal que impida problemas de pérdidas de circulación y fracturamiento de las formaciones. En algunos casos, la altura de la columna del cemento deberá controlarse.

Un factor en la calidad de la operación es el control de varias propiedades características de la lechada. La densidad es generalmente considerada como la propiedad más importante y comúnmente medida. Ésta se relaciona directamente sólo con la presión hidrostática de la lechada de cemento.

Otras propiedades, tales como: la compresión, viscosidad, pérdida del filtrado y agua libre, para un diseño en particular dependen de la densidad a la cual la lechada es mezclada.

La densidad de la lechada siempre deberá ser excepto para cementaciones forzadas suficiente para mantener el control del pozo, existen varias maneras para controlar la densidad.

En operaciones de campo, la densidad de la lechada de cemento es determinada por una balanza de lodos, pero en la actualidad hay dispositivos integrados a las mezcladoras o al sistema de mezclado que esté en uso, para ir observando la densidad de la mezcla electrónicamente y siendo registrada en una terminal de computadora para su control.

3.2.8 Pérdida de Circulación

La pérdida de circulación se define como la pérdida del fluido de perforación o cemento desde el pozo a las formaciones subsuperficiales. Esta condición es detectada en la superficie cuando el gasto de flujo que sale del espacio anular es menor que el gasto de bombeo dentro del pozo. La pérdida de circulación ocurre cuando encontramos formaciones extremadamente permeables como estratos de grava, ostreros, calizas cavernosas o cuando hay una formación fracturada o es creada por la excesiva presión dentro del pozo.

En la selección y el uso de materiales para controlar la pérdida de circulación, dos factores deberán tenerse en mente: que el material deberá ser de un tamaño tal que pueda manejarse por el equipo de bombeo y las aberturas de la formación deberán ser bastante pequeñas para permitir que el material obture y selle. Cuando las aberturas de la formación son demasiado grandes, los agentes sellantes son relativamente ineficientes, llevando esto a la necesidad de diseñar cementos semisólidos o de fraguado repentino. La efectividad de estos materiales tiene que tener una estabilidad, no solamente en las pruebas de laboratorio, sino también por sus resultados de campo.

3.2.9 Calor de Hidratación

Cuando el cemento es mezclado con agua ocurre una reacción exotérmica en la cual se libera una cantidad considerable de calor.

Si la masa de cemento es grande, la evolución del calor es grande. En laboratorio con frecuencia el calor es medido con un calorímetro.

Una de las razones primordiales por las que la cementación de TR's resultan canalizadas, se atribuye a la reducción de presión hidrostática en el espacio anular, durante el proceso de hidratación del cemento.

Para reducir las probabilidades de que la cementación resulte canalizada debido a la excentricidad de la tubería en el pozo, se sugiere mover la tubería en sentido rotacional. Esta práctica, cuando se aplica, da buenos resultados.

Experimentalmente en laboratorio se ha observado que las lechadas con propiedades tixotrópicas, al quedar en reposo, tienden a gelificar y adherirse a las paredes del espacio anular. Otros estudios revelan que la presión hidrostática que ejerce la columna de lechada, durante el proceso de hidratación, tiende a reducir hasta alcanzar un valor de presión equivalente al de una columna de agua de longitud similar.

Esto se puede atribuir a que el cemento durante el proceso de hidratación, cambia gradualmente de fluido a sólido y sufre un encogimiento. Además, se estima que la hidratación requiere el 25% de agua por peso de cemento. Un 19% de agua de la lechada quedará en la matriz del cemento y será la única que transmita su presión hidrostática. La mezcla de cemento en estado tixotrópico tiende a soportar su propio peso. La reducción de volumen de las mezclas de cemento varía de 0.1 a 0.3% durante el proceso de hidratación y alcanza valores del orden de 2% al final del fraguado. Si se acepta lo anterior una columna de 500 m de lechada de 1.9 gr/cm^3 de densidad, ejerciendo inicialmente una presión de 95 kg/cm^2 , podrá reducirse a sólo 50 kg/cm^2 , durante el proceso de hidratación.

3.2.10 Permeabilidad

A pesar de que al diseñar la lechada de cemento sólo se da poca importancia a la permeabilidad del cemento fraguado, existen maneras de medir tanto la permeabilidad al agua, como al gas. El API ha especificado un sistema que comprende el uso de un permeámetro.

Los cementos fraguados tienen menos permeabilidad que las formaciones productoras. Los trabajos anteriores han demostrado que a temperaturas menores de $94 \text{ }^\circ\text{C}$ ($200 \text{ }^\circ\text{F}$) la permeabilidad del cemento decrece con el tiempo y la temperatura.

La permeabilidad al gas, del cemento fraguado, normalmente es más alta que la del agua. Los cementos que han fraguado de 3 a 7 días tienen una permeabilidad al gas menor que 0.1 md. La dolomita y la caliza tienen un promedio de 2 a 3 md y las calizas oolíticas usualmente tienen muy baja permeabilidad. La arenisca tiene permeabilidad al gas en un rango de 0.1 a 2000 md.

3.2.11 Ángulo de Desviación

El ángulo de desviación del pozo se estudia para determinar los efectos del aumento del área superficial en la estabilidad de la lechada. Trabajos previos indican que el agua libre aumenta en un promedio del 8% al 9% con el ángulo de desviación hasta del orden de 45°. Esto es en parte por el incremento del área superficial que desarrolla el pozo al ser desviado. Aunque el área de la superficie se considera como un factor que contribuye al aumento de la separación del agua libre. Hay otros factores que además del área superficial pueden contribuir a la separación del agua libre, como son: el asentamiento y las fuerzas de cohesión de los sólidos y la longitud de la columna de la lechada, además del área del espacio anular. Estos factores son exteriores. También se desarrolla una segregación debida a la diferencia de la densidad como resultado de la desviación del agujero.

3.2.12 Control del Filtrado

El control de la pérdida del filtrado de la lechada de cemento es importante para una cementación de un pozo en el control del tiempo de espesamiento o el desarrollo de la resistencia a la compresión.

La prematura deshidratación de la lechada de cemento causada por la falta de control de la pérdida de filtrado puede provocar una comunicación de gas. Este problema es más evidente cuando en zonas permeables ocurren variaciones de presión. Las lechadas sin un adecuado control sobre el filtrado quizá se deshidratarán al cruzar una zona permeable cuando la presión hidrostática excede la presión de la formación. Abajo del punto de alta filtración en el espacio anular, la presión hidrostática disminuye, lo que permitirá la migración del gas de una zona de alta presión a una de baja presión, generando canales de gas en la columna de cemento.

Los factores que influyen en la pérdida de filtrado son el tiempo, la presión, la temperatura y la permeabilidad. Para medir las características del filtrado de la

lechada de cemento, el API estandariza y especifica una prueba de 30 minutos a 100 ó 1,000 psi.

La presencia de enjarre limita el gasto de pérdida del filtrado de la lechada de cemento. Sin control de la pérdida del filtrado, las lechadas de cemento quizás fallen para transmitir una amplia presión hidrostática uniforme antes del fraguado inicial.

La presión diferencial del gas aplicada al inicio y al final del fraguado del cemento quizá generen microcapilaridades. Se deberá controlar la pérdida del filtrado en las lechadas de cemento a fin de minimizar las canalizaciones de gas cuando la cementación cruce zonas de variación de presión.

El filtrado es forzado a salir del cemento, aumentando la densidad y viscosidad de la lechada y por lo tanto reduce el tiempo de bombeo e incrementa la fricción. Sin embargo, la pérdida de filtrado se puede controlar con aditivos.

El diseño de lechadas de cemento para un trabajo determinado cuenta con propiedades específicas para un pozo. La viscosidad, el tiempo de espesamiento, reología, resistencia a la compresión, etc., son factores que se relacionan entre sí para unas condiciones de fondo dadas.

El cemento puro (cemento sin aditivos), tiene un gasto de pérdida de filtrado del orden de $1,000 \text{ cm}^3/30 \text{ min.}$ Variando las concentraciones de los aditivos para pérdida de filtrado podrán controlarse estos gastos. Los siguientes valores se observan en la Tabla 3.5 y su interpretación es generalmente aceptada:

TABLA 3.5 RELACIÓN ENTRE EL GASTO DE PÉRDIDA DE FILTRADO Y SU INTERPRETACIÓN

0-200 $\text{cm}^3/30 \text{ min.}$	Buen control
200-500 $\text{cm}^3/30 \text{ min.}$	Control moderado
500-1,000 $\text{cm}^3/30 \text{ min.}$	Control regular
Arriba de 1,000 $\text{cm}^3/30 \text{ min.}$	Sin control

3.2.13 Migración de Gas

La migración de fluidos por el espacio anular puede ocurrir durante la perforación o terminación del pozo y ha sido reconocido como un problema crítico en la industria petrolera. Consiste en la invasión de fluidos de la formación al espacio anular,

provocada por un desbalance de presión en la cara de la formación. Los fluidos pueden migrar a una zona de menor presión, e incluso hasta la superficie, siendo la migración de gas, la más frecuente.

Estudios recientes han demostrado que el flujo o migración de gas se presenta cuando la lechada de cemento ya colocado en el espacio anular de tubería-formación, pasa por una etapa o tiempo de transición. El tiempo de transición, es el período durante el cual la lechada cambia de un fluido verdaderamente hidráulico, a una masa altamente viscosa que muestra características de un sólido. El tiempo de transición se inicia cuando la lechada desarrolla suficiente fuerza de gelatinización que restringe la transmisión completa de una presión hidrostática y termina cuando el cemento desarrolla suficiente fuerza de gelatinización y características de sólido que evita el filtrado de gas a través de la columna de cemento.

La canalización de gas es un problema potencial cuando la cementación de la tubería de revestimiento se efectúa cubriendo intervalos productores.

La migración de gas es un problema complejo que involucra el control de la densidad, remoción del lodo, propiedades de la lechada de cemento, hidratación y adherencia del cemento con la tubería de revestimiento y la formación.

El control del gas durante e inmediatamente después de que el cemento ha sido colocado involucra el mantener la presión de fondo, arriba de la presión estática de la zona de gas.

Debido a la diferencia de densidades entre el lodo de perforación, el bache lavador, el bache espaciador y la lechada de cemento, dan como resultado, que la presión hidrostática ejercida contra la cara de la formación no sea constante durante la operación.

Si la presión hidrostática cae por debajo de la presión de formación en cualquier instante, puede dar lugar a una entrada de gas, con el consiguiente aligeramiento de la columna hidrostática y así obtener un proceso irreversible de entrada de gas.

Una adecuada remoción del lodo ayuda a evitar la migración de gas hacia el espacio anular (la cual se favorece por la existencia de canales continuos de lodo dentro del cemento fraguado).

El proceso de gelificación del cemento también puede favorecer el flujo de gas después de la cementación, debido a que la atracción entre las partículas hidratadas puede prevenir que la presión hidrostática de la columna se transmita completamente y que ésta soporte parte de su propio peso. En consecuencia, si la presión hidrostática efectiva de la columna de cemento es reducida a un nivel menor de la presión de formación, el gas se canalizará a través del cemento, formando microanillos difíciles de ser reforzados con cemento.

3.2.14 Calidad del Mezclado

Los procesos de mezclado de las lechadas de cemento requieren la incorporación de un cemento mezclado dentro del agua de mezcla para formar una lechada homogénea. Durante los procesos de mezclado de campo, una adecuada energía deberá ser aplicada para mojar completamente todas las partículas sólidas y facilitar el rendimiento de los aditivos y del cemento tal como las lechadas mezcladas en el laboratorio y que las propiedades de éstas, mezcladas en el campo, sean aproximadamente iguales.

Un diseño dado de lechada puede estar influenciado por las condiciones del pozo o por cuestión económica. Si el principal aspecto de la operación es el económico (el cual resulta cierto en un alto porcentaje de operaciones de cementaciones), se deben emplear “extendedores” para incrementar la cantidad de agua requerida y reducir el costo del material utilizado. Cuando la adición de agua de mezcla se combina con una energía de mezclado inadecuada, las propiedades de la lechada (tales como el agua libre y pérdida del filtrado) tienden a incrementarse hasta rangos inadecuados.

Las lechadas tixotrópicas han sido desarrolladas para el control de la migración de gas y a menudo son difíciles de mezclar, inclusive son altamente viscosas y posiblemente entrapen aire, lo cual afecta las mediciones de densidad. Algunas de estas lechadas especializadas pueden ser diseñadas hasta un valor de densidad crítico.

Algunas lechadas requieren una alta densidad para balancear las presiones hidrostáticas. Estas lechadas son difíciles de mezclar debido a su alto volumen de material densificante en la mezcla de cemento. Por esto, se deben agregar viscosificantes para ayudar a suspender el material densificante, el cual constituye el problema de mezclado.

Cuando se diseñan lechadas de cemento con aditivos líquidos, los cuales son mezclados en el agua, un error en la densidad puede causar un cambio mayor en varias de las propiedades de la lechada, que aquel que podría sufrir cuando el mismo error es establecido en una lechada con aditivos sólidos.

3.2.15 Proceso de Desplazamiento

El bombeo del cemento dentro del espacio anular es muy importante para el éxito del programa de cementación, así como en el diseño de la lechada de cemento. Un desplazamiento inadecuado puede ser la causa principal de malos trabajos de cementación. Las variables incluyen gastos de desplazamiento, tipo y cantidad de baches lavadores o espaciadores y el tipo real del proceso de desplazamiento o flujo.

El gasto de desplazamiento afecta el régimen de flujo en el espacio anular. Altos gastos de flujo convierten el régimen de laminar a turbulento. Aunque durante la perforación el flujo turbulento en el espacio anular no es deseable, en las operaciones de cementación sí lo es, porque erosiona el enjarre de la formación.

3.3 REOLOGÍA DE LA LECHADA DE CEMENTO

Las propiedades de flujo de la lechada de cemento a ser utilizada en cementaciones de tubería de revestimiento, deben ser caracterizadas de manera precisa, para determinar los gastos de flujo, así como las caídas de presión por fricción y la potencia hidráulica requerida.

Debido a que las lechadas de cemento son fluidos no-Newtonianos, no es posible definir sus propiedades reológicas por medio del factor de viscosidad, puesto que la relación velocidad de corte/esfuerzo de corte no es constante, por lo tanto es necesario establecer al menos dos parámetros para los cálculos de flujo. La determinación de las propiedades reológicas de la lechada de cemento se realiza con un viscosímetro rotacional conforme al procedimiento recomendado en el API SPEC-10.

Las lechadas de cemento son sistemas activos y sus propiedades reológicas cambian continuamente con el tiempo debido a la reacción química, rompimiento estructural y/o recuperación tixotrópica. Esto hace que las lechadas de cemento sean altamente dependientes de la historia de corte. La historia de corte del material se establece conforme a los esfuerzos de corte que éste experimenta desde que inicia la

operación de mezclado. De este modo, el resultado de cualquier medición reológica subsecuente puede estar influenciada en cierto grado por la operación de mezclado.

Para lechadas de cemento, el tamaño y distribución de partículas afecta de manera más pronunciada, ya que la velocidad de deshidratación es dependiente de la finura del cemento. Se ha establecido que incrementado el área superficial de las partículas de cemento, aumenta tanto el esfuerzo de cedencia como la viscosidad plástica del material.

Las lechadas de cemento muestran un comportamiento no-Newtoniano y normalmente son fluidos pseudoplásticos con punto de cedencia, para los cuales la viscosidad disminuye con la velocidad de corte. Los modelos que describen de manera general las propiedades reológicas de las lechadas de cemento son el de Ley de Potencias con Punto de Cedencia y el Plástico de Bingham .

Debido a la importancia de caracterizar el comportamiento reológico de la lechada de cemento de manera más exacta para un amplio rango de velocidades de corte, se recomienda utilizar los modelos de Casson y Hershel-Bulkley, puesto que tales modelos caracterizan al fluido mediante tres parámetros. Lo anterior nos permitirá determinar de manera precisa las caídas de presión por fricción y el obtener un adecuado desplazamiento del lodo de perforación en el agujero.

El equipo estándar de medición usado para caracterizar las propiedades reológicas de lechadas de cemento es un viscosímetro rotacional del tipo de cilindros coaxiales, principalmente los modelos de seis velocidades, aunque se recomiendan los que cubren un rango de doce velocidades para caracterizar de manera más precisa el comportamiento de la lechada de cemento. Otro sistema utilizado para caracterizar reológicamente las lechadas de cemento es el viscosímetro capilar, aunque su uso esta limitado al laboratorio, ya que se requieren diámetros de tubería grandes para evitar que los resultados se vean afectados por dicho parámetro.

Denis y Guillot mostraron que se tiene una congruencia razonable entre resultados de un viscosímetro de cilindros coaxiales y uno capilar para algunas lechadas de cemento, previendo que los datos reológicos no sean afectados por deslizamiento en la pared, sin embargo, al caracterizar sistemas más complejos de lechadas de cemento, existen diferencias significativas en las mediciones.

Shah y Sutton obtuvieron una correlación estadística entre las mediciones de un viscosímetro rotacional y uno capilar. Ellos utilizaron un viscosímetro de cilindros

coaxiales modificado para permitir la circulación vertical de la lechada en el espacio anular, al suspender la circulación se realiza la medición a una velocidad de rotación dada. Además, concluyeron que sus datos experimentales se ajustaban al modelo Plástico de Bingham y establecieron la siguiente correlación:

$$(\eta_p)_p = 0.962 [(\eta_p)_c]^{0.9815}$$

donde η_p es la viscosidad plástica en centipoises y se observa que las viscosidades obtenidas con el viscosímetro capilar fueron aproximadamente 10% menores que las obtenidas con el viscosímetro de cilindros coaxiales.

Para los esfuerzos de cedencia, los datos obtenidos con un viscosímetro capilar fueron sobrestimados en un factor de 1.333, mientras que para un viscosímetro rotacional, en un factor de 1.067. Lo anterior como resultado de considerar en ambos casos, la velocidad de corte en la pared como el valor Newtoniano, el cual no es el caso para un fluido plástico de Bingham. Al corregir este error, la correlación se modificó para establecer:

$$(\tau_y)_p = 1.273 (\tau_y)_c$$

donde τ_y es el esfuerzo de cedencia en pascuales. La dependencia de las propiedades reológicas de las lechadas de cemento respecto a la presión y temperatura no está bien comprendido, ya que el equipo de medición convencional de campo permite que las lecturas se obtengan únicamente a presión atmosférica y temperaturas menores de 90°C.

En cuanto a la dependencia de las propiedades reológicas de las lechadas de cemento con respecto a la presión, se considera mínima o despreciable, ya que éstas son base agua (debido a su baja compresibilidad y poca variación de la viscosidad aparente con la presión). Esto representa la condición de la mayoría de los sistemas de lechadas de cemento, excepto los que muestran una alta relación sólido-líquido. Para tales formulaciones, donde se tiene alta compresibilidad de la fase líquida, respecto de la fase sólida, se observa un incremento considerable de la viscosidad con la presión, al aumentar la relación sólido-líquido.

Por otra parte, la temperatura puede tener un efecto drástico sobre la reología de la lechada de cemento, pero su magnitud es altamente dependiente de la clase del

cemento y de los aditivos. La tendencia descendente de la viscosidad plástica de la lechada (definida como la pendiente de una curva de τ vs. $\dot{\gamma}$) es similar a la de una solución polimérica, la cual viscosifica por sí misma y es sensible a la temperatura, mientras que el esfuerzo de cedencia permanece casi siempre constante.

Las propiedades reológicas de la lechada de cemento son dependientes no sólo de la velocidad de corte, sino también del tiempo; esto puede ocurrir por dos razones. Por un lado, existen interacciones físicas entre las partículas de cemento en suspensión, resultando en una estructura poco compacta cuya naturaleza determina la reología. Esta estructura es muy sensible a la manera en que el fluido es deformado. Para tales materiales, una estructura equilibrada y un esfuerzo de corte correspondiente puede asociarse con una velocidad de corte en particular. Sin embargo, el equilibrio puede alcanzarse únicamente si la velocidad de corte es aplicada por un intervalo de tiempo suficiente. Antes de alcanzar el equilibrio, la estructura se forma progresivamente y posteriormente se rompe, dependiendo de si la velocidad de corte aplicada previamente fue mayor o menor que la velocidad actual. Esto se asocia con un incremento o decremento del esfuerzo de corte hasta que se alcanza un valor asintótico.

Por otro lado, para las lechadas de cemento existe una segunda fuente de dependencia del tiempo, es decir, las reacciones químicas continuas, las cuales con el tiempo modifican de manera irreversible las propiedades de la lechada.

3.4 ADITIVOS

En la cementación de pozos, los sistemas de cemento Portland han sido diseñados rutinariamente para rangos de temperatura desde inferiores al punto de congelación, en zonas permanentemente cubiertas por hielo, hasta temperaturas de 370 °C (700 °F), en pozos de recuperación térmica y pozos geotérmicos; esto conlleva a presiones próximas a la atmosférica en pozos someros y hasta más de 30,000 psi en pozos profundos.

Además de considerar presiones y temperaturas, los cementos para pozos deben diseñarse para afirmarse o sostenerse en formaciones débiles o porosas, soportar fluidos corrosivos y formaciones con fluidos de presión anormal; esto se ha logrado mediante el uso y desarrollo de aditivos para cemento.

Los aditivos modifican el comportamiento de los sistemas de los cementos, permitiendo la colocación de las lechadas exitosamente en condiciones adecuadas

en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación, obteniendo un rápido desarrollo de la resistencia a la compresión y el adecuado aislamiento de las zonas durante el tiempo de vida del pozo.

Hoy en día, existen más de 100 aditivos en el mercado para cementar pozos, muchos de los cuales pueden ser suministrados en forma sólida (polvo) o líquida (solución).

Estos aditivos caen dentro de las siguientes categorías:

- Aceleradores
- Retardadores
- Densificantes
- Reductores de la Densidad
- Dispersantes
- Aditivos para la Pérdida de Filtrado
- Controladores de la Viscosidad
- Agentes de Control de la Regresión de la Resistencia a la Compresión
- Aditivos Especiales
- Aditivos para Impedir la Pérdida de Circulación
- Baches Lavadores y Espaciadores

3.4.1 Aceleradores

La mayor parte de los operadores tienen que esperar a que el cemento alcance una mínima resistencia a la compresión de 500 psi antes de continuar con las operaciones. En temperaturas por debajo de 38 °C (100 °F), es común que el cemento requiera de uno a dos días para desarrollar 500 psi de resistencia. Los aceleradores son útiles para la reducción de la cantidad del tiempo de espera.

Estos aditivos químicos acortan el tiempo de bombeabilidad de la lechada e incrementan la resistencia a la compresión temprana del producto fraguado, disminuyendo el tiempo del equipo de perforación por este concepto.

Bajas concentraciones de aceleradores en el cemento, usualmente se maneja un porcentaje de 2 a 4 % de peso de cemento, acortan el tiempo de fraguado del cemento y promueve el rápido desarrollo de la resistencia. El cloruro de calcio es el producto más usado para este propósito.

3.4.2 Retardadores

Altas temperaturas en la formación están asociadas con el incremento de las profundidades de los pozos. Por ello, necesitan el uso de productos químicos que retarden el tiempo de fraguado de cemento, aumentando el tiempo de bombeo, permitiendo trabajar el cemento en amplios rangos de presión y temperatura. Estos productos químicos proveen el efecto retardador suficiente para permitir el mezclado de la lechada y el desplazamiento dentro del pozo con un margen de seguridad para acontecimientos imprevistos. El más común de los retardadores quizá es el lignosulfonato de calcio. Este es efectivo en temperaturas arriba de 94 °C (200 °F). En la mayoría de las lechadas, se utilizan concentraciones del orden de 0.1 a 1.0 % para predecir tanto el tiempo de espesamiento, como la resistencia a la compresión. Cantidades mayores del 1 % no se deberán agregar para retardar la lechada.

La determinación de la temperatura real en el agujero es un importante aspecto para la selección de los retardadores. Un mapa del gradiente isotérmico proporciona una guía general del área.

3.4.3 Densificantes

Algunas veces, las condiciones en que se encuentra el pozo, requieren aumentar las densidades de las lechadas o tal vez desarrollar lechadas puras. Altas presiones de formación pueden requerir que se aumente la densidad a la lechada de cemento.

Son materiales de alto peso específico y manejan poca agua. Los densificantes comúnmente empleados son la arena y la limadura de fierro (hematita).

La arena es el más atractivo aditivo debido a sus bajos requerimientos de agua. Los dispersantes son aditivos que pueden aumentar la densidad de la lechada. Debido a su efecto en la viscosidad, permite que la lechada se mezcle con menor cantidad de agua y más sólidos.

3.4.4 Reductores de la Densidad

Los reductores de densidad incrementan el rendimiento y reducen la densidad de la lechada. Los reductores tienen la habilidad de manejar grandes volúmenes de agua; esta característica es la que se aprovecha cuando se desean cubrir columnas largas

con cemento, sin llegar a rebasar la presión de fracturamiento, además de reducir la densidad y lograr mezclas más económicas.

La reducción de la densidad se lleva a cabo con la adición de más agua a la lechada y adicionando materiales, como el gel, para impedir la separación de sólidos. El gel se puede usar en concentraciones arriba de un 25 % por peso de cemento. Los requerimientos de agua para el gel son de 5.3 % por cada 1 % de gel. Se pueden usar dispersantes para bajar la viscosidad de la lechada cuando se utiliza 8 % de gel.

Estos productos reducen la resistencia a la compresión inmediata y por lo mismo debe tenerse mucho cuidado al emplearlos para no dosificarlos en concentraciones que den valores de resistencia a la compresión inferiores a los 35 kg/cm², mínimo estimado para cementos con aditivos en 24 horas para soportar la tubería de revestimiento, en operaciones prácticas de campo.

3.4.5 Dispersantes (Reductores de Pérdida de Presión por Fricción)

Son productos que ayudan a obtener, con gastos bajos de bombeo, el régimen turbulento, reduciendo la fricción entre granos y entre éstos y las paredes.

De acuerdo con varias investigaciones realizadas en diferentes países se ha demostrado que la mayor eficiencia en la limpieza del lodo del espacio anular se logra en régimen turbulento; es decir, cuando la lechada de cemento y los colchones de limpieza se desplazan a una velocidad tal que corresponda a un número de Reynolds de 3,000 a 4,000 o mayor, en función de sus características reológicas: n' = índice de comportamiento de flujo y k' = índice de consistencia.

Los dispersantes proporcionan diversas características benéficas para la lechada:

- Reducen la viscosidad de la lechada
- Permiten la turbulencia de la lechada para disminuir los gastos de bombeo
- Ayuda a proporcionar un control sobre la pérdida del filtrado para lechadas densificadas
- Reducen las caídas de presión por fricción, para un gasto constante
- Reducen la presión de bombeo

Se usan comúnmente los lignosulfonatos y polímeros como dispersantes.

3.4.6 Aditivos para la Pérdida de Filtrado

Los agentes para la pérdida de filtrado son usados en las lechadas por las siguientes razones:

- Minimizar la deshidratación del cemento en el espacio anular
- Reducir la migración del gas
- Mejorar la adherencia
- Minimizar el daño a la formación

Los aditivos para el control de filtración en el cemento tienen la misma función que los aditivos usados para el control del filtrado del lodo. Sin embargo, las lechadas de cemento que no contienen estos aditivos presentan altos gastos de filtración que los lodos arcillosos. Una lechada no tratada de un cemento clase H tiene pérdida de filtrado en exceso en 30 minutos de 1,000 cm³. Esto es deseable sólo para delimitar la pérdida de agua de la lechada a las formaciones permeables para minimizar la hidratación de las formaciones que contienen lutitas sensibles al agua, impedir el incremento de la viscosidad durante su colocación, evitar también la formación de obturantes en el espacio anular, los cuáles pueden actuar como un empacador y remover la presión hidrostática deteniendo zonas potenciales de alta presión y reduciendo el gasto de deshidratación mientras el cemento es bombeado dentro de los intervalos perforados para su abandono, estos permiten un largo taponamiento de los intervalos en una sencilla operación. Los más comunes incluyen al látex, bentonita con dispersante, CMHEC y varios polímeros orgánicos.

Los derivados de la celulosa son los aditivos más usados para estos casos. Las concentraciones normales varían de entre un 0.3 a 3.0 % por peso del cemento. Altos porcentajes producen excesivas viscosidades y presentan dificultad para el mezclado en las operaciones de campo.

3.4.7 Controladores de la Viscosidad

Las lechadas puras presentan una viscosidad alta. Por lo que, es deseable reducir la viscosidad de la lechada, de modo que, menor caballaje de bombeo deberá requerirse para la colocación del cemento, reduciendo el gradiente de presión generado por la fricción en el espacio anular. Los aditivos más comunes son: los defloculantes tales como los lignosulfonatos cálcicos, el NaCl y algunos polímeros de cadenas largas.

Los defloculantes reducen la viscosidad de la lechada de cemento de la misma manera que a los fluidos de perforación. Sin embargo, habrá que recordar que los defloculantes actúan como retardadores o también como adelgazantes, aunque existen ciertos polímeros orgánicos que actúan como adelgazantes, sin acelerar o retardar el cemento.

3.4.8 Agentes de Control de la Regresión de la Resistencia a la Compresión

La regresión de la resistencia a la compresión es el abatimiento de la misma en los cementos expuestos a temperaturas mayores de 100 °C (212 °F), la regresión es función de la composición química de los cementos.

Estos agentes evitan la regresión de la resistencia a la compresión por efectos de temperatura. Son silicatos de alto grado de pureza con una textura que va de malla de 100 a 325 para poder tener una distribución grande y homogénea en el cuerpo del cemento; normalmente se dosifican al 35% por peso de cemento y requieren el 40% de agua de su propio peso para una malla 325 y para la 100 no requieren agua.

En pozos geotérmicos con temperaturas mayores (hasta de 315 °C), se emplean harinas de sílice al 50%.

3.4.9 Aditivos Especiales

- *Antiespumantes*

Debido a la velocidad con que se maneja el cemento en el campo cuando se está haciendo la lechada (aproximadamente una tonelada por minuto), el cemento tiende a mantener gran cantidad de aire en la lechada, haciendo que el control de densidad de la misma sea erróneo; así mismo, algunos de los productos químicos ayudan a mantener el aire dentro de la mezcla y dificultan el trabajo de las bombas de alta presión con que se maneja ésta para ser bombeada al pozo.

El problema se minimiza mediante el uso de los agentes antiespumantes, los que eliminan la mayor parte de burbujas de aire. Generalmente, son sales orgánicas ácidas de solubilidad media y se dosifican del 0.2 al 0.3% por peso de cemento.

- *Agentes Expandidores del Cemento Fraguado*

Son aditivos que dilatan el producto hidratado, sin que esto sea originado por efecto de temperatura. Los expandidores más usados, son: cloruro de sodio y el cloruro de potasio.

3.4.10 Aditivos para Impedir la Pérdida de Circulación

Las zonas de pérdida de circulación, durante una cementación se definen como la falta de circulación de la lechada. Esas zonas no deben confundirse con una disminución de volumen, debido a la filtración o del volumen requerido para llenar el pozo. Generalmente, se emplean dos pasos para combatir la pérdida de circulación. El primero, es reducir la densidad de la lechada y el segundo añadir un material de refuerzo o de sellado.

Otra técnica, es añadir N (nitrógeno) al sistema de cemento. Los más usados, son: cemento espumoso, lechadas no acuosas, arena, mica, perlita, fibras, poliéster, etc.

3.4.11 Baches Lavadores y Espaciadores

Durante una operación de cementación de tubería de revestimiento, la lechada de cemento debe desplazar la totalidad del fluido de perforación del espacio anular. Sin embargo, el contacto entre el lodo y la lechada de cemento, generalmente resulta en una masa viscosa imbombeable en la interfase lodo-cemento. En tales casos, se dice que ambos fluidos son incompatibles.

Cuando existe incompatibilidad entre los fluidos que están siendo desplazados en el espacio anular, el fluido desplazante (en este caso la lechada de cemento) tiende a canalizarse a través de la tubería de revestimiento y de la formación. Esto puede conducir a tener un aislamiento insuficiente entre zonas, requiriéndose la realización de operaciones posteriores, tales como cementaciones forzadas para corregir esta anomalía. Para evitar estos problemas, se recomienda el uso de uno o más fluidos intermedios, llamados "baches", los cuales son compatibles con la lechada de cemento y con el fluido de perforación. Estos fluidos bombeados por delante de la lechada de cemento, son diseñados para limpiar el enjarre del lodo mismo del espacio anular, para permitir que exista buena adherencia entre las superficies en contacto y el cemento.

Los “lavadores” son fluidos con una densidad y viscosidad muy cercana a la del agua. Estos actúan adelgazando y dispersando el lodo. Debido a su muy baja viscosidad, son útiles para desplazamiento en flujo turbulento.

La forma más simple de un lavador es el agua dulce, sin embargo, para obtener una mayor eficiencia de adelgazamiento y dispersión, se recomienda los lavadores químicos, los cuales contienen una mezcla de dispersantes que pueden ser: sulfanatos polinoftaleno, linosulfanatos y tanatos. Los surfactantes comúnmente utilizados son no iónicos (ácido graso, ésteres y alcohol etoxilado) y los aniónicos (alkil sulfanatos).

Algunas veces se han utilizado resinas de hidrocarburos en pequeñas concentraciones, las cuales forman un enjarre delgado en la pared de la formación, minimizando las pérdidas de filtrado tanto del lavador como de la lechada de cemento.

Es recomendable agregar cloruro de sodio y de potasio al lavador, para proteger formaciones de arcillas.

Los “espaciadores” son baches con propiedades reológicas y densidades diseñadas cuidadosamente, que permiten un eficiente desplazamiento del lodo.

Cuando se selecciona un espaciador, deben considerarse los siguientes criterios:

- Reología del espaciador y gastos de bombeo
- Compatibilidad lodo-cemento-espaciador
- Características de mojabilidad del espaciador
- Densidad del espaciador y características de suspensión de sólidos
- Tiempo de contacto

Estos fluidos tienen un contenido de partículas sólidas mayor que los lavadores y generalmente son separadores más efectivos para evitar el contacto entre la lechada de cemento y el lodo.

Una de las formas más simples de un espaciador es una lechada de cemento de baja densidad con una pérdida de filtrado baja. La principal desventaja es que normalmente son incompatibles con el fluido de perforación.

Generalmente la mejor remoción del lodo se obtiene si la densidad del espaciador es mayor que la densidad del fluido de perforación, pero menor que la lechada de cemento.

Para densificar el bache se utilizan agentes densificantes de alta densidad, generalmente insolubles, por lo que se requiere incluir en la formulación del espaciador un viscosificante que evite los problemas de sedimentación del densificante.

El régimen de flujo recomendado para un espaciador es el turbulento, debido a que éste provee una mejor remoción del lodo en el espacio anular, sin embargo, debe considerarse que la viscosidad del espaciador deberá ser tan baja como sea posible, para permitir que el flujo turbulento sea alcanzado a bajos gastos.

En algunos casos, los gastos de bombeo necesarios para obtener flujo turbulento no pueden aplicarse, debido a las limitaciones impuestas por el equipo de bombeo disponible, o cuando la presión por fricción resultante pueda presentar un peligro de fractura de la formación recomendándose el flujo laminar. El volumen requerido del fluido espaciador deberá calcularse en base a un tiempo de contacto óptimo de 10 min.

Los aditivos utilizados en la formulación de un espaciador, son:

- Viscosificantes
- Dispersantes
- Agentes para la pérdida de filtrado
- Surfactantes

4.1 CABEZA DE CEMENTACIÓN (Tapón Sencillo)

Para llevar a cabo el desplazamiento del cemento, en el interior de la tubería de revestimiento, es necesario hacer uso de la herramienta que permita hacer una conexión exterior entre la unidad de cementación y la tubería de revestimiento a cementar.

Este diseño ofrece una cabeza de alta presión, como se muestra en la Figura 4.1, con un rango limitado, único con rosca para la conexión con la tubería de revestimiento. Todas las conexiones para la cabeza son del tipo integral (no autógena) con la rosca #8 de ACME protegida con sellos Poly-Pak. El montaje del tapón de cementación debe de estar a la izquierda de la cabeza. La parte interior de la cabeza está maquinada especialmente para permitir igualar la presión alrededor del tapón de cementación. El tapón es colocado durante la cementación por un ensamblador continuo del pasador. Un acoplamiento rápido permite una fácil conexión, mientras la tubería de revestimiento está suspendida. El ensamble completo está maquinado usando una aleación de acero con una trazabilidad de cada componente y con las especificaciones de ASME y API.

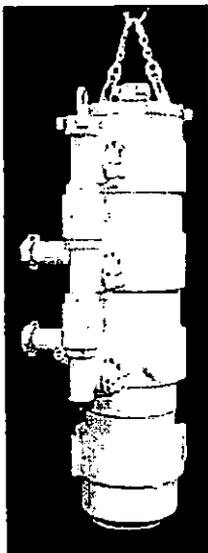


FIGURA 4.1 CABEZA DE CEMENTACIÓN

4.2 CABEZA DE CEMENTACIÓN (Doble Tapón)

Este diseño es el más popular de las cabezas de cementación. El costo es mucho más bajo que el de tipo integral. Los rangos de presión son adecuados. Trabaja con presiones de 5000 psi a través de un diámetro de $9\frac{3}{8}$ " , de 3000 psi por uno de $13\frac{1}{4}$ " , y de 1500 psi a través de uno de 20". Cada cabeza viene equipada con un pasador continuo ensamblado, un múltiple y un acoplador de rápido ensamble. El ensamblaje completo se maquina usando una aleación de acero, de especificación ASME y API.

4.3 CABEZA DE CIRCULACIÓN

La cabeza está diseñada para trabajar a 5000 psi por medio de un diámetro de tubería de revestimiento de $9\frac{3}{8}$ " , de 3000 psi igual que la cabeza de cementación, así como también para las 1500 psi. Esta es una herramienta útil en cualquier equipo. En lugar de desconectar un niple regular de la tubería de revestimiento, esta herramienta permite entrar al agujero de la tubería de revestimiento por medio de la desconexión de la unión. Esto permite correr los tapones de cementación, herramientas de fondo, etc. y eliminar los problemas de enroscamiento.



FIGURA 4.2 CABEZA DE CIRCULACIÓN

4.4 TAPONES DE CEMENTACIÓN DE ALUMINIO

Los tapones de aluminio son más resistentes y confiables en el fondo del pozo, que los tapones convencionales de caucho. Estos tapones permiten el uso de métodos de cementación convencionales con tubería de revestimiento de 16" y 20".

Estos tapones contienen tres copas autocentradoras y unos elementos de limpieza en todo el cuerpo de aluminio. La copa es una pieza única y sus elementos de limpieza son de una elasticidad natural. La presión diferencial a través del tapón hace que los elementos de limpieza se adhieran firmemente a la pared de la tubería de revestimiento para asegurar un buen trabajo de limpieza en su camino hacia el fondo.

El cuerpo de aluminio evita deformaciones por presión en el fondo del agujero y dan un sólido soporte a toda la columna de lechada de cemento o al fluido de perforación. La resistencia de estos tapones eliminan el daño causado por un manejo rudo. En el tapón de fondo todas las copas de caucho y el plato superior tienen un orificio de $3\frac{1}{2}$ " de diámetro y un sólido diafragma de goma en la parte superior de la copa el cual rompe cuando la presión es suficientemente fuerte.

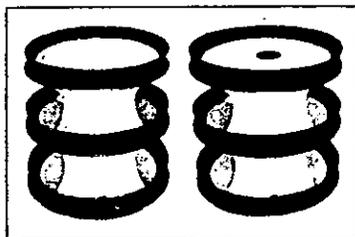


FIGURA 4.3 TAPONES DE CEMENTACIÓN DE ALUMINIO

4.5 TAPONES DE CEMENTACIÓN (Superior e Inferior)

El diseño es el mismo para el tapón superior e inferior. Están provistos de cinco superficies de limpieza.

El diseño de la copa superior e inferior de ambos tapones proporcionan un sello seguro contra la pared de la tubería de revestimiento para prevenir que se mezclen el fluido de perforación y la lechada de cemento. El tapón superior asienta y sella dentro del tapón de fondo para disminuir la posibilidad de adicionar un

desplazamiento de lechada mayor y asegurar una buena adhesión en el fondo de la tubería de revestimiento. El tapón superior tiene un núcleo de plástico moldeado para su fácil perforabilidad.

El núcleo está completamente encapsulado en caucho para prevenir que sea bombeado fuera durante la operación de cementación. Esto asegura la separación de la lechada y el fluido de perforación, en la parte superior.

El tapón de fondo tiene un núcleo hueco de aluminio. Después de que es asentado; la presión adicional causa la ruptura en la cabeza de la parte superior del núcleo permitiendo el flujo de la lechada a través de él.

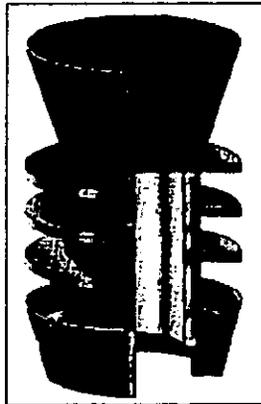


FIGURA 4.4 TAPÓN DE CEMENTACIÓN

4.6 TAPONES DE CEMENTACIÓN DE MADERA

Los tapones son de madera laminada y caucho. El tapón superior es de una sola pieza y de un elemento limpiador tanto en la parte superior como en la inferior.

Los tapones inferiores están contruidos con discos limpiadores tanto en la parte superior como en la inferior. Tiene el mismo diseño que el tapón superior excepto que el núcleo está perforado para permitir el paso de la lechada. El diafragma de caucho que cubre el orificio, está diseñado con un perfil de propiedades físicas controladas, que permiten las operaciones convencionales de bombeo. La presión adicional rompe el diafragma permitiendo el flujo a través de él.

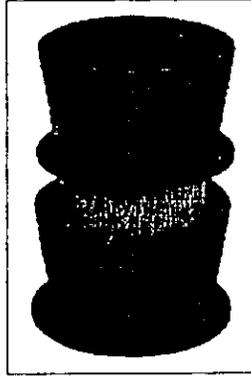


FIGURA 4.5 TAPON DE CEMENTACIÓN DE MADERA

4.7 SEGURO DE FONDO Y DEFLECTOR

Este equipo consiste de un seguro para el tapón de cementación y de un deflector roscado. El deflector está roscado para atornillarse dentro de un cople. El centro del deflector está maquinado para recibir al seguro de fondo. El seguro de fondo está equipado con un sello en forma de anillo y un juego de cuñas. Cuando el tapón es bombeado hacia el fondo seguido de la lechada de cemento hace un ligero cierre en el deflector y las cuñas se cierran firmemente en su sitio. Este equipo es el más ampliamente usado en pozos donde el tapón no puede ser perforado.

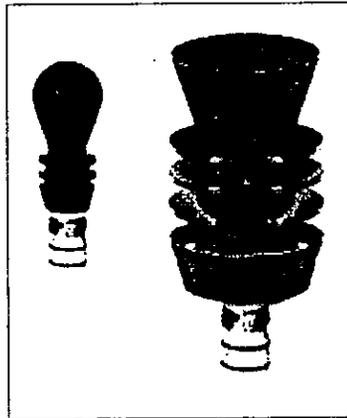


FIGURA 4.6 SEGUROS DE FONDO Y DEFLECTOR

4.8 EQUIPO DE FLOTACIÓN

El equipo de flotación comúnmente se usa en la sección inferior de la tubería de revestimiento para reducir la carga al gancho, permitiendo su flotación. Previene que la lechada de cemento regrese al interior de la sarta. La zapata guía o flotadora dirige la tubería de revestimiento a lo largo del agujero y minimiza la fricción lateral para que pase sin problemas en la secciones desviadas. También provee un asiento para el tapón de desplazamiento.

VÁLVULA FLOTADORA TIPO BOLA

Consiste de una compuerta con su asiento y se instala dentro del cople entre tubo y tubo. Este tipo de válvula se usa donde los requerimientos de resistencia sean moderados; además, su costo es bajo. Los coples de retención con válvula flotadora tipo inserto y zapata con el mismo tipo de válvula están hechos de aluminio.

COPE FLOTADOR

Al igual que la zapata flotadora tiene una válvula que permite el paso en una sola dirección, se coloca uno o dos tramos arriba de la zapata, lo cual permite que el cemento quede abajo del cople. Su función no es únicamente la de tipo flotador, sino que actúa como asiento del tapón de desplazamiento indicando así que la operación de cementación ha terminado.

NARIZ FLOTADORA

Es de un diseño económico para ser usada en pozos poco profundos. La nariz esta hecha de aluminio resistente y es perforable fácilmente.

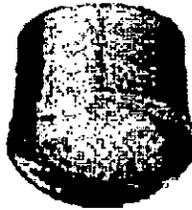


FIGURA 4.7 NARIZ FLOTADORA

ZAPATA GUIA Y NARIZ GUIA

Son de un diseño económico igual para utilizarse en pozos someros, este equipo esta disponible como una zapata completa para colocarse en la parte inferior de la tubería de revestimiento, o como una nariz roscada para colocarse en la unión de la tubería. La zapata guía y la nariz guía están hechas de una aleación de aluminio resistente y son fácilmente perforables.

La zapata es del tipo bola. La bola viajera está hecha de un material de alta densidad para su fortaleza y resistencia a la abrasión, aún cuando estén sujetos a largos períodos de bombeo de estos materiales abrasivos. El descanso de la bola es un arillo de caucho localizado en un disco de aluminio, esta diseñado para tener una salida a la trayectoria de flujo de los fluidos. La zapata flotadora se instala en la parte inferior de la tubería y sirve para guiar la misma dentro del pozo, previniendo que la tubería se encaje en la pared o la descarapele.

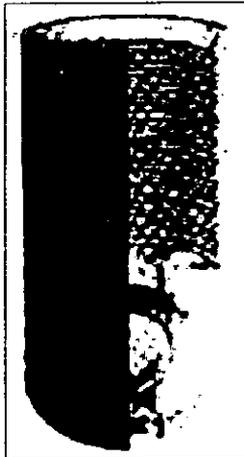


FIGURA 4.8 ZAPATA GUÍA Y NARIZ GUÍA

La zapata del tipo A está diseñada para proteger efectivamente la formación abajo de la zapata, de la contaminación de cemento cuando se expande. El elemento de empaque de caucho, no solamente retiene el cemento arriba de la zapata, sino también asegura un sello entre la tubería de revestimiento y la formación. Esto es particularmente importante por la entrada de agua a los pozos. Ésta se coloca dentro de la tubería de revestimiento y se corre hasta la profundidad deseada para ser cementada. La bola viajera baja y se asienta por gravedad. Entonces la presión de

bombeo se acumula lentamente dentro de la tubería de revestimiento. La presión hace que el pistón interno se mueva hacia abajo, permitiendo que el fluido entre al cilindro exterior.

La presión continua fuerza al fluido detrás del empaque mientras la parte superior del mismo es bajada. Éste expande para sellar contra las paredes del agujero. La presión es de aproximadamente de 500 psi para que los pernos abracen la manga deslizándola. La manga es movida hacia abajo, abriendo el paso al cemento y cerrando el empacamiento en la posición de expansión.

La bola viajera impide que la lechada entre al fondo de la zapata, todas las partes internas de la zapata son fácilmente perforables.

La zapata de cementación del tipo B tiene la misma función que la del tipo A pero además tiene un empaque para las secciones débiles del agujero. Esta construida como una canasta de cementación lineal de caucho montada en un mandril tubular. La canasta consiste de muelles de acero en forma de costillas y con caucho traslapado linealmente. La canasta se cierra cuando se coloca dentro del agujero y se abre por medio de la bola viajera. La zapata se introduce dentro de la sarta y se coloca a la profundidad deseada.

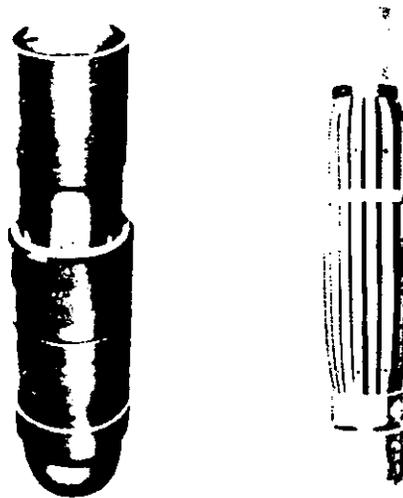


FIGURA 4.9 ZAPATAS DE CEMENTACIÓN TIPO A Y B

PLATO DEFLECTOR

El plato deflector está diseñado para ser colocado entre dos tramos de tubería y para servir como descanso para el tapón de cemento. El plato está hecho de una aleación de aluminio resistente.



FIGURA 4.10 PLATO DEFLECTOR

COPLE FLOTADOR DE BOLA

El cople flotador regular emplea la misma bola y asiento diseñado para la zapata. La bola está en una cámara montada por debajo del asiento. Un adecuado paso al flujo y materiales resistentes a la abrasión aseguran un descanso positivo de la bola.

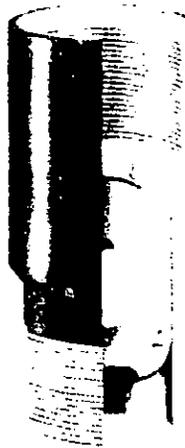


FIGURA 4.11 COPLE FLOTADOR DE BOLA

ZAPATA FLOTADORA TIPO CHARNELA

Está diseñada para usarse cuando el equipo de flotación lo requiera. Este equipo es particularmente ajustable para bajos volúmenes de pozos donde el agujero no está lleno con el fluido anterior a la corrida de la tubería de revestimiento y para usar cuando la circulación se necesita para lavar o acondicionar el agujero para la cementación.

La válvula de aluminio extra fuerte está montada en un disco de aluminio y firmemente asentada en caucho. La válvula de charnela y la válvula de asiento son diseñados para aguantar la acción abrasiva de grandes volúmenes de fluido y proveer un sello firme cuando la válvula está cerrada. La contrapresión sella la válvula de charnela cuando la circulación se detiene.

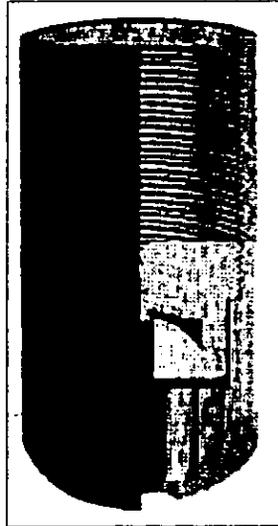


FIGURA 4.12 ZAPATA FLOTADORA TIPO CHARNELA

COPLE FLOTADOR TIPO CHARNELA

La válvula de charnela y la válvula de asiento tienen la misma construcción que en la zapata. El cople puede ser corrido arriba de cualquier zapata guía o zapata flotadora. La circulación a través del cople se puede llevar a cabo en cualquier tiempo asegurando un buen sello cuando está detenida.

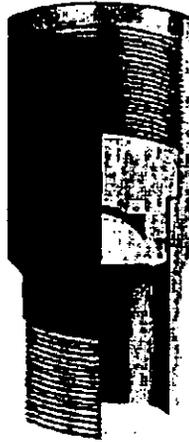


FIGURA 4.13 COPLE FLOTADOR TIPO CHARNELA

ZAPATA FLOTADORA DE LLENADO AUTOMÁTICO

Está construida de una válvula de tipo charnela montada con un orificio de salida de aluminio por un pasador. El orificio de salida sostiene la válvula de charnela abierta y regula el flujo de fluidos dentro de la tubería de revestimiento. El orificio de salida esta diseñado para aceptar una bola viajera la que se proporciona con el equipo. La bola puede ser colocada por medio del bombeo o por gravedad. Cuando la bola se asienta, una presión de bombeo de 300 psi puede forzar a los seguros que sostienen al orificio.



FIGURA 4.14 ZAPATA FLOTADORA DE LLENADO AUTOMÁTICO

COPEL FLOTADOR DE LLENADO AUTOMÁTICO

Tiene el mismo diseño que el cople anterior, pero conteniendo el mismo sistema que la zapata de llenado automático



FIGURA 4.15 COPEL FLOTADOR DE LLENADO AUTOMÁTICO

COPEL DE RETENCIÓN

Es similar al cople flotador en su apariencia externa pero no tiene válvula y sirve sólo para detener el tapón de desplazamiento.

4.9 COPEL DE CEMENTACIÓN MULTITAPAS

Esta herramienta se utiliza cuando se tienen secciones de tubería de gran longitud, yacimientos productores de manera múltiple o cuando el volumen de la lechada de cemento es bastante grande. Su diseño permite conectarse a gran profundidad, ya que su resistencia al colapso y a la tensión es semejante a las tuberías de revestimiento. La herramienta provee un medio de apertura y cierre de orificios para el desplazamiento y contención del cemento.

Todas las partes interiores son fácilmente perforables y están firmemente sujetas para rotarlas durante la perforación. El orificio de la manga se cierra positivamente después de la cementación. Cuando se va a correr el cople se aconseja colocar un

centrador arriba y abajo y para correrlo una canasta de cementación abajo. Después de correr el cople a la profundidad deseada se cementa de manera convencional y el cemento es desplazado con un tapón flexible proporcionado por el cople. Éste se topa contra el deflector el que también es proporcionado. Una baja acumulación de presión del orden de 300-400 psi asegura que el tapón asiente en el deflector. Los orificios en el cople son abiertos para la segunda etapa de cementación y se aplica de 800-1000 psi de presión. La segunda etapa es desplazada con el tapón de cierre el cuál también se provee con la herramienta.



FIGURA 4.16 COPLE DE CEMENTACIÓN MULTIETAPAS

4.10 EQUIPO DE INSERCIÓN

La misma válvula tipo charnela que es usada en el equipo de flotación está disponible en el equipo de inserción, igualmente como en el equipo de llenado automático. Esta unidad de inserción está provisto con una bola viajera la misma

que asienta en orificio de bombeo de salida. Con una presión de 300 psi el pin abrasa el orificio, la bola viajera cae al fondo y la unidad llega a ser operacional en ese momento.



FIGURA 4.17 EQUIPO DE INSERCIÓN

4.11 UNIDAD GIRATORIA DE LA TR

Esta unidad se diseñó para ser usada en forma conjunta con limpiadores de pared rotatorios (raspadores), para impedir la canalización durante la operación de cementación y por la necesidad de realizar un trabajo de cementación forzada, si es el caso. Esta unidad tiene filas de cojinetes de bola con carrera uniformemente espaciada en la cámara de la unidad y cinco arillos igualmente espaciados. El espaciamiento de los cojinetes da la resistencia y estabilidad para vencer la “presión de arrastre”, que se genera cuando la cabeza de cementación, el múltiple y otros equipos montados arriba de la unidad giratoria tienden a inclinarse fuera del centro.

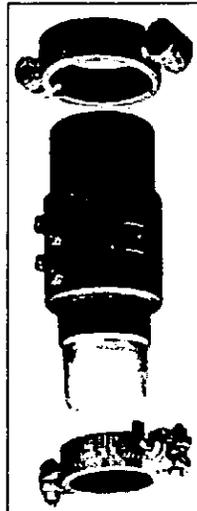


FIGURA 4.18 UNIÓN GIRATORIA

4.12 SISTEMA DE MEZCLADO TIPO JET

Está diseñado para proporcionar y mezclar el cemento seco con el conductor de fluido para proveer un continuo suministro de lechada con las propiedades deseadas. El sistema funciona para lograr una corriente de agua a través de un jet y cruzando una cámara de mezclado dentro de la línea de descarga. La corriente de agua crea un vacío a través de la cámara de mezclado, arrastrando el cemento seco y combinándose dentro de la tolva. El gasto de generación de la lechada y su composición determinan el tamaño del jet a usarse. Este tipo de sistema se fabricará dependiendo de las necesidades y especificaciones del trabajo a realizar.



FIGURA 4.19 SISTEMA DE MEZCLADO TIPO JET

4.13 UNIDAD CEMENTADORA DE ALTA PRESIÓN

Se denomina unidad cementadora, al equipo con el que se prepara o mezcla la lechada de cemento y se bombea al pozo.

Emplean un par de motores diesel de gran capacidad de caballaje, los que proporcionan presiones y gastos requeridos para cada tipo de operación a realizar, consta además de una transmisión mecánica, un par de bombas triplex, un par de presas o cajas de mantenimiento de fluidos, una caja de succión para fluidos mezclados, un mezclador de chorro, comúnmente llamado embudo mezclador, una serie de válvulas de control, las cuales regulan la entrada y salida de los fluidos que se trabajan, medidores de presión y gastos.

La bomba de la derecha (situándose arriba de la unidad y la vista hacia la parte trasera), es la de mezclar. Esta bomba succiona agua de las cajas de la unidad, enviándola al mezclador y a una derivación que sirve para regular la cantidad de agua de mezcla en la lechada y está conectada a un inserto en el "cuello de ganso". Este inserto conduce la lechada del mezclador a la charola, de donde la bomba izquierda la succiona y bombea al pozo.

La preparación o mezcla del cemento también se puede realizar usando la bomba centrífuga para hacer la lechada y desplazarla al pozo con ambas bombas de alta presión. Esto agiliza la operación en tal forma que se dobla el rendimiento de la unidad a manejar un poco más de dos toneladas de cemento por minuto.

Cada unidad cementadora trae todos los accesorios necesarios para conectar ambas bombas al pozo, a tomas de agua y lodo además de las mangueras para dar circulación inversa en el caso que se requiera.

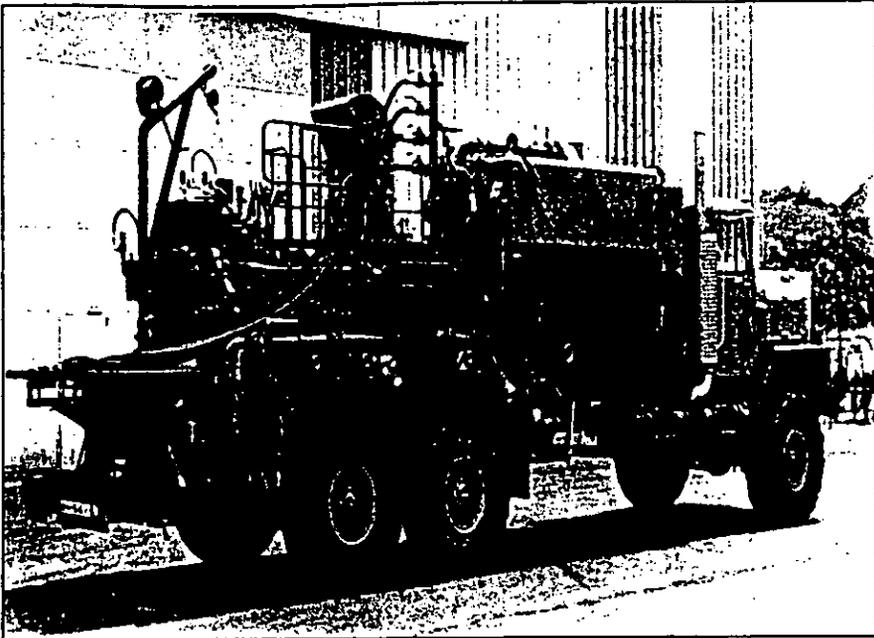


FIGURA 4.20 UNIDAD CEMENTADORA DE ALTA PRESIÓN

4.14 RASPADORES O LIMPIADORES DE PARED

La película de lodo adherida en la pared del agujero deberá eliminarse si es posible, en el intervalo en el cual se va a colocar la lechada de cemento. El enjarre puede eliminarse, circulando agua o un bache limpiador antes de poner el cemento. Pero si el enjarre de lodo es grueso y compacto, será necesario recurrir a métodos mecánicos para desprenderlo.

Existen dos tipos principales de raspadores llamados rotatorios y reciprocantes, esta denominación se debe al tipo de movimiento que debe dársele a la tubería de revestimiento, con el fin de hacerlos trabajar. Los raspadores de tipo reciprocante están diseñados para este trabajo de limpieza.

La doble hilera de escobillas fabricadas de acero al alto carbón, templados en aceite, tiene la forma y flexibilidad necesaria para lograr una perfecta adherencia del cemento. Estos son más efectivos cuando se usan mientras se está bombeando. Tanto los raspadores como los centradores ayudan a la distribución del cemento alrededor de la tubería de revestimiento.

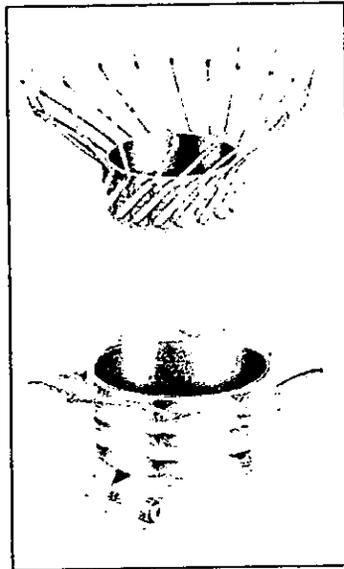


FIGURA 4.21 RASPADORES O LIMPIADORES DE PARED

ESTO NO DEBE
TESTS NO DEBE
ESTA TESTS NO DEBE
SER DE LA BIBLIOTECA
SIN

4.15 CENTRADORES

La uniformidad de la envoltura del cemento alrededor de la tubería de revestimiento determina una gran extensión de un sello efectivo entre la misma y el agujero. Puesto que los agujeros son raramente rectos, la tubería hace contacto generalmente con la pared del pozo en diversos lugares. La desviación del pozo puede variar desde 0° hasta del orden de 70-80 grados. Puede ser influenciada por tan severa desviación el número y espaciamiento de los centradores. Uno de los beneficios de los centradores es que reducen la pegadura de la tubería causada por la presión diferencial. La fuerza de agarre de la tubería de revestimiento contra una sección permeable del agujero es proporcional a la presión diferencial a través de la tubería y al área de la tubería en contacto con el fondo aislándolo de la presión hidrostática por el espesor del enjarre. El diseño de los centradores varía considerablemente, dependiendo de sus propósitos y del vendedor. Por esta razón, las especificaciones las define el API, asegurando los requerimientos de resistencia mínimos. Estos requerimientos están basados en la fuerza de agarre y una fuerza de contención.

Estos dispositivos están contruidos de varios flejes de acero curvados en forma de costillas que van unidos en sus extremos a dos arillos o bandas, los cuales rodean a la tubería de revestimiento. De manera general se clasifican en dos tipos: recto y espiral.

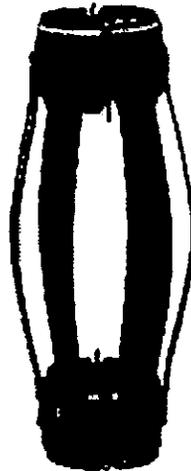


FIGURA 4.22 CENTRADOR

CENTRADOR TIPO RECTO

Se denominan así porque sus ejes siguen una dirección paralela al eje de la tubería. Dentro de este tipo existen dos clases, atendiendo a la forma de los anillos que los limitan, de bisagra y sólidos, los primeros permiten su colocación en los puntos deseados durante la introducción de los tramos de la tubería de revestimiento y los segundos se colocan cuando ésta se encuentra estibada.

CENTRADOR TIPO ESPIRAL

Los flejes de estos centradores tienen una espiral derecha que permite un acomodamiento de la tubería de revestimiento al pasar por las reducciones del agujero debido a la rotación que provoca la espiral.

Los centradores tipo espiral generalmente van soldados a la tubería de revestimiento en el extremo inferior de los tramos, el molleo se controla por medio de pequeños candados en forma de herradura, que soldados a la TR forman un tope al ajustarse en el anillo superior, también existen centradores de bisagra.

4.16 DENSIMETRO

Para que una lechada de cemento pueda tener las propiedades deseadas y esperadas, deberá registrarse la densidad de la misma. Al trabajar un densímetro radiactivo calibrado, que está montado en la unidad cementadora, permite un continuo monitoreo de la densidad de la lechada, pudiendo hacer ajustes a la misma.

Este dispositivo está diseñado para indicar el peso específico de la lechada de cemento o de otros fluidos mediante una curva de densidad, la cual es registrada sobre una carta. En caso de no contar con este dispositivo en la unidad de cementación, se emplea la balanza de lodos con la cual será comprobada la densidad de la lechada manualmente.

4.17 CANASTA DE CEMENTACIÓN

Son usados junto con la tubería de revestimiento o liners en puntos donde el pozo o las formaciones atravesadas que son débiles requieren de ayuda en el soporte de la columna de cemento hasta que este inicia su fraguado. Las canastas se instalan sobre la tubería de revestimiento, usando cualquier cople o abrazadera, para sujetarlas en su lugar. Está construida de muelles flexibles y costillas de acero de un

tipo de aleación especial y de líneas traslapadas de caucho reforzado, dando con esto un efectivo sello para evitar la contaminación de la lechada y del mismo cemento.

La canasta puede ser deslizada sobre la sarta y su posición está determinada por la posición de cada uno de los coples en las partes finales de cada junta.

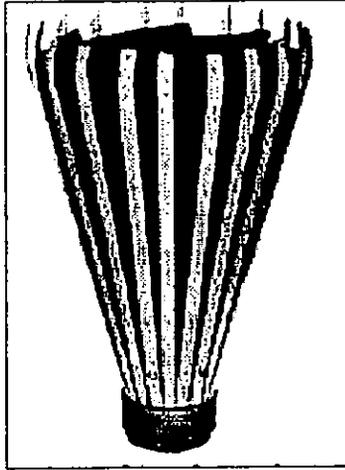


FIGURA 4.23 CANASTA DE CEMENTACIÓN

4.18 TUBERÍA FLEXIBLE (COILED TUBING)

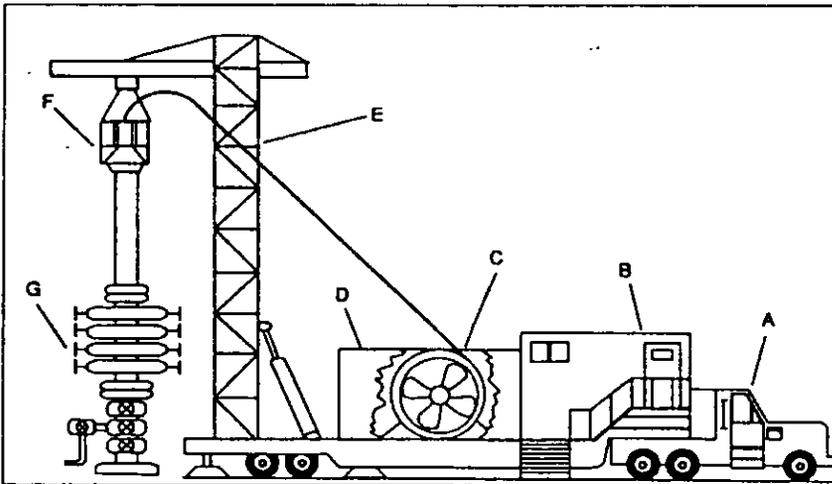
La tubería flexible fue introducida por primera vez para labores de cementación en la Vertiente Norte de Alaska.

El diseño de la unidad de tubería flexible que predomina actualmente en las operaciones en pozos petroleros, tiene su fundamento en que la unidad debe ser de fácil transporte, operada por un sistema hidráulico, capaz de introducir y sacar una sarta continua de tubería dentro del pozo, relativamente inexpandible y para ser utilizada en otras labores que el pozo requiera. Ha sido utilizada para una variedad de propósitos, incluyendo la toma de registros en grandes ángulos, en pozos horizontales, perforación, escariamiento, limpieza, cementaciones forzadas y en la estimulación con ácido.

La tubería flexible es una sarta continua de diámetro nominal del orden de 1.5 ó 1.75 pulgadas, la que está enrollada en un carrete y asegurada para su fácil manejo.

La tubería flexible se usa para las labores de cementación forzada, ya que es una alternativa probada, para los trabajos de reparación de un pozo. La producción excesiva de gas y agua pueden ser controladas, cerrando canales y cerrando las perforaciones no productivas, por medio de la cementación forzada, utilizando para ello la tubería flexible. La tubería flexible es utilizada para cementaciones forzadas en pozos someros o con profundidades, arriba de los 19,000 pies (5,791 m) con temperaturas del orden de 171° C (340° F). Las aplicaciones incluyen:

- Cementación.
- Colocación de tapones de cemento.
- Zonas de abandono.
- Limpieza del pozo.
- Reparación de filtraciones en la tubería de revestimiento.
- Cambio de intervalos.
- Aislamiento.
- Reducción en la producción de gas y agua.
- Taponamiento para abandono.
- Otros



4.24 UNIDAD DE TUBERÍA FLEXIBLE

- A CAMIÓN**
- B CABINA DE OPERACIÓN**
- C CARRETE (CON TUBERIA FLEXIBLE ENROLLADA)**
- D SISTEMA DE POTENCIA**
- E MÁSTIL**
- F CABEZA INYECTORA**
- G COLUMNA DE PREVENTORES**

5.1 CEMENTACION PRIMARIA

Se le da el nombre de cementación primaria a la operación de cementar cualquier tubería de revestimiento o de ademe de un pozo petrolero, la cual consiste en lo siguiente:

- Se deberá acondicionar el lodo de perforación, antes de introducir la tubería de revestimiento. Cuando el pozo lo permita, es recomendable bajar la densidad hasta que la presión hidrostática sea un poco mayor que la del yacimiento.
- Antes de introducir la tubería deberá de verificar su grado, espesor, tipo de rosca, diámetro externo e interno, peso y calibrarla interiormente cuando se encuentra estibada, antes de conectarla. Y tenerse el total de la tubería en el pozo antes de empezar a introducirla.
- Una vez arreglada la tubería de revestimiento con todos sus accesorios y haber definido cuantos tramos de tubería de revestimiento deberán introducirse al pozo y cuantos tramos de TP se usarán para bajarla.
- Se coloca la zapata en el primer tramo de la tubería que se va a introducir al pozo y en la parte superior de éste o en el segundo tramo se coloca el cople de flotación.
- Con la tubería por cementar colocada en el fondo del agujero equipada con sus centradores, zapata y cople de flotación etc. dentro del fluido de control y después de haber circulado de 4 a 5 veces el volumen total de este fluido en el pozo, se colocan los tapones superior e inferior dentro de la cabeza de cementación y ésta a su vez se instala en la tubería de revestimiento.
- Se manda un bache lavador para limpiar el enjarre que dejó el lodo de perforación en el espacio anular y en la pared de la formación.
- Enseguida se suelta el tapón limpiador o de diafragma (tapón inferior) y se bombea por el interior de la tubería para cementar, seguido por un bache espaciador que forma la interfase elástica para barrido de sólidos y para que no se contamine el cemento; seguido por la lechada de cemento diseñada específicamente para esa tubería.

- Una vez bombeado el volumen total de lechada, se suelta el tapón ciego (tapón superior) y se desplaza hacia el espacio anular con un volumen igual a la capacidad de la tubería de revestimiento del fluido desplazante, hasta que el tapón de fondo asiente en el cople de flotación diseñado para esto y posteriormente el tapón superior se coloque arriba del tapón inferior. Con el aumento de la presión en el interior de la tubería de revestimiento y los volúmenes bombeados de cada uno de los fluidos utilizados, se determina que los dos taponos se hayan acoplado. Para entonces el trabajo habrá concluido. Lo anterior se muestra en la Figura 5.1.
- Se procura que la presión final sea mayor que la de desplazamiento, para estar seguro que no quedó cemento dentro de la tubería y coincida con el tiempo calculado para desplazar el segundo tapón.

En todos los trabajos de cementación, es necesario calcular volúmenes y presiones, tales como:

- Volumen de cemento requerido.
- Volumen de agua necesario para la lechada de cemento.
- Volumen de aditivos.
- Presión mínima requerida para desplazar el tapón sólido hasta el equipo de flotación.
- Presión final de la lechada de amarre.
- La presión hidrostática en el espacio anular.

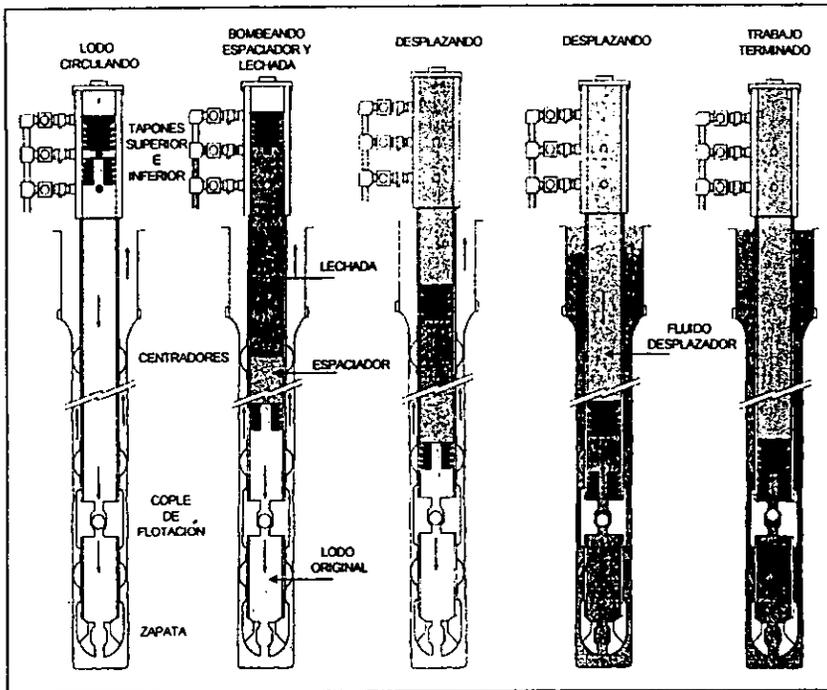


FIGURA 5.1 CEMENTACIÓN PRIMARIA

5.2 CEMENTACIÓN FORZADA

Se define como el proceso de colocar la lechada de cemento, bajo presión, a través de agujeros o disparos en tubería de revestimiento-espacio anular. Cuando la lechada es forzada a entrar en una formación permeable, las partículas de los sólidos se filtran en la cara de la formación y la fase acuosa (filtrado del cemento) entra a la matriz de la formación. Un apropiado diseño del trabajo de una cementación forzada da como resultado un filtrado de cemento que llena las aberturas entre la formación y la tubería de revestimiento. El filtrado forma una capa impermeable sólida. En algunos casos donde la lechada es colocada en intervalos fracturados, los sólidos del cemento deberán desarrollar un filtrado o puente en la fractura.

La cementación forzada tiene muchas aplicaciones durante las fases de perforación y terminación. Las mas comunes se citan enseguida:

- Reparar un trabajo de cementación primaria que tiene canalización o tiene una altura insuficiente en el espacio anular.
- Eliminar la intrusión de agua arriba y abajo del intervalo productor.
- Reducir la relación gas-aceite para aislar las zonas de gas de intervalos de aceite adyacentes.
- Reparar fugas de la tubería de revestimiento por corrosión o tubería ranurada.
- Abandono de zonas improductivas o agotadas.
- Sellar zonas de pérdida de circulación.
- Proteger las zonas productoras de la migración de fluidos.

Actualmente, en las cementaciones forzadas el cemento se prepara con aditivos de control de pérdida de agua y se inyecta a bajo gasto de presiones inferiores a la de fracturamiento de la formación, dando tiempos estáticos para hacer que la lechada expuesta a la zona permeable en los disparos se deshidrate y forme una capa de cemento en cada tiempo estático y así obturar todos los disparos con capas de cemento superpuestas hasta tener una pequeña protuberancia en cada agujero.

Por lo regular se recomienda usar un empacador recuperable con tubería de aluminio de 2" de diámetro, debajo de éste. También debe usarse un colchón de ácido clorhídrico de baja concentración (5 a 10 %) adelante de la lechada, éste se coloca por circulación y se baña la totalidad del intervalo por cementar para que el ácido deshidrate las arcillas de los fluidos de control y de la formación y facilite la inyección de la lechada a baja presión a través de los disparos.

Con un manómetro deberán observarse las presiones registradas en la operación descrita, debido a que la presión de inyección en los tiempos estáticos tenderá a igualarse. Cuando estas dos presiones tengan una diferencia de 100 a 300 psi, será indicativo de que todos los disparos han aceptado cemento y se procederá a descargar lentamente la presión.

El volumen de fluido que regresa se recibirá en el camión cementador para su medición; no debe pasar de 3 bbl; si éste es mayor, se reanudará, como se hizo en un principio hasta lograr una devolución correcta.

A continuación, con el empacador recuperable anclado pero sin empacarse se da circulación inversa lentamente, por el extremo inferior de la tubería de perforación, que estará en la base de los disparos para lavar el exceso de lechada frente al intervalo y no dejar ningún tapón de cemento; una vez circulados de 8 a 10 bbl. Desanclar y salirse del intervalo con 2 ó 3 paradas de tubería para circular inverso a mayor gasto. En esta forma se da por terminada la cementación.

5.3 CEMENTACIÓN DE UNA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA (LINER)

La tubería de revestimiento corta o liner es empleada para ademar la parte descubierta del pozo bajo la última tubería de revestimiento. La tubería corta se extiende desde la profundidad de asentamiento hasta traslapar unos 30 m (100 pies) dentro de la parte inferior de la tubería de revestimiento intermedia.

El liner se ensambla tubo a tubo en la mesa rotaria e introducida dentro del pozo. Se utiliza un equipo de flotación y algunas veces un cople de asentamiento, usado para recibir el tapón limpiador de liner. Los centradores también son un equipo indispensable en la colocación de un liner. Una mejor centralización permite una buena eficiencia de desplazamiento del lodo. Así como también de un colgador el cual tiene un dispositivo de cuñas que fija el liner a la tubería de revestimiento. Se coloca en superficie la cabeza de cementación para liner, la cual consta de un solo tapón.

Una vez que la tubería corta ha sido instalada, después de estar circulando el fluido de control, se lanza un bache lavador (cuando sea posible) y detrás de éste el bache espaciador seguido de la lechada de cemento que ha sido mezclada y bombeada dentro de la tubería de perforación. Después de haber bombeado toda el volumen de la lechada se lanza el tapón. El aumento en la presión en superficie indicará que el tapón está descendiendo. El tapón posteriormente se asentará en el tapón limpiador del liner formando un solo cuerpo el cual asentará en el cople y el posterior aumento de la presión en superficie indicarán la terminación del trabajo. Se levantará la tubería de perforación hasta la parte superior del liner. Entonces el exceso de cemento se regresa por medio de circulación inversa o se permite que frague sobre el

revestimiento, eliminandose después, al limpiarse el interior de la tubería con una barrena. Como se muestra en la Figura 5.2.

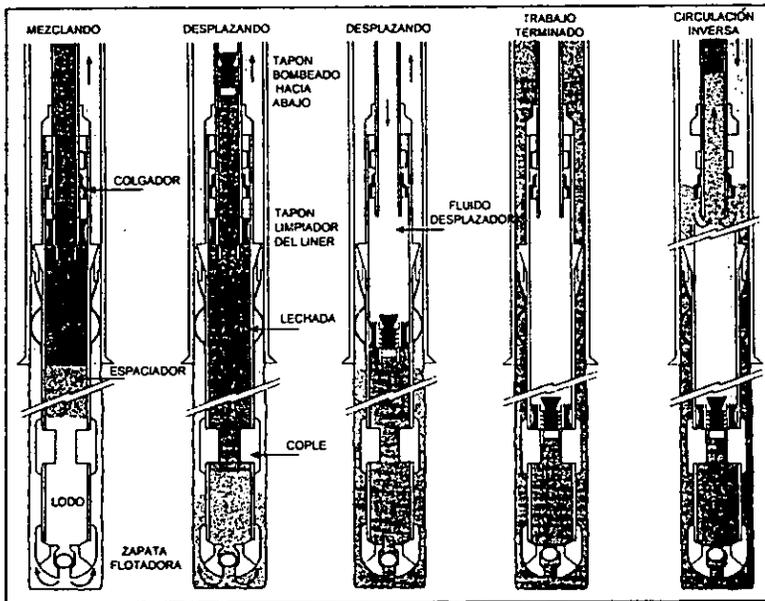


FIGURA 5.2 CEMENTACIÓN DE UNA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA (LINER)

5.4 CEMENTACIÓN DE TAPONES

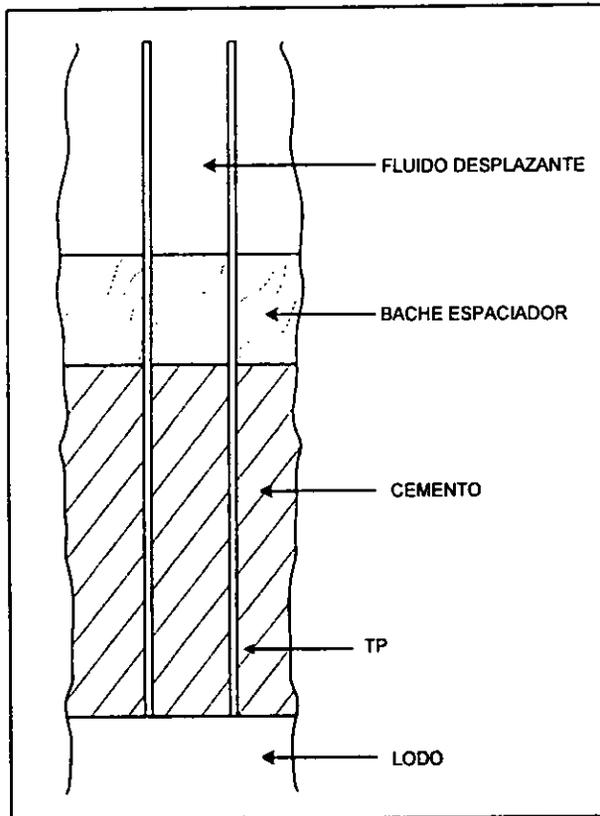
Existen comúnmente tres técnicas para la colocación de tapones:

- Técnica del tapón por columnas balanceadas
- Técnica con cubeta de vaciado (Dump Bailer)
- Técnica de doble tapón

Tapón por Columnas Balanceadas

La técnica más común es la colocación de tapones por columnas balanceadas. La tubería de perforación o de producción se baja hasta la profundidad deseada para la base del tapón. El volumen destinado para el espaciador o bache lavador es bombeado delante y detrás de la lechada para evitar cualquier contaminación del cemento por el lodo. La lechada se mezcla por baches para obtener un mejor control de la densidad y de la reología.

Los volúmenes del espaciador o bache lavador deberán tener alturas semejantes en el espacio anular y en la tubería de perforación o de producción. El desplazamiento se termina hasta alcanzar la profundidad del tapón calculado en la tubería. Esta es una práctica común para desplazamientos pequeños (usualmente para dos o tres barriles) para evitar el refluo del lodo en el piso de la rotaria cuando se esta desconectando la tubería después de la colocación y permitiendo que el tapón alcance un equilibrio hidrostático. Otras veces el tapón es balanceado, cuando la tubería es lentamente sacada del cemento a una profundidad arriba del tapón y después el exceso del cemento es removido con circulación inversa.



FIGUA 5.3 TAPÓN POR COLUMNAS BALANCEADAS

Técnica con Cubeta de Vaciado (Dump Bailer)

Esta técnica coloca el cemento bajando con línea de acero una cubeta de vaciado (Dump Bailer) conteniendo ésta un volumen específico de lechada de cemento. Este dispositivo contiene una válvula de descarga, generalmente de charnela que se coloca arriba del intervalo a taponar. Una vez colocado un tapón retenedor el cual esta compuesto principalmente de cuñas, un mandril tapón y un elemento sellante de hule, se coloca en la tubería de revestimiento para aislar la zona inferior mientras la sección superior se cementa. Entonces el cemento es descargado arriba del tapón retenedor. La ventaja de este método consiste en que la profundidad del tapón del cemento es fácilmente controlable y esto es relativamente barato. La principal desventaja es que la cantidad disponible de lechada se limita al volumen de la cubeta.

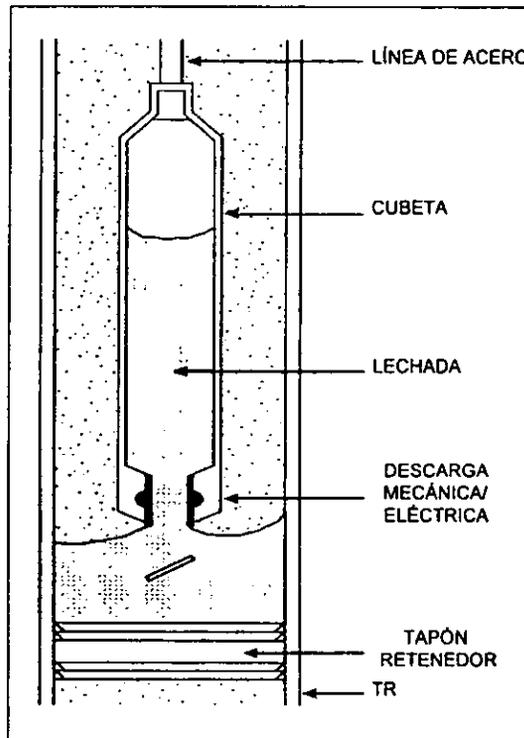


FIGURA 5.4 CUBETA DE VACIADO

Técnica de Doble Tapón

Este método usa una herramienta especial para la colocación de un tapón de cemento en un pozo a una profundidad calculada con una máxima exactitud y una mínima contaminación del cemento.

El tapón de fondo se bombea delante de la lechada de cemento para limpiar la pared de la tubería de perforación y separar al lodo del cemento. El perno de seguridad en el dado del tapón se rompe cuando se incrementa la presión de bombeo y éste es bombeado hacia el fondo a través de una tubería de aluminio. El tapón superior es bombeado detrás de la lechada de cemento para separar del fluido desplazante. Si se observa un incremento de la presión en superficie es indicativo de que el tapón ha llegado a su posición. La tubería de perforación se saca hasta que la parte baja de ésta alcance la profundidad calculada para la cima del tapón del cemento. Terminando así la operación.

5.5 CEMENTACIÓN DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO CORTAS EN AGUJERO REDUCIDO

En una cementación de tubería de revestimiento corta en agujero vertical reducido planeada en una sola etapa, con base a la selección óptima de las condiciones del agujero, como las condiciones de cementación son más severas se debe tener un mayor control en el procedimiento por lo que se pueden aplicar los siguientes pasos:

- Deberá instalarse una línea de circulación inversa, sin importar que se planeé dar circulación inversa una vez que se ha cementado la tubería de revestimiento corta. Esto puede reducir costos, si se presenta alguna falla mecánica.
- Después de introducir los primeros cinco tramos de tubería, deberá bombearse un bache de menor densidad que la del lodo, para asegurarse que el equipo de flotación trabaja satisfactoriamente.
- Deberá calcularse la velocidad de introducción de la tubería de revestimiento corta dentro del pozo. Una regla práctica es de 1.5 a 2 minutos por lingada (3 tramos de tubería) dentro de la tubería de

revestimiento anterior o bien, 2 a 3 minutos por lingada dentro del agujero descubierto.

- Calibrar interiormente la tubería de perforación (TP), es decir, mediante un calibrador adecuado, introduciendo al interior de la misma cuando esta se encuentra estibada, antes de conectarla y verificar que no exista daño o reducción interior de la misma.
- Resulta una buena práctica, tener a un trabajador en las presas de lodo para verificar algún flujo o desplazamiento inusual.
- Circular antes de llegar al fondo, esto es, conectar la línea de llenado y establecer circulación con lodo. Esto puede ayudar a tener un lavado eficiente del fondo, de posible depositación de sólidos.
- Cuando la tubería de revestimiento corta llegue al fondo, circular un mínimo de 6 a 8 horas para limpiar el agujero y acondicionar el lodo a los parámetros reológicos requeridos. Si dichos parámetros no son alcanzados en este período, deberá considerarse un tiempo extra de circulación. Reciprocarse la tubería de revestimiento corta al menos un tramo mientras se circula, para remover recortes de formación y lodo deshidratado de secciones "lavadas" del agujero.
- Se deberá determinar si las propiedades reológicas están dentro del rango óptimo y si la densidad del lodo está variando por gasificación.
- En el caso que se presente gasificación, deberá circularse el tiempo necesario para que todo el de gas sea desplazado del pozo y la densidad del lodo sea homogénea.
- Anclar y soltar la tubería de revestimiento corta, restablecer circulación e iniciar la preparación de los baches espaciador, lavador y del cemento.
- Si se requiere mover la tubería de revestimiento durante la cementación, se recomienda utilizar un colgador rotatorio (sea mecánico o hidráulico) y rotar la misma en vez de reciprocarse.

- Después de que el bache lavador y el bache espaciador han sido bombeados, desplazar la lechada de cemento al más alto gasto posible (previo cálculo, para obtener flujo turbulento) dentro de los límites de presión predeterminados, para evitar la fractura de la formación.
- Si se requiere desalojar algún exceso de cemento, sacar aproximadamente 10 lingadas de TP e iniciar la circulación inversa.
- Sacar totalmente el soltador a la superficie, en espera de fraguado del cemento. Meter la barrena con TP hasta una profundidad arriba de la cima teórica del cemento. Esperar el tiempo de fraguado. Circular a esta profundidad, ya que de este modo, cualquier problema severo de gasificación podría ser controlado de manera segura.
- Bajar lentamente la sarta hasta la cima real de cemento, deberá tenerse cuidado de no atraparse al realizar este paso, ya que comúnmente, el cemento de la cima se encuentra poco consistente.
- Después de rebajar el cemento hasta la boca de la tubería de revestimiento corta, se deberá realizar una prueba hidrostática y/o una prueba diferencial, (de acuerdo a las especificaciones de la tubería de revestimiento utilizada) para determinar que el sello en la boca del liner sea adecuado.
- En el caso de que dicha prueba resulte fallida, la boca del liner deberá recementarse, forzando cemento a través de un retenedor, y posteriormente repetir las pruebas.
- Deberá correrse un registro de adherencia de cemento (CBL) o de calidad de la cementación (CBT) una vez que se haya verificado el interior de la tubería de revestimiento corta hasta el cople de retención o profundidad interior y de esta manera evaluar cualitativamente la cementación.

5.6 CEMENTACIÓN FORZADA CON TUBERÍA FLEXIBLE

En la cementación forzada con tubería flexible los problemas que necesitan ser cuidadosamente considerados incluyen el control y correlación de la

profundidad a la que se trabaja con la TF, control de calidad para pequeños baches de cemento, control de pérdida de fluidos del cemento, procedimientos de prueba, colocación correcta del cemento en la zona de interés y la necesidad de usar retardadores de fraguado que eviten el fraguado dentro del pozo.

Para atacar estos problemas se realizaron diversas pruebas de laboratorio y de campo. Se encontró que mediante la densidad de los fluidos es posible controlar la segregación, esto es, fluidos densos desplazan fluidos menos densos independientemente de su fuerza de gel o viscosidad. Se logró formular un aditivo retardador eficaz que no afectó la resistencia final del cemento.

Un procedimiento para realizar una cementación forzada con tubería flexible es el siguiente:

- Revisar la historia de producción y todos los datos disponibles para determinar tanto el intervalo como la densidad de los disparos, diseñar el cemento y el sistema de lodo de apoyo, hacer pruebas del comportamiento de los aditivos. Establecer una correlación para la profundidad de la tubería flexible.
- Colocar un bache de lodo en el fondo del pozo (el cual sirve de apoyo). Posteriormente se realiza una limpieza en el espacio arriba del lodo y se circulan hacia afuera los contaminantes. Efectuar los disparos. Llenar todo el intervalo de interés con agua y aceite o diesel para remover el gas que se encuentre dentro del pozo.
- Iniciar la inyección de cemento sobre el soporte de lodo. Bombear un bache de agua, el aditivo y desplazar el fluido. Levantar algunos metros la tubería mientras se bombea, mantener la interfase de cemento sobre la nariz inyectora. Sostener la presión (forzada) de cementación durante algún tiempo.
- Cuando el cemento se encuentre inmediatamente abajo de la TF, se comienza a elevar la tubería mientras se bombea el aditivo con una proporción de uno a uno. Manteniendo una baja presión en la formación.

- Eliminar por circulación inversa el cemento mezclado con el aditivo. Continuar limpiando hasta que se eliminen todos los excesos.

5.7 CEMENTACIÓN POR ETAPAS

En la cementación por etapas se emplea una herramienta denominada cople de cementación múltiple que es un juego de camisas deslizables, actúa con un tapón metálico pesado llamado torpedo o bomba, el cual rompe los tornillos de corte y desliza la primer camisa.

La primera etapa se efectúa en forma convencional, después se baja una sarta de tubería de perforación con los posicionadores de las camisas en el extremo inferior y se corre a un punto abajo de la herramienta más profunda. El posicionador para abrir la camisa se mueve hacia arriba cuando se requiere y automáticamente localiza la herramienta más cercana.

Ya localizados los operadores del posicionador de la camisa se enganchan y se cierran dentro de la ranura en la camisa deslizable; sobre la herramienta se aplica una fuerza de tensión de aproximadamente 20,000 libras para la herramienta de 7" o mayores y de 10,000 libras para herramientas menores de 7".

Esta fuerza desenganchará el collar que sujeta la camisa cerrada y moverá la camisa deslizable para exponer los orificios de la camisa y hacerlas coincidir con los orificios de la cubierta exterior. El posicionador de camisa se desengancha de la herramienta automáticamente, cuando la camisa se ha colocado en la posición de completamente abierto. En estas condiciones se hace la operación de cementación.

El posicionador de cierre de camisa, que está localizado aproximadamente a 3 m abajo del posicionador de apertura de camisa, se baja para que automáticamente localice y enganche la camisa deslizable. Se aplica sobre la herramienta un peso de aproximadamente 10,000 libras para herramientas de 7" o mayores y de 5,000 libras para herramientas menores. Esto mueve hacia abajo la camisa de igualación de presión, cubriendo los orificios exteriores, cerrando y metiendo el candado a la camisa deslizable.

Los orificios exteriores permanecerán cerrados hasta que se le aplique a la camisa una fuerza mecánica hacia arriba aproximadamente de 10,000 a 20,000 libras.

El posicionador de la camisa se soltará de la camisa deslizable cuando ésta se coloque en posición de totalmente cerrada. Cuando se sitúe en esa posición, el exceso de cemento será circulado con inversa.

No se debe permitir que el posicionador de apertura de la camisa se mueva abajo del cementador , ya que esto puede reabrir la camisa cuando la tubería de perforación se extraiga.

Existen otras herramientas que sirven para efectuar la cementación por de cementación múltiple, con la cual se pueden hacer el número de cementaciones o etapas que se requieran.

El procedimiento de cementación descrito se seguirá en cada una de las etapas mencionadas.

Para comunicar con el espacio anular el interior de la tubería de revestimiento, procediendo a establecer circulación, efectuando la operación de cementación normal y al llegar el tapón desplazador a la segunda camisa del cople de cementación múltiple desliza dicha camisa sellando los orificios de comunicación, observándose un incremento de presión, lo cual indica que el sello es efectivo.

Con los coples de cementación múltiple se pueden efectuar cementaciones de dos y tres etapas; es similar, sólo que en lugar de un cople se usan dos, el cople superior con diámetro interior mayor que el cople inferior y dos juegos de tapones con torpedos de diámetro apropiado.

5.8 CEMENTACIÓN DE POZOS HORIZONTALES

Clasificación de Pozos Horizontales

Los pozos horizontales son aquellos en los que una parte del pozo está desviada 90° con respecto a la vertical. La técnica de perforación horizontal puede ser subdividida dentro de cuatro grupos, dependiendo del ángulo con

el que se ha construido el pozo: que puede ser de radio largo, medio, corto y ultracorto. Las principales características de este tipo de pozos se muestra en la Figura 5.5.

Radio Largo

En un sistema de radio largo se usa la tecnología de perforación direccional, en el que los incrementos de ángulo van desde 3° a 8° por cada 30 m (100 pies) y dependiendo del alcance, requieren de este incremento para ser desarrollados en dos o tres secciones.

El drenaje de pozos horizontales de radio largo puede ser relativamente grande, con una máxima longitud de 1,220 m (4,000 pies). La perforación de pozos altamente desviados pueden ser o no de "alcance extendido". Éstos son mostrados en la Figura 5.6 generalmente estos pozos se inician a construir de un punto de partida con una desviación de 40° a 50°, seguida por una sección grande de declive y terminar en una sección horizontal dentro del yacimiento. Con la presente tecnología en la perforación de pozos horizontales se logran longitudes de drenaje que exceden los 610 m (2,000 pies), diámetros de 5 ½" a 9 ½", el control vertical no presenta mayor problema en los primeros 5 m (16 pies), cuando son atravesadas formaciones problemáticas y en profundidades verticales mayores a los 3,048 m (10,000 pies).

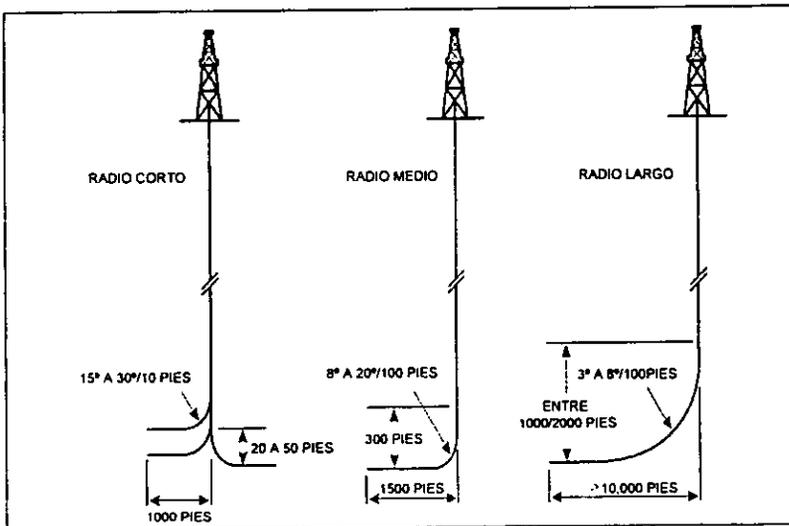


FIGURA 5.5 CLASIFICACIÓN DE POZOS HORIZONTALES

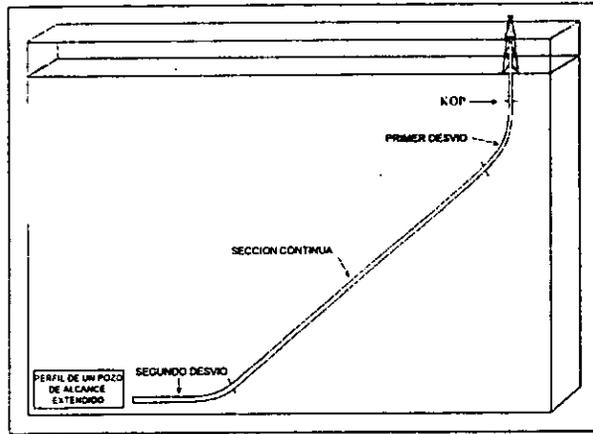


FIGURA 5.6 PERFIL DE UN POZO DE ALCANCE EXTENDIDO

Radio Medio

Para la perforación de un pozo de radio medio se emplea el equipo convencional de perforación modificado y se va desviando a un ritmo de 8° a 20° por cada 30 m (100 pies), aunque ritmos de incremento del orden de 50° por cada 100 pies son teóricamente posibles. El largo de la sección horizontal puede ser de 915 m (3,000 pies) o más. El diámetro es de $5 \frac{1}{2}''$ a $9 \frac{1}{2}''$ igual que en los pozos de radio largo.

Radio Corto

El método de perforación lateral de radio corto tienen un ritmo de incremento del ángulo de entre 1.5° a 3° por pie, permitiendo desviar el pozo desde la vertical hasta la horizontal en menos de 30 m (100 pies). Las penetraciones laterales arriba de 274 m (900 pies) son comunes. Un equipo muy especializado es utilizado, combinándolo con herramientas rotatorias con coples y juntas especiales para lograr articular la tubería. Frecuentemente son perforados múltiples drenes desde la misma vertical del pozo con esta técnica.

Radio Ultracorto

El método de radio ultracorto, utiliza la acción de inyección a chorro a través de una tobera de alta presión montada al final de la tubería flexible orientada.

El ritmo de incremento del ángulo es de 90°/pie; sin embargo, la longitud y el diámetro de cada uno de los agujeros está limitadas de 30 a 60 m y 5 cm, respectivamente. Se pueden perforar más de 10 agujeros de drenes pequeños en el mismo plano en ángulos rectos con respecto a la vertical. Y se conocen como "star jet holes".

Procedimiento de Terminación

En la actualidad, varios agujeros horizontales son terminados sin ser cementados. La sección horizontal generalmente se termina con liner ranurado, liner preperforado o en algunos casos cedazos para el control de la arena. En tales pozos, la roca de la formación debe de ser lo suficientemente compacta para impedir el colapso, particularmente cuando se aproxima el agotamiento. Muy raramente los pozos horizontales pueden ser terminados en agujero abierto sin algún método de revestimiento.

Las tuberías de revestimiento intermedias por lo general se encuentran en la sección altamente desviada, por lo que deben de tener un buen trabajo de cementación. Esto es necesario para protegerlas de la filtración de fluidos y para proveer un aislamiento entre el revestimiento de la parte superior y los intervalos productores de la parte inferior.

Sin embargo, frecuentemente existen ciertos aspectos de producción y terminación de pozos horizontales que determinan dónde se deberá meter una tubería de revestimiento y de forma aislada. Algunos de estos aspectos se listan abajo:

- Cuando en un yacimiento se planea un tratamiento de estimulación en intervalos múltiples.
- Cuando hay problemas para controlar la conificación de gas y agua, las cuales deben ser prevenidas durante la perforación del agujero. Esto da como resultado la pérdida del control direccional ya que esto causaría que el agujero se perfora sin rumbo, o simplemente perforar el casquete de gas antes de entrar en la zona de aceite.

- Cuando un intervalo de producción requiera de una cementación de reparación para impedir la producción de agua indeseada o el avance del gas.

Un ejemplo de un pozo horizontal , cementado y terminado se muestra en la Figura 5.7.

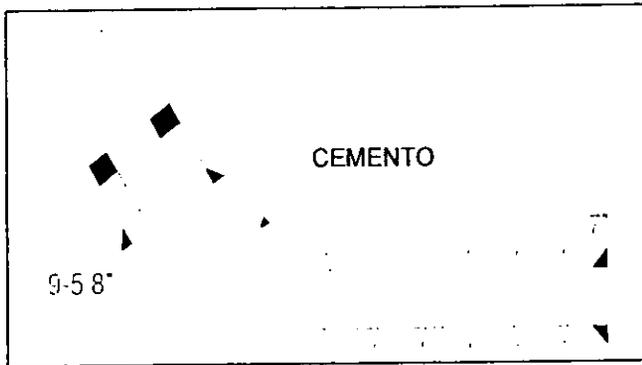


FIGURA 5.7 POZO HORIZONTAL CEMENTADO Y TERMINADO

En el caso de pozos horizontales, las propiedades más importante de la lechada de cemento, son la estabilidad y la pérdida de filtrado.

La estabilidad de la lechada de cemento es siempre importante pero aún más en un pozo desviado. Hay dos propiedades que la determinan: el agua libre y la sedimentación. El agua libre es importante debido a que puede migrar al lado superior del agujero y crear un canal abierto a través del cual los fluidos del pozo puedan fluir y la sedimentación pueda causar un cemento poroso de baja resistencia en la parte superior del pozo. Por consiguiente, deben llevarse a cabo pruebas de laboratorio para asegurarse que no ocurrirá a medida que el ángulo aumenta. El agua libre debe mantenerse en cero y puede prevenirse junto con la sedimentación por medios químicos tales como la adición de agentes viscosificantes y/o sales metálicas que forman hidróxidos complejos.

El control de la pérdida de fluido es particularmente importante en pozos horizontales debido a que la lechada de cemento está expuesta a secciones permeables más largas que en pozos verticales. Los ritmos de pérdida de fluido bajos son necesarios para preservar las propiedades reológicas

cuidadosamente diseñadas de la lechada de cemento. El ritmo de pérdida de fluido siempre debe ser menor a 50 ml/30 min.

Otras propiedades en la lechada de cemento es el control de la densidad y las concentraciones uniformes de aditivos, las cuales son particularmente importantes para asegurar que las propiedades del cemento sean consistentes en todas las partes del intervalo cementado. La lechada de cemento deberá ser mezclada en su totalidad, antes de ser bombeada, siempre que esto sea posible.

Una vez que la lechada de cemento ha sido diseñada, los gastos de flujo deberán ser verificados en un simulador de tipo U. Esto es muy importante para obtener las presiones de poro y fractura de la formación, las cuales no deberán de excederse durante la cementación.

Puntos a Considerar en la Cementación de Pozos Horizontales

Basados en investigaciones y en experiencia de campo, las principales claves para el éxito de una cementación de un pozo horizontal puede resumirse como sigue:

- Prevenir el asentamiento de los sólidos del fluido de perforación
- Optimizar las propiedades de la lechada
- Maximizar la limpieza del espacio anular
- Centrar la tubería de revestimiento
- Circular el lodo
- Reciprocar y rotar la tubería de revestimiento
- Bombear baches compatibles
- Diseñar gastos de desplazamiento para flujo turbulento (sin llegar al límite de la presión de poro y presión de fractura)

La experiencia dentro de la industria confirma que con unas buenas prácticas de cementación y una atención rígida a los detalles especiales de planificación y ejecución de los pozos horizontales. Éstos se podrán cementar con óptimos resultados.

5.9 CEMENTACIÓN DE POZOS MULTILATERALES

Los pozos multilaterales se clasifican en seis niveles fundamentales y secuencialmente cada nivel aumenta su complejidad.

Un pozo de nivel dos se caracteriza porque el pozo principal se cementa convencionalmente y se le coloca un tramo con ventana dentado y ranurado (sin cementar).

Para un pozo de nivel tres el pozo principal se cementa convencionalmente y los pozos secundarios se les coloca cemento o epóxica alrededor de la conexión entre el brazo del pozo y del agujero principal.

Se deberá tener mayor cuidado en el cemento en la conexión del agujero principal y los secundarios ya que éste debe resistir los diferenciales de presión. Este cemento alrededor de la unión y del agujero principal provee estabilidad mecánica e integridad hidráulica. La cementación dependerá mucho del tipo de terminación y del nivel del multilateral.

Para este tipo de pozos se utilizan sistemas de lechadas especialmente diseñadas para desarrollar una buena estabilidad dentro del agujero o para el tipo de trabajo a realizar.

Se debe tener una buena limpieza del agujero para poder correr las tuberías de revestimiento cortas sin dificultad.

Además, la cantidad de agua libre no debe exceder del límite estimado para esta aplicación y que no quede el cemento solo por debajo del revestimiento.

El proceso de cementación, durante su planeación deberá considerar cuidadosamente el método más apropiado para su aplicación, dependiendo si tenemos problemas superficiales de la localización, yacimientos heterogéneos, aguas profundas, presiones anormales, etc., con la nueva tecnología podemos maximizar la exposición del yacimiento con un mínimo de pozos y tener más drene potencial, por lo tanto mayor producción.

Se recomienda un sistema simple de cementación de un solo tapón para la tubería de revestimiento superficial. Un tapón limpiador debe correrse en base al diámetro de la tubería de revestimiento seleccionado. Un sistema de doble

tapón es bastante arriesgado en este tipo de pozos porque está asociado con el paso de los taponos a través de un casquillo interno. Así, sucede para la tubería intermedia o un liner. Por consiguiente, se debe considerar el uso de un estabilizador interno para la operación de cementación, en el caso de que se instale un tramo con ventana.

Ciertas aplicaciones requieren que la tubería de revestimiento o el liner sean rotados durante las operaciones de cementación para maximizar la distribución óptima del cemento alrededor de ésta. Esta rotación no es posible con un equipo convencional porque la orientación de la ventana se perderá. Sin embargo, se dispone de un sistema que permite que la tubería de revestimiento abajo de la ventana sea rotada sin rotar la ventana. Esta técnica involucra el uso de una sarta interna que pase a través de una manga y sea continua para un embrague de la cabeza giratoria abajo de la ventana. Este sistema se aplica en sistemas de alto grado de desviación.

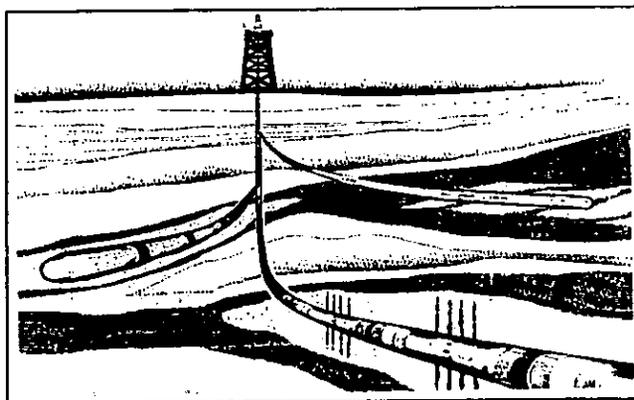


FIGURA 5.8 POZO MULTILATERAL

5.10 CEMENTACIÓN DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO

Este tipo de pozos son producto de las más recientes innovaciones tecnológicas en la industria petrolera. Son pozos del tipo horizontal pero con una sección horizontal mayor, llamados convencionalmente de alcance extendido (extended reach wells). Estos pozos tienen un punto de origen, logrando desarrollar desviaciones del orden de 40° a 50° grados, seguidos por un sección de ángulo constante y por último una sección horizontal dentro del yacimiento. Esta última no necesariamente deberá ser horizontal.

Con la presente tecnología se han desarrollado pozos con un alcance de hasta 10,000 metros con una profundidad vertical de aproximadamente 3,000 metros.

Al igual que los pozos multilaterales como se muestra en la Figura 5.8 se utiliza el mismo principio para la cementación de pozos horizontales, pero con la característica de que en este caso se tendrán mayores distancias con respecto a la vertical para ser cementadas.

El diseño del programa de revestimiento, así como del programa de cementación, deberá tener en cuenta los pesos y grados de las TR's para no tener un mayor impacto en los costos del pozo. Ya que éstas deberán ser diseñadas fundamentalmente para permitir un margen de seguridad para el colapso, debido al peso de las formaciones suprayacentes, reventones y el esfuerzo a la tensión. Razón por la cual el cemento colocado alrededor de la tubería de revestimiento deberá desarrollar una alta resistencia a la compresión.

5.11 CEMENTACIÓN DE POZOS EN AGUAS PROFUNDAS

Cuando los operadores entraron por primera vez a las aguas profundas del Golfo de México (más de 650 m), se sorprendieron por la presencia de arenas no consolidadas entre los 100 y 1,650 m (300 y 5,000 pies) debajo del fondo marino. Estas arenas altamente permeables están ampliamente referidas como flujos de agua somera, debido a que están lo suficientemente geopresionadas para forzar el agua y la arena dentro de los pozos que están a menor presión. Al reportarse por primera vez por la Shell Offshore, en el Golfo de México, tales flujos también habían sido reportados en aguas profundas del oeste de África, del sudeste de Asia y del oeste de las Islas Shetland.

Una falla en el control del flujo de estas aguas someras puede tener graves consecuencias. Los costos económicos pueden variar desde 100,000 USD, en el caso de una cementación forzada, hasta la pérdida total del pozo y de millones de dólares en inversión.

La presencia de estas zonas de flujo de aguas someras, sorprendió a los pioneros en aguas profundas, debido a que el procesado tradicional de datos sísmicos estaba enfocado a localizar posibles formaciones productoras de

hidrocarburos, no a detallar la geología a profundidades someras. Desde entonces, sabiendo qué buscar, las formaciones con flujo de aguas someras se han mapeado mediante la integración de bases de datos sísmicos 2D con 3D y otros datos. Así se puede perforar alrededor de formaciones o localizaciones que más tarde resultarán en trayectorias de pozos, a través de sus secciones más delgadas.

Las característica que define a las formaciones con flujo de aguas someras, es un pequeño margen entre el gradiente de fractura y el gradiente de presión de formación. Como resultado, los operadores se acercan a ellas como posibles zonas con pérdidas de circulación, mediante la colocación de una tubería de revestimiento en la parte superior de la formación, de tal manera que se pueda perforar con un fluido de perforación de menor densidad.

El procedimiento tiene los mismos inconvenientes que otras zonas de presión anormal inesperadas. Por ejemplo, los diseños típicos de tubería de revestimiento en el Golfo de México deben ser alterados para incluir una sarta de tubería de revestimiento intermedia, que de otro forma no sería necesaria. En muchos casos, la perforación sin riser ya no es aplicable, una vez que la sarta extra se ha instalado. El costo resultante de la tubería de revestimiento, el cemento y el tiempo es significativo y casi siempre resulta en una reducción del tamaño de la tubería de revestimiento del diseño óptimo del pozo.

El hecho de conocer la zona problema no es ninguna garantía contra los problemas de perforación que lo causan. Una vez que se asienta la tubería de revestimiento arriba de esa zona, la perforación de la siguiente etapa, especialmente en las secciones extendidas, se torna difícil y el asentamiento y la cementación de la tubería de revestimiento a través de las arenas no consolidadas generalmente es costoso y técnicamente problemático. Tal y como sucede con los fluidos para perforarlas, las lechadas de cemento deben estar balanceadas cuidadosamente entre la presión de fractura y la presión de formación cuando se bombean. Éste es un problema constituido por la química del cemento.

Quando se coloca el cemento, pasa, con el tiempo de la lechada líquida a un estado de endurecimiento, medido en términos de resistencia a la compresión. 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 del cemento se complica más adelante debido a que la historia térmica de la lechada de cemento debe resistir entre la superficie y su destino final, en operaciones en aguas profundas y muy profundas. El proceso de mezclado eleva al cemento a aproximadamente 35 °C (95 °F). Luego se bombea a través de 650 a 1,000 m (2,000 a 3,000 pies) de agua, que en el fondo marino, está dentro de unos cuantos grados del congelamiento. Finalmente, después de que pasa el fondo marino y viaja a través de la tubería de revestimiento y del espacio anular, el gradiente térmico natural de la tierra calienta la lechada cerca de -12 °C (10 °F). En esos casos, las temperaturas son lo suficientemente bajas para extender severamente el tiempo de transición del cemento. En ambientes fríos, la consecuencia, no deseable, es simplemente la de tiempos de espera de fraguado prolongados y posiblemente la de trabajos de cementación forzada a través de la zapata de la tubería de revestimiento. Pero en presencia de una formación geopresionada, todo el trabajo de cementación se puede perder debido a la afluencia de agua (y arena) durante el tiempo extendido de expansión a una presión hidrostática baja.

La meta de las operaciones ha sido, ya sea reducir los efectos del frío sobre el tiempo de transición del cemento, extender los tiempos de transición sobre la presión hidrostática, o ambos. Considerando las estrategias de zonas de pérdida de circulación y de presión de formación reducida las investigaciones de las alianzas de la industria frecuentemente han podido permitir a los expertos fijar su atención hacia los cementos de bajo peso, particularmente cementos espumosos.

En pozos en tierra, el nitrógeno se ha mezclado con las lechadas de cemento durante muchos años para crear cementos de baja densidad para después colocarlos a través de zonas agotadas o depresionadas, de alta permeabilidad. El gas inyectado durante el bombeo, reduce la densidad de la lechada sin reducir la resistencia a la compresión final del cemento ya colocado.

Pero hasta antes del descubrimiento de los fluidos de aguas someros en tirantes de aguas profundas, las dificultades de logística y de costo de la inyección de la lechada de nitrógeno era prohibitiva en el mar. En tierra, el equipo de inyección

de nitrógeno se modeló tomando como base el utilizado en el fracturamiento hidráulico con nitrógeno, a gran escala para aplicaciones costa fuera.

Pero las consecuencias financieras de los flujos de agua somera no controlados, junto con los beneficios probados de la espuma, han convencido a las compañías operadoras y de cementación de llegar a romper la barrera logística. Las unidades de mezclado de nitrógeno han reducido su tamaño para ajustarse a las restricciones de espacio de las plataformas marinas. El equipo también ha sido rediseñado y dimensionado en forma segura para los gastos de flujo mucho menores que se manejan con los cementos espumosos.

Paralelo a los beneficios de utilizar un cemento de baja densidad en formaciones no consolidadas, el nitrógeno proporciona al cemento otras características físicas propias de todos los gases (compresibilidad y expandibilidad). Esto significa que durante la etapa de transición del cemento, en la cual la presión hidrostática normalmente se abate, el gas mezclado se expande, contrarrestando la mayoría de los efectos gelantes.

5.12 EJEMPLOS DE CÁLCULO

CÁLCULOS DE LA CEMENTACIÓN DE UNA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO DE 13 3/8". LA CEMENTACIÓN SERA EN DOS ETAPAS POR MEDIO DE UN COUPLE DE CEMENTACIÓN MÚLTIPLE.

Primera Etapa

Datos

Profundidad del pozo: 2500 metros

Diámetro de barrena: 17 ½ pg

Tubería de revestimiento 13 3/8 pg, N-80, 77 lb/pie

Diámetro interno de la tubería de revestimiento: 12.275 pg

Altura del cemento en el espacio anular a 1400 m (1100 m)

Tipo de cemento "G" con los siguientes aditivos:

0.5 % CFR - 2 (densificante) $\rho = 1.32 \text{ gr/cm}^3$

0.4 % HALLAD 22-A (reductor de filtrado) $\rho = 1.32 \text{ gr/cm}^3$

0.1 % HR-12 (retardador) $\rho = 1.22 \text{ gr/cm}^3$

Requerimiento de agua: 18.92 lts/saco (5 gal/saco)
 Distancia del cople de retención a la zapata: 27 m
 Densidad de la lechada: 1.9 gr/cm³ (15.8 lb/gal)
 Tubería de revestimiento anteriormente cementada: K-55, 20 pg De y 19.124 pg Di a 500 m
 Gasto de desplazamiento: 8 bbl/min

Solución:

1.- Cálculo de la capacidad anular entre el agujero y la tubería de revestimiento de 13 3/8"

$$\begin{aligned} \text{Cap An 1} &= 0.5067 (D_a^2 - D_t^2) \\ &= 0.5067 (17.5^2 - 13.375^2) \\ &= 64.54 \text{ lts/m} \end{aligned}$$

2.- Cálculo de la tubería de revestimiento

$$\begin{aligned} \text{Cap An 2} &= 0.5067(12.275^2) \\ &= 76.34 \text{ lts/m} \end{aligned}$$

3.- Cálculo del volumen anular

$$\begin{aligned} V_{an} &= \text{Cap An 1} \times \text{longitud} \\ &= 64.54 \times (2500 - 1400) \\ &= 70994 \text{ lts} = 70.994 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

4.- Cálculo del volumen entre el cople de retención y la zapata

$$\begin{aligned} V_{TR} &= \text{Cap An 2} \times \text{Distancia cople - zapata} \\ &= 76.34 \times 27 \\ &= 2061.18 \text{ lts} = 2.061 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

5.- Cálculo del volumen total de lechada

$$\begin{aligned} V_{TOT} &= V_{an} + V_{TR} \\ &= 70.99 + 2.061 \\ &= 73051 \text{ lts} = 73.051 \text{ m}^3 \text{ de lechada} \end{aligned}$$

6.- Cálculo del rendimiento de la lechada

$$\text{Rendimiento} = \frac{V_{\text{CEMENTO}} + V_{\text{AGUA}} + V_{\text{ADITIVOS}}}{\text{Saco de cemento}}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{\frac{50}{315} + \frac{50 \times 0.44}{1.0} + \frac{50 \times 0.005}{1.32} + \frac{50 \times 0.004}{1.32} + \frac{50 \times 0.001}{1.22}}{\text{Saco de cemento}}$$

$$= 38.25 \text{ lts/saco de cemento}$$

7.- Cantidad de sacos del cemento

$$\text{N}^\circ \text{ de sacos} = \frac{\text{Volumen total de lechada}}{\text{Rendimiento del cemento}}$$

$$= \frac{73051 \text{ lts}}{38.25 \text{ lts / saco}} = 1910 \text{ sacos de cemento}$$

$$\text{Tonelaje de cemento} = 1910 \text{ sacos} \times \frac{50 \text{ kg}}{\text{saco}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$= 95.5 \text{ Toneladas de cemento}$$

8.- Volumen de agua necesario para preparar la lechada

$$\begin{aligned} V_{\text{AGUA}} &= \text{N}^\circ \text{ Sacos} \times \text{Requerimiento de agua/saco} \\ &= 1910 \text{ saco} \times 18.92 \text{ lts/saco} \\ &= 36137.2 \text{ lts} = 36.137 \text{ m}^3 \text{ de agua} \end{aligned}$$

9.- Volumen de lodo para desplazar el cemento

$$\begin{aligned} V_{\text{LODO}} &= \text{Capacidad de la T.R.} \times \text{Profundidad del cople} \\ &= 76.34 \text{ lts/m} \times (2500 - 27) \text{ m} \\ &= 188788.8 \text{ lts} = 188.788 \text{ m}^3 = 1187.35 \text{ bbl} \end{aligned}$$

10.- Tiempo requerido para desplazar el cemento

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de desplazamiento} &= \frac{V_{\text{LOJO}}}{\text{Gasto de la bomba}} \\ &= \frac{1187.35 \text{ bbl}}{8 \text{ bbl / min}} = 148.4 \text{ min aprox. 2 hrs y media} \end{aligned}$$

Segunda Etapa

Datos

Profundidad del cople de cementación múltiple: 1300 m
 Altura del cemento en el espacio anular a 450 m (850 m)
 Tipo de cemento "G" con los siguientes aditivos:

0.5 % CFR - 2 (densificante) $\rho = 1.32 \text{ gr/cm}^3$
 0.4 % HALLAD 22-A (reductor de filtrado) $\rho = 1.32 \text{ gr/cm}^3$

Densidad de la lechada: 1.9 gr/cm^3 (15.8 lb/gal)
 Gasto de desplazamiento: 9 bbl/min

Solución:

1.- Cálculo de la capacidad anular entre TR's de 20 pg y 13 3/8 pg

$$\begin{aligned} \text{Cap An 3} &= 0.5067 (D_a^2 - D_t^2) \\ &= 0.5067 (19.124^2 - 12.275^2) \\ &= 108.96 \text{ lts/m} \end{aligned}$$

2.- Cálculo del volumen anular (es el total de lechada)

$$\begin{aligned} V_{\text{an}} &= \text{Cap An 1} \times \text{longitud} + \text{Cap An 3} \times \text{longitud} \\ &= 64.54 \times (1300 - 500) + 108.96 \times 50 \\ &= 57080 \text{ lts} = 57.08 \text{ m}^3 = \text{Volumen total de lechada} \end{aligned}$$

3.- Cálculo del rendimiento de la lechada

$$\text{Rendimiento} = \frac{V_{\text{CEMENTO}} + V_{\text{AGUA}} + V_{\text{ADITIVOS}}}{\text{Saco de cemento}}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{\frac{50}{3.15} + \frac{50}{1.0} \times 0.44 + \frac{50 \times 0.009}{1.32}}{\text{Saco de cemento}}$$

$$= 38.21 \text{ lts/saco de cemento}$$

4.- Cantidad de sacos del cemento

$$\text{N}^\circ \text{ de sacos} = \frac{\text{Volumen total de lechada}}{\text{Rendimiento del cemento}}$$

$$= \frac{57080 \text{ lts}}{38.21 \text{ lts/saco}} = 1494 \text{ sacos de cemento}$$

$$\text{Tonelaje de cemento} = 1494 \text{ sacos} \times \frac{50 \text{ kg}}{\text{saco}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$= 74.7 \text{ Toneladas de cemento}$$

5.- Volumen de agua necesario para preparar la lechada

$$\begin{aligned} V_{\text{AGUA}} &= \text{N}^\circ \text{ sacos} \times \text{Requerimiento de agua/saco} \\ &= 1494 \text{ saco} \times 18.92 \text{ lts/saco} \\ &= 28266.48 \text{ lts} = 28.26648 \text{ m}^3 \text{ de agua} = 177.77 \text{ bbl} \end{aligned}$$

6.- Volumen de lodo para desplazar el cemento

$$V_{\text{LODO}} = \text{Capacidad de la T.R.} \times \text{Profundidad del cople de cementación múltiple}$$

$$\begin{aligned} &= 76.34 \text{ lts/m} \times 1300 \text{ m} \\ &= 99242 \text{ lts} = 99.242 \text{ m}^3 = 624.163 \text{ bbl} \end{aligned}$$

7.- Tiempo requerido para desplazar el cemento

$$\text{Tiempo de desplazamiento} = \frac{V_{\text{LODO}}}{\text{Gasto de la bomba}}$$

$$= \frac{624.163 \text{ bbl}}{9 \text{ bbl/min}} = 69.35 \text{ min.}$$

CÁLCULOS PARA LA CEMENTACIÓN PRIMARIA DE UNA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EN UN POZO PETROLERO CON LOS DATOS SIGUIENTES:

- Profundidad del pozo = 950 m
- Diámetro de barrena = 22 pg
- Tubería de revestimiento a cementar 16 pg, J-55, 84 lb/pie
- Diámetro interno de la T.R. = 15.01 pg.
- Altura del cemento en el espacio anular = a superficie
- Porcentaje de exceso de cemento = 100 %
- Tipo de cemento A (sin aditivos)
- Rendimiento del cemento = 39.23 lts/saco
- Requerimiento de agua = 23.36 lts/saco
- Distancia cople de retención - zapata = 20 m.
- Densidad de la lechada = 1.87 gr/cm³
- Tubería de revestimiento anteriormente cementada de 24 pg a 50 m
- Diámetro interno de la tubería de revestimiento de 24 pg = 23 pg
- Gasto de desplazamiento = 7 bbl/min

Solución:

1.- Cálculo de la capacidad anular entre el agujero y la tubería de revestimiento de 16"

$$CAPAN1 = 0.5067 (Da^2 - Dt^2)$$

$$CAPAN1 = 0.5067 (22^2 - 16^2)$$

$$CAPAN1 = 115.52 \text{ lts/m}$$

2.- Cálculo de la capacidad anular entre tubería de revestimiento de 24 pg y la tubería de revestimiento de 16 pg

$$CAPAN2 = 0.5067 (23^2 - 16^2)$$

$$CAPAN2 = 138.33 \text{ lts/m}$$

3.- Cálculo de la capacidad de la tubería de revestimiento de 16"

$$CAPAN3 = 0.5067 (15.01^2)$$

$$CAPAN3 = 114.16 \text{ lts/m}$$

4.- Cálculo del volumen anular

$$\begin{aligned} \text{VAN} &= \text{VAN1} + \text{VAN2} \\ \text{VAN} &= (\text{CAPAN1} \times \text{Longitud}) + (\text{CAPAN2} \times \text{Longitud}) \\ \text{VAN} &= (115.52 \times 900) + (138.33 \times 50) \\ \text{VAN} &= 110,884.5 \text{ LTS} = 110.884 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

5.- Cálculo del volumen entre cople - zapata

$$\begin{aligned} \text{VTR} &= \text{CAPAN3} \times \text{Distancia cople - zapata} \\ \text{VTR} &= 114.16 \times 20 \\ \text{VTR} &= 2283 \text{ lts} = 2.283 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

6.- Cálculo del volumen total de lechada

$$\begin{aligned} \text{VTOT} &= \text{VAN} + \text{VTR} \\ \text{VTOT} &= 110.884 + 2.283 \text{ m}^3 \\ \text{VTOT} &= 113.167 \text{ m}^3 = 113167 \text{ lts} \end{aligned}$$

7.- Volumen de lechada mas exceso

$$\begin{aligned} \text{VTOTAL} &= 113167 + 113167 \\ \text{VTOTAL} &= 226334 \text{ lts de lechada} \end{aligned}$$

8.- Cantidad de sacos del cemento

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ \text{ de sacos} &= \frac{\text{Volumen total de lechada}}{\text{Rendimiento del cemento}} \\ &= \frac{226334 \text{ lts}}{39.23 \text{ lts / saco}} = 5769 \text{ sacos de cemento} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tonelaje de cemento} &= 5769 \text{ sacos} \times \frac{50 \text{ kg}}{\text{saco}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \\ &= 288.47 \text{ Toneladas de cemento} \end{aligned}$$

9.- Volumen de agua necesario para preparar la lechada

Volumen de agua = N° de sacos x Requerimiento de agua/saco

Volumen de agua = 5769 sacos x 23.36 lts/saco = 134186 lts

Volumen de agua = 134.186 m³

10.- Volumen de lodo para desplazar el cemento

VLODO = Capacidad de la tubería de revestimiento x Profundidad
cople

VLODO = 114.16 lts/m x 930 m = 106168 lts = 106.168 m³ = 667.71
bbl

11.- Tiempo requerido para desplazar el cemento

$$\text{Tiempo de desplazamiento} = \frac{\text{V LODO}}{\text{Gasto de la bomba}}$$

$$\text{Tiempo de desplazamiento} = \frac{667.7 \text{ bbl}}{7 \text{ bbl / min}} = \text{aprox. } 96 \text{ min}$$

EJEMPLO DE CÁLCULO DE CEMENTACIÓN DE UNA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA (LINER)

Calcular la cementación de una tubería de revestimiento corta (liner) para un pozo petrolero con los siguientes datos:

- Profundidad del pozo = 5500 m
- Diámetro del agujero = 9 ½ pg
- Traslape del liner = 200 m
- Tubería de revestimiento anterior 10 ¾ pg, P-110, 60.7 lb/pie a 3000m
- Diámetro interno de la tubería de revestimiento de 10 ¾ pg = 9.66 pg
- Tubería de revestimiento corta de 7 5/8 pg, V-150, 39 lb/pie
- Diámetro interno de la tubería de revestimiento corta = 6.625 pg
- Tubería de perforación de 5 pg , 19.5 lbs/pie
- Diámetro interno de la tubería de perforación = 4.276 pg
- Rendimiento del cemento = 38 lts/saco
- Requerimientos de agua = 17.8 lts/saco
- Distancia cople de retención - zapata = 20 m

- Gasto de la bomba = 5 bbl/min
- Porcentaje de exceso de cemento = 90%

Solución:

1.- Capacidad interior de la tubería de perforación

$$\begin{aligned} \text{CAPTP} &= 0.5067 (D_i^2) \\ \text{CAPTP} &= 0.5067 (4.276^2) \\ \text{CAPTP} &= 9.26 \text{ lts/m} \end{aligned}$$

2.- Capacidad interior del liner

$$\begin{aligned} \text{CAPLIN} &= 0.5067 (D_i^2) \\ \text{CAPLIN} &= 0.5067 (6.625^2) \\ \text{CAPLIN} &= 22.23 \text{ lts/m} \end{aligned}$$

3.- Capacidad anular liner-agujero

$$\begin{aligned} \text{CAPLA} &= 0.5067 (D_a^2 - D_{tr}^2) \\ \text{CAPLA} &= 0.5067 (9.5^2 - 7.625^2) \\ \text{CAPLA} &= 16.27 \text{ lts/m} \end{aligned}$$

4.- Capacidad anular liner-tubería de revestimiento

$$\begin{aligned} \text{CAPLT} &= 0.5067 (9.66^2 - 7.625^2) \\ \text{CAPLT} &= 17.82 \text{ lts/m} \end{aligned}$$

5.- Volumen anular liner-agujero

$$\begin{aligned} \text{VANLA} &= \text{CAPLA} \times \text{Longitud} \\ \text{VANLA} &= 16.27 \times (5500 - 3000) \\ \text{VANLA} &= 16.27 \times (2500) \\ \text{VANLA} &= 40675 \text{ lts} = 40.675 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

6.- Volumen anular entre liner y tubería de revestimiento

$$\begin{aligned} \text{VANLT} &= \text{CAPLT} \times \text{Traslape del liner} \\ \text{VANLT} &= 17.82 \times 200 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{VANLT} = 3564 \text{ lts} = 3.564 \text{ m}^3$$

7.- Volumen entre cople-zapata

$$\text{VCZ} = \text{CAPLIN} \times \text{Distancia cople-zapata}$$

$$\text{VCZ} = 22.23 \times 20$$

$$\text{VCZ} = 444 \text{ lts} = 0.444 \text{ m}^3$$

8.- Volumen total de lechada

$$\text{VT} = \text{VANLA} + \text{VANLT} + \text{VCZ}$$

$$\text{VT} = 40.675 + 3.564 + 0.444$$

$$\text{VT} = 44.683 \text{ m}^3$$

9.- Volumen total de lechada con porcentaje de exceso

$$\text{VTL} = \text{VT} \times \% \text{ de exceso}$$

$$\text{VTL} = 44.683 \times (1.9)$$

$$\text{VTL} = 84.9 \text{ m}^3 = 84900 \text{ lts}$$

10.- Número de sacos de cemento

$$\text{N}^\circ \text{ sacos} = \text{VTL} / \text{Rendimiento del cemento}$$

$$\text{N}^\circ \text{ sacos} = 84900 / 38$$

$$\text{N}^\circ \text{ sacos} = 2234 \text{ sacos}$$

11.- Tonelaje de cemento

$$\text{TON} = \text{N}^\circ \text{ sacos} \times 50 \text{ kg/saco} \times 1 \text{ ton} / 1000$$

$$\text{TON} = \frac{2234}{1000} \times 50$$

$$\text{TON} = 111.7 \text{ Toneladas de cemento}$$

12.- Volumen de agua necesario para preparar la lechada

$$\text{VAG} = \text{N}^\circ \text{ de sacos} \times \text{Requerimientos de agua}$$

$$\begin{aligned} VAG &= 2234 \times 17.8 \\ VAG &= 39765 \text{ lts} \\ VAG &= 39.765 = 40 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

13.- Volumen de lodo para desplazar el cemento

$$\begin{aligned} \text{VLODO} &= \text{Volumen de tubería de perforación} + \text{volumen de liner} \\ \text{VLODO} &= (\text{CAPTP} \times \text{Longitud}) + (\text{CAPLIN} \times \text{Longitud}) \\ \text{VLODO} &= (9.26 \times 2800) + 22.23 (2700-20) \\ \text{VLODO} &= 85500 \text{ lts} = 85.5 \text{ m}^3 = 538 \text{ bbl} \end{aligned}$$

14.- Volumen de lodo bombeado para verificar acoplamiento de tapones

$$\begin{aligned} \text{VLTAP} &= \text{Volumen de lodo en la tubería de perforación} \\ \text{VLTAP} &= 9.26 \times 2800 \\ \text{VLTAP} &= 25928 \text{ lts} = 25.928 \text{ m}^3 = 163 \text{ bbl} \end{aligned}$$

15.- Altura del cemento en el espacio anular al terminar la cementación

$$\begin{aligned} H &= \text{VTL} - \text{VCZ} - \text{VANLT} - \text{VANLA} \\ H &= 84900 - 444 - 3564 - 40675 \\ H &= 40217 \text{ lts} \\ \text{HC} &= H/\text{Capacidad anular TP o TR} \\ \text{HC} &= \frac{H}{(0.5067(9.66^2 - 5^2))} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{HC} &= 40217 \text{ lts} / 34.61 \text{ lts/m} \\ \text{HC} &= 1162 \text{ m arriba de la boca del liner} \end{aligned}$$

16.- Tiempo necesario para desplazar el cemento

$$\text{TIEMPO} = \text{Volumen de lodo/Gasto de la bomba}$$

$$\text{TIEMPO} = \frac{538 \text{ bbl}}{5 \text{ bbl/min}} = 107 \text{ min}$$

6.1 INTRODUCCIÓN

Hace más de medio siglo se introdujo el registro eléctrico de pozos en la industria petrolera. Desde entonces, se han desarrollado y utilizado, en forma general, mucho más y mejores dispositivos de registro.

A medida que la ciencia de los registros avanzaba, también lo hacía el arte de la interpretación de datos. Hoy en día, el análisis detallado de un conjunto de perfiles cuidadosamente elegido, provee un método para derivar e inferir datos seguros sobre la evaluación de la calidad de los cementos en la industria petrolera.

Se han escrito cientos de artículos técnicos que describen los diferentes métodos de registro, su aplicación y su interpretación. Esta abundante literatura es abrumadora en cuanto a contenido y frecuentemente, inaccesible para los usuarios comunes de registros de pozos.

Por lo tanto, este trabajo presenta una breve reseña de estos métodos de la toma de registros para poder evaluar la calidad de los cementos y de algunas técnicas de interpretación.

Se espera que este documento sea útil como consulta para cualquier persona interesada en la evaluación de los cementos. Para aquéllos que estén más interesados en material más detallado, pueden consultarse las referencias que aparecen al final del trabajo, así como otra literatura al respecto.

La evaluación de los cementos dio comienzo con el cálculo de las cimas del cemento. Este cálculo suponía la medida del agujero y la no canalización de cemento a través del lodo de perforación. Los calibradores no estaban disponibles en ese tiempo. A mediados de los años 30's, el uso de registros de temperatura para determinar la cima del cemento fueron totalmente documentados en las revistas técnicas de la época. Corriendo apropiadamente los registros se puede identificar la cima del cemento, no así su distribución.

Los trazadores radiactivos se corrieron a finales de los años 30's para determinar las cimas del cemento. La carnotita se mezclaba en la línea de conducción de la lechada y las cimas eran determinadas con un registro de rayos gamma. Los levantamientos de los trazadores tuvieron las mismas limitaciones que los registros de temperatura sólo que éstos no eran sensibles al tiempo.

El registro acústico de adherencia (Cement Bond Log CBL) aparece a principios de los años 60's y en la actualidad se utiliza todavía. La mayor limitación del CBL es la dificultad de identificar pequeños canales. Los más recientes desarrollos en este campo incluyen un coeficiente de atenuación para esta herramienta.

Una novedosa herramienta más conveniente y disponible en el mercado fue el uso de el Segmented Bond Tool (SBT). Esta herramienta evalúa la adherencia circunferencial sobre los 360° en segmentos de 60° cada uno.

Otra herramienta es el Micro CBL, el cual evalúa la adherencia circunferencial en ocho segmentos de 50° cada uno, pero fue descontinuado por el éxito que tuvo el SBT.

A principios de los años 80's la herramienta de evaluación del cemento (Cement Evaluation Tool CET) fue introducida, para medir la impedancia acústica del material en contacto con el exterior de la TR.

Otra herramienta novedosa, es el Ultrasonic Imager, la cual pertenece a la familia de las herramientas de evaluación acústica, capaz de evaluar la impedancia acústica que se genera en el agujero.

6.2 HERRAMIENTAS CBL-VDL

El registro de adherencia del cemento CBL asociado con el registro de densidad variable VDL, ha sido durante muchos años el único método para evaluar la calidad de cementación. Aunque este servicio permite obtener una respuesta clara en la mayoría de los casos, es importante recordar los fundamentos básicos del principio de estas mediciones, para entender la influencia de los diferentes parámetros de limitación y resolver los casos difíciles de interpretar.

Principio de Medición

El registro CBL se corre con las herramientas clásicas del sónico. Un pulso de energía acústica, con frecuencia aproximada de 20 KHz, es emitido periódicamente por un transmisor omnidireccional hacia la formación (Figura 6.1). La medición consiste en registrar la amplitud o atenuación de las ondas que se propagan axialmente a lo largo de la tubería; esto se logra mediante dos receptores ubicados en la sonda a una distancia de 3 a 5 pies, respectivamente, del

transmisor. Dichas mediciones dependen del grado de acoplamiento mecánico (principalmente de cizallamiento) entre el cemento y la tubería.

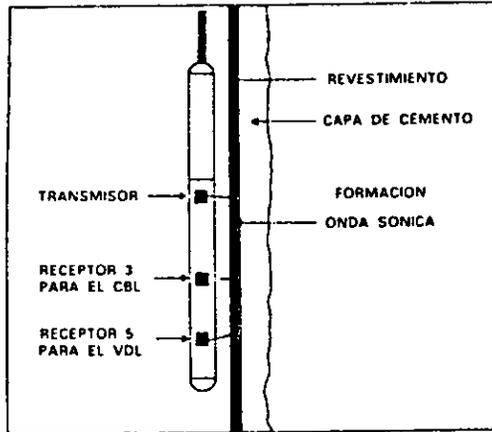


FIGURA 6.1 HERRAMIENTA CBL-VDL

Se ha demostrado que la cantidad de energía acústica transmitida por la tubería depende de la velocidad de propagación de una onda plana en ésta, de su densidad y del espesor del cemento. La distribución del cemento alrededor de la tubería afecta considerablemente la transmisión de la energía.

El receptor ubicado a 3 pies de distancia del transmisor mide la amplitud de la primera cresta de la onda acústica recibida, así como el tiempo de tránsito. El receptor a 5 pies recibe los trenes completos de onda, para la presentación de la densidad variable VDL.

En el tren de onda registrado por el receptor de 3 pies, el primer eco E1 corresponde generalmente a la onda transmitida por la tubería, puesto que la velocidad de propagación es generalmente mucho mayor en el acero que en las formaciones o en los fluidos que llenan el pozo. La amplitud es máxima para una tubería sin adherencia de cemento y mínima cuando la cementación es buena. El análisis de amplitud constituye el principio fundamental de la medición (Figura 6.2).

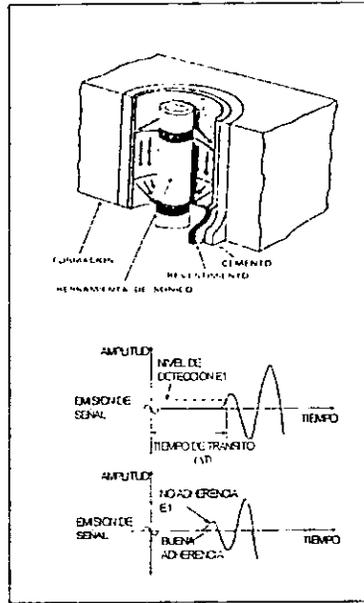


FIGURA 6.2 ANALISIS DE LA SEÑAL DE MEDICIÓN

A raíz de las características omnidireccionales del transmisor, se debe mantener una centralización perfecta de la sonda en la tubería para obtener la máxima amplitud de la señal (Figura 6.3). Una excentración de ¼" reduce la amplitud aproximadamente en un 30 %. La curva de tiempo de tránsito es útil para reconocer este efecto, así como las anomalías de detección que causan saltos de ciclos.

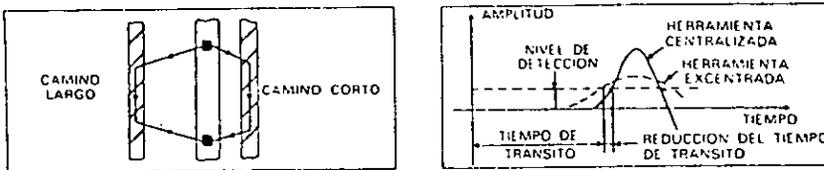


FIGURA 6.3 EFECTO DE EXCENTRACIÓN DE LA HERRAMIENTA SOBRE LA MEDICIÓN DE AMPLITUD

El registro de densidad variable VDL es un complemento muy útil del registro CBL para reconocer las condiciones poco comunes donde la interpretación del CBL se vuelve difícil, como formaciones de alta velocidad, microanillos o canales

y mal acoplamiento entre cemento y formación. Como lo presenta la Figura 6.4.

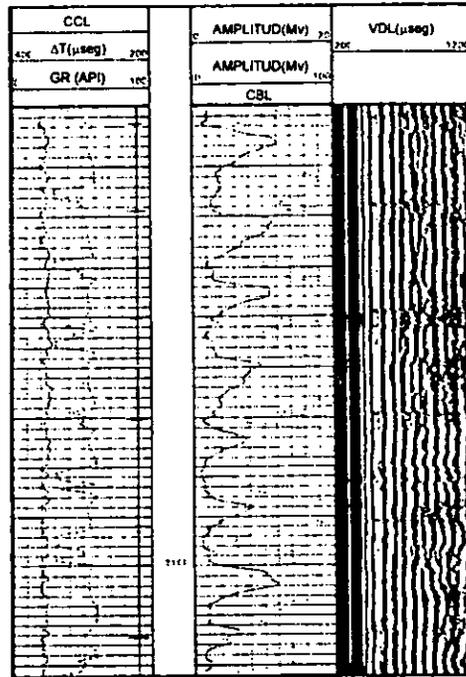


FIGURA 6.4 RESPUESTA DEL REGISTRO CBL-VDL

Evaluación Cuantitativa

Mediante gráficas derivadas de fórmulas empíricas, se puede relacionar la amplitud de la onda acústica con la resistencia del cemento a la compresión. Sin embargo, es preferible expresar la amplitud en términos de atenuación de la onda (db/pie) o de “índice de adherencia”.

El índice de adherencia (BI) se define como la relación entre la atenuación en un nivel considerado y la atenuación máxima calculada en un nivel bien cementado.

$$BI = \frac{\text{Atenuación al nivel considerado}}{\text{Atenuación máxima}}$$

La experiencia adquirida en el mundo entero ha demostrado que en condiciones normales de cementación, un índice de adherencia superior a 0.8 es suficiente para asegurar un buen aislamiento, a condición de que el intervalo sea lo suficientemente largo. Se han obtenido resultados satisfactorios para un índice de adherencia de 0.8, con un mínimo de 5 pies en tuberías de 5 1/2", de 10 pies en tuberías de 7", o de 15 pies en tuberías de 9 5/8". La Figura 6.5 muestra el índice de adherencia vs. diámetro del revestimiento.

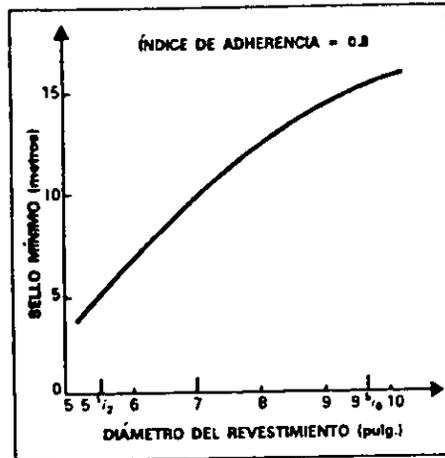


FIGURA 6.5 LONGITUD MÍNIMA DE INTERVALOS PARA FORMAR UN SELLO

6.2.1 Anomalías del Registro CBL

Ciertas condiciones poco usuales pueden ser la causa de un comportamiento anómalo de las curvas del registro CBL. Para detectar estas situaciones, es necesario comparar cuidadosamente las curvas de tiempo de tránsito, amplitud y registro de densidad variable. Dichas condiciones pueden ser las siguientes:

- Microanillo
- Formaciones de Alta Velocidad
- Mal Acoplamiento Cemento-Formación
- Canalización

Microanillo

En ciertas condiciones, un pequeño espacio anular logra formarse entre la tubería y el cemento. Generalmente, se provoca por la contracción de la tubería después de soltar la presión final de la cementación o después de un cambio importante de presión hidrostática en el pozo. Pero, también puede ser motivado por la condición física de la superficie de la tubería.

El efecto de microanillo aparece frecuentemente cuando se toma el registro CBL-VDL después de haber reemplazado el lodo de perforación (usado durante la operación de cementación) por un fluido más ligero (agua o aceite). El espesor del anillo así creado, es normalmente insignificante y no compromete al buen aislamiento hidráulico de los distintos intervalos productores.

Sin embargo, es suficiente para que cierta cantidad de energía acústica se transmita por la tubería, causando valores altos de amplitud. Por lo tanto, el registro CBL resulta pesimista ante la presencia de un microanillo. En el registro de densidad variable se pueden apreciar reflexiones moderadas de tubería y ecos de formaciones relativamente fuertes. En cambio, el registro CET que se describirá más adelante, es insensible a este fenómeno.

El microanillo se podrá detectar fácilmente por medio de una corrida adicional del CBL-VDL, con un aumento suficiente de presión en la tubería, a fin de cerrar el espacio anular.

Formaciones de Alta Velocidad

En las formaciones cuyo tiempo de tránsito es inferior al del acero (carbonatos compactos, evaporitas), la medición de la amplitud del primer eco ya no es representativa de la calidad del cemento. Estas formaciones causan, generalmente, lecturas de la curva de tiempo de tránsito, inferiores a las del acero, fenómeno que se puede observar igualmente en la densidad variable. Las lecturas de amplitud, en cambio, dependen del modo de detección escogido durante el registro.

Mal Acoplamiento Cemento - Formación

Aunque la curva de amplitud muestre niveles bajos que indican buena adherencia entre tubería y cemento, el registro de densidad variable puede, en ciertos casos,

carecer de señales representativas de la formación. Aquí existen varias interpretaciones:

- La misma señal de formación es débil. Se puede comparar con el VDL de pozo abierto, cuando exista.
- El cemento ejerce una buena adherencia con la tubería, pero no con la formación.

Canalización

El efecto de canalización detrás de la tubería constituye una de las limitaciones más grandes del registro CBL-VDL. Eso se debe a la característica omnidireccional de los transmisores y receptores. La medición de la amplitud se relaciona con la adherencia promedio del cemento alrededor de la tubería y no permite distinguir entre un sello uniformemente pobre y un canal abierto en una masa homogénea del cemento (Figura 6.6).

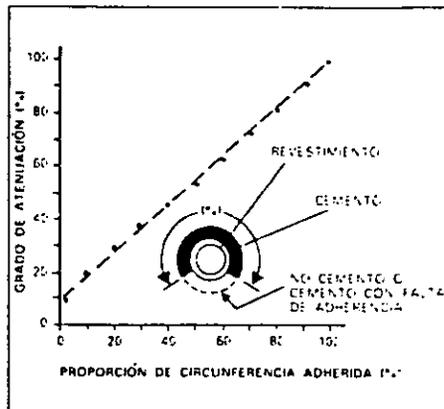


FIGURA 6.6 EFECTO DE ADHERENCIA NO UNIFORME

Se pueden presentar las siguientes situaciones:

- Canalización a lo largo de la tubería
- Canalización detrás del cemento
- Canalización dentro de la formación

En el primer caso, la curva de amplitud indicará niveles relativamente altos, mientras que el registro de densidad variable mostrará reflexiones fuertes de la formación.

En el segundo caso, el canal podrá no ser detectado con el registro CBL-VDL, si el espesor de cemento es lo suficientemente grueso.

En el tercer caso, no será posible detectar la comunicación con el registro CBL-VDL, como lo muestra la Figura 6.7.

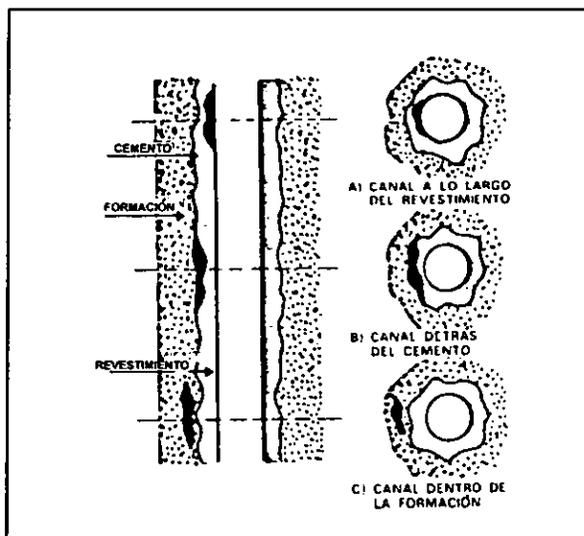


FIGURA 6.7 CONFIGURACIÓN DE CANALES

Los canales podrán causar movimientos significativos de fluidos cuando son lo suficientemente continuos.

Los métodos que permiten poner en evidencia el fenómeno de canalización cuando existan dudas sobre la calidad de la cementación, son los siguientes:

- La herramienta CET, que proporciona un análisis circular de la capa de cemento alrededor de la TR.
- Registro de temperatura o de ruido para detectar movimientos de fluido detrás del revestimiento.

6.2.2 Control de Calidad del CBL

La mayoría de los problemas asociados con el registro CBL, están asociados con el centrado de la herramienta, el manejo y el efecto de los microanillos. Una buena calidad en la toma del registro es un prerrequisito para una buena interpretación del mismo.

La velocidad de atenuación está directamente relacionada a la impedancia acústica de el cemento detrás de la TR, a pesar del tipo de lechada usado, incluyendo cemento espumoso. Esto es particularmente importante para el caso en el que se apliquen lechadas de baja densidad de tipo espumoso para la cementación de tuberías de revestimiento en pozos en aguas profundas. Lo anterior con el fin de evitar el flujo de agua somero.

Los procedimientos estándares de interpretación usados para evaluar la resistencia a la compresión pueden ser incorrectos.

Conociendo la impedancia acústica del cemento vs. el tiempo es fundamental para una mejor interpretación del CBL, especialmente para sistemas en donde las propiedades físicas varían con el tiempo.

La relación exponencial entre la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión pueden ser incorrectos por el contenido de sales en la lechada de cemento.

La evaluación puede llevarse a cabo efectivamente para pozos desviados utilizando como herramienta a la tubería flexible.

6.3 HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE CEMENTO CET

La herramienta de Evaluación de Cemento CET, tiene ciertas características que permiten mejorar considerablemente la calidad de la evaluación del cemento. No solamente es insensible a los diferentes factores que limitan generalmente la interpretación de los registros CBL-VDL, como en las formaciones de alta velocidad, tan comunes en México, sino que ofrece también la ventaja de poder detectar la presencia de canales, por medio de un análisis circular del ambiente que rodea la tubería.

Principio de Medición

El concepto fundamental de la medición consiste en hacer resonar el espesor del revestimiento, mediante una excitación provocada por la emisión de pulsos ultrasónicos (Figura 6.8). La presencia de cemento detrás del revestimiento produce una rápida atenuación de la resonancia, mientras que la ausencia de cemento provoca un alargado período de atenuación.

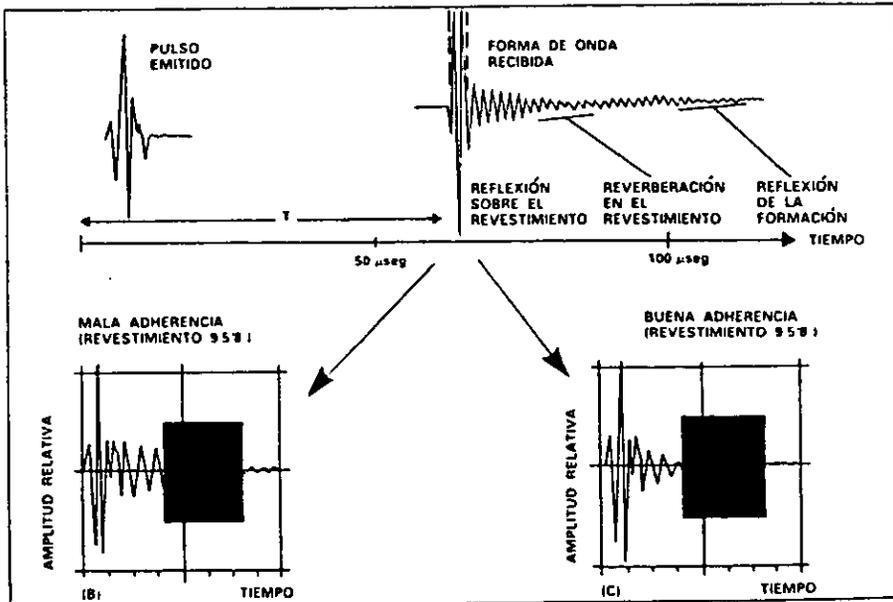


FIGURA 6.8 PRINCIPIO DE MEDICIÓN DE LA HERRAMIENTA CET

Diseño

La herramienta CET cuenta con ocho transductores, enfocados radialmente hacia un pequeño sector angular de la tubería. Están dispuestos en forma helicoidal sobre la sonda, a 45° uno del otro. Ocupan un espacio vertical de 2 pies aproximadamente y operan en el rango de frecuencia de resonancia de la mayoría de las tuberías en uso.

(Figura 6.9).

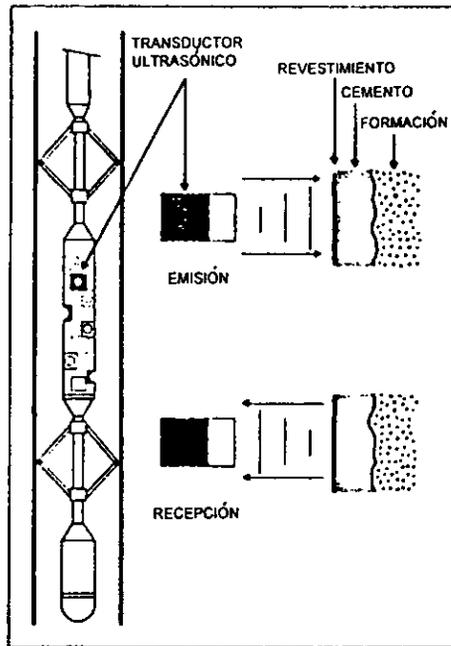


FIGURA 6.9 HERRAMIENTA CET

La distancia que separa el transductor de la pared de la tubería es del orden de 2 pulgadas y puede ser ajustada manualmente, según las condiciones de operación.

Los transductores actúan, a la vez, como transmisores de pulsos ultrasónicos y receptores del eco resultante. El eco se analiza en varios intervalos de tiempo, con el fin de definir la rapidez de la atenuación.

El sistema CSU permite memorizar y poner en profundidad cada medición. La resolución vertical de la herramienta coincide con el diámetro del rayo ultrasónico y es del orden de 2". Es posible obtener mediante la gran cantidad de pulsos emitidos por segundo, un promedio de las diferentes mediciones. Por lo tanto, la velocidad del registro no debe ser mayor de 1000 m/hr.

Se utilizan sondas de 3 3/8" de diámetro para tuberías de 4 1/2" hasta 7" y sondas de 4" para tuberías de 7" hasta 10 3/4". Se pueden derivar 4 calibres acústicos a partir de los 8 tiempos de tránsito medidos con los transductores. El valor de la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el fluido del pozo, se obtiene

por medio de un transductor de referencia que mide el tiempo de tránsito sobre un intervalo calibrado.

Análisis de la Señal

El pulso de energía acústica viaja radialmente desde el transductor hacia la pared de la tubería. La mayor parte de la energía se refleja directamente sobre la superficie interior de la tubería, mientras que la otra parte se transmite dentro del revestimiento, dando lugar a una segunda reflexión en la superficie exterior de la tubería. En cada reflexión se transmite, fuera del revestimiento, una fracción de la energía, según la magnitud del coeficiente de reflexión de la superficie de contacto.

El tren de ondas recibido por el transductor después de las sucesivas reflexiones está formado por una serie de pequeños impulsos separados por un intervalo de tiempo igual a dos veces el tiempo de tránsito en el espesor del revestimiento. La amplitud de cada impulso es función de las impedancias acústicas de los diferentes medios ambientes (fluido en el pozo, acero, cemento y formación).

La amplitud de la primera cresta, que proviene de la reflexión directa del pulso que incide sobre la tubería, queda principalmente afectada por las condiciones atenuantes del fluido del pozo y del diámetro de la tubería. Una ventana de detección W_1 permite a la vez, determinar el tiempo de tránsito de la onda acústica y ajustar la ganancia del sistema para mantener la respuesta a un nivel de referencia.

La presencia de cemento afecta considerablemente la parte posterior del tren de onda. El decaimiento exponencial, medido entre las amplitudes del primer eco y de los ecos posteriores, es función de la impedancia acústica del cemento.

La ventana de medición W_2 está colocada en un intervalo que permite distinguir zonas bien cementadas o sin cemento. La relación de las respuestas medidas entre las ventanas W_1 y W_2 se puede relacionar con la impedancia acústica Z del medio que rodea la tubería y, posteriormente, con la resistencia del cemento a la compresión.

Sin embargo, se debe introducir un factor de corrección para tomar en cuenta las variaciones de diámetro de la tubería, espesor del metal e impedancia acústica del

lodo. El factor de normalización es igual a la cantidad W_{2MAX} , medida en la ventana W_2 frente a un intervalo no cementado. La señal normalizada WW obtenida por la herramienta CET, es entonces:

$$WW = \left(\frac{W_2}{W_1} * \frac{1}{W_{2MAX}} \right)$$

Experimentos en el laboratorio han demostrado que la impedancia acústica Z derivada del parámetro WW varía casi linealmente con la resistencia a la compresión. El equipo CSU calcula una curva de resistencia a la compresión para cada transductor y, entre éstas, selecciona la máxima y la mínima.

6.3.1 Interpretación

Detección de Gas

La cantidad WW es igual a 1, por definición, cuando se encuentra un líquido (agua) detrás de la tubería y menor de 1 cuando hay cemento. Se ha observado que WW puede ser mayor que 1 (1.5), cuando hay canalización de gas detrás de la tubería.

Los niveles probablemente afectados por la presencia de gas, donde la relación WW es mayor de 1, pueden ser fácilmente identificados mediante la aparición de una señal en forma de raya delgada, en el carril de la extrema derecha de la presentación del registro CET.

Reflexiones de Formación

Si viene a interferir una reflexión de formación con la señal de medición, el decaimiento de la onda deja de ser exponencial entre las ventanas W_1 y W_2 , lo cual podría hacer pensar que no hay cemento. En realidad, la presencia de una reflexión de formación indica que existe cierta forma de adherencia.

Por este motivo, se requiere la presencia de una tercera ventana de detección W_3 , ubicada entre las ventanas W_1 y W_2 .

Se comparan entonces los niveles de energía medidos en las tres ventanas por medio de las relaciones W_2/W_1 y W_3/W_1 , lo cual permite confirmar la ausencia de

decaimiento exponencial. En este caso no es posible calcular un valor de resistencia a la compresión. Se atribuye un valor mínimo, preseleccionado de 1000 psi, que toma en cuenta la probabilidad de una buena adherencia en este sector angular.

Las reflexiones de la formación están indicadas por una señal (en forma de rayas gruesas) en el carril de la extrema derecha.

6.3.2 Curvas del Registro CET

El registro CET incluye las siguientes curvas:

Carril 1. Curvas de excentración y de rumbo relativo de la herramienta y curva de diámetro promedio de la tubería. El rumbo relativo, al igual que las herramientas de echados, representa el ángulo entre el lado alto de la herramienta y una dirección de referencia definida por el transductor # 1. Esta medición permite orientar la sonda en agujeros desviados. Normalmente se pueden añadir curvas de rayos gamma y CCL, como correlación.

Carril 2. Curvas de desviación del agujero y dos resistencias a la compresión del cemento, la máxima y la mínima. La curva de resistencia mínima a la compresión se identifica por el sombreado gris.

Carril 3. Esta pista es una presentación gráfica de la calidad del cemento detrás de la tubería. Está formada por yuxtaposición de las ocho trazas vistas por cada uno de los transductores. El negro significa buena adherencia, mientras que el blanco representa ausencia de cemento. De esta manera, es posible efectuar un control visual rápido de la calidad del cemento y detectar canales.

Una opción del programa de adquisición (constante IMAR) permite hacer girar la imagen de tal manera que el transductor ubicado en el lado bajo del pozo venga a imprimir su imagen en el centro del carril. Si la constante IMAR no está habilitada, la imagen representa los ecos de los transductores 1 a 8, en orden ascendente, de izquierda a derecha.

Carril 4. Esta pista de ancho reducido, permite identificar los eventos especiales de detección de gas o reflexiones de la formación. Las rayas delgadas señalan eventualmente la presencia de gas, mientras que las gruesas indican reflexiones de

formación. Las líneas verticales permiten identificar el número del transductor que está al origen del efecto representado (por orden ascendente 1 a 8, de izquierda a derecha).

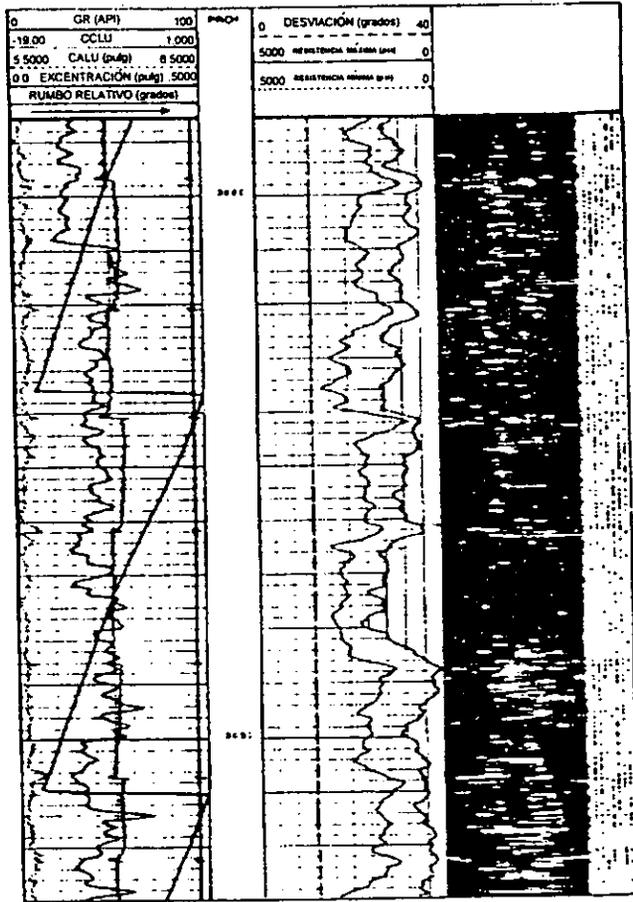


FIGURA 6.10 REGISTRO CET

Calibres Acústicos

El diseño CET permite medir, para cada transductor, el tiempo de tránsito entre la emisión del pulso ultrasónico y el primer eco de llegada después de la reflexión en la tubería.

Conociendo la velocidad de propagación de la onda en el fluido del pozo mediante el transductor de referencia, es posible convertir los tiempos de tránsito en distancias, con una resolución de 0.1 mm. Los ocho radios aparentes, separados por un ángulo de 45° entre sí, se convierten fácilmente en 4 calibres de tubería. Están generalmente presentados en una escala adicional, simultáneamente con la curva de diámetro promedio CALU. Un análisis de los 4 diámetros en cada nivel permite obtener las curvas de:

- Excentración (ECCE) = máxima diferencia entre los radios calculados para dos transductores opuestos, dividida por dos.
- Ovalización (OVAL) = máxima diferencia entre dos diámetros.

La curva de excentración es una curva de control de calidad. La excentración no afecta el registro, hasta que no pase de 5 mm. La herramienta, por su diseño liviano, se puede centrar fácilmente, inclusive en pozos dirigidos, hasta 60° de desviación. El registro de calibres acústicos proporciona una medida importante de control del estado de las tuberías: colapso, desprendimiento, cambios de peso, etc. La presentación de las curvas en forma simétrica (o de espejo) permite ilustrar las irregularidades del tamaño de tubería o cambios de espesor.

Limitaciones

El factor principal de limitación de la herramienta se debe a las características atenuantes de los fluidos del pozo. Las ondas de alta frecuencia (ultrasonidos) se atenúan con mayor rapidez en un medio ambiente determinado, que las ondas de baja frecuencia. Para una operación normal de la herramienta, el fluido debe de tener una atenuación inferior a 2 db/cm.

La impedancia acústica depende de la naturaleza del fluido y de su densidad. Se ha podido observar que la atenuación aumenta cuando incrementa la densidad del fluido, por su alto contenido de sólidos. Por lo tanto, se considera que fluidos con una densidad mayor de 1.6 gr/cm³ no son adecuados para la operación de esta herramienta. Por el contrario, la experiencia en México indica que los lodos a base de agua, con densidad entre 1 gr/cm³ y 1.4 gr/cm³, permiten el uso normal de esta herramienta. Las situaciones donde la densidad de lodo varía de 1.4 gr/cm³ a 1.6 gr/cm³ deben ser examinadas cuidadosamente. En el caso de los lodos a base

aceite, el rango de operación puede ser aproximadamente de 0.8 gr/cm^3 a 1.2 gr/cm^3 .

Los trenes de ondas acústicas contienen una gran cantidad de información sobre las condiciones de la tubería y del medio ambiente que la rodea, de la cual sólo una pequeña parte ha sido analizada hasta ahora. Se ha demostrado en pruebas recientes que mediante un moderno procesamiento de las formas de onda, se puede obtener información sobre el espesor y condición externa del revestimiento, información muy importante para el control de corrosión de tuberías.

6.4 REGISTRO DE TEMPERATURA

La temperatura en la tierra se incrementa con la profundidad. El promedio de incremento es de casi $1 \text{ }^\circ\text{C}$ por cada 33 m de profundidad y es conocido como el gradiente geotérmico. La desviación del promedio, se debe a la localización geográfica y por la conductividad del calor de las formaciones geológicas. Las temperaturas en los agujeros puede ser transmitida a través de las tuberías de perforación o de revestimiento, no exclusivamente debido al gradiente geotérmico, sino también al fluido usado para la operación de cementación. Los registros de temperatura han sido usados para detectar la cima del cemento.

El registro de temperatura es un dispositivo que cuenta con un sistema de puente eléctrico, que está expuesto a variaciones de temperatura; el elemento sensible es un filamento metálico que controla la frecuencia de un oscilador colocado en la parte inferior de la herramienta.

El calor de la reacción exotérmica que el fraguado del cemento genera se disipa rápidamente. Las pruebas hechas en el laboratorio, indican un regreso a la temperatura normal del agujero en un tiempo no mayor a 24 horas. Los primeros estudios también arrojan que aparte del efecto del tiempo, también la temperatura del fondo, el tiempo de circulación y la conductividad térmica de las formaciones circundantes afectan igualmente el perfil de temperaturas. El mayor inconveniente en la técnica de evaluación es el tiempo.

La mayor parte de las mediciones son hechas durante el período de transición antes de que el fluido tenga bastante tiempo para alcanzar el equilibrio térmico con las formaciones adyacentes. Una medición se hace bajando el instrumento dentro del agujero lentamente a fin de que el elemento sensible tenga tiempo de

alcanzar la temperatura del fluido circundante. Las mediciones se logran en el sentido descendente, esto elimina el efecto perturbador del cable del registro. Si se va a correr otra toma de registro, es necesario esperar de 6 a 20 horas hasta que las condiciones de temperatura se estabilicen o puedan ser estabilizadas.

6.4.1 Cima de Cemento

La cima de cemento es la parte superior que tiene el cemento en el espacio anular, o entre la TR y la formación.

Los estudios de temperatura a menudo se realizan en agujeros ademados para el propósito de localizar la cima del cemento en el espacio anular. Puesto que el cemento genera una considerable cantidad de calor cuando fragua, la temperatura incrementa su nivel detrás de la TR.

Para mejores resultados de las mediciones de temperatura se puede correr la herramienta a pocas horas, usualmente alrededor de 20, después de que la lechada de cemento fue bombeada en su sitio alrededor de la TR. Si el lodo es circulado dentro del pozo antes de correr el registro de temperatura, es necesario esperar un tiempo relativamente corto, o si es posible, esperar unas horas después de la circulación antes de correr el registro.

Los registros de temperatura son una forma efectiva y económica para determinar la cima y los intervalos de cemento.

La Figura 6.11 muestra la cima del cemento con el registro de temperaturas. El perfil local de temperatura permitirá evitar equivocaciones entre el cambio en la conductividad térmica de la formación y la cima de cemento.

Se recomienda correr los registros de temperatura, antes de correr el CBL para la evaluación de cementos espumosos. Algunos trabajos indican que el tiempo óptimo para correr el registro quizá precede al tiempo óptimo para el registro CBL por varias horas o más.

El desarrollo de la resistencia a la compresión se retrasa debido a la reacción exotérmica durante el fraguado del cemento. Esto permite grabar el registro CBL y el de temperatura en cinta y representar la temperatura y las curvas de amplitud

con las de un calibrador en una escala de profundidad comprimida. Esto facilita la evaluación de cementsos en zonas de fractura.

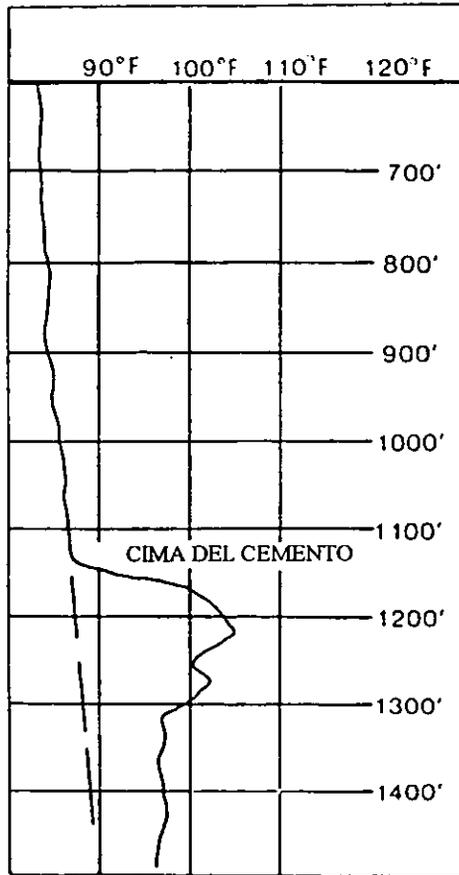


FIGURA 6.11 PERFIL TÍPICO DE TEMPERATURAS

El registro de temperatura es útil en la evaluación de cementsos, particularmente si se combina con otras herramientas. Aunque ésta no delinea el aislamiento vertical, se cuenta con otras herramientas para cubrir estas necesidades.

6.4.2 Anomalías

Tal registro puede localizar la cima del cemento con razonable exactitud, a condición de grabar anomalías de temperatura.

Algunas causas del mal registro en el aumento de temperatura, son:

- Cemento con bajo calor de hidratación
- Correr el registro demasiado pronto o tardíamente
- La contaminación excesiva y dilución de la lechada de cemento

Para mejores resultados el registro deberá correrse en las primeras 12 a 24 horas.

La cantidad de calor liberado durante el fraguado del cemento depende de las condiciones en las que se encuentre el pozo, sistemas de cementación y las condiciones que se estén manejando en superficie.

La mala calidad de la toma de un registro, si se corre mucho después de la colocación del cemento, hará que se disipe el calor en las formaciones adyacentes. Si un agujero es amplio, requerirá más cemento y puede causar una línea en el registro con una pendiente más pronunciada, arriba o abajo del intervalo ampliado.

6.5 TRAZADORES RADIATIVOS

La carnotita fue uno de los primeros materiales usados como un trazador. Y era mezclado con los primeros 25 sacos (o más) de cemento. Ahora son usados rara vez desde la aparición de la herramienta acústica CBL para la evaluación del cemento.

Con este método, la cima del cemento puede ser exactamente determinado si la porción superior (la primera porción encontrada en el descenso de la herramienta) emite radiactividad. El trazador es agregado en forma de una sal soluble durante el mezclado del cemento con el agua. Adicionando un trazador radiactivo a la porción superior del cemento es un buen seguro en caso de que transcurra mucho tiempo después de la colocación del cemento, lo que no pasa con el registro de temperatura.

En el trazador no es así. En realidad con un trazador de vida media-larga el registro puede ser hecho en cualquier tiempo en la vida de un pozo.

Otros materiales comúnmente usados son el Yodo 131 y el Escandio 46, los cuales tienen una vida media de 8 y 84 días respectivamente.

La principal ventaja de los trazadores radiactivos es la rápida localización del material detrás de la TR.

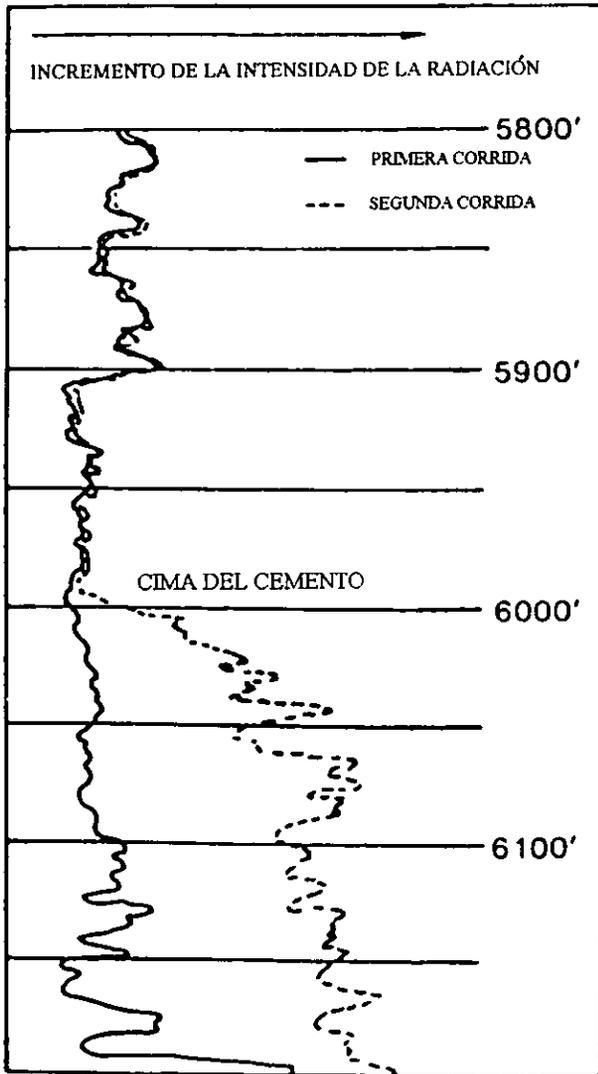


FIGURA 6.12 RESPUESTA TÍPICA DE UN TRAZADOR RADIACTIVO

Y la principal desventaja es la cuestión en cuanto al manejo del material radiactivo así como del alto costo que significa tomar una prueba como esta. La respuesta de los trazadores se muestra en la siguiente Figura 6.12, para localizar la cima del cemento.

6.6 REGISTRO ULTRASONIC IMAGER^R (USI)

Es la herramienta de más reciente desarrollo en la evaluación del cemento. El USI pertenece a la segunda generación de herramientas ultrasónicas, usando el mismo principio físico de medición que el CET. Las principales mejoras son el procesamiento de la señal en forma más exacta, proporcionando respuestas consistentes de la impedancia acústica y el uso de un transductor rotatorio para mejorar la cobertura de la TR. Otra mejora de la herramienta USI es la presentación en un mapa a color que permite la interpretación del registro, para identificar rápidamente los problemas que se tengan en la envoltura del cemento. Puesto que la introducción de la herramienta USI tiene mejoras para tener una buena evaluación de la calidad del cemento, superando problemas como la restricción del agujero y otras que se presentan con otras herramientas.

Uno de los problemas es la interpretación de los datos de la USI, en cuanto a la contaminación del cemento por gas. Para este problema usualmente se recomienda utilizar la herramienta USI junto con un CBL, ya que esta última es menos afectada por el gas.

La USI es del tipo de herramienta de adherencia circunferencial. Ésta cuenta con un transductor de eco-pulso que rota 7.5 veces por segundo y normalmente pulsa 18 veces por revolución. La impedancia acústica del cemento tiene un rango desde 3.0 Mrayl hasta 7.0 Mrayl.

Los fluidos de perforación tienen un rango desde 1.5 Mrayl hasta 3.0 Mrayl. El agua tiene una impedancia acústica de 1.5 Mrayl y el gas tiene una del orden de 0.04 Mrayl o menor. Es por esto que se puede identificar fácilmente la presencia de gas u otro fluido dentro del cemento, presentando un tipo de canalización. La Figura 6.13 muestra la respuesta de la herramienta USI.

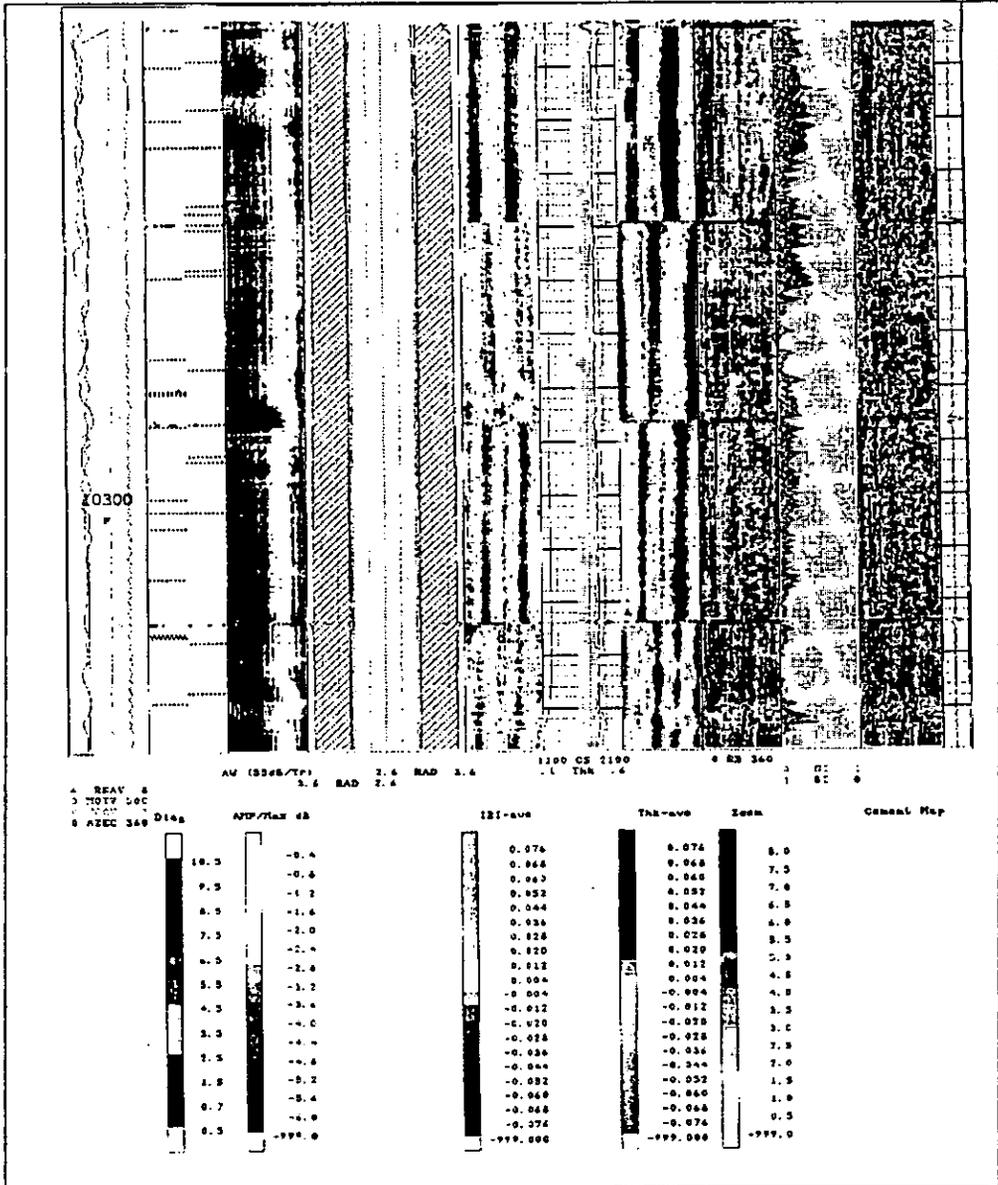


FIGURA 6.13 HERRAMIENTA USI

6.7 HERRAMIENTA DE ATENUACIÓN DE VELOCIDAD

Esta herramienta tiene una ventaja sobre el CBL convencional y es que no se ve afectada por el tiempo de tránsito del fluido. Estas herramientas miden amplitud en dos receptores que están separados a una distancia de un pie entre ellos y calculan una compensación a la atenuación de velocidad. Lo que graban es el efecto de la señal acústica que viaja debajo de la TR, a un pie de distancia de ella. Estas herramientas tienen un pequeño receptor (la distancia aproximada del receptor al transmisor es de un pie) el cual permite calcular la atenuación para ser grabada antes de la interferencia de la TR. La siguiente Figura 6.14 muestra la gráfica de la respuesta de la herramienta.

Estos dispositivos son menos sensibles a la excentricidad, en el caso que la sonda este mal centrada o este inclinada, pero necesitará estar inmóvil.

La atenuación es una función de la impedancia acústica y no esta relacionada exactamente con la resistencia a la compresión. Altos valores de atenuación generalmente reflejan una buena adherencia de la tubería al cemento.

Estos registros son afectados por pequeños canales y por la existencia de sartas concéntricas. Estas limitaciones también las tienen las herramientas CBL. El efecto de microanillo podrá eliminarse centrando adecuadamente la herramienta.

6.8 HERRAMIENTAS DE ECO-PULSO

Fueron desarrolladas para la detección de canales, el cual es su principal objetivo, como se muestra la Figura 6.15.

Este tipo de herramientas estudian aproximadamente un radio de profundidad de 8 pulgadas, contando con ocho transductores colocados en forma circunferencial, cubriendo cada uno un rango de una pulgada o menos. Estas herramientas tienen dificultad de detección en grandes diámetros de TR's.

6.9 HERRAMIENTAS (SBT y MICRO CBL)

Éstas incluyen al SBT (Segmented Bond Tool) o Herramienta de Adherencia Segmentada y al Micro CBL. Estas herramientas miden la circunferencia completa del revestimiento y tienen la capacidad de detectar pequeños canales.

El SBT es una herramienta que consta de seis brazos con un cojín o almohadilla de contacto con dos transmisores y dos receptores en cada brazo. Los transmisores disparan secuencialmente una señal y la atenuación es registrada similarmente como en las herramientas de atenuación. El centrado de la herramienta es muy importante, ya que esto puede cambiar la trayectoria de la señal acústica entre los receptores alrededor de la TR. La herramienta también tiene un receptor convencional de cinco pies para la señal de onda que proviene de la adherencia a la formación. Los pequeños canales son cualitativamente detectados con esta herramienta. En la Figura 6.16 se observa la respuesta del SBT.

El micro CBL es una herramienta del tipo enfocada de atenuación con ocho transmisores/receptores localizados circunferencialmente alrededor de ésta.

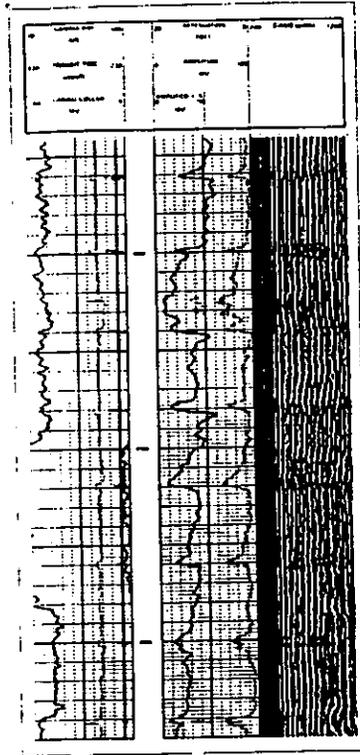


FIGURA 6.14 REGISTRO DE ATENUACIÓN DE VELOCIDAD

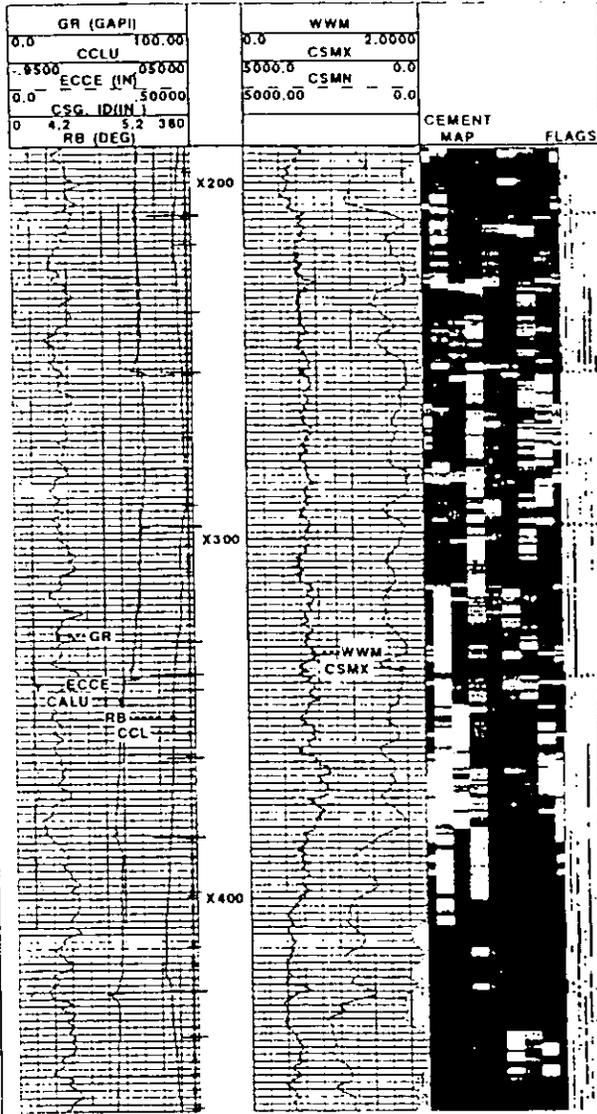


FIGURA 6.15 RESPUESTA DE LA HERRAMIENTA DE ECO-PULSO

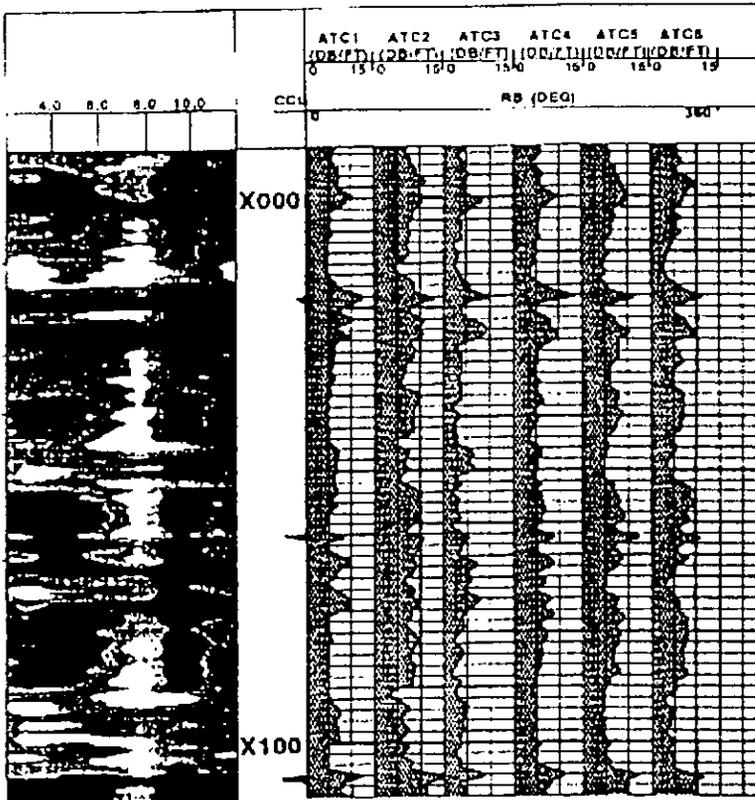


FIGURA 6.16 RESPUESTA DE LA HERRAMIENTA SBT

6.10 FUTUROS DESARROLLOS

El Sonic Volumetric Scan Log quizá algún día será la herramienta estándar en la evaluación de los cementos. La herramienta opera como un televidente en el fondo del agujero y usa un procesador especial para crear una imagen del cemento en el espacio anular tridimensional. Esto será al parecer, para acercarse a la óptima evaluación del cemento. Esta herramienta estará eventualmente en forma comercial, disponible, conforme la tecnología de registros avance.

7.1 INTRODUCCIÓN

Las compañías de servicio están limitadas solo al conocimiento y no al control de los eventos que ocurren durante la etapa de perforación, los mismos que no pueden ser previstos. La Figura 7.1 incluye a la cementación como una de las etapas involucradas en la construcción de un pozo petrolero. Las etapas que preceden a la cementación pueden afectar el éxito de la operación y a la evaluación de las etapas siguientes. Sin embargo, su desarrollo es independiente de la compañía de servicio. Dependiendo de la eficiencia de los procesos anteriores a la cementación, se tendrá un desarrollo satisfactorio de esta y esto implicará una mayor o menor inversión en los costos del pozo.

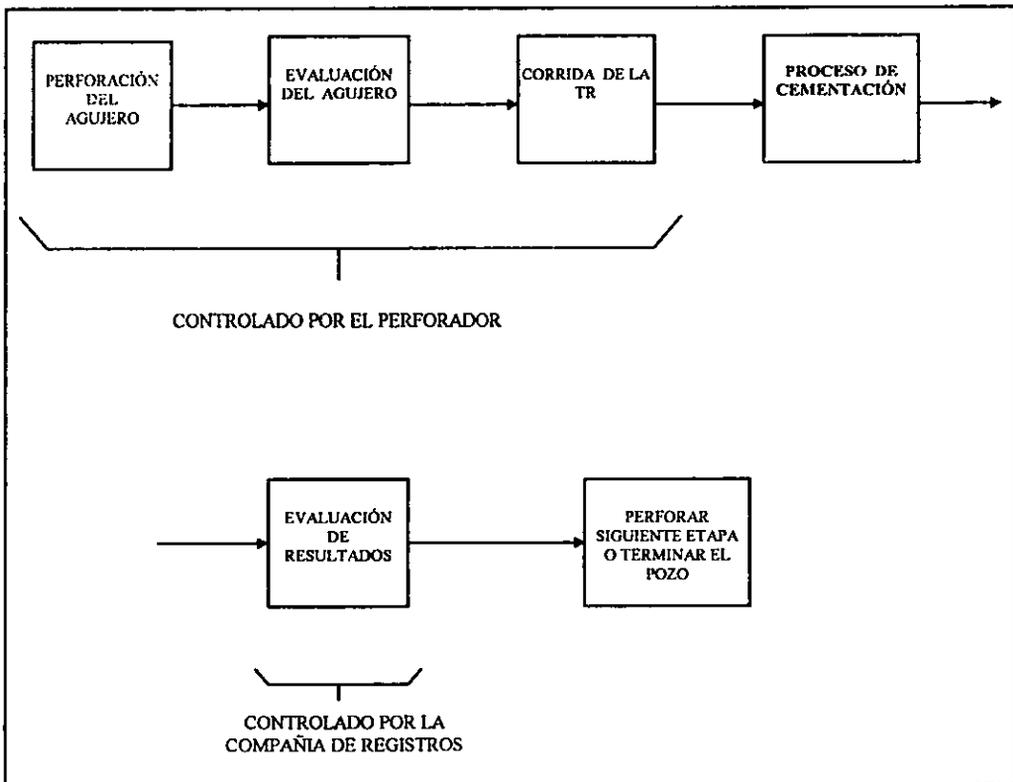


FIGURA 7.1 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE UN POZO PETROLERO

7.2 COSTOS DE UN POZO PETROLERO

Durante la perforación y terminación de pozos petroleros, resulta importante la etapa de cementación, es por ello, que si la operación es deficiente, todas las demás operaciones que se realicen son virtualmente afectadas; por tal motivo, deberá corregirse antes de programar cualquier trabajo relacionado con la terminación del pozo.

El realizar todas estas tareas es una labor preponderante en la realización de un pozo petrolero, por consiguiente, los costos operativos de una cementación se ven afectados por los demás costos implicados en las labores de preparación y acondicionamiento del agujero. Ya que esta no es una acción aislada en el siguiente cuadro vemos interrelacionados algunos factores involucrados en la perforación del pozo conjuntamente con la cementación, tuberías, lodos, aditivos, transporte de cuadrillas como del equipo, servicios varios, tratamientos, accesorios, barrenas, etc.

Todo esto, tomando en cuenta todos y cada uno de los procesos relacionados en la cementación de pozos petroleros y de su representación en números, para su ejecución como un trabajo e industria que debe optimizar los gastos que representan todos estos sucesos.

Como se observa en la Tabla 7.1, el costo de una cementación es considerable, tomando como referencia los valores en porcentaje de los otros procesos para la construcción de un pozo.

El comité financiero del IPAA (Independent Petroleum Association of America) anualmente realiza un estudio de los balances presupuestarios que incluyen los costos de perforación de un pozo petrolero.

Estos reportes presentan los costos de perforación y equipo usado en los Estados Unidos, mismos que, desde 1992 han venido disminuyendo paulatinamente. Con las nuevas técnicas de optimización y el desarrollo de la tecnología, los costos en términos generales han sido menores que en años anteriores.

Este organismo afilia a todos los productores independientes, los cuales perforan el 85% de los pozos en este país, en 33 Estados con producción de aceite y gas. Éstos producen 65% y 40% de gas natural y aceite, respectivamente, consumido por los norteamericanos.

TABLA 7.1 COSTOS EN PORCENTAJES DE UN POZO PETROLERO

CATEGORIA	PORCENTAJE
<i>Pago a contratistas</i>	30.7
<i>Camino y preparación del sitio</i>	4.4
<i>Transportación</i>	2.4
<i>Combustible</i>	0.6
<i>Lodo de perforación y aditivos</i>	5.8
<i>Localización de registros y monitoreo</i>	1.1
<i>Todas las otras pruebas físicas</i>	0.6
<i>Evaluación de registros y línea de acero</i>	3.7
<i>Servicios y datos de localización</i>	0.1
<i>Servicios de perforación direccional</i>	1.6
<i>Perforar</i>	1.4
<i>Tratamientos a la formación</i>	4.4
<i>Cemento/Servicios de cementación</i>	4.8
<i>TR's y tubería de producción</i>	13.7
<i>Accesorios de la TR</i>	0.9
<i>Renta de herramientas especiales</i>	2.7
<i>Barrenas y raspadores</i>	2.3
<i>Equipo de la cabeza del pozo</i>	1.8
<i>Otros equipos y suministros</i>	3.0
<i>Taponamiento</i>	1.3
<i>Supervisión y gastos generales</i>	5.6
<i>Otros gastos</i>	7.1

Estos productores independientes reportan sus gastos a la asociación en la construcción de un pozo, como se muestra en la Figura 7.2. Se observa la distribución de los costos involucrados en perforación de un pozo.

Los costos de una cementación se encuentran sujetos a diversos factores, los cuales influyen de una u otra manera en el desarrollo de la operación. Hasta nuestros días se han realizado diferentes estudios y programas de optimización de las actividades realizadas en el campo petrolero, incluyendo las cementaciones de cualquier índole, para un pozo en la región marina o en tierra.

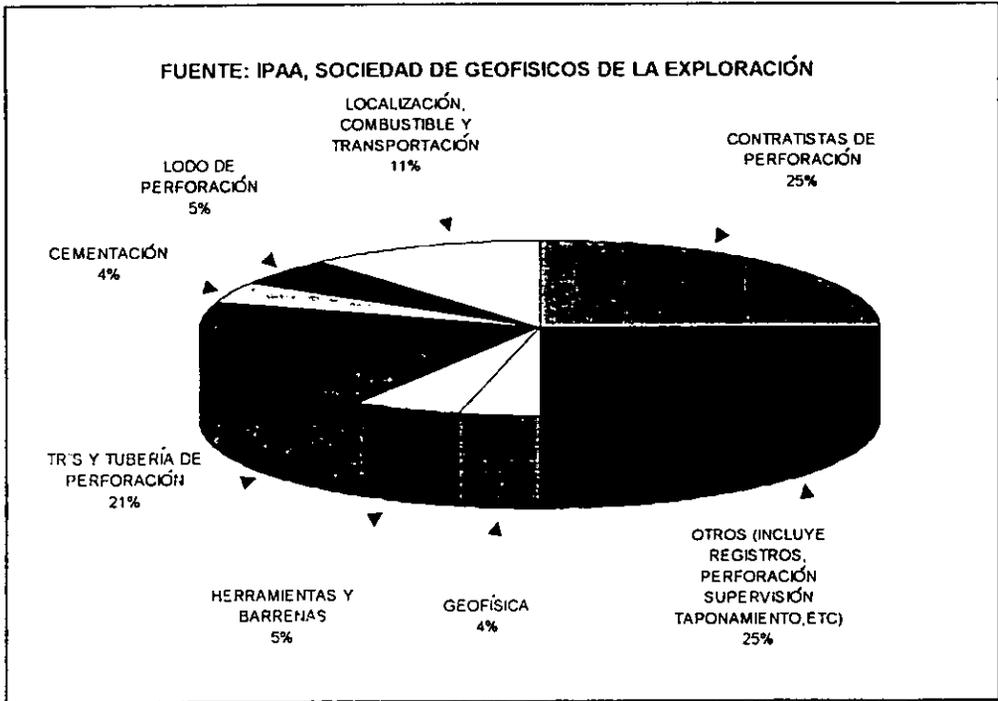


FIGURA 7.2 COSTOS DE UN POZO PETROLERO

En la región marina los costos en general aumentan en promedio de un 30 a 35% de lo que costaría el mismo trabajo en tierra. Por razones obvias, ya que si consideramos el número de operaciones y el tiempo que toma el realizar tal o cual trabajo, por la dificultad o por la transportación del equipo hasta la localización deseada, etc.

La evaluación de los costos generados por la perforación de un pozo en tierra con respecto a uno marino nos muestra, de primera instancia, el uso del primero, dado que:

- Se cuenta con la tecnología más probada.
- Los costos, en general son menores.
- Personal más experimentado.
- Los ambientes de trabajo son más seguros.
- La reparación de un trabajo en tierra es menos costosa.
- Los factores de riesgo son menores.

Esto sin tomar en cuenta las variaciones climáticas, las que en su momento podrían llegar a ser preponderantes en la ejecución de la operación en mar abierto.

Pero esta es una industria que esta vinculada estrechamente con la economía, factor primordial para la aceptación o rechazo de un programa de cementación.

Alrededor del mundo las compañías de servicio del ramo petrolero realizan una serie de programas financieros para determinar los costos de cada operación y así tomar la decisión "correcta" o más conveniente para la realización del proyecto.

Al departamento encargado de la perforación le concierne la selección y la composición del mejor cemento y la técnica de colocación para cada una de las aplicaciones requeridas. Determinando así, los menores costos, para llevarlas a cabo.

Con el paso de los años se han optimizado las operaciones de cementación, conjuntamente con los costos, ya que estos son la parte fundamental en el desarrollo de toda operación en la industria petrolera.

Pero hay diversos aspectos que se tienen que analizar en conjunto. Las operaciones no son acciones aisladas, considerando el nivel de afectación si modificamos uno u otro parámetro, teniendo en mente los costos que implicarían todos estos cambios en el desarrollo del trabajo de cementación.

Tomar una decisión incorrecta o el realizar un mal trabajo de cementación, repercutirá en una mayor inversión que la planeada inicialmente, ya que se tendrán que tomar acciones para reparar una mala cementación, elevando los costos del pozo.

Llevar a cabo un trabajo de cementación forzada, en términos generales dependerá del grado del mal trabajo realizado anteriormente. Con esto se podrá cuantificar el costo que tomará realizar la operación, así como las condiciones actuales que presente el agujero. Esto aumentará en un 20% o quizá más, según sea el caso.

La Tabla 7.2 muestra los costos de una operación de cementación de una tubería de revestimiento. El intervalo de cementación es de 2,100 a 3,700 metros. Los valores presentados son extrapolados del costo más elevado que tomó ese trabajo.

TABLA 7.2 COSTOS DE OPERACIÓN DE UNA CEMENTACIÓN DE UNA TR (De 2,100 a 3,700 m)

Operación	Costo por Día	Perforación y Registro	Corrida de la TR	Costo de Operación
<i>Gastos por Día</i>	-	30	7	37
<i>Gastos Administrativos</i>	1500	45000	10500	55500
<i>Barrenas, Raspadores, Escariadores</i>	-	20000	2000	22000
<i>Campamento y Abastecimiento</i>	600	18000	4200	22200
<i>Inspección de TR's y Reparación</i>	-	15000	10000	25000
<i>Cementación</i>	-	25000	15000	40000
<i>Contrato Laborista</i>	200	6000	1400	7400
<i>Manejo de Núcleos y Análisis</i>	-	20000	10000	30000
<i>Supervisión Directa</i>	1300	39000	9100	48100
<i>Equipo de Perforación</i>	10000	300000	70000	370000
<i>Registros Eléctricos</i>	-	110000	50000	160000
<i>Pruebas a la Formación</i>	-	15000	20000	35000
<i>Pruebas de Laboratorio</i>	-	5000	10000	15000
<i>Servicios</i>	500	15000	3500	18500
<i>Provisiones</i>	200	6000	1400	7400
<i>Lodo y Químicos</i>	-	0	20000	20000
<i>Registro del Lodo</i>	600	18000	4200	22200
<i>Mantenimiento y Reparaciones</i>	200	6000	1400	7400
<i>Perforación</i>	-	0	26000	26000
<i>Herramientas y Renta del Equipo</i>	1500	45000	10500	55500
<i>Transporte de Materiales</i>	-	50000	50000	100000
<i>Otros Transportes</i>	500	15000	3500	18500
<i>Estimulación del Pozo</i>	-	0	50000	50000
<i>Contingencia 20%</i>	-	154600	76540	231140
			COSTO TOTAL	\$ 1,386,877

*COSTOS EN DOLARES

Es imperativo que la cementación no sea sacrificada en cuanto a calidad tanto de diseño como de operación, en aras de reducir los días de perforación y costos en general. Los costos de reparación de los trabajos de cementación, generalmente exceden los costos de perforación.

Las realidades económicas y un incremento en el énfasis por un mejoramiento en la calidad y su propio manejo tienden a apuntar a una revalidación de las relaciones entre las compañías de servicio y los operadores o contratistas de perforación y las vías en las que ellos interactúan para ejecutar trabajos de cementación de pozos de aceite o gas. Se cree que con bases globales, los perforadores y productores se beneficiarán con la formación de asociaciones con las compañías de servicio en donde con mayor responsabilidad en las operaciones de cementación se lograrán mejores trabajos, repercutiendo esto positivamente en las finanzas del proyecto de perforación.

Usando este enfoque, las compañías de servicio, deberán manejar todos los aspectos del programa de cementación establecido, con un planteamiento prioritario para su uso en las actividades a desarrollar para un mejoramiento en los niveles de producción.

Precedentes de este tipo ya existen a nivel mundial con las asociaciones de compañías de servicio y las perforadoras, que en ciertos casos ya pertenecen al mismo grupo interdisciplinario de trabajo.

La baja calidad en un trabajo de cementación puede ser causa de un gasto adicional para el operador, ya que requerirá de un trabajo de reparación de la cementación primaria, como se muestra en la Tabla 7.3. Estos gastos serán mayores al valor del trabajo original. Como lo muestra la Tabla 7.4.

Cuando establecemos la relación entre el operador y la compañía de servicio, el costo total del proceso de cementación deberá considerarse. Realizar un pobre trabajo de cementación puede dar como resultado la pérdida del pozo.

Se deben conjuntar estos aspectos para lograr realizar un buen trabajo de cementación y no realizar operaciones de reparación, elevando los costos de perforación y terminación, así como mejorar la calidad del mismo.

TABLA 7.3 PROBLEMAS TÍPICOS Y GASTOS ASOCIADOS CON LA CEMENTACIÓN DE UNA TR SUPERFICIAL

TIPO DE PROBLEMA	FRECUENCIA DEL PROBLEMA (%)	COSTO DE REPARACIÓN DEL PROBLEMA (DLS)	COSTO ESPERADO DEL PROBLEMA (DLS)
RETORNO PARCIAL DEL CEMENTO	35%	X 5,600	= 1,960
ZAPATA HUMEDA	25%	X 26,100	= 6,525
DESPLAZAMIENTO INCOMPLETO	5%	X 3,000	= 150
MIGRACION DE GAS	5%	X 25,900	= 1,295
COSTO TOTAL DE LOS PROBLEMAS POR POZO			= 9,930

TABLA 7.4 COSTOS RELATIVOS A LOS TRABAJOS CORRECTIVOS COMPARADOS CON LOS COSTOS DEL TRABAJO DE CEMENTACIÓN ORIGINAL

TIPO DE TRABAJO	COSTO DEL TRABAJO DE CEMENTACIÓN INICIAL	COSTO ESPERADO DE LOS PROBLEMAS (RELACIONADOS CON LA CEMENTACIÓN) (DLS)	COSTO DEL PROBLEMA RELATIVO AL TRABAJO INICIAL (%)
TR SUPERFICIAL	18,100	9,930	55%
TR INTERMEDIA	52,200	7,600	15%
LINER	22,200	26,600	120%
TR DE PRODUCCION	23,800	19,900	84%

En vista de que el mayor componente, ya no es sólo el cemento y que los materiales a ser usados para el acondicionamiento del cemento son numerosos, éstos solamente necesitan cumplir con las regulaciones establecidas por los organismos competentes, como el API.

El principal criterio de selección de materiales equivalentes es el precio. Esto nos permite reducir significativamente los costos en el servicio de cementación con la adecuada adquisición y una disposición logística.

7.3 COMPARACIÓN DE COSTOS DE UNA CEMENTACIÓN DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA

Los costos de la cementación de una TR corta de 3 1/2" en un agujero de 4 1/8", se muestran en la Tabla 7.5. De manera comparativa, para apreciar la reducción efectiva de los costos, se presenta el costo que implicaría cementar una TR corta convencional de 5" en un agujero de 6 1/2", en el caso de que así fuese programada desde el inicio de la perforación del pozo. Se consideró el mismo diseño del cemento, aunque únicamente se contemplaron los baches lavador y espaciador.

En base a un programa de optimización propuesto por la compañía de servicio asignada, el volumen de lechada bombeado en esta operación (8 bbl) no resulta suficiente para cubrir la totalidad del intervalo hasta la boca de la TR corta, debiendo ser de 10 bbl, considerando además la utilización de un empacador externo para cubrir la boca de la TR corta, para sellar completamente la misma y

evitar la posible migración del gas y por lo tanto la canalización del cemento, se presentan los costos para dicha propuesta (Tabla 7.6).

TABLA 7.5 CEMENTACIÓN DE TR CORTA CONVENCIONAL

CONCEPTO	TR 3 1/2"	TR 5"	CIA. SERVICIO
TUBERIA DE REVESTIMIENTO	109.230	169.910	TAMSA-PRINVER
ARMADO, INTRODUCCION Y ANCLAJE DE TR	6.125	7.963	BAKER
ACCESORIOS PARA TR CORTA	83.600	54.750	BAKER
CEMENTO CON ADITIVOS	16.075	44.206	DOWELL
BACHE LAVADOR	5.397	8.995	DOWELL
BACHE ESPACIADOR	9.844	16.407	DOWELL
SERVICIO DE CEMENTACIÓN	99.481	103.945	DOWELL
TOTAL	329.752	406.176	

COSTO EN MILES DE PESOS

TABLA 7.6 CEMENTACIÓN DE TR CORTA OPTIMIZADA

CONCEPTO	TR 3 1/2"	CIA. SERVICIO
TUBERIA DE REVESTIMIENTO	109.230	TAMSA-PRINVER
ARMADO, INTRODUCCION Y ANCLAJE DE TR	6.125	BAKER
ACCESORIOS PARA TR CORTA	138.350	BAKER
CEMENTO CON ADITIVOS	24.113	DOWELL
BACHE LAVADOR	5.397	DOWELL
BACHE ESPACIADOR	9.844	DOWELL
SERVICIO DE CEMENTACIÓN	99.481	DOWELL
TOTAL	392.54	

COSTO EN MILES DE PESOS

8.1 CONCLUSIONES

Las funciones de una cementación primaria son controlar el movimiento de fluidos, proporcionar un soporte a la tubería de revestimiento, protegerla de la corrosión, soportar el equipo superficial y aislar zonas de presiones anormales.

En el caso de la cementación de una tubería de revestimiento corta, las razones de cementarla son evitar problemas durante la perforación, tales como pérdidas de lodo, pegaduras de tubería, tener mayor rango de densidades del lodo y mayor capacidad del equipo de perforación, en cuanto a profundidad.

El propósito de una cementación forzada es el de corregir una cementación primaria defectuosa, sellar los disparos no deseados o cambiar de intervalo, taponar canalizaciones, o bien, reparar una tubería de revestimiento dañada.

Los tapones de cemento se colocan por varias razones, algunas de ellas son: abandono, desviación del pozo, control de pérdida de circulación y para trabajos correctivos.

La cementación en dos etapas se efectúa en pozos donde se desea cubrir con cemento una gran longitud del espacio anular para no rebasar el gradiente de fractura de la formación o para colocar cemento sólo en el lugar deseado, sin hacer una columna continua de cemento.

En la cementación múltiple de tuberías de producción se elimina la necesidad de terminaciones complejas con empacadores y equipos para zonas múltiples. De esta manera se simplifica el control de las zonas productoras durante los trabajos de reparación.

Para la cementación de un pozo petrolero se utiliza como principal ingrediente en una lechada, el cemento Portland, cuyos componentes son caliza, sílice y arcilla. El cemento Portland fragua y desarrolla resistencia a la compresión como resultado de la deshidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. Por lo que deberá desarrollar esta característica en diferentes clases de ambiente.

El ASTM clasifica al cemento Portland en cinco tipos, los cuales difieren considerablemente de los usados en pozos petroleros ya que éstos están sujetos a un amplio rango de presiones y temperaturas. Por esta razón el API provee ocho clases

de cemento para su uso en pozos petroleros, designándoles una letra para las diferentes clases como son A, B, C, D, E, F, G y H.

La lechada de cemento puede modificar su comportamiento con los sofisticados productos químicos (aditivos), ya sea para acelerar o retardar el fraguado, para aumentar o reducir la viscosidad, incluyendo las demás propiedades.

Para diseñar una lechada de cemento se requerirán calcular volúmenes de materiales, agua, rendimiento y la densidad de todos sus componentes. Para lograrlo se deberá identificar el objetivo o uso para su aplicación.

El diseño de la lechada se apoya con pruebas de laboratorio o trabajos previos disponibles tanto en la literatura técnica como a nivel operativo.

Los parámetros que afectan en menor o mayor medida el diseño de una lechada de cemento son: presión, temperatura, tiempo de bombeabilidad, viscosidad, contenido de agua, tiempo de espesamiento, resistencia del cemento para soportar la tubería, resistencia a la compresión, agua de mezclado, densidad de la lechada, pérdida de circulación, calor de hidratación, permeabilidad, ángulo de desviación, control de filtrado, migración de gas, control de calidad del mezclado y proceso de desplazamiento.

En cada diseño existen una serie de variables o parámetros que se podrán controlar para observar su comportamiento, fijando una y variar las restantes, haciendo esto con todas y cada una de ellas. Este tipo de control es de capital importancia y tiene por objeto evitar que los resultados se vean afectados por factores ajenos al diseño y que sin duda llevarán a obtener resultados erróneos. Al finalizar el trabajo se deberá de realizar un análisis de los resultados.

En las condiciones que se encuentre el pozo, se indicará si es necesario el uso de materiales especiales (aditivos u otros).

La columna de la lechada de cemento ejerce una presión hidrostática la cual deberá ser mayor que la presión de formación y menor que el gradiente de fractura para poder realizar el trabajo de cementación.

Al ingeniero de perforación le concierne la selección del cemento adecuado, la técnica de colocación adecuada y la composición idónea, ya que ésta deberá ser de modo tal que el cemento alcance una resistencia óptima, después de su colocación.

Para asegurarse que cada fase del trabajo de cementación se está llevando a cabo según el programa establecido, se deberán verificar muchos detalles. Las frases claves para un buen control, son “nunca suponer, siempre verificar; nunca estimar, siempre calcular”.

Hay dos factores básicos que influyen en el diseño de una lechada de cemento y son la temperatura y la presión, principalmente. Afectando el tiempo de bombeo y la resistencia a la compresión del cemento.

La lechada de cemento deberá tener una viscosidad que logre la máxima eficiencia de desplazamiento del lodo y permitir una buena adherencia con la formación y la tubería.

El tiempo de espesamiento será el mínimo tiempo requerido para mezclar y bombear la lechada de cemento deseado.

La resistencia a la compresión, es la resistencia que desarrollará el cemento a una fuerza compresiva por unidad de área, de tal manera que tienda a colapsarlo, soportando los diferenciales de presión a través del cemento. La temperatura afecta la resistencia a la compresión. Altas temperaturas reducen el tiempo necesario para que la lechada de cemento pueda alcanzar los niveles de compresibilidad. Un valor de la resistencia a la compresión de 500 psi como mínimo, se requiere para garantizar que el cemento realice adecuadamente sus funciones. Cualquier valor mayor mejorará el comportamiento.

Los requerimientos de agua para el mezclado variará dependiendo de la clase de cemento y densidad de la lechada. Se debe calcular el volumen exacto, asegurando así el adecuado suministro de agua. Los requerimientos de ésta pueden ser considerables si la densidad de la lechada es baja.

La densidad de la lechada deberá ser, excepto para cementaciones forzadas, suficiente para mantener el control del pozo. Propiedades como la resistencia a la compresión, viscosidad, pérdida del filtrado, agua libre, etc. dependen también de la densidad de la lechada de cemento.

La pérdida de circulación es la pérdida de fluido desde el pozo hacia las formaciones adyacentes. Y esta ocurre cuando encontramos formaciones extremadamente permeables o cuando hay una formación fracturada o es generada por la excesiva densidad de la lechada de cemento.

Una de las razones por las que la cementación de tuberías de revestimiento resultan canalizadas, se atribuye a la reducción de presión hidrostática en el espacio anular, durante el proceso de hidratación del cemento.

Un buen control de pérdida de filtrado de la lechada es importante para evitar la migración de gas. Los factores que influyen en la pérdida de filtrado son el tiempo, la presión, la temperatura y la permeabilidad.

Se deberá aplicar una adecuada energía de agitación para mojar completamente todas las partículas sólidas y facilitar el rendimiento de los aditivos y del cemento.

Un inadecuado desplazamiento puede ser la causa principal de malos trabajos de cementación.

Las lechadas de cemento son sistemas activos y sus propiedades reológicas cambian continuamente con el tiempo.

Las lechadas de cemento muestran un comportamiento no newtoniano y normalmente son fluidos pseudoplásticos con punto de cedencia y propiedades de tixotropía. Los modelos que describen de manera general las propiedades reológicas de las lechadas de cemento son el de Ley de Potencias con Punto de Cedencia y el Plástico de Bingham.

La dependencia de las propiedades reológicas de las lechadas con respecto a la presión, se considera mínima o despreciable, ya que éstas son base agua.

La temperatura puede tener un efecto drástico sobre la reología de la lechada de cemento, pero su magnitud es altamente dependiente de la clase de cemento y de sus aditivos.

Los sistemas de cementos han sido diseñados para diferentes rangos de presión y temperatura, o bien, para fluidos corrosivos.

Para evitar la contaminación del cemento con el lodo de perforación se utilizan fluidos intermedios llamados baches. También se utilizan fluidos lavadores para la remoción del lodo.

Para la cementación de tuberías cortas en agujero reducido se deben utilizar:

- Lechadas de cemento de bajos valores reológicos (viscosidad plástica de 30 a 40 cp, punto de cedencia del orden de 5 lb/100 pie²), pérdida de filtrado de 20 a 35 ml/30 min y agua libre de cero.
- Se debe aplicar flujo laminar para el desplazamiento.
- Centrar la tubería de revestimiento con centradores flexibles.
- Utilizar medios mecánicos para mejorar la eficiencia de desplazamiento del lodo y adherencia del cemento (movimiento de rotación y reciprocante).
- Utilizar lechadas de cemento con tiempo de transición cortos y pueda desarrollar un esfuerzo compresivo mayor a 500 psi durante las doce horas siguientes a la operación.

Los pozos horizontales pueden ser de radio largo, medio, corto y ultracorto. Unas variantes de este tipo de pozos son los de alcance extendido y multilaterales. Los pozos horizontales pueden ser terminados sin ser cementados. La sección horizontal generalmente se termina con una tubería de revestimiento corta, ya sea ranurada, perforada o con cedazos.

En la cementación de pozos horizontales las propiedades más importantes, son:

- La estabilidad de la lechada (no asentamiento de sólidos).
- Evitar la liberación de agua libre.
- Poner atención en un adecuado centrado de la tubería de revestimiento.

Para la cementación de pozos de alcance extendido se deberá poner mucho cuidado en los siguientes puntos:

- Centrado de la tubería, ya que en estos casos se tienen grandes tramos de tubería horizontal.
- El cemento tendrá que desarrollar alta resistencia a la compresión

- El fraguado debe ser rápido debido a que el peso de las capas suprayacentes tratarán de colapsarlo.
- Otro aspecto que se deberá cuidar es la pérdida de filtrado, ya que hay una área mayor de contacto cemento-formación.
- Se tendrá que contar con equipo de mayor capacidad, ya que los requerimientos de volúmenes de cemento serán grandes.
- El desplazamiento del cemento se hará en flujo turbulento para evitar el asentamiento de partículas y mejorar la distribución del cemento alrededor del revestimiento.

En el caso de cementación de pozos multilaterales, se considerarán los siguientes puntos:

- Centrado de la tubería de revestimiento.
- Estabilidad de la lechada.
- Evitar sedimentación de sólidos y pérdida de filtrado.
- El cemento deberá desarrollar alta resistencia a la compresión, proporcionando estabilidad mecánica e integridad hidráulica para resistir los diferenciales de presión.
- Evitar la liberación de agua libre.
- Utilizar un sistema de un solo tapón para reducir los riesgos de un entrapamiento.
- La distribución del cemento se logra con flujo turbulento y rotando la tubería abajo del tramo con ventana.

En la cementación de pozos en aguas profundas se debe de tener un especial cuidado, con:

- Las arenas no consolidadas que hay debajo del fondo marino ya que éstas arenas son altamente permeables y permiten el flujo de aguas someras las que pueden acarrear graves consecuencias como el tener que realizar una cementación forzada o hasta la pérdida del pozo.
- La cementación de pozos en aguas profundas es costosa y técnicamente problemática.
- La lechada de cemento para pozos en aguas profundas debe estar balanceada cuidadosamente de tal forma que la presión hidrostática de la columna de lechada se encuentre entre la presión de fractura y la presión de formación, ya que el margen entre estas presiones es muy pequeño.
- Otro punto importante en el diseño de la lechada de cemento es la variación de temperaturas desde la superficie hasta su destino final. Se utilizan lechadas de baja densidad particularmente cementos espumosos.

El registro CBL junto con el registro de densidad variable VDL, ha sido durante muchos años el método para evaluar la calidad de la cementación.

La mayoría de los problemas asociados con el registro CBL, están asociados con el centrado de la herramienta, el manejo y el efecto de los microanillos. Una buena calidad en la toma del registro es un prerequisite para una óptima interpretación del mismo.

La velocidad de atenuación está directamente relacionada a la impedancia acústica del cemento detrás de la tubería de revestimiento, a pesar del tipo de lechada usado, incluyendo cemento espumoso. Esto es particularmente importante para el caso en el que se apliquen lechadas de baja densidad de tipo espumoso para la cementación en aguas profundas.

La herramienta CET, tiene ciertas características que permiten mejorar considerablemente la calidad de la evaluación del cemento. No solamente es insensible a los diferentes factores que limitan generalmente la interpretación de los registros CBL-VDL. La presencia de cemento detrás del revestimiento produce una rápida atenuación de la resonancia, mientras que la ausencia de cemento provoca un largo período de atenuación.

Conociendo la velocidad de propagación de la onda en el fluido del pozo mediante el transductor de referencia, es posible convertir los tiempos de tránsito en distancias.

La temperatura en el pozo puede ser transmitida a través de las tuberías de perforación o de revestimiento, no exclusivamente debido al gradiente geotérmico, sino también al fluido usado para la operación de cementación, por ello los registros de temperatura son utilizados para detectar las cimas de cemento, ya que el cemento al hidratar genera una cantidad de calor considerable.

Con los trazadores radiactivos, la cima del cemento se puede determinar exactamente si la parte superior emite radiactividad. El trazador es agregado durante el mezclado del cemento en forma de sal soluble. La principal ventaja de los trazadores radiactivos es la rápida localización del material detrás de la tubería de revestimiento. Y la principal desventaja es cuanto al manejo de este tipo de materiales radiactivos.

La herramienta USI pertenece a la segunda generación de herramientas ultrasónicas. Las principales mejoras son en el procesamiento de la señal en forma más exacta, proporcionando respuestas consistentes de la impedancia acústica. También presenta un mapa a color para poder identificar más rápidamente los problemas que se tengan con la envoltura de cemento. Es del tipo de herramienta de adherencia circunferencial, además que puede identificar fácilmente la presencia de gas u otro fluido dentro de la envoltura de cemento.

La herramienta de atenuación de velocidad no se ve afectada por el tiempo de tránsito del fluido.

El registro VSL (Volumetric Scan Log) será la herramienta que se utilice en el futuro para la evaluación de la cementación, ya que ésta opera como un televidente en el fondo del agujero y con los datos recabados en él, usando un procesador especial crea una imagen tridimensional de la envoltura del cemento alrededor de la tubería de revestimiento.

Durante la perforación y terminación de pozos petroleros, resulta importante la etapa de cementación, es por ello, que se deberán tomar en cuenta todos y cada uno de los procesos relacionados con ella y su representación en números, para su ejecución como un trabajo que debe optimizar los gastos.

Llevar a cabo una cementación forzada para corregir una cementación primaria aumentará el costo de la operación original un 20 % más.

Es imperativo que la cementación no sea sacrificada en aras de reducir los días de perforación y costos en general.

En la región marina los costos en general aumentan en promedio de un 30 a 35 % de lo que costaría el mismo trabajo en tierra.

Cuando se efectúa una cementación se debe considerar como un proceso integral. No es un trabajo que pueda monitorear una sola persona, es un esfuerzo de equipo que necesita incluir a la gerencia, a los supervisores, a los ingenieros, a los contratistas y al personal de las compañías de servicio.

El proceso de cementación no es aquel que pueda iniciarse cuando la tubería ya está en el fondo lista para cementar. Debe iniciarse durante la perforación del pozo y todo lo que se pueda hacer para mejorar la cementación. El proceso requiere atención, llevando un buen control estadístico del mismo. La tecnología mejora todos los días y se debe estar al corriente si se quiere hacer lo mejor posible. Sólo si existen buenos bancos de datos de los cuáles pueda evaluarse lo que ha ocurrido durante una cementación, se puede optimizar el diseño de la cementación y con esto conseguir mejores resultados en las cementaciones.

La disponibilidad de una buena tecnología no produce automáticamente una utilidad (o una meta comparable). El "puente" necesario entre la tecnología y la utilidad es el profesionalismo con el cual se utiliza la tecnología. Un creciente número de personas conocedoras creen que el nivel general de profesionalismo tiene que ser elevado si se quiere mejorar la industria. La industria petrolera no es la única en este sentido.

Si al estar perforando la siguiente etapa, la presión declina más de un 10% en 30 minutos, esto es indicativo de una cementación inapropiada o canalización del cemento, entonces se deberán tomar medidas correctivas.

Ningún aditivo único, ninguna técnica única, conseguirá una cementación exitosa. Se requiere hacer un análisis completo de ingeniería de todos los parámetros en la desarrollo de una cementación para garantizar que esta sea satisfactoria.

8.2 RECOMENDACIONES

De acuerdo con el estado de arte de la tecnología de la cementación de pozos petroleros y de las conclusiones anteriores, se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

- La tubería deberá de ser rotada o reciprocada antes y durante la cementación para evitar una gelificación del cemento, tapones o acumulaciones de recortes que puedan atrapar a la tubería. Permitiendo esto un buen desplazamiento con bajos gastos, ayudando con esto a colocar la lechada alrededor del revestimiento.
- Después haber cementado el revestimiento anterior y posteriormente perforado aproximadamente 10 pies de la nueva formación, se deberá de efectuar una prueba de presión para poder determinar su gradiente de fractura.
- Los estudios de temperatura se recomiendan efectuar en agujeros ademados para el propósito de localizar la cima del cemento en el espacio anular.
- Para reducir las probabilidades de que la cementación resulte canalizada debido a la excentricidad de la tubería del pozo, se sugiere mover la tubería en sentido rotacional.
- Una adecuada remoción del lodo ayuda a evitar la migración de gas hacia el espacio anular.
- Para minimizar la migración del flujo de gas de la formación al pozo, se sugiere el empleo de lechadas que transmitan su presión hidrostática de manera más uniforme durante el proceso de hidratación del cemento. Esta característica la exhiben las lechadas de baja pérdida de agua y que no exhiben tixotropía; además, su tiempo de espesamiento deberá ser el mínimo posible.
- Se debe correr el registro de temperatura, antes de correr el CBL para la evaluación de cementos espumosos.
- Se deberán emplear extendedores para incrementar la cantidad de agua requerida y reducir el costo del material utilizado.

- El registro de temperatura es útil en la evaluación de cementos, particularmente si se combina con otras herramientas.
- Se deberá poner atención en la configuración de los distintos esfuerzos con respecto al flujo de aguas someras para la cementación en aguas profundas.
- Si deberá hacer más énfasis en la investigación acerca de los cementos que se requieren para diseñar lechadas de baja densidad en la cementación de aguas profundas.
- En la cementación de pozos no convencionales se recomienda poner atención en un análisis exhaustivo de la operación y los aditivos que se utilizarán.
- Sin excepción alguna salvo la TR conductora, antes de perforar fuera del último revestimiento o liner después de haber sido cementado, todas las TR's, liners y traslapes deberán ser examinados y probados para soportar las condiciones de presión y temperatura del agujero.
- No se debe asumir que la cementación será fácil, ni con lo que esté sucediendo o haya sucedido durante la perforación del pozo.
- Presentar resultados de cementaciones anteriores de una manera clara y practica, de tal manera que sirva a las necesidades y requisitos técnicos de los usuarios para trabajos futuros.
- Mantener interacción directa con las compañías prestadoras de servicios, a fin de conocer las nuevas herramientas y equipos empleados.
- En algunos casos donde el tiempo bombeable y la resistencia a la compresión cumplan con los requerimientos mínimos, los datos de los reportes generales de laboratorio, son lo suficientemente exactos para ejecutar el trabajo de cementación.
- En la cementación de pozos multilaterales no se deberán colocar centradores en los tramos con ventana o en la conexión del pozo principal con los brazos y de esta manera no estorben en la perforación lateral.

- En los pozos multilaterales se deberá utilizar una sarta estabilizadora interna si se va a instalar más de un tramo con ventana.
- Debido a que algunas operaciones requieren de mayor exactitud (como el caso de cementaciones a presión prolongadas y en general las cementaciones de pozos profundos con temperatura de fondo alta) para estos pozos, en el laboratorio regional se correrán pruebas con diseños apropiados para cada pozo en particular con el cemento que se usará.
- Se requieren utilizar lechadas de cemento con tiempos de transición cortos y que pueda desarrollar un esfuerzo compresivo mayor a 500 psi durante las 12 horas siguientes a la operación, esto minimizará la migración de gas en zonas productoras.
- Investigar sobre la evaluación cuantitativa de la adherencia del cemento.
- Centralizar adecuadamente la TR (con centradores) y utilizar métodos mecánicos para mejorar la eficiencia de desplazamiento del lodo y la adherencia del cemento.
- Y la mayor de todas estas recomendaciones, es la de no dejar este tipo de trabajos hasta aquí, sino ampliar estas investigaciones más, conforme las innovaciones tecnológicas se presenten. Se da solo un paso más, pero no debe ser el único, se sugiere seguir aportando ideas, propuestas, herramientas, software, técnicas, etc., todo para lograr solucionar una amplia gama de problemas que aún se presentan en las cementaciones. Para lograr óptimos resultados y no generar más errores, que resultan en pérdidas de tiempo y dinero.

BIBLIOGRAFÍA

- Paul E. Pilkington, "Cement Evaluation Past, Present, and Future", JPT, Febrero 1992.
- Smith Dwight K, "Cementing", Second Printing, SPE, 1976.
- J.J. Jutten, "Relationship Between Cement Slurry Composition, Mechanical Properties, and Cement-Bond-Log Output", SPE Production Engineering, Febrero 1989.
- K.J. Goodwin, "Guidelines for Ultrasonic Cement-Sheath Evaluation", SPE Production Engineering, Agosto 1992.
- Sora Talabani, "Gas Channeling and Micro-Fractures in Cemented Annulus", SPE 26068, Mayo 1993.
- "Well Logging Methods", Lesson 3, Petroleum Extension Service, Austin Texas, 1971.
- Halliburton, "Coiled Tubing Services", A Wealth of Applications for the Energy World, Enero 1998.
- Industrial Rubber Inc. Oil Tool Division, Oklahoma City, Febrero 1998.
- Michael J. Economides, "Petroleum Well Construction", John Wiley & Sons Published, Junio 1998.
- API Specification 10 (Spec 10), Fifth Edition, July 1 1990. "Specification for Materials and Testing for Well Cements", Noviembre 1997.
- Fred I. Sabins, "Problems in Cementing Horizontal Wells", SPE, Halliburton Services, JPT, Abril 1990.
- J.J. Jutten, "Studies with Narrow Cement Thickness Lead to Improved CBL in Concentric Casing", SPE, JPT, Noviembre 1989.
- Alonso Cárdenas Ignacio, "Apuntes de Terminación de Pozos", Facultad de Ingeniería, UNAM, Abril 1983.
- Nelson E.B., "Well Cementing", Dowell Schlumberger Educational Services, 1991.
- H. Gai, T.D. Summers, "Zonal Isolation and Evaluation for Cemented Horizontal Liners", SPE 29981, Noviembre 1995.
- Walter H. Fertl, "A Look at Cement Bond Logs", SPE-AIME, Febrero 1974.
- R.J. Butsch, "Overcoming Interpretation Problems of Gas Contaminated Cement Using Ultrasonic Cement Logs", SPE 30509, Octubre 1995.
- Bourgoyne Adam T., "Applied Drilling Engineering", SPE, Series Vol. 2, Second Printing 1991.
- Poblano Ordóñez Raúl, "Comportamiento de las Lechadas Durante el Proceso de Hidratación del Cemento", Ingeniería Petrolera, Enero 1981.

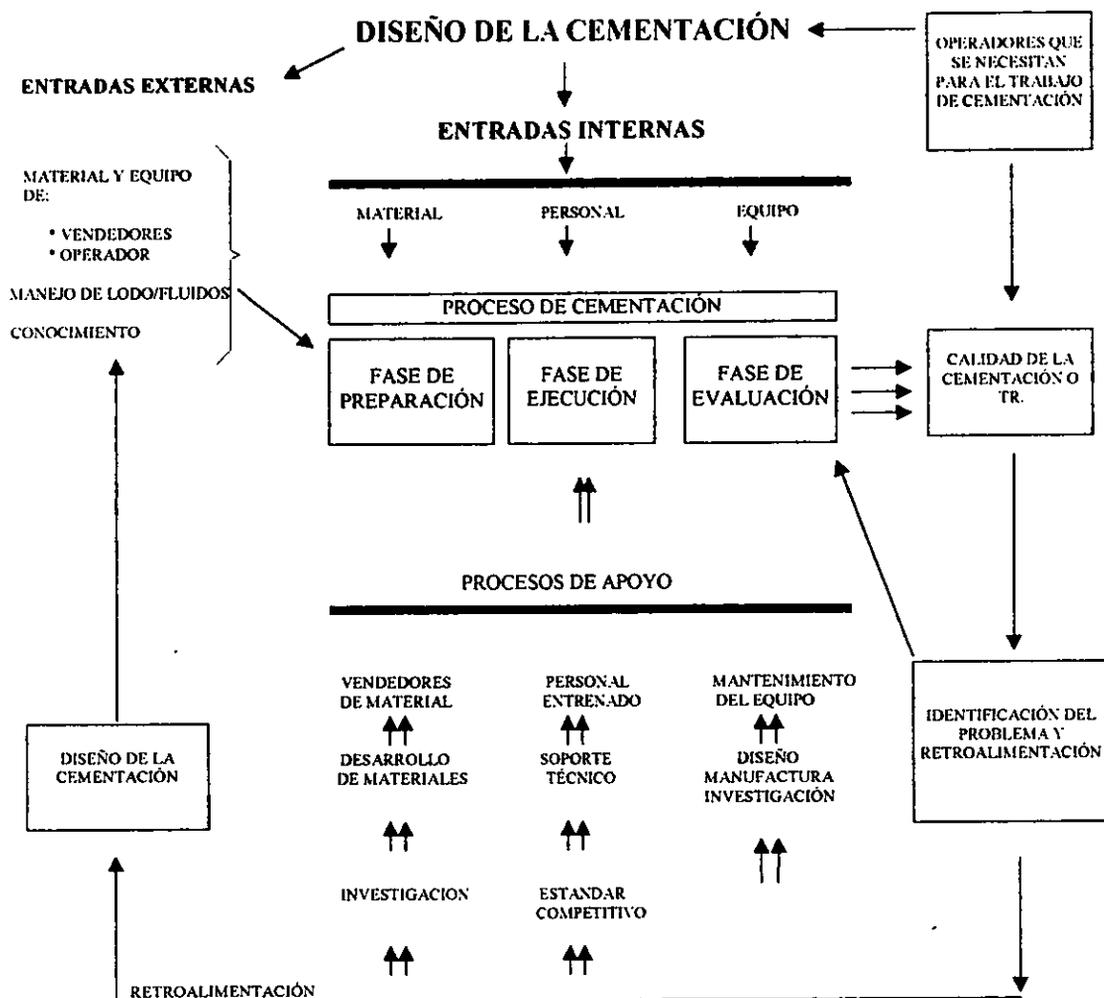
- W.H. Grant, "Field Limitations of Liquid Additive Cementing Systems", SPE/IADC 18619, 1989.
- D.J. Calvert, "API Oilwell Cementing Practices", OTC 6210, 1990.
- Charles George, "Ten Steps to Improve Your Next Cement Job", Petroleum Engineer, Enero 1992.
- M.L. Stephens, "Test Your Knowledge", Petroleum Engineer, Junio 1990.
- M.A. Benitez Hernández, "Apuntes de Tecnología de Perforación", Segunda Parte, F.I., Abril 1988.
- Neal J. Adams, "Drilling Engineering: A Complete Well Planning Approach", Pennwell Tulsa Oklahoma, 1985.
- Clark C.R., "Mud Displacement with Cement Slurries", JPT, 1973.
- Vidick B., "Critical Mixing Parameters for Good Control of Cement Slurry Quality", SPE 18895, 1989.
- C. Cook, "Filtrate Control A Key in Successful Cementing Practices", SPE 5898, 1976.
- "Cementing: A Well Completion Reference", World Oil Supplement, Marzo 1997.
- P. Rosemary Hornbrook, "Improved Coiled-Tubing Squeeze-Cementing Techniques at Prudhoe Bay", JPT; Abril 1991.
- H.A. Bergeron, "Cement Quality Control Program Shows Substantial Savings", SPE/IADC 18621, 1989.
- R.P. Matson, "The Effects of Temperature, Pressure, and Angle of Deviation on Free Water and Cement Slurry Stability", SPE 22551, 1991.
- Calvin Stegemoeller, "Automatic Density Control and High Specific Mixing Energy Deliver Consistent High-Quality Cement Slurries", OTC 7068; 1992.
- Denis J.H. and Guillot D.J., "Prediction of Cement Slurry Laminar Pressure Drops by Rotational Viscometry", SPE 16137, 1987.
- Shah S.N. and Sutton D.L., "New Friction Correlation for Cement from Pipe and Rotational Viscometer Data", SPE 19539, 1989.
- Jabal Tejada Arias, "Ingeniería de Cementaciones", Subdirección de Perforación y Mantenimiento a Pozos, Petróleos Mexicanos.
- David R. Casas, "Una Cementación Exitosa", Ingeniería Petrolera, Febrero 1992.
- Michael J. Economides, "Reservoir Stimulation", Second Edition.
- R.J. Crook, "Solutions to Problems Associated with Deviated-Wellbore Cementing", SPE 14198, 1985.
- Riley Sheffield, "Floating Drilling: Equipment and Its Use", Gulf Publishing, Houston Texas, 1982.

-
- Fred L. Sabins, "Problems in Cementing Horizontal Wells", SPE JPT, Abril 1990.
 - Petroleum Extension Service, "Well Completion Methods", The university of Texas At Austin, Austin, Texas, 1971
 - Charles George, "Innovations Change Cementing Operations", Petroleum Engineer, October 1990.
 - P. Rosemary Hornbrook, "Improved Coiled-Tubing Squeeze-Cementing Techniques at Prudhoe Bay", JPT April 1991.
 - Ing. Manuel J. Silva Alcalá, "Movimiento de TR's Cortas Durante la Cementación y Aplicación en el Distrito de Reynosa", Ingeniería Petrolera, Febrero 1994.
 - S.H. Shryock, "Problems Related to Squeeze Cementing", SPE 1993
 - www.halliburton.com, Abril, 1998.
 - www.exxon.com, Abril, 1998.
 - www.avalon.com, Abril, 1998.
 - www.touchgo.com, Abril, 1998.
 - www.dowell.com, Abril, 1998.
 - www.oxy.com, Abril, 1998.
 - www.irioiltool.com, Abril, 1998.
 - Mark E. Teel, Senior Engineering Editor, "What's Happening in Drilling", World Oil, Enero 1998.
 - R.D. Stilley, "Cementing as a Total Service", IADC/SPE 23898, Febrero 1992.
 - Brent Lowson, "Multilateral-Well Planning", IADC/SPE, JPT Julio 1998.

ANEXOS

ANEXO.- A

PROCESO PARA LA CEMENTACIÓN DE UN POZO



ANEXO.- B ADITIVOS DE USO FRECUENTE PARA LA CEMENTACIÓN DE POZOS

CATEGORÍA DE ADITIVO	EFFECTO	COMPOSICIÓN QUÍMICA	MECANISMO DE ACCIÓN
Accelerador	Acorta el tiempo de espesamiento	CaCl ₂ NaCl	Incrementa la permeabilidad de la capa de gel C-S-H Formación de gel C-S-H por reacción con iones de Ca ⁺⁺
Retardador	<p>Acorta la resistencia a la compresión</p> <p>Prolonga el tiempo de espesamiento</p>	<p>Silicatos Sódicos</p> <p>Lignosulfonatos</p> <p>Ácidos hidroxycarboxílicos</p> <p>derivados de la celulosa</p> <p>Organo/fosfonatos</p> <p>Ciertos compuestos inorgánicos</p>	<p>Adsorción de la capa de gel C-S-H, reduciendo la permeabilidad</p> <p>Prevención de la nucleación y crecimiento de los productos hidratados</p> <p>Precipitación de los sólidos impermeables en la capa de gel C-S-H.</p>
Escondedores o Reductores de la Densidad	<p>Bajan la densidad de la lechada</p> <p>Aumentan el rendimiento de la lechada</p>	<p>Bentonita</p> <p>Silicatos de Sodio</p> <p>Puzolana</p> <p>Gilsonita</p> <p>Carbón en polvo</p> <p>Micas finas</p> <p>Nitrogeno</p>	<p>Formación de gel C-S-H + adsorción de agua</p> <p>Tienen densidad más baja que la del cemento</p>
Agentes Desulfatante	Aumenta la densidad de la lechada	<p>Barrita (BaSO₄)</p> <p>Hemedia (Fe₂O₃)</p> <p>Ilmenita (FeTiO₃)</p>	<p>Comento Espumoso</p> <p>Se densidad es más alta que la del cemento</p>
Dispersante	Disminuye la viscosidad de la lechada	<p>Sulfonato polynafaleno</p> <p>Sulfonato poly-oximina</p> <p>Lignosulfonatos</p> <p>Sulfonato polystireno</p> <p>Ácidos Hidroxycarboxílicos</p> <p>Polímeros celulósicos</p>	<p>Inducen la repulsión electrostática de los granos de cemento</p>
Aditivos para la pérdida de filtrado	Reducen la deshidratación de la lechada de cemento	<p>Polímeros</p> <p>Polímeros sulfonados aromáticos</p> <p>Polyvinilpirrolidón</p> <p>Polyvinilalcohol</p> <p>AMPS copolímeros o terpolímeros</p> <p>Bentonita</p> <p>Latices</p>	<p>Incrementan la viscosidad de la fase acuosa de la lechada</p> <p>Reducen la permeabilidad del filtrado del cemento</p> <p>Forman puentes entre las partículas de cemento del filtrado</p>
Agentes para la pérdida de circulación	Impiden la pérdida de lechada hacia la formación	<p>Gilsonita</p> <p>Carbón granular</p> <p>Hoja de celulosa</p> <p>Cascara de nuez</p> <p>Feno</p> <p>Ciertas sales de sulfato solubles</p> <p>Bentonita</p>	<p>Ejercen un puenteo a través de la formación</p> <p>Inducen un comportamiento isoréptico a la lechada de cemento</p>
Agentes antiepumante	Disminuyen la entrada de aire, ayudando el mezclado de la lechada de cemento	<p>Eter poliglicol</p> <p>Silicatos</p>	<p>Insoluble en sistemas espumosos</p> <p>Disminuye la tensión superficial del sistema espumoso.</p>
Agentes radiactivos o trazadores	De fácil localización dentro del revestimiento	<p>Si³²</p> <p>Br⁸²</p> <p>Rn²²²</p>	<p>Emisión de radiactividad</p>

ANEXO.- C COMPENDIO DEL EQUIPO DE CEMENTACIÓN Y AUXILIARES MECÁNICOS

<u>EQUIPO:</u>	<u>FUNCIÓN/ APLICACIÓN:</u>	<u>COLOCACIÓN:</u>
<p><u>Equipo de Flotación</u> Zapatras Guías</p> <p>Coples de Flotación</p>	<p>Para guiar la TR dentro del pozo Para reducir el esfuerzo de la Torre de Perforación</p> <p>Para impedir el reflujo de cemento Para crear presión diferencial para mejorar la adhesión. Para atrapar los tapones.</p>	<p>Primera junta de la TR</p> <p>Una junta arriba de la zapata en pozos menores a los 6000 pies de profundidad y 2 ó 3 juntas arriba de la zapata en pozos profundos arriba de los 6000 pies.</p>
<p><u>Equipo de Llenado Automático</u> Zapatras y coples</p> <p>Zapatras de flotación y coples de llenado diferencial</p>	<p>Tienen la misma que las ordinarias zapatas de flotación y coples; también para controlar la presión hidrostática en el espacio anular mientras la tubería esta siendo corrida hacia el fondo del pozo.</p>	<p>Tienen la misma que las zapatas y coples del tipo ordinario.</p>
<p><u>Herramientas de Empacamiento de la Formación</u> Zapatras emparadoras Coples empaadores</p>	<p>Para proteger las zonas bajas durante la cementación.</p>	<p>Primera junta de la TR</p> <p>Dependiendo de los requerimientos del agujero.</p>
<p><u>Herramientas de Cementación por Etapas</u> Herramientas de dos etapas Herramientas de tres etapas</p>	<p>Para cementar dos ó más secciones en etapas separadas.</p>	<p>Esta basada en zonas críticas y gradientes de fractura.</p>

CONTINUACIÓN DEL ANEXO.- C

<p><u>Contenedores de Tapones</u> Contenedores de Apertura-Rápida Cabezas de Cementación Continuas <u>Tapones de Cementación</u> Tapones de limpieza superior e inferior Tapones de Bola Tapones con Seguro de Fondo <u>Centradores de la TR</u></p>	<p>Para agarrar los tapones de cementación dentro de la sarta de revestimiento hasta que los tapones son liberados. Para actuar como un espaciador entre el lodo y el cemento (tapón inferior) y entre el cemento y el fluido desplazador (tapón superior).</p>	<p>Para la unión de la TR en la superficie del pozo. Entre los fluidos de perforación y el cemento.</p>
<p>Varios Tipos</p>	<p>Para centrar la TR en el agujero o proporcionar el mínimo claro para mejorar la distribución del cemento en el espacio anular y prevenir la pegadura diferencial.</p>	<p>En agujero Recto: uno por junta a lo largo y a 200 pies arriba y abajo de las zonas de producción; o uno por cada tres juntas en agujero abierto para ser cementado. En agujero Desviado: variable, dependiendo del grado de desviación del agujero.</p>
<p><u>Raspadores</u> Raspadores Rotatorios Raspadores Recíprocos</p>	<p>Para remover el enjarre y el lodo que circula dentro del pozo. Para ayudar en la creación de turbulencia. Para mejorar la adhesión del cemento.</p>	<p>Por medio de las formaciones productoras y de 50 a 100 pies arriba (la tubería será rotada a 15 ó 20 rpm). El mismo que los raspadores rotatorios (la tubería puede ser recíprocada a 10 ó 15 pies fuera del agujero).</p>
<p><u>Equipo Especial</u> Canasta de Cementación</p>	<p>En la colocación de la TR ó liner, para ayudar a las formaciones débiles a soportar la columna de cemento hasta su fraguado.</p>	<p>Abajo de las herramientas de cementación por etapas o en el fondo del agujero donde existan formaciones no consolidadas.</p>

ANEXO.- D PROPIEDADES ACÚSTICAS

La acústica estudia todas las características de propagación de las ondas de sonido. La propagación del sonido es la compresión periódica y rarefacción de las moléculas (en el caso de un gas o un líquido) o la contracción y elongación de las partículas (en el caso de un sólido). Cuando este movimiento ocurre en la misma dirección como propagación de onda, el fenómeno es conocido como *onda compresional*.

En un sólido, se presenta un segundo tipo de onda (*onda de cizallamiento*). Esta no existe en los fluidos. Cuando pasa por un sólido la textura del grano vibra perpendicularmente a la dirección de propagación de onda. La onda de cizallamiento siempre viaja más despacio que la onda compresional. Las velocidades de las ondas compresionales y de cizallamiento están íntimamente relacionadas a las propiedades elásticas del material (Módulo de Young, Módulo de Cizallamiento y Relación de Poisson) y es independiente de la frecuencia. Estas propiedades elásticas relacionan el esfuerzo a la deformación del material siguiendo la Ley de Hooke. En el registro de pozos, las ondas de sonido son generalmente caracterizadas por su lentitud (ΔT), tradicionalmente expresadas en $\mu s/ft$ o $\mu s/m$, que es el inverso de la velocidad. Hoy en la interpretación de los registros acústicos, se enfocan principalmente en la velocidad de propagación de las ondas compresionales. El conocimiento de la velocidad de las ondas compresionales a través del material permite determinar la impedancia acústica compresional (Z) de éste, tradicionalmente expresada en $10^6 \text{ kg/m}^2 s$, también llamados Megarayleigh (Mrayl).

$$Z = \rho V_c$$

donde:

ρ = densidad del material (kg/m^3)

V_c = velocidad de la onda compresional (m/s)

Mientras se propaga a través de un material, la onda sonora pierde energía. Esta pérdida de energía, llamada atenuación, es característica del material y se incrementa con la frecuencia de la onda. No existe ninguna relación general entre atenuación y frecuencia. Para una frecuencia dada la atenuación se expresa normalmente en decibeles (dB) por unidad de longitud.

$$A = \frac{20}{L} \log_{10} \frac{P_X}{P_{X+L}}$$

donde:

A = señal de atenuación (dB)

P_X = señal de presión (amplitud) en X

P_{X+L} = señal de presión (amplitud) en X+L

L = distancia entre dos puntos medidos

Las propiedades acústicas de la formación tienen influencia en los registros acústicos. Los términos de formación rápida y formación lenta se refieren a la velocidad del sonido a través del

seno de la roca. Tradicionalmente, para propósito de evaluación de los cementos, una formación es "rápida", cuando el sonido viaja tan rápido como en la tubería de revestimiento.

Propiedades Acústicas de los Cementos

La respuesta acústica de un registro dependerá principalmente de las propiedades acústicas del cemento. Las propiedades acústicas de las rocas son bien conocidas; de cualquier modo, es más difícil conocer las del cemento, porque éstas cambian con el tiempo. Este principio distingue el análisis crítico hecho al registro en algunas cosas.

- El registro puede cambiar, porque las propiedades físicas del cemento cambian con el tiempo.
- El cemento no tiene el mismo estado físico a lo largo de la sarta de revestimiento. Esto puede producir una diferencia grande en la respuesta del registro en sartas largas donde exista una gran diferencia de temperaturas entre el fondo y la cima del cemento.

Esto da como resultado, que cuando se tienen lechadas de baja densidad, estas presentan una baja impedancia acústica, cambiando significativamente después de varios días. La impedancia acústica de las partes más densas del cemento variara de uno a siete días.

Esto puede ser más severo, cuando se tienen extendidas microesferas de sílice en toda la lechada, las cuales tienen una baja impedancia acústica. El cemento espumoso tiene también una baja impedancia acústica. Cuando la porosidad de la espuma es alta, es muy difícil diferenciar al cemento del agua.

Las fluctuaciones de las propiedades acústicas se pueden presentar durante días o en varias semanas, como se ha observado en el campo. Es evidente la mejoría que se tiene en la respuesta de los registros acústicos cuando ha pasado tiempo suficiente después de la cementación.

Tales problemas a menudo originan una sobreestimación de la temperatura de fondo y la subsecuente sobreretardación de la lechada. A altas temperaturas de la hidratación del cemento es más rápida y las propiedades acústicas se estabilizan más rápido, por lo que se observa menor dependencia del tiempo.

CONTINUACIÓN DEL ANEXO.- D

Material	Densidad (kg/m ³)	Velocidad Acústica (m/s)	Impedancia Acústica (Mrayl)
Gas	1.3 - 130	330	0.0004 - 0.04
Agua	1000	1500	1.5
Fluidos de perforación	1000 - 2000	1300 - 1800	1.5 - 3.0
Lechadas de cemento	1000 - 2000	1800 - 1500	1.8 - 3.0
Cemento (Litefil)	1400	2200 - 2600	3.1 - 3.6
Cemento (clase G, H)	1900	2700 - 3700	5.0 - 7.0
Acero	7800	5900	46

Interpretación de problemas/limitación	GBL/CBT-VDL	CET	USI
Resolución Vertical	3 pies / < a 1	1.2" / 6"	1.5" / 6"
Resolución Radial	1 muestra / profundidad	45° (8 muestras)	10° / 5° (36 o 72)
Cobertura Radial	Si	No	No
Cobertura Vertical	Si	No	No
Canal mínimo cuantificable	BI responde a ambos	45°	1.2"
Limitaciones de Atenuación del lodo	Ninguno	>13 lb/gal base agua	<12 db/cm/MHz ~16 lb/gal base agua ~12 lb/gal base aceite
Sensibilidad al llenado de los microanillos con líquido	Alto	Bajo	Bajo
Sensibilidad al gas	Alto	Alto	Alto
Sensibilidad a formaciones de alta velocidad	Alta / Media	Bajo	Bajo
Sensibilidad al espesamiento de la envoltura del cemento	Alto	Bajo	Bajo
Sensibilidad a la contaminación por gas	Medio	Alto	Alto
Aseguramiento de la adherencia a la formación	Cualitativamente solamente	No	No

ANEXO.- E RESUMEN DE LOS PROCESOS DE PRUEBA EN LABORATORIO PARA LOS CEMENTOS USADOS EN POZOS PETROLEROS

CATEGORÍA DE LA PRUEBA	EQUIPO	REFERENCIA DEL PROCEDIMIENTO
Muestreo	División Mecánica Tubo muestreador Muestreador de flujo desviado	ASTM C 702 API Spec 10 (sección 3) Gerke, 1985
Preparación de la lechada	Mezclador de propela de dos velocidades	API Spec 10 (sección 5) Apéndice A
Tiempo de espesamiento	Consistómetro atmosférico Consistómetro presurizado	API Spec 10 (sección 8) Apéndice E
Pérdida de filtrado	Celda de alta pérdida de filtrado usando una malla 325	API Spec 10 Apéndice F
Resistencia a la compresión	Molde de curado 2x2", colocado en agua, o en un autoclave, midiendo la resistencia a la presión hidráulica Analizador ultrasónico del cemento	API Spec 10 (sección 7) Apéndice D Rao, 1982
Agua libre	Cilindro graduado de 250 ml	API Spec 10 (sección 6) Apéndice M
Permeabilidad	Permeámetro	API Spec 10 Apéndice G
Rheología	Viscosímetro rotacional (T-C) Viscosímetro rotacional (T-S) Reómetro de flujo en tubería	API Spec 10 Apéndice H Orban y Parcevaux, 1986 Bannister, 1978
Resistencia al gel estático	Viscosímetro rotacional (T-C)	API RP 13 B (sección 2)
Expansión	Molde bar Mangas cilíndricas	ASTM C 151 Spangle, 1983
Compatibilidad espaciador/lavador/cemento	Viscosímetro rotacional (T-C) con consistómetro presurizado, celda de pérdida de filtrado, autoclave presurizado y prensa hidráulica	API Spec 10 Apéndice P
Análisis de fase del cemento Portland	Métodos de mojabilidad química, XRD, XRF, AA o ICP, calculados por las ecs. De Bogue	Aldridge, 1982 Bogue, 1929
Determinación de yeso, hemihidratos y cal libre en el cemento Portland	Métodos de mojabilidad química Termogravimetría (TGA) Análisis termal diferencial (DTA)	Simpson, 1988 El-Jazairi y Illston, 1977 Wachtler, 1984
Análisis de partículas del cemento Portland	Permeámetro Blaine Turbidímetro Wagner BET Dispersión de luz laser	ASTM C 204 ASTM C 115 Brunauer, 1983 Wertheimer y Wilcock, 1976
Densidad relativa del cemento Portland	Picnómetro	ASTM C 188 ASTM C 114
Análisis químico de mezclas secas	Absorción espectrofotométrica UV XRD, XRF Microscopio óptico	ASTM C 114 Simpson, 1988 Reeves, 1983
Análisis químico del agua de la mezcla	Método de mojabilidad química AA, ICP	API RP 45 Simpson, 1988