



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

EVALUACION DE LA CEMENTACION EN TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

RAUL LOPEZ PACHECO

L

DIRECTOR DE TESIS: DR. DANIEL GARCIA GAVITO



MEXICO D. F.

2000

SEPTIEMBRE DEL 2000



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.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-947

SR. RAUL LOPEZ PACHECO

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Daniel García Gavito y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

EVALUACION DE LA CEMENTACION EN TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

- INTRODUCCION**
- I IMPORTANCIA DE LA CEMENTACION PRIMARIA**
- II CEMENTACION PRIMARIA**
- III REGISTROS GEOFISICOS**
- IV EVALUACION DE LA CEMENTACION**
- V HERRAMIENTAS INNOVADORAS PARA LA EVALUACION DE LA CEMENTACION**
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

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

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

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, a 19 de julio del 2000

EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Tesis:

Evaluación de la Cementación en Tuberías de Revestimiento

Presentada por:

Raúl López Pacheco

Dirigida por:

Dr. Daniel García Gavito

Jurado del examen profesional:

Presidente: Ing. Salvador Macías Herrera

Vocal: Dr. Daniel García Gavito

Secretario: Ing. Eusebio Capitanachi González

1er. Suplente: Ing. Joaquín Mendiola Sánchez

2do. Suplente: Ing. Norma Araceli García Muñoz

The image shows four handwritten signatures in black ink, each written over a horizontal line. The signatures are: 1. Salvador Macías Herrera (top), 2. Daniel García Gavito (second), 3. Joaquín Mendiola Sánchez (third), and 4. Norma Araceli García Muñoz (bottom).

A mi Madre:

Augusta Pacheco G.

Gracias por éste logro que es tuyo, por toda esa vida de lucha y sacrificios, para apoyarnos y darnos lo mejor pero sobre todo te agradezco esa enorme confianza que has depositado en mi.

Te amo.

A mi Padre Ricardo López S. por darme la vida (†)

A mis hermanos:

Carlos, Abel y Lalo

Gracias por darme su apoyo en todo momento, pero más por compartir tantos momentos de alegría .

Los Quiero Mucho.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, a la Facultad de Ingeniería y a mis profesores, por todo el apoyo y conocimientos ofrecidos durante mi estancia en sus instalaciones.

Al Instituto Mexicano del Petróleo, por sus facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

A mi Abuelita Catarina Guendulain A. por ser tan buena y paciente conmigo.

A mis Padrinos Wilfrido y Marcelina por sus consejos y apoyo incondicional que me siguen dando y por esos años maravillosos que compartimos.

A mis Tíos (Zoila, Cirenía, Segismundo, Carmen, Eunimia, Juan de Dios, Reynaldo, Maricela, Samuel y Lidia) por su apoyo y cariño que me han brindado, pero principalmente por el cariño que le tienen a mi Mamá.

A mis Primos (Miguel, Luis, Fidel, Liz, Omar, Wili, Israel, Sami, Paty, Komi, Venus, Javier, Cali, Segitas, Angel, Miriam, Pelón, Jazmin, Williams, Joana y Diegito) por compartir tan bellos momentos y mantener esa unión que nos caracteriza.

A la persona que también me ayudo en las buenas y en las malas, sin esperar nada a cambio, por esas palabras de aliento cuando más lo necesitaba, además de aguantar mi carácter y por supuesto por esos bellos momentos a su lado. Gracias, con mi amor para Rocío V. Gómez.

A mis amigos que compartieron momentos inolvidables, así como a todos aquellos compañeros de la carrera y aquellos que no tienen que ver con la escuela pero que estuvieron apoyándome.

Al Dr. Daniel García Gavito por su apoyo en este trabajo.

Al Ing. José Manuel Castañeda por ser un buen amigo y por toda su ayuda que me ofreció.

A los Ingenieros Herón, Joaquín, Eliseo, Rodolfo, Toño Morales, Norma, Alonso, Mario, José Luis, Edgar y Gustavo por su ayuda y amistad.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es el de mostrar un marco teórico de los diferentes parámetros utilizados durante la operación de la cementación de un pozo, es decir, todos aquellos aspectos relacionados con el acondicionamiento del pozo, con el diseño de la cementación de pozos petroleros, así como de aquellos conceptos relacionados con los registros geofísicos de pozos y de los aspectos involucrados para la evaluación de la calidad de la cementación, que es el tema principal y de mayor interés que se presenta en la tesis.

En los capítulos I y II se mencionan principalmente todas aquellas actividades necesarias que se deben de tomar en cuenta antes de llevar a cabo la cementación de tuberías de revestimiento, trabajos relacionados con la limpieza del agujero, diseño de la lechada, baches espaciadores y lavadores, centralización de la T.R, técnicas de cementaciones, etc, de éste modo, al realizar adecuadamente los procedimientos que involucran en dichas operaciones, se obtendrá un trabajo exitoso, que finalmente repercutirá en la vida productiva del pozo.

El tema de registros geofísicos se aborda brevemente en el capítulo III, en donde se contemplan una descripción detallada de los métodos de la toma de registros, su aplicación y su interpretación, así como el avance que ha tenido a lo largo del tiempo, además de que mencionan cuales fueron los primeros registros que se realizaban para determinar la calidad de la cementación.

Por último en los capítulos IV y V se mencionan los cambios que han tenido la interpretación de los registros, de acuerdo, al avance tecnológico que han sufrido las herramientas diseñadas para evaluar la calidad de la cementación.

Se mencionan todas aquellas herramientas que se usan para tomar los registros. Principalmente aquellos cambios y avances que han tenido unas con respecto a otras, relacionados con los datos proporcionados en los registros que cada una de ellas presenta, ya que los registros cada vez tienen más información clara y precisa para una mejor interpretación.

De esta manera la intención que se tiene con la realización de este trabajo, es la de proporcionar una fuente de consulta para cualquier persona interesada en la evaluación de las cementaciones, además de que sea un apoyo para futuros desarrollos e investigaciones que se realicen particularmente en nuestro país o en otras partes del mundo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

iii

CAPÍTULO I. IMPORTANCIA DE LA CEMENTACIÓN DE POZOS

I.1 CEMENTACIONES DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO	1
I.1.1 PREPARACIÓN DEL POZO	2
I.1.2 GEOMETRÍA DEL AGUJERO	2
I.1.3 LIMPIEZA DEL AGUJERO	4
I.2 DISEÑO DE LA LECHADA	5
I.3 PATRONES DE FLUJO	12
I.3.1 CONCEPTOS BÁSICOS	12
I.3.2 NÚMERO DE REYNOLDS	13
I.4 BACHES ESPACIADORES Y LAVADORES	16
I.4.1 REOLOGÍA DEL FLUIDO ESPACIADOR Y GASTOS DE BOMBEO	18
I.4.2 COMPATIBILIDAD DEL FLUIDO ESPACIADOR Y EL CEMENTO	19
I.4.3 DENSIDAD DEL FLUIDO ESPACIADOR Y CONTENIDO DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	20
I.5 CENTRALIZACIÓN DE LA TUBERÍA	22
I.5 MOVIMIENTO DE LA TUBERÍA	27

CAPÍTULO II. CEMENTACIÓN PRIMARIA

II.1 FUNCIONES DEL CEMENTO	29
II.2 TIPOS DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO	30
II.3 TÉCNICAS DE CEMENTACIÓN	31
II.3.1 ETAPA ÚNICA	32
II.3.2 ETAPAS MÚLTIPLES	32
II.3.3 STAB-IN	34
II.3.4 LINER	35
II.3.5 CEMENTACIÓN EN SUB-SUPERFICIE	37
II.3.6 GROUTING	38
II.4 TAPONES DE CEMENTO	38
II.4.1 USO DE LOS TAPONES DE CEMENTO	40
II.4.2 COLOCACIÓN DEL TAPÓN	41
II.5 TÉCNICAS DE COLOCACIÓN DE TAPONES	42
II.5.1 MÉTODO DE BALANCEO	42
II.5.2 PRUEBAS DE TAPONES DE CEMENTO	43
II.6 PROBLEMAS O CAUSAS ASOCIADOS A UNA MALA CEMENTACIÓN	44
II.7 MIGRACIÓN DE GAS	46
II.7.1 CAUSAS DE LA MIGRACIÓN DE GAS	46
II.7.2 CONSECUENCIAS DE LA MIGRACIÓN DE GAS	49
II.7.3 MECANISMOS DE FLUJO DE GAS	49
II.7.4 MÉTODOS PARA CONTROLAR LA MIGRACIÓN DE GAS	50
II.7.4.1 MEJORAR LAS PRÁCTICAS DE CEMENTACIÓN	50
II.7.4.2 MÉTODOS FÍSICOS	51
II.7.4.3 TÉCNICAS ESPECIALES	54

CAPÍTULO III. REGISTROS GEOFÍSICOS

III.1 IMPORTANCIA DE LOS REGISTROS GEOFÍSICOS	57
III.1.1 DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN	59
III.1.2 SISTEMA MAXIS 500	63
III.1.3 CONTROL DE CALIDAD EN TIEMPO REAL	66
III.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CEMENTACIÓN	69
III.3 TIPOS DE EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN	71
III.4 PRUEBA SECA	72

III.5 REGISTROS DE TEMPERATURA	72
III.6 TRAZADORES RADIOACTIVOS	75
III.7 REGISTROS SÓNICOS	75

CAPITULO IV. EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN

IV.1 HERRAMIENTAS SÓNICAS	78
IV.2 COMPONENTES DE UNA ONDA DE SONIDO	82
IV.2.1 PROPIEDADES ACÚSTICAS	83
IV.3 REGISTRO DE ADHERENCIA DEL CEMENTO (CBL)	88
IV.3.1 TIEMPO DE TRÁNSITO	93
IV.3.2 SALTO DE CICLO Y ESTIRAMIENTO	94
IV.3.3 LECTURAS DE LA AMPLITUD	95
IV.3.4 ATENUACIÓN	98
IV.4 PERFIL DE DENSIDAD VARIABLE	98
IV.4.1 ÍNDICE DE ADHERENCIA	100
IV.4.2 FACTORES QUE AFECTAN A LA LECTURA DE UN REGISTRO SÓNICO	103
IV.5 CONTROL DE CALIDAD DEL CBL-VDL	110
IV.6 INTERPRETACIÓN DEL CBL-VDL	111
IV.7 REGISTRO DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA CEMENTACIÓN (CET)	121
IV.7.1 PRINCIPIO DE MEDICIÓN	122
IV.7.2 CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL	124
IV.7.3 RESPUESTA A LOS IMPULSOS	124
IV.7.4 FORMATO Y DESCRIPCIÓN DE LA ONDA	125
IV.7.5 PRESENTACIÓN DEL REGISTRO	129
IV.7.6 LIMITACIONES E INTERPRETACIONES	130
IV.7.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	132
IV.7.8 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DEL CET	133
IV.8 COMBINACIÓN CBL-VDL-CET	136

CAPITULO V. HERRAMIENTAS INNOVADORAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN

V.1 HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN (CBT)	143
V.1.1 PRINCIPIO DE MEDICIÓN	144
V.1.2 CARACTERÍSTICAS Y DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA	146
V.1.3 PRESENTACIÓN DEL REGISTRO	149
V.1.4 INTERPRETACIÓN DEL REGISTRO CBT	150
V.1.5 RESPUESTA TÍPICA DEL CBT	153
V.2 HERRAMIENTA ULTRASÓNICA (USIT)	153
V.2.1 PRINCIPIO DE MEDICIÓN	155
V.2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PISTAS	162
V.2.3 CONTROL DE CEMENTACIÓN	163
V.2.4 CONTROL DE CORROSIÓN	164
V.3 PULSE ECHO TOOL (PET)	165
V.3.1 PRINCIPIO DE MEDICIÓN	168
V.4 RATIO BOND TOOL (Herramienta de Relación de Adherencia)	173
V.4.1 PRINCIPIO DE MEDICIÓN	174
V.5 SEGMENTED BONDING TOOL (Herramienta de Adherencia Segmentado)	176
V.5.1 PRINCIPIO DE MEDICIÓN	177
V.5.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PISTAS	178

CONCLUSIONES	181
---------------------	-----

RECOMENDACIONES	181
------------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	182
---------------------	-----

INTRODUCCIÓN

Una de las actividades fundamentales en el desarrollo y construcción de un pozo petrolero es lo referente a la cementación de tuberías de revestimiento, la cual consiste básicamente en la colocación de lechadas de cemento en el espacio anular, comprendido entre el agujero y la tubería de revestimiento, ya que ésta es una de las tareas más importantes y difíciles, tanto económica, como operativamente. De ahí que estos trabajos requieran de todo el esfuerzo posible para que ésta pueda resultar de manera exitosa y no se tengan problemas posteriormente cuando se efectúe la evaluación de la cementación.

Dentro de algunas de las funciones principales de las cementaciones de tuberías de revestimiento están:

- > Efectuar un verdadero sello entre las capas que conforman el subsuelo
- > Soportar las tuberías de revestimiento

Para lograr que el cemento lleve a cabo sus funciones adecuadamente, antes de iniciar cualquier operación, el ingeniero responsable debe de corroborar que el cemento por utilizar reúna las características y condiciones necesarias para efectuar la operación, de no cumplirse esto, es preferible que la cementación no se realice para no tener problemas posteriores por fraguado prematuro, ya que esto puede dar como consecuencia un atrapamiento de las herramientas. En algunos casos esto ha originado la pérdida total del pozo o bien operaciones sumamente costosas para recuperar la herramienta atrapada.

La sustitución de los fluidos de perforación con lechadas de cemento, para sostener y proteger a la tubería de revestimiento, así como para sellar hidráulicamente las presiones de las diferentes formaciones, ha sido por muchos años el objetivo principal del personal operativo y es un tema que comprende los mecanismos, bien definidos, del desplazamiento del lodo.

La operación de la cementación no es un proceso que se inicia cuando la tubería esta en el fondo, debe iniciarse durante la perforación del pozo a cementar, donde deberán realizarse todos los esfuerzos para mejorar el proceso de desplazamiento de lodo.

La tecnología enfocada a la investigación tanto de las lechadas de cemento como de los fluidos de perforación, se ha venido desarrollando rápidamente en los últimos años, dando como resultado mejores adherencias en el espacio anular. Es por ello que al igual que en todas las áreas de la industria petrolera, la cementación de pozos petroleros requiere de continuos desarrollos técnicos y operativos.

La seguridad del personal y el medio ambiente, el éxito de un programa de exploración, la validación de los cálculos de ingeniería de yacimientos y el buen control de los

tratamientos de estimulación, dependen de la tubería de revestimiento cementada en el pozo.

Debido a los avances tecnológicos y a la normatividad vigente en la cementación de pozos petroleros, permitirá al personal especializado diseñar con más eficiencia la colocación de la lechada de cemento durante la cementación de la tubería de revestimiento (T.R).

Una vez que la operación de la cementación de la T.R haya concluido, la pregunta que surge es la de si quedó bien cementada o no. Para poder responder esta pregunta se lleva a cabo la evaluación, la cuál se identifica con la interpretación de los registros geofísicos tomados con herramientas diseñadas especialmente para este fin.

Se tiene un equipo en superficie que suministra corriente eléctrica a las herramientas, pero lo que es más importante es que el equipo de superficie recibe las señales y responde en consecuencia. Las señales deseadas se registran en cinta magnética en forma digital, en tubos catódicos y película fotográfica, de manera analógica. La película fotográfica se procesa en la unidad y copias de papel impresas se preparan a partir de ellas, las cuales contienen información como: diámetro interno de la tubería, detector de coples, adherencia del cemento, cemento contaminado con gas, microanillos, canalización, partes sólidas y partes líquidas, etc.

A medida que la ciencia de los registros avanzaba, también lo hacía la técnica 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 la cementación en la industria petrolera.

Para que un trabajo de cementación se considere un éxito incondicional, el cemento debe aislar efectivamente las zonas permeables atrás de la tubería de revestimiento y protegerla durante toda la vida útil del pozo. En el momento de la cementación, el operador no sabe cuál es la vida útil del pozo o exactamente a que presiones se someterá el cemento.

Muchas personas creen, con base a su experiencia, que no es recomendable utilizar los pozos existentes como inyectores en proyectos de recuperación mejorada. Existe algo de cierto en esto, pero quizá indica que se espera lo peor cuando se dispone de poca información. Cuando se tienen pozos perforados por otro operador, con información incompleta sobre como fueron cementados, es justificable que se tenga cierta incertidumbre sobre el pozo. Para que un trabajo de cementación falle, se deben conjugar varios factores. Debe existir una sección con poco cemento en un lugar sensitivo del pozo y después de un tiempo, con la presión suficiente, la corrosión u otros factores se presentan en dicho lugar. Si falta uno de estos factores quizá no ocurra ninguna falla.

Miles de pozos se han terminado indudablemente con trabajos de cementación no muy satisfactorios⁽²⁾. Dichos pozos que aún operan, por circunstancias fortuitas, no justifican que no se realicen intentos razonables para obtener un trabajo de cementación tan

bueno como sea posible, en trabajos posteriores. Puesto que la tendencia general es hacia pozos más profundos, mayores presiones, en localizaciones marinas, en áreas ambientales con mayores problemas, se debe continuar aunando a la tecnología, los medios de desarrollo para que se pueda aplicar más ampliamente y planear cada trabajo como si fuera un reto.

La reparación de cementaciones primarias en tuberías en pozos de aceite o gas ha sido practicada durante años. La decisión de que se lleve a cabo una cementación forzada o no, ha sido invariablemente basadas en la interpretación de la calidad de la capa de cemento, o de la falta de éste, usando ya sea, registros sónicos o ultrasónicos, dispositivos comúnmente referidos como "registros de adherencia". Estas herramientas son comúnmente usadas para describir una cementación buena de una mala vía índice de adherencia o porcentaje de adherencia, de esta manera, se podrá solucionar el problema en dado caso con una cementación forzada.

La otra parte del proceso que debe mejorarse, es el de obtener buenos registros. La tecnología de los registros se está mejorando cada día y los ingenieros deberán actualizarse en las técnicas involucradas para interpretar adecuadamente los registros y poder tomar decisiones acertadas.

Solamente si se disponen de buenos registros, para evaluar lo que ocurre en un trabajo de cementación, se puede ser el más eficiente y realizándolo consistentemente se lograrán buenas cementaciones.

CAPÍTULO I

IMPORTANCIA DE LA CEMENTACIÓN DE POZOS

1.1 CEMENTACIONES DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

Una buena cementación es necesaria para todos los trabajos subsecuentes u operaciones que se efectúen en el pozo. El hecho de realizar un trabajo de cementación exitoso, es un factor importante y de gran relevancia para la vida productiva de cualquier pozo. Cuando dicha cementación es deficiente todas las operaciones que se efectúen estarán seriamente afectadas, por tal motivo deberá corregirse antes de programar cualquier trabajo relacionado con la terminación del pozo.⁽¹⁾

La perforación y terminación de pozos son actualmente áreas muy significativas de investigación en la industria petrolera. Una de las operaciones más importantes involucradas en ambas áreas, es precisamente la cementación de una tubería de revestimiento. Un trabajo efectivo de cementación primaria es el primer paso y vital para lograr una buena terminación del pozo.

La cementación de un pozo, como se mencionó anteriormente, es el proceso de mezclar cemento con agua formando una lechada, misma que será bombeada a través de las técnicas para cementar la tubería de revestimiento y colocarla en el espacio anular formado por la tubería y la pared del agujero.

Desde el inicio de la perforación de un pozo petrolero, es indispensable contener las paredes del mismo, esto se logra mediante la columna de lodo. Conforme se profundiza y a intervalos determinados, la contención de las paredes se efectúa por medio de ademes empleando para esto tuberías de revestimiento. Para lograr este efecto es necesario agregar otro material que es el cemento.

La tubería de revestimiento y el cemento que ademan un pozo, son dos de los elementos más importantes, no sólo en el aspecto económico sino también en cuanto a sus características.

Las funciones principales de las tuberías de revestimiento son:

- Evitar que se derrumben las paredes del pozo
- Prevenir la contaminación con acuíferos dulces en formaciones someras
- Impedir la contaminación del lodo proveniente de las zonas problemáticas
- Confinar la producción del intervalo productor

- Servir de base para instalar el equipo de control superficial
- Permitir la instalación del equipo para la terminación
- Proporcionar un diámetro conocido que facilita el uso de accesorios y herramientas

Debido a que durante las operaciones de perforación se atraviesa por una gran variedad de formaciones y cada una de ellas presenta diferentes problemas, se hace necesario introducir en el pozo varias tuberías de revestimiento en forma concéntrica.

Las tuberías de revestimiento de acuerdo a sus funciones específicas se clasifican de la siguiente manera:

- ◆ Conductoras
- ◆ Superficiales
- ◆ Intermedias
- ◆ De explotación
- ◆ Cortas o Liners

Así dependiendo del tipo de sarta de revestimiento utilizada, será el objetivo de la cementación primaria, que puede variar de sección a sección.

1.1.1 Preparación del pozo

El acondicionamiento del pozo y del lodo de perforación comprende las operaciones siguientes: limpieza de recortes y de las paredes del agujero por efecto del enjarre del lodo, colocación de la tubería de revestimiento a la profundidad deseada sin dañar las formaciones y homogeneización del lodo, hasta dejarlo en condiciones óptimas para efectuar la cementación. El programa de circulación de lodo y la corrida de tubería en el pozo se consideran puntos claves para el acondicionamiento del pozo y lodo de perforación.^{(2), (5)}

Entre las condiciones que deben corregirse antes de introducir la tubería de ademe al pozo, es el de reducir al lodo de perforación la gelatinosidad y viscosidad plástica, ya que con ello se mejora la eficiencia del desplazamiento. Es recomendable, cuando el pozo lo permita, bajar la densidad del lodo hasta que la presión hidrostática sea un poco mayor que la del yacimiento.

1.1.2 Geometría del agujero

En los pozos verticales convencionales, la geometría del agujero es de suma importancia ya que se deben de lograr las condiciones ideales para la realización de una buena cementación.

La trayectoria del agujero puede ser influenciada por varios factores como por ejemplo el tipo de formación y los parámetros de la perforación. Patas de perro y "zigzag" pueden ser causados por cambios en la estructura de las rocas así como las modificaciones en el buzamiento de la formación. Agujeros en espiral son ocasionados por esfuerzos descentralizados de las barrenas tricónicas y por el esfuerzo de pandeo de la tubería de perforación.⁽⁵⁾

El ensanchamiento del agujero o ranura (también conocido como "ojo de llave") puede ser causado por el desgaste en las paredes del pozo debido a los movimientos de la tubería durante la perforación y los viajes. Agujeros elípticos son causados por desgaste de la tubería o por los esfuerzos anisotrópicos de la formación.

Conocer la geometría del agujero a cementar es muy importante desde el punto de vista del desplazamiento del lodo, así como también para conocer el volumen necesario de cemento. Para una buena cementación se deberá considerar la tendencia del agujero a ser de un diámetro, comúnmente llamado diámetro uniforme y la tendencia del agujero a ser de forma ovalada, más que redonda.

El omitir ambas condiciones, puede conducir a un deficiente desplazamiento del lodo, resultando en un trabajo de cementación no muy eficiente.

Si el agujero tiene variaciones en el diámetro, llamados derrumbes, la velocidad anular, a lo largo de esa sección, será menor que en las partes donde el diámetro del agujero es uniforme. Si ésta velocidad anular es lo suficientemente baja, el lodo y los recortes permanecerán en las zonas derrumbadas y, en consecuencia, será muy difícil la remoción del lodo por el cemento.

También dentro de las consideraciones que se deben tener, es la de procurar tener la información correcta del volumen del pozo. Si el volumen de cemento se subestima, la cima del cemento puede estar más abajo de lo que se requiere; en el caso de una tubería corta, puede resultar en una costosa operación de reparación. Se puede también concluir incorrectamente, que el fluido lavador no realizó apropiadamente su trabajo de remoción del lodo. Para evitar estos problemas generalmente se mide el diámetro del agujero, mediante registros de calibración para determinar el volumen exacto a bombear.

Existen en la actualidad tres tipos de registros de calibración: los de 2, 3 y 4 brazos. Como se ilustran en los incisos a, b y c respectivamente (fig. I.1). El registro calibrador de agujero de 2 brazos se dispone en varios registros radioactivos y eléctricos. Así las partes observadas del agujero, proporcionarán un volumen mayor que cuando el volumen es calculado como la amplitud de dos brazos iguales al diámetro de un círculo.

El registro calibrador de agujero de 3 brazos, interpreta en agujeros ovalados lo contrario del registro de 2 brazos y proporcionar un volumen mucho menor que el de las condiciones reales.⁽²⁾

El registro calibrador de agujero de 4 brazos, proporcionará la más precisa representación de la geometría real del agujero. Este registro se puede obtener con diferentes tipos de registros. También será de ayuda si se introduce con un integrador, para un fácil cálculo de los volúmenes de cemento y del tamaño del diámetro promedio del agujero, para utilizarse en los cálculos de la velocidad de desplazamiento. Cualquier esfuerzo en la perforación del pozo, que proporcione un agujero más uniforme deberá de realizarse sin ningún pretexto. Esto puede incluir: perforación controlada, menor tiempo del agujero expuesto al lodo, mejor control de los sólidos en el lodo, una mejor determinación de la presión de poro, un mejor control del contenido de calcio en el lodo.

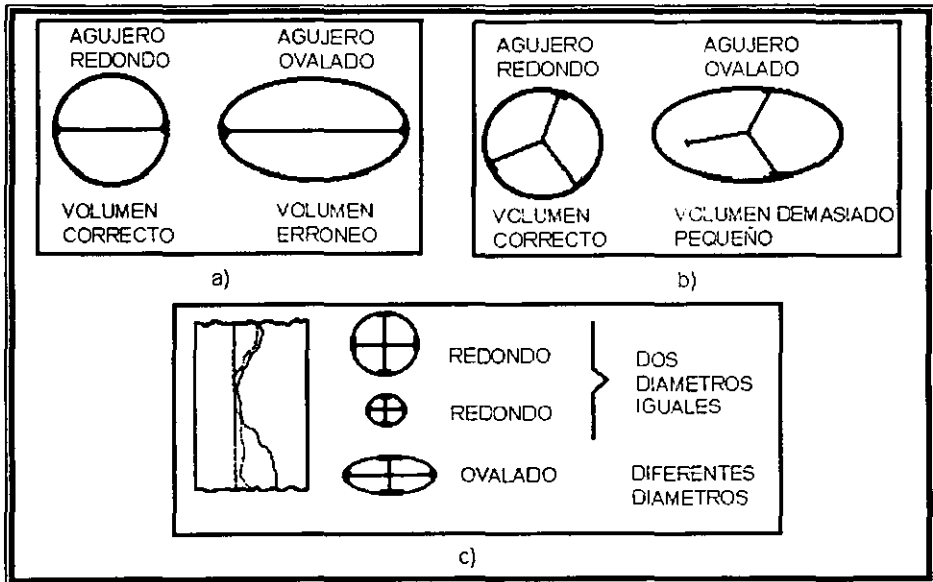


Fig. 1.1. Calibradores de Agujeros. De 2, 3 y 4 brazos.⁽²⁾

Si al final, éstas medidas resultan en una mayor uniformidad del agujero y en una mejor remoción del lodo durante la operación de cementación, bien puede valer la pena el esfuerzo realizado, en términos de menos operaciones de reparación costosas y un mejor control del perfil del agujero.

Cualquiera de estas condiciones puede ser perjudicial a la cementación, dificultando la centralización y contribuyendo para la acumulación de los recortes.

1.1.3 Limpieza del agujero

Uno de los aspectos más importantes en los trabajos de cementaciones primarias es el desplazamiento del lodo. Iniciando con el problema de los sólidos que tienden a asentarse en la parte baja del pozo, éste debe minimizarse puesto que la remoción de dichos sólidos es más difícil una vez que han sido compactados por el peso de la

tubería; estos sólidos pueden ser los recortes de la formación o partículas sólidas de los materiales densificantes del lodo.⁽²⁾

Así el control de la decantación de los recortes es muy importante por varias razones, ya que de lo contrario afectará la bajada y sacada de la tubería, tanto la de perforación como la tubería de revestimiento. Este asentamiento o acumulación de residuos debe ser evitado para así minimizar el torque y el arrastre, de manera que se pueda rotar o reciprocarse la tubería sin problemas durante el acondicionamiento del lodo y la cementación.

Si el material que se encuentra acumulado en la parte baja del pozo no es desplazado por el cemento, un canal continuo quedará en el anillo del cemento; éste canal afectará o reducirá la integridad del cemento provocando comunicación o flujo interzonal, lo cual no es recomendable si el pozo es candidato a futuros trabajos de fracturamiento. Así para tener una mejor idea del transporte de los recortes se hacen estudios experimentales y de laboratorio llegando a la conclusión que dependen de la densidad del fluido, tixotropía, reología y velocidad anular. Un ejemplo de ello es que en pozos verticales, incrementando la reología se mejora el transporte de los recortes.

Al tener una buena limpieza del agujero se tendrá una cementación adecuada, ya que si no se tiene cuidado con estos recortes de alguna manera modificarán las propiedades de la lechada de cemento, y ello repercutirá posiblemente en una cementación no muy buena.

1.2 DISEÑO DE LA LECHADA^{(11), (12)}

La composición y técnicas de cementación para cada trabajo deben combinarse, de tal modo que una vez que la lechada de cemento ha sido colocada, alcance rápidamente su adecuada resistencia, evitando con esto largos periodos de espera; además, la lechada deberá permanecer lo bastante bombeable para permitir su adecuada colocación. También uno de los puntos más importantes es mantener un control adecuado de la densidad, ya que habrá de considerarse la longitud de la columna de la lechada de cemento y las presiones de desplazamiento para no fracturar la formación.

La lechada de cemento se prepara mezclando en la superficie, agua, cemento pulverizado y aditivos para después colocarla dentro del pozo, bombeando ésta mediante un desplazamiento hidráulico hasta la zona deseada. Así al endurecer o reaccionar, la lechada fragua para convertirse en un sólido rígido exhibiendo las características deseables para el trabajo.

De este modo los principales objetivos de los trabajos de cementaciones primarias son:

1. Proporcionar un soporte adicional para la T.R, como un esfuerzo o como una prevención de presiones de formación que van a ser impuestas a la T.R.
2. Retardar la corrosión, al minimizar el contacto entre la tubería y las formaciones con medio ambiente corrosivo.

3. Proporcionar un aislamiento duradero a diferentes zonas permeables.

Durante el diseño de la lechada debe de considerarse ciertas propiedades para su óptimo funcionamiento, dentro las cuales están; agua libre, agua mínima, tiempo de espesamiento, resistencia a la compresión, densidad, control del filtrado, asentamiento, pérdida de fluido, composición del cemento, etc.

Existen ciertos aditivos que se ocupan para modificar las propiedades de la lechada del cemento, se mencionarán de manera general algunas de sus funciones. Existen ocho clases distintas de aditivos las cuales se presentan a continuación con sus respectivas funciones⁽⁴⁾:

1.- ACELERADORES

- ◆ Disminuir el tiempo de bombeabilidad de la lechada
- ◆ Acelerar el proceso de fraguado
- ◆ Compensar el efecto retardador de otros aditivos (por ejemplo controladores de filtrado, dispersantes, etc).
- ◆ Modificar la estructura del gel C-S-H (Hidrato de Silicato de Calcio) y aumentar la hidratación

2.- RETARDADORES

- ◆ Incrementar el tiempo de fraguado
- ◆ Inhibir la hidratación

3.- EXTENDEDORES

- ◆ Incrementar el rendimiento del cemento (mayor volumen de lechada con menor cantidad de cemento, ya que el cemento es uno de los productos más caros de la cementación).
- ◆ Reducir la densidad de la lechada (reducen la presión hidrostática y previene el fracturamiento de la formación).

4.-DENSIFICANTES

- ◆ Aumentar la densidad de la lechada

5.-DISPERSANTES

- ◆ Reducir la viscosidad y el punto de cedencia de la lechada

- ◆ Reducir la presión de fricción
- ◆ Modificar el régimen de flujo
- ◆ Mejorar la eficiencia de los controladores de filtrado
- ◆ Reducir el contenido de agua

6.- CONTROLADOR DE FILTRADO

- ◆ Controlar la pérdida de la fase acuosa hacia la formación

7.-CONTROLADOR DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN

- ◆ Controlar la pérdida de la lechada de cemento hacia formaciones débiles o fracturadas

8.-ADITIVOS ESPECIALES:

a) ADITIVOS ANTIESPUMANTES

- ◆ Prevenir o eliminar la espuma
- ◆ Prevenir la cavitación
- ◆ Mantener la densidad de la lechada bombeada al pozo

b) ADITIVOS ANTI-SEDIMENTACIÓN

- ◆ Asegurar un valor mínimo del punto de cedencia (previene la sedimentación de los sólidos).
- ◆ Mantener la lechada estabilizada durante la cementación

Al diseñar una cementación deben tomarse en consideración la profundidad, temperatura del pozo, condiciones del pozo y los problemas existentes durante la perforación. A continuación se presentan algunos factores que afectan el diseño de una lechada de cemento⁽¹⁾:

a) Profundidad, temperatura y tiempo de bombeo

Dos factores básicos que influyen en la operación, son la temperatura y la presión, ambos afectan el tiempo de bombeo y el desarrollo de la resistencia necesaria para soportar la tubería. La temperatura es el factor que tiene mayor influencia, a medida que la temperatura de formación aumenta, la lechada de cemento se deshidrata y se seca más rápidamente, desarrollando así la resistencia con mayor rapidez.

Las temperaturas de circulación se pueden obtener mediante dispositivos instalados en la tubería cuando se está perforando. De los datos puede obtenerse la relación entre las temperaturas estáticas del fondo contra las temperaturas de circulación, para determinar la capacidad de bombeo de la lechada de cemento.

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.

El tiempo que toma la lechada en alcanzar el fondo, depende del diámetro de la tubería de revestimiento y del gasto empleado en el desplazamiento.

b) Viscosidad y contenido de agua en la lechada

En la cementación primaria las lechadas deben poseer una viscosidad o consistencia que logre el máximo y eficiente movimiento del lodo y que aún permita una buena adherencia entre la formación y la tubería.

Para lograr esto, la mezcla en las lechadas se formula con una cantidad de agua que proporcione un volumen de fraguado igual al volumen de la lechada sin separación de agua libre. El tamaño de la partícula, el área superficial y los aditivos influyen en la cantidad de agua requerida para lograr una viscosidad determinada.

Agua máxima. Es aquella cantidad de agua de mezcla para una composición de cemento determinada que dará un volumen de fraguado igual al volumen de lechada sin que se produzca más de 1½ por ciento de separación de agua libre. Esta agua es aquella cantidad que se usa en casi todas las operaciones de cementación porque con cada saco de cemento se desea obtener el máximo rendimiento.

Agua normal. Es la cantidad de agua de mezcla que alcanzará una consistencia óptima, ya que proporciona una lechada capaz de ser bombeable. Los valores que se manejan son unidades de consistencia (Uc), por lo que debe de alcanzar un valor de 11 Uc.

Agua mínima. Es la cantidad de agua de mezcla que dará una consistencia de 30 Uc.

Debe hacerse hincapié en el hecho de que a pesar de que el aumento de contenido de agua llevará el tiempo de bombeo y se retardará el fraguado del cemento, el agua nunca debe aumentarse, debe evitarse el exceso de ésta, ya que produce siempre una lechada débil y con baja resistencia a la compresión.

c) Tiempo de espesamiento o de bombeo

El tiempo mínimo de espesamiento, es el tiempo requerido para mezclar y bombear la lechada al espacio anular seleccionado. Las recomendaciones específicas para el tiempo de espesamiento, dependen en gran parte del tipo de operación, de las condiciones del pozo y volumen de lechada que va a bombearse.

d) Resistencia del cemento que se requiere para soportar la tubería

El cemento requiere de muy poca resistencia para soportar la T.R. Los datos han demostrado que diez pies de longitud de cemento en el espacio anular, que posea sólo 8 lb/pg² de resistencia a tensión puede soportar más de 200 pies de T.R. de diámetro de 7 5/8" - 9 5/8", incluso cuando se requieren grandes pesos sobre la barrena para perforar el equipo de flotación, una carga adicional debe ser soportada por la capa del cemento, se debe tomar en cuenta que el intervalo de tiempo cuando el cemento empieza a fraguar hasta que desarrolla una resistencia a la compresión de 100 lb/pg² puede ser comparativamente corto.

En general la industria y los organismos de regulación aceptan que una resistencia a la compresión de 500 lb/pg², es adecuada para la mayoría de las operaciones, y empleando buenas prácticas de cementación, se puede perforar sin peligro el equipo de flotación. Los datos de resistencia se basan en las temperaturas y presiones de pozos e indican el tiempo requerido para que el cemento fragüe lo suficiente para resistir la tubería.

e) Calidad del agua de mezclado

La función principal del agua en el cemento es mojar los sólidos del mismo. Muchos trabajos de cementación han resultado defectuosos, debido a la interferencia de alguna substancia en el agua de mezcla.

En teoría, el agua para mezclar el cemento deberá ser razonablemente limpia y libre de substancias químicas solubles, fango, materia orgánica, substancias alcalinas u otros contaminantes. Esto no siempre resulta práctico, por eso debe considerarse la fuente de agua disponible. El agua que se encuentra por lo común en el campo o alrededor, se obtiene de una fosa abierta o de un depósito de abastecimiento, como un pozo de agua o de un lago.

Con frecuencia esa agua es satisfactoria para mezclarse con cemento a profundidades menores de 5000 pies, particularmente cuando está relativamente limpia y tiene un contenido total de sólidos menor a 500 ppm.

El agua potable siempre se recomienda donde esté disponible, a menos que el agua limpia tenga un sabor marcadamente salado, en general, será adecuada. Inclusive las aguas salobres podrán emplearse, pero las lechadas deberán ser examinadas antes en el laboratorio.

f) Tipo de fluido de perforación y de los aditivos empleados

Un problema de suma importancia en la cementación de pozos petroleros, es la remoción efectiva del fluido de perforación durante el desplazamiento. La contaminación y dilución debida al lodo puede dañar el proceso de cementación, al igual que muchas otras substancias que se encuentran en el lodo y en el enjarre.

Es por eso que después de la perforación, el lodo debe ser removido para ser reemplazado por la lechada de cemento. Esto significa que el lodo debe tener propiedades que lo hacen ser fácilmente removido por el fluido espaciador y la lechada. Estas propiedades son totalmente distintas a las necesarias para la perforación, por consiguiente después de perforar se deben modificar las propiedades del lodo (llamamos a esto acondicionamiento).

La contaminación y dilución debida al lodo puede dañar en cierto grado el sistema de cementación, al igual que muchas otras sustancias que se encuentran en el lodo y en el enjarre. Algunas contaminaciones de éste tipo ocurren durante la mayoría de los trabajos, pero probablemente casi todas ocurren cuando un tapón de cemento es colocado en un sistema de lodo que ha sido tratado con exceso de sustancias químicas.

La mejor forma para combatir los efectos nocivos de los aditivos del lodo, es emplear fluidos lavadores y espaciadores adecuados.

g) Densidad de la lechada

La densidad de la lechada siempre deberá (excepto para trabajos a presión) ser suficiente como para mantener el control del pozo. Existen varias formas de controlar la densidad.

En operaciones de campo, la densidad de la lechada por lo común es determinada con la balanza de lodo.

h) Calor de hidratación

Cuando se forma una lechada (agua y cemento), ocurre una reacción "exotérmica" en la cual se libera gran cantidad de calor. Mientras mayor sea la masa de cemento mayor será la radiación de calor. El calor de hidratación está influenciado por la calidad (finura) y composición del cemento, por los aditivos y por el ambiente dentro del pozo. A mayor temperatura de formación más rápida será la reacción y la radiación del calor.

Hidratar significa reaccionar con agua. Cuando el cemento se hidrata, se va solidificando hasta tornarse imbombeable y en poco tiempo (dependiendo de la temperatura y de los aditivos) logra alcanzar valores de resistencia a la compresión de algunos miles de libras por pulgada cuadrada, sin embargo la hidratación sigue su proceso durante varios días.

Aparte de la temperatura, uno de los factores que más afecta la hidratación es la granulometría del cemento. Una mayor área de superficie dará como resultado un fraguado más rápido, mayores resistencias iniciales, casi siempre resultará en mayores requerimientos de los aditivos (mayor concentración).

Cuando el cemento fragua en un área cerrada (como en el pozo), se produce un apreciable aumento de la temperatura ya que el calor no es transferido rápidamente a

otra zona. Esto será muy importante para la evaluación de la calidad del cemento y también por ocasionar un efecto de dilatación de la T.R (microanillo). En la mayoría de los pozos, el calor de hidratación produce una temperatura máxima de 35 °F a 45 °F (tuberías superficiales).

La pérdida de fluido influye en la deshidratación de la lechada y en la formación de puentes anulares, lo cual puede ocasionar migración de gas. La pérdida de fluido se mantiene tan baja como lo permite la práctica, para prevenir la deshidratación de cemento en las formaciones permeables. Si una formación permeable está encima de una formación con gas a presión y existe una diferencial de presión positiva hacia la zona permeable, se formará un enjarre de cemento.

Sin un adecuado control de pérdida de fluido en el cemento, el proceso de deshidratación continuará y permitirá que las partículas del cemento formen un puente adyacente a la zona permeable. Una vez formado el puente, éste empieza a soportar la presión hidrostática arriba de él. Al mismo tiempo que se forma este puente, otro enjarre de cemento puede estar formándose sobre la formación permeable presionada que ésta abajo del puente. Si el fluido se pierde por éste intervalo, en combinación con el efecto de puenteo en la parte superior del agujero, la presión hidrostática se reduce, por lo que se ocasiona una diferencial de presión positiva desde la zona presionada hacia la pared del pozo, causando el flujo de gas hacia el interior del pozo y posteriores reducciones de la presión hidrostática de la columna de cemento se hace porosa y permeable y pierde su capacidad para crear un sello hidráulico, lo que ocasiona una cementación deficiente.

Para prevenir la formación de puentes en el espacio anular y posteriores migraciones de gas, la pérdida de fluido deberá mantenerse tan baja como sea posible. En la técnica de cementación de tubería corta, que se utiliza actualmente, el rango de fluido de la lechada de cemento fluctúa entre 40 y 100 cm³/30 min. El cemento más denso se emplea para obtener un cemento más resistente en corto tiempo. También disminuye la cantidad de agua libre en el cemento, para permitir un mejor control de la pérdida de fluido. Esto reduce los problemas de deshidratación y de formación de puentes anulares.

i) Permeabilidad del cemento fraguado

A pesar de que al diseñar la lechada de cemento, normalmente se da poca importancia a la permeabilidad del cemento fraguado, existen formas de medirlos, tanto para agua como para gas. El API⁽⁶⁾ ha especificado un sistema que comprende el uso de un permeámetro.

Los cementos fraguados tienen muy poca permeabilidad, menos que de la mayoría de las formaciones. Los datos de laboratorio han demostrado que a temperaturas menores a 200 °F la permeabilidad de los cementos disminuye con el tiempo. Después de siete días de curado, generalmente la permeabilidad es tan baja como para medirse⁽⁶⁾.

La permeabilidad del cemento fraguado con respecto al gas, generalmente es mayor que con respecto al agua. Los cementos que se han solidificado de tres a siete días, tienen una permeabilidad con respecto al gas de menos de 0.1 md.

j) Control de filtración

El control de filtrado de la lechada de cemento es de gran importancia en tuberías de revestimiento para grandes profundidades y en la cementación a presión. La pérdida de filtrado a través de un medio permeable, provocará un aumento en la viscosidad y una rápida depositación de enjarre, restringiendo así el flujo.

Los factores que influyen en la pérdida de agua son: el tiempo, la presión, la temperatura y la permeabilidad. Para medir las características de filtración de la lechada de cemento, el API estandariza y especifica una prueba de 30 minutos a 100 o 1000 lb/pg².

k) Resistencia a salmueras del fondo del pozo

La susceptibilidad de los cementos a la corrosión por aguas de formación ha sido el tema de muchas investigaciones. Las salmueras de formación que contienen sulfato de sodio, sulfato de magnesio y cloruro de magnesio, se encuentran entre los agentes más destructivos dentro del pozo. Los sulfatos, generalmente considerados como las sustancias más corrosivas al cemento, reaccionan con la cal y con el aluminato tricálcico para formar grandes cristales de sulfoaluminato de calcio, esos cristales requieren más espacio de poro de lo que el cemento fraguado puede proporcionar, por eso causan expansión excesiva y poco a poco deterioración.

Los estudios sobre las aguas corrosivas de formación, se enfocan en particular hacia la susceptibilidad del cemento fraguado. Se considera que el ion sodio es más nocivo que el ión magnesio y por eso se emplea en las pruebas de laboratorio.

1.3 PATRONES DE FLUJO⁽¹³⁾

1.3.1 Conceptos básicos

Comparando el movimiento de un fluido, como dos placas moviéndose a velocidades V_1 y V_2 y si le aplicamos una fuerza F a determinada área A como se ilustra en la fig. 1.2, podemos definir los siguientes conceptos⁽¹⁵⁾:

El esfuerzo de corte o cizallamiento (τ): representa la fuerza por unidad de área, que sería en este caso la presión de bombeo o la presión de fricción, que ocasiona el fluido al fluir a una velocidad V_1 cuando V_2 es igual a cero. Este esfuerzo es uniforme en todo el fluido y es expresado en psi.

La velocidad de corte (γ): representa el gradiente de velocidad, o sea, una medida de la diferencia de velocidad entre dos placas, se expresa en seg^{-1} .

La viscosidad aparente (η) es la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte de un fluido, ésta propiedad permite determinar la fuerza necesaria para mover un fluido. Es una medida de la resistencia interna que el fluido ofrece debido a sus fuerzas internas (fricción y electrostática).

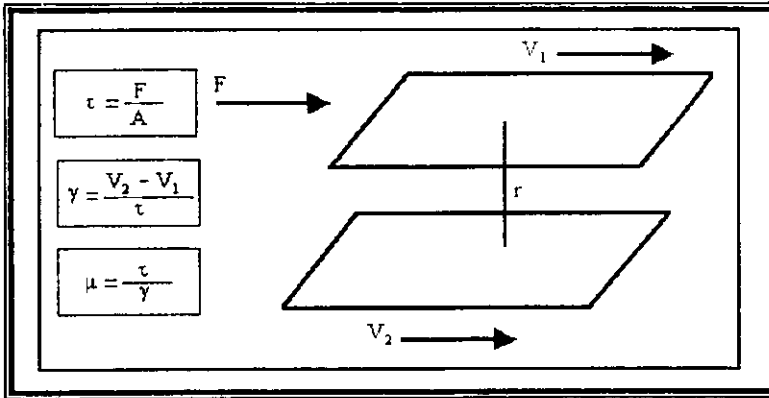


Fig. 1.2. Características de los fluidos.⁽¹³⁾

El punto de cedencia (PC) es la fuerza necesaria para poner el fluido en movimiento, representa el comportamiento del fluido en condiciones de baja velocidad de corte. El punto de cedencia es afectado por la estructura interna del fluido (floculación y atracción electrostática).

Un alto PC significa una buena capacidad de suspensión de sólidos, excelente para la limpieza del pozo, también aumenta la densidad equivalente de circulación (EDC), pero la remoción de lodo con un alto PC es extremadamente difícil, especialmente en secciones descentralizadas del revestimiento. Un lodo de bajo PC es recomendado para la cementación.

1.3.2 Número de Reynolds

Es un parámetro que permite predecir el régimen de flujo. Es una relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de fricción. Un Número de Reynolds (NRe) hasta de 2100 el fluido se encuentra en flujo laminar, entre 2100 y 3000 hay una zona de transición en la cual las partículas son sometidas a constantes cambios de velocidad y dirección. Cuando se llega a un Número de Reynolds de 3000 se logra el caudal crítico, a partir del cual el fluido se encuentra en flujo turbulento⁽²⁾.

Para un espacio anular concéntrico, el NRe requerido para alcanzar turbulencia será siempre el mismo en toda la circunferencia. Sin embargo, si la tubería está descentralizada este parámetro varía. Es decir, la sección más ensanchada puede estar en turbulencia (con NRe igual o mayor que 3000) mientras que la sección más estrecha el fluido no estará en flujo turbulento y sí en flujo laminar.

El Número de Reynolds es directamente proporcional al diámetro (área), velocidad (caudal) y densidad e inversamente proporcional a la viscosidad. La densidad es el factor más contradictorio ya que a primera vista parece ser dudoso que el aumento de la densidad resulte en aumento del NRe, esto es cuando la densidad de un fluido aumenta, su viscosidad aumenta en una proporción mucho mayor, por lo tanto, un fluido de mayor densidad tendrá un NRe menor, ya que la viscosidad aumentará mucho más.

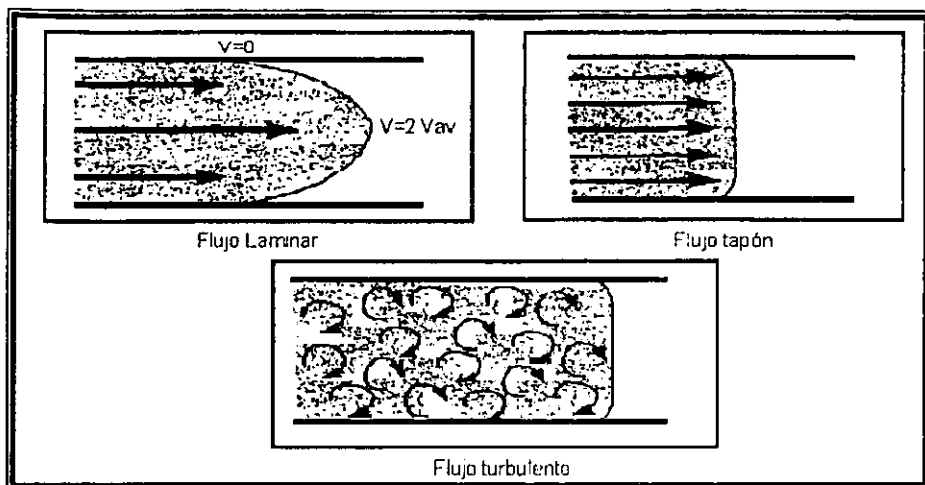


Fig. I.3. Patrones de flujo mostrados en el espacio anular.⁽²⁾

Flujo Laminar. Las partículas se mueven paralelas a los ejes de la tubería, en forma de lámina (las partículas se deslizan entre sí).

El perfil de velocidad tiene una forma parabólica, esto quiere decir que la velocidad en las paredes es mínima (o velocidad igual a cero) y máxima en el centro (aproximadamente el doble de la velocidad promedio). El flujo laminar ocurre en caudales relativamente bajos o en áreas excesivamente grandes.

Flujo Turbulento. Las partículas fluyen en forma de remolino, sin dirección prefijada, es decir el flujo no es paralelo a los ejes, teniéndose una mezcla entre las partículas. El perfil de la velocidad es plano, ya que las partículas fluyen a velocidad constante. La pérdida de presión depende más de la densidad que de la viscosidad.

Flujo Tapón. Este no es un modelo de flujo en sí, es decir, se trata de una condición especial del flujo laminar, donde la viscosidad del fluido es muy alta y la velocidad de corte muy baja. Esto hace que el fluido se comporte como un tapón, fluyendo con velocidad constante. Estudios demuestran que a medida que se incrementa la temperatura o se reduce el volumen en el espacio anular, difícilmente el fluido se comportará como flujo tapón: la temperatura reduce la viscosidad, cambiando el perfil de velocidad y de la interfase y la velocidad de corte en una sección angosta será

siempre mayor, llevando al fluido a salir de la condición de flujo tapón. Esto obliga a incrementar la viscosidad a valores extremadamente elevados, casi sin poderlos bombear en superficie y a reducir drásticamente el caudal de desplazamiento, hasta valores poco prácticos como de 0.2 a 0.3 bpm.

El flujo tapón solo funciona cuando se cumple con algunas condiciones: reología controlada del fluido (alta viscosidad) y velocidad de corte muy reducida (caudales muy bajos). Este tipo de flujo no es muy recomendable para la cementación de tuberías de revestimiento^{(13), (15)}.

El frente de avance de un fluido desplazándose en el espacio anular puede ser representado por tres tipos de perfiles de flujo: tapón, laminar y turbulento, éstos se ilustran en la figura 1.3. Los patrones de flujo tapón y turbulento tienen aproximadamente el mismo frente de avance plano. Estos tipos de perfiles, comparados con el perfil de flujo laminar, establecerán un mayor contacto con el fluido de perforación durante el desplazamiento. Esto da por resultado una óptima remoción del lodo de perforación, una reducida canalización del cemento y un mejor revestimiento del cemento alrededor de la tubería. El patrón de flujo aceptado para el desplazamiento del fluido de perforación es el turbulento.

Sin embargo, en ciertas situaciones, como son: la geometría del agujero; el cemento y fluido de perforación y las restricciones de presión, pueden imponer gastos de desplazamiento donde no se pueda obtener la turbulencia. En estas situaciones se recomienda más el régimen de flujo tapón que el laminar. El régimen de flujo tapón, en combinación con un mayor esfuerzo gel y densidad del cemento que del fluido de perforación, aumentará el desplazamiento del lodo. El ritmo al cual es desplazado el cemento denso es menor o igual a 1 bl/pie, y se encuentra dentro del régimen de flujo tapón. Actualmente con la técnica que se tiene se bombea en régimen de flujo tapón ya que el flujo laminar no se considera tan eficiente en el desplazamiento del lodo.

Así de éste modo se ha establecido técnicas, para los trabajos de cementación primaria, dentro de las cuales tenemos:

- ◆ Cementación primaria convencional bajo un régimen de flujo turbulento
- ◆ Cementación primaria convencional bajo un régimen de flujo laminar

Se ha establecido por varios investigadores que cuando se utiliza el régimen de flujo turbulento, se obtiene un desplazamiento más efectivo del lodo, en el espacio anular, lográndose, por consiguiente, una mayor adherencia entre el cemento y la pared del agujero, éste patrón de flujo genera altas caídas de presión, por lo que la aplicación de ésta técnica queda limitada a formaciones cuyo gradiente de presión de fractura sea mayor que el gradiente de presión generado durante la operación de cementación, así como de la disponibilidad del equipo de superficie, pero debe quedar muy claro que, el desplazamiento debe ser el efectivo más no el mejor, dado que sólo con reducir la viscosidad se puede provocar dicho flujo, y una reducción excesiva de la viscosidad provocaría interdigitación, entre la lechada de cemento y la columna de lodo.

1.4 BACHES ESPACIADORES Y LAVADORES^{(2), (10), (11)}

Los fluidos lavadores deben poseer una densidad y viscosidad igual o muy cercana a la del agua, pues con estas características tienen la función de dispersar todo residuo del fluido de perforación adherido sobre la pared del agujero. Su desempeño mejora cuando por sus bajas propiedades de densidad y viscosidad, se desplaza con flujo turbulento. Un lavador sencillo puede ser el agua, pero dependiendo del tipo de fluido de perforación en el pozo (base agua o base aceite), se tiene que adecuar adicionando aditivos químicos: surfactantes, dispersantes, inhibidores de hidratación de arcillas, etc.

Los fluidos espaciadores se emplean con el propósito de evitar el contacto directo entre el fluido de perforación y la lechada de cemento. Estos fluidos deben diseñarse cuidadosamente poniendo atención en su densidad, propiedades reológicas, tipo de surfactantes, poder de sustentación al adicionar material densificante, tiempo de contacto, gasto de bombeo, etc. Generalmente la mejor separación entre el fluido de perforación y la lechada de cemento, se logra si la densidad del espaciador es mayor que la densidad del fluido de perforación, pero menor que la lechada de cemento.

El volumen requerido de fluido lavador, lo mismo que para el fluido espaciador, deberá calcularse con base a una longitud equivalente en el espacio anular de 150 m mínimo (500 pies) o un tiempo de contacto de 5 a 10 min, de acuerdo al diseño de gastos de desplazamiento (óptimo 10 min). Es preciso dejar muy bien establecido la cantidad volumétrica a utilizar de los fluidos de la formación y en no poner en riesgo la estabilidad de las paredes del agujero.

Los fluidos espaciadores son fluidos diseñados para separar el fluido de perforación de la lechada de cemento dentro del pozo, los baches espaciadores consisten de agua, soluciones ácidas, fosfatos, mezclas de cemento con agua y lechadas de bentonita, así como de arcilla sin tratar, que ayudan a limpiar la T.R. y el agujero, también los taponeros limpiadores (fluidos lavadores) ayudan a eliminar la contaminación dentro de la T.R.

Estos baches son benéficos, ya que permiten separar distintos fluidos (cemento y fluidos de perforación), aumentan la remoción del lodo gelado, permitiendo una mejor adherencia del cemento, lo cual ayuda a evitar problemas de compatibilidad. Se han realizado formulaciones para aplicaciones específicas, como son los espaciadores reactivos, los cuales aumentan la remoción del lodo, o bien, espaciadores que reaccionan con los componentes químicos del enjarre para mejorar la adherencia del cemento.

El uso correcto de espaciadores y limpiadores es indispensable para maximizar la eficiencia de colocación del cemento cuando se consideran ambos fluidos de perforación (base agua y base aceite).

Cuando se selecciona un fluido espaciador, para efectuar un eficiente desplazamiento del lodo, deberán tomarse en consideración los siguientes criterios:

a) Reología del fluido espaciador y gastos de bombeo

- b) Compatibilidad del fluido espaciador con el lodo y el cemento
- c) Características de mojabilidad del fluido espaciador
- d) Densidad y contenido de sólidos en suspensión
- e) Tiempo de contacto
- f) Dónde colocar los tapones lavadores en relación con el lodo, fluido espaciador y el cemento

En lodos base aceite se tiene dos características que determinan el éxito de una cementación:

a).- Dichos fluidos son diseñados para reducir la pérdida de filtrado en caso de encontrarse con una zona permeable. Esto crea una condición que permite una excelente característica de remoción, puesto que no existe hidratación del espacio anular o debido a que no se forman enjarres gruesos en las zonas permeables.

b).- El aceite como fase externa de los fluidos permite estabilidad y excelente lubricidad durante las operaciones de introducción de tuberías de revestimiento.

Sin embargo, cuando se procede a realizar la cementación, el medio ambiente creado para la humectación del aceite origina que no exista buen contacto y adherencia del cemento, por eso se debe de determinar el mejor sistema limpiador en un intento para crear un medio ambiente mojado por agua, necesario para permitir la adherencia del cemento y así poder aislar las zonas de interés de la terminación.

Existen tres determinaciones para diseñar un sistema espaciador y/o limpiador para remover lodos de emulsión inversa; estos incluyen:

1. Evaluar los fluidos base de dicho sistema.
2. Seleccionar el óptimo surfactante(s) que se adicionará a los fluidos para crear un ambiente mojado por agua.
3. Determinar los volúmenes y gastos del sistema para maximizar las características de limpieza.

La primera determinación se resuelve fácilmente en la mayoría de los casos, el programa estándar de espaciadores bajo esas condiciones se realiza en dos etapas. La primera consiste en la mezcla de los fluidos base aceite utilizados durante la perforación, y un surfactante rompedor de emulsiones, lo cual asegurará que no existan problemas de compatibilidad entre el espaciador y el lodo, además permitirá el barrido de la mayor parte del lodo en el espacio anular.

La segunda etapa emplea una mezcla de agua y un surfactante para la remoción final de la película de aceite de la formación y la tubería. La energía de flujo adicional a gastos equivalentes hace que los fluidos se adelgacen más efectivamente debido a la acción turbulenta; esto debe considerarse en el grado de centralización, ya que también afecta las velocidades de los baches espaciadores y lavadores en los lados cercanos del espacio anular. En estos lados, se tiene una baja velocidad, por lo cual será necesario diseñar un buen espaciador para limpiar los sólidos en tales partes.

Los siguientes puntos son recomendaciones de espaciadores cuando se considera la remoción de lodos base agua:

- 1.- De 8 a 10 minutos de tiempo de contacto
- 2.- Fluidos delgados en régimen turbulento
- 3.- Fluidos reactivos (opcionales)

Las recomendaciones generales para el desplazamiento de fluidos base aceite son las siguientes:

- 1.- De 8 a 10 minutos de tiempo de contacto
- 2.- Compatibilidad con el lodo y cemento
- 3.- Correcto diseño de surfactante (s)
- 4.- Altos gastos para mejorar la adherencia

Sin embargo, el medio ambiente mojado por aceite sobre la tubería y formación evitará la adherencia del cemento a esas superficies a menos que sea removido. Se deben diseñar surfactantes para su uso con los espaciadores y que sean compatibles con el lodo y cemento, manteniéndose así buenos resultados de adherencia debido al ambiente mojado por agua que va a ser creado.

1.4.1 Reología del fluido espaciador y gastos de bombeo⁽²⁾

Como se sabe algún tipo de fluido espaciador deberá ser colocado entre el lodo y el cemento, para prevenir la rigidez de estos fluidos cuando son incompatibles.

Con lodos base agua que se han tratado poco, o no han sido tratados químicamente, un pequeño volumen de agua fresca se ha bombeado como fluido espaciador entre el lodo y el cemento y se han registrado resultados satisfactorios. En algunas investigaciones se han encontrado que cuando los lodos son tratados, la incompatibilidad hace muy difícil el proceso de remoción del lodo y ha conducido al desarrollo de fluidos espaciadores compatibles con el lodo y con el cemento.

Con el tiempo se ha estudiado y mejorado la "lechada raspadora" que así se conocía a los fluidos espaciadores, en los años 40 se conocía que con altos gastos de bombeo y usando agua como fluido espaciador, se obtenía una mejor remoción del lodo. Fue en los 60 que se reconoció que un fluido en régimen de flujo turbulento, aproximadamente en contacto 10 minutos con el punto de interés, podría también proporcionar una mejor remoción del lodo. También se concluyó que este fluido, en régimen de flujo turbulento, debe poseer características de baja pérdida de fluido para ser capaz de conservar las propiedades reológicas a lo largo del desplazamiento.

Posteriormente en los 70 y 80 se reconoció que los fluidos incompatibles de la "lechada raspadora" y la mayoría de los lodos, podrían ser tratados mediante el uso de un fluido espaciador, capaz de desplazarse en régimen de flujo turbulento a razonables gastos de bombeo, y aún mantener la suspensión de sólidos requerida para obtener una densidad mayor que la del lodo. Estos fluidos espaciadores generalmente son polímeros en soluciones acuosas capaces de mantener los sólidos en suspensión.

El criterio más importante en la selección de un fluido espaciador es que el fluido seleccionado pueda desplazarse en turbulencia a gastos de bombeo razonables para la geometría que presenta el pozo. Se sabe que un fluido newtoniano, como el agua, requiere el menor esfuerzo de corte y gasto de bombeo para obtener flujo turbulento bajo un conjunto de condiciones establecidas.

Cuando la densidad del lodo es inferior o igual a 9 lb/gal, generalmente se utiliza agua como fluido espaciador y agua con pirofosfato de sodio como fluido lavador. Frecuentemente se agregan 5 lb de sosa cáustica por barril de agua fresca o agua de mar, para elevar el pH. Se han obtenido resultados favorables cuando esta solución cáustica se bombea adelante de la lechada de cemento a volúmenes equivalentes a un tiempo de contacto de 10 minutos. Este sencillo fluido espaciador puede mezclarse fácilmente en los tanques, si ésta es del volumen suficiente.

Como la mayoría de los fluidos espaciadores de alta densidad, no son fluidos newtonianos, normalmente se utiliza el modelo reológico determinado para calcular los gastos críticos y las pérdidas de presión por fricción.

1.4.2 Compatibilidad del fluido espaciador con el lodo y el cemento⁽²⁾

El siguiente aspecto a considerar en la selección del fluido espaciador es el de saber si el fluido espaciador es o no compatible con el lodo y el cemento.

Cuando se seleccione el tipo de espaciador requerido, se deberán considerar factores como: tratamiento químico del lodo, tipo de lodo (base aceite o agua); carga iónica del emulsificante y los aditivos químicos necesarios, para asegurar la compatibilidad con el lodo y el cemento.

Como la tubería de revestimiento y la formación deberán estar mojadas por agua, para facilitar la adherencia del cemento, el sistema específico del lodo deberá probarse con los sistemas del posible fluido espaciador, hasta encontrar uno que sea compatible.

Durante la realización de estas pruebas, pudieran encontrarse un surfactante o una combinación de surfactantes que deje mojada por agua la formación, para facilitar la compatibilidad del fluido espaciador con el lodo base aceite. Esto es lo ideal. Si no se puede realizar, se deberá bombear entre el lodo y el cemento un bache de fluido oleoso. Sería ideal que este fluido oleoso pudiera prepararse con la densidad del lodo; pero ésto no es siempre posible debido a las bajas viscosidades de algunos de los aceites de baja toxicidad.

La única precaución que deberá tomarse, es la de realizar en el campo una prueba de agitado de botella⁽⁶⁾, si la prueba resulta compatible en el laboratorio, y no es compatible en la prueba de campo, deberá bombearse un fluido compatible base aceite adelante del fluido espaciador.

1.4.3 Densidad del fluido espaciador y contenido de sólidos en suspensión⁽²⁾

Cuando se diseña un fluido espaciador, deberá considerarse la densidad de éste. Lo que generalmente se hace es diseñar la densidad del fluido espaciador entre la densidad del lodo y la del cemento. Se acostumbra que el fluido espaciador sea de una densidad de 0.5 lb/gal mayor que la del lodo. Aunque los fluidos espaciadores de mayor densidad pueden no ser perjudiciales, ellos serán más costosos. Los fluidos espaciadores de mayor densidad también pueden crear mayores densidades de circulación durante la colocación del cemento.

El otro problema con los fluidos espaciadores de alta densidad, especialmente aquellos con viscosidades lo suficientemente bajas para desplazarse en turbulencia, es la tendencia al asentamiento de sólidos. A menos que se utilicen polímeros al formular el fluido espaciador, que rompan sus uniones con la temperatura, permitiendo así reducir la viscosidad del fluido espaciador durante la colocación del cemento, el asentamiento de sólidos en la superficie puede ser un problema. Lo que se requiere para mantener los sólidos en suspensión es un equipo de mezclado bien diseñado, de preferencia con un fondo cónico y líneas de succión de bombeo que permitan obtener velocidades lo suficientemente altas para mantener estos sólidos en suspensión.

Así el fluido espaciador se usa adelante y atrás del cemento para mejorar el desplazamiento y reducir la contaminación, el volumen del espaciador debe ser tal que tenga una altura en el espacio anular de 500 a 800 pies (152 a 244 m) dependiendo de las condiciones del pozo y de la compatibilidad del lodo y el cemento. También se debe igualar la altura del fluido espaciador que va atrás del cemento, a la del que se encuentra en el espacio anular en el momento en que todo el cemento ha salido de la tubería de perforación.

El tipo de espaciador debe ser compatible con el cemento y con el lodo de perforación.

No debe haber una gelatinosidad excesiva cuando se mezcle con cualquiera de los dos. Para lodos base agua, de baja densidad, se recomienda un fluido lavador, a éstos no se les puede densificar; pero, por otro lado, pueden tener baja pérdida de fluido y son excelentes para agujeros perforados con aire o gas (para reducir las presiones de

tratamiento). Se puede también usar agua. Para lodos base agua, de densidades altas, se recomienda un espaciador. Estos pueden densificarse con siderita, hematita, barita y otros materiales densificantes; también pueden tener baja pérdida de fluido.

Los lodos base aceite requieren de un espaciador capaz de desplazar éste tipo de lodos. Generalmente contienen surfactantes. Se recomienda un surfactante mojante de agua para incrementar la adhesión del cemento con la formación.

Así el fluido espaciador deberá tener una densidad de 0.5 a 1 lb/gal mayor que la del lodo. Si es posible, tratar de mantener la densidad y la viscosidad del espaciador en el rango formado entre la del lodo y la de la lechada. De ésta manera los baches lavadores y espaciadores se deben de bombear a condiciones de flujo turbulento si es posible; las fluctuaciones en el bombeo deben reducirse en número y duración.

Existen tres tipos básicos de fluidos limpiadores: agua, lechada de cemento lavador y sustancias químicas. Cada fluido limpiador tiene su aplicación en determinadas áreas y el mejor generalmente se determina por experiencia. Por ejemplo en un pozo en Wamsutter se utiliza una combinación de 20 barriles de agua fresca y 20 barriles de cemento lavador.

El agua se bombea en flujo turbulento, seguida por el cemento lavador de una densidad de 12.5 lb/gal, también en flujo turbulento. El cemento lavador, de baja densidad, es un excelente fluido limpiador. Es posible obtener flujo turbulento y sus partículas sólidas desgastan la película de lodo y el enjarre. El volumen de fluido limpiador utilizado y el gasto al cual es bombeado, está diseñado para un tiempo de contacto de 10 minutos, con flujo turbulento, lo cual es un mínimo recomendable para remover el fluido de perforación.

Una vez que se seleccionó el fluido espaciador, se realizaron las pruebas de compatibilidad, se determinó la cantidad del fluido espaciador y si se bombea o no el fluido oleoso, permanece la pregunta de cómo separar los fluidos cuando se bombeen por la tubería de revestimiento. Como el desplazamiento de los fluidos está diseñado tomando en cuenta su densidad relativa, los fluidos más ligeros generalmente están al final de la cima del espacio anular, y los de mayor densidad en el fondo. Evidentemente que durante la colocación del cemento, sucede justamente lo contrario. Un método que ha sido y puede ser utilizado, es colocar tapones limpiadores de "fondo" entre el lodo y el fluido oleoso, entre el fluido oleoso y el fluido espaciador y entre el fluido espaciador y el cemento.

Esto se puede realizar de la siguiente manera:

- a) Introducir el primer tapón
- b) Bombear 5 barriles de fluido oleoso y soltar el tapón, bombear 5 bl más y parar
- c) Introducir el segundo tapón

- d) Bombear el resto del fluido oleoso y soltar el segundo tapón
- e) Bombear 5 bl del fluido espaciador y parar
- f) Introducir el tercer tapón
- g) Bombear el resto del fluido espaciador y soltar el tercer tapón
- h) Bombear 5 bl de cemento y parar
- i) Introducir el tapón superior
- j) Bombear el resto del cemento, soltar el tapón superior y desplazar

La inadecuada selección, eficiencia, volumen o tipo de flujo del fluido lavador, propiciará que los residuos del fluido de perforación que se depositan sobre la pared del agujero, no se liberen apropiadamente, una vez realizada la cementación. La consecuencia que puede presentarse es que los residuos del fluido de perforación permitan con relativa facilidad la canalización de los fluidos de la formación, dando por resultado deficiencias en los trabajos de cementación.

La calidad de los espaciadores se refleja en la compatibilidad que tengan con la formación, la lechada de cemento, el fluido de perforación y con la capacidad de reducir la contaminación entre fluidos cuando se lleva a cabo el desplazamiento.

1.5 CENTRALIZACIÓN DE LA TUBERÍA^{(2), (5), (10)}

Otro punto a tratar obviamente es la centralización de la T.R, de estudios experimentales y de campo se observó que el lodo es bastante fácil de remover cuando a tubería tiene una excentricidad mayor al 67% (excentricidad API). Se debe recordar que si la tubería está en contacto con la pared del pozo, es imposible colocar el cemento entre la tubería de revestimiento y la pared.

De pruebas realizadas, en las secciones de la tubería donde se tenía poca excentricidad, el cemento mostraba una tendencia no muy uniforme de desplazar el lodo, porque la lechada de cemento y baches espaciadores siguen el camino de mínima resistencia en el espacio anular. Los centradores mejoran la centralización, igualando la distribución de fuerzas generadas por la lechada de cemento al fluir por el espacio anular, de otra manera el cemento tiende a fluir por la parte que ofrezca menos resistencia, por ejemplo la parte más amplia del espacio anular (fig. 1.4).

Se han efectuado investigaciones para observar el efecto de la excentricidad sobre el comportamiento de flujo en el espacio anular y los resultados demostraron que la excentricidad de la tubería aumenta la velocidad necesaria para iniciar el movimiento de los fluidos, desde la sección más angosta del espacio anular, lo cual puede observarse en la gráfica 1.1.

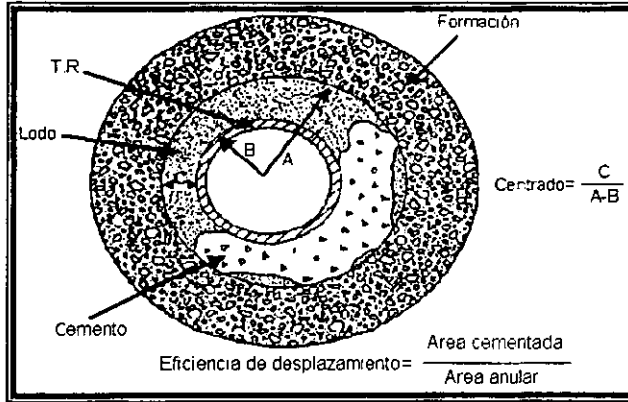
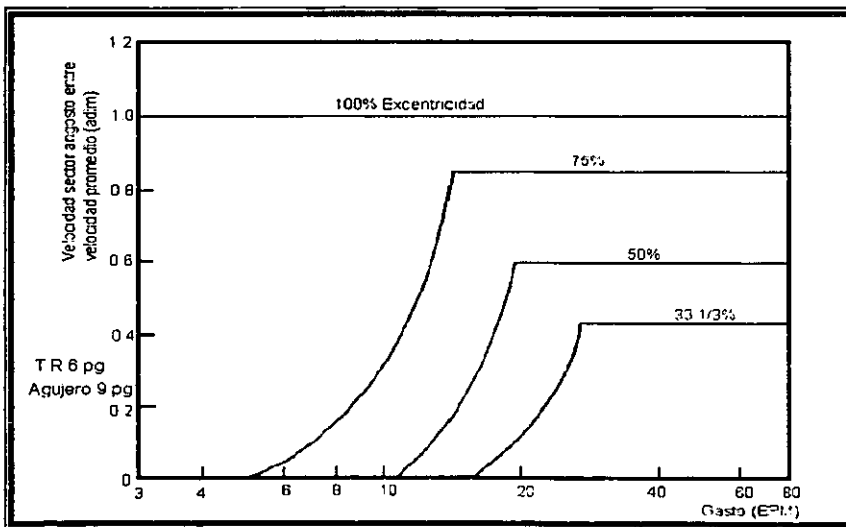


Fig. I.4. Definición de centrado y eficiencia de desplazamiento⁽²⁾

En la gráfica I.1 se observa que la excentricidad afecta la velocidad en la parte angosta respecto a la velocidad promedio de flujo, por ejemplo una T.R. con un 50% de excentricidad; el fluido en la parte más angosta no se pondrá en movimiento hasta que el gasto de bombeo supere los 10 bpm. Además, la velocidad en la sección angosta nunca será mayor que el 60% de la velocidad promedio, aún a gastos mayores de 20 bpm, en éstas condiciones serán muy difícil alcanzar el flujo turbulento en la sección angosta del espacio anular: si se establece un régimen para desplazar un flujo tapón, el lodo en la sección estrecha nunca llegará a moverse.



Gráfica I.1. Efectos del gasto sobre el desplazamiento del lodo con diferentes excentricidades⁽²⁾

Las pruebas realizadas confirman que los centradores tienen un efecto significativo en el proceso de desplazamiento del canal donde se encuentran asentados los sólidos. Pruebas realizadas en laboratorio con centradores de arco de muelle, indican que éstos ayudan a limpiar el canal de sólidos por varios pies corriente abajo de su localización; los cuerpos de muelle actúan como líneas de mezclado, las cuales causan turbulencia en el patrón de flujo que tiende a disgregar y desplazar los sólidos dentro de la corriente en una distancia corta.

El diseño de los fluidos de perforación es de vital importancia, ya que de no tenerse un buen diseño para el transporte de sólidos, éstos volverán a caer al lado bajo del pozo una vez que la turbulencia haya finalizado; sin embargo, ésta turbulencia debe al menos asegurar el desplazamiento en las zonas cercanas a los centradores.

Uno de los principales objetivos de los centradores, es el de ayudar a prevenir la canalización durante el desplazamiento de la lechada, manteniendo centrada la tubería en el agujero, además el uso de centradores ayuda a prevenir pegaduras en formaciones altamente permeables. El problema más común asociado con el uso de centradores, es el excesivo aumento de fricción que originan al estar en contacto con la formación así como el número insuficiente de éstos para ser usados. El espaciamiento entre centradores puede calcularse utilizando ecuaciones, a través de un programa de cómputo, para obtener un mejor rendimiento y mantener la fricción al mínimo, además de obtener un aumento en la centralización de la tubería.

El diseño de centradores puede ser dividido en dos tipos, basándose en su habilidad de centralización:

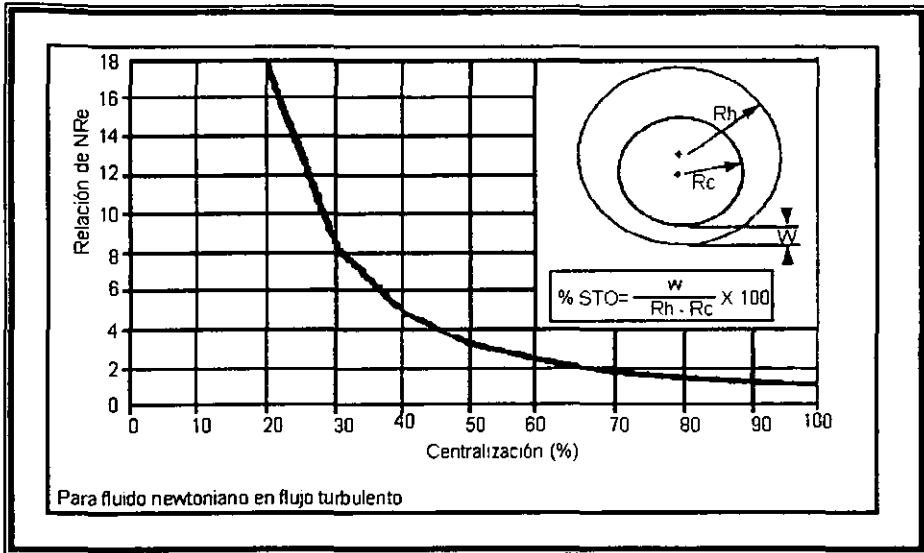
Centradores con arco de muelle, generalmente utilizan varias hojas de muelle para tener una fuerza de centrado, la cual es dirigida radialmente sobre la tubería.

Centradores rígidos (positivos), soportan la T.R por medio de bandas metálicas, las cuales son diseñadas para que no se flexionen.

Existen tres normas API⁽⁹⁾ para centradores:

- 1) Fuerza de inercia. Esta prueba sirve para verificar que se puede introducir la T.R en el agujero únicamente con su propio peso.
- 2) Deformación permanente. Se realiza para verificar la elasticidad del centrador. La hoja de muelle se mide una vez que se ha doblado doce veces.
- 3) Fuerza de restitución. Es una medida de la fuerza ejercida por el centrador para mantener la tubería alejada de la pared del agujero.

Todo esfuerzo dirigido a obtener un buen desplazamiento del lodo, será anulado debido a la inadecuada colocación de los centradores y se reflejará en la evaluación final del trabajo de cementación.



Gráfica 1.2. Variación del número de Reynolds crítico con la descentralización.⁽²⁾

Son indiscutibles los beneficios que tiene el centrado de la tubería de revestimiento con respecto a la eficiente remoción de lodo durante la cementación. La industria parece confiar en varios modelos matemáticos para la predicción de presiones, densidades equivalentes de circulación, fuerzas de arrastre durante el movimiento recíprocante de la tubería de revestimiento, etc. Estos métodos están basados en la suposición de tuberías de revestimiento centradas. Mientras que estos métodos de cálculo son aceptados, la colocación de centradores es a menudo minimizada, generalmente debido a experiencias anteriores con centradores que han sido destruidos y ha fallado la introducción de la tubería de revestimiento.

Un factor importante para determinar la eficacia del desplazamiento de los fluidos en el anular es la descentralización de la tubería en el agujero. El caudal de flujo en el anular varía con el espacio entre el T.R y la pared del pozo, siendo que la velocidad más alta ocurre en la sección más ancha.

Esto podría resultar en una mala remoción de lodo debido a los regímenes del flujo incoherentes (turbulento en algunas partes, laminar en otras). La gráfica 1.2 muestra la relación del Número de Reynolds (NRe) de un pozo perfectamente centralizado. Cuanto mayor sea ésta relación, más difícil será alcanzar turbulencia en la sección estrecha.

El Número de Reynolds Crítico es el Número de Reynolds que asegura turbulencia en toda la extensión del espacio anular. La descentralización tiene una importancia preponderante en el NRe: para un pozo totalmente centralizado (o standoff = 100%), el NRe es igual a 1, lo que quiere decir que al alcanzar el NRe del fluido, todo el espacio anular estará en turbulencia. Un pozo totalmente centralizado tiene standoff de 100%.

A medida que aumenta la descentralización (standoff se reduce), el NRe aumenta. En una centralización de 70% aproximadamente, el NRe del fluido utilizado, como se puede ver en la gráfica 2 es casi igual a 2. Esto quiere decir que se alcanza un NRe de 3000 en la zona más ancha, pero el flujo en la zona más angosta no estará todavía en turbulencia. Será necesario que el NRe sea el doble (o sea $NRe = 6000$ o caudal crítico igual al doble) para asegurar que toda la sección del espacio anular fluya en turbulencia.

Una descentralización inferior a 60% torna prácticamente imposible la remoción de lodo en flujo turbulento. Los caudales requeridos alcanzan valores imposibles de ser bombeados o simplemente no son económicos. Lo ideal es mantener la centralización superior a 70%.

Obviamente, el objetivo es tener la menor diferencia posible entre los caudales de flujo, esto se logra a través de la centralización de la T.R. Sin embargo, hay un límite práctico y económico al máximo de centralización posible de ser logrado. El trabajo del Ingeniero de cementación es determinar el nivel óptimo de centralización necesaria para alcanzar una efectiva remoción del lodo, en la figura 1.5 se observan los efectos de la centralización. Es por ello que existen programas muy eficientes como el CemCADE que permiten al ingeniero optimizar la centralización e identificar los requerimientos necesarios para asegurar una buena remoción del lodo.

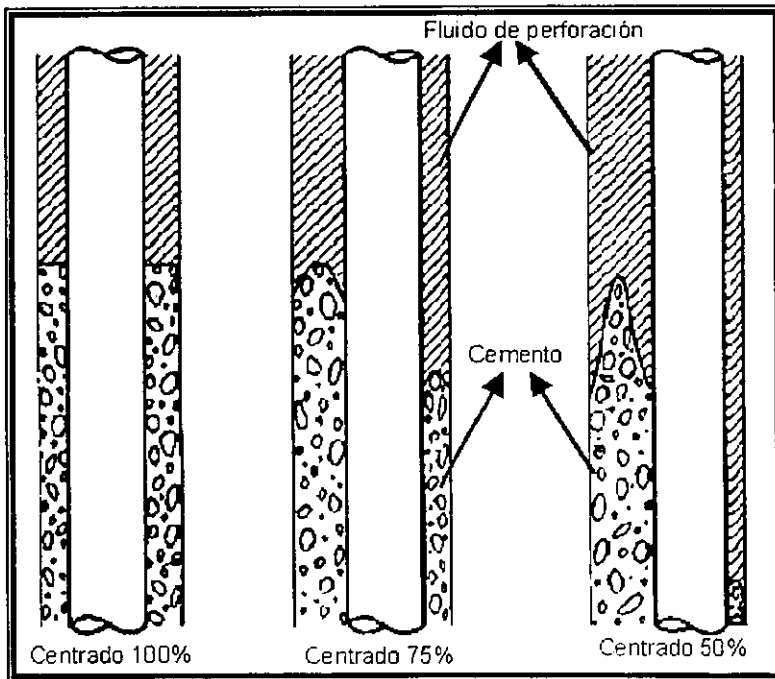


Fig. 1.5. Efectos del centrado sobre el desplazamiento del lodo⁽²⁾

Existe una fórmula para calcular el porcentaje de centralización en la que se encuentra la tubería y se denota de la siguiente forma:

$$\% \text{ centrado} = 100 \cdot (W_n / (R_h - R_p)) \dots \dots \dots (1)$$

donde:

W_n = Distancia mínima entre el diámetro exterior de la tubería y el diámetro interior del pozo, pg.

R_h = Radio del pozo, pg.

R_p = Radio de la tubería, pg.

Así de esta manera también existen varios métodos para calcular la colocación de centradores.

En la actualidad se ha desarrollado un modelo (Método de Graham), para la remoción efectiva del lodo en tuberías de revestimiento no centradas. Un problema con este método es que para efectuar una completa remoción del lodo, se debe bombear un gran volumen de cemento, mayor que cuando la tubería de revestimiento está centrada. Debido a la incertidumbre relacionada con el método de Graham, se prefiere utilizar el número justo de centradores para un centrado mínimo de 67%. Es cierto que todavía falta mucho por investigar sobre este tema, pero con los grandes beneficios que trae consigo el buen centrado de la tubería de revestimiento, se están llevando a cabo diversos estudios sobre dicho tema.

1.6 MOVIMIENTO DE LA TUBERÍA^{(2), (5), (8)}

El movimiento vertical y/o de rotación, durante la cementación, mejora en gran medida la posibilidad de un buen trabajo de cementación.

Durante la cementación surgen preguntas como ¿qué tanto se debe de mover la tubería? o ¿qué tan rápido?, pero la primera decisión que debe tomarse es si la tubería será girada, movida en forma recíprocante o con ambos movimientos. Desde el punto de vista operativo, el movimiento giratorio es mucho más difícil, debido a la necesidad de las uniones giratorias, el cabezal de rotación y centradores adecuados. El método usual de movimiento de la tubería, es el recíprocante.

Mientras la tubería no se mueva a una velocidad a la que el pozo sea inducido o fracturado, este tipo de movimiento parece proporcionar un mejor desplazamiento del lodo, que sin movimiento. Si no se considera como una opción el movimiento recíprocante, como pudiera ser el caso de una tubería corta, entonces el movimiento giratorio puede considerarse. Existen colgadores de rotación para tuberías cortas, que utilizan cajas de sellados de chumacera para la rotación. También existen colgadores que giran en cojinetes no sellados de baleros, pero generalmente la vida de rotación es más corta, debido a la erosión de sólidos en los cojinetes. La ventaja que tienen las herramientas de rotación es que la tubería corta puede quedar colgada, la herramienta de introducción y asentamiento se libera y la tubería corta puede continuar girando.

Una vez que el cemento esté en el lugar, todo lo que se requiere es un esfuerzo de tensión para recuperar las herramientas introducidas.

Estudios han demostrado que la eficiencia de desplazamiento puede aumentar desde 25 a 50% cuando se mueve la tubería a prácticamente 100% cuando se utiliza alguna forma de movimiento (reciprocación o rotación). Se tiene la mala idea o el mal concepto de que mover la tubería puede resultar en prisión o desenroscamiento de la misma, pero si el pozo está en buen estado el peligro de aprisionarse o desenroscar la tubería es bajo. Una buena centralización puede ayudar en reducir el arrastre en la tubería al mantenerla fuera de contacto con las paredes del pozo. Sin embargo, no es posible tener perfectamente centralizada la tubería en el agujero, por lo que siempre habrá una pequeña descentralización, por menor que sea ésta. Al mover la tubería se consigue muchos beneficios, por ejemplo: ayuda en la remoción de los recortes, rompe la fuerza gel del lodo, reduce la viscosidad del lodo y cambia el perfil de flujo en el anular. También el movimiento de la tubería puede desviar el flujo hacia dentro de los derrumbes, donde de otra manera no podría llegar. Todo esto ayudará a mejorar la eficiencia del desplazamiento.

Rotación.- Es la forma más efectiva de mover la tubería, debido a que las fuerzas rotatorias barren los fluidos alrededor del agujero. La velocidad de rotación debe ser alrededor de 10 a 20 rpm. La rotación también puede ayudar en la bajada de la tubería ya que muchas veces los recortes acumulados en el fondo del agujero son arrastrados por el movimiento rotatorio de la zapata durante la corrida de la tubería de revestimiento. Si la tubería empieza a tener peso, la rotación y circulación facilitarán la completa bajada hasta el fondo del pozo. Se debe tomar mucho cuidado en evitar sobrepasar los límites de la tubería y de las conexiones.

Reciprocación.- Puede ser muy eficaz en la remoción del lodo. Aunque sea considerada menos efectiva que la rotación, la reciprocación ayuda a romper la fuerza del gel lodo. Durante el movimiento la tubería se alterna entre esfuerzos de tensión y compresión, lo que ayuda a modificar el perfil de descentralización. Esto modifica el perfil de flujo alrededor de la tubería, ayudando en el desplazamiento del fluido en el anular. La reciprocación debe ser realizada en ciclos de 10 a 20 pies en el fondo, repitiéndose a cada uno o dos minutos. Herramientas adecuadas como los rascadores pueden ayudar a romper la fuerza gel del lodo. Para optimizar el mejor diseño en el movimiento de la tubería se deben de determinar las presiones de pistoneo y surgencia.

El movimiento de la tubería empieza con el acondicionamiento del lodo y cuando se corre la T.R en el pozo. Es posible rotar y reciprocarse simultáneamente, teniendo buenos resultados. Muchas tuberías de revestimiento han sido cementadas moviendo la tubería durante la cementación. Esto debe ser tomado en cuenta durante el diseño de la operación para aumentar el éxito. Ambos movimientos han demostrado ser la mejor contribución en la remoción de los fluidos de perforación del pozo. La agitación mecánica creada, ayuda al rompimiento de las bolsas de lodo geladas y a aflojar los recortes que pueden acumularse a lo largo del pozo.

CAPÍTULO II

CEMENTACIÓN PRIMARIA

II.1 FUNCIONES DEL CEMENTO

La cementación primaria es la técnica utilizada para la colocación de una lechada de cemento cubriendo el espacio anular entre la T.R y el agujero. Los objetivos o funciones principales de la lechada de cemento son⁽⁷⁾:

- Soportar la T.R. Probablemente el objetivo más simple es sostener y soportar la T.R en su lugar, permitiendo que continúen las operaciones subsiguientes de perforación y de terminación. Una T.R bien cementada evitará todos los problemas ocasionados por esfuerzos desiguales, especialmente esfuerzos laterales causados por formaciones plásticas (zonas de sal) o por formaciones tectónicamente activas o no consolidadas. Estos esfuerzos pueden llevar a la ovalización y en último caso al colapso de la tubería. Con el espacio anular cubierto con cemento, la tubería de revestimiento sufrirá esfuerzos más homogéneos.
- Protección de la T.R. La protección de la pared externa de la tubería de revestimiento es muy importante, ya que algunas formaciones poseen fluidos agresivos como salmueras, sales, H₂S, CO₂, etc. El contacto prolongado entre la T.R y estos fluidos pueden llevar a corrosión y destrucción completa del revestimiento.
- Aislamiento Hidráulico. El cemento fraguado no permitirá la comunicación entre zonas, causa frecuente de migración de fluidos indeseables. Esta migración puede ser entre formaciones o hacia la superficie (por lo que podríamos hablar de pérdida de producción), contaminación de otras formaciones (acuíferos), contaminación ambiental, etc. El sello hidráulico también es necesario para asegurar que futuros tratamientos de estimulación (como acidificación matricial y fracturamiento hidráulico) sean confinados a la zona de interés (fig. II.1).

La cementación de un pozo productor de aceite, gas o inyector, puede ser una de las tareas más difíciles encontradas durante la perforación o terminación del pozo, si se realiza correctamente. Desafortunadamente, al menos una operación de cementación se realiza en cada pozo perforado y, a menudo, la cementación se considera, como una rutina y puede realizarse sin tener el diseño de ingeniería requerido.

Como pocas veces se requiere demostrar la calidad del trabajo de cementación y aún cuando ésto sucede las herramientas y métodos de evaluación pueden ser poco confiables, muchos de los errores de colocación del cemento nunca se descubren. Si las pruebas de producción posterior son suficientes para mostrar la comunicación con zonas diferentes a las deseadas, se puede creer que es imposible obtener una buena cementación.

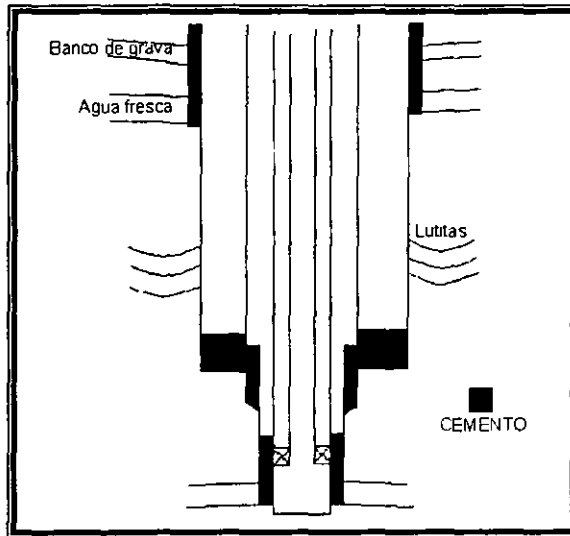


Fig.II.1. Objetivos del cemento

Se puede obtener una buena cementación, realizando un esfuerzo considerable por todos los interesados: el responsable de la perforación, el ingeniero de perforación, el contratista y las compañías de servicio involucradas. La planeación debe realizarse, días, semanas o algunas veces meses antes de la perforación. Para reemplazar apropiadamente el lodo utilizado, para perforar el pozo y formar un sello hidráulico, los esfuerzos tendrán que realizarse durante la perforación, la toma de registros, la introducción de la tubería de revestimiento, la circulación del pozo, el mezclado del cemento, el desplazamiento, el bombeo del tapón y el tiempo de espera del fraguado del cemento.

Se deberán considerar, parámetros que se mencionaron en el capítulo uno, como, la geometría del agujero, la viscosidad del lodo, la velocidad de introducción de la tubería de revestimiento, el centrado de la tubería, el tipo de lodo, la compatibilidad del lodo y el cemento, los regímenes de flujo para el desplazamiento y muchos aspectos más de la operación. Se deberá realizar un análisis de todos los parámetros de las ecuaciones involucradas en la cementación, para garantizar el éxito en la operación de cementación.

II.2 TIPOS DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

Existen diferentes tipos de sartas de revestimiento utilizadas, por lo tanto el objetivo de la cementación primaria puede variar de sección a sección⁽⁷⁾:

Conductor. Normalmente es el primero a ser bajado, su principal función es prevenir la erosión de las capas superficiales debajo del equipo de perforación, ya que normalmente las primeras formaciones perforadas son extremadamente

desconsolidadas y débiles. También sirve como conductor para circular el fluido de perforación hacia las presas. El revestimiento conductor permite la pronta instalación del preventor (BOP), para que las operaciones de perforación puedan ser iniciadas con plena seguridad. Esto es muy importante ya que es muy común encontrar en formaciones someras la presencia de hidrocarburos (normalmente gas). En algunos casos (especialmente costa fuera), el conductor no es cementado y sí clavado con un bate-estaca, ya que las formaciones someras costa fuera son mucho más débiles y extensas que en tierra.

T.R Superficial. Su función es similar al conductor, también permite proteger acuíferos someros. Debido a esto, normalmente puede ser que existan normas gubernamentales regulando la profundidad y requerimientos de la cementación. En la mayoría de los casos, el mayor requerimiento es soportar el T.R, por lo que se usa una lechada extendida de bajo costo, seguida por una lechada de cemento puro con mayor resistencia para la zapata. No obstante la presencia de formaciones someras con gas puede llevar a la necesidad de bombear una lechada antimigratoria.

T.R Intermedia. Normalmente usada para sellar zonas problemáticas (formaciones con presiones anormales, zonas de gas, zonas plásticas como arcillas y lutitas, zonas de pérdida de circulación, etc.) antes de empezar a perforar la zona de interés. En términos de longitud, ésta tubería intermedia puede ser la más larga utilizada en el pozo. Debido a los distintos tipos de formaciones expuestas, el requerimiento de la cementación puede variar considerablemente pero normalmente se requiere de lechadas con mucho mejor desempeño que el de la T.R de superficie.

En la actualidad, con los pozos cada vez más profundos, se requiere de tuberías intermedias más profundas y con el incremento de formaciones expuestas (cada una con su particularidad), se vuelve cada vez más grande el reto para la cementación de ésta tubería.

T.R de Producción. El objetivo final del pozo, en el cual todos los grandes requerimientos serán aplicados (aislamiento hidráulico, al igual que soporte y protección del T.R). Siendo la última T.R en el pozo, será sometido a las condiciones más críticas de presión y temperatura. Casi siempre, las características de la lechada son maximizadas: mínimo filtrado (para prevenir deshidratación prematura y modificaciones en su reología durante el bombeo), alta resistencia a la compresión (para asegurar un buen cañoneo y vida útil del T.R), baja permeabilidad, etc.

II.3 TÉCNICAS DE CEMENTACIÓN

Para poder llevar el cemento a su destino u objetivo, existen diferentes técnicas para hacerlo, dentro de las cuales tenemos⁽⁷⁾:

- ◆ Etapa Única
- ◆ Etapas Múltiples

- ◆ Stab-in
- ◆ Liner
- ◆ Sub-Superficie (SubSea)
- ◆ Grouting

II.3.1 Etapa Única

Es una operación donde los fluidos son bombeados continuamente en una sola etapa, además es la opción preferida por las operadoras como por las compañías de servicio por varias razones: el funcionamiento es más simple, más rápido y no hay necesidad de utilizar materiales de entubación especiales, tales como collar de etapa. También es más económico, ya que una cementación de etapas múltiples requiere de volúmenes adicionales de lavadores químicos y espaciadores, más el costo de herramientas y del tiempo de perforación adicional para realizar operaciones redundantes (desplazamiento, bombeo de los fluidos lavadores y espaciadores). Recientemente con el elevado costo de los equipos de perforación (especialmente costa afuera, localizaciones remotas y áreas ambientalmente sensitivas), éste es un punto muy importante a ser considerado.

Existen algunas ventajas técnicas en hacer el trabajo en una fase, el más importante es el hecho que se puede mover toda la tubería (rotación y/o reciprocación) ya que como se sabe el mover la tubería aumenta la eficacia de la remoción de lodo y mejora la calidad global del trabajo de cementación.

En un trabajo de etapas múltiples, la sección superior es cementada cuando el cemento de la capa inferior todavía no esta completamente fraguado. Las presiones y vibraciones que sufre la T.R. durante el bombeo de la segunda etapa pueden causar un microanillo en la sección inferior (con el cemento aún plástico), lo que resulta en un microanillo. Esto afecta especialmente un registro sónico como el CBL .

Intentar presurizar la tubería durante el registro para superar el microanillo, puede no ser lo suficiente para superarlo (especialmente si los puertos del collar de etapa no sellan correctamente).

En la actualidad, el uso de lechadas ultralivianas como cemento espumado y otras permite la realización de operaciones de una sola etapa en condiciones extremas.

II.3.2 Etapas Múltiples

Operaciones de 2 o 3 etapas, usando un material de entubación especial (collar de etapa), normalmente instalado encima del tope del cemento de la etapa anterior. La herramienta se mantiene cerrada hasta el final del desplazamiento de la primera etapa. Los puertos del collar son abiertos por un dispositivo lanzado desde superficie

(denominado "bomba" o "dardo"), enseguida el pozo se pone en circulación y se procede a bombear la lechada.

La cementación en etapas múltiples se utiliza para las siguientes situaciones:

- ◆ Formaciones débiles que pudieran fracturarse debido a la alta columna hidrostática del cemento
- ◆ La sección superior requiere de un cemento de alta densidad y resistencia a la compresión
- ◆ No se requiere de cemento entre intervalos muy separados
- ◆ La extensión de formación es muy grande y requiere mucho caballaje para el desplazamiento
- ◆ Reducción de costos (dejar un intervalo intermedio sin cementar entre las dos etapas)

Las técnicas usadas para operaciones de etapas múltiples son la cementación en dos etapas (regular y continua) y la cementación en tres etapas. En la operación regular de 2 etapas, cada etapa se realiza como una operación adicional, mientras en la operación continua las etapas se realizan en secuencia. Diferente a la operación técnica de etapa única, en estas operaciones se requiere de un collar de etapa (2 en el caso de una cementación en 3 etapas). Esta herramienta tiene puertos que se abren y cierran por medio de camisas operadas por presión. Durante la cementación de la etapa anterior, estos puertos están sellados y la herramienta se comporta exactamente como una junta de la T.R.

En la operación regular de 2 etapas, al terminar el desplazamiento de la primera etapa convencional, se lanza desde superficie un dispositivo de abertura del collar ("bomba" o "dardo") que gravitará hasta posicionarse en el collar. Aplicación de presión (aproximadamente 1200 a 1500 psi) fuerza el dispositivo hacia abajo, lo que rompe unos seguros y mueve la camisa, exponiendo los puertos. Esto se ve en superficie como una repentina caída de presión. Después de la circulación, el pozo estará listo para la próxima etapa. Nuevamente se bombea colchones y lechada, seguida del tapón de desplazamiento. Este tapón se asentará en el collar, resultando en un incremento de presión de unos 1500 psi, que mueve otra vez la camisa hacia abajo, cerrando los puertos.

La operación continua de 2 etapas utiliza un tapón de abertura en lugar del dardo o bomba, por lo que no habrá ningún tiempo de espera. La primera operación se efectúa normalmente, seguido del tapón de desplazamiento y un volumen bien definido de lodo (correspondiente al volumen entre el collar flotante y el collar de etapa). Enseguida se lanza el tapón de abertura, seguido de los colchones y lechada. Se lanza el tapón de cierre y se desplaza hasta el collar. Normalmente se instala en el collar flotante un

inserto como by-pass para permitir algún tipo de tolerancia hasta el tapón de abertura y alcanzar el collar de etapa.

La operación regular de 3 etapas no difiere mucho de la de 2 etapas, solo utiliza un collar adicional. El dardo y el tapón de cierre de la primera etapa son menores que los de la segunda etapa.

II.3.3 Stab-In

Son operaciones normalmente diseñadas para cementar tuberías de grandes diámetros (por encima de 10 ¾"), donde un ahorro considerable de tiempo puede ocurrir si reducimos el volumen interno de la T.R. En este caso la tubería de perforación es conectada al collar o zapata de Stab-in, reduciendo drásticamente el tiempo de bombeo y desplazamiento.

También es muy ventajoso cuando se desconoce el valor real de volumen anular (no hay caliper), lo que ocurre a menudo en la T.R. superficial, cuando la lechada empieza a retornar en superficie, se para el bombeo y se procede a desplazar.

Así la técnica Stab-in es una operación de cementación realizada a través de tubería de perforación y es normalmente usada sólo para T.R. de grandes diámetros, generalmente conductoras o de superficie. La tubería de revestimiento es bajada normalmente con una zapata guía y collar flotante Stab-in (a veces se baja sólo con una zapata flotadora). Al llegar a la profundidad deseada, la T.R. se asienta y la tubería de perforación es bajada con un stinger (aguijón). La herramienta se encaja en el collar o zapata y se empieza a circular, observándose el retorno por el espacio anular entre la T.R. y el agujero.

La lechada de cemento es mezclada y bombeada por la tubería de perforación y al llegar al fondo retorna por el espacio anular. Casi siempre estas operaciones requieren que la lechada alcance la superficie. Cuando se observa retorno de lechada en buenas condiciones se suspende el bombeo de cemento y la tubería de perforación es desplazada, por lo tanto no hay necesidad de calcular precisamente el volumen anular a cementar, basta con bombear hasta observar el retorno de cemento y desplazar, como se menciona anteriormente.

Después de terminado el desplazamiento, la tubería de perforación se rota varias veces a la derecha y las ruestas gruesas liberan la herramienta. A menudo se emplean stinger muy sencillos que utilizan sólo el peso de la tubería de perforación para sellar. El pozo es circulado para remover cualquier residuo de cemento dentro de la tubería de revestimiento y la tubería se saca a superficie.

El pequeño volumen de la tubería de perforación (comparado con el de la T.R.) torna la operación rápida y evita la necesidad de calcular con precisión el volumen en el espacio anular (estas formaciones son normalmente muy blandas y sujetas a grandes ensanchamientos y normalmente no se corre registros de perfil de caliper en tales agujeros).

También se gana tiempo y facilidad operacional al evitar el uso de grandes y pesadas botellas de circulación y cabezales de cementación (con sus respectivos tapones), ya que estas son difíciles de conectar a la T.R., inseguros para operar, además los tapones son muy caros e incómodos de instalar.

II.3.4 Liner

Un liner consiste en una tubería de revestimiento que no se extiende totalmente hasta la superficie. En cambio se conecta a la tubería de perforación por medio del colgador de liner y es bajado en el pozo. La idea es reducir costo al reducir la longitud de la T.R. requerida. Cuando se alcanza la profundidad estimada, el colgador se asienta en la T.R. anterior, anclando la tubería. La cementación es similar a un trabajo convencional, con excepción de los tapones y del cabezal, que son especialmente diseñados para la operación.

El liner es definido como una T.R que no se extiende totalmente hasta la superficie, pero es colgado dentro de la T.R anterior. El intervalo de "overlap" dependerá del propósito del liner, pudiendo variar desde 50 pies para liners de perforación como 500 pies para liners de producción.

El liner es utilizado principalmente para reducir los costos de tubería en T.R muy largos (menor cantidad de tubos requeridos), optimizar el volumen interno del agujero (mayor diámetro), además de permitir utilizar sargas de producción más anchas o doble sarga así como permitir la instalación de equipos de explotación artificial.

Tipos de Liners:

- ◆ Liner de Perforación. También conocidos como liners intermedias, son utilizadas para aislar zonas problemáticas encontradas durante la perforación (pérdida de circulación, formaciones con presiones anormales, formaciones plásticas e inestables, como arcillas, sal, etc). Después de cementado el liner, la perforación prosigue sin problemas.
- ◆ Liner de Producción. Usado para cementar la zona de interés. Es esencial un buen aislamiento hidráulico para las futuras operaciones de terminación y producción.
- ◆ Tieback stub liner. Extienden desde el tope de un liner ya existente hasta determinado punto más arriba (incluso superficie). Son generalmente usados para reparar T.R dañados, corroidos o deliberadamente perforados encima del liner existente. Muchas veces el estado de esta T.R es tan precario que sale más económico cementarlo totalmente con un nuevo liner que repararlo.

El liner es bajado inicialmente como una T.R normal, con su equipo de flotación y con un Landing Collar (usado para servir de asiento para el liner wiper plug), a veces es instalada una junta encima del collar flotante. El colgador de liner es instalado en el tope del liner y cuando es asentado en la profundidad requerida soportará el peso de la columna, manteniéndola sobre tensión y evitando así el combamiento.

Se debe tener cuidado cuando se empieza a bajar las secciones de la T.P, ya que la velocidad de bajada podría ser muy elevada, teniendo problemas de forzamiento del lodo contra la formación. La velocidad se reduce en el colgador debido al mayor volumen anular, esto puede resultar en precipitación de detritos arriba del colgador (el lodo debe estar bien acondicionado y limpio). El colgador tiene cuñas que se agarran a la pared interna de la T.R, permitiendo anclar la T.R.

El colgador es conectado a la herramienta de asentamiento. Esta herramienta es recuperable, por ejemplo, después de terminado el trabajo, el colgador es dejado definitivamente en el pozo mientras la herramienta es traída a superficie junto con la tubería de perforación. Esta herramienta tiene varias funciones: proveer un sello entre la tubería de perforación y el liner y almacenar los tapones (conectados por pines).

El colgador de liner puede ser activado mecánicamente o hidráulicamente. El último es preferido en pozos profundos o desviados, ya que no requiere de rotación de la tubería de perforación.

En la profundidad deseada, se circula durante un tiempo y se procede a asentarlo en la tubería anterior. El liner es mantenido en tensión, evitando el combamiento (que puede dificultar la centralización).

Normalmente, el espacio anular entre el liner y el agujero es muy pequeño. Siendo así un buen programa de centralización será crítico para la eficiencia de la cementación. La remoción del lodo es muy importante, debe comenzar con su acondicionamiento antes de bajar la tubería.

Si el lodo no está bien acondicionado antes de bajar el liner, se corre el riesgo de crear zonas estáticas, en las cuales será imposible hacer que el lodo entre en movimiento más tarde. Se debe aplicar movimiento a la tubería (rotación y/o reciprocación) ya que aumenta drásticamente la posibilidad de éxito. Debido a los espacios anulares restringidos será más fácil alcanzar flujo turbulento a bajos caudales de bombeo, sin embargo antes de decidirse por éste método es necesario confirmar la integridad de la formación, para no exceder la máxima presión permitida.

Los fluidos lavadores y espaciadores son bombeados, seguidos por la lechada. El tapón de desplazamiento es lanzado y seguirá por la tubería de perforación hasta asentarse en el liner wiper plug, instalado en la herramienta de asentamiento. El incremento de la presión rompe unos pines de bronce y los dos tapones seguirán bajando juntos, ahora por dentro de la tubería de revestimiento. Si se usa un colgador equipado con empacadura, la misma es asentada después de que se haya terminado el desplazamiento. La herramienta de asentamiento es removida del colgador y cualquier exceso de cemento es regresa con circulación inversa, después la herramienta es sacada a superficie.

Un Tie-Back liner requiere de herramientas adicionales como la camisa de Tie-Back (conectada al colgador), niple de sello (proporciona un sello contra la manga) y a veces un collar de etapa instalado encima del niple. El Tie-Back es una opción muy

económica ya que ésta se podría utilizar en lugar de reparar la tubería de revestimiento superior, además de que con ésta la cementación entre 2 tuberías de revestimiento es más sencilla.

II.3.5 Cementación de Sub-Superficie

Este sistema es similar a un liner sólo que aplicado a equipos de perforación costafuera.

El equipo puede flotar, así se usan juntas telescópicas en la tubería de perforación para compensar los movimientos verticales. La herramienta es muy similar a un colgador de liner pero tiene distintos conceptos de ingeniería ya que es instalado en el fondo del océano.

La cementación sub-superficie (Sub Sea) es un proceso muy similar a la cementación de un liner. En primer lugar, la T.R es conectada a la superficie a través de la tubería de perforación, por lo que es necesario la utilización de un modelo distinto de cabeza de cementación y tapones. El sistema comprende la cabeza y herramienta de fondo, la cabeza contiene los dardos (en algunos modelos se tienen esferas), la herramienta de fondo contiene los tapones (inferior y superior). La herramienta de fondo esta localizada en el tope de la T.R (normalmente en el lecho marino) y contiene los tapones inferior y superior.

Una esfera es lanzada desde la superficie antes de ser bombeada la lechada. Esta esfera asentará en el tapón de fondo (en la herramienta de fondo) y un incremento de presión hará que se rompan unos pines de bronce y el tapón es bajado como una única pieza. Al llegar al fondo (collar de fondo o de asentamiento), la presión hará que la esfera atraviese el tapón permitiendo el paso de los fluidos hasta el espacio anular. En los modelos más recientes, la esfera es reemplazada por un dardo, pero el procedimiento de acoplamiento al tapón no cambia.

Antes del desplazamiento, un dardo es liberado en la superficie y será bombeado hasta encajarse al tapón superior, nuevamente localizado en la herramienta de fondo. Este tapón es diseñado para no romperse cuando logra llegar al collar flotante o de asentamiento, dando indicaciones positivas al final del desplazamiento.

Como se mencionó anteriormente, el sistema es similar al utilizado en los liners, sin embargo hay algunos conceptos a consideración, por ejemplo, la baja temperatura encontrada en el fondo del océano, la presión hidrostática ejercida por la columna de agua salada, el movimiento flotante de la tubería de perforación, etc.

Existe una nueva herramienta, que fue especialmente diseñada para superar las limitaciones de los sistemas convencionales de Sub Superficie, como por ejemplo el bombeo de espaciadores y lechadas a través de los tapones (con ésta técnica los fluidos no son bombeados por dentro de los tapones), limitación en el número de tapones inferiores (se puede utilizar más de un tapón inferior), interrupción del bombeo para lanzar el dardo o esfera (los tapones son liberados sin interrupción del bombeo), el

propio hecho de que tal lanzamiento es manual, obligando al personal acercarse demasiado a una cabeza que podría estar instalada muy alta o con alta presión de bombeo (el lanzamiento de los tapones es automático y remoto), etc.

II.3.6 Grouting

Es una operación de cementación especial, normalmente utilizada para operaciones de relleno de cemento, como por ejemplo cementación de patas de plataformas y estructuras de concreto, pero también se puede aplicar a pozos. Esto puede ocurrir cuando existe la necesidad de rellenar la cima de una cementación (Top Job) en donde el cemento no logró alcanzar determinada profundidad, es decir, cuando el volumen de lechada fue insuficiente en la cementación o también cuando el cemento se perdió en formaciones débiles o fracturadas. En este caso una tubería de pequeño diámetro, es bajada por el espacio anular y se bombea la lechada por ella.

Grouting es el nombre conocido a la técnica en el cual el cemento es aplicado para rellenar espacios vacíos. Normalmente es usada para servicios de construcción civil (normalmente aplicado a trabajos de construcción o minería) pero en la industria petrolera podemos mencionar el bombeo de cemento para llenar las estacas de las patas de plataformas costafuera.

Para aplicaciones en los pozos, normalmente tuberías de pequeño diámetro (no son T.R) son utilizadas para bombear cemento con el objetivo de llenar espacios vacíos en el espacio anular, el cemento no es bombeado por la tubería de revestimiento, puede ser bombeado por tuberías chicas como "macarroni". Estos espacios existen por varias razones:

- ◆ Volumen insuficiente de lechada (pozo descalibrado o cálculos inexactos)
- ◆ Pérdida de circulación durante el bombeo

Tuberías de pequeño diámetro (normalmente inferiores a 2", como los "macarroni") son bajadas por el espacio anular, enroscándose varias juntas hasta llegar a la profundidad requerida. La tubería es conectada a la unidad de bombeo y la lechada bombeada hasta lograr llenar totalmente el espacio vacío.

II.4 TAPONES DE CEMENTO

El cemento además de cumplir con los objetivos mencionados anteriormente también sirve en alguna etapa de la perforación de un pozo, ya que en algunas ocasiones se requiere del taponamiento en el fondo del agujero, de acuerdo a ciertos criterios de operación o ciertas normas y muchas veces de acuerdo al criterio del operador para su utilización (fig. II.2a).

La colocación de tapones de cemento en agujero descubierto ha sido históricamente una actividad difícil. Con frecuencia se requieren varios intentos para colocar tapones de cemento, antes de obtener uno que quede a la profundidad programada y que tenga

la suficiente resistencia para permitir la desviación del agujero. El comportamiento de flujo inestable, resultante de una lechada de cemento de alta densidad que reposa sobre un lodo de baja densidad, es una de las causas principales de la falla de los taponos (fig. II.2b).

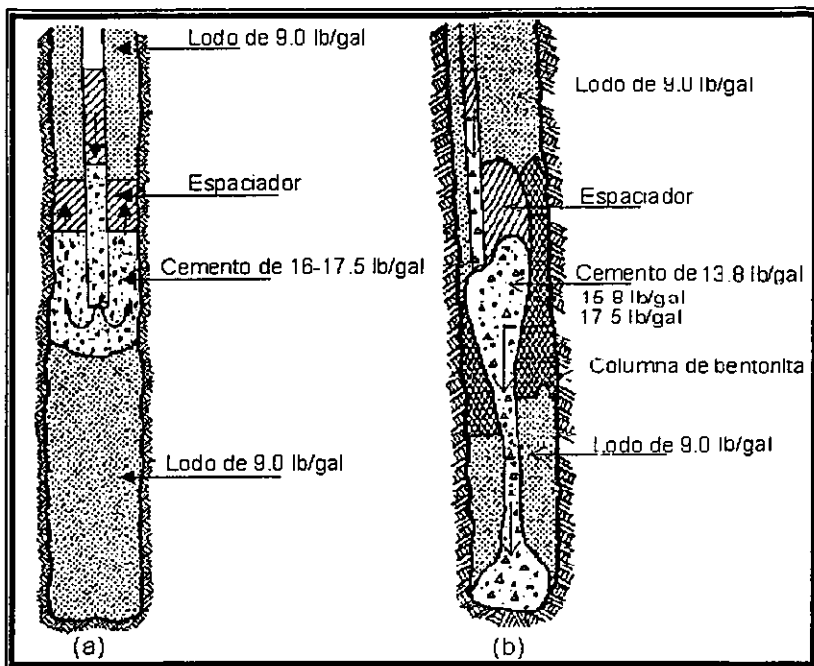


Fig. II.2. (a) Caso ideal de un tapón, (b) Resultado de un tapón inestable⁽²⁾

La práctica común del uso de tubería franca o tubería de producción, para colocar el tapón, es también un factor importante que contribuye al fracaso en la colocación de taponos.

Cada operación de taponamiento presenta un problema ya que el volumen de cemento es relativamente menor en comparación con el lodo del pozo. El lodo puede contaminar el cemento y el resultado, aún después de un tiempo de fraguado razonable, es un tapón débil, diluido y sin fraguar. Por estas razones, tanto la tecnología mecánica como la química son indispensables para obtener un taponamiento exitoso.

De acuerdo a diversos estudios se ha demostrado que las lechadas de cemento pesadas, colocadas arriba de lodos ligeros, forman interfaces inestables, las cuales, debido a las fuerzas gravitacionales adversas, pueden originar el flujo de los fluidos, contaminando el tapón o haciendo que éste se mueva hacia abajo y entonces, que ocasione la falla del trabajo de taponamiento.

La mayoría de las técnicas para colocar tapones en agujero descubierto se han desarrollado en el proceso de perforación orientada, taponando el pozo descubierto antes de la colocación de la T.R. En ocasiones son hasta seis intentos de colocar tapones en el pozo descubierto donde el sistema de lodo ha sido tratado con excesiva cantidad de reactivo, antes de poder obtener un tapón adecuado.

En pozos que se taponaron por abandono y que fueron reincorporados años después, se ha encontrado que cada uno de estos tapones están exactamente en el lugar registrado por los datos de perforación, para saber la posición y condición de un tapón se hace una verificación con la tubería de perforación, es decir, tocando o aplicando peso al tapón con la misma.

II.4.1 Uso de los tapones de cemento

Abandono. Para sellar determinados intervalos de un pozo seco o de un pozo agotado, un tapón de cemento colocado a la profundidad requerida ayuda a prevenir comunicación de zonas y cualquier migración de fluidos que pueda infiltrar fuentes de agua subterráneas. Se deben consultar los reglamentos locales sobre operaciones de taponamiento para abandono de pozos.

Aislamiento de Zona. Una de las razones más comunes para taponar es el de aislar una zona específica. El propósito es el de controlar el agua, para reacondicionar una zona de profundidad menor o el de proteger una zona de baja presión, en un pozo cuya longitud de perforación descubierta requiera de una recementación. En un pozo que tiene dos o más intervalos productores; es en ciertas ocasiones benéfico el abandonar una zona agotada o una zona con bajo rendimiento de producción, colocando un tapón permanente de cemento para aislar ésta zona, ayudando así a prevenir posibles pérdidas de producción por la migración de fluidos de otro intervalo.

Perforación Orientada. Al desviar una perforación alrededor de un pescado no recuperable (tal como una columna de perforación pegada o rota), es necesario colocar el tapón de cemento a la profundidad requerida para ayudar a soportar a la herramienta desviadora y poder dirigir la barrena a la dirección deseada. Este tipo de tapón es usado para cambiar las direcciones de la perforación, perforación de un pozo de alivio, perforación en domos salinos y perforación hacia cualquier otro objetivo inaccesible.

Control de Pérdida de Circulación. Cuando la circulación del lodo se pierde durante la perforación, algunas veces es posible restaurar el retorno del fluido localizando la zona de pérdida de circulación y colocando un tapón de cemento. Si se adiciona a la lechada material fibroso y/o aditivos de control de pérdida de circulación, se reduce el problema de la desintegración del cemento residual conforme se perfora el tapón de cemento al reanudarse las operaciones, asegurando mayor éxito en el trabajo.

Pruebas de Formación. Los tapones de cemento son generalmente colocados en la perforación del pozo, pero también se colocan cuando se descubre una zona que se quiera probar y que se encuentra a una distancia considerable del fondo, donde no es posible o práctico colocar un tapón puente. Los tapones de cemento deben ser de

suficiente volumen para que no migre dentro de la formación cuando se les apliquen cargas anormales.

II.4.2 Colocación del tapón

Al colocar un tapón de cemento en un agujero descubierto, se debe considerar cuidadosamente el tipo de formación a través de la que se va a colocar. Con los siguientes cuidados, se pueden evitar muchos problemas:

- ◆ Seleccionar, con la ayuda de un registro calibrador, el diámetro de la sección
- ◆ Calcular cuidadosamente el cemento, agua y volúmenes de desplazamiento, planeando el usar un exceso de cemento
- ◆ Utilizar un cemento densificado (clase A, G o H) que tolerase una contaminación del lodo
- ◆ Preceder el cemento con suficiente fluido lavador
- ◆ Girar la tubería mientras se coloca el tapón, usando en el tubo final centradores y raspadores
- ◆ En el extremo inferior del tubo final pueden efectuársele perforaciones desfasadas a 90° con el objeto de que durante la circulación remueva el enjarre de lodo
- ◆ La tubería de perforación deberá extraerse lentamente del tapón, para reducir la contaminación de lodo en la parte superior

Para una mejor adherencia, se debe seleccionar una formación compacta y limpia, especialmente en casos de zonas que deban de aislarse o abandonarse. En perforación orientada debe elegirse una formación que se pueda perforar después de colocado el tapón, en una zona dura puede significar que al perforar el tapón de cemento vuelva a caerse en el pozo anterior. En pruebas de formación con tubería de perforación o al colocar tapones de fondo para excluir el agua u otros fluidos de pozo, el cemento deberá ser colocado en la zona del intervalo y cubrir hasta una formación compacta o impermeable. Al taponar pozos para abandono, se debe colocar un tapón en o debajo de la zona productora de agua y otro en la parte superior de la tubería superficial. Es conveniente el tener datos de un registro de calibración para una adecuada ubicación de colocación del tapón.

Sistema del Lodo. Antes de que se coloque un tapón de cemento, deben estudiarse el lodo y sus propiedades. Algunos de estos lodos no generan características de tixotropía (gel) en contacto con el cemento y por lo tanto permiten que la lechada, que es de mayor densidad se asiente o resbale hacia el fondo del pozo.

Con sistemas de lodo base agua, un esfuerzo gel mayor tiene lugar en la interfase con el cemento. Para obtener una buena adherencia entre el tapón y la formación, debe removerse el enjarre de lodo.

Estudios⁽⁶⁾ sobre tapones muestran que el sistema de lodo base agua debe tener una viscosidad Marsh de 45 a 80 segundos, una viscosidad plástica de 12 a 20 cp., un punto cedente menor de 5 lb/100 pies², y una pérdida de filtrado menor de 15 cc. En algunas áreas es conveniente el uso de baches para problemas de contaminación lodo/cemento, entre el tapón de cemento, mezclando bentonita, agua y material densificante (barita). La mayoría de los tapones deben de colocarse por el método de balanceo y es importante que el lodo sea circulado el tiempo suficiente para asegurar que todo el sistema tenga peso uniforme. De otra manera, la lechada de cemento puede quedar desbalanceada y el tapón puede no ser colocado a la profundidad deseada o puede resultar contaminado por el lodo.

Volumen de Cemento y Diseño de la Lechada. La cantidad de cemento para un trabajo en particular es controlada por la longitud del tapón y el diámetro del pozo (casos especiales especifican la longitud del tapón legalmente requerida para dejarse en una perforación abandonada). En otros casos, de 10 a 20 sacos pueden ser suficientes para sellar el agua en el fondo del pozo. Por otro lado, en perforación orientada puede ser necesario que el tapón cubra una longitud de 75 m, lo que pudiese originar el empleo de 125 a 150 sacos, según el diámetro del pozo. Mayores cantidades de cemento mejorarán las probabilidades de éxito cuando una perforación deba ser desviada.

Cuando los tapones son colocados con una tubería de perforación o de producción, deberán usarse los fluidos espaciadores antes y después de la lechada para reducir la contaminación de cemento y lodo. El agua es hasta ahora el fluido espaciador de uso común, aún cuando el aceite estabilizado o diesel y mezclas de agua y bentonita también son empleadas.

La selección de composición de cemento para un tapón de cemento dependerá de la profundidad y diámetro del agujero, temperatura y propiedades del lodo. Por ejemplo, para un tapón de 100 sacos de cemento, el tiempo de colocación en un pozo de aproximadamente 5000 m es de 40 minutos.

Ya que la contaminación de lodo causada por retardación y dilución es siempre una posibilidad en la colocación de tapones, cementos densificados o con una relación de agua reducida producen generalmente resultados con mayor éxito.

II.5 TÉCNICAS DE COLOCACIÓN DE TAPONES⁽²⁾

II.5.1 Método por balanceo

Este método implica bombear una cantidad deseada de cemento a través de la tubería empleada hasta que el nivel del cemento exterior sea igual al nivel dentro de la tubería. En ese momento se jala lentamente la tubería, dejando el tapón en su lugar. El método es simple y no requiere equipo especial fuera de la unidad de servicio de cementación.

Las características del lodo son muy importantes en el equilibrio de un tapón de cemento en el pozo, especialmente la habilidad de obtener una circulación libre durante la misma. Cuando el propósito de un tapón es el de controlar la pérdida de circulación, el tapón se diseña, de manera que cuando llegue a la zona de pérdida éste fragüe y selle la zona.

Los movimientos de los fluidos del pozo pueden afectar la calidad del tapón, cuando el tapón de cemento está siendo colocado. Aún una pequeña cantidad de gas migrando lentamente a través del tapón de cemento puede dañarlo lo suficiente como para evitar que fragüe.

En algunas áreas existen flujos artesianos que tienden a desplazar el tapón de cemento hacia la superficie del pozo o lavarlo. Es necesario, por lo tanto, tener cuidado para asegurarse que el pozo ésta en estado estático (ni ganando ni perdiendo fluido). La cantidad de lodo, baches de lavado y cemento deben ser cuidadosamente calculados para asegurar volúmenes de fluido que permanezcan en equilibrio tanto adelante como atrás del tapón de cemento.

II.5.2 Prueba de taponos de cemento

No existe ningún método sencillo para probar taponos. En una gran mayoría existe la práctica errónea de no verificar el estado de los taponos para abandono o el sello de agua en el fondo. Los taponos colocados para controlar la pérdida de circulación o para asentamiento de una herramienta de desviación, son probados determinando la dureza del tapón. La práctica común es de bajar tubería de perforación, lastra barrenas y barrena, aplicar peso sobre la cima del tapón, habiendo probado previamente la velocidad de penetración en aproximadamente 5 o 7 metros.

Este método es generalmente usado después de permitir que el tapón tenga un tiempo de fraguado de 12 a 24 horas. Aún cuando no siempre es satisfactorio, al menos da alguna indicación sobre si se ha logrado algún grado de taponamiento en el lugar deseado. Un tapón puede estar duro en la parte superior, pero suave más abajo, por lo que con el tiempo los fluidos pueden migrar a través de él.

Tiempos normales de fraguado pueden ser de 12 a 36 horas, sin embargo, con el uso de cementos densificados y aceleradores se puede lograr un tapón de considerable consistencia de entre 8 a 18 horas. Cuando las temperaturas son superiores a 230 °F, el polvo de sílice funciona como agente estabilizador y como un catalizador para producir taponos de cemento de alta resistencia en un tiempo mínimo después de su colocación.

Existe un método que podría incrementar enormemente las posibilidades de obtener buenos taponos de cemento a las profundidades deseadas, éste método utiliza una herramienta desviadora y una columna espaciadora de lodo bentonítico. La figura II.3 muestra la forma correcta utilizando herramienta desviadora para colocar la columna de lodo bentonítico y la lechada de cemento.

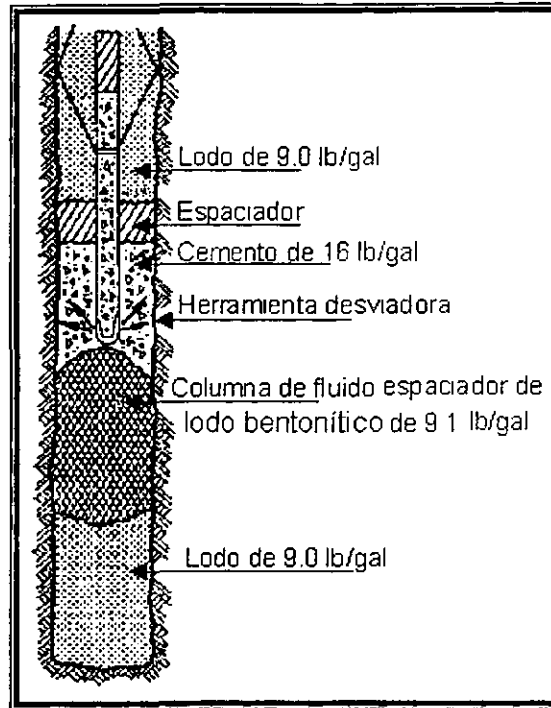


Fig. II.3. Método recomendado para un buen taponamiento.⁽²⁾

Las operaciones de taponamiento deben ser cuidadosamente planeadas, dándole énfasis a la colocación, volumen de cemento, irregularidades del diámetro de pozo y errores en la medición de la tubería, así como a los volúmenes calculados de cemento a ser colocados en la perforación.

II.6 PROBLEMAS O CAUSAS ASOCIADOS A UNA MALA CEMENTACIÓN

Las causas de una cementación inadecuada pueden clasificarse en dos grandes categorías:

1.-Sistemas mecánicos deficientes al bombear la lechada

Estos son: centralización deficiente de la tubería, agujero derrumbado, bache de limpieza inadecuado, presiones locales excesivas. Las consecuencias son el desplazamiento incompleto del todo o la pérdida de lechada dentro de la formación.

2.-Degradación de la calidad del cemento durante el fraguado

Generalmente se da muy poca importancia al fenómeno de presión durante el fraguado. Pero ahora se sabe que una diferencia entre la presión que ejerce el cemento en el

pozo y la presión de formación es la causa de muchos desperfectos en la cementación. La consecuencia de una presión no controlada durante el fraguado es la degradación de la calidad del cemento debido a la pérdida de agua y la absorción del fluido de la formación.⁽¹⁶⁾

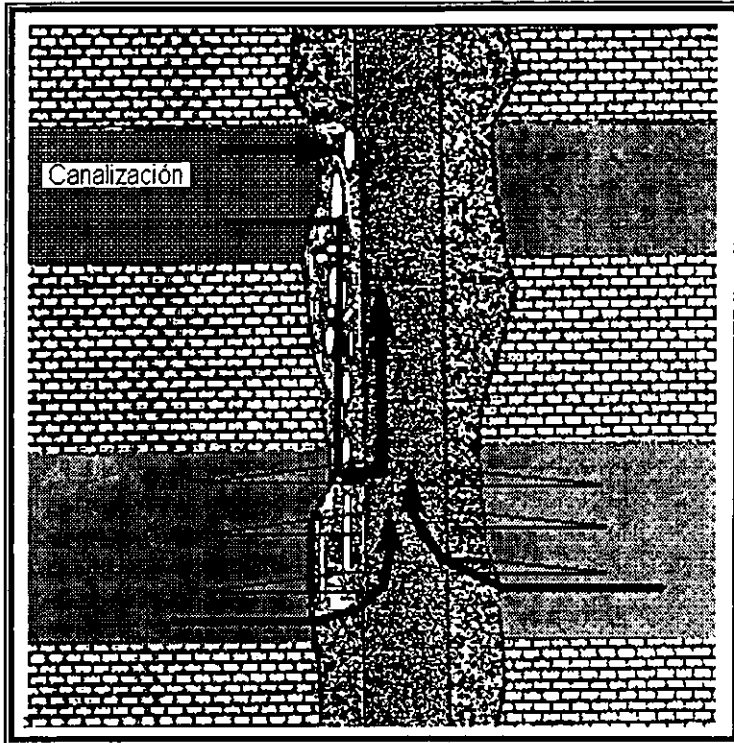


Fig.II.4. Ejemplo de una mala cementación.⁽¹⁹⁾

La aparición de operaciones de cementación sofisticadas y costosas hizo necesarias técnicas que validaran en el mismo pozo tanto los procedimientos como los productos químicos utilizados.

Además la mala adherencia entre el cemento y la tubería de revestimiento o la formación puede crear un espacio que posibilita la comunicación de zonas. Este espacio es conocido como microanillo y, aunque normalmente no sea motivo de preocupación en pozos de petróleo, en los pozos de gas podría causar la comunicación entre distintas formaciones. En la figura II. 4 se observa el resultado de una mala cementación.

El cemento es un material que encoge con el tiempo, este encogimiento (o contracción química) podría ocasionar una separación. Residuos de petróleo o fluido de perforación

base aceite pueden crear una película en la cara de la formación, impidiendo la adherencia del cemento. Por último, formaciones muy débiles o poco consolidadas pueden dejar abierto un espacio por detrás de la tubería de revestimiento. Es por eso que en la actualidad se están estudiando y probando lechadas especialmente diseñadas para ser utilizadas en estos casos, es decir, lechadas que tengan grado de contracción mucho menor que los cementos convencionales.

II.7 MIGRACIÓN DE GAS ^{(17), (18), (19)}

II.7.1 Causas de la migración de gas

La causa más simple de migración de gas (o de cualquier otro fluido de la formación) es por descontrol hidrostático, cuando la presión de la formación es superior a la presión de fondo.

En formaciones muy someras, la presión hidrostática puede ser insuficiente para controlar el gas. Casi siempre la presencia del gas en estas formaciones no es debido a un proceso natural de migración de fluido y sí por un proceso inducido. Por ejemplo, pozos que se han estado produciendo a profundidades someras durante muchos años, ha presentado acumulación de gas debido a pequeñas filtraciones y comunicaciones subterráneas entre formaciones.

Uno de los más probables motivos de migración de gas es la mala remoción del lodo durante la cementación del revestimiento. La existencia de canales o huecos llenos con lodo viscoso (que será fácilmente desplazado por el gas) es quizá la principal razón de problemas de migración de gas. También pueden ocurrir cuando el lodo se contacta al cemento, formando una masa muy viscosa y sin las características de fraguado y resistencia a la compresión del cemento original⁽¹⁹⁾.

La existencia de una retorta muy espesa en la fase de la formación es otro motivo de problema, ya que ésta retorta después servirá como un canal para la migración de fluidos.

Existen dos puntos muy importantes a ser considerados:

- La migración de gas no necesita alcanzar la superficie, muchas veces ocurre lo que llamamos "reventón subterráneo", el cual puede del mismo modo traer resultados catastróficos. En la mayoría de los casos, la migración de gas interzonal no es tan violenta, por lo tanto no llega a ser identificada sino hasta mucho tiempo después.
- Muchas veces la causa de la migración no es lo suficiente para una migración violenta al punto de transformarse en un reventón, pero puede ser lo suficiente para significar la pérdida de volúmenes muy elevados de gas hacia otras formaciones. En otras palabras, una pequeña canalización no será una tragedia pero puede representar la pérdida de un volumen apreciable de gas con el correr del tiempo.

Otra de las causas de migración de gas es el deterioro de la integridad física del cemento. El contacto de sulfatos con el aluminato tricálcico (C_3A) da como resultado la formación de sulfoaluminato de calcio, que viene a ser un mineral que ocupa un espacio mayor que el ocupado por el C_3A . Esto ocasiona un crecimiento de un componente del cemento fraguado, ocasionando grietas y fisuras, llevando a la completa desintegración del cemento.

Fisuras pueden ser también el resultado de los esfuerzos tectónicos aplicados por formaciones muy activas, llevando al rompimiento del bloque de cemento, en la figura II.5 se puede observar una de las causas de la migración.

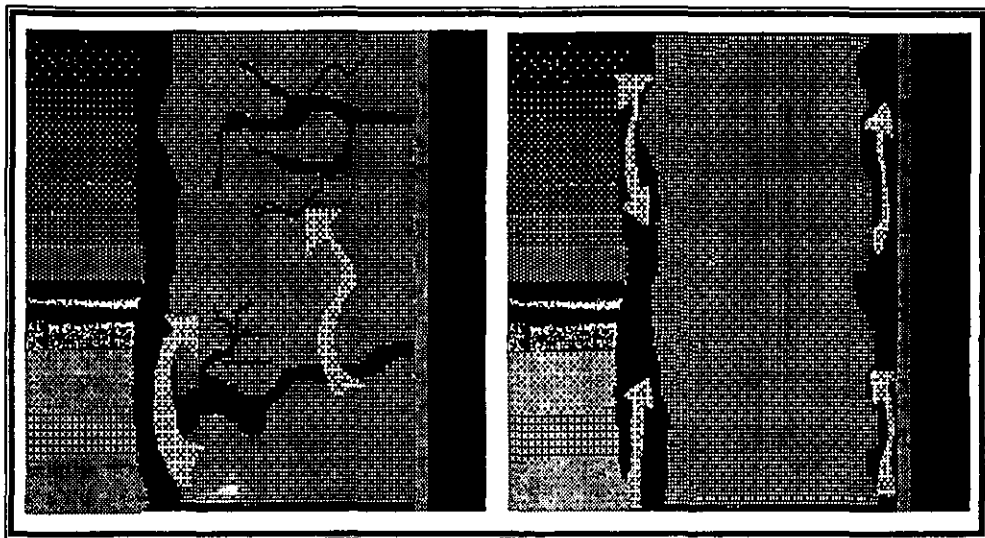


Fig. II.5. causas de la migración de gas⁽¹⁹⁾

La deshidratación de la lechada cuando pasa por una formación muy permeable, puede tornarla muy pastosa, quitándole fluidez. Al viscosificarse, la lechada ayuda a restringir aún más el espacio anular, incrementando las presiones y forzando más aún el cemento contra la formación. Este proceso continua hasta un taponamiento total del espacio anular (que puede llevar a fractura en formaciones débiles) o hasta que la lechada se quede muy gelificada. Una lechada gelificada no se comporta como un líquido verdadero, que transmite la presión hidrostática en el fondo. Al contrario, se torna autosoportante y la presión de fondo frente a la formación se reduce.

La pérdida de filtrado durante el bombeo significa el aumento de la densidad y la reducción del volumen de la lechada. En casos extremos este puede llevar al desbalanceo de las presiones de fondo. El mismo efecto puede ocurrir cuando la lechada este en condiciones estáticas, o sea, después de terminar la operación. El filtrado recomendado para una lechada debe ser inferior a 50 ml/30 min (API).

Lechadas de alta porosidad y/o permeabilidad son lechadas con grandes volúmenes de agua, como las extendidas con silicato o bentonita. La matriz del cemento esta compuesta por sólidos dispersos en un volumen muy elevado de agua, lo que facilita la propagación del gas cuando penetra por la misma. Esto ocurre especialmente en las lechadas extendidas con bentonita ya que la misma proporciona un cierto grado de gelificación a la lechada.

Las lechadas extendidas (o con menor volumen de cemento) normalmente tienen un valor muy bajo de desarrollo de la resistencia a la compresión. El tiempo tomado entre los 30 y 70 unidades Bearden de consistencia (medido en el consistometro) es muy elevado. Esto significa que habrá más tiempo para que el gas fluya por la matriz del cemento, especialmente cuando éste se encuentre en su fase inicial de proceso de fraguado.

Por esta razón se dice que lo ideal es tener una lechada con fraguado en ángulo recto, ya que el tiempo entre la lechada líquida y el fraguado (pero con tal consistencia que no permitirá más la migración de gas) será muy corto.

Anteriormente se mencionó que la mala remoción del lodo durante la cementación es la principal causa de la migración de gas, por lo que se recomienda acondicionar bien el lodo antes de cementar, para que la remoción sea más eficiente. Cuando se termina la fase de perforación, el lodo no requiere más de un alto punto de cedencia ya que no hay mucho más sólidos que sostener. Al contrario, un alto punto cedencia va a dificultar la cementación, ya que será mucho más difícil poner el fluido en movimiento en las secciones descentralizadas. Una buena centralización de la T.R facilitará la remoción del lodo. Es muy importante resaltar que muchos consideran los centralizadores un estorbo a la bajada de la tubería, sin embargo, el costo de reparación de una tubería mal cementada (sin contar los problemas que esto ocasionaría), comparada con una tubería bien centralizada, hace que ésta última sea una condición imprescindible del éxito de la cementación.

Mover la tubería durante la cementación es otro factor que mejora la remoción de lodo. La reciprocación permite cambiar los esfuerzos de tensión a compresión lo que optimiza el perfil de centralización. La rotación ayuda en la remoción del lodo estático en las áreas más angostas de la tubería. Por supuesto que la selección apropiada de los regímenes de flujo y de los lavadores y espaciadores a utilizar es otro factor muy importante.

Otra causa es la canalización ocasionada por agua libre. Por supuesto que el mayor peligro esta en los pozos inclinados u horizontales, sin embargo el mismo fenómeno puede ocurrir en pozos verticales.

La estabilidad de la lechada pasa entonces a ser muy importante, especialmente si está dentro de las áreas críticas de densidad (lechadas extendidas o densificadas). Aditivos especiales son utilizados para eliminar la decantación de los componentes de la lechada.

II.7.2 Consecuencias de la migración de gas⁽¹⁹⁾

Se pueden tener consecuencias económicas, técnicas y en el medio ambiente.

Económicas

La principal consecuencia es que se perderá parte o totalmente la producción de los hidrocarburos. Esto sin hablar de la pérdida del pozo o del equipo de perforación o terminación. Se puede considerar también la pérdida de fluidos de tratamiento de estimulación inyectados en otras formaciones. El costo de la reparación tiene que ser considerado, ya que es un trabajo muy difícil y requiere de varios días, además hay que considerar el costo de equipos de fondo o de superficie dañados.

Técnicas

El desvío de los fluidos de estimulación hacia otras zonas hacen que la eficiencia de ésta operación sea muy limitada si no hay aislamiento hidráulico entre las formaciones. La pérdida de una parte del gas del yacimiento tendrá un impacto directo en el sistema productor, reduciendo la presión de fondo y requiriendo de un método de levantamiento artificial.

Seguridad y Medio Ambiente

El medio ambiente es en la actualidad uno de los temas más importantes de la industria petrolera. Un reventón es un acontecimiento extremadamente peligroso. La contaminación de acuíferos someros (la fuente de agua potable de muchas regiones) es otro factor a ser tomado en cuenta (especialmente porque la migración de gas puede ser totalmente subterránea, sin que sea observada en superficie). Lo mismo ocurre con la re-presurización de zonas ya abandonadas, esto puede llevar a presiones por encima de las utilizadas para el diseño de las tuberías y equipos de superficie.

II.7.3 Mecanismos de flujo del gas

Existen tres mecanismos de flujo del gas: Micropercolación, burbujas y fractura⁽¹⁹⁾.

Uno de los mecanismos de flujo de gas estudiados es la invasión del gas por entre la estructura aún líquida (aunque en proceso de fraguado) del cemento, el gas penetra lentamente por la matriz del cemento. Esto ocurre cuando la presión hidrostática de la columna empieza a aproximarse a la presión de la formación. El gas percola por entre la matriz del cemento, desplazando el agua intersticial entre los poros, así el gas no rompe la estructura del cemento, pero la invade. Esto es llamado Micropercolación.

Existen algunas teorías que el gas percola por entre la matriz del cemento cuando la lechada empieza a gelificarse, el tamaño de las burbujas depende del espacio poral de las lechadas, mayores burbujas ocurren en lechadas extendidas, de alta porosidad. En este proceso el gas fluye como burbujas, abriendo camino por entre el cemento

gelificado. Esta teoría dice que tal migración será interrumpida si la fuerza gel de la lechada es extremadamente alta y con desarrollo muy rápido.

Algunas compañías recomiendan lechadas de alto gel, con características tixotrópicas. Aunque se han reportado varios casos de éxito con tales diseños, se considera que el uso de una lechada tixotrópica es negativo tanto desde el punto de vista de remoción del lodo como del propio control del pozo, ya que son lechadas de difícil control de filtrado y de alta presión de fricción. Por otra parte, si el gel no logra alcanzar rápidamente el valor requerido (mayor que 500 lb/100 pie²), el gas podrá migrar por el propio cemento.

Fractura. La fuerza del flujo de gas rompe la estructura del cemento, normalmente ocurre encima de la zona de gas. Esta fractura puede ser ocasionado por encogimiento excesivo de la lechada.

II.7.4 Métodos para controlar la migración de gas

II.7.4.1 Mejorar las prácticas de cementación

El primer paso para controlar la migración de gas es adoptar las técnicas más efectivas para la cementación. La centralización de la tubería de revestimiento es una de las más importantes, ya que las canalizaciones del lodo en el espacio anular servirán como medio para el flujo de gas. El lodo debe ser acondicionado para ser fácilmente removido.

Mover la tubería, tanto rotando como reciprocando, es una manera de mejorar el perfil de flujo en el espacio anular. La reciprocación permite cambiar los esfuerzos de tensión a compresión, lo que hará modificar el esfuerzo aplicado a los centralizadores, mejorando la circulación en el espacio anular. La rotación posibilita el contacto de los lavadores y espaciadores contra secciones del espacio anular donde el lodo estaba estático.

Los regímenes de flujo deben ser bien diseñados. Es muy difícil, por ejemplo, cementar con flujo turbulento un pozo con un agujero muy ensanchado, debido a la dificultad en lograr alcanzar los caudales de desplazamiento requeridos. Si la turbulencia no puede ser alcanzada, entonces la opción es el flujo laminar efectivo. Después de seleccionar el régimen de flujo, se deben diseñar los fluidos lavadores y espaciadores adecuados a tal modelo de flujo^{(17), (18)}.

Además se tienen que controlar bien las propiedades de las lechadas. El filtrado es quizás el más importante, pero todos los otros factores también deben ser muy bien diseñados. Para los pozos desviados u horizontales, el agua libre es de vital importancia.

Varias propiedades de las lechadas son controladas para optimizar al máximo el control de la migración de gas. El aumento de la densidad del agua de mezcla es una manera

de que se incremente la presión poral, lo que será útil durante el proceso de gelificación de la lechada.

II.7.4.2 Métodos Físicos^{(18), (19)}

La aplicación de presión en el espacio anular tiene como objetivo incrementar la hidrostática en el fondo. Es una técnica de dudosa eficiencia, ya que durante la gelificación del cemento no habrá transmisión de presión hidrostática hacia abajo. Sin embargo, la presión de la lechada será más elevada, lo que de algún modo podría ayudar a controlar la presión de formación. Puede fracturar las formaciones si la presión es muy elevada o la formación muy débil. Puede también forzar demasiado la lechada contra la formación, esto la dañaría.

La cementación en múltiples etapas es utilizada para colocar una lechada de fraguado rápido arriba de la lechada principal, que estará en contacto con la formación productora de gas. El objetivo es tener un cemento fraguado encima de la formación de gas, para asegurar que el mismo no fluya hasta la superficie.

Reducir la columna de cemento tiene como objetivo mantener al máximo un volumen de fluido líquido en el espacio anular (ejerciendo presión hidrostática constante). Nuevamente, durante el proceso de gelificación el cemento no transmitirá hacia abajo la hidrostática del lodo arriba, lo que limita la eficiencia de ésta técnica.

Casing Seal Ring. Son anillos de goma instalados en el espacio anular. Los elastómeros se abren cuando hay una tendencia de flujo de gas, ayudando a atrapar al máximo hasta que el cemento frague. Su efectividad es muy limitada ya que se pueden dañar durante la circulación y bombeo, especialmente si el régimen de flujo es turbulento.

External Casing Packers (ECP, empaques externos de T.R) son tuberías de revestimiento especialmente diseñados con empaques rellenos con lodo en su exterior. Son normalmente instalados una o dos juntas arriba de la cima de la formación con gas. Durante la presurización del tapón de desplazamiento, las gomas se inflan con el lodo. El objetivo es crear un sello en el espacio anular para impedir el paso de gas hacia arriba.

La confiabilidad de los ECP han mejorado mucho en los últimos años, sin embargo todavía no son 100% efectivos. En primer lugar, las gomas pueden dañarse durante la bajada de la tubería. Las formaciones deben ser consolidadas y el agujero bien calibrado, de lo contrario el sello será afectado.

Cemento Compresible. Los cementos compresibles son diseñados para mantener la presión poral del sistema por encima de la presión de la formación hasta que el cemento fragüe. Teóricamente, esto previene la migración de gas desde la formación. Como las lechadas convencionales tienen muy baja compresibilidad, cualquier pérdida de volumen por menor que sea resultará en una pérdida de presión aplicada en el espacio anular. Agregando gas a la lechada estaremos creando un sistema

compresible, menos propenso a reducciones drásticas de presión poral (la reducción de volumen de los componentes líquidos es contrarrestada por la compresibilidad del gas).

Hay dos tipos de lechadas compresibles: Generadora de gas y Cemento espumado.

Generadora de gas. Aditivos especiales son agregados al cemento (compuestos de aluminio o magnesio), los cuales reaccionarán produciendo gas hidrógeno. Este gas mantendrá la presión poral constante en el fondo del pozo. Aún así es importante que tales lechadas tengan un buen control de filtrado y propiedades reológicas para combatir la invasión del gas. La dificultad en el control del sistema es debido que el gas debe ser generado después de que la lechada haya sido colocada en frente de la formación. Por supuesto, hay peligro de que el gas generado facilite aún más la migración de gas en lugar de evitarla.

Cemento Espumado. Un gas inerte (normalmente nitrógeno) es agregado a la lechada y al pasar por un generador de espuma, se crea una lechada con espuma estabilizada. A pesar de ser una buena técnica, el cemento espumado es normalmente utilizado en aplicaciones de bajos gradientes de fractura o zonas de pérdida. Y con respecto a otras técnicas ésta resulta muy costosa, requiriendo de más equipos y personal altamente capacitado.

Ambos casos son limitados a pozos someros, ya que en pozos muy profundos la compresibilidad del sistema es reducida⁽¹⁹⁾.

Fraguado de Angulo Recto. Lechadas con fraguado de ángulo recto (Right Angle Set, RAS) son sistemas bien dispersos que no presentan ninguna tendencia a gelificarse pero que fraguan rápidamente debido a una cinética de hidratación muy acelerada. Esto permite que la lechada quede en estado líquido durante casi todo el proceso y el tiempo crítico (entre los 30 y 70 unidades de consistencia) es muy reducido.

Otra característica de la lechada de cemento RAS es el desarrollo de una matriz muy poco permeable, lo que ayuda a contener el gas. El incremento de la consistencia es muy rápido y normalmente está asociado a una reacción exotérmica del cemento.

Cuando la temperatura de circulación en el fondo (BHCT) es inferior a 250 °F no es fácil lograr una lechada RAS. Son lechadas relativamente sensibles a los efectos de algunos aditivos (por ejemplo, los reductores de filtrado y dispersantes, que podrían resultar en retardación o dilatación del tiempo crítico). Uno de los factores más negativos en éstas lechadas es que normalmente presentan un encogimiento (contracción química) muy grande.

Cemento Expansible. Los cementos expansivos han sido utilizados para controlar la migración de gas. Son efectivos cuando la migración ocurre por espacios muy pequeños, como el microanillo.

Hay dos técnicas utilizadas:

- Crecimiento de cristales. La Etringita (una forma altamente hidratada de Sulfoaluminato de Calcio) es formada con la reacción de sulfato de calcio con las fases aluminatos. Se observa una expansión lineal de 0.2 a 0.3%. Otros compuestos pueden ocasionar expansión
- Generación de gas. Similar a los cementos compresibles, sólo con la reducción de los compuestos reactivos (base aluminio y magnesio).

Una expansión controlada ayuda a sellar pequeños espacios entre el cemento y la formación o la tubería de revestimiento. Una limitación será que la expansión será insuficiente para cerrar canales grandes. Habrá un límite en la cantidad de expansión del cemento (aproximadamente 1%), una vez sobrepasado este porcentaje comprometerá otras características del mismo.

El problema de la expansión es que ocurre después del fraguado del cemento. Esto puede ser muy tarde para controlar la migración de gas.

Aún con la expansión de su volumen, también los cementos expansivos exhiben el comportamiento de contracción química interna, esto resulta en un cemento de mayor porosidad, por lo tanto más permeable.

Cemento Tixotrópico. Una lechada tixotrópica puede evitar la migración macroscópica de gas. Al ofrecer resistencia a la deformación física y a la percolación de las burbujas de gas, éste tipo de lechadas puede frenar la migración de gas hasta que el cemento este completamente fraguado, ya que una fuerte gelificación mantiene las partículas fuertemente unidas, para que el gas no logre romper el gel y percolar. Sin embargo esta gelificación tiene que ocurrir rápidamente, de tal modo, que el tiempo en que la lechada quede semi-sólida sea mínimo, ya que mayor tiempo podría permitir la entrada de gas. La fuerza que desarrolla el gel es del orden de 50 a 500 lb/100 pie².

Es muy importante resaltar que este proceso no impide la micropercolación de gas (que es la entrada de gas en forma microscópica por entre los poros de la lechada). Como muchas de las formaciones productoras de gas son de baja permeabilidad, es lógico suponer que las burbujas que salen son muy pequeñas, lo que facilitará la percolación microscópica.

Hay dos procesos de creación de la lechada tixotrópica:

1.- La creación de una estructura micro-cristalina o micro-gelatinosa compuesta de minerales hidratados a lo largo de la lechada, las cuales soportarán el grueso de los sólidos de cemento por atracción mecánica o electrostática. Se forma el mineral Etringita cuando se agrega D53 o D111 al cemento. La cadena de etringita interconectada da la propiedad tixotrópica al cemento.

2.- Polímeros disueltos en el agua intersticial que son reticulados por reacciones químicas, originando un gel extremadamente viscoso y auto-soportante.

El control de filtrado de lechadas tixotrópicas es muy difícil, lo que crea la posibilidad de deshidratación prematura, creando un taponamiento en frente del intervalo.

Estos sistemas son normalmente utilizados para formaciones someras.

Cemento Tenso-Activo. Es la formación de una espuma estable en la lechada de cemento, el agente espumante es agregado a la lechada y bombeado al pozo. Cuando el gas intenta percolar por el sistema, provocará la formación de espuma.

Una limitación es que el sistema funciona sólo si hay presencia de agua intersticial en el momento que el gas entra en la matriz del cemento. Por lo tanto, si hay una pérdida de filtrado muy fuerte o si la percolación del gas se da en los momentos más tarde de la hidratación del cemento, el sistema puede no funcionar. Para reducir este problema, se agrega surfactante a los lavadores y espaciadores, para que sean inyectados en la formación formando una película en la cara de la formación.

No es una técnica utilizada regularmente, a pesar de que es relativamente barato y simple.

II.7.4.3 Técnicas Especiales⁽¹⁹⁾

La técnica conocida como Sandwich Squeeze fue desarrollada en Canada para controlar la migración de gas en pozos someros. Utiliza un pequeño volumen de lechada con fraguado en ángulo recto (o de fraguado más rápido) seguida de una lechada con bajo filtrado. Es necesario tener una buena idea de las condiciones del caliper para poder calcular bien los volúmenes y el posicionamiento de cada lechada en el agujero.

Los procedimientos de acondicionamiento del lodo, centralización, remoción de lodo, etc, son los mismos para una operación normal. Después se bombea la lechada de fraguado en ángulo recto, con un volumen equivalente a 50 metros en el espacio anular (o de la superficie hasta la cima de la formación de gas). Esta lechada debe tener un tiempo crítico (o de transición) muy corto (de 5 a 10 minutos) y buena reología y filtrado, debe ser mezclada con surfactante.

Inmediatamente se bombea la lechada que se queda enfrente de la formación de gas, con buen filtrado, tiempo de espaciamiento más largo y baja fuerza gel. En algunos casos se agrega surfactante a la lechada. Se libera el tapón superior de desplazamiento, desplazándolo hasta una o dos juntas por encima del collar. Se deja el pozo en reposo algunos minutos hasta que la lechada de cemento RAS empiece a fraguar. Después se vuelve a desplazar lentamente, forzando la lechada hasta topar con el tapón o la presión se incrementa demasiado.

El éxito de la técnica se debe a la combinación de tres factores:

- Fraguado rápido de la lechada RAS, que rápidamente adquiere consistencia e impide la migración de gas hasta la superficie
- Forzamiento de la lechada contra la formación, mantiene una presión poral aplicada contra la formación de gas
- Surfactante en la lechada crea una espuma estable (si el gas empieza a fluir)

Lechadas Antimigratorias

Son lechadas que impiden el paso y el flujo de gas, dentro de las técnicas utilizadas están los polímeros, polímeros viscosificantes y la microsilica, que a continuación se describen brevemente:

Polímeros. Son utilizados para viscosificar el agua intersticial de la lechada de cemento, así estos dificultan el flujo del gas por entre los poros de la lechada. El concepto es similar al del control de filtrado y también tiene sus limitaciones (viscosificación excesiva de la lechada, retardación a baja temperatura y pérdida de efectividad a altas temperaturas).

La reducción de la porosidad del sistema no deja espacio para que fluya el gas. Se puede lograr con diversos aditivos, sin embargo, el más común es la microsilica.

Los aditivos formadores de película impermeable, forman, como el nombre lo indica, una película en los granos de cemento, de esta manera, cuando el gas empieza a fluir es atrapado por esta malla de polímeros interconectados.

Es muy importante observar el efecto que cada sistema tendrá sobre las propiedades de la lechada y el cemento fraguado tales como la reología, control de filtrado, tiempo de fraguado, durabilidad, resistencia a la compresión, etc.

Polímeros Viscosificantes. Son lechadas impermeables basado en polímeros gelificantes trabajan de un modo muy similar a los cementos tixotrópicos. Como la migración de gas en parte se da por la percolación por el agua intersticial (entre los granos del cemento), el objetivo es tener una lechada cuya fase acuosa sea un obstáculo al flujo. Esto se da por la viscosificación y reticulación (cross-link) del agua. Cuando el gas intenta fluir no logra penetrar por esta barrera, mientras el cemento sigue su proceso de gelificación y endurecimiento.

Muchas veces se agrega un material obturante con el propósito de llenar aún más los espacios vacíos de la lechada de cemento. Normalmente el material más utilizado es la microsilica.

El proceso tiene algunas complicaciones, en primer lugar la lechada resulta siempre con una viscosidad excesiva, debido a la gelificación de su agua de mezcla. Esto afecta

el bombeo, ya que las presiones serán más elevadas debido a la mayor fricción, remoción de lodo, etc.

Como cualquier aditivo gelificante, el efecto de la temperatura es alto, en pozos muy profundos la cantidad de gelificación requerida prácticamente torna el sistema imbombeable en superficie. El control del tiempo de activación del reticulador es otro punto clave: una activación prematura puede llevar a la pérdida de filtrado o de circulación, una activación por demás lenta puede permitir la lenta entrada de gas al sistema.

Microsilica. La microsilica fue inicialmente utilizado como extendedor. Estudios realizados indican que una lechada de baja porosidad reduce la permeabilidad (consecuentemente reduciendo o eliminando la migración de gas). Con granos promedios 100 veces menores que el cemento, las partículas de microsilica rellenan los espacios entre los granos del cemento, dando al agua intersticial un cierto grado de inamovilidad, dificultando el proceso de reemplazo de ésta agua por la entrada del gas. (la granulometría del cemento normalmente esta entre 1 y 100 micras, el promedio es de 20 a 30 micras, la granulometría de la microsilica esta entre 0.01 y 0.5 micras, el promedio es de 0.15 micras). Por lo que se puede decir, que en menor porosidad, se tiene como resultado menor permeabilidad, por lo tanto el gas no fluye por entre los poros del cemento.

Normalmente es utilizado en aplicaciones superficiales o pocas profundas. La microsilica es muy conocida por su alta reactividad a altas temperaturas, lo que la torna extremadamente difícil de retardar a estas temperaturas.

Existen dos formas de microsilica utilizadas:

Sólida. La microsilica sólida, es más económica sin embargo, presenta diversos problemas, dentro de las cuales tenemos la dificultad en su operación, ya que estas partículas son tan finas que no pueden ser bombeadas por los sistemas neumáticos comunes. Otro problema es con el personal, ya que estas partículas se mantienen en el aire cuando son agitadas, y esto conlleva a enfermedades graves, ocasionando daños a los pulmones.

Líquida. La microsilica líquida es una suspensión de partículas de microsilica en agua utilizando un surfactante especial para mantenerla en suspensión (la adición de microsilica sólida al agua sin éste surfactante resulta en una fuerte decantación).

CAPÍTULO III

REGISTROS GEOFÍSICOS

III.1 IMPORTANCIA DE LOS REGISTROS GEOFÍSICOS

Posterior a una cementación de tubería de revestimiento, se debe evaluar su adherencia entre las siguientes partes: tubería-cemento-formación, dado que se tiene la oportunidad de efectuar correcciones en caso de presentarse anomalías. Para ello, es indispensable obtener la suficiente información que refleje el estado final de la cementación, y esto es posible gracias a los Registros Geofísicos.

Hay que considerar que cada uno de los registros que se emplean para tal fin, tiene una función específica y que en conjunto proporcionan una mejor visión para correlacionar cualquier tipo de falla.

El registro de pozos de hidrocarburos implica la utilización de una cantidad de equipo especializado, tanto de superficie como de fondo. Dicho equipo ha ido evolucionando a través de los años, pasando desde las válvulas electrónicas hasta la utilización de computadoras.

Los registros geofísicos fueron introducidos a la industria petrolera hace más de medio siglo. Desde entonces muchos dispositivos de registros han sido desarrollados y puestos en actividad. Los registros geofísicos de pozos son técnicas que se utilizan para determinar casi de manera directa propiedades y parámetros físicos de las rocas. Tradicionalmente se les ha definido como "la representación digital o analógica de una propiedad física que se mide contra la profundidad".

En la actualidad se utilizan para determinar el contenido de hidrocarburos, agua, minerales, así como para localizar y analizar rocas arcillosas y con composición mineralógica compleja, entre otras. El uso de estos ha ayudado a comprender mejor las características del subsuelo.

Así los registros geofísicos de pozos son técnicas que se utilizan en pozos para la exploración y explotación petrolera, minera, geohidrológica, geotérmica y geotécnica. Sirven para determinar insitu propiedades físicas de las rocas. Se distinguen de otros métodos geofísicos porque dan un diagnóstico más confiable de las condiciones de las rocas que están en el subsuelo.

El mayor avance que han tenido es en el área petrolera, aunque actualmente se han difundido a varias áreas dada su confiabilidad y versatilidad. Son mucho más económicos que los núcleos; aparte de dar una información continua de todo el pozo, tienen un mayor radio de investigación. La aplicación de un conjunto de registros en cualquier área representa alrededor del 5 al 10% del costo de un pozo ya en operación.

La obtención de un registro se realiza a partir de una sonda que va recorriendo la trayectoria del pozo y de un equipo superficial que traduce la información enviada por la sonda a través de un cable que se registra en una cinta magnética o película fotográfica.

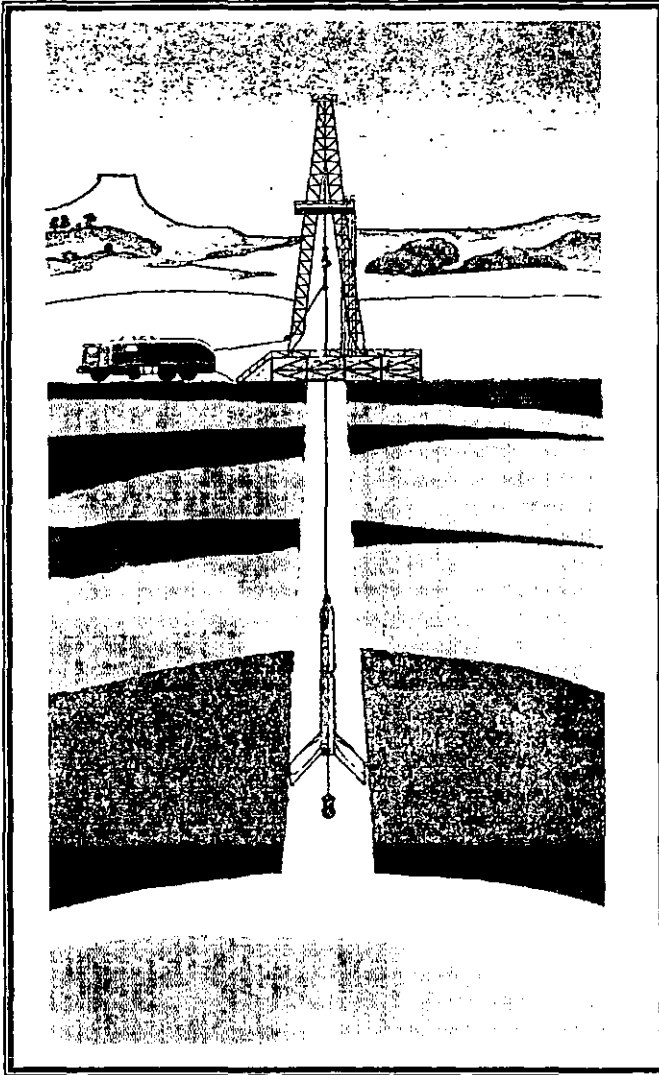


Fig.III.1. Toma de registros⁽²⁰⁾

Así como la especialidad de los registros geofísicos avanzó, el conocimiento de interpretar sus datos también lo hizo. En la actualidad el análisis detallado de un conjunto de servicios de cable cuidadosamente seleccionados proporcionan un método

para derivar o inferir valores exactos de la propiedad que se requiera, como: saturación del agua o hidrocarburos, la porosidad, el índice de permeabilidad, litología del yacimiento, así como para la evaluación de la calidad de los cementos en la industria petrolera, etc. Estos son parte de los conocimientos que el Ingeniero del área operativa, de diseño y de fluidos requiere para la interpretación de registros geofísicos⁽²⁰⁾.

El objetivo de la interpretación cuantitativa de los registros es proporcionar las ecuaciones y técnicas para que puedan efectuarse los cálculos requeridos para conocer los parámetros petrofísicos.

Los registros se toman desde una unidad de registros geofísicos, la cual transporta los equipos de fondo, el cable eléctrico y el winch para bajar los equipos de superficie necesarios y energizarlos, recibir y procesar sus señales, así como los sistemas necesarios para hacer una grabación permanente del registro.

La introducción de las computadoras dentro de los equipos de registro ha ayudado a agilizar el procesamiento de la información y dar un diagnóstico en el mismo pozo en muy poco tiempo. Una interpretación más a detalle se realiza en los centros de proceso que tienen las compañías de servicio en algunas ciudades, donde se hace un análisis en el que se puede llegar a determinar variaciones en las estructuras geológicas, arcillosidad de la formación, cantidad de dolomitización en una secuencia de carbonatos, etc. Con la información obtenida del análisis se pueden realizar mapas que ayudarán al geólogo en su interpretación de la geología del subsuelo.

Los registros eléctricos por cable (fig. III.1) se llevan a cabo desde un camión de registros, al que en ocasiones se llama "laboratorio móvil". El camión transporta los instrumentos de medición de fondo, el cable eléctrico y un malacate que se necesita para bajar los instrumentos por el pozo, así como el equipo de superficie necesario para alimentar las herramientas de fondo y para recibir y procesar sus señales y también el equipo necesario para efectuar una grabación permanente del registro.

III.1.1 Dispositivos de medición⁽¹⁶⁾

Dentro de los dispositivos de medición tenemos a la sonda, al cartucho eléctrico, la unidad de procesamiento (CSU), pantallas de vídeo, teclado-impresor y el sistema para transmisión-recepción los cuales se describen a continuación:

Sonda. Las sondas son cilindros de metal que tienen en su parte interior circuitos electrónicos muy sofisticados y varían de acuerdo a la propiedad que mide, a las necesidades de investigación, condiciones y profundidad del pozo.

La manera de medir las distintas propiedades de las rocas parte de un sistema básico común: un emisor (electrodo, bobina, emisor de radioactividad, emisor de neutrones, emisor de ondas acústicas) que envían una señal (corriente eléctrica, campo electromagnético, radioactividad, neutrones u ondas acústicas) hacia la formación. Uno o varios receptores miden la respuesta de la formación a cierta distancia del emisor.

Contiene los sensores para hacer la medición llamada sonda. El tipo de sensor depende de la naturaleza de la medición. Los sensores de resistividad usan electrodos o bobinas; los sensores acústicos usan transductores; los de radioactividad usan detectores sensibles a la radiación, etc, las fundas de las sondas pueden estar construidas de acero o fibra de vidrio.

Cartucho Eléctrico. Contiene los elementos electrónicos que alimentan a los sensores, que procesan las señales de medición resultantes y que transmiten las señales por el cable hacia el camión. El cartucho es un dispositivo independiente acoplado a la sonda constituyendo un sistema, el cual depende del espacio entre sensores y electrónica requeridos, así como del tipo de sensores. El cartucho puede ser un componente independiente que se atornilla a la sonda para formar así la herramienta completa, o bien puede combinarse con los sensores en una sola herramienta. Eso depende, desde luego, del espacio que requieren los sensores y las partes electrónicas, así como de los requerimientos de los sensores. La envoltura del cartucho es generalmente de acero.

Actualmente las herramientas son combinables, es decir pueden conectarse entre sí, para efectuar en un sólo viaje dentro del pozo diversos registros geofísicos. En otras palabras, las sondas y cartuchos de diversas herramientas pueden conectarse a fin de formar una sola herramienta y con ello realizar muchas mediciones y registros en una sola bajada y subida en el pozo.

La herramienta (o herramientas) se conecta a un cable eléctrico para bajarla y sacarla del pozo. La mayoría de los cables que se usan actualmente en los registros de agujero abierto contienen siete conductores de cobre aislados. Los nuevos cables incluyen conductores de fibra óptica en el centro de seis conductores de cobre. El cable se cubre con un armazón de acero para darle la fuerza para soportar el peso de la herramienta y jalarla en el caso de que se atore en el pozo. Tanto el cable como las herramientas se meten y sacan del pozo mediante un malacate instalado en la unidad.

Las profundidades del pozo se miden con un sistema de ruedas de medición calibrada. Los registros se realizan normalmente durante el ascenso en el pozo con objeto de asegurar la tensión del cable y un mejor control de profundidad. La transmisión de las señales por el cable puede hacerse de forma analógica o digital, las tendencias actuales favorecen a la digital. El cable también se usa, por supuesto, para transmitir la corriente eléctrica desde la superficie a las herramientas.

El equipo de superficie suministra la corriente eléctrica a las herramientas. Pero lo que es más importante es que el equipo de superficie recibe las señales desde éstas herramientas, procesa y/o analiza éstas señales y responde en consecuencia. Las señales deseadas se registran en cinta magnética en forma digital, en tubos catódicos y película fotográfica de manera analógica. La película fotográfica se procesa en la unidad y copias de papel impresas se preparan a partir de ella.

Esta grabación continua de las señales de medición se denomina registro o "log".

Unidad de Procesamiento (CSU). El CSU es un sistema de adquisición y control de datos, gobernado por una computadora digital que recibe instrucciones del Ingeniero de campo. Puede estar montado en forma integrada en el camión de registros, en la unidad de servicio marina o en un camión o unidad satélite.

Las ventajas del sistema CSU comparado con los sistemas analógicos previos son:

Mayor exactitud en la adquisición de datos

Gran versatilidad de presentaciones

Capacidad para efectuar evaluaciones rápidas en el pozo

Mayor capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos

Posibilidad de transmitir y recibir información por línea telefónica o radio

Mayor velocidad en las operaciones

La información que recibe el CSU se graba en una cinta magnética y en película, lo cual hace posible reproducir películas del pozo con cualquier información que se haya grabado o con resultados del procedimiento de la información grabada, en diferentes escalas.

Por lo tanto la principal función del CSU es asegurar que los registros sean correctos, consistentes entre sí y con datos o parámetros del campo en cuestión; estén presentados adecuadamente y permitan confirmar que hay suficiente información con el conjunto de registros obtenidos para hacer una evaluación adecuada.

El CSU cuenta con sistemas periféricos que son:

Sistema de Cinta Magnética. Existen dos sistemas de cinta magnética. Uno es la unidad estándar de 9 pistas y 800 BPI y el otro es una unidad de cassette con tres cartuchos independientes de 4 pistas y 1600 BPI. La cinta magnética constituye el archivo principal de la información.

Sistema de Registro Óptico. Los registros ópticos proveen dos unidades controladas en forma independiente. La película se expone al haz luminoso de una cámara de tipo tubo de rayos catódicos, controlada directamente por el operador.

El sistema es altamente versátil e imprime variadas formas de líneas o curvas con o sin diferentes códigos; sombreado de áreas con diferentes presentaciones; números, letras, diagramas de flechas; densidad variable de ondas (VDL).

El grado de exposición es independiente de la velocidad de operación o de la velocidad de cambio en los valores de las curvas. En cualquiera de las dos unidades de películas se pueden presentar hasta 16 curvas.

Las unidades pueden funcionar a la velocidad de 40000 pies de pozo por hora para registros en escala de 1/200 y proporcionalmente más rápido para escalas más comprimidas.

Pantallas de Video. Consiste en un osciloscopio con capacidad de memorizar la exposición; se utiliza como control visual de la operación o control visual de lectura de la información grabada. La pantalla tiene 125 mm de alto, lo que permite exhibir apropiadamente 90 pies de registro en escala de 1/200 y más para escalas más pequeñas. El tamaño físico y la escala del visor son idénticos al de la pantalla de igual escala de profundidad. La imagen del registro puede ser retenida en la pantalla el tiempo que se requiera sin que esto afecte la continuación de los registros magnético y óptico.

Teclado-Impresor. La principal función del teclado-impresor es crear un vínculo de comunicación entre el sistema y el Ingeniero, lo cual permite a éste mantenerse informado del estado de la operación, recibir mensajes de aviso sobre posibles problemas, dar comandos al sistema cuando éste lo requiera o solicitar al sistema instrucciones de ayuda en determinadas operaciones.

Además del teclado- impresor puede imprimir valores numéricos de los datos leídos de una cinta grabada. También puede utilizarse como una impresora para producir gráficas (clossplots) e histogramas con caracteres alfanuméricos.

Sistema para Transmisión-Recepción. La existencia de un buen sistema de comunicación permite que las cintas grabadas en el CSU puedan ser transmitidas a una estación receptora cerca de un centro de computación con mayor capacidad de procesamiento, así como a una base de operaciones para una rápida entrega del registro.

Cabe mencionar que la tecnología de registro está cambiando debido a los rápidos avances en la electrónica digital y en los métodos de manejo de datos. Se han mejorado los sensores, la electrónica de fondo, el cable, la telemetría de cable y el procesamiento de las señales en la superficie. Mediciones de registro básicas pueden contener grandes cantidades de información. Anteriormente, no se registraba parte de dichos datos debido a la falta de sensores y de electrónica de fondo de alta velocidad, a la incapacidad de transmitir los datos por el cable y a la incapacidad de grabarlos en la unidad de registros.

Del mismo modo, dichas limitaciones han evitado o retardado el uso de nuevas mediciones y herramientas de registro. Con la telemetría digital, se ha presentado un importante aumento en la cantidad de datos que pueden enviarse por el cable de registro. Las técnicas de registro digital dentro de la unidad de registro proporcionan un aumento substancial en la capacidad de grabación de datos. El uso de señales digitales también facilita la transmisión de señales de registro por radio, satélite o línea telefónica a centros de cómputo u oficinas centrales.

El procesamiento de señales puede efectuarse en, por lo menos, tres niveles: en el pozo (en la herramienta), en la boca del pozo (en el camión) y en un centro de cómputo central. El lugar donde se lleva a cabo el procesamiento depende de dónde se pueden producir los resultados deseados con mayor eficacia, dónde se necesita primero la información extraída, dónde se encuentran los expertos, o dónde lo exigen las consideraciones tecnológicas.

Cuando es conveniente, se diseña la herramienta de registro para que los datos se procesen en el fondo y la señal procesada se transmita a la superficie. Esto sucede cuando se prevé una escasa utilidad en el futuro para los datos primarios o cuando la cantidad de datos primarios impide su transmisión. Sin embargo, en la mayoría de los casos es preferible llevar los datos primarios medidos a la superficie para su grabación y procesamiento. De este modo, los datos originales están disponibles para un procesamiento posterior o para presentación y se preservan permanentemente para su uso futuro.

Dentro de las innovaciones que se tienen en los registros es un arreglo de sensores, el cuál resuelve simultáneamente la profundidad de investigación, resolución vertical y la cobertura angular. Esta solución provee una cantidad enorme de información, la cual no podría ser analizada si fuera presentada como curvas. Se convierten las medidas en una gráfica de dos o más dimensiones donde la variable física a visualizar se presenta por una escala de intensidades en color o blanco y negro, es esto lo que llamaremos una "IMAGEN".

Generalmente, se representa la profundidad en el eje Z, los otros ejes pueden representar la profundidad de investigación o el perímetro de la pared del pozo.

III.1.2 Sistema Maxis 500⁽²²⁾

La mayor parte de las nuevas herramientas que usan arreglos de sensores, no pueden ser utilizadas con los sistemas tradicionales de registros. Este hecho estimuló el desarrollo de herramientas de fondo basadas en microprocesadores, una nueva telemetría digital para la transmisión de los datos desde el fondo a superficie y un nuevo equipo para la recolección, almacenamiento, procesamiento, transmisión y presentación de datos.

Al extremo terminal del sistema se encuentran las estaciones de trabajo para un procesamiento más detallado e interpretación de la información obtenida.

El nombre MAXIS significa traducida al español "Sistema de Adquisición Multitareas de Datos e Imágenes". La instrumentación de superficie fue rediseñada completamente para satisfacer los requerimientos impuestos por la nueva generación de herramientas multisensores, o sea, una velocidad de datos transmitidos por el cable a 500 kilobits por segundo. De ahí el nombre de MAXIS 500.

Estructura Básica:

- Procesadores múltiples (3) operando en paralelo con capacidad para realizar varios procesos simultáneamente. Esto es lo que se denomina "Multitask" o Multitareas. Cada procesador de tipo "Micro Vax 3" está conectado a un disco duro de 760 mega-bytes para el almacenamiento de datos y también de programas
- Dos terminales gráficos a color para control del proceso de registro y observación de los registros
- Dos unidades de cinta magnética de tipo "DAT" (Digital Audio Type) con una capacidad de almacenamiento de 1300 mega-bytes
- Una unidad electrónica para el acondicionamiento de la información proveniente de las herramientas de fondo y para la lectura y presentación de la profundidad y tensión del cable. Se ha incorporado un sistema de seguridad que alerta al ingeniero y operadores de anomalías relacionadas con el movimiento de la herramienta y del cable de exceso de profundidad. El equipo hace una advertencia visual y auditiva, si no hay respuesta o acción para corregir el problema, el sistema automáticamente detiene el malacate
- Una fuente de poder para alimentar el equipo de fondo
- Impresoras a color y en blanco y negro

Los tres procesadores se utilizan en forma cooperativa, es decir, se dividen los programas y se comparten la información por medio de un sistema de comunicaciones llamado "Ethernet". La ventaja principal de este sistema es que permite utilizar todos los recursos computacionales del sistema al mismo tiempo que permite flexibilidad en la operación en caso de que uno de ellos fallase. Esta capacidad de adaptación se denomina "reconfigurabilidad", básicamente, significa que los programas pueden ser distribuidos en las máquinas restantes.

Todo el paquete de programas fue diseñado sobre la base de un sistema operativo existente. Se han utilizado conceptos avanzados de la ciencia de la computación, tales como código orientado a objetos (object oriented code). Los programas funcionan en forma independiente, pero se comunican entre sí para intercambio de información. Cada uno de dichos programas realiza una función específica.

Todos los programas residen permanentemente en memoria, de ahí que no sea necesario de cargar otro cuando se trata de correr un servicio diferente. Esta también trae consigo la ventaja de que cualquier combinación de herramientas que sean mecánicas y electrónicamente compatibles sean aceptadas por el sistema.

Para dar un ejemplo se ha corrido un caliper (dipmeter) estratigráfico junto a las herramientas de porosidad y densidad. La mayor parte ha sido escrita en lenguaje de alto nivel para tener la "portabilidad", es decir, la posibilidad de cambiar de

computadores, en el futuro, sin tener que reescribir todo. Para exponer la información en las pantallas de color, se utiliza un sistema de ventanas, el cual tiene la ventaja de ser muy gráfico y, por ende más fácil de usar. Varios registros pueden ser presentados simultáneamente o en distintas de un mismo registro.

Las calibraciones son presentadas en una forma gráfica que hace que su lectura no requiera de conocimientos específicos sobre algún servicio en cuestión para verificar los valores. En el análisis de la sección repetida se superponen las curvas de la sección repetida con las de la sección principal.

Existen varias herramientas de control que permiten al ingeniero operar y verificar el funcionamiento del sistema. Está el monitor de señales que permite la visualización de señales de medida como de control interno.

La telemetría digital DTS fue desarrollada bajo la necesidad de transmitir desde el fondo del pozo la información recopilada por los arreglos de sensores a una velocidad que permita que la operación sea práctica. Se ha logrado transmitir la información a una velocidad de 500 kilobits/segundo utilizando moduladores-demoduladores (modems) digitales en los cables de siete conductores tradicionales. Esto contribuye a la eliminación de efectos de interferencia electromagnéticos ("crosstalk"), lo cual permite recibir la información en superficie con un error promedio de 1 bit cada 85 horas.

Muchas de las nuevas herramientas están provistas de arreglos de sensores que permiten la obtención de imágenes a través de un procesamiento que puede ser simultáneo a la adquisición o diferido en tiempo. Otras, aun cuando no tengan esta característica, hacen posibles medidas de mejor calidad en términos de exactitud, rango de medición y resolución vertical.

Para un departamento o división de exploración o división de exploración es extremadamente importante contar con los registros de un pozo en la forma más rápida y fidedigna posible. Este es sólo uno de los tantos casos donde la transmisión de información es fundamental, de ahí que los programas estén sufriendo constantes cambios que incluyen mejoras y correcciones utilizando sofisticados equipos de comunicación para acelerar el proceso de toma de decisiones y el control de operaciones.

Aunque la transmisión de datos no es nueva en la industria, se han incorporado los últimos adelantos técnicos en materia de equipo para hacer un mejor uso de los recursos de comunicaciones disponibles. Está de más decir que el elemento más crítico de un sistema de transmisión es el enlace mismo, el cual puede ser una simple línea telefónica o un sistema por satélites. En el sistema MAXIS 500 se ofrecen dos servicios: transmisión de datos numéricos para ser procesado y/o interpretados y Digifax para la transmisión de información puramente gráfica.

Para la transmisión de datos se usan "modems", de tal forma, que cuando el registro haya sido terminado ésta quede inmediatamente listo para ser transmitido. Normalmente, se eliminan todas las curvas no relevantes a la información para un uso

más eficiente de la línea de transmisión. En un futuro próximo será posible transmitir simultáneamente con la adquisición de datos. En este último caso, la velocidad de transmisión puede estar limitada por la velocidad a la cual se realiza el registro. En el extremo receptor puede estar una estación de trabajo en la oficina del cliente y la información puede ser enviada a cualquiera de los centros de computación. Para la opción de Digifax se utilizan "modems" del grupo 3, el cual es el estándar en la mayor parte del mundo. Este sistema tiene la ventaja que los archivos gráficos pueden ser enviados hasta el fax receptor sin ser jamás convertidos a papel. Esto otorga la ventaja de obtener copias muy claras y de ahorrar tiempo.

III.1.3 Control de Calidad en Tiempo Real

La mayor cantidad de datos disponibles con el sistema Maxis 500 es uno de los puntos para mejor calidad de registros. Por ejemplo, las herramientas de imágenes proveen más datos acerca de las condiciones del hueco, permitiendo un cálculo más fidedigno de las correcciones ambientales en tiempo real.

Muchos de los controles de calidad no pueden ser utilizados, sino hasta que el registro haya sido terminado. El mejor momento para realizar el control de calidad es el momento en que se está registrando, ya que cualquier anomalía puede ser detectada a tiempo de ser corregida. Este proceso se llama "Aseguramiento de la Calidad", ya que la palabra control es más asociada con un proceso posterior a la elaboración del producto. El sistema Maxis nos permite realizar este proceso en una forma más eficiente.

Son varias las características del sistema que nos permiten realizar el proceso de "Aseguramiento de la Calidad". Ellos son:

- ◆ Presentaciones múltiples a través del sistema de ventanas. Esto significa que los registros se pueden comparar entre sí durante la adquisición de los mismos
- ◆ Las presentaciones a color ayudan a diferenciar las curvas y por ende a detectar anomalías
- ◆ Hasta 32 canales pueden ser visualizados en forma numérica. Esto permite al operador o ingeniero detectar valores fuera del rango, advertencias referentes a la operación de las herramientas y en general tener una mejor perspectiva de la operación
- ◆ Crossplots: Este es uno de los tradicionales controles que ahora se puede realizar en tiempo real
- ◆ Productos. Varios productos pueden ser obtenidos en tiempo real, lo cual permite saber inmediatamente si los datos son buenos como para obtener un producto de acuerdo a estándares. Por ejemplo, el registro de echados permite verificar las curvas obtenidas con los "dipmeters" o con los microbarredores

- ◆ Análisis de la sección repetida. Las curvas de la sección repetida pueden ser superpuestas sobre las correspondientes de la sección principal. Esta elimina una gran cantidad de errores visuales que se producen al superponer una película sobre una pantalla o simplemente al tratar de seguir visualmente las curvas
- ◆ Calibraciones gráficas. Las calibraciones son presentadas en dos formas:

Análogica y Numérica. En la primera, se representan los valores por medio de una barra en una escala indicada por los límites aceptables. En la segunda, simplemente se indica el valor de la calibración en forma de números en la parte derecha de la presentación gráfica. La barra presenta un color amarillo si el valor en cuestión está dentro del rango aceptable, rojo si excede los límites, además de un anuncio indicando lo mismo
- ◆ Sistema Automático de Control de Calidad, LOMS (Log Quality Control Monitoring System). Muchos de los controles realizados manualmente por el ingeniero se han automatizado. El programa que lo realiza lleva un registro de todas las observaciones detectadas además de advertir inmediatamente sobre el evento detectado. Realiza en tiempo real una serie de computaciones que van de simples verificaciones de límites a las más complejas que se van adaptando según la profundidad, tiempo o temperatura

Es por ello que los registros geofísicos son muy importantes en la vida de un pozo, ya que de él depende mucha información importante, la cual nos ayuda, ya sea para ver cuestiones como herramientas en el interior hasta, interpretar estos registros para su futura intervención, si así lo quisiese.

La secuencia en la vida del pozo después de la entubación es la siguiente:

Evaluación a través de la tubería o correlación con registros de pozo abierto

Control de la cementación por medio de registros

Penetración de los intervalos seleccionados

Evaluación y control de la producción

Los registros geofísicos se clasifican de acuerdo a la propiedad física que miden y a la propiedad física con que operan.⁽²¹⁾

Con base a la propiedad física que miden:

- ◆ Litológicos
- ◆ Resistividad
- ◆ Porosidad

- ◆ Mecánicos
- ◆ Temperatura

Con base a la propiedad con que operan:

- ◆ Radioactivos
- ◆ Eléctricos
- ◆ Mecánicos

Las aplicaciones de los registros geofísicos, durante la extracción de los hidrocarburos es muy amplia, y la revisión de los productos procesados puede ser considerada con base en la clasificación siguiente:

- Aplicaciones Generales (profundidad vertical verdadera, aplicaciones geológicas como registros de echados, fallas, discordancias, arrecifes, análisis estratigráfico, registro de litología)
- Aplicaciones para Perforación (registro de geometría del pozo, registro direccional, registro de compactación)
- Aplicaciones Geológicas
- Aplicaciones Geofísicas (registro de velocidad)
- Aplicaciones de las formaciones

Además también se emplean para la detección de presiones anormales.

En cada una de estas aplicaciones presentan productos típicos con escalas y presentaciones estándares, pero la versatilidad del sistema permite escalas y presentaciones diferentes si el cliente así lo requiere.

Dentro de las aplicaciones más comunes tenemos:

- ◆ Determinación del contacto agua aceite
- ◆ Determinación de zonas permeables e impermeables
- ◆ Determinación de la porosidad y saturación de fluidos
- ◆ Determinación de la litología
- ◆ Localización del intervalo productor

- ◆ Límites de capas
- ◆ Diferenciación entre rocas duras y blandas
- ◆ Salinidad del agua de formación
- ◆ Evaluación de la calidad del cemento
- ◆ Otros

Gracias a los registros se resuelven varias preguntas que podrían quedarse en el aire, como por ejemplo, si hay cemento por detrás de la tubería de revestimiento, si hay cemento, ¿donde estará el tope(cima) y el fondo del cemento?, si existe adherencia entre el cemento y la tubería y entre el cemento y la formación, que anomalías existirán en el cemento? (microanillo, canalización, etc), es decir aquellos problemas que no lo podemos ver y gracias a los registros tenemos conocimientos de ellas.

Para poder resolver todas estas preguntas, se requiere de evaluar la calidad del cemento, con técnicas de evaluación y herramientas adecuadas, ya que existen en la industria diferentes herramientas para la evaluación del cemento y el uso de cada uno de ellos va a ser de acuerdo a las necesidades que se requieran.

III.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CEMENTACIÓN⁽¹⁶⁾

Los materiales en el espacio anular son:

Cemento normal

Líquido, incluyendo lechada que no fraguó

Cemento contaminado con gas

Gas libre en la interfase del revestimiento

La cementación debe evaluarse en sus dos funciones:

Soporte de la tubería. Esta función se refleja por la resistencia del cemento a la compresión, una resistencia a la compresión de 500 psi es suficiente para soportar la tubería.

Aislamiento hidráulico de zonas. Esta función se encuentra asociada por el camino más corto por el cual el fluido se desplaza, entre dos puntos dados. El fluido tiene que abrirse camino a través de varios sólidos. Si entre los dos puntos existe una trayectoria abierta sin sólidos, un criterio representativo será la sección más corta de esta trayectoria.

El análisis de las propiedades del cemento, su distribución y la forma de distribución, permiten estimar los siguientes criterios:

1.- Patrones de distribución del cemento

La siguiente clasificación es de los patrones típicos de distribución y su correlación con otras indicaciones provistas por los registros litológicos y por el calibre del agujero.

Lechadas deficientes:

- Descentralización de la tubería. Canales verticales de lodo no desplazado, muy pocos puentes de cemento, en el lado inferior de la tubería en los pozos desviados no existen correlación con la litología.
- Bache de limpieza deficiente. Masas de líquido distribuidas aleatoriamente en la parte inferior de la tubería en los pozos desviados. Canales con puente. No existe correlación con la litología.
- Régimen de flujo incorrecto. Sin canales verticales claros. Cementación todavía más deficiente enfrente de las secciones derrumbadas o de las cavernas donde el régimen de fluido puede haber cambiado a laminar.

Lechadas mal adaptadas:

- Contracción demasiado alta y microanillo. Indicaciones generalizadas de cementación deficiente. Mejor adherencia en arcillas. Resistencia a la compresión normal. Indicaciones de cementación todavía más deficientes en doble revestimiento debido a una contracción no compensada.
- Contenido de agua demasiado alto. Masas de líquido aleatorias o conglomeradas en el lado superior de la tubería en los pozos desviados. Separación entre el agua y el cemento enfrente de las arcillas, mejor comportamiento en zonas permeables.
- Absorción del gas de la formación. Distribución en masas del buen cemento, del cemento contaminado con gas y el gas libre. Presencia de formaciones portadoras de gas.
- Interacciones con la formación. Correlaciones específicas con ciertos tipos de litología (dilatación de las arcillas, disolución de la sal).

2.- Permeabilidad del cemento

Investigaciones a nivel laboratorio mostraron que un cemento estándar fraguado correctamente presenta permeabilidades del orden de 0.001 milidarcy. El tamaño del poro es menor a 1 micrón y la porosidad de 30 a 35%. Sin embargo investigaciones recientes han demostrado que si se permite que el gas se desplace en la lechada antes de terminar el fraguado, la estructura de los poros se destruye parcialmente y aparece

una configuración de tipo tubo. Los diámetros de los tubos pueden alcanzar 0.004 de pulgada y la permeabilidad resultante del cemento puede alcanzar de 1 a 5 milidarcies.

3.- Aislamiento Hidráulico de Zonas

Con el fin de mejorar la cementación de los pozos futuros y determinar una posible intercomunicación de zonas es muy importante definir por qué quedaron fluidos en el anulo mediante el análisis de patrones de distribución del cemento. Si el problema es una operación incorrecta de la lechada, probablemente se debe a que el cemento ha conservado sus propiedades originales y solamente ocurrirán comunicaciones si hay canales sin puentes.

Cuando el problema se le atribuye a una absorción del fluido de la formación durante el periodo de fraguado, es posible que la estructura de los poros del cemento esté alterada y que su permeabilidad haya aumentado.

III.3 TIPOS DE EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN⁽²³⁾

Podemos considerar dos tipos de evaluación, una realizada durante el trabajo y otra después de la operación.

La ventaja de monitorear el comportamiento durante la operación es que permite incluso intentar corregir algún parámetro (por ejemplo, reducir el caudal de bombeo, cuando la presión indica una posibilidad de fractura u ocurrencia de efecto de tubo en U). Pero normalmente en una cementación de mayor profundidad, cuando el cemento llega a contactar la formación ya se encuentra en pleno proceso de desplazamiento y muy poco se puede hacer para corregir el problema, a parte de empezar a elaborar un programa de corrección.

Este es el caso, cuando por ejemplo, observamos el retorno en superficie de los colchones lavadores y espaciadores, cuando supuestamente no deberían llegar. Esto es una indicación de que los fluidos se canalizaran en el lodo. Lo mismo pasa cuando las presiones son distintas al estimado, muchas veces indican posibilidad de fractura o pérdida de circulación. En este caso, la reducción del caudal, tomando cuidado de checar el tiempo de espesamiento de la lechada, es una buena opción para intentar lograr el retorno.

Los métodos de evaluación pos-operación son más efectivos y ayudan a dar informaciones más detalladas sobre las características del cemento después del fraguado. Una buena cementación en superficie puede fallar en el fondo: por ejemplo, una fractura de la formación y pérdida de la lechada después de haber terminado el desplazamiento.

Existen varios métodos de evaluación pos-operación disponibles, de los cuales hablaremos con detalle en los dos capítulos siguientes, y a continuación se mencionarán los primeros registros que se utilizaban en un tiempo no muy lejano.

III.4 PRUEBA SECA

Consiste en bajar un bridge plug (tapón retenedor) y un packer (empacador) hasta una profundidad por encima de la zona de interés, en una formación impermeable previamente disparada y verificar si hay aporte de fluido, si no hay flujo es una indicación de que el cemento en la zona de interés está sellando la formación. Esta técnica es muy costosa y destructiva, se utiliza en casos muy extremos⁽²³⁾.

III.5 REGISTRO DE TEMPERATURA⁽²³⁾

Los perfiles de temperatura son muy utilizados para aplicaciones de producción, como para la evaluación de la cementación, ya que los datos obtenidos son muy limitados técnicamente para permitir una interpretación precisa del estado real del cemento, lo que sí permite calcular es la cima del cemento, identificar la presencia de zonas más calientes y para comparar el tope real del cemento con el estimado.

La temperatura en el agujero se incrementa con la profundidad. El promedio de incremento es de casi 1°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 pueden ser transmitidas 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.

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.

Los registros de temperatura son corridos algunas horas después de la cementación, la reacción exotérmica de la hidratación del cemento hace que la temperatura pueda superar a la temperatura de la formación en hasta 40 °F o más. Esto los torna muy efectivos para identificar la profundidad del tope del cemento, lo que por si solo ya sirve como alguna fuente de referencia del estado estimado del cemento: si el tope se encuentra arriba del estimado, lo más probable es que hubo canalización del cemento, por lo que la calidad del cemento no fue muy efectiva. Si el tope del cemento está localizado más abajo a lo mejor hubo pérdida de circulación durante el bombeo y será necesario realizar operaciones de reparación para lograr cubrir el intervalo abierto.

Una disminución de la curva de temperatura dentro de una zona cementada puede iniciar la presencia de canalización (ya que reduciría el volumen de cemento y por lo tanto la temperatura).

El calor de la reacción exotérmica que el fraguado del cemento genera, se disipa rápidamente. Pruebas realizadas 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 periodo 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.

La cima de cemento es la parte superior que tiene el cemento en el espacio anular o entre la tubería de revestimiento y la formación. Los estudios de temperatura a menudo se realizan en agujeros adermados 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 T.R.

Para mejores resultados de las mediciones de temperatura se puede correr la herramienta a pocas horas, usualmente alrededor de 20 hrs, después de que la lechada de cemento fue bombeada en su sitio alrededor de la T.R. Si el lodo es circulado dentro del pozo antes de correr el registro de temperatura, es necesario esperar unas horas después de la circulación antes de correr el registro.

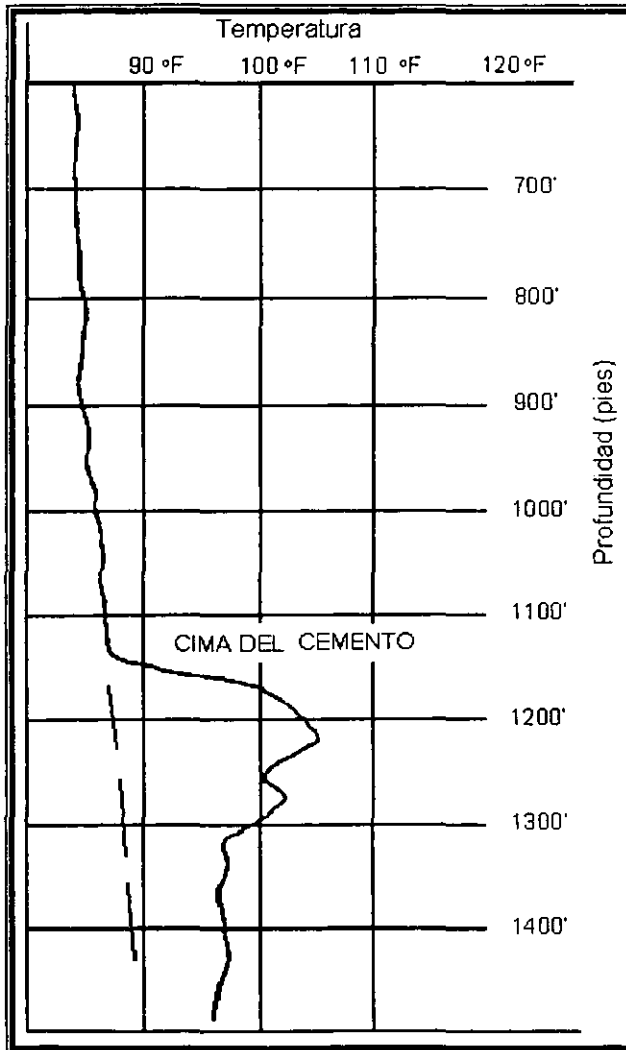
Los registros de temperatura son una forma efectiva y económica para determinar la cima y los intervalos de cemento.

La figura III.2 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 (Cement Bond Logging o Registro de Adherencia del Cemento) 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 cementos en zonas de fractura.

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

Fig. III.2. Registro de temperatura⁽²⁴⁾**Limitaciones:**

La confiabilidad es muy baja para pequeñas canalizaciones o áreas de mala cementación y el propio estado del cemento en el espacio anular. Las formaciones tienen valores de conductividad térmica distintos, lo que hace variar la temperatura para una misma condición de cemento en el espacio anular, dificultando la interpretación. Las lechadas de baja densidad por su lado, tienen una reacción exotérmica mucho menor (contienen menos cemento) lo que hará difícil el contraste con la formación.

Registros de temperatura también son utilizados para la evaluación del cemento después del que el pozo ha sido disparado.

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 en las 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.

III.6 TRAZADORES RADIOACTIVOS

Perfiles radioactivos son utilizados con la adición de trazadores radioactivos al cemento. Presenta características muy similares al del perfil de temperatura: son buenos para identificar el tope del cemento, pero limitados para evaluar la calidad del mismo. Tiene la desventaja de involucrar materiales radioactivos, lo que complica la logística de la operación y agrega restricciones ambientales. Son más caros debido al costo de los trazadores y pueden interferir en futuros registros que involucren radioactividad natural de la formación (dependiendo de la vida útil del componente radioactivo utilizado)⁽²³⁾.

La carnotita fue uno de los principales materiales usados como trazador, se mezclaba 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 éste método, la cima del cemento puede ser exactamente determinada si la porción superior (la primera porción encontrada en el descenso de la herramienta) emite radioactividad. El trazador es agregado en forma de una sal soluble durante el mezclado del cemento con el agua. Adicionando un trazador radioactivo 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, que tenga una vida media-larga el registro puede ser tomado en cualquier tiempo en la vida de un pozo, con las consecuencias que se mencionaron anteriormente.

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 radioactivos es la rápida localización del material detrás de la T.R.

La desventaja es cuanto al manejo del material radioactivo, así como del alto costo que significa tomar una prueba como ésta. La respuesta de los trazadores se muestra en la figura III.3 para localizar la cima del cemento.

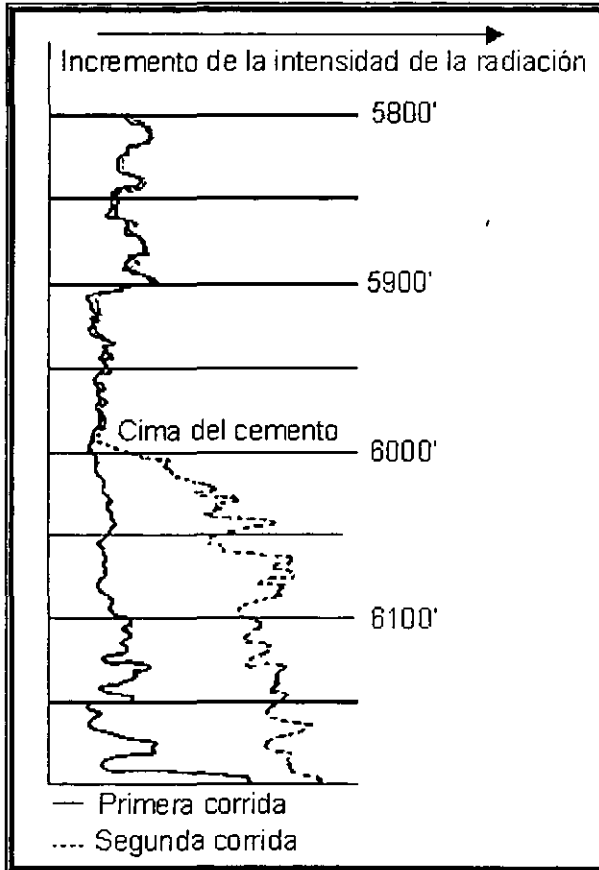


Fig.III.3. Registro de un trazador radioactivo⁽²⁴⁾

III.7 REGISTROS SÓNICOS⁽²⁵⁾

Los sistemas sónicos convencionales miden la amplitud o atenuación de las ondas que se propagan a lo largo de la tubería. La calidad de cementación es medida como un promedio circunferencial de la calidad del cemento alrededor de la tubería de revestimiento, lo que los torna más difíciles de interpretar y muy sensibles, al grado de

acoplamiento acústico entre la tubería, cemento y la formación. Por lo tanto, son afectados por la existencia de microanillo y muy sensibles a otras variables como centralización, cambio de fluidos, etc.

Algunas herramientas sónicas fueron diseñadas para compensar los efectos de fondo y para esto utilizan dos receptores en lugar de uno solo. A pesar de ser más versátiles y confiables, aún tienen limitaciones en su resolución y problemas con microanillos.

Amplitud. Registran la amplitud de una señal de energía que es enviada por un transmisor y recibida por un receptor.

Atenuación. Miden la cantidad de energía perdida entre dos o más receptores comparando la señal recibida en cada uno, como el enviado por el transmisor.

Impedancia. Los transductores envían una señal en dirección a la tubería de revestimiento y miden la reflexión del retorno.

Herramientas Ultrasónicas

Estas permiten un examen más detallado de la circunferencia, utilizando varios transductores intercalados azimutalmente o uno solo giratorio. Esto facilita la identificación de zonas con mal cemento e incluso canalizaciones. Se mide la impedancia acústica detrás de la tubería de revestimiento, permitiendo interpretar estos datos como resistencia a la compresión del cemento.

En los siguientes dos capítulos se hablarán detalladamente de las herramientas de evaluación del cemento.

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN

Existen formas prácticas de evaluar la cementación de las tuberías. Una de ellas se realiza durante la operación. Esto consiste en elaborar una gráfica de presión contra volumen bombeado de lechada de cemento y fluido desplazante. Mediante el análisis de ésta gráfica se puede determinar inicialmente y de forma confiable, la cima más probable de la lechada de cemento en el espacio anular.

La segunda forma de evaluación la cuál se abordará ampliamente en éste capítulo es la de correr un registro de cementación para verificar la cima real o probable y la calidad de cementación en el espacio anular.

Indistintamente, el primer método se puede utilizar siempre que se realice la operación en el pozo. El segundo método requiere de equipo, tiempo y costo adicional.

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, pero no así su distribución, aunque esto ha cambiado últimamente con las nuevas herramientas.

Los trazadores radioactivos se corrieron a finales de los años 30's para determinar las cimas del cemento. Los levantamientos de los trazadores tuvieron las mismas limitaciones que los registros de temperatura sólo que éstos no eran sensibles al tiempo.

A continuación se describen otras herramientas utilizadas para la evaluación de la calidad de la cementación, con sus características y funciones de cada una de ellas.

IV.1 HERRAMIENTAS SÓNICAS ^{(16), (23), (25)}

El objetivo fundamental del perfil sónico es el de obtener datos característicos sobre las formaciones. Con los registros sónicos, se explotan las propiedades de una onda sonora para obtener la información sobre litología, espesor de capas, porosidad, localización de fracturas y las condiciones del cemento.

Las herramientas sónicas emiten pulsos de energía sónica que se expanden esféricamente a partir de un transmisor y son enviados omnidireccionalmente hacia la tubería de revestimiento, el cemento y la formación.

En un medio isótropo (que tiene las mismas propiedades en todas las direcciones) e infinito, la propagación del sonido emitido por un transmisor, se propagará en todas las direcciones y después se disipará.

La transmisión de la energía del sonido se hace por esfuerzos compresionales y laterales en este medio.

En el perfilaje, la propagación del sonido está afectada por las paredes del pozo como lo muestra la figura IV.1.

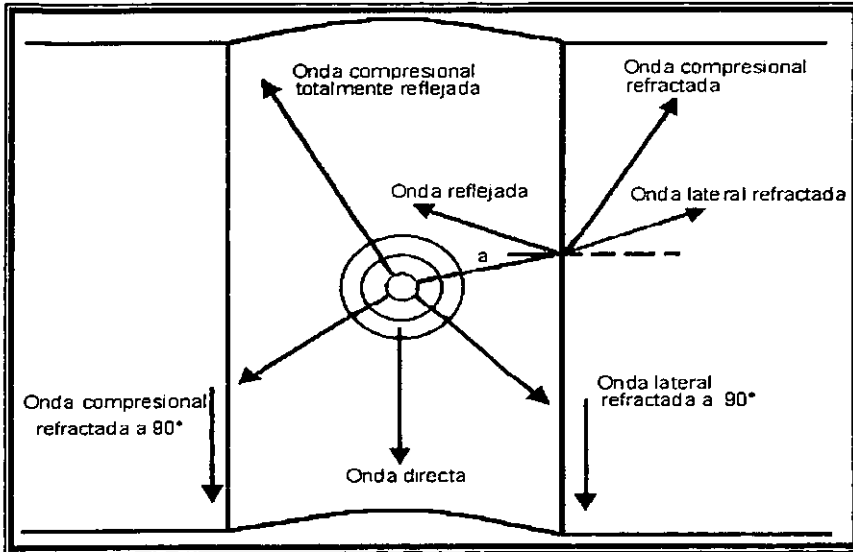


Fig. IV.1. Propagación del sonido⁽²⁵⁾

Las ondas acústicas se reflejan y se refractan como ondas ópticas y rayos. Las ondas generadas por el transmisor son todas compresionales, porque los líquidos sólo transmiten ondas compresionales.

Estas ondas compresionales tocan las paredes del pozo con ángulos diferentes:

- a) 1- Pequeño ángulo de incidencia
- 2- La energía se refleja y refracta parcialmente
- 3- La energía se disipa en el medio
- 4- Existen dos ondas refractadas, la onda compresional y la onda lateral a ángulos diferentes

- b) 1- Gran ángulo de incidencia
 - 2- La energía se refleja totalmente en el fluido como compresional
- c) 1- Ángulo de incidencia crítico (compresional)
 - 2- La onda refractada compresional es paralela a la pared del pozo, es la onda más rápida
- d) 1- Ángulo de incidencia crítico (lateral)
 - 2- La onda lateral refractada es paralela a la pared del pozo. También viaja hacia el receptor

Velocidad de onda lateral. Ligeramente más de 0.5 de la velocidad de onda compresional.

A un tiempo dado (T_x) la posición de las ondas es la siguiente (figura IV.2):

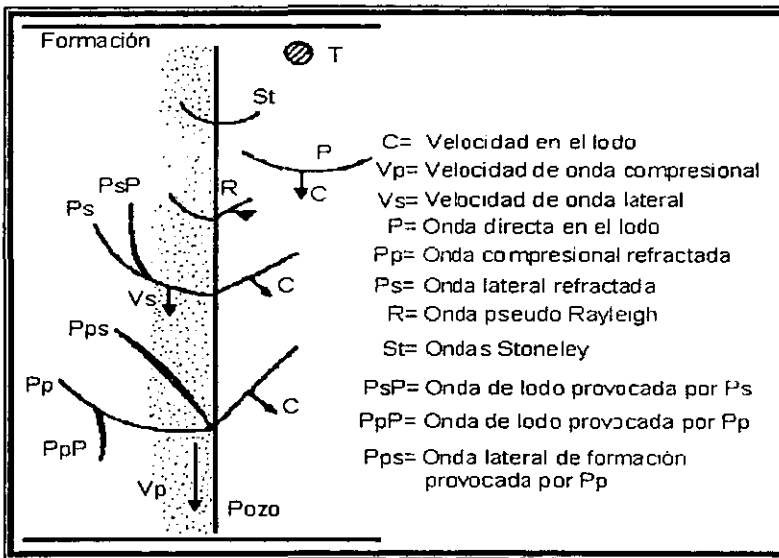


Fig. IV.2. Tipos de ondas⁽²⁵⁾

Se observa que las ondas compresionales y laterales refractadas provocan una onda compresional correspondiente en el lodo.

Las ondas pseudo Rayleigh y laterales refractadas tienen velocidades tan cercanas que son demasiado difíciles para distinguir.

La primera onda que llega al receptor, es la que viaja del transmisor hacia la formación como onda compresional en el lodo, ha sido refractada en la pared del pozo y ha viajado paralela a la pared a la velocidad de onda compresional en la formación.

Una onda típica en el receptor sería la siguiente:

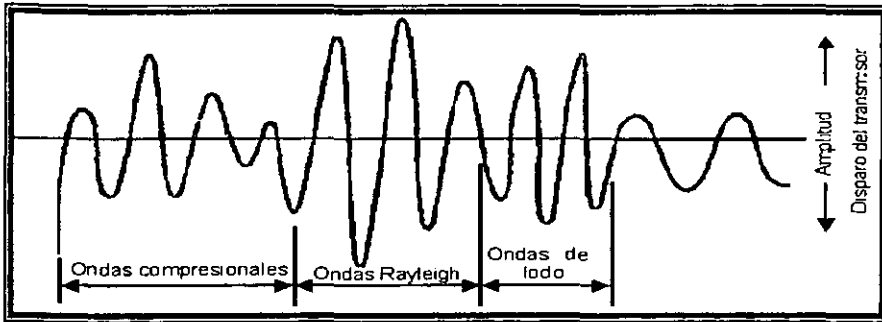


Fig. IV.3. Comportamiento de una onda típica⁽²³⁾

La velocidad del sonido en una formación depende de las propiedades elásticas de la matriz de la formación, porosidad, contenido de su fluido y su presión.

Inicialmente la energía se dirige hacia la tubería de revestimiento. Si existe un buen cemento y una buena adherencia a la tubería, la energía sónica pasa de la tubería hacia el cemento. Y si existe una buena adherencia entre el cemento y la formación, la energía continuará su ruta por la formación, en este caso la energía sónica será muy atenuada (amortiguada) por el cemento y la formación, por lo tanto, la amplitud de la señal que logra volver al receptor será muy baja, es decir entre mayor amortiguación, mejor la calidad y distribución del cemento y si es menor la amortiguación peor la calidad y distribución del cemento.

Si no existe un buen cemento la amplitud de la señal será muy alta, ya que no logra ser amortiguada por el cemento y la formación. Si la adherencia entre el cemento y la tubería de revestimiento es mala, la energía se mantendrá en la tubería, reverberando en su superficie, por lo tanto, no será transmitida al cemento y formación y retornará con mayor intensidad hacia la sonda que será registrada por un receptor. Si existe un buen cemento y buena adherencia, la amplitud registrada es baja y si no existe cemento o hay mala adherencia, la amplitud es alta.⁽²³⁾

Es imprescindible la existencia de un buen acoplamiento acústico entre el cemento y la tubería de revestimiento y la formación, de lo contrario las señales recibidas estarán limitadas a la tubería de revestimiento.

Por lo tanto, los factores importantes en un registro sónico son:

- El grado de atenuación del cemento, conocido como Impedancia Acústica

- La presencia y distribución del cemento
- El grado de acoplamiento acústico entre el cemento y la tubería de revestimiento y la formación

IV.2 COMPONENTES DE UNA ONDA DE SONIDO^{(23), (25)}

Tiempo de Tránsito (Δt). Es el tiempo que toma la energía entre ser enviada por un transmisor, recorrer por el medio y retornar hasta un receptor. Puede ser el pico de la onda como también un valor predeterminado. Casi siempre se utilizan los picos positivos, como E_1 y E_3 y muy raramente los negativos como E_2 . El tiempo de tránsito se mide en $\mu\text{s}/\text{pie}$.

Longitud de Onda (λ). Es la distancia recorrida por una onda en un ciclo. Es igual a la relación entre la velocidad de propagación y la frecuencia ($\lambda = V/F$) o equivalente a $V \times T$. Tanto la velocidad de propagación como la longitud de onda dependen del medio de propagación.

Periodo (T). Es la duración de un ciclo en microsegundos y corresponde al tiempo separando el pico de dos ondas sucesivas. Es independiente del medio de propagación.

Frecuencia (F). Es el número de ciclos completados por segundo y es medido en Hertz (Hz), siendo $1 \text{ Hz} = 1 \text{ ciclo/segundo}$. Es el inverso del periodo, o sea, $F = 1/T$. La frecuencia es independiente del medio de propagación y casi independiente de la velocidad del sonido. La atenuación depende de la frecuencia y del medio de propagación. Todos estos componentes se observan en la figura IV.4.

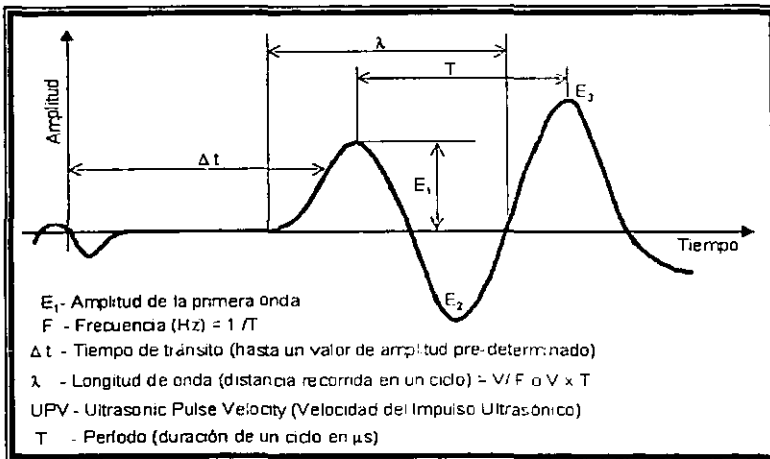


Fig. IV.4. Elementos de una onda de sonido⁽²³⁾

IV.2.1. Propiedades Acústicas ⁽²³⁾

Las propiedades acústicas de los materiales pueden ser definidas por la Impedancia Acústica (Z), que es el producto de la densidad del material (kg/l) y la velocidad del sonido (km/s) pasando por el material, así la impedancia acústica es medida en Mrayl ($10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

La transferencia de energía entre dos medios, por ejemplo, entre la tubería de revestimiento y el cemento, dependerá de la impedancia acústica. La atenuación del CBL es directamente relacionada con la impedancia acústica del cemento y del área de la tubería de revestimiento. Para un cemento con buena adherencia, la atenuación será mayor cuando el contraste de impedancia acústica entre el cemento y la T.R es mínimo.

Material	Porosidad	Δt ($\mu\text{s}/\text{pie}$)	UPV (m/s)	Z (Mrayl)
Casing	----	57	5340	41.6
Agua	STP*	190 a 200	1463 / 1676	1.5 / 1.8
Petróleo	STP*	238	1280	1.0 / 1.2
Lodo	8.5 a 17 ppg	200 a 180	1300 / 1800	1.5 / 3.0
Aire	15 a 3000 psi	920 a 780	330 / 390	0.0004 / 0.1
Cemento**	15.8 ppg	85 a 100	3000 / 3400	5.6 / 6.4
Cemento**	Litefil 11.2 ppg	85 a 100	1650 / 2500	2.2 / 3.3
Cemento**	36% espuma	85 a 100	2100 / 2300	1.75 / 2.75
Arenisca	0%	52 a 57	5760	15.2
Arenisca	5%	62.5	4880	12.6
Arenisca	20%	87	3500	8.2
Arenisca	no consolidada	111	2740	6.0
Dolomita	0%	43.5	7010	20.2
Dolomita	5%	50	6100	17.0
Dolomita	20%	66.6	4570	11.5
Caliza	0%	47.6	6400	17.3
Caliza	5%	54	5640	14.8
Caliza	20%	77	3960	9.4
Arcilla	fuerte	59	5180	12.0
Arcilla	débil	143	2130	4.3
Anhidrita	----	50	6100	18.5
Halita	----	66.6	4570	9.3

*Presión y Temperatura Estándar

**Cemento con fraguado entre 1 y 7 días

Tabla 1. Propiedades acústicas de los materiales

En la tabla 1 se observa que la velocidad del sonido a través de la T.R es mayor que la mayoría de las formaciones. Esto explica porque la primera onda que retorna al receptor de un CBL es normalmente compuesta únicamente por la onda sónica que pasa a través de la T.R.

Los registros sónicos son afectados por las propiedades acústicas de las formaciones. Estas son definidas como lentas o rápidas. En una formación rápida el sonido recorre más rápido que en la T.R, por ejemplo, su velocidad es superior a 5340 m/sec o su lentitud es inferior a 57 μ s/pie. En este caso la señal de la formación es recibida antes que la señal de la T.R.

Para los materiales con porosidad, como las formaciones, cuanto mayor es la porosidad, menor será el UPV (Velocidad del Impulso Ultrasónico, también conocido como Velocidad del Sonido en el medio) y la impedancia acústica, pero menor la atenuación. Esto quiere decir que las lutitas, tobas u otros materiales arcillosos atenúan tanto la señal que muchas veces no se obtiene la señal de la formación, especialmente a bajas profundidades.

Por lo tanto las propiedades de los cementos dependen del tiempo, de la cinética de hidratación y de la porosidad.

Z (Mrayl)	
8.0	Cementos Ultrafuertes Cementos Pesados
6.0	Cementos 15.8 lb/gal Ligeros con Baja Densidad
4.0	Líneros con Alta Porosidad (espuma)
2.0	
1.5	Agua
0.1	Gas

Tabla 2. Impedancias Acústicas

Hay una relación entre Z y la atenuación del CBL pero no hay relación entre Z y la resistencia a la compresión.

Cada tipo de cemento, después del fraguado tiene distintas impedancias acústicas, como se puede observar en la tabla 2, a continuación se dan algunos ejemplos:

- Cemento Puro de 5.4 a 6.4 Mrayl
- Cemento con hematita alrededor de 8.0 Mrayl

- Extendido con silicato de 2.9 a 4.6 Mrayl
- Extendido con microesferas de cerámica, dependiendo de la densidad de 2.2 a 5.0 Mrayl
- Espumado de 2 a 2.75 Mrayl

Lechadas de cemento puro o de alta densidad tienen una impedancia acústica mayor debido a la menor porosidad, alta cinética de hidratación, por el mayor contenido de cemento y mayor densidad de sus componentes. Sin embargo, la continuación del proceso de hidratación hacen que las propiedades acústicas de los cementos varíen con el tiempo. Para una lechada de cemento puro, la impedancia después de 24 horas ya representa más del 80% de la impedancia final.

Lechadas livianas o extendidas normalmente tienen una baja Z debido a la mayor porosidad, menor cinética de hidratación, es decir, con menor material cementante y menor densidad de sus componentes (tanto el extendedor como el agua adicional agregada). Lechadas con D124 tienen una mayor Z que otras lechadas livianas, debido a la menor porosidad y menor cantidad de agua.

El cemento espumado es un típico ejemplo de que una menor impedancia acústica no está relacionada con la resistencia a la compresión. El cemento espumado tiene gas atrapado en el sistema, lo que hace cambiar la velocidad del sonido. Como resultado la atenuación del CBL es muy baja y la amplitud es muy alta. Aún así su resistencia a la compresión es mucho mayor que sistemas extendidos convencionales. En los registros ultrasónicos el problema está en la correcta interpretación, ya que el contraste entre el cemento y el lodo es mínimo.

Sin embargo, el factor más importante que afecta estas lechadas livianas es que el grado de aumento de Z con el tiempo es mucho mayor que una lechada de cemento puro o de alta densidad. Estas lechadas pueden alcanzar en una semana un valor de Z hasta más de 50% del valor del primer día, por esta razón se recomienda correr el registro por lo menos una semana después de haber realizado la cementación.

Algunas características o conceptos importantes de la impedancia acústica son:

- Entre mayor sea la temperatura mayor va a ser la cinética de hidratación del cemento y acelera el desarrollo de las propiedades mecánicas
- Cuanto mayor es la porosidad, más lento será el desarrollo
- La impedancia acústica mejora con el tiempo, especialmente en lechadas extendidas
- La impedancia acústica de una lechada sin fraguar totalmente es similar al del agua (1.5 Mrayl)

- El cemento espumado tiene bajo Z pero alta resistencia a la compresión debido al gas atrapado en el sistema
- La marca de cemento tiene muy poco efecto sobre Z
- El agente densificante afectará el valor de Z, por ejemplo, la barita resulta en menor valor de Z que la hematita

La composición típica de una herramienta sónica es como se muestra en la figura IV.5a, en la parte superior se encuentra el CCL (Casing Collar Locator—Detector de coples) seguido del rayo gamma.

El sónico es generalmente localizado en la parte inferior.

La superficie de la sonda sónica (fig. IV.5b) es especialmente diseñada para retrasar al máximo la propagación de la energía a través del propio cuerpo de la herramienta, evitando así interferencias en los valores registrados.

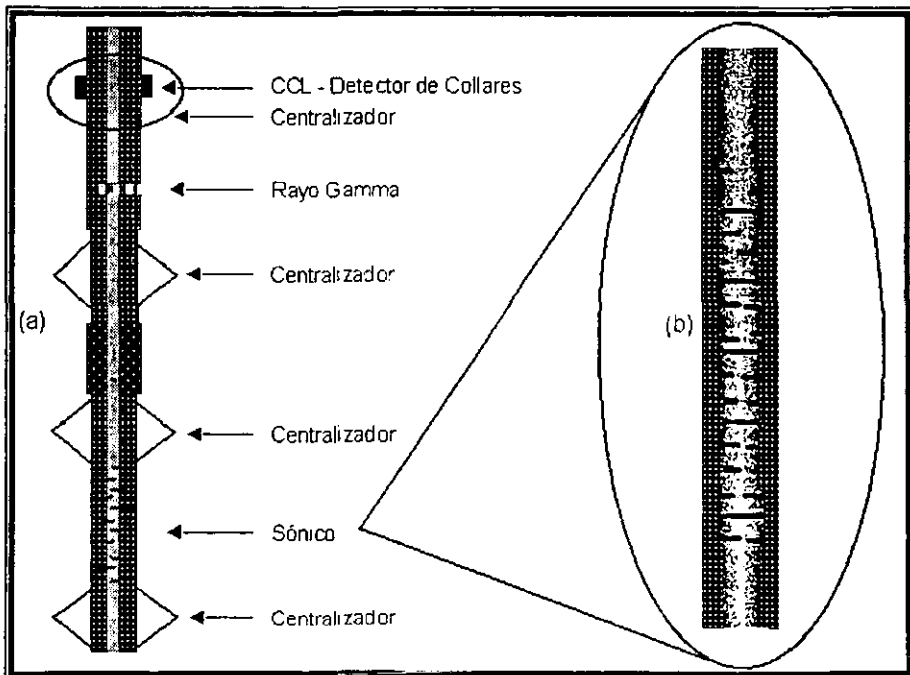


Fig. IV.5.(a) Herramienta Sónica y (b) Sonda Sónica⁽²³⁾

Se podrían utilizar diferentes combinaciones de receptor transmisor en equipos de perfilaje sónico como se muestran en la figura IV.6:

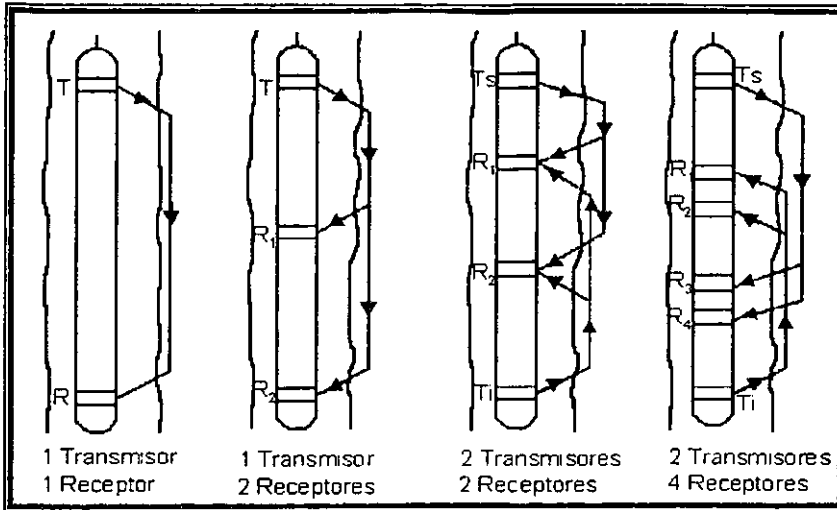


Fig.IV.6. Combinaciones de herramientas sónicas⁽²⁵⁾

En la figura IV.7 se observa que, instalando un segundo receptor a una distancia conocida, abajo del primer receptor, se puede eliminar el trayecto en el lodo.

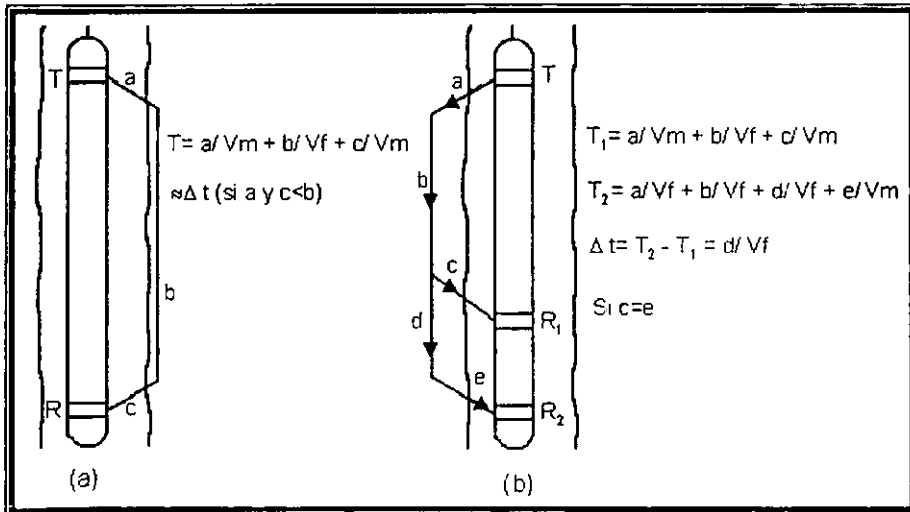


Fig.IV.7. (a) Esquema de un receptor, (b) Tipo de dos receptores⁽²⁵⁾

Así se puede medir el tiempo necesario para que el sonido viaje a una distancia conocida "d" en la formación. Conociendo d, se puede expresar el tiempo en $\mu\text{s}/\text{pie}$.

Pero para eliminar completamente el trayecto en el lodo, la distancia en el lodo para que el sonido llegue hasta el receptor, debe ser igual. Este no es el caso cuando la sonda está torcida debido a una falta de centralización o cuando hay cavernas, es decir, zonas más anchas (fig.IV.8).

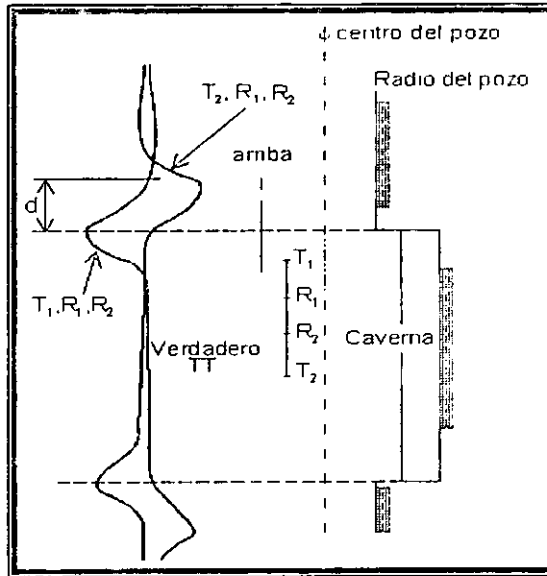


Fig. IV.8. Ejemplo del comportamiento de la onda cuando existen cavernas⁽²⁵⁾

En el equipo se usa una distancia de 3 pies entre el transmisor y el receptor cercano y una distancia de 2 pies entre el receptor cercano y lejano.

IV.3 REGISTRO DE ADHERENCIA DEL CEMENTO (CBL)

El control de la cementación se efectúa a través del registro de cementación CBL, el cual es un registro continuo de la amplitud de la primera onda de sonido que llega al receptor a través de la tubería. La atenuación de la primera onda y el registro de todas las ondas se usan para evaluar la calidad del cemento, ya sea entre cemento-T.R o cemento-formación.

El registro de adherencia del cemento (CBL) asociado con el registro de densidad variable (VDL), fue durante muchos años el único método para evaluar la calidad de cementación, ya que en la actualidad existen herramientas más sofisticadas. Aunque éste servicio permite obtener una respuesta clara en la mayoría de los casos, es importante recordar los fundamentos básicos del principio de estas mediciones, ya que de esta manera se podrá entender la influencia de los diferentes parámetros de limitación y resolver los casos difíciles de interpretar.

La figura IV.9 muestra un diagrama esquemático de la sonda dentro del pozo⁽¹⁶⁾.

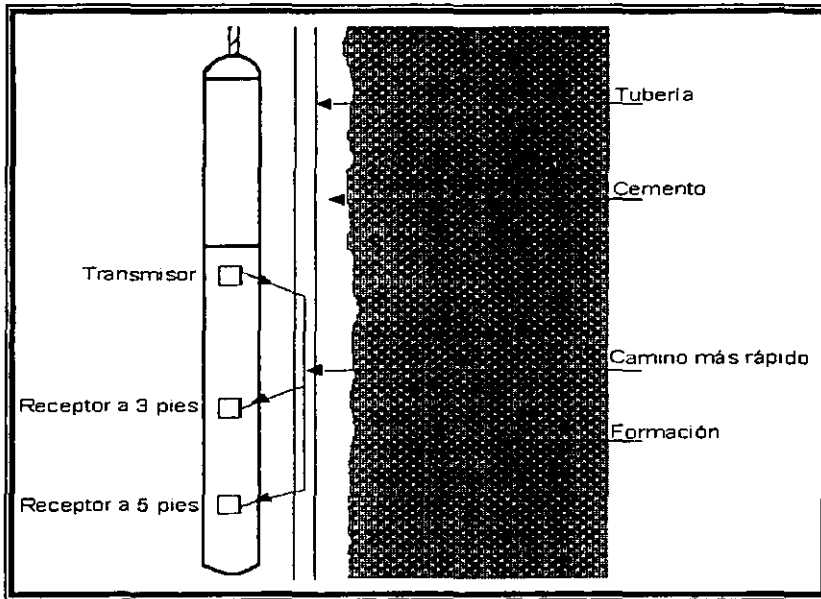


Fig. IV.9. Viaje de la onda de sonido a través de la tubería⁽¹⁶⁾

El registro CBL (Cement Bond Log) se corre con las herramientas acústicas, es una herramienta que contiene un transmisor (T) normalmente cerámico piezoeléctrico y dos receptores (R_1 y R_2), también piezoeléctricos. Estos dos receptores están localizados a 3 y 5 pies de distancia del transmisor. El primer receptor (R_1) mide la amplitud de la primera señal de energía (CBL) mientras R_2 registra la visualización completa del tren de ondas (VDL). En el tren de ondas registrado por el receptor de tres pies, el primer eco E_1 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.⁽²⁴⁾

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.

Del tren de ondas registradas por el receptor, el primer pulso E_1 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, para obtener su máxima amplitud la sonda deberá mantenerse centralizada debido a sus características omnidireccionales.

Existen otras configuraciones de la herramienta CBL (por ejemplo, un solo receptor localizado a 4 pies, etc.), pero son más raras, es decir, no se usan generalmente y se hablará del modelo que es más conocido y utilizado en la industria petrolera. La distancia entre los dos receptores (L) es equivalente a 2 pies y fue determinada experimentalmente como siendo la mejor entre todas las condiciones de diámetro de la tubería de revestimiento y el diámetro del agujero.

El transmisor emite continuamente pulsos sónicos con longitud equivalente a 50 microsegundos y una frecuencia de 10 a 60 kHz, generalmente 20 kHz. Estos pulsos se expanden de manera omnidireccional, es decir, en todas direcciones. La señal sale del transmisor, pasa por el fluido que está dentro de la tubería de revestimiento, recorre por el cemento y la formación y finalmente alcanza los receptores.

Cuando la onda de energía alcanza la tubería de revestimiento, es refractada de acuerdo a la ley de Snell: en un determinado ángulo (el ángulo crítico), la refracción es vertical, es decir, paralela a la T.R. Esta onda es la que determina la amplitud de la primera señal al alcanzar el receptor de 3 pies y el tiempo que le toma a la onda en llegar es conocido como tiempo de tránsito, el cual se verá más adelante detalladamente.

Parte de la onda también se dirige a la formación. Nuevamente, sale del transmisor y pasa por el fluido dentro de la tubería de revestimiento, por el cemento, la formación y retorna hacia el receptor localizado a 5 pies. Los ecos de ésta onda son registrados como un tren de ondas completo y no solamente la medición del pico de la onda, el tren de ondas le corresponde al VDL (Variable Density Log).

Para comprender mejor el funcionamiento de un registro sónico, se hace una analogía, la cual se compara a la tubería de revestimiento con una campana, para ejemplificar lo que sucede en el pozo. Al igual que una campana cuando es golpeada, la tubería suena cuando es sometido a una vibración producida por la energía acústica. El volumen (amplitud) del sonido resultante en la campana dependerá de dos factores⁽²¹⁾:

- > Tamaño. Cuanto mayor sea la campana, mayor será la señal.
- > Estado. Si la campana está bien sujeta, la energía será amortiguada por el material que la sujeta, reduciendo la señal de retorno, pero si la campana está libre no habrá amortiguación de ésta energía.

Una tubería libre, es decir, sin cemento, devolverá una señal de amplitud alta, o sea, con mayor ruido, reverberará por un periodo más largo que una T.R bien cementada. Cuando la campana es sostenida con la mano, la señal de amplitud que retorna es baja. Lo mismo ocurre con la T.R, cuando está bien cementada. Por lo tanto 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 (fig.IV.10a). De acuerdo a las características omnidireccionales del transmisor, se debe mantener una centralización perfecta de la sonda en la tubería, para obtener la máxima amplitud de señal, por ejemplo, una excentricidad de ¼" reduce la amplitud

aproximadamente en un 30% (fig.IV.10b). La curva de tiempo de tránsito es útil para reconocer éste efecto así como las anomalías de detección que causan saltos de ciclos.

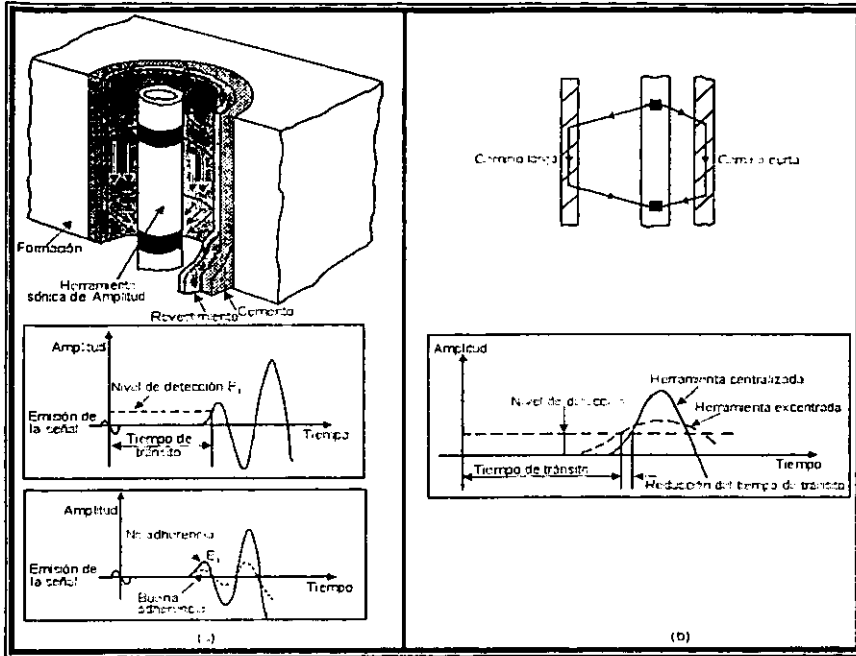


Fig. IV.10. (a) Análisis de la señal de medición, (b) Efecto de excentricación de la herramienta sobre la medición de amplitud⁽²⁴⁾

Este fenómeno de reducción de la amplitud, llamado atenuación, es una función del tipo de T.R, características de la lechada, espesor del cemento y uniformidad (homogeneidad) del cemento detrás de la T.R.

En la figura IV.11 podemos observar lo que se ha mencionado, además podemos ver que la energía que sale del transmisor es igual en los dos casos, lo que cambia es la energía que retorna al receptor. En éste caso, la energía recibida es menor en una T.R bien sostenida confirmando que la atenuación es mayor.

La onda de compresión que viaja a través de la T.R es la primera en alcanzar el receptor de 3 pies, y los primeros 3 picos de la señal son denominados E_1 , E_2 y E_3 , respectivamente. Cuando la adherencia entre la T.R y el cemento es buena, la amplitud de E_1 , E_2 , y E_3 es baja, ya que las amplitudes son inversamente proporcionales a la atenuación de la señal, es decir, mayor atenuación, menor amplitud y viceversa.

Anteriormente se mencionó que la atenuación varía de acuerdo al tipo de lechada y al porcentaje del volumen anular lleno con cemento. Antes era común decir que la atenuación era proporcional a la densidad de la lechada, sin embargo esto se debía a

que las lechadas livianas, usadas tiempo atrás contenían simplemente más agua (lechadas extendidas con bentonita y silicato), esto hacía que se redujera su impedancia. En la actualidad existen lechadas livianas de alta resistencia a la compresión, que tienen mayor atenuación que lechadas extendidas convencionales de densidades equivalentes. Las tablas y nomógrafos desarrollados empíricamente para medir algunas de éstas lechadas convencionales no son totalmente confiables para calibrar la herramienta para todos los trabajos, utilizando diversos tipos de lechadas.

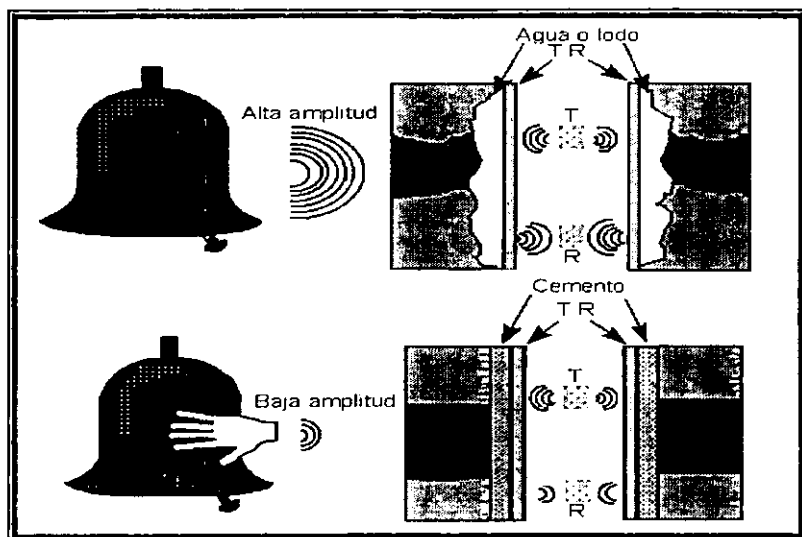
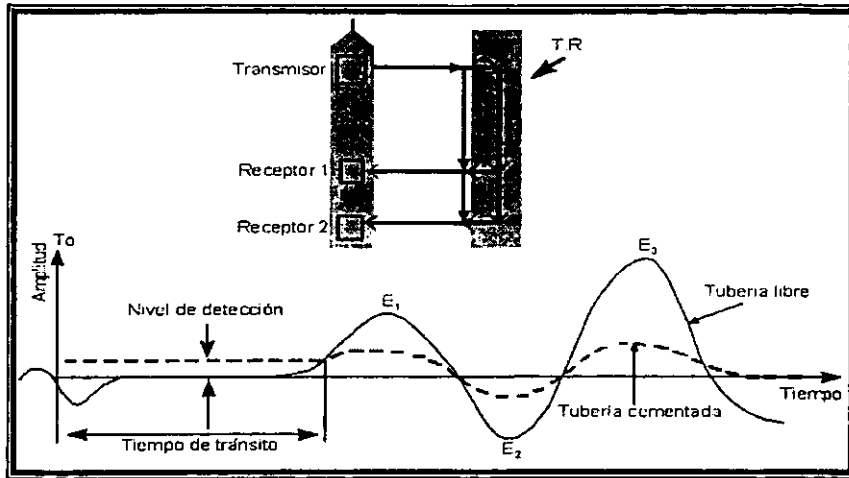


Fig.IV.11. Comparación de una campanilla con la T.R. para interpretar la amplitud⁽²³⁾

En un CBL son realizadas dos mediciones: el tiempo de tránsito (Δt) y la amplitud de E_1 .

Cuando la sonda emite un pulso sónico, empieza a trabajar un reloj electrónico que registra el tiempo que lleva la primera señal en alcanzar el receptor. Cuando la onda choca contra la pared interna de la T.R., es reflejada de acuerdo a la ley de Snell: un determinado ángulo de ataque (denominado ángulo crítico) hace que la señal retorne paralelamente a la superficie de la T.R. Esta onda sigue bajando hasta alcanzar el receptor donde es registrada. El tiempo que lleva la señal viajando es denominada, como se dijo anteriormente, tiempo de tránsito (Fig.IV.12).

La sonda tiene un filtro para evitar el registro de ruidos que podrían interferir en la interpretación de E_1 . Se habla de un nivel de detección, el cual es un valor predeterminado que hace que el receptor no registre nada hasta que este valor sea alcanzado. De esta manera se elimina la interferencia de otros ruidos presentes en el pozo que podrían dificultar la interpretación de los datos. Por lo tanto, éste filtro tiene un papel muy importante en la correcta evaluación del registro.^{(28), (29)}

Fig.IV.12. Principio de medición del CBL⁽²⁴⁾

IV.3.1. Tiempo de tránsito⁽²³⁾

El tiempo de tránsito es el tiempo de llegada de la primera señal con un valor superior al nivel de detección. Normalmente se utilizan los picos positivos (E_1) y no los negativos (E_2). Es utilizado como método de control de calidad de la operación, ya que nos permite confirmar la centralización de la sonda e identificar la presencia del salto de ciclo, estiramiento y formaciones rápidas.

La herramienta es muy sensible a la descentralización, especialmente cuando se trata de una sonda pequeña en una T.R grande. Si el Δt disminuye más de 4 microsegundos, la amplitud CBL se deteriora y no es posible la evaluación. Lamentablemente es muy común encontrar herramientas de 1 11/16" y 2 3/8" siendo utilizadas en una T.R de 7", lo que no es recomendable, pero lo hacen por una aparente reducción de costo. Es difícil entender tal procedimiento ya que el grado de confiabilidad es tan bajo y son tan altos los riesgos de una mala interpretación de los datos reales, lo que puede llevar a costosas e innecesarias operaciones de recementación.

Cuando el tiempo de tránsito aumenta y la amplitud CBL es pequeña, significa que existe una buena adherencia.

El tiempo de tránsito es una de las formas de control de calidad de un registro sísmico. La observación del comportamiento del Δt puede confirmar si la lectura es válida o no. Siempre se toma como base el Δt en una tubería libre conocido como tiempo crítico de viaje.

El tiempo de tránsito es un buen indicador inicial de la condición general del cemento, mayor tiempo de tránsito es normalmente un buen indicio. En una situación constante,

sin contar los factores que afectan el Δt como cambio de fluido, espesor de la T.R, etc, la ocurrencia de un incremento en el Δt es un indicio positivo ya que es indicación de un salto de ciclo o estiramiento. Y en ambos casos habrá buen cemento, o sea, son indicación de buena adherencia y de baja amplitud, la amplitud puede estar alta pero esto ocurre cuando hay un salto de ciclo en una herramienta de modo de apertura flotante.

Por otro lado, la reducción del tiempo de tránsito es una indicación negativa: ya que puede ser ocasionada por una descentralización, lo que hace irreal los valores de amplitud, como también es indicativo de presencia de una formación rápida, aunque exista una buena adherencia.

La existencia de señales de la formación en el VDL es un hecho positivo ya que es necesario que haya un buen cemento con buen acoplamiento acústico a la T.R y a la formación para que las señales sean visibles. Sin embargo en formaciones muy atenuantes, como arcillas muy duras o areniscas poco consolidadas y especialmente cuando están a baja profundidad, el VDL a veces no muestra nada.

IV.3.2. Salto de ciclo y estiramiento⁽²³⁾

Salto de ciclo y estiramiento son dos fenómenos que pueden afectar la interpretación de la curva de amplitud en un CBL (fig. IV.13).

Salto de ciclo. Ocurre cuando la amplitud de E_1 es tan baja que no logra alcanzar el nivel de detección pre-establecido (normalmente de 5 mV). En este caso, la herramienta no logra leer E_1 y sí E_3 . Como E_3 normalmente tiene una amplitud mucho mayor que E_1 , la curva del CBL se despegaba, dando una impresión equivocada de que el cemento es malo.

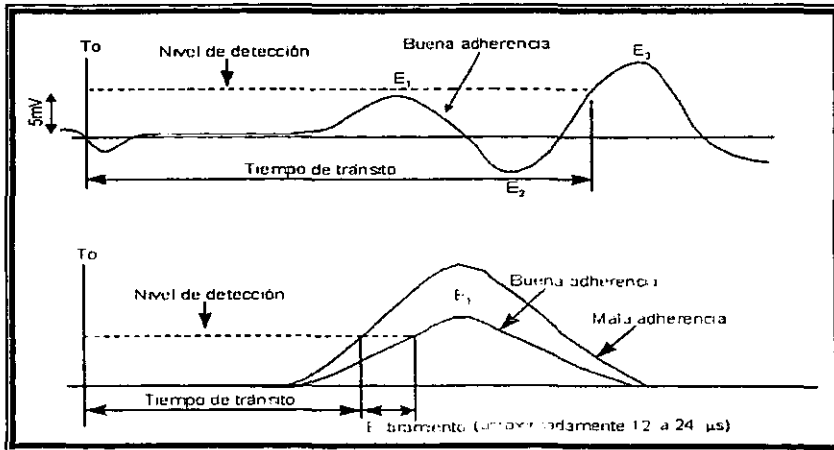


Fig.IV.13. Salto de ciclo y estiramiento⁽²³⁾

Sin embargo, ocurre justamente al contrario, el estado del cemento y la adherencia del cemento es muy buena, tanto que el valor de la amplitud está por debajo del nivel de detección, es decir la amplitud de la señal es mínima.

El salto de ciclo es identificado por el tiempo de tránsito mayor de E_3 , por lo tanto identificamos el salto de ciclo cuando hay un incremento pronunciado en la curva de Δt (un salto de aproximadamente $50 \mu\text{s}$). Por supuesto si esta curva no es registrada, no será posible confirmar si la herramienta está leyendo E_1 o E_3 .

El salto de ciclo no debe ocurrir en altas amplitudes. Si la amplitud es alta (mayor que 2 mV) y la curva de Δt indica la existencia de saltos, quiere decir que algo andará mal en la herramienta.

El Estiramiento. Este ocurre cuando la amplitud de E_1 es muy baja pero aún superior al nivel de detección. Como la amplitud es baja, el tiempo de tránsito se estira o dilata un poco (unos 12 o $14 \mu\text{s}$, lo que equivale hasta 25% de la longitud de la onda). No llega a ser un salto completo como el salto de ciclo (o sea, la herramienta sigue leyendo E_1 y no E_3), pero del mismo modo indica la presencia de un buen cemento y buena adherencia.

Cuando ocurre estiramiento pero los valores de amplitudes registrados en el CBL son elevados, es una indicación de que existe un problema con la herramienta. Otra posibilidad es la interferencia de otros factores como un reducido espesor del cemento y un alto contraste de impedancia acústica entre el cemento y la formación.

IV.3.3. Lecturas de la amplitud

Existen dos formas para medir la lectura de la amplitud, por lo que, la herramienta tiene una ventana de medición que es el intervalo de tiempo donde se pueden registrar los valores de la amplitud de E_1 . Estos dos tipos de mecanismos que activan ésta ventana, conocidos también como modos de abertura son⁽²¹⁾:

1. Abertura Fija. El momento en que ésta ventana se abre y el tiempo que permanecerá abierta son constantes y preseleccionados por el operador antes de bajar la herramienta.

En éste modo, el operador selecciona manualmente el tiempo a partir del cual se abrirá la ventana de medición, conocido como NMSG (Near Minimum Sliding Gate). Cuando la ventana se abre, la herramienta registra el máximo valor de amplitud encontrado. Para seleccionar el NMSG, el operador normalmente busca una sección de tubería libre y registra el tiempo de tránsito de las señales de la tubería de revestimiento. Este Δt será el valor de referencia para la calibración, que se hace configurando la herramienta para abrirse un poco antes del Δt de la tubería libre, normalmente unos $10 \mu\text{s}$, sin embargo, dependiendo del tipo y espesor de la tubería de revestimiento otros valores pueden ser seleccionados.

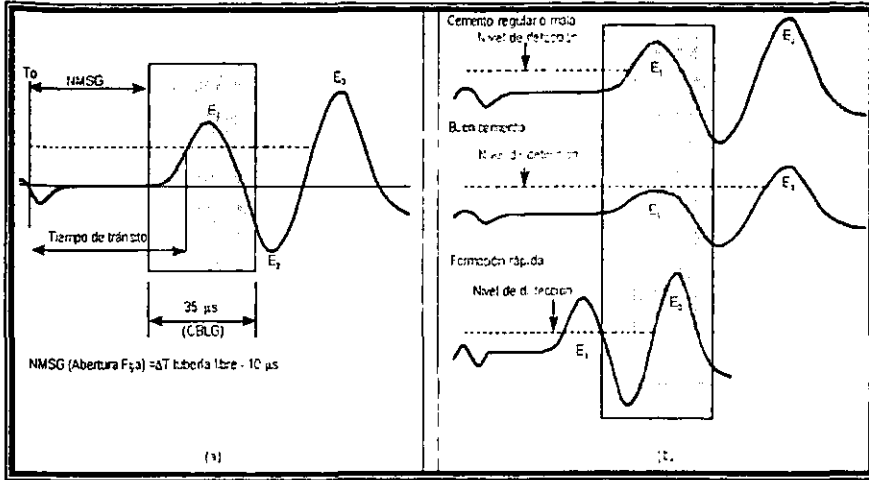


Fig. IV.14. (a) Abertura Fija, (b) Ejemplos de apertura fija⁽²³⁾

El tiempo de apertura de la ventana, conocido como CBLG (Cement Bond Logging Gate) es alrededor de $35 \mu s$, pero algunas veces se puede utilizar hasta $45 \mu s$. Si es muy corto, la máxima amplitud registrada no corresponde al pico de E_1 y si es muy largo se corre el riesgo de medir E_3 en lugar de E_1 .

La ventaja de éste sistema es que siempre medirá un mismo E_1 , si el cemento es muy bueno y si ocurre un salto de ciclo. La desventaja es que si hay un cambio en el Δt ocasionado por una distinta velocidad sónica (cambio de fluido), E_1 va a ocurrir más temprano y la amplitud medida no será la correcta. En la actualidad es el más utilizado.

En la figura IV.14a podemos observar las características que presenta la ventana de medición cuando es fija y la figura IV.14b se observan algunos ejemplos. A continuación se describen estos ejemplos para una mayor comprensión:

Cemento Regular o Malo. La amplitud de E_1 es alta y ocurre en un intervalo dentro de la ventana de medición. La herramienta mide correctamente el Δt y la amplitud del CBL.

Buen Cemento. La amplitud de E_1 es muy baja y es inferior al nivel de detección. Por lo tanto, el Δt no lee E_1 y si E_3 , lo que se conoce como salto de ciclo. El CBL (amplitud de E_1) si es medido correctamente.

Formación Rápida. El tiempo de tránsito es medido correctamente, ya que la onda E_1 ocurre antes del NMSG. El CBL tampoco lee E_1 y si E_3 .

2. Abertura Flotante. El tiempo de apertura es constante pero el momento de abrir la ventana no lo es y va a depender de lo que ocurrió en el ciclo anterior, es decir, la ventana de medición es activada basada en el tiempo de tránsito del ciclo anterior.

En esta condición la abertura es variable y no fija. La ventana de medición es activada después que la herramienta toma como base el Δt medido del ciclo anterior. Por esto se llama de abertura flotante. La abertura ocurre en el tiempo de transito de la lectura anterior menos SGW (Sliding Gate Width) que es normalmente alrededor de 80 μs . El tiempo de apertura de la ventana es un poco más largo que el utilizado en el modo de apertura fija, de modo que debe ser más flexible en el caso de cambios en el Δt . La abertura ocurrirá siempre después de AMSG (Amplitud Minimum Sliding Gate).

Algunas herramientas son diseñadas para que la ventana se abra cuando la amplitud de E_1 alcanza el valor por encima del nivel de detección. En este caso, el tiempo de apertura de la ventana es muy pequeño, para evitar que se mida parte de E_3 .

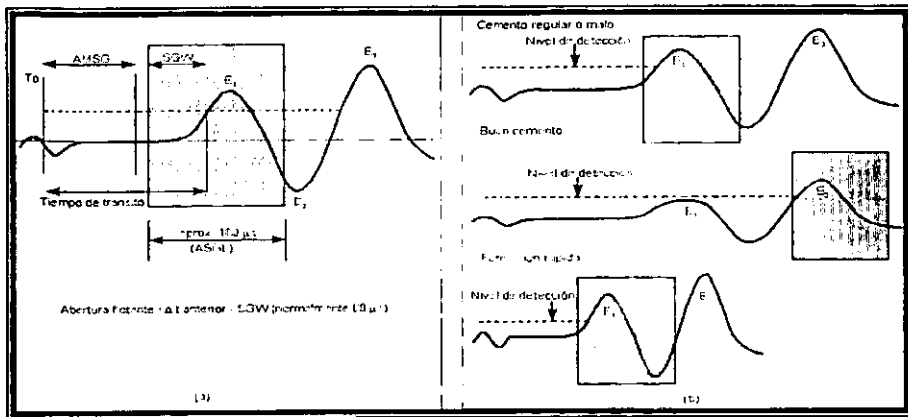


Fig. IV.15. (a) Abertura Flotante, (b) Ejemplos de abertura flotante⁽²³⁾

La ventaja es que si hay un cambio en el Δt , la herramienta automáticamente corregirá el momento de abrir la ventana de medición, es decir, permite una lectura correcta del pico de E_1 independientemente de cualquier variación en el Δt , ya sea ocasionado por un cambio de fluido o espesor de la tubería de revestimiento. El problema es que si el cemento es muy bueno (y por lo tanto la amplitud de E_1 muy baja), la herramienta saltará hacia E_3 y tanto la amplitud como el Δt serán erróneas.

En la figura IV.15a podemos observar las características que presenta la ventana de medición cuando es flotante y en la figura IV.15b se observan algunos ejemplos. Y para poder entender mejor estos ejemplos a continuación se explican brevemente:

Cemento Regular o Malo. La herramienta mide correctamente el Δt y la amplitud del CBL.

Buen Cemento. La amplitud de E_1 es muy baja y es inferior al nivel de detección. Por lo tanto, el Δt no lee E_1 y si E_3 , llamado salto de ciclo. El CBL también es afectado ya que la ventana es seleccionada de acuerdo con el Δt , por lo tanto, mide E_3 y no E_1 .

Formación Rápida. El Δt y el CBL miden correctamente la onda E_1 , sin embargo E_1 es proveniente de la formación, por lo tanto los datos registrados no son representativos.

Ambos casos son extremadamente sensibles a la existencia de formaciones rápidas. En este caso, tanto la amplitud como el tiempo de tránsito registrado no tienen ninguna representatividad, ya que son reflejos de la formación y no del estado del cemento.

IV.3.4. Atenuación

La atenuación es la medida de energía perdida por una onda propagada desde el momento que es generada por el transmisor hasta ser medida por el receptor. Varios factores afectan el grado de atenuación de una onda, como son: la velocidad del sonido en el medio, el acoplamiento acústico en la interfase, la distancia entre el transmisor y el receptor, la longitud de onda y las características de las formaciones y del cemento. Por supuesto, el espaciamiento entre el transmisor y el receptor es uno de ellos, ya que cuanto mayor sea la distancia a recorrer, más energía será la perdida. El espaciamiento considerado como más efectivo es el de 3 pies.⁽²⁵⁾

La atenuación puede ser calculada por la siguiente formula:

$$A \text{ (dB/pie)} = -\frac{20}{L} * \log_{10} * E_1 / E_{FP} \dots \dots \dots (2)$$

donde: L = Distancia entre el receptor 1 y 2
 E_1 = Amplitud de la tubería cementada
 E_{FP} = Amplitud de la tubería libre

IV.4 PERFIL DE DENSIDAD VARIABLE

El VDL, Registro de Densidad Variable, es la graficación completa del tren de ondas, medido por el receptor localizado a 5 pies, con color negro para las amplitudes positivas y blanco para las negativas. Es utilizado para complementar los datos registrados por el CBL ya que permite identificar mucho más que simplemente la amplitud de la primera señal al llegar, es de mucha ayuda en aquellas 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.

Las primeras amplitudes en alcanzar el receptor de 5 pies son las señales de la tubería debido a una combinación de la mayor velocidad del sonido en el metal y la proximidad de la tubería de revestimiento con la sonda. Son normalmente amplitudes muy homogéneas (constantes) y dependerán de la adherencia del cemento con la tubería. En una tubería libre, sin cemento en el espacio anular, el VDL debe ser constante con fuertes señales de arribo de la T.R. Distorsiones en forma de V, conocidas como patrones Chevron son visibles en el registro. En una tubería bien cementada, el VDL

presenta poco o ninguna señal de arribo de la T.R, pero sí fuertes señales de la formación (fig. IV.16).

Las señales de la formación son los próximos a ser registrados. Debido a las heterogeneidades de las formaciones, las amplitudes son muy variables, en forma de S, fácilmente se identifican en el registro. En formaciones conocidas como rápidas, es decir, en donde la velocidad del sonido en la formación es mayor que la velocidad en la T.R, las primeras señales arriban antes del E_1 provenientes de la T.R y pueden dar la impresión equivocada de una mala cementación.^{(16). (24)}

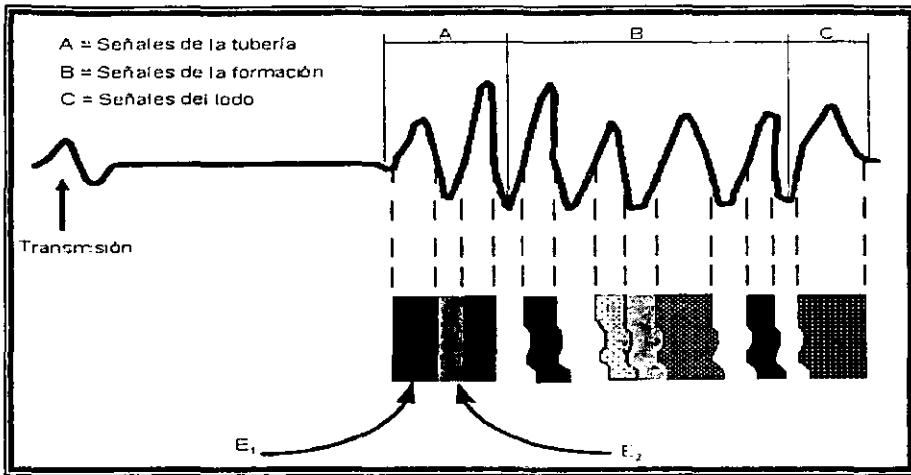


Fig. IV.16. Perfil de densidad variable VDL⁽¹⁶⁾

Las últimas señales son normalmente las señales del lodo o fluido de terminación. Esto es aparentemente contradictorio, ya que son los que están más cerca del transmisor, sin embargo, la velocidad del sonido en los líquidos es menor que en los sólidos, por ésta razón, son las últimas en registrarse. Así como en la T.R, las amplitudes del lodo son muy homogéneas, visibles como líneas verticales muy constantes.

El contraste de colores en un VDL es muy importante, ya que amplitudes altas resultan en mayores contrastes (blanco contra negro), mientras menores sean las amplitudes van a presentar tonalidades grises.

Esta es la razón de que copias del VDL enviadas por fax tienen una resolución muy pobre con relación a su interpretación, ya que el fax no tiene precisión con colores grises. En éste caso se utilizan los VDL con el formato de las ondas y no la grabación por contraste de tonos. Por ejemplo si se tiene un registro de CBL-VDL, en donde la carta se divide en 3 secciones o pistas, tenemos lo siguiente:

La primera pista es utilizada como correlación y medición, es decir, con los datos que presenta esta registro ayudan a comparar mejor el CBL con los otros registros de pozo

abierto (como caliper, resistividad, porosidad, etc). En ésta sección se encuentra la curva de rayos gama (0 a 50 API), que ayuda para identificar la litología de la formación y el CCL que sirve como referencia para los disparos. Se puede medir el tiempo de tránsito (200 a 400 μ s).

La segunda pista presenta los datos registrados por el receptor de 3 pies, que registra la amplitud de la primera curva que retorna a la herramienta (E_1). Amplitud normal, normalmente de 0 a 100 mV, sirve para medir las señales de amplitud altas como el de tubería libre. Amplitud amplificada, normalmente de 0 a 25 mV, sirve para definir la amplitud en una zona 100% cementada, dato que será útil para el índice de adherencia.

La última pista corresponde al VDL, que es la visualización del tren de ondas registrado por el receptor, localizado a 5 pies. El VDL complementa los datos del CBL ya que éste no registra la adherencia entre el cemento y la formación. Este tren de ondas puede ser graficado en dos formas, una como contraste de tonos y la otra como formato de onda. Cada una tiene sus ventajas, el de contraste es de más fácil interpretación, sin embargo, en el de formato de onda es menos factible de perder su precisión cuando se desea enviarlo por fax o en un fotocopiado, los dos van de 200 a 1200 μ s.

IV.4.1. Índice de adherencia^{(16), (24)}

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.

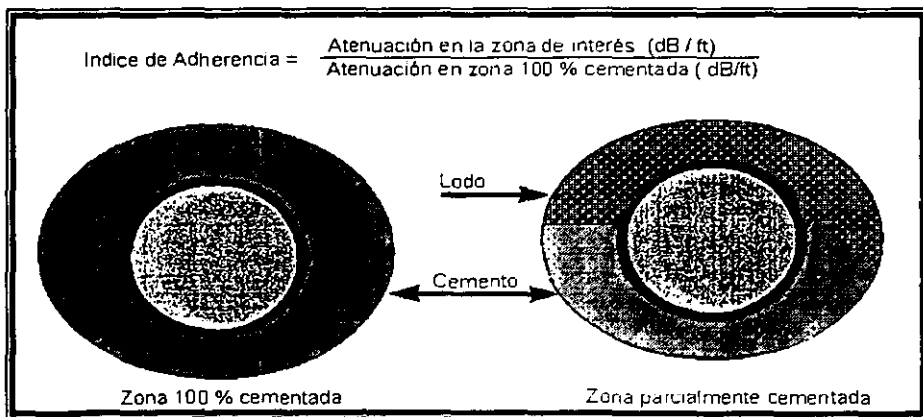


Fig. IV.17. Índice de Adherencia⁽¹⁶⁾

El índice de adherencia es un valor que ayuda a evaluar de manera cuantitativa el estado del cemento (fig. IV.17). La atenuación de la energía acústica es función de la adherencia y atenuación del cemento. A través de estudios experimentales se llegó a la

conclusión de que el comportamiento era proporcional a la circunferencia de la T.R lleno con cemento.

La gráfica de la figura IV.18a permite a partir de la amplitud, calcular directamente la atenuación de la onda. La experiencia adquirida en el mundo entero, ha demostrado que, en condiciones normales de cementación, un índice de adherencia de 80% (0.8) o más por una longitud de cemento que varía de acuerdo al tamaño de la T.R (desde 3.5 pies para una T.R de 5", 10 pies para 7" y 15 pies para una T.R de 9 5/8") será lo suficiente para asegurar un buen aislamiento (fig. IV.18b). Para calcular el índice de adherencia, calculamos la atenuación de una zona totalmente cementada y comparamos con la atenuación en la zona de interés.

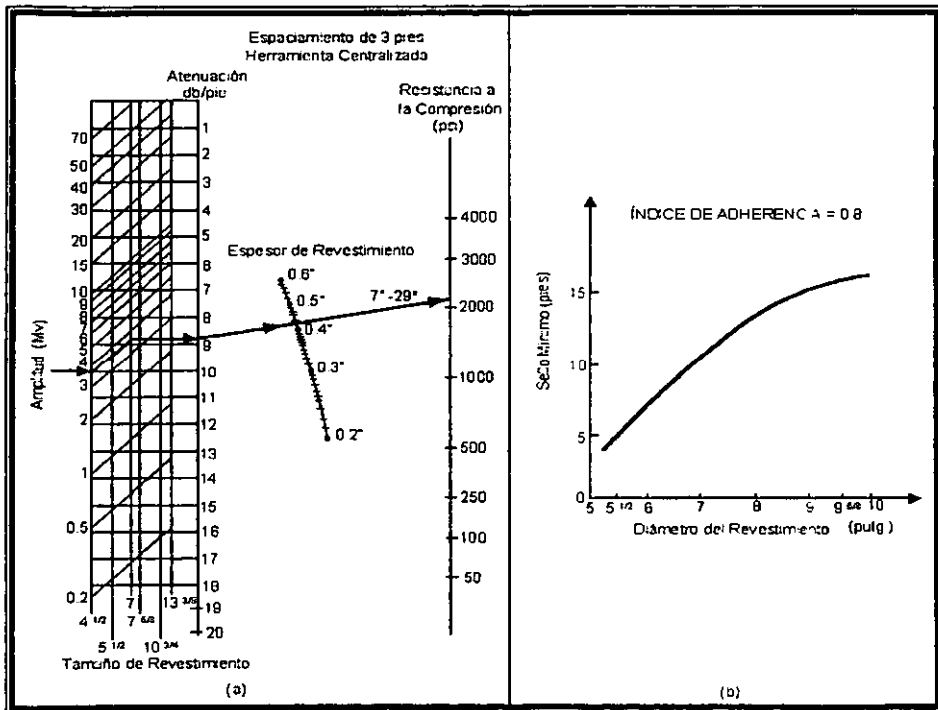


Fig. IV.18. (a) Evaluación cuantitativa del registro CBL, (b) Longitud mínima de intervalos para formar un sello⁽²⁴⁾

Sin embargo ésta técnica tiene sus limitaciones:

- Encontrar un valor correcto y representativo de atenuación calculado en la zona de referencia (100% cementada)
- Efectos ambientales (presión, temperatura, cambio de fluido o espesor de la T.R, etc) sobre el valor de referencia

- No se aplica cuando existe microanillo o formaciones rápidas
- Cuando existe una película de lodo (especialmente base aceite) sobre la T.R, hace que se reduzca la adherencia y cambia la atenuación
- Problemas con revestimientos concéntricos y espesor muy reducido de cemento
- Cambio de lechada (cambio de la impedancia acústica, z)

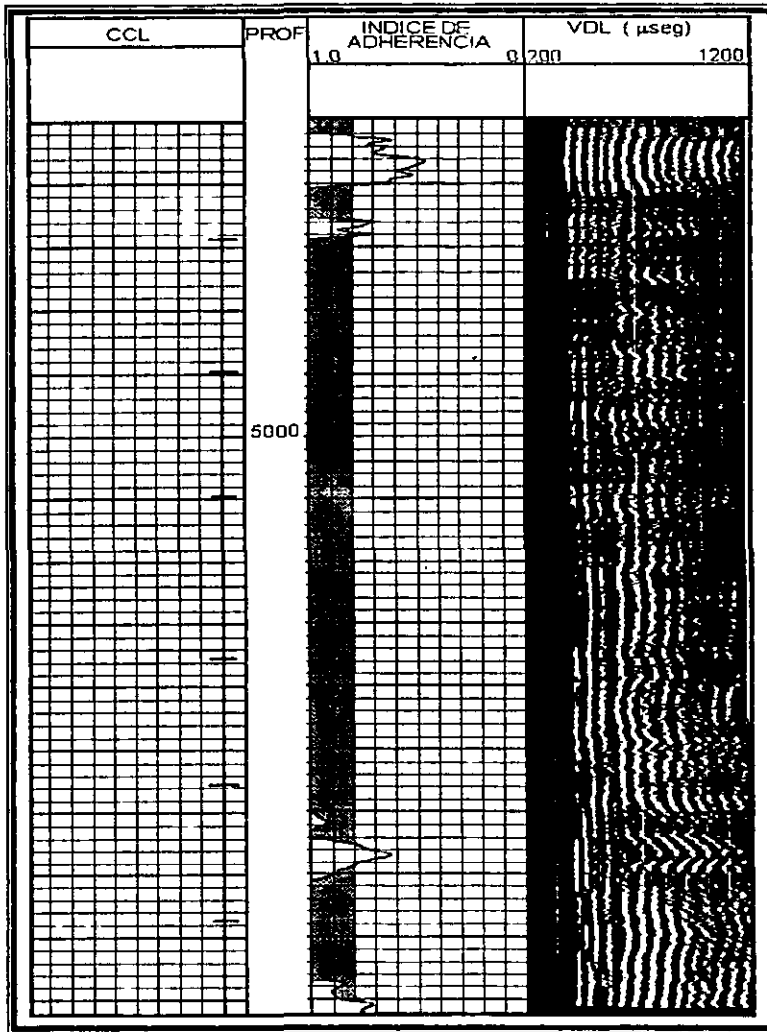


Fig. IV.19. Presentación CYBERBOND (computación de la unidad CSU)⁽¹⁶⁾

También el índice de adherencia se puede calcular mediante el CYBERBOND del CSU, el cuál permite la obtención directa de una curva de éste. Por medio de un sombreado gris se hacen resaltar los intervalos con un índice de adherencia superior a 0.8, mientras que unos marcadores en el carril de profundidad delimitan, según el diámetro de tubería, los intervalos cuya longitud permite obtener un aislamiento adecuado (fig. IV.19).

IV.4.2. Factores que afectan a la lectura de un registro sónico

Ciertas condiciones poco usuales son la causa de un comportamiento anómalo de las curvas de los registros, para detectarlas es necesario comparar cuidadosamente las curvas de tiempo de tránsito, amplitud y registro de Densidad Variable.

Descentralización. La descentralización es uno de los factores que más afectan las herramientas sónicas ya que los datos registrados pierden su precisión. Una descentralización de 0.5 pulgadas puede reducir la amplitud de E_1 en más de 50%.

El control de calidad de la operación es hecho con la curva de tiempo de tránsito, sin ésta curva es imposible evaluar la confiabilidad de los parámetros registrados. Esta evaluación consiste en comparar el tiempo de tránsito de la zona observada contra el tiempo de tránsito de una sección de tubería libre. Un tiempo de tránsito menor normalmente indica dos cosas⁽¹⁶⁾:

1.- Mala centralización. La amplitud es más baja

2.- Formaciones Rápidas. La amplitud puede ser baja o elevada pero el VDL presenta señales de formación arribando muy temprano (antes de la T.R).

Una reducción en el tiempo de tránsito de más de 4 μ s es considerada inaceptable. Es decir en una descentralización de la sonda, va a ser menor la amplitud y el tiempo de tránsito, el uso de herramientas baratas no es recomendado, por ejemplo, una sonda de 1 11/16" en T.R de 7" o 5 1/2" resulta en una pobre resolución.

Microanillo. En ciertas condiciones, un pequeño espacio anular logra formarse entre la tubería y el cemento. Por lo que el microanillo es el espacio pequeño que se logra formar en el espacio anular, entre la tubería y el cemento, es decir, es un pequeño espacio de más o menos 0.1 mm entre la T.R y el cemento que impide el acoplamiento acústico pero no impide el aislamiento hidráulico. 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, también puede ser motivado por la condición física de la superficie de la tubería. Al contrario de una canalización, el microanillo normalmente no permite comunicación entre zonas (excepto microanillos muy grandes en zonas de gas). Sin embargo es difícil identificarlo en el CBL. La amplitud de E_1 es muy alta y las señales de la T.R son más fuertes en el VDL.

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 liviano (agua o aceite). El espesor del anillo así creado, es normalmente insignificante y no compromete al buen aislamiento hidráulico de los distintos intervalos productores (del orden de 0.01"). 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 posteriormente, es insensible a éste fenómeno.

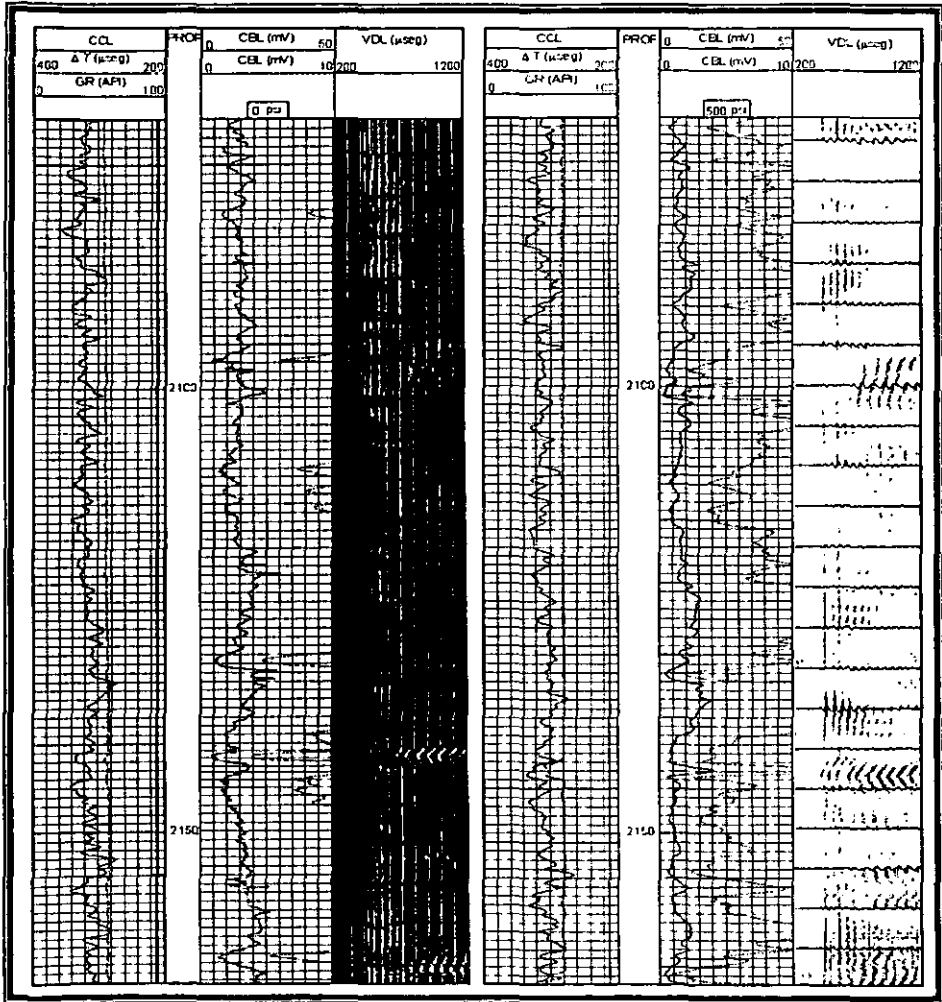


Fig. IV.20. Efecto de microanillo sobre las mediciones del registro CBL -VDL. Registro con y sin presión⁽¹⁶⁾

El microanillo se podrá detectar fácilmente por medio de una corrida adicional CBL-VDL, con un aumento suficiente de presión en la tubería con el fin de cerrar el espacio anular (la experiencia ha demostrado que con una presión máxima de 500 lb es suficiente) fig. IV.20. Existen varios tipos de microanillos:

Microanillo Térmico. Este es ocasionado por el calentamiento provocado por la reacción exotérmica de la hidratación del cemento. El calor hace que se dilate la T.R y cuando la temperatura vuelve a su normalidad las paredes de la T.R encogen, ocasionando la separación del cemento fraguado. También pueden ocurrir por el contacto con fluidos de terminación más fríos.

Este tipo de microanillo no ofrece mayores problemas para la lectura, basta con presurizar la T.R con unas 1000 psi. Es el más común y ocurre en la gran mayoría de los pozos. Es muy errático, varía con la profundidad, debido a diferentes espesores de cemento y distintas conductividades térmicas de la formación. En zonas porosas, como lutitas y arenas, el calor se disipa más lentamente que en una caliza de baja porosidad. Zonas ensanchadas tienen mayor volumen de cemento, lo que resulta en mayor temperatura aplicada a la T.R.

Microanillo Mecánico. Este ocurre cuando se aplica algún tipo de esfuerzo a la tubería mientras el cemento se encuentra en un estado plástico, o sea, cuando se deforma y no vuelve a su estado original, en otras palabras, ocurre cuando hay presión interna en la T.R durante la cementación. Puede ser ocasionado por aplicación de presión en la T.R al dejar el pozo cerrado, ya que con esta presión se provoca de nuevo el desplazamiento, por lo tanto el fluido empieza a dilatarse por el calor, así como pruebas de presión en la T.R y BOP, movimiento de la tubería, también ocurre cuando se mueve la tubería durante el fraguado, etc. En el caso de la cementación forzada, es muy probable que resulte un microanillo ya que toda la operación es hecha con presión en la tubería. Para solucionar éste tipo de microanillo se requiere de una presión mayor para ser superado.

Microanillo Inducido. Este es el más complicado ya que no siempre es eliminado con la aplicación de presión entre un rango de 1000 a 2000 psi. Si el fluido de desplazamiento es un lodo de 13 lb/gal y el fluido de terminación es una salmuera de 8.5, la diferencial de presión en un pozo de 10000 pies, será de 2350 psi, sin contar el efecto de un microanillo térmico. En este caso hay que eliminar primero la diferencial de presión para después aplicar los 1000 a 2000 psi de presión.

Canalización. El efecto de canalización detrás de la tubería constituye una de las limitaciones mayores 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 de cemento. Algunas veces se pueden presentar las siguientes situaciones⁽²⁴⁾:

- a.- Canalización a lo largo de la tubería
- b.- Canalización detrás del cemento
- c.- 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.

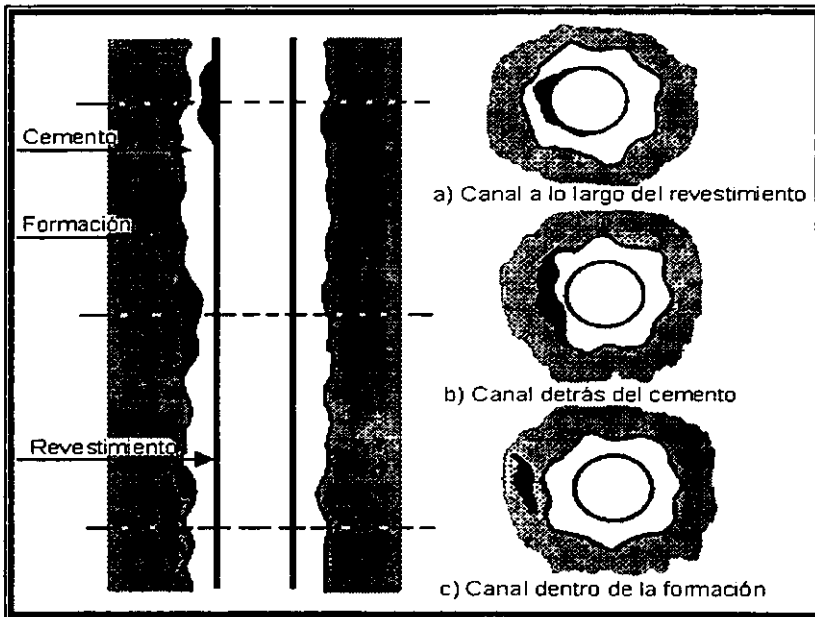


Fig. IV.21. Configuración de canales⁽²⁴⁾

En la figura IV.21 se observan los tipos de canales, pero no siempre es aplicable cuando existen casos de canalización, los canales podrán causar movimientos significativos de fluidos cuando son lo suficientemente continuos.

La canalización tiene un efecto en los registros muy similar al microanillo. Las señales de la formación son normalmente visibles en el VDL mientras que las amplitudes en el CBL son altas o moderadas. Diferente al control del microanillo, la aplicación de presión no mejora la lectura, ya que el problema no es acoplamiento acústico entre la T.R. y el cemento y si una mala atenuación del cemento en el espacio anular.

Se ha observado que al presurizar la T.R no hay mejoras, ya que las señales son muy similares a la corrida sin presión. Hay que asegurarse que no se trate de un fuerte microanillo, muchas veces 1000 o 2000 psi de presión no es suficiente para cerrar el microanillo. Otra manera de saber cual es el problema, es checando la profundidad del tope del cemento, si está muy por encima del estimado, es posible que sea una canalización.

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

- Herramienta CET, que proporciona un análisis circular de la capa de cemento alrededor de la tubería de revestimiento
- Registro de temperatura o de ruido para detectar movimientos de fluido detrás del revestimiento
- Pruebas de comunicación: se perforan intervalos pequeños para verificar si existe comunicación de presión entre ellos

Limitada resolución azimutal y vertical. La lectura de un registro sónico es muy afectado por la pobre resolución vertical de la herramienta. La lectura es un promedio de los datos medidos a 360 grados

Fluido en la T.R. El fluido afecta la medición del sónico, ya que fluidos distintos tienen valores diferentes de velocidad sónica e impedancia. Por ejemplo, la amplitud de una tubería libre en una T.R de 7" con agua es de 55 mV, pero con lodo de 9.5 lb/gal es de 70 mV. Aparte de la amplitud, también cambia el tiempo de tránsito. Cuando el operador configura la herramienta con modo de abertura fija, el tiempo de tránsito en la tubería libre es utilizado para calibrar la ventana de medición. Si el fluido cambia, la lectura pierde representatividad.

Tipo de formación. Varias características de las formaciones afectan el CBL.

Formaciones Rápidas. En las formaciones cuyo tiempo de tránsito es inferior al del acero, la medición de la amplitud del primer eco ya no es representativa de la calidad del cemento. Estas formaciones generalmente dan 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 seleccionado durante el registro.

Son formaciones en las cuales el sonido recorre más rápidamente que en la T.R, o sea, más rápido que $57 \mu s$, ejemplos de éste tipo de formaciones tenemos a las calizas y dolomías. Las señales de la formación aparecen antes de la T.R en el VDL, si esto ocurre, es indicio de buen cemento y buena adherencia, a pesar de que la amplitud de E_1 sea más alta, de lo contrario la energía no lograría llegar a la formación. No debemos olvidar que tanto la adherencia cemento/T.R como cemento/formación deben ser muy buenas para que las señales de formaciones rápidas aparezcan.

Por ejemplo, si tenemos una zona A que corresponde a una tubería libre, con tiempo de tránsito de 250 μ s y una amplitud de 76 mV y unas zonas B y C las cuales corresponden a formaciones rápidas, con tiempo de tránsito de 230 y 260 μ s respectivamente y una amplitud de 80 mV en ambas, en éste caso no se distinguirían las formaciones rápidas, ya que los patrones en el VDL se asemejarían un poco a los de tubería libre, esto tal vez se deba a la homogeneidad de tales formaciones. Sin embargo un registro de mucha ayuda sería el de rayos gama, ya que en este registro se observan claramente los cambios, debido a que éste se basa en las variaciones en las variaciones de la litología de la formación. Otra manera de identificar la presencia de formaciones rápidas es que la amplitud de las formaciones normales es extremadamente baja, confirmando que el cemento y la adherencia son muy buenos.

Formaciones Lentas. Algunas formaciones como arcillas muy blandas localizadas a baja profundidad tienen velocidad tan baja que sus señales no logran ser registrados a tiempo en el VDL, ya que tardan mucho para llegar.

Formaciones Poco Consolidadas. Ocurren especialmente a bajas profundidades, cuando la presión de sobrecarga es menor. Este tipo de formación atenúa fuertemente el sonido. El VDL no muestra ninguna señal de formación porque sus amplitudes son muy bajas.

Formaciones Plásticas. Normalmente son formaciones que son muy homogéneas, como por ejemplo zonas de sal. El VDL muestra señales constantes, muy similares a las señales de la tubería libre.

Características de la T.R. Cuanto mayor sea la T.R, más largo será el trayecto por entre el fluido, lo que va a aumentar la atenuación de la señal. Esto hace que se reduzca la amplitud de E_1 en la tubería libre. En una T.R cementada, la amplitud es mayor, éste fenómeno es explicado por el mayor espesor del acero, con menor atenuación. Enfrente de los collares ocurre una interrupción del paso de la energía sónica debido a las roscas de las conexiones. Esto da como resultado un efecto en forma de W en el VDL, conocido como patrones Chevron.

Centralización de la T.R. Como ya se ha mencionado anteriormente una T.R descentralizada en contacto con la pared de la formación, mismo con cemento malo o inexistente permitirá un acoplamiento acústico, lo que hará que la energía se propague a la formación. La curva de amplitud será alta, debido a los valores de las otras secciones sin contacto con la formación, pero habrá señales de formación en el VDL.

Tuberías concéntricas. Un liner bien cementado puede mostrar un VDL con informaciones sobre el cemento anterior. Sin embargo, aunque exista una buena adherencia entre el cemento y la T.R anterior, la pared de la T.R resonará demasiado, lo que hace incrementar los valores de amplitudes registrados. Esto puede llevar a una interpretación incorrecta de que el liner está mal cementada, es decir con fuertes señales del liner.

Como recomendación, sería conveniente observar bien el registro en la profundidad de la zapata de la T.R anterior, para ver si logra una buena adherencia entre las dos T.R's y sea un buen indicio.

La resonancia ocasionada por la tubería de la T.R anterior modifica el formato de la curva. Si la amplitud del primer ciclo es mayor que el nivel de detección, la curva de tiempo de tránsito será normal, sin embargo la amplitud será muy elevada ya que la herramienta está leyendo parte del ciclo siguiente. Si el primer ciclo está por debajo del nivel de detección, habrá salto de ciclo pero aún con amplitud elevada.

Si E_1 es mayor que el nivel de detección, el Δt es el previsto y la amplitud muy elevada, si E_2 es menor que el nivel de detección, Δt se presentará con salto de ciclo y la amplitud será muy elevada. Todo esto puede llevar a una cementación forzada innecesaria.

Independientemente de lo que se presente, dará la impresión de una mala cementación, justamente en una zona que se requiere de mayor aislación hidráulica.

La solución debe ser discutida apropiadamente con los expertos, sin embargo, una buena opción es reducir el tiempo de apertura de la ventana para evitar interferencia de E_3 . Este fenómeno no es raro y puede llevar a decisiones equivocadas con relación a disparar y recementar el tope del liner.

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 de 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.

Características del cemento. Un espesor reducido podrá permitir la interferencia de otros factores en la amplitud. Una lechada ligera tiene valores de amplitud más elevados, y demás características como: impedancia acústica, tiempo de hidratación, etc.

Efectos de presión y temperatura. Afectan la velocidad y atenuación del sonido.

Modo de abertura de la compuerta. Estos se mencionan anteriormente a detalle, por lo tanto el modo de abertura puede ser fija o flotante y pueden afectar los valores registrados.

11.3 CONTROL DE CALIDAD DEL CBL-VDL

Antes de evaluar un registro sónico, es importante tener disponible todas las herramientas para un completo control de calidad de los datos. Siendo un registro muy influenciado por factores externos, no se puede decir que una amplitud menor sea necesariamente un mal cemento. Lo que se debe de hacer para hacer el control de calidad es:

En primer lugar tener a la mano una copia del registro de pozo abierto, identificar la profundidad de las formaciones, especialmente las permeables, ya que si hay una retorta del lodo, la amplitud del CBL será menor y es muy poco probable que exista adherencia entre la T.R y la formación. Es importante verificar la litología así como el caliper, ya que pueden encontrarse zonas ensanchadas que pueden tener canalizaciones debido a la mala remoción del lodo y comparar el estado de las zonas problemáticas, ya sean patas de perro, zonas de gas, lutitas, formaciones de bajo gradiente, etc.

También se deben de contar con datos de la cementación como profundidad estimada de cada lechada, impedancia estimada del cemento, problemas durante la operación (interrupción, pérdida de circulación, etc). Calcular la diferencial de presión entre la presión de fondo durante la cementación (con la densidad del lodo) contra el BHP actual (con fluido de terminación), éste valor será importante para calcular la presión necesaria para eliminar el microanillo.^{(26), (27)}

Si se cuenta con una sección repetida, es mejor, tratarse de una doble corrida por un mismo trecho determinado, que es utilizado como comparación de la efectividad de la herramienta. La sonda debe producir la misma respuesta en ambas secciones. El hecho de que la respuesta sea idéntica no quiere decir que la herramienta no tiene problemas, pero si hay discrepancias sabemos que si existe algún error en la medición.

Todavía no hay una norma aprobada por el API para la calibración del CBL y esto lleva a que en algunos casos la calibración sea hecha de manera poco efectiva. Es común que se calibre la herramienta midiendo una sección de tubería libre como si fuera el valor máximo de amplitud y un valor del tiempo de tránsito estimado. Sin embargo, éste proceso puede llevar a una resolución muy pobre cuando se registra la zona cementada, en donde puede haber cambios en la T.R (espesor, diámetro, material, etc) o de fluido.

El registro debe contener los datos del tipo de abertura de la ventana de medición, configuración de la sonda, etc.

La curva del tiempo de tránsito es utilizada para el control de calidad ya que de ésta confirmamos la centralización y sabremos también de cuando las señales pertenezcan a formaciones rápidas. Si la curva del Δt oscila mucho, es indicación de que la herramienta no está centralizada y conque se tenga una pequeña descentralización es lo suficiente para tornar los valores registrados totalmente inútiles.

Se recomienda medir el Δt en una zona de tubería libre, con ello se define el Δt crítico. Cualquier valor que sea registrado con un Δt inferior al Δt crítico es indicación de un mal funcionamiento de la herramienta o tal vez se trate de formaciones rápidas.

Formaciones rápidas son formaciones en las cuales la velocidad del sonido es más rápida que en la T.R, o sea, la lentitud es menor que 57 microsegundos por pie. Cuando se observa la presencia de formaciones rápidas, la amplitud y el VDL no son representativos del estado del cemento, ya que son reflejos de la formación. Pero se considera que es una indicación de un buen cemento con buena adherencia a la formación, de lo contrario no hubiera acoplamiento acústico ni transmisión de ecos.

Se recomienda guardar copias con las escalas, ya que muchas veces no sabemos si la lectura de la amplitud es de 0 a 100 mV o de 0 a 50 mV. Lo mismo pasa con el tiempo de tránsito.

La primera corrida es sin presión, ya que el objetivo es diferenciar el microanillo de una canalización y la segunda corrida es con presión por si existe un microanillo y de esta manera eliminarla.

IV.6 INTERPRETACIÓN DEL CBL-VDL^{(16), (26), (27)}

Es muy importante recordar que es lo que en verdad mide la herramienta. No mide directamente la calidad de la cementación como muchos creen, desafortunadamente la mayoría piensa que un CBL es una fotografía del cemento y que si la amplitud es más alta con un determinado tipo de lechada, esto automáticamente significa que el cemento está peor, pero lo que si mide es la atenuación ocasionada por todo el medio exterior. Por lo que el VDL es únicamente cualitativo, es decir, complementa lo que indica el CBL.

Una buena evaluación del CBL-VDL lleva a comparar todos los datos registrados con los parámetros de la operación y del pozo. Se interpreta el comportamiento de los componentes y se busca evaluar si el cemento existente tiene o no condiciones de ejercer su función.

Lo más interesante es que el CBL es uno de los registros más viejos que existen y que todavía son utilizados en gran escala, sin embargo, los especialistas de las compañías de servicio lo consideran como uno de los más difíciles de interpretar, debido a la complejidad de factores que lo afectan y de la escasa información que estos presentan para una interpretación de estos parámetros.

Efectos de distintas condiciones en el CBL-VDL:

Tubería libre. Alta amplitud en el CBL, corroborado por fuertes señales en el VDL. En ambos casos, los valores son muy constantes (amplitud y Δt). Enfrente de los collares se observan los efectos de las roscas, esto se observa con un pequeño incremento de Δt junto con Chevrons visibles en el VDL.

Buena adherencia entre T.R-Cemento-Formación. Este sería la condición ideal. Las señales de la T.R son prácticamente imperceptibles y las de la formación son muy fuertes. En condiciones óptimas hay estiramiento del Δt debido al formato de onda más plano, indicando buena amortiguación de la energía. Las señales de los collares no son visibles en el CBL ni en el VDL. Cuando la atenuación es más baja que el nivel de detección, se observa un retraso marcante de la curva de tiempo de tránsito (salto de ciclo). Las señales de tubería desaparecen y existen fuertes señales de la formación, en formaciones rápidas puede aumentar la amplitud y afectar el VDL.

Buena adherencia entre T.R-cemento. La amplitud normalmente es baja en el CBL, pero dependiendo del espesor de cemento en el espacio anular puede ser que se tenga reflejos negativos de retorta en frente de la formación, muchas veces esto es indicación de una falta de acoplamiento acústico entre el cemento y la formación. El VDL puede dar cualquier resultado, normalmente no aparecen las señales de la formación.

Formaciones muy atenuantes. Son formaciones que atenúan fuertemente las señales, haciendo que no sean identificadas las señales de la formación en el VDL. Muchas veces esto lleva a que se tenga una mala interpretación y hace creer que no hay buena adherencia entre el cemento y la formación.

T.R recostado en la pared del pozo. Las señales dan unas amplitudes entre medianas y altas, con señales de formación en el VDL, ocurren en pozos desviados y con mala centralización. Una T.R recostado puede proveer acoplamiento acústico con la formación. Normalmente la amplitud es alta ya que casi siempre no hay cemento en esta zona de la T.R.

Zona de gas. Casi siempre es visible por una mayor amplitud en la zona afectada. Esto puede ser indicación de los bolsones de gas propiamente dicho o el efecto de minúsculas burbujas de gas atrapado en la matriz del cemento. Cuando hay presencia de gas no es raro que su interpretación sea confundida con una mala cementación, especialmente si hay un cambio drástico entre el cemento localizado arriba y abajo de la zona de interés, lo que lleva a reparaciones innecesarias. Por lo tanto un cemento con gas atrapado con presión va a tener una impedancia menor. Generalmente el VDL es borroso y el CBL puede tener una amplitud alta o baja.

Formaciones plásticas. Son formaciones muy homogéneas, aparentan como si fuera una tubería libre, pero casi siempre las señales son visibles al final de la escala en el VDL, lo que las vuelve más fácil de ser identificadas.

Canalización y microanillo. La diferencia fundamental entre los dos es que un microanillo no representa peligro para el aislamiento hidráulico de la zona. Ya que una canalización es más seria y puede llevar a pérdida de producción, contaminación de otras zonas, producción de gas por el espacio anular, llevando a consecuencias como contaminación ambiental y problemas de seguridad, etc. El problema es que normalmente en un registro síncrono la respuesta de la herramienta es muy similar en los dos casos: La amplitud es mediana o alta, el VDL puede traer o no señales de formación, dependiendo del espesor del cemento y de la T.R. Una de las características

de una canalización es que la intercalación de un cemento malo a bueno se observa modificaciones muy drásticas en la amplitud registrada, mientras que en el microanillo casi siempre es más uniforme. De este modo podemos decir que con presión la amplitud se reduce sólo en el microanillo.

T.R de mayor espesor. La amplitud es mayor porque la señal resuena más en la superficie metálica del acero, pero el Δt se reduce un poco debido a la mayor proximidad de la pared con la sonda.

T.R de mayor diámetro. Cuanto mayor es el diámetro de la T.R, mayor será el camino por entre el fluido presente en el espacio anular, por lo tanto, mayor atenuación de la señal. Sin embargo si la T.R está bien cementada, la amplitud se reducirá ligeramente ya que el mayor espesor de cemento permitirá una mayor transmisibilidad de la señal hacia la formación.

Dentro de las señales inadecuadas de un CBL en zonas permeables pudieran ser ocasionados por:

- ◆ Presencia de un fuerte filtrado de lodo en frente de la formación impidiendo el acoplamiento acústico entre cemento-formación o atenuando la energía.
- ◆ Hidratación parcial del cemento, dependiendo del tiempo entre la cementación y el registro puede ser que la impedancia acústica del cemento sea baja sin que sea necesariamente una mala cementación.
- ◆ Pérdida excesiva de filtrado del cemento puede ocasionar hidratación parcial o encogimiento del cemento, ocasionando microanillos.

Algunas características que presentan el VDL y el CBL cuando esta cementada la tubería y cuando no lo esta son las siguientes:

Cuando la tubería esta sin cemento el CBL registra un tiempo de transito constante, con un corto salto enfrente de los collares, y la amplitud de E_1 , registrada en la pista central es alta. En el VDL las señales de la tubería son fuertes y existen efectos de Chevron enfrente de los collares.

Cuando la tubería esta cementada la amplitud en el CBL es baja, cuando existe buena adherencia existe lo que se llama el estiramiento o salto de ciclo y en el VDL las señales de la tubería son débiles y son más fuertes las señales de la formación, con fuertes variaciones debido a la poca homogeneidad de la misma. Experimentos de laboratorio han demostrado que la atenuación expresada en db/pie, es proporcional al porcentaje de circunferencia de tubería cementada. Una disminución de la atenuación a valores menores que el 70 u 80% de la máxima atenuación, puede indicar problemas de cementación. La respuesta de la herramienta CBL depende del espaciamiento transmisor-receptor.

La figura IV. 22a muestra la variación de la amplitud registrada en una tubería de siete pulgadas en diferentes condiciones de cementación y para diferentes espaciamientos. En la figura anterior se puede observar que se obtiene un mayor rango dinámico y linealidad con espaciamientos más pequeños. El límite inferior para la selección del espaciamiento es la distancia en la cual la señal que viaja en forma directa a través del fluido del pozo interfiere con la señal proveniente de la tubería, en la utilización de un espaciamiento de 3 pies.

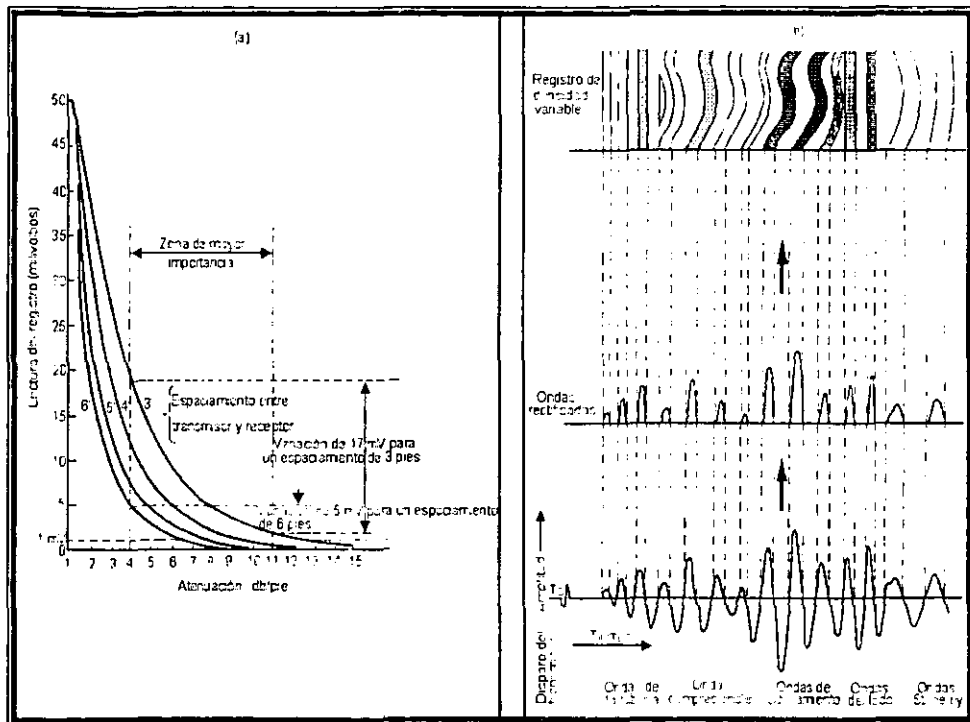


Fig. IV.22. (a) Amplitud y atenuación de una señal registrada en una tubería de 7 pulgadas, (b) Correspondencia entre el tren de ondas y el VDL⁽²⁴⁾

El CBL combinado con el registro VDL registra la densidad variable de ondas. La figura IV. 22b es una presentación cualitativa del tren completo de ondas que llega hasta un receptor ubicado a 5 pies del transmisor. El grado de obscuridad de la onda registrada aumenta con la amplitud de la onda positiva; la parte negativa es registrada en tono claro.

Para poder discriminar mejor entre ondas de tubería y de formación se utiliza el receptor lejano (5 pies). Generalmente, la velocidad del sonido en la formación es menor que en la tubería y al utilizar un mayor espaciamiento se permite una mejor separación entre ambos trenes de ondas.

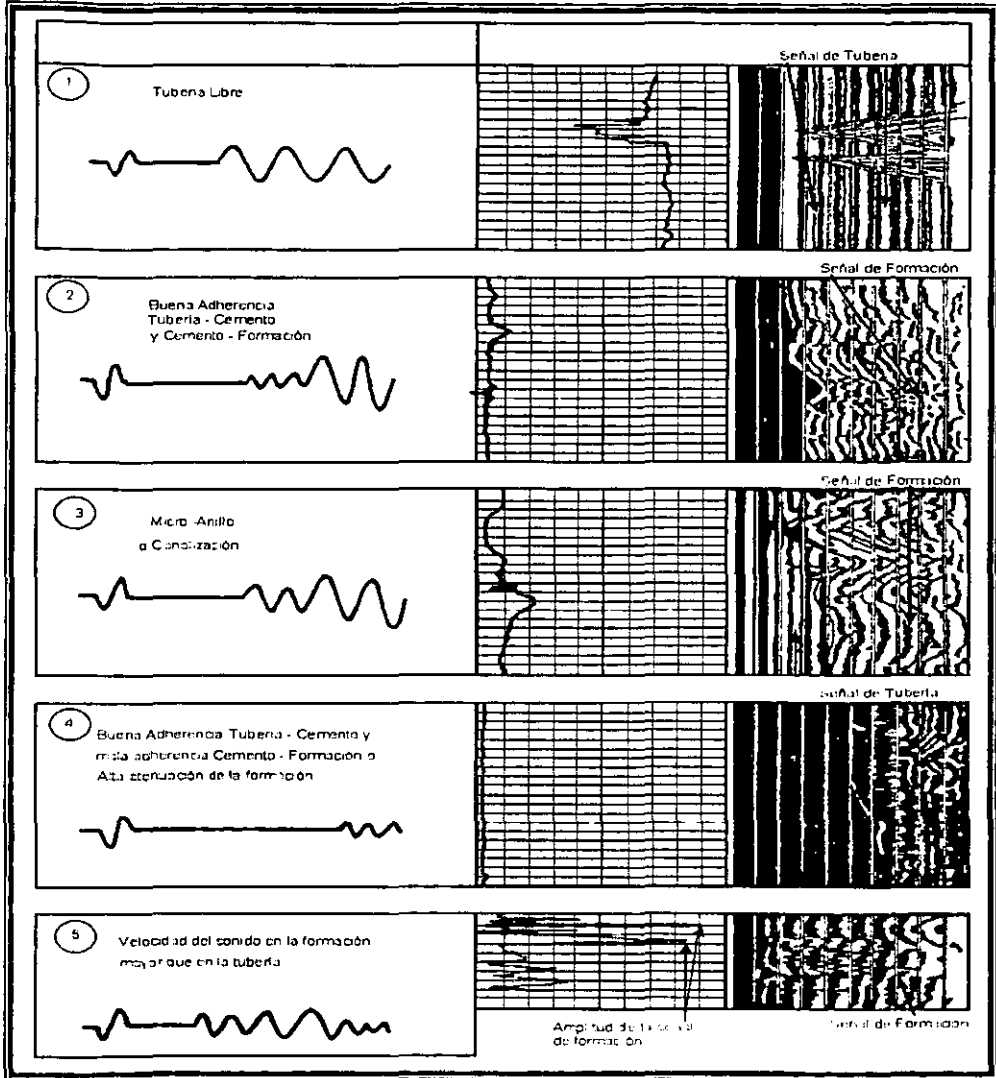


Fig. IV.23. Guía para la interpretación del registro CBL -VDL⁽¹⁶⁾

El VDL es muy útil para confirmar la interpretación del CBL y reconocer condiciones inusuales en las cuales la interpretación del CBL es difícil, por ejemplo cuando:

- La primera onda que llega al receptor de tres pies proviene de la formación y no de la tubería, lo que ocurre cuando la velocidad del sonido en la formación es mayor que en la tubería

- Existe un microanillo entre la tubería y el cemento (el CBL es negativo en estos casos)
- Existe un contacto pobre entre el cemento y la formación

La figura IV. 23 resume la interpretación que se realiza con el CBL-VDL, analizando las amplitudes de las ondas de formación y de tubería. Por otro lado, es importante señalar que:

- Las señales de tubería implican mala adherencia del cemento a la tubería
- Las señales débiles de formación indican mala adherencia cemento-formación o demasiada atenuación en la formación

Normalmente, con el registro CBL-VDL se combinan con un registro de Rayos Gamma, un localizador de coples (CCL) y el tiempo de propagación que tarda la primera onda del transmisor al receptor de 3 pies.

El registro rayos gamma se utiliza para correlacionar con los registros de pozo abierto y el localizador de coples como referencia de profundidad para las operaciones de disparo.

El tiempo de propagación es un control de la centralización de la sonda. Cuando ésta se encuentra centralizada respecto al pozo, la amplitud de la onda disminuye notablemente porque la energía que parte radialmente del transmisor no efectúa interferencia constructiva al llegar al receptor debido a que no existe simetría radial. Si la sonda por cualquier razón se acerca a la pared del pozo durante el registro, disminuyen tanto la amplitud como el tiempo que tarda la primera onda en llegar al receptor.

Un control de calidad adecuado consiste en verificar si la disminuciones en la amplitud no se correlacionan con disminuciones en el tiempo de propagación.

En general, cuando la señal está muy atenuada en zonas bien cementadas no se puede distinguir la primera onda para calcular el tiempo y se detecta el siguiente pico positivo del tren de ondas (salto de ciclos). Esto origina variaciones bruscas del tiempo de propagación hacia valores mayores.

El ejemplo de la figura IV.24 es un caso típico de la ayuda que presta el registro CBL-VDL para tomar decisiones. En el registro de pozo abierto se observa una capa petrolífera entre 5135 y 5142 pies. De 5132 pies hacia arriba y de 5150 hacia abajo existen arenas acuíferas. Para verificar el aislamiento se registró un CBL-VDL y como se aprecia en la figura, muestra muy buena cementación tanto por encima como por debajo de la capa petrolífera.

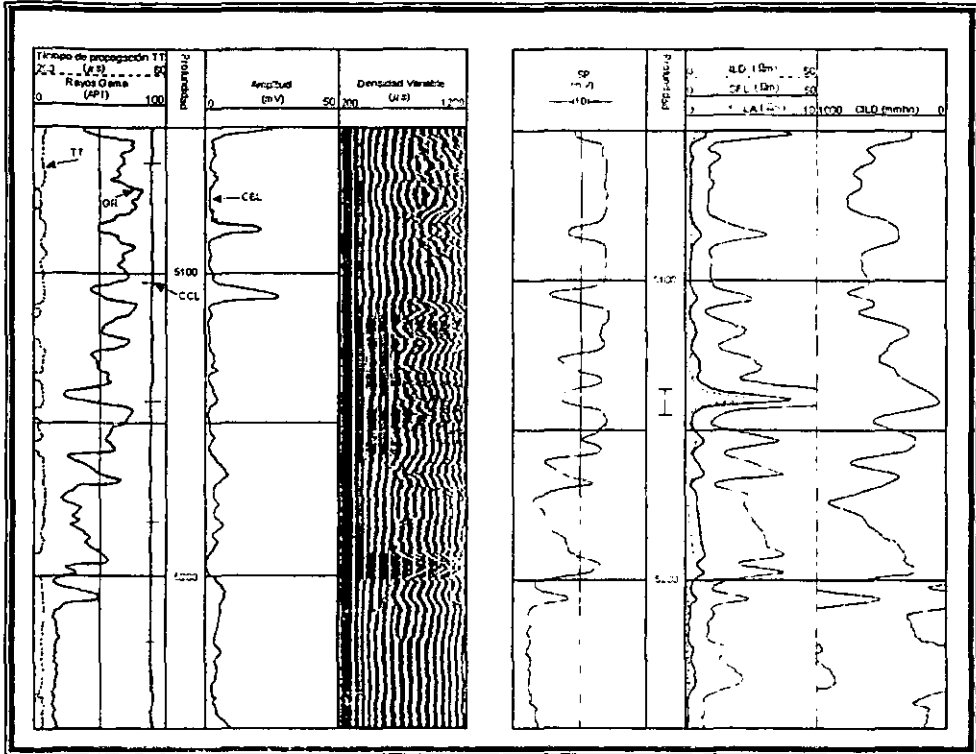


Fig. IV.24. Capa petrolífera bien aislada de las capas acuíferas cercanas⁽¹⁶⁾

La figura IV.25 es un ejemplo de registro CBL-VDL en una tubería mal cementada.

La figura IV.26 muestra el registro CBL-VDL dos semanas después que se efectuara otra cementación.

De la figura IV.26, es decir, en la segunda corrida se puede observar la señal de formación en el VDL, debido al buen acoplamiento entre tubería formación.

En la figura IV.27 podemos observar un ejemplo interesante de CBL-VDL, en ella se muestran dos corridas en el mismo pozo. La corrida uno fue registrada 24 horas después de finalizada la cementación. Del fondo a 4240, de 4204 a 4165 pies y de 4088 a 4084 pies, en la misma corrida; el CBL indica alta atenuación mientras que en el VDL no se observan señales de formación, esto puede indicar un buen acoplamiento tubería-cemento y mal acoplamiento cemento-formación o buena cementación con señales muy atenuadas por la formación. En las zonas superiores se observa buena cementación, tanto en la atenuación mostrada por el CBL como en las señales de formación presentes en el VDL, que indican un buen acoplamiento acústico entre la formación y la tubería.

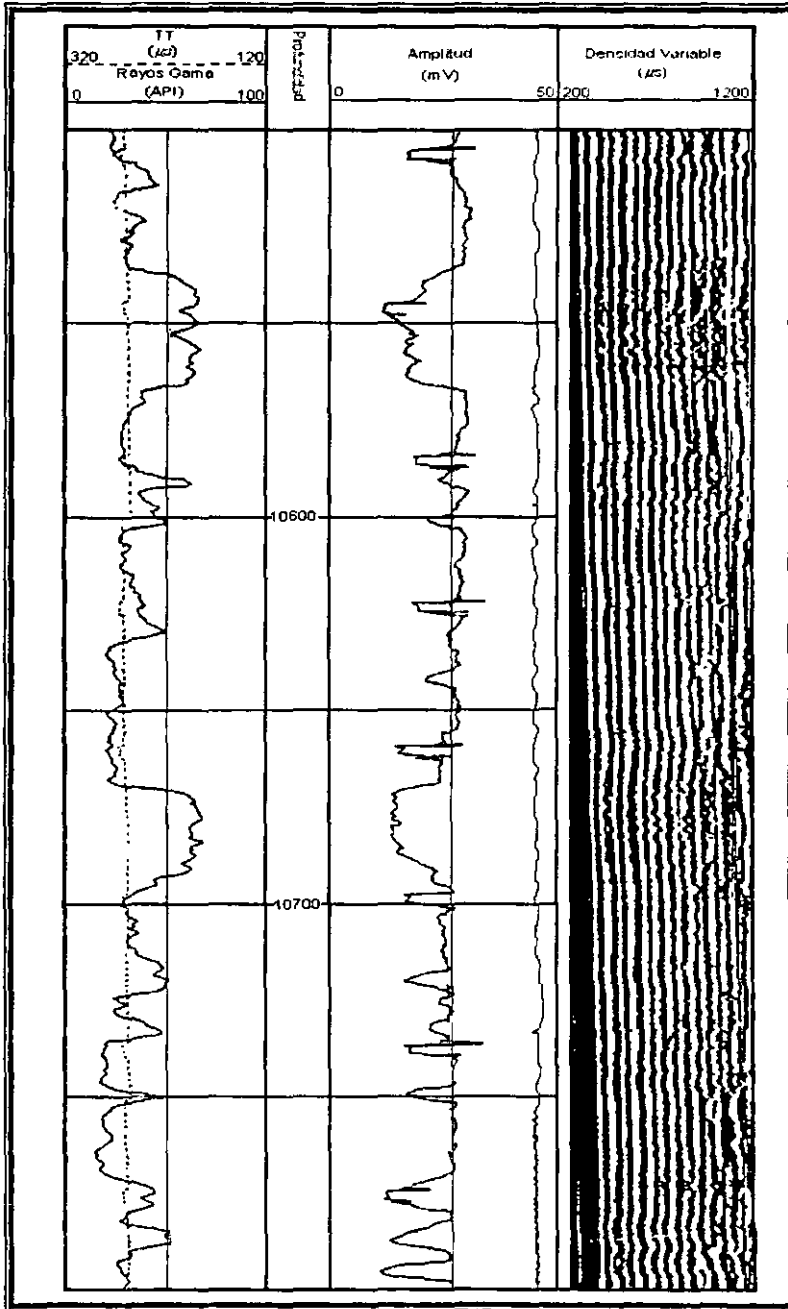
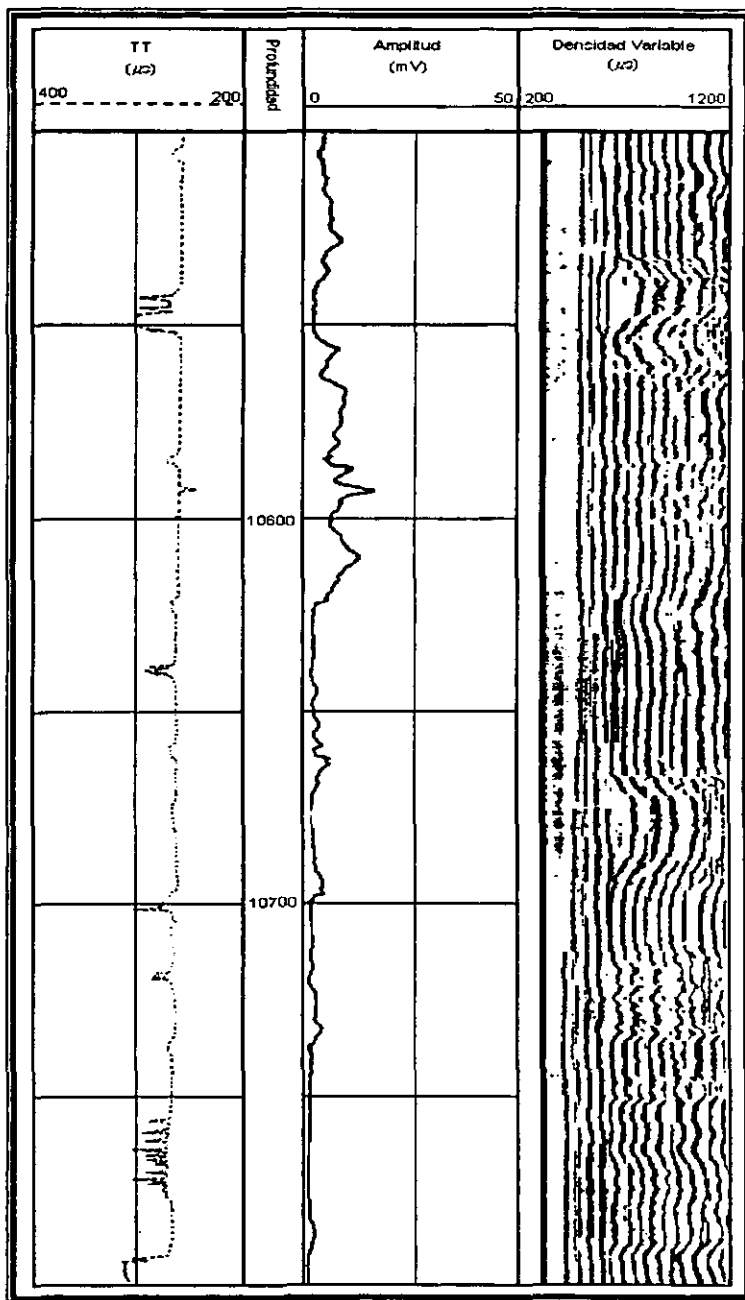


Fig. IV.25. Ejemplo de tubería con inadecuada cementación⁽¹⁶⁾

Fig. IV.26. Registro CBL -VDL después de una cementación auxiliar⁽¹⁶⁾

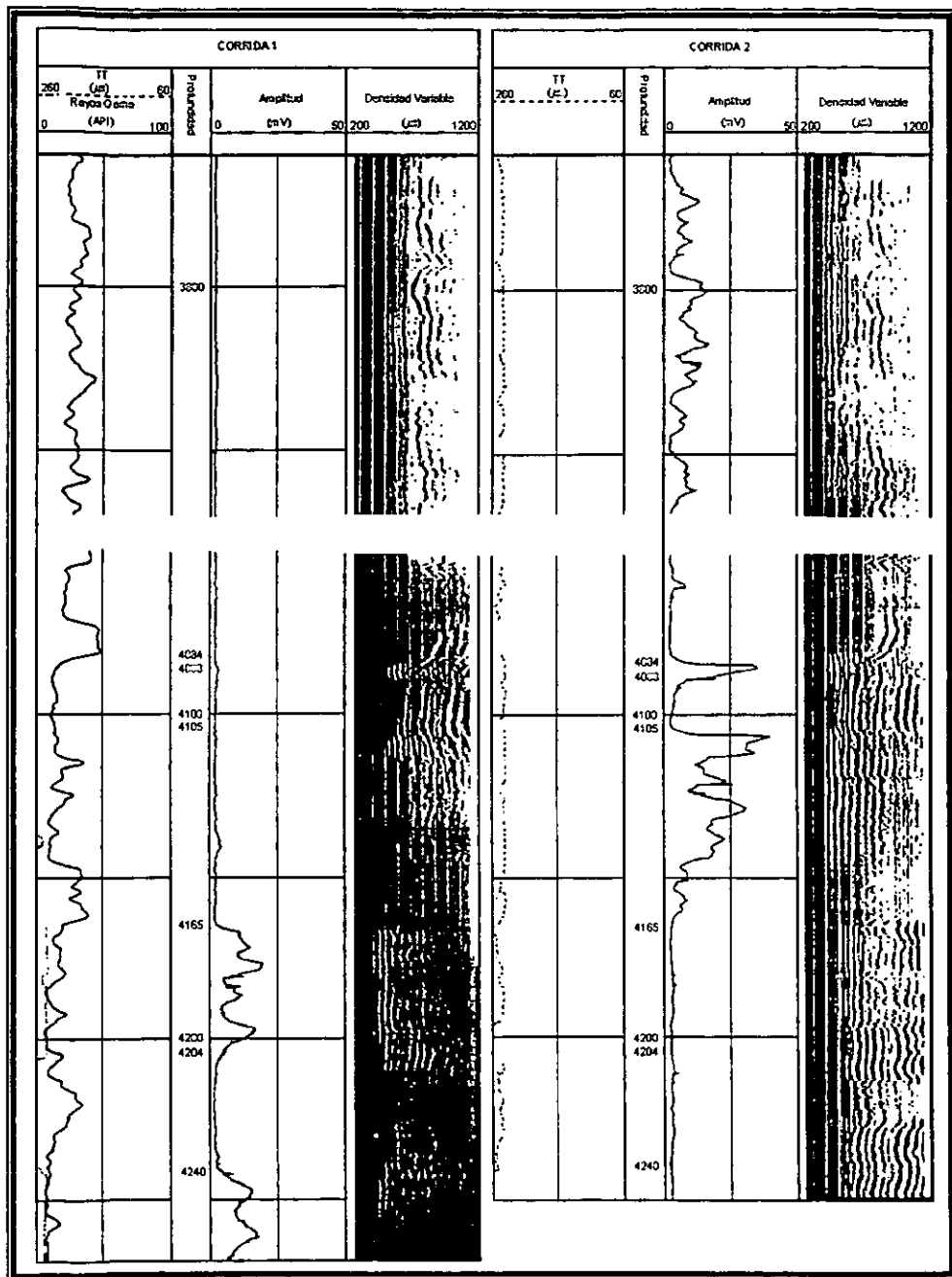


Fig. IV.27. Microanillo creado durante la cementación⁽¹⁶⁾

Debido a la escasa cementación en la zona inferior se efectuaron cementaciones forzadas a 4265-64 y 4197-95 dos días después de la cementación inicial principal. El CBL-VDL registrado 24 horas más tarde (segunda corrida) muestra lo siguiente:

- La cementación mejoró notablemente en las zonas que previamente estaban mal cementadas (desde el fondo hasta 4162 pies)
- En la zona donde previamente no se podía ver un buen acoplamiento entre el cemento y la formación (4165-05 y 4088-84) la cementación empeoró, probablemente como consecuencia de un fracturamiento del cemento, originado durante la cementación forzada
- Se aprecia la existencia de microanillos en las zonas superiores, donde el CBL no muestra mucha atenuación en la segunda corrida, mientras que el VDL presenta señales de formación indicando acoplamiento cemento- formación

El microanillo se creó probablemente como consecuencia de la presión durante la cementación forzada que expandió ligeramente la tubería estando el cemento detrás de la tubería, parcialmente fraguado a sólo dos días de la cementación inicial. Al disminuir la presión luego de la cementación forzada, la tubería retorno a su diámetro creando un microanillo entre ella y el cemento. Los microanillos no afectan el aislamiento entre capas.

Sin embargo el registro CBL-VDL tiene ciertas desventajas, es decir, tiene ciertas limitaciones en la detección de microanillos, en las formaciones de alta velocidad y en la presencia de canales.

IV.7 REGISTRO DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA CEMENTACIÓN (CET)

La Herramienta de Evaluación del Cemento CET o CEL (Cement Evaluation Tool), 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, tales como microanillos, formaciones de alta velocidad 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. El registro permite obtener curvas de resistencia del cemento a la compresión y un análisis visual de la capa de cemento detrás de la tubería. La condición geométrica de la tubería se puede también evaluar mediante 4 calibres acústicos. Además es un dispositivo ultrasónico de alta frecuencia con 8 transductores (transmisor y receptor a la vez) distribuidos a 45° que examinan diferentes azimutes de la tubería con una buena resolución vertical, como se observa en la figura IV.28. Cada transductor ocupa un espacio vertical de 2 pies aproximadamente y operan en el rango de frecuencia de resonancia de la mayoría de las tuberías en uso, además, cada transductor emite un corto impulso de energía acústica para recibir luego el eco de la T.R. Existe un noveno transductor, cuya función es medir continuamente la velocidad acústica del fluido presente en el pozo.^{(24),(28),(30)}

El tipo de propagación de onda empleado (onda compresional perpendicular a la superficie de la T.R), no es tan afectado por la ocurrencia de microanillo, que es mucho menor con respecto a la longitud de la onda. Sin embargo es sensible a un microanillo lleno de gas, como veremos más adelante. Las reflexiones de la formación llegan más tarde que las del cemento y pueden ser distinguidas.

La respuesta de la herramienta depende de la impedancia acústica del cemento (producto de su densidad y velocidad acústica). Utilizando calibraciones elaboradas a partir de experimentos en laboratorio con distintos tipos de lechadas, se pueden registrar valores de resistencia a la compresión.

La separación azimutal de los transductores permite una representación gráfica de la distribución del cemento alrededor de la T.R. Además, el tiempo entre la emisión y la recepción del primer eco (en conjunto con la medición del tiempo de transito en el lodo) permite calcular la distancia entre cada transductor y la T.R (o sea, 4 diámetros internos). También a partir de las medidas de desviación y orientación relativa se conoce exactamente la posición de la sonda.

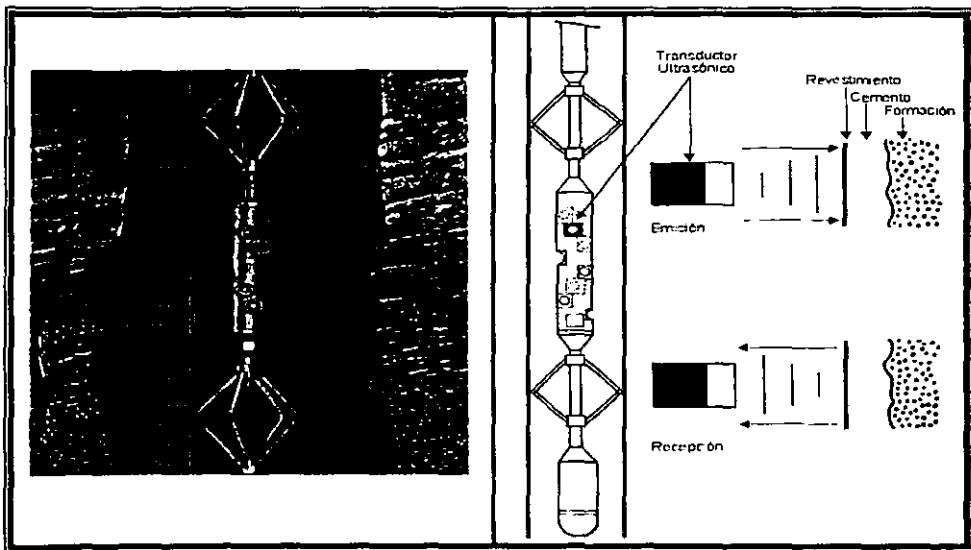


Fig. IV.28. Herramienta CET⁽²⁸⁾

IV.7.1. 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 (fig. IV.29). 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.⁽²⁴⁾

El transductor transmite un corto impulso de energía ultrasónica en dirección de la T.R. Al alcanzar la pared de la T.R la energía se divide, una parte se dirige a la formación pero la mayor parte es reflejada y retorna al transductor (fig.IV.30a). El pulso remanente sigue en dirección a la formación, siendo reflejado continuamente por cada interfase.

Después de atravesar el fluido dentro de la T.R, la mayor parte del impulso es reflejado al transductor por la primera superficie de separación, que es la T.R. Una pequeña fracción de energía entra en la pared de la T.R y es reflejada hacia atrás y adelante dentro de la misma, con parte de su energía transmitida fuera en cada reflexión.

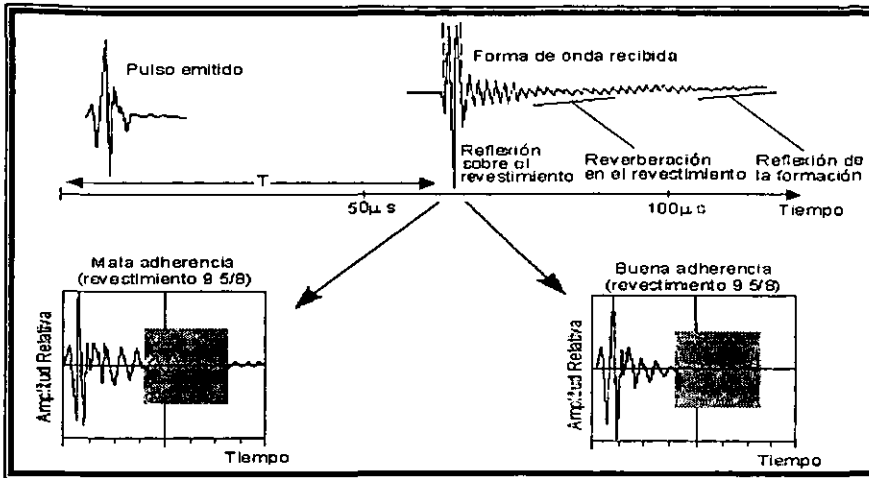


Fig. IV.29. Principio de medición de la herramienta CET⁽²⁸⁾

Cuando el pulso choca contra la T.R, la pared de la T.R empieza a resonar en función de su espesor. El decaimiento de la resonancia de la T.R dependerá de la impedancia acústica del material detrás de la T.R. La presencia de buen cemento detrás de la T.R es detectada por el rápido decaimiento de ésta resonancia, mientras que un largo decaimiento de ésta resonancia indica falta de cemento.

El transductor se encuentra aproximadamente a 2 pulgadas de la pared de la T.R y emite continuamente los impulsos hacia la T.R. El frente de ondas ultrasónicas es considerado como plano y paralelo a la superficie del acero a pesar de la curvatura de la T.R.

Los transductores son cilíndricos con aproximadamente una pulgada de diámetro. El área de medición de cada uno es de más o menos un pie cuadrado. Los transductores actúan como transmisores de pulsos ultrasónicos y receptores del eco resultante.

Se utilizan sondas de 3 3/8 pg. de diámetro para tuberías desde 4 1/2 hasta 7 pg. y sondas de 4 pg. para tuberías desde 7 hasta 10 3/4 pg.

IV.7.2. Características de la señal⁽²³⁾

En la figura IV.30 inciso b encontramos la representación de la amplitud contra el tiempo, y se observa la característica principal de éste tipo de herramienta, la cuál presenta un pulso cuya duración es solamente de 10 μ s de duración.

En la figura IV.30 inciso c representa el espectro de la frecuencia de la misma señal. El pulso contiene una energía acústica de alta frecuencia en el rango de 270 a 650 kHz. La ventaja de utilizar alta frecuencia es la limitada propagación de la onda a medida que recorre por los fluidos, esto permite una mejor resolución. Sin embargo, el problema es la excesiva pérdida de la señal en lodos de alta densidad o T.R's de espesores grandes.

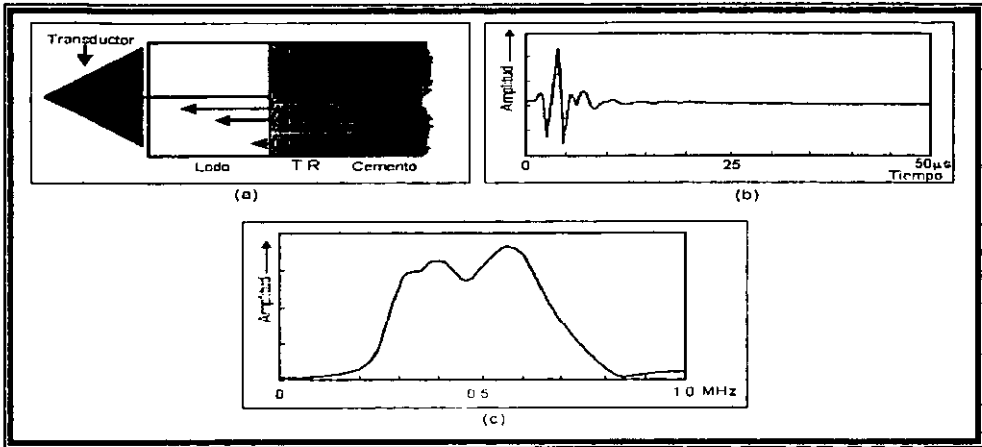


Fig. IV.30. (a) Principio de medición, (b) y (c) características de la señal⁽²⁴⁾

IV.7.3. Respuesta a los impulsos

La respuesta a los impulsos representada en la figura IV.31a es una sucesión de impulsos separados por Δt el doble del tiempo de propagación a través de las paredes de acero. Cada una de las amplitudes es una función de la impedancia acústica en los tres medios (fluido en el pozo, acero y medio exterior). El primer pulso, A, es aproximadamente 10 veces superior a los demás. Los pulsos siguientes son de signo opuesto y sus amplitudes forman un decaimiento exponencial.^{(23), (23)}

En el caso de una tubería libre, con agua en ambos lados, el decaimiento es lento. Con cemento el decaimiento es rápido porque es mejor el acoplamiento acústico entre el acero y el medio exterior.

Se prevé el comienzo de la respuesta al impulso después de 50 μ s aproximadamente, esto corresponde a una separación de 2 pulgadas (5 cm) entre el transductor y la tubería.

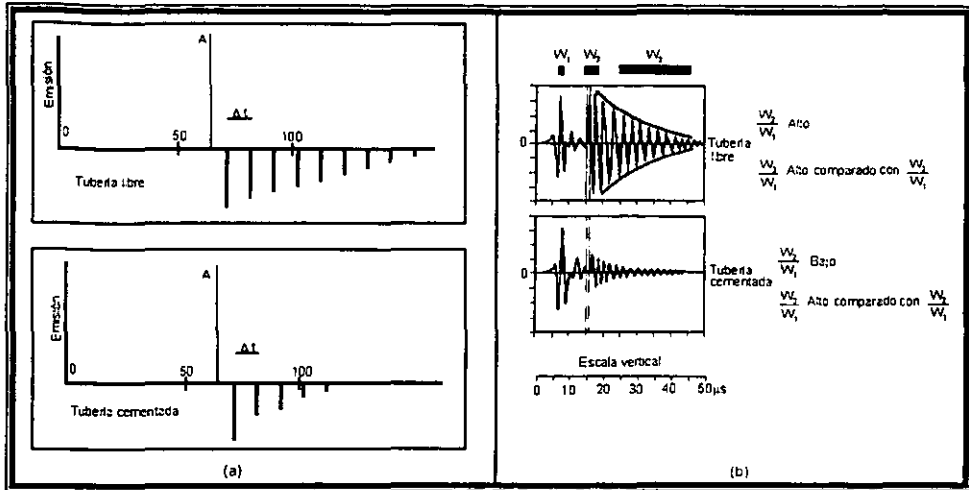


Fig. IV.31. (a) Respuesta a los impulsos y (b) Formato de onda⁽²⁴⁾

IV.7.4. Formato y Descripción de la Onda

La gráfica de la figura IV.31b muestra el formato típico de la onda. El primer arribo es ocasionado por la reflexión de la pared interna de la T.R. Los demás arribos son causados por la resonancia de la T.R y su forma de decaimiento dependerá de las condiciones de la propia T.R.

La amplitud del pulso reflejado es función de la impedancia acústica del fluido presente en el pozo, del acero de la T.R y del medio exterior (formación). En el caso de una tubería libre, con liquido en ambos lados, el decaimiento es demorado. Con cemento detrás de la T.R, la caída es rápida porque el acoplamiento acústico entre el acero y el medio exterior es bueno.

El espesor típico de la capa de cemento es aproximadamente una pulgada. Parte de la energía acústica es transmitida a través de la pared de acero a esta capa de cemento. Si el cemento no es atenuante y el medio siguiente tiene una impedancia acústica que contrasta con la del cemento y una superficie de separación suave, entonces, parte de la energía será reflejada al transductor. Esta situación puede ocurrir en formaciones rápidas o en tuberías concéntricas. Esta energía interfiere con el decaimiento normal de la resonancia aumentando el valor de R interpretándose como una disminución aparente de la calidad del cemento.⁽²³⁾

Sin embargo es posible detectar dichas reflexiones de la formación mediante la detección de un decaimiento no exponencial (característico por las reflexiones de formaciones) en la señal reflejada. Sabiendo que las reflexiones de las formaciones significan poca atenuación de la señal en el cemento, por lo tanto, se puede deducir

que la calidad del cemento es buena y se puede fijar un valor no inferior a 1000 psi para la resistencia a la compresión en ese punto.

La figura IV.32 representa el eco recibido por el transductor. La primera señal a retornar es una serie de tres grandes picos, similares a la letra "w". La forma de onda representa 3 ventanas, conocidas como W_1 , W_2 y W_3 . W_1 corresponde a la primera medición a ser reflejada por la superficie interna de la T.R y se caracteriza por una alta amplitud. Es utilizada para los cálculos del estado de la T.R.

W_2 Y W_3 son las señales de la resonancia, que es un decaimiento exponencial. W_2 es la amplitud de resonancia, que mide las últimas señales y es utilizada para determinar la impedancia acústica del material en el espacio anular, combinada con W_1 . W_3 es la amplitud auxiliar que mide el decaimiento no exponencial y es usada para detectar ecos reflejados por una tercera interfase (T.R concéntrico, reflexiones de la formación). W_3 también es utilizada para checar W_2 .^{(23), (24)}

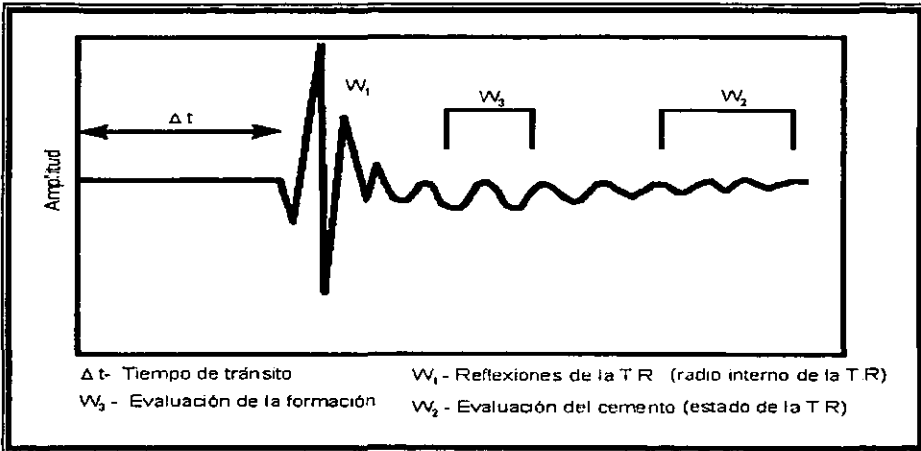


Fig. IV.32. Descripción de la onda⁽²³⁾

Para medir las propiedades del material por detrás de la T.R, se rectifica la forma de onda y se integra dentro de un intervalo que cubre parte del decaimiento de la resonancia. Se fija el intervalo (W_2) a fin de obtener el máximo contraste entre la tubería libre y la cementada. El voltaje de salida R_1 del intervalo es una función de la impedancia acústica del medio detrás de la tubería. R es normalizado a uno cuando hay agua detrás de la tubería. Si hay gas o aire detrás de la T.R la respuesta es aproximadamente 50% superior, debido a la menor impedancia acústica del medio.

El tiempo de tránsito es utilizado para calcular el radio interno de la T.R. La suma de dos transductores opuestos calcula el diámetro, los ocho transductores calculan cuatro diámetros a la vez. El valor promedio de las 4 mediciones es el diámetro interno promedio. La máxima diferencia entre los diámetros es la ovalización.

Las lechadas livianas convencionales tienen un desarrollo de la resistencia a la compresión muy lento comparadas con lechadas de mayor resistencia. Una lechada que todavía no ha desarrollado una resistencia suficiente tendrá problemas durante el registro ya que su atenuación será mucho menor debido a su hidratación parcial.

La impedancia acústica es muy afectada especialmente en lechadas más livianas. Por esta razón se recomienda correr el registro por lo menos una semana después de la cementación.

El valor de la impedancia acústica puede ser transformado a resistencia a la compresión del cemento. Se ha establecido una relación empírica para esto, con muestras hechas de cemento clase G mezcladas en varias proporciones con distintos aditivos. La relación entre impedancia acústica y la resistencia a la compresión es aproximadamente lineal desde 0 a 10000 psi. De este modo es posible convertir la respuesta R en términos de impedancia acústica a resistencia a la compresión enfrente del transductor.

Errores que presenta ésta correlación son evidentes, ya que no hay una relación fundamental entre las propiedades acústicas del cemento que determinan la lectura de la herramienta (W_2) y las propiedades relativas a la fatiga del cemento. Las propiedades acústicas se relacionan con las propiedades elásticas lineales del material (modulo de Young, relación de Poisson, etc) que poco tienen que ver con la fatiga del cemento.

Los parámetros utilizados para convertir la impedancia acústica medida a valores de resistencia a la compresión son:

$$CS = (Z * CSCG) - CSCO \dots \dots \dots (3)$$

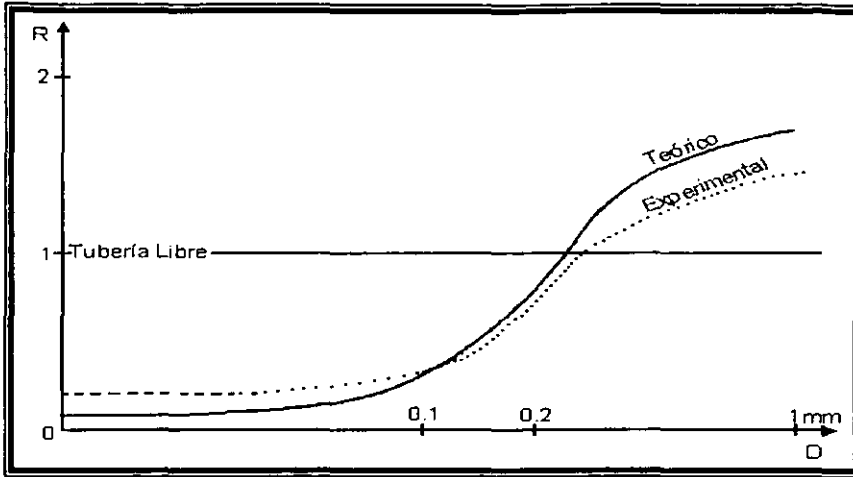
Donde: Z = Impedancia acústica
 CSCG = Resistencia a la Compresión del Cemento Conseguído
 CSCO = Resistencia a la Compresión del Cemento Compensado

Como se vio anteriormente el microanillo es un espacio pequeño, normalmente inferior a 0.1 mm entre la T.R y el cemento. Cuando esté lleno con líquido ya sea agua o lodo, por ejemplo, el efecto teórico y experimental del microanillo es mostrado en la figura IV.33.

Por debajo de 0.1 mm es insignificante porque tal longitud es sólo una mínima fracción de la longitud de onda ultrasónica en agua. Podemos calcular la longitud de la onda con la siguiente formula:

$$\lambda = UPV * T \dots \dots \dots (4)$$

donde: UPV = Velocidad del Impulso Ultrasónico, varía de acuerdo al fluido presente.
 T = Periodo, duración de un ciclo, es el inverso de la frecuencia, en kHz.

Fig. IV.33. Efecto de microanillo⁽²³⁾

Para el agua la UPV es igual a 1500 m/s y T es igual a 1/500 kHz, lo que da como resultado una longitud de onda de 3 mm, por lo tanto, la longitud de la onda es 30 veces mayor que un microanillo de 0.1 mm en agua, lo que hace a la herramienta poco sensible lo que provoca que se realice una segunda corrida con presión en la T.R.

Sin embargo, la situación cambia cuando el microanillo está lleno con gas, debido a la menor UPV en un medio gaseoso, la cual es inferior a los 450 m/s para gas e inferior a 350 para aire. La longitud de la onda por lo tanto se torna cercana al del microanillo.

Lamentablemente, muchos creen que las herramientas ultrasónicas quedan exentas a los efectos del microanillo, en realidad son menos sensibles que un CBL. Pero si el microanillo está lleno de gas, la lectura de la herramienta será de puro gas, ya que la longitud de onda en un medio gaseoso es mucho menor.

El espesor de la pared de la T.R es un factor determinante, ya que paredes más finas resonan a mayor frecuencia, menor longitud de onda, siendo más afectado por un pequeño microanillo que una T.R de mayor espesor. Esto debe ser interpretado con mucha precaución de lo contrario se corre el riesgo de disparar la formación para realizar una cementación forzada innecesaria.

Efectos de la descentralización. Cuando el transductor es desplazado del centro, el rayo ultrasónico deja de ser perpendicular a la pared de la T.R y al ser reflejado se aleja del transductor. La descentralización máxima no perjudicial a la calidad del perfil varía desde 0.2" en una T.R de 5" a 0.4" en una T.R de 9 5/8".

Como toda herramienta, la centralización es un factor muy importante para garantizar una buena lectura, pero con esta herramienta no es problema ya que es una sonda

ligera, corta y rígida, lo que hace a la herramienta CET fácil de centralizar aún en pozos desviados.

Efectos de la ovalización. Los ocho transductores están posicionados a 45° lo que hace 4 parejas posicionadas a 90°. Esto resulta en la medición de 4 diámetros internos de la T.R a partir de los tiempos de transito, el noveno transductor mide la velocidad del sonido en el fluido. La ovalización es la máxima diferencia entre dos diámetros.

IV.7.5. Presentación del registro

El registro se divide en cuatro partes⁽³²⁾:

Pista 1. El lado izquierdo está dedicado a las mediciones de distancias obtenidas a partir de la conversión de los tiempos de transito a distancias. El diámetro promedio (caliper) es computado a partir de los ocho tiempos de transito, con una resolución próxima a 0.1 mm. La ovalización de la tubería es la diferencia entre el diámetro mayor y menor y suministra una indicación sensible de la corrosión, desgaste o colapsamiento de la T.R. La curva de excentricidad (ECCE) sirve para comprobar la centralización de la herramienta. Así como los otros perfiles, como los sónicos, algunas curvas sirven para correlacionar las profundidades, como el GR y el CCL.

Pista 2. Dos curvas de resistencia a la compresión, máxima y mínima, que son CS promedio de los tres valores más altos y bajos, respectivamente, obtenidos de Z. Estas curvas están computadas a partir de las medidas de los transductores después de sacar el promedio vertical sobre 4 pies (1.2 metros) y un promedio azimutal sobre 45° o dos transductores. Cuando la resistencia mínima a la compresión es superior a cero, aparece en el registro para señalar las zonas de buen aislamiento. La curva de valores W_2 promedio (WWM) muestra el promedio de energía reflectiva o impedancia acústica de los 8 transductores, El valor de WWM indica en la mayoría de los casos el material por detrás de la T.R, una WWM igual a 1 es una indicación de agua o lodo, entre 1.5 y 2.5 es indicativo de gas y menor a 1 es una indicación de cemento. La curva está relacionada con la atenuación CBL (mV) y es un indicador de la calidad del cemento. Una curva es opcional: la orientación relativa (RB) de la herramienta con respecto a la desviación, en un pozo desviado indicará la orientación de los efectos del cemento, por ejemplo, en el caso de una canalización.

Pista 3. Mapa del cemento detrás de la T.R. El sombreado es proporcional a la resistencia a la compresión del cemento, desde un blanco, lo cual indica, tubería libre a negro, buen cemento, con una resistencia a la compresión superior a los 3500 psi de acuerdo al valor delimitado. La resistencia a la compresión presentada para cada sector de 45° es una interpolación lineal entre 2 transductores que hacen mediciones puntuales sobre la circunferencia.

Pista 4. Identifica las reflexiones de las formaciones o detecciones de gas. Ocho líneas representan los 8 transductores y cada línea es normalmente delgada. Reflejos secundarios de la formación, se indican por líneas gruesas mientras que el gas detrás de la T.R por 2 líneas angostas.

IV.7.6. Limitaciones e interpretaciones

Algunas condiciones pueden complicar la interpretación de los registros ultrasónicos⁽³⁰⁾:

Reducida penetración de la onda. A pesar de la excelente capacidad de captación de detalles de las ondas ultrasónicas, hay una limitación grande con relación a su penetración. Esto impide observar detalles de la adherencia entre el cemento y la formación, por lo tanto esta herramienta será superada por el VDL en este sentido.

Poco contraste. Este tipo de onda también es muy limitado cuando no hay un buen contraste de impedancia acústica entre los materiales investigados, por ejemplo, es difícil evaluar una lechada extendida o cemento espumoso debido a su poco contraste con el lodo. Lo mismo ocurre con lechadas convencionales cuando el lodo es muy denso.

Gas en el espacio anular. Los valores de W_2 son incrementados debido a la reducida impedancia acústica del gas, lo que resulta en una elevada resonancia. Avisos de gas aparecerán en la pista 4.

Microanillo con gas. El efecto dependerá del material existente en el microanillo y del espesor de la T.R. La herramienta es muy sensible al microanillo lleno con gas y microanillo en una T.R de reducido espesor.

T.R corroído. Pueden producir una drástica dispersión de las ondas ultrasónicas. Con poca energía reflejada hacia el transductor que W_1 , W_2 y W_3 son muy reducidos, con resultados impredecibles, es decir, dispersa las reflexiones dificultando la evaluación.

Lodos base aceite y lodos muy densos. Afectan la lectura al atenuar fuertemente las señales. La confiabilidad de la herramienta se reduce drásticamente cuando la densidad del lodo base agua es superior a 13 lb/gal y lodo base aceite superior a 10 lb7gal.

Espesor de la T.R. Cambios en el espesor de la T.R afecta la lectura.

Reflexiones secundarias. Una señal reflejada desde la interfase del espacio anular-formación puede interferir con la primera señal reflejada de la interface T.R-espacio anular. Varios factores contribuyen en las reflexiones secundarias pero normalmente no son capaces de afectar mucho la operación normal de la herramienta, entre los cuales se encuentran capa de cemento muy fina, tubería centralizada en agujero, agujero muy calibrado, superficie del agujero muy lisa, fuerte contraste de impedancia entre cemento y formación, etc.

Algunas interpretaciones del CET^{(23), (32)}:

Tubería libre. W_2 y W_3 son iguales a 1, el mapa de cemento es totalmente blanco, excepto por bandas oscuras y horizontales en frente de los collares, bajas lecturas de resistencia a la compresión, falta de avisos de gas y de formación.

Formaciones rápidas y T.R concéntrica. El espesor promedio de cemento es de 1 pulgada (2.5 cm). Parte de la energía acústica es transmitida a través de la pared de la T.R hacia el cemento. Si el cemento no es atenuante y el medio detrás provee un contraste de impedancia acústica con el cemento, parte de la energía es reflejada al transductor.

Esto puede ocurrir en formaciones muy densas o T.R concéntricas. Esta energía interfiere con el decaimiento normal aparentando una reducción en la calidad del cemento.

Es detectada por una caída no-exponencial, indicando señales de formación. Como la calidad del cemento tiene que ser buena para que pueda ocurrir esta reflexión, se asigna un valor prefijado de 1000 psi de resistencia a la compresión al cemento. Al mismo tiempo aparecen indicaciones de aviso de formación en la última pista.

Buen cemento. Bajas energías de W_1 y W_2 , el mapa de cemento es denso y oscura.

Gas en el espacio anular. W_2 y W_3 es igual o mayor que como en una tubería libre, el mapa de cemento es blanco con aviso de gas.

Cemento gaseoso en el espacio anular. W_2 y W_3 son elevadas (gas), el mapa de cemento es blanco como si fuera tubería libre pero la presencia de avisos de gas en la pista 4 permite identificar que lejos de tener un mala cementación, la respuesta de la herramienta puede ser solamente reflejo del decaimiento no exponencial. Cuando hay gas en el espacio anular, o el cemento contiene gas en su matriz, el decaimiento no es exponencial.

Casi siempre el cemento está mucho mejor de lo que se cree y los intentos de repararlo ocasionan más problemas que soluciones.

Microanillo con líquido. No es influenciado, el mapa de cemento es correcto. La herramienta es muy poco sensible a un microanillo con líquido pero es muy sensible a un microanillo con gas.

Microanillo con gas. Aviso de gas, mapa de cemento muy deficiente pero constante, curva WWM errática.

Reflexiones secundarios. Avisos de formación (W_2 mayor que W_3).

Canalización. Listras blancas en el mapa de cemento, curva WWM aumenta con el tamaño del canal, es decir, estos canales son visibles

Efectos de zonas permeables. Es común observar un mal cemento justamente en frente de la zona de interés, sin embargo, esto no quiere decir que el cemento este realmente mal. Hay varias razones que afectan la interpretación del cemento, entre ellas:

- a. Mala adherencia del cemento a la formación, especialmente cuando el espesor del cemento es pequeño.
- b. Retorta excesiva en la cara de la formación, reduciendo la impedancia acústica
- c. Efecto de microburbujas atrapadas en la matriz del cemento.

En ninguno de estos casos significa que el cemento esté necesariamente mal y por lo tanto, no requiere de reparación. Tanto el cemento arriba como debajo de la zona de interés esta bien y es muy difícil que exista una mala cementación sólo enfrente de la formación. De todas formas, esto no afecta la calidad de la cementación en general, o sea hay aislación acústica, soporte y protección de la T.R.

IV.7.7. Ventajas y Desventajas

La herramienta de evaluación de cemento CET, tiene las siguientes ventajas:

Se obtiene información sobre el espesor y condiciones externas del revestimiento analizando las ondas, lo cual permite el control de corrosión de tuberías.

Permite evaluar el cemento, evitando las limitaciones que tiene el registro CBL-VDL.

Detecta la presencia de canales por medio de un análisis circular del ambiente que rodea la tubería.

Permite obtener curvas de la resistencia a la compresión del cemento y un análisis visual de la capa de cemento detrás de la tubería.

Se puede evaluar la condición geométrica de la tubería mediante cuatro calibradores acústicos.

Desventajas:

El primer factor limitante de la herramienta CET se presenta por 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 operación normal de la herramienta el fluido debe tener una atenuación inferior de 2 lb/cm.

Debido a que la impedancia acústica depende de la naturaleza del fluido y su densidad, la atenuación aumenta cuando se incrementa la densidad del fluido por su alto contenido de sólidos. Por ello, los fluidos con una densidad mayor de 1.6 gr/cm³ no son adecuados para la operación de ésta herramienta.

Con base a experiencias se ha comprobado en México que los lodos base agua, con densidad entre 1 y 1.4 gr/cm³ permiten el uso normal de la herramienta CET. Las

situaciones donde la densidad de lodo varía de 1.4 a 1.6 gr/cm³ deben examinarse cuidadosamente.

IV.7.8. PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DEL CET

Los trenes de ondas del CET, similares al de la figura IV.34, primero se normalizan. Los parámetros útiles para la evaluación de la calidad de la cementación que son obtenidos de cada transductor *i* (*i*=1 a 8) son los siguientes^{(16), (24)}:

W_2Ni = Energía integrada y normalizada en el intervalo de tiempo W_2

W_3Ni = Energía integrada y normalizada en el intervalo de tiempo W_3

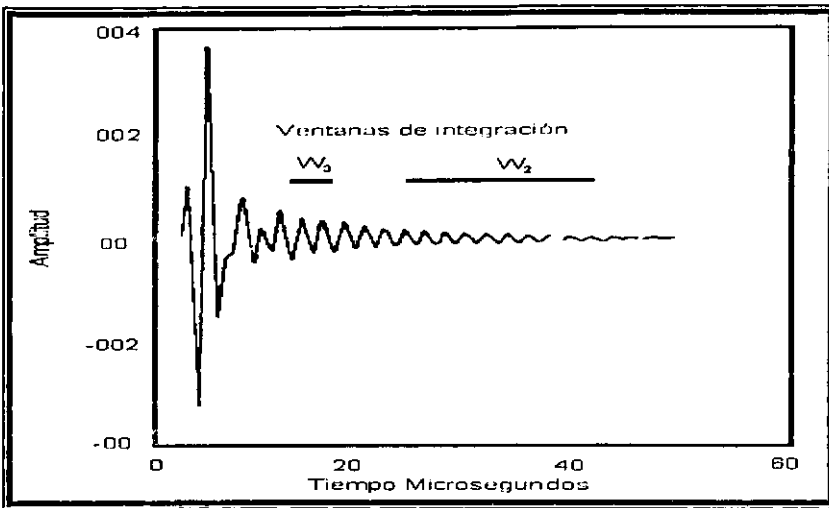


Fig. IV.34. Tren de ondas del CET⁽¹⁶⁾

Las dimensiones internas de la tubería se miden con gran precisión y se utilizan para estimar su espesor, asumiendo que el diámetro exterior es constante. Un péndulo integrado sirve de referencia para conocer la posición radial de cada transductor con respecto al lado de la tubería, en pozos desviados.

Simulaciones por computadora de la respuesta de la herramienta han demostrado que la relación entre W_2Ni y W_3Ni , es independiente de las condiciones ambientales (es decir, el medio dentro del revestimiento, el tamaño y el espesor del revestimiento, el medio detrás del revestimiento). La figura IV.35a representa esta relación, la cual ha sido verificada en el laboratorio y con pruebas de campo. Esta relación se denomina F_1 .

$$W_2Ni = F_1 (W_3Ni) \dots \dots \dots (5)$$

Cuando se detecta un eco de la formación mediante una desviación de los datos de la relación F_1 , es preferible utilizar Z_2 . Este enfoque permite que la determinación de Z sea casi insensible a tales ecos.

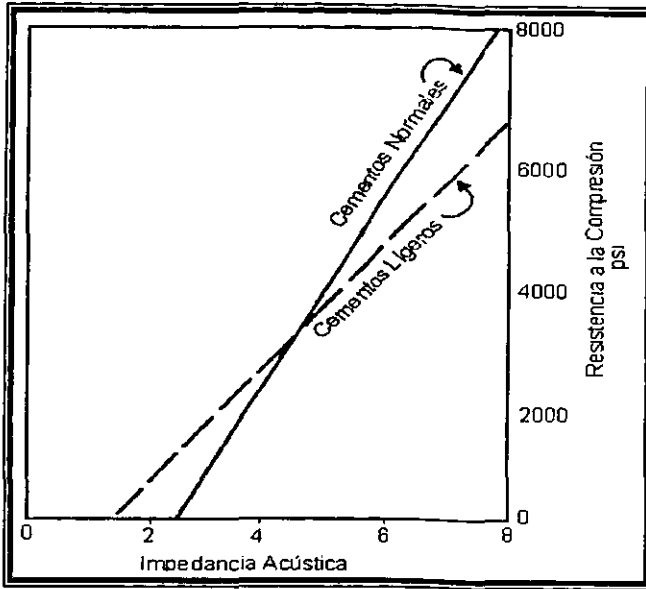


Fig. IV. 36. Relación F_3 ⁽¹⁶⁾

Con el fin de relacionar su importancia acústica con la resistencia a la compresión se analizaron varias muestras de cemento clase G, de espuma, de microesfera de vidrio y de puzolana. Con base a esta investigación fue posible establecer dos relaciones lineales: una para los cementos normales y otra para los ligeros (figura IV.36). Esta relación se denomina F_3 .

$$CS = F_3(Z, \text{tipo de cemento}) \dots \dots \dots (8)$$

El primer paso para evaluar la calidad de la cementación es determinar si existe o no cemento en el ánulo. Para este propósito, se debe considerar la mayor impedancia acústica del fluido Z_f , que se pueda encontrar en el ánulo y deducir que cualquier material que tenga una Z mayor que Z_f es cemento. Lo anterior es posible porque un lodo de densidad de 1.6 gr/cm^3 tiene una Z de $2.4 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^2 \text{ -seg}$, que es inferior a la de cualquier cemento normal, como lo ilustra la figura IV. 36.

Generalmente, los cementos ligeros se asocian con fluidos de perforación ligeros y por lo tanto de Z más baja; también es posible efectuar una distinción entre ellos. Además, se puede identificar el gas bajo presión puesto que tiene una Z de $0.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \text{ -seg}$, aproximadamente.

IV.8 Combinación CBL–VDL–CET

Para comparar las respuestas del registro CBL –CET, se calcula el porcentaje de circunferencia de tuberías cementadas, tal como lo detecta el CET y se compara con la evaluación similar mencionada del CBL. Esta aproximación ha sido probada ampliamente en el campo y ha revelado una buena correlación. Además la experiencia ha confirmado las condiciones cuando la teoría prevé diferencias, tales como^{(31), (32)}

1.- Microanillo lleno de líquido. Generalmente, una tubería de 7 pg y de 23 lb/pie se expande alrededor de 0.004 pg para una presión añadida de 1000 psi. El CBL es mucho más sensible a tal diferencia que el CET. La razón principal reside en el modo de operación de las herramientas. El impulso del CBL actúa a lo largo de la interfase revestimiento/ánulo en una configuración de cizallamiento, mientras que el impulso del CET se dirige perpendicularmente a esta interfase.

2.- Cemento alrededor de la tubería de revestimiento. La amplitud E_1 del CBL depende del espesor del cemento, cuando ésta es menor a $\frac{3}{4}$ de pulgada. El CBL indica un canal, mientras que el CET detecta cemento debido a su profundidad de investigación más pequeña.

3.- Adherencia del cemento a la formación en forma deficiente. La calidad de la interfase cemento–formación no es accesible al CEL ni a la amplitud E_1 del CBL, pero puede conocerse cualitativamente con el VDL en agujeros lisos.

4.- Formaciones rápidas. En formaciones compactas, tales como dolomías de baja porosidad, el sonido viaja más rápido que en el acero. Esto afecta la medición de E_1 del CBL, pero el VDL puede identificarlo. Esta situación se controla mejor con el CEL usando Z_2 en vez de Z_1 .

5.- Corrosión de la tubería o defectos internos. Cuando la longitud de onda del CEL y el tamaño de las irregularidades en la cara interna del revestimiento son comparables, el registro CEL puede ser afectado a tal punto que la información sobre la cementación pueda no revelarse. El CBL con mayor longitud de onda es casi insensible a este tipo de rugosidad.

6.- Presencia de gas en la zona anular. La presencia de gas aparece muy claramente en el CEL, como los puntos brillantes sobre un mapa sísmico. El CBL no es tan sensible y con el VDL puede detectarse la presencia de gas cuando las trazas se vuelven más tenues y ruidosas debido a la absorción de la señal. En el CEL puede hacerse la distinción entre gas libre y cemento contaminado con gas. Para confirmar esto se utiliza el CBL, puesto que el cemento contaminado con gas proveerá normalmente un buen soporte de la tubería.

7.- Microanillo con gas. Teóricamente, un microanillo lleno con gas no afecta al CEL siempre que su tamaño sea inferior a 0.001 pg. Cuando el fluido en el interior del revestimiento contiene demasiadas partículas reflectoras, como podría ser el caso de

lodos pesados, la absorción de la señal del CEL aumenta. En estas condiciones, la distinción puede volverse marginal y el CEL debe ser verificado con un CBL.

La información más útil que aporta el CEL es la distribución radial y vertical del cemento. Esta información provee:

- La identificación de la causa más probable de una cementación deficiente
- La estimación del aislamiento hidráulico de zonas
- La adaptación de los procedimientos para la cementación correctiva

Cuando existe una comunicación entre zonas, se debe considerar que los líquidos que el CEL detecta tal vez estén altamente cargados con partículas sólidas, como materiales de cementación no fraguados. La lechada que se inyecta para corregir esa comunicación tendrá propiedades bastante diferentes de las del fluido (agua, aceite o gas), para fluir naturalmente por la intercomunicación. A veces se puede utilizar un procedimiento de circulación entre dos operaciones de perforación, precedido por un agente de limpieza.

El CEL puede prever el éxito en un procedimiento de circulación cuando se evidencia un canal; sin embargo, cabe notar que un canal creado por una excentricación de la tubería tiene una sección transversal estrecha que impide la fácil circulación de la lechada, exactamente como sucedió en la cementación primaria. Si existen varias trayectorias, la lechada fluirá principalmente por la que ofrece menos resistencia y evitará las demás.

Este tipo de procedimientos son extremadamente delicados; por ello, es preferible evitarlos cuando sea posible y utilizar la técnica clásica de inyecciones de lechada en un solo punto.

En la figura IV.37 se observa un ejemplo de una lechada incorrecta debido a la mala centralización de la tubería en un pozo desviado.

En el registro CEL de la figura IV.37 el cemento está representado en negro y los líquidos en blanco. Arriba de 6200 pies, se desarrolla la presencia de un canal. El CEL a veces puede detectar los coples, puesto que provocan la desviación de los datos en la relación F_1 . La rotación aparente del canal se debe a la rotación de la herramienta; la curva de rumbo relativo indica el lado superior de la tubería y muestra que el canal permanece en el lado inferior. Esto sugiere como causa de que la tubería reposa sobre la formación. De hecho, se puede ver de vez en cuando una indicación de presencia de sólidos, probablemente de la formación, en medio del canal.

También en la misma figura se puede observar la correlación entre las curvas que indican el porcentaje de circunferencia de tubería cementada, a partir del CEL y del CBL. El CEL aporta información adicional que permite la identificación de la causa del defecto de la cementación. Esto ofrece un área de flujo pequeña, puesto que la tubería

está tocando probablemente la formación. Lo anterior puede causar problemas de aislamiento hidráulico, por lo que el éxito de una cementación forzada sería dudoso. El soporte de la tubería debe ser correcto.

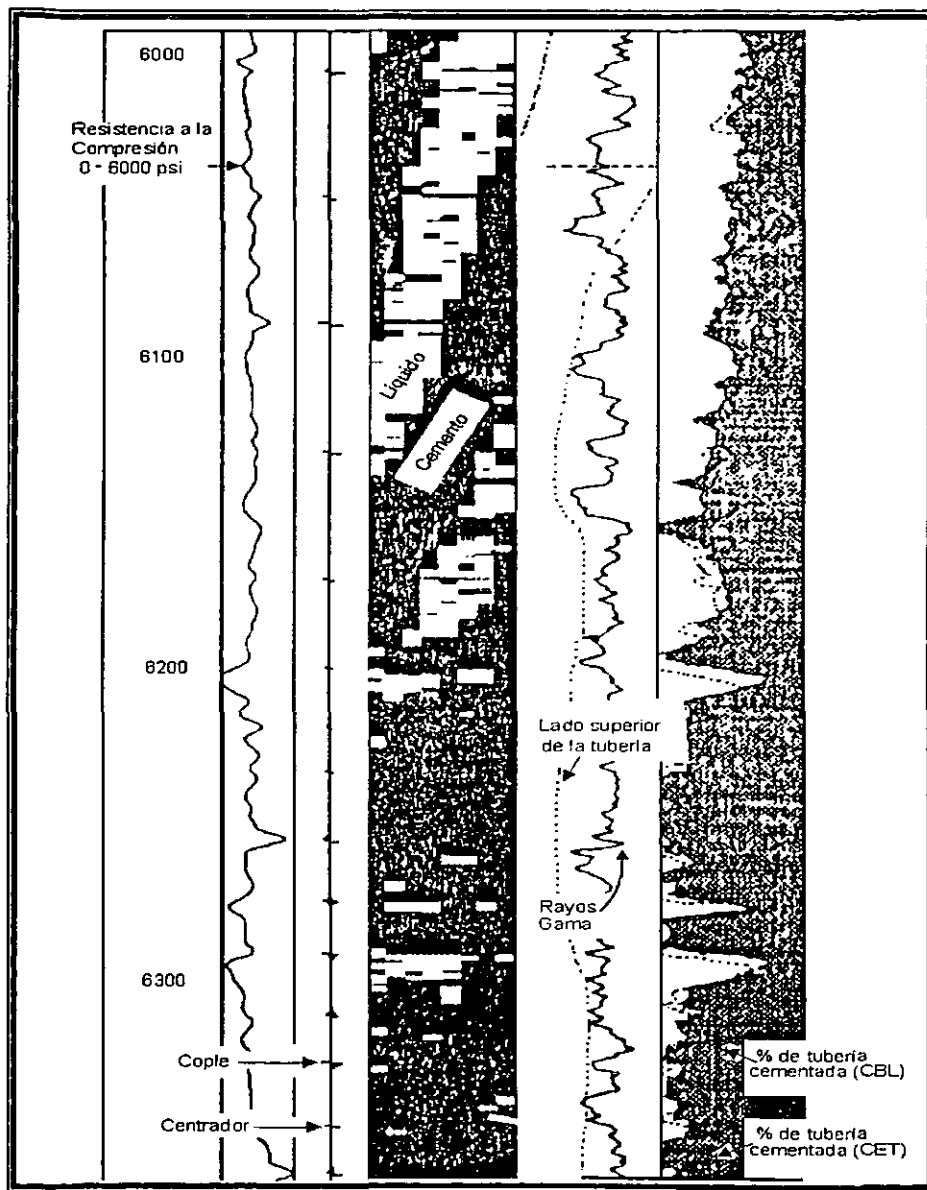


Fig. IV. 37. Inadecuada cementación en un pozo desviado⁽²³⁾

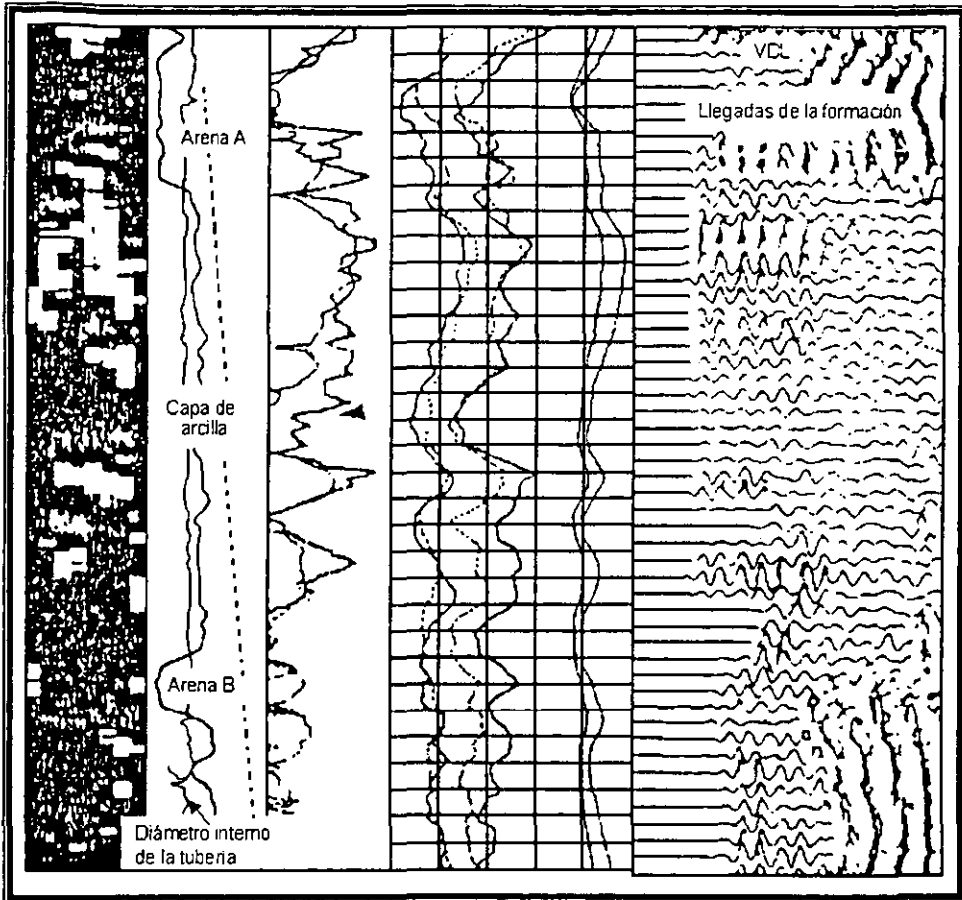
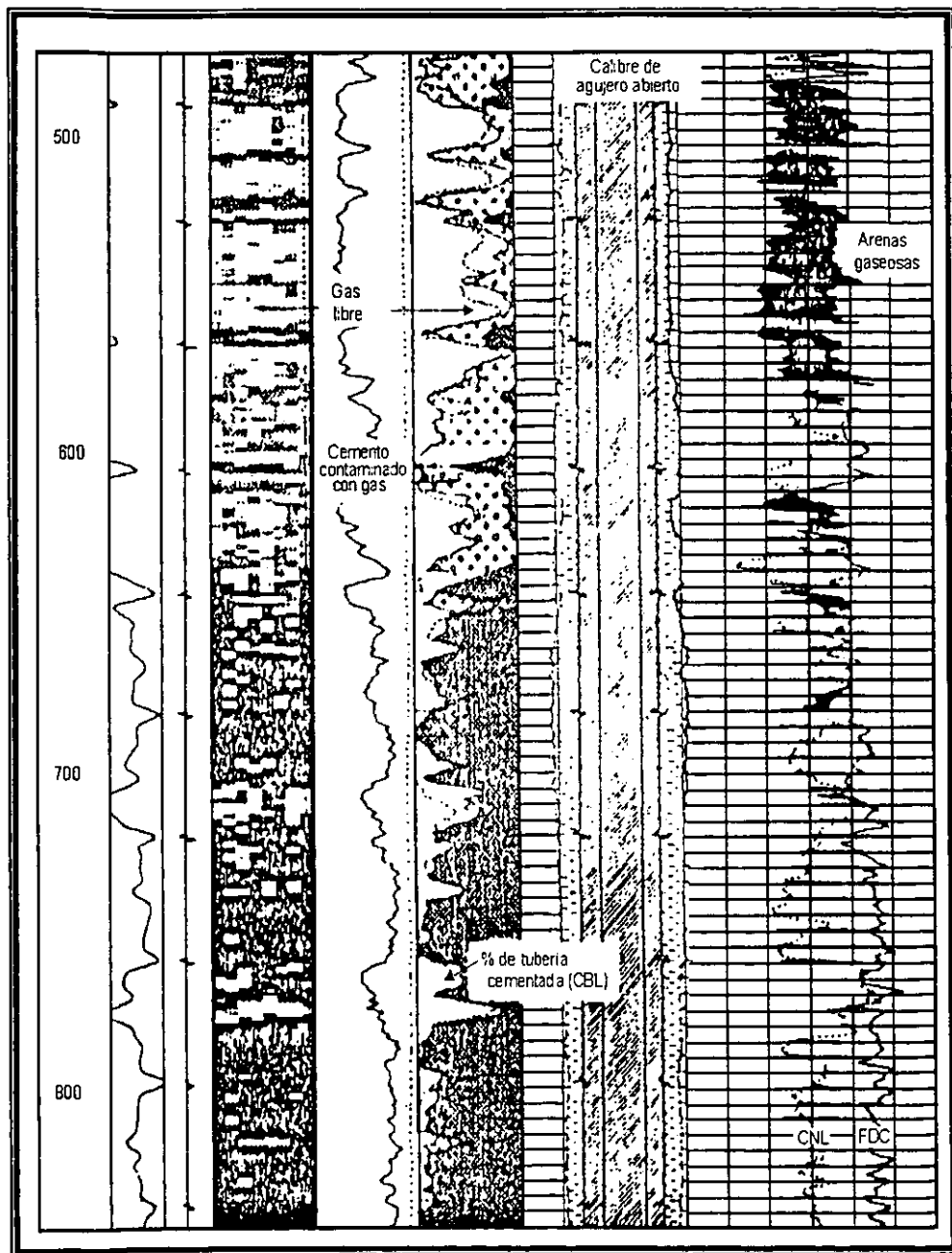


Fig. IV.38. Ejemplo de una inadecuada cementación y forma de ondas del registro VDL⁽¹⁶⁾

En la figura IV. 38 se observa el problema causado por el alto contenido de agua en la lechada y una posible cubierta de cemento fino. Se observa un canal en la parte superior de la tubería enfrente de una parte de la capa de arcilla (identificada por la curva de rayos gamma) que no absorbió el exceso de agua. La correlación entre los registros CEL y CBL es buena, excepto en la profundidad indicada por la flecha donde el registro CBL es ligeramente más negativo, debido posiblemente a una cubierta de cemento demasiado fino. La reducción de la señal de llegada de la formación en el VDL lo confirma y sugiere una adherencia deficiente entre el cemento y la formación. Por lo tanto, debe considerarse la posibilidad de una comunicación entre las arenas A y B.

En el siguiente registro se muestra una mala cementación a las formaciones portadoras de gas, figura IV.39.



Las formaciones con gas están indicadas en negro en la presentación de las curvas de densidad /neutrón del carril 4. El agujero es ligeramente mayor al nominal en algunas secciones como lo muestra el calibre de agujero del carril 3.

La figura IV.40a es un diagrama de interrelación de W_2Ni en función de W_3Ni ; la línea representa la relación teórica F_1 . La nube inferior corresponde a los datos del cemento y arriba se encuentra la nube de puntos correspondiente a líquidos. Las coordenadas 1 – 1 son las del punto de agua. La presencia del gas es evidente cuando todos los datos caen arriba del punto de agua. Los datos registrados enfrente de las secciones que tiene gas libre en la interfase revestimiento –ánulo queda en el extremo superior del diagrama (reflexiones fuertes).

La figura IV.40b es un diagrama de interrelación de W_3Ni del CEL en función del logaritmo de E_1 del CBL. En esta figura, se pueden observar dos tendencias: una que apunta al cemento óptimo hasta el punto de líquido y la otra hasta el punto de gas libre.

Esto indica la presencia de un cemento cuya porosidad está llena de gas (CEL), pero que provee todavía un soporte mecánico adecuado de la tubería (CBL). La estructura de los poros de éste cemento contaminado con gas ha sido probablemente alterada por la intrusión de gas en la etapa de fraguado; por lo tanto, su permeabilidad puede permitir el flujo de gas.

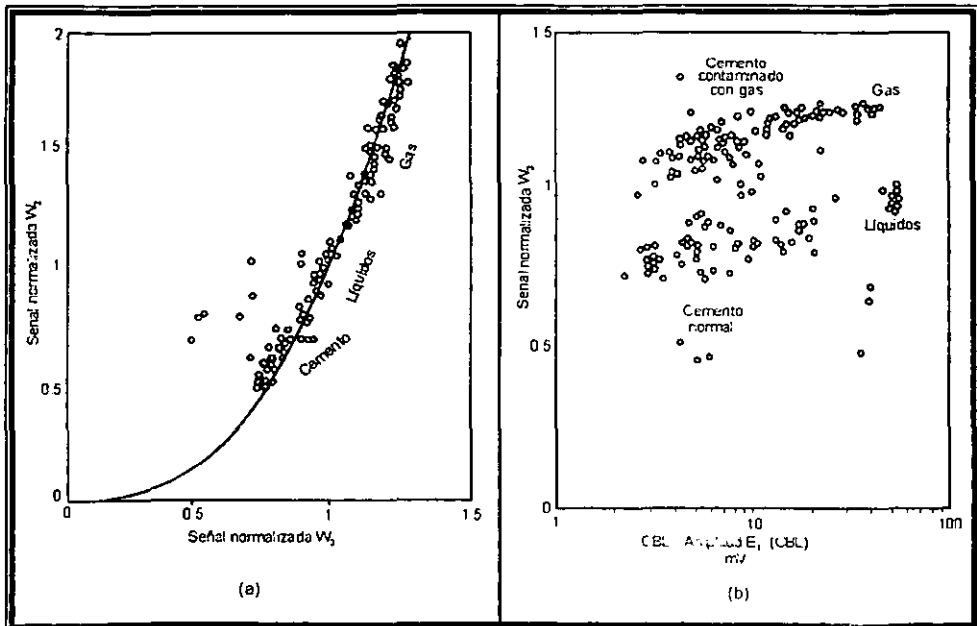


Fig. IV.40. Los incisos a y b representan los diagramas de interpretación de W_2Ni y W_3Ni-E_1 respectivamente⁽¹⁶⁾

Con base a las observaciones anteriores, se utilizó una técnica a partir del CEL, la cuál consiste en un número estadístico de puntos que caen muy arriba del punto de agua.

Esta técnica realza la presencia de cemento contaminado con gas. En los registros, el gas libre aparece en gris claro y el cemento contaminado con gas en gris oscuro. El porcentaje de circunferencia cubierto de gas libre se calcula de manera similar al de la circunferencia cementada. La curva del CBL compatible se sobrepone al porcentaje de gas libre del CEL en la parte superior de la figura IV.39 y al porcentaje cemento adecuado.

El soporte de la tubería puede considerarse satisfactorio, particularmente enfrente de las arcillas, donde hay menos gas libre. El aislamiento hidráulico probablemente es deficiente, lo que se confirma con el hecho de que el gas podría todavía filtrarse a través del ánulo cementado entre las arenas gaseosas. La experiencia ha demostrado que es extremadamente difícil suprimir las fugas anulares provocadas por cementos contaminados con gas, a través de una cementación forzada.

Confirmando en la interpretación del CEL, el sistema de lechada fue cambiado en un pozo cercano y se utilizó un nuevo tipo de aditivo para evitar la intrusión de gas. La operación tuvo éxito. El CEL indica que el gas casi había desaparecido del ánulo. El CEL proporciona un mapa de distribución de los materiales detrás del revestimiento. Puede efectuarse un calculo de porcentaje de estos materiales sobre la circunferencia y compararse directamente con la información del CBL, con el fin de compensar las limitaciones de la herramienta. Los patrones de distribución del cemento proveen indicadores que permiten la determinación de las causas de las cementaciones deficientes.

CAPÍTULO V

HERRAMIENTAS INNOVADORAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN

La evaluación de cementación por métodos tradicionales ha tenido la desventaja que ciertos efectos, tales como microanulus son indetectables y pueden ser fácilmente confundidos por baja calidad en la cementación. Efectos de canalización podían muchas veces ser detectados, pero no su extensión ni tampoco su orientación angular.

Las herramientas ultrasónicas vinieron a aliviar, en parte, el problema y a partir de ellas algunas herramientas fueron evolucionando. Las herramientas ultrasónicas, por otra parte, dan información sobre el diámetro interno y espesor de la T.R (tubería o cañería).

V.1 HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN (CBT)

El CBT es una herramienta sónica diseñada para la evaluación del cemento. Tiene un diámetro de 2 3/4", es muy liviana y rígida, lo que la hace muy efectiva para ser utilizada en pozos desviados⁽¹⁶⁾.

Una de sus ventajas es que todos los circuitos electrónicos se encuentran en el cartucho y no en el cuerpo de la sonda, por eso es que esto la hace aún más liviana y fácil de centralizar. El CBT puede utilizarse con la herramienta de sónico de porosidad (SLT de 3 5/8 pg), ésta herramienta al igual que otras diseñadas para la evaluación de la cementación, tiene sus limitaciones como las siguientes:

- ◆ Efecto de mala centralización
- ◆ Efecto de atenuación del fluido
- ◆ Sensibilidad de los receptores
- ◆ Efecto de corrimiento por temperatura
- ◆ Calibración
- ◆ Formaciones rápidas
- ◆ Combinación limitada

No se puede usar en tuberías de revestimiento de 5 pg. o menos debido a que su diámetro es de 3 5/8 pg.

Así como el CBL, esta herramienta es normalmente utilizada con rayos gama y el detector de coples (CCL) para correlación.

V.1.1 Principio de medición

La sonda está compuesta por una combinación de dos transmisores y tres receptores, con diferentes espaciamientos y la generación de ondas acústicas a través de los sensores de transmisión y la medición del tiempo que tarda una onda acústica en desplazarse vía lodo de perforación, tubería, cemento, formación y su detección en el receptor, figura V.1a.

El CBT como se dijo tiene dos transmisores (T_1 y T_2) y tres receptores (R_1, R_2 y R_3), las distancias entre los transmisores y los receptores son los siguientes^{(16), (23)}:

- De T_1 a R_1 (0.8'), R_2 (3.4') y R_3 (3.4')
- De T_2 a R_3 (2.4') R_2 (3.4') y R_1 (5.0')

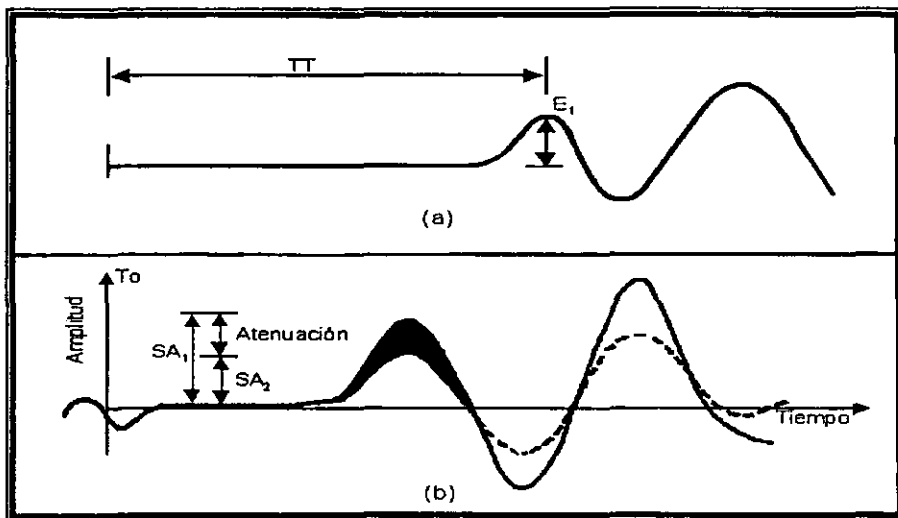


Fig.V.1. (a)Onda acústica detectada por el receptor, (b) Principio del CBT⁽¹⁶⁾

Por lo tanto, hay dos receptores que están siempre distanciados 2.4 y 3.4 pies de cada transmisor, ellos son R_2 y R_3 (figura V.2). El uso de dos transmisores y receptores ayuda a eliminar los efectos dañinos de algunos factores externos tales como: descentralización, presión, temperatura, tipo de fluido, etc.

El receptor R_1 es utilizado para identificar la existencia de formaciones rápidas, debido a su corto espaciamiento hace que registre señales de la formación cuando los mismos arriban antes de las señales de la T.R.

SA_1 es la amplitud de la primera señal que arriba entre los transmisores y receptores más cercanos (T_1-R_2 o T_2-R_3) y SA_2 es la amplitud de la primera señal que arriba entre los transmisores y receptores más lejanos (T_1-R_3 o T_2-R_2).

La diferencia de amplitud entre las dos medidas de cada transmisor/receptor es utilizada para calcular la atenuación directamente, sin la necesidad de tener que usar cartas de corrección. El espaciamiento entre los receptores R_2 y R_3 (1 pie) permite el cálculo de la atenuación, si la atenuación es baja (por ejemplo: poco cemento) las amplitudes SA_1 y SA_2 serán muy similares. Si hay un buen cemento ambas amplitudes serán atenuadas, sin embargo, la diferencia entre las dos curvas será más fuerte (figura V.1b).

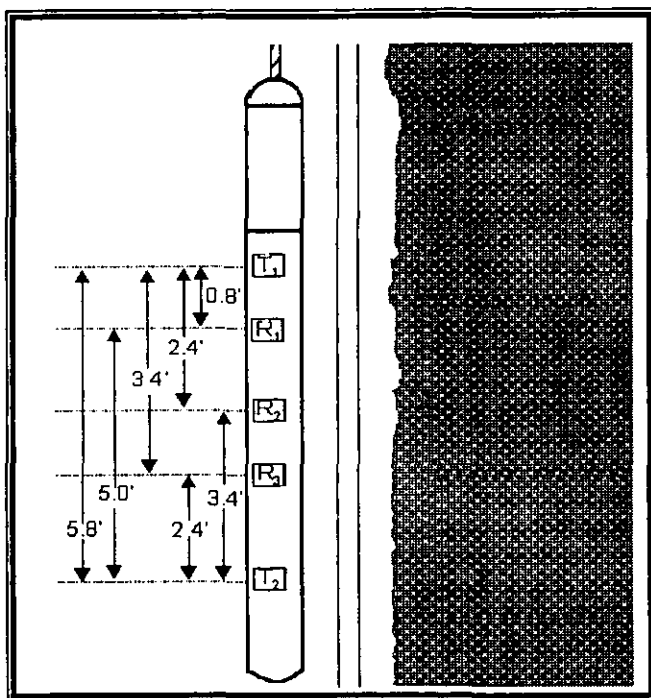


Figura V.2. Herramienta CBT⁽¹⁶⁾

Con dos mediciones independientes de la atenuación, obtenemos el BATT (Atenuación Compensada del Pozo), lo que reduce los efectos de interferencia que suele ocurrir con herramientas de transmisor único. Si la herramienta no está bien centralizada, un par de T/R (transmisor/receptor) estará más cerca de la tubería de revestimiento, obteniéndose valores incorrectos. El otro par también estará incorrecto pero con error en la dirección contraria, el promedio de los dos dará como resultado una amplitud idéntica al de una sonda totalmente centralizada. Esto es muy importante, ya que las herramientas convencionales de un solo transmisor son extremadamente sensibles a la

descentralización. Claro que el CBT debe estar bien centralizado, pero es una herramienta mucho menos sensible que el CBL.

Como se observa en la figura V.1a la señal acústica estará en función de:

- ◆ Amplitud de onda de presión (P_1) generada por el transmisor (T_1)
- ◆ Sensibilidad (S_1) del receptor (R_1)
- ◆ Distancia entre receptor y transmisor (D)
- ◆ Atenuación de la señal (A)

Estos parámetros se relacionan con la ecuación siguiente:

$$A_{T_1R_1} = P_1 S_1 10^{(-AD/20)} \dots \dots \dots (9)$$

V.1.2 Características y Descripción de la herramienta⁽¹⁶⁾

Dentro de las características más importantes de la herramienta CBT tenemos los siguientes:

- ◆ Medición autocontrolada
- ◆ Insensibilidad a la excentralización hasta 0.3 pg.
- ◆ La temperatura del lodo no lo afecta
- ◆ Medidas de amplitud en milivolts y atenuación en dbs/pie
- ◆ El diámetro de la herramienta es de 2 ¾ pg. operable en tuberías de 4 ½ a 13 3/8 pg
- ◆ Los valores máximos de temperatura y presión son 350 °F y 20,000 psi
- ◆ Está configurada por dos transmisores y 3 receptores
- ◆ Es combinable a través de un cartucho de telemetría con diferentes herramientas
- ◆ Mide correctamente la amplitud de la señal acústica frente a formaciones rápidas

En caso de usarse en pozos desviados se emplean centradores especiales y una sonda más liviana

Las figuras V.3 y V.4 que se presentan a continuación muestran la herramienta y sus combinaciones:

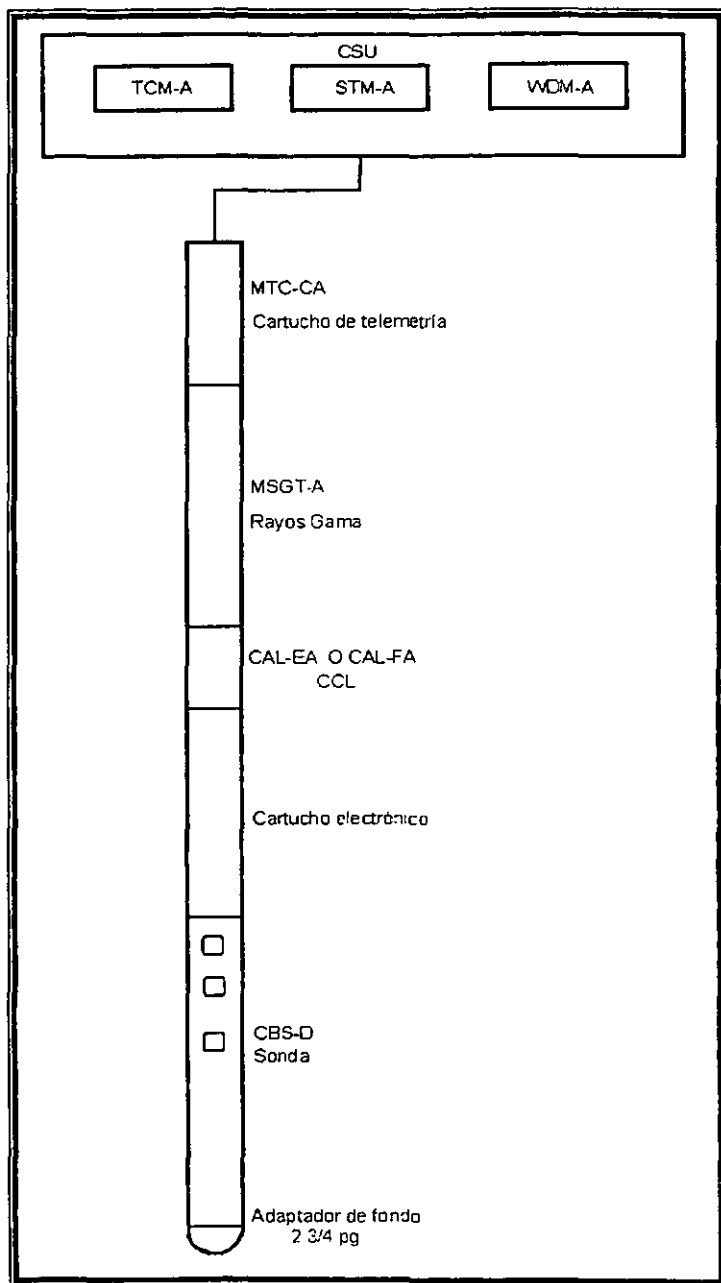
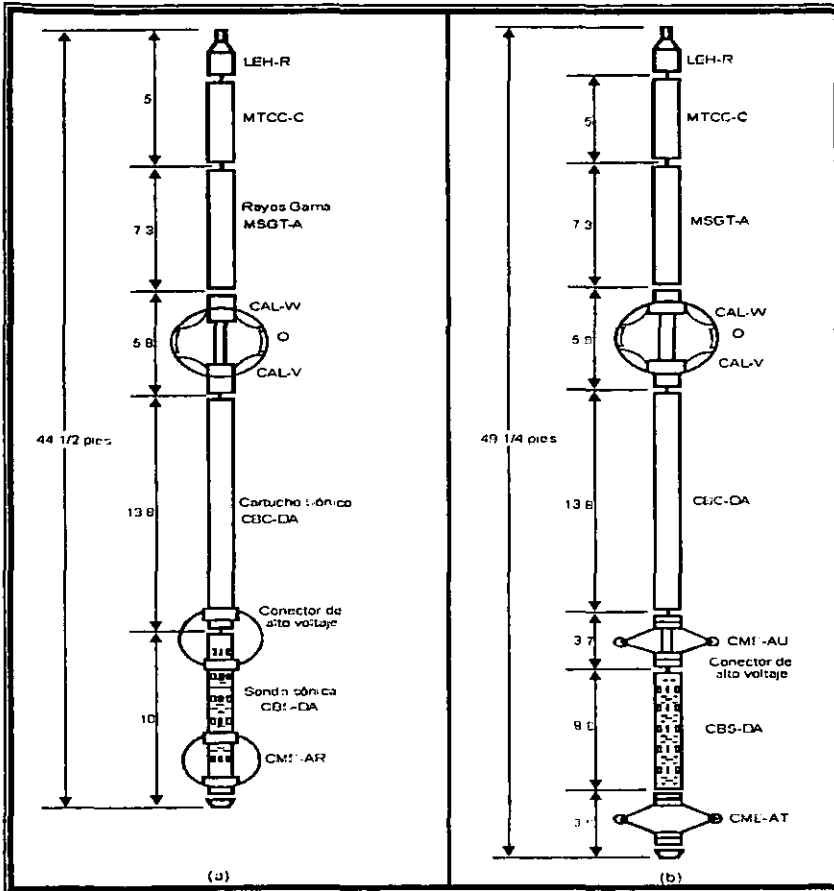


Fig. V.3. Sistema CBT operado con un sistema cibernético CSU y su combinación con diversas herramientas: MTC-CA-MSGT-A-CAL-E-F/CBT-E⁽¹⁶⁾

Fig.V.4. Configuración de la herramienta CBT-E⁽¹⁶⁾

- ◆ El diámetro de la herramienta es de 2 3/4 pg
- ◆ Registra la amplitud de las ondas acústicas correspondientes a los receptores espaciados con 0.8, 2.4 y 3.4 pies
- ◆ Obtención de la atenuación para la onda acústica de acuerdo al receptor correspondiente
- ◆ Sistema también operable como sónico de densidad variable

Cabeza:

- ◆ La cabeza superior de interconexión con el resto del equipo se compone de 29 pins

Rangos de aplicación:

- ◆ Sus rangos máximos de operación de temperatura y presión son de 175 °C y 20,000 psi

Es adaptable con los sistemas MSGT-A, CET y cualquier herramienta combinable con CTS (La herramienta CBT requiere de MTC-CA, CTS (cartucho de telemetría) y TCM-AB (módulo de telemetría)).

V.1.3 Presentación del registro

En los carriles de la figura V.5 se presentan las curvas siguientes:

Carril I: Coples, Rayos Gama, tiempo de tránsito

Carril de profundidad:

- a) Profundidad del pozo
- b) Curva de tensión del cable

Carril II: Curvas de atenuación (dbs/pie)

SATN = Atenuación de onda acústica $T_1 - R_1$

NATN = Atenuación de onda acústica $T_1 - R_2$

DATN = Atenuación de onda acústica $T_1 - R_3$

Carril III: Curva de amplitud (milivolts)

SCBL = Amplitud de onda acústica $T_1 - R_1$

NCBL = Amplitud de onda acústica $T_1 - R_2$

DCBL = Amplitud de onda acústica $T_1 - R_3$

Control de calidad. La amplitud de una onda es inversamente proporcional a su atenuación; cuando la amplitud aumenta disminuye la atenuación

Dado el espaciamiento menor que existe de R_1 respecto R_2 , se tiene que el tiempo de tránsito $\Delta t_1 R_1$ (0.8 pies) es menor a $\Delta t_1 R_2$ (2.4 pies).

La curva de atenuación SATN (0.8 pies) es confiable en tuberías de hasta un diámetro de 7 pg. arriba de este valor la curva se ve afectada. La confiabilidad en la lectura de la curva SATN no es tan buena como las de NATN y DATN.

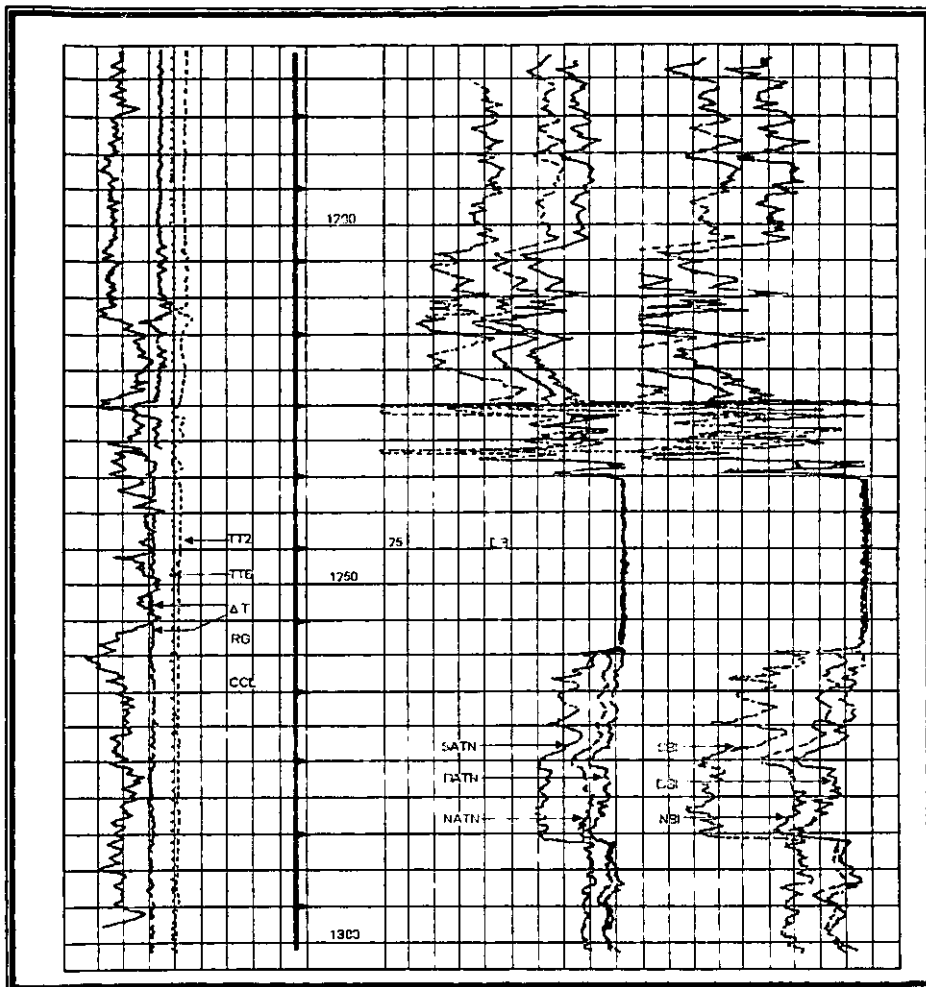


Fig. V.5. Registro CBT⁽¹⁶⁾

V.1.4 Interpretación del registro CBT

Tubería libre:

- ◆ Valores altos de amplitud (CBL)
- ◆ Valores bajos de atenuación (ATN)
- ◆ SCBL=NCBL=DCBL (3 pies)
- ◆ SATN=NATN=DATN

Tubería cementada en forma homogénea:

- ◆ Valores bajos de amplitud
- ◆ Valores altos de atenuación
- ◆ SCBL=NCBL=DCBL (3 pies)
- ◆ SATN=NATN= DATN

La figura V.6 muestra el registro donde se puede apreciar lo descrito anteriormente.

Comparación con el registro CBL convencional con un receptor a 3 pies. Asumiendo que ambas herramientas están calibradas, los valores obtenidos de los registros CBL (3 pies) y CBT (2.4 pies) deberán ser muy similares.

Formaciones rápidas:

Las respuestas de los receptores de espaciamiento grande (3.4 y 5 pies) se afectan, antes que los receptores de espaciamiento corto (0.8 y 2.4 pies); por lo tanto, se tiene:

$$SCBL \leq NCBL \gg DCBL$$

$$SATN \leq NATN \gg DATN$$

Efectos de los canales en la cementación:

Si se tiene que la distribución del cemento alrededor de la tubería es homogénea:

$$DATN = NATN = SATN$$

Si no lo es, como en el caso de una canalización:

$$SATN > NATN > DATN$$

$$SCBL < NCBL < DCBL$$

Tiempo de una onda acústica en el cemento (espesor = 1.5 pg.), tabla3 y figura V.7.

$$90 \mu s / pie = 7.5 \mu s / pg \text{ en } 1.5 \text{ pg } 0 \geq 11.25 \mu s$$

$$\text{ida y vuelta} = 225 \approx 23 \mu s$$

$$\mu s / pg = \text{microsegundo por pulgada}$$

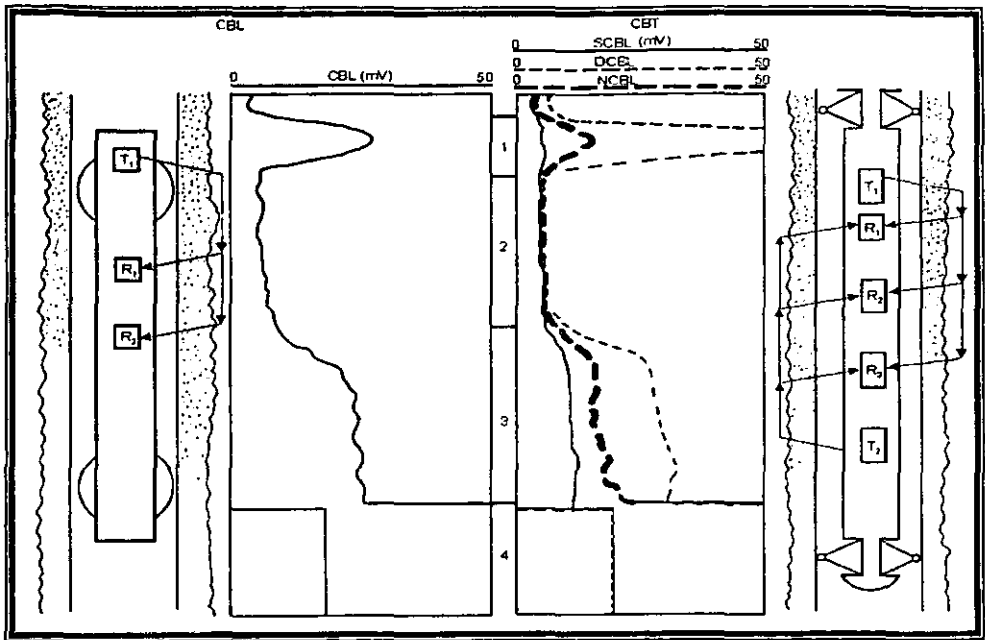


Fig.V.6. Ejemplo comparativo de los registros CBL- CBT⁽¹⁶⁾

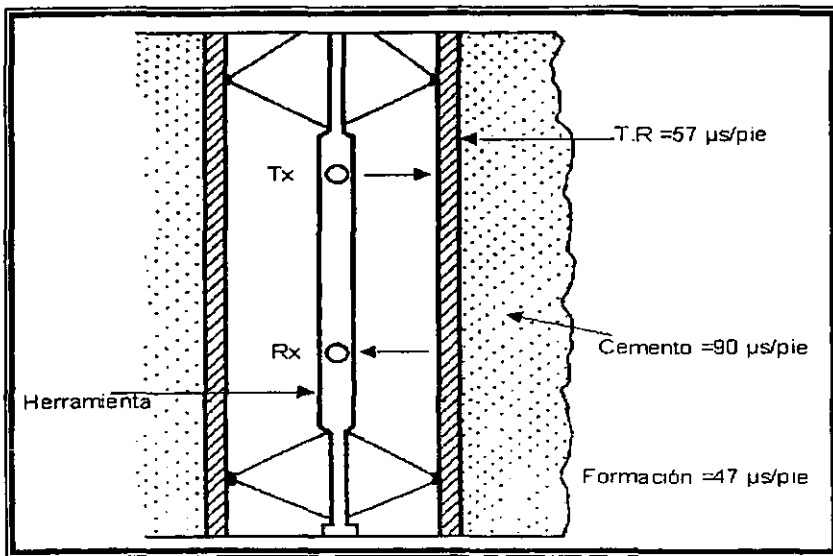


Fig. V.7. Tiempo de la señal acústica en el cemento⁽¹⁶⁾

Distancia TxRx	Señal T.R.	Señal de Formación
0.8	$57 \times 0.8 \approx 46 \mu s$	$23 + 0.8 \times 47 \approx 60 \mu s$
1	57	70
2	114 ← ↓ →	117
3	171 interés resistencia de los arribos de formación	164
5	285	258

Tabla 3. Señales de la formación y la T.R a diferentes distancias (transductor-receptor)

V.1.5 Respuesta típica del CBT

Las respuestas de la herramienta CBT y CBL en forma comparativa se pueden dar de acuerdo con los casos siguientes:

- Zona 1

⇒

DCBL>>NCBL>SCBL

Formaciones rápidas

(la medición para un espaciamiento de 3.4 pg. es afectada)
- Zona 2

⇒

DCBL=NCBL=SCBL

Valores bajos de amplitud (alta atenuación)

Cemento homogéneo
- Zona 3

⇒

DCBL>NCBL>SCBL

Cemento heterogéneo (casos de canalización)
- Zona 4

⇒

DCBL=NCBL=SCBL

Altos valores de amplitud (CBL)

Tubería libre

V.2 HERRAMIENTA ULTRASÓNICA (USIT)

Ondas ultrasónicas son ondas de sonido con frecuencias superiores a la capacidad auditiva del oído humano. Mientras el umbral del oído humano está situado entre 20 y 20,000 Hz, la frecuencia de las ondas ultrasónicas está localizada entre 195 kHz y 700 kHz. La principal ventaja de estas ondas es que su longitud es mucho más corta que la longitud de las ondas, esto las hacen ser fácilmente reflejadas por objetos pequeños

mientras que las ondas de mayor longitud tienden a fluir alrededor de estos objetos pequeños con muy poca reflexión.^{(22), (23)}

Sin embargo el uso de éstas ondas tiene varias ventajas:

La alta frecuencia de estas ondas requiere una capacidad de transmisión que está más allá de la capacidad de la tecnología actual, lo que obliga a que el formato de onda tenga que ser procesado directamente por la herramienta en el fondo, aumentando la complejidad de la electrónica en la herramienta.

La profundidad de investigación de estas ondas es más limitada debido a su naturaleza altamente reflexiva.

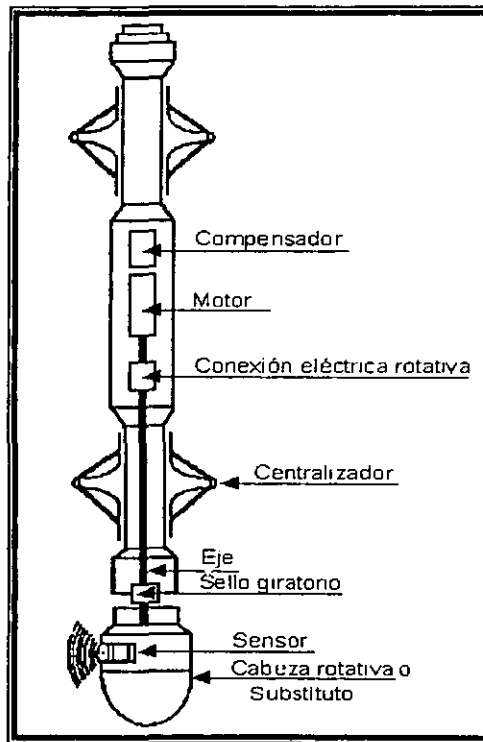


Fig.V.8. Herramienta Ultrasónica⁽³²⁾

Existen diversos usos para las ondas ultrasónicas. Por ejemplo, son utilizadas en la medicina para inspeccionar órganos del cuerpo humano sin necesidad de cirugía. También son usadas para determinar la integridad estructural en un método no destructivo, identifica la existencia de microfisuras, puntos de fatiga, etc.

El UltraSonic Imager Tool (USIT) es utilizado para evaluar la calidad del cemento e inspeccionar la tubería de revestimiento, con cobertura azimutal de 360 grados. La medición precisa de las dimensiones internas de la T.R y su espesor permiten informaciones detalladas sobre la calidad de la cementación, con identificación precisa de canalizaciones.

Así como otras herramientas ultrasónicas el USIT no es afectado por un microanillo lleno con líquido, sin embargo es afectado por un microanillo lleno con gas o aire.

V.2.1 Principio de medición

La herramienta (figura V.8) consiste de un transductor simple montado sobre una sonda giratoria al final de la herramienta, la cara del transductor en la sonda es rectangular, midiendo 1.2 (ancho) por 0.8 pg, la sonda gira a 7.5 revoluciones por segundo. Las muestras verticales están en función de la velocidad del registro (ver tabla 4). Están disponibles varios tamaños de substitutos giratorios como 5, 6, 7, 9 5/8 y 10 3/4 pg. El substituto de 10 3/4 puede ser usado en tuberías de revestimiento de tamaños superiores a 13 3/8 pg. El principio de medición es idéntico a la de la herramienta CET, de cualquier modo el transductor rotatorio provee mucho más datos disponibles para el análisis de la interfase T.R –cemento. Esta herramienta provee mediciones circunferenciales continuas en la T.R, en un diseño helicoidal con una espiral en la hélice espaciado aproximadamente 1 pg verticalmente.⁽³²⁾

Azimut	Muestra (pg)	Velocidad del Registro (ft/hr)
10°	1.51	1600
5°	6.0	3200
5°	3.0	1600
5°	1.6	800
5°	0.6	300

Tabla 4. Velocidad del Registro vs Muestreo

El principio de funcionamiento es similar al CET: un pulso corto es emitido en dirección a la T.R, haciéndolo resonar. El análisis del eco reflejado permite obtener cuatro medidas:

- 1.- Radio interno de la T.R. Calculado por el tiempo de tránsito de la señal reflejada. El tiempo es convertido en distancia, utilizando el FPM (Fluid Properties Measurement) para computar la velocidad del sonido en el fluido, basado en las propias mediciones de la sonda. La técnica utilizada elimina la posibilidad de salto de ciclo.
- 2.- Rugosidad de la T.R. Basado en la amplitud de la señal. La máxima amplitud de la señal provee una medición cualitativa de la superficie interna de la T.R.
- 3.- Espesor de la T.R. Basado en la frecuencia de la resonancia, que es inversamente proporcional al espesor de la pared de la T.R.

4.- Impedancia acústica del material detrás de la T.R. Basado en el formato de la resonancia.

El algoritmo utilizado es conocido como Técnica de Procesamiento T³ (Traitment Très Tot, Procesamiento Muy Temprano) porque analiza la parte inicial de la resonancia. Este método está compuesto por tres fases: la medición de la herramienta, la modelización y la calibración. Este método es distinto al utilizado en el CET y utiliza cinco parámetros:

- Impedancia acústica del material detrás de la T.R
- Impedancia acústica de la T.R
- Impedancia acústica del fluido
- Espesor de la T.R
- Velocidad acústica en el acero

La impedancia y la velocidad acústica del acero ya son conocidas y la impedancia del fluido es una medida también conocida, por lo tanto, las medidas que no se conocen son la impedancia acústica del material detrás de la T.R y el espesor de la misma.

Las ventajas del procesamiento T³ son: procesamiento en tiempo real, medición precisa de los parámetros (impedancia acústica, espesor de la T.R, diámetro interno), la impedancia acústica no es ser afectada por cambios en el espesor de la T.R, menor sensibilidad a otros factores (atenuación de lodo de alta densidad, reflexiones de la formación, rugosidad de la T.R) y el procesamiento no es afectado por la normalización.

Un transductor emite un corto pulso acústico en dirección a la T.R, por lo tanto, el acoplamiento acústico tiene menor importancia que el CBL, cuya dirección de propagación es vertical. La T.R resuena y refleja la señal de vuelta al transductor, que la interpreta y la analiza. Al igual que el CET la herramienta USIT analiza el decaimiento de la señal reflejado, pero el análisis es realizada de manera distinta.

La herramienta de imágenes ultrasónicas emite pulsos ultrasónicos de alta frecuencia, parte del pulso es reflejado por la pared interna del revestidor y otra resuena entre la pared interna y externa del mismo. A cada rebote, parte de la energía se transmite hacia el cemento y formación, la otra se transmite en dirección del transductor mismo. La herramienta "escucha" estas descomposiciones del pulso emitido y registra la señal en formas digital. Esta información es utilizada a términos de imágenes, calidad de cemento y de corrosión.

El USIT utiliza un transductor (Transmisor –Detector) rotatorio que tenga el papel de transmisor y detector al mismo tiempo. La distancia desde el sensor hasta el revestidor debe estar dentro de ciertos límites. Para resolver el problema se utilizan varios tamaños de la parte rotatoria.

Para medir las propiedades del fluido en condiciones de fondo se utiliza el mismo sensor, pero orientado hacia una placa de metal a una distancia conocida y de espesor también conocido. A medida que la herramienta va avanzando, el sensor va describiendo un hélice sobre el interior del revestimiento. La velocidad determina que resolución vertical es posible obtener. Por otra parte, el sensor se dispara cada cierta cantidad de grado, lo cual determina la resolución angular. Según sea la aplicación, el ángulo de muestreo varía desde 3.3 grados hasta 10 grados y la resolución vertical va desde 0.4 hasta 6 pulgadas.

El transductor emite un pulso ultrasónico con frecuencia entre 195 y 650 kHz y va cambiando conforme se acerque al receptor. El pulso viaja a través del fluido y choca contra la superficie de la T.R. La mayor parte de la energía es reflejada de vuelta al transductor, pero una cierta cantidad penetra en la T.R, ocasionando múltiples reflexiones entre las otras interfaces (T.R/espacio anular y espacio anular/formación). Cada interfase provoca pérdida de parte de la energía, dependiendo del contraste de la impedancia acústica entre las interfases(figura V.9).

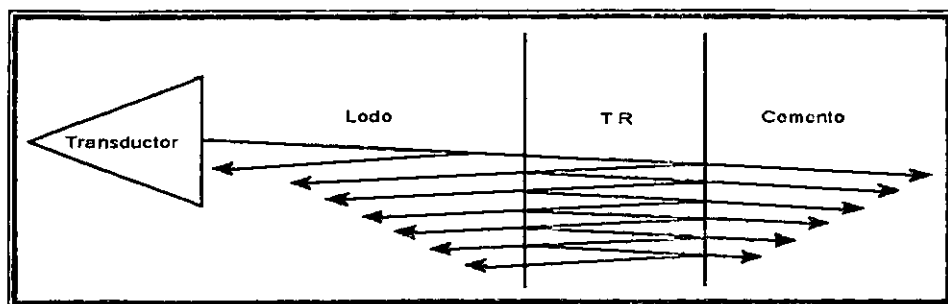


Fig.V.9. Principio de la medición⁽²³⁾

Como la impedancia acústica del acero (T.R) y del fluido existente en el pozo son esencialmente constantes, el decaimiento de la señal dependerá de la impedancia acústica del material existente detrás de la T.R. La impedancia acústica del cemento muestra una indicación de la calidad y distribución del cemento: un buen cemento tiene mayor impedancia acústica que un mal cemento o fluido de perforación. El espesor y la impedancia acústica del cemento son calculados por un nuevo algoritmo, que automáticamente corrige los efectos de variaciones en el espesor de la T.R, la atenuación del lodo y las variaciones en las lecturas de la impedancia. Los efectos del lodo son corregidos por la medición de la velocidad ultrasónica en el fluido y su impedancia.

Esto vuelve a la herramienta más precisa para detectar canalizaciones, cemento contaminado, cemento ligero, presencia de gas, incluso la detección de centralizadores, desgaste mecánico en la T.R, corrosión y depósitos en su superficie interna.

La sonda está equipada con un transductor único, disponible en diferentes tamaños a depender del diámetro de la T.R (figura V.10). El transductor (transmisor y receptor a la

vez) gira a 7.5 rotaciones por segundo, emitiendo 18 pulsos por rotación. Cada pulso tiene entre 195 y 650 kHz. Las variaciones de frecuencia son por cambios del espesor de pared de la T.R que va de 0.18 a 0.59 μg y por cambios de la densidad de los fluidos en la T.R y se sintonizan desde la superficie para optimizar las variaciones del fondo del pozo. La amplitud (nivel de energía) de la señal reflejada es una función de la impedancia acústica del fluido en la T.R, del acero de la T.R y del cemento de las respectivas interfaces.

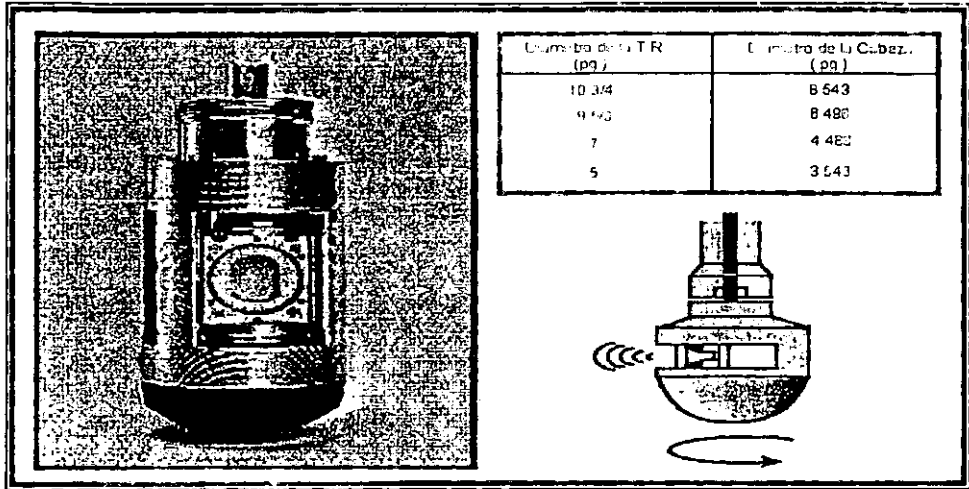


Fig.V.10. Transductor Rotativo⁽²³⁾

La mayoría de la energía transmitida es reflejada en la interfase lodo –T.R. La pequeña fracción de energía refractada a través del espesor de la T.R es reflejada en tiempos múltiples entre la superficie que refleja, una vez que el pulso ha sido transmitido dentro del cemento o lodo, cada tiempo de energía golpea a la superficie que refleja, de esta manera, el impulso del eco consiste de una amplia energía inicial reflejada en el diámetro interior de la T.R , seguido por series de pulsos invertidos con decaimiento exponencial. El procesamiento de la forma de onda reflejada incluye sólo la reflexión inicial y la parte muy temprana de la onda (el tiempo de llegada inmediatamente después del diámetro exterior de la T.R) para evitar más tarde reflexiones del exterior de la T.R, del agujero o de la formación.

Los cinco colores usados para la presentación de la USIT, es un mejoramiento sobre el mapa de cemento del CET, pero la imagen de los colores en el USIT puede ser engañosa como la coloración del mapa de cemento del CET. La imagen de los colores trabajan muy bien cuando existe una diferencia relativamente grande en la impedancia acústica entre los materiales medidos, por ejemplo, el cemento puro y agua.

La medición, coloración e interpretación llegan a ser un problema fuerte cuando una cantidad grande de gas (o espumoso) se exhibe en el cemento, es decir, los valores de la impedancia acústica es igual o menor que los fluidos del espacio anular como lodo o

agua, en la práctica esto es común a través de zonas productoras de aceite y/o gas. En estos casos, la coloración en la presentación del registro puede ser consumado, pero la mayoría de las veces el material no es identificado correctamente en el espacio anular. Estas malas interpretaciones llevan a una innecesaria y costosas operaciones y en la peor parte se corrige sin éxito la corrección.

Las innovaciones más recientes en las interpretaciones de la coloración presentan imágenes blancas pasando por amarillas y café oscuro, además tiene una línea extra para la presentación de la desviación mínima, máxima y promedio. Aceptado el concepto de que los líquidos no manifiestan variaciones estadísticas significantes en la impedancia acústica, de esta manera se sabrá que la impedancia acústica se exhibe como una "línea recta", cuando la línea de desviación es cero o casi cero, se puede decir que eso significa que es un líquido, sin tener en cuenta la impedancia acústica.

Los materiales cristalinos como el cemento fraguado (o cualquiera que no sea líquido) varían considerablemente en la impedancia acústica y por eso la impedancia acústica se manifiesta como una curva no lineal. La desviación de un material no líquido se puede manifestar cuando la desviación es mayor que 0.5 aproximadamente.

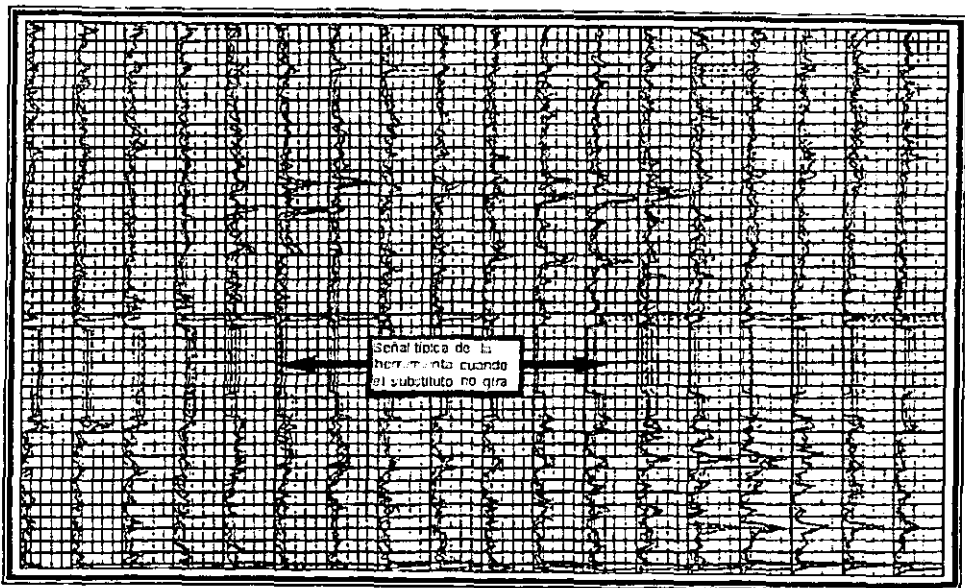


Fig.V.11. Curvas de Impedancia Acústica "Problemas en el Substituto"⁽³²⁾

Este tipo de presentación acompañado con la coloración es mucho más fácil interpretarlo y es muy significativo cuando se trata de identificar canales de líquidos en contacto con la T.R. Estas correlaciones son presentadas en una pista vertical, una horizontal y dos diagonales, lamentablemente el registro se tiene que correr en conjunto con el paquete GPIT (Herramienta General de Inclinación) para una orientación absoluta del registro en la parte superior e inferior del agujero.

Otra presentación útil del USIT es el registro de impedancia acústica (figura V.11 a V.14).⁽³²⁾ La presentación de la impedancia acústica permite la manipulación de los datos obtenidos de las curvas medidas circunferencialmente cada 5 o 10 grados junto con la profundidad.

La presentación de estas curvas junto con 36 o 76 curvas de impedancia acústica deberá ser provista, aunque sea difícil y pesado se deben de dar lectura para que se de una precisa identificación de pequeños canales y saber si están en contacto con la T.R.

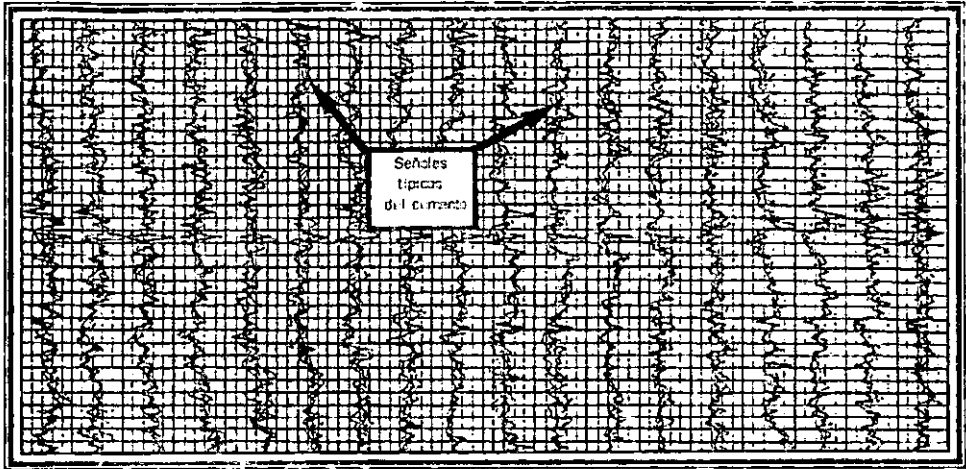


Fig.V.12. Curvas de Impedancia Acústica "Señales Típicas del Cemento"⁽³²⁾

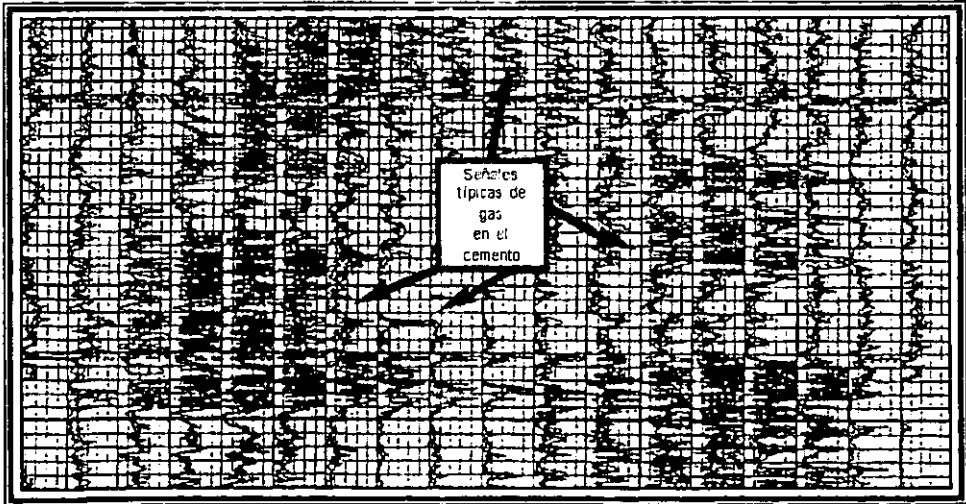


Fig.V.13. Curvas de Impedancia Acústica "Señales del Cemento con Gas"⁽³²⁾

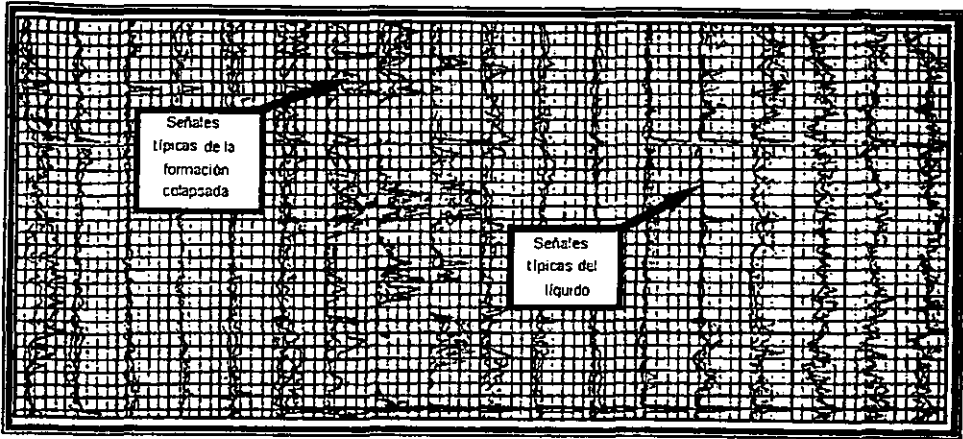


Fig.V.14. Curvas de Impedancia Acústica "Señales de la Formación y del Líquido"⁽³²⁾

Para mantener la distancia entre el transductor y la superficie interna de la T.R, existen varios modelos de cabeza rotativa de acuerdo al diámetro de la T.R a evaluar.

El transductor trabaja en dos posiciones (figura V.15)⁽²³⁾.

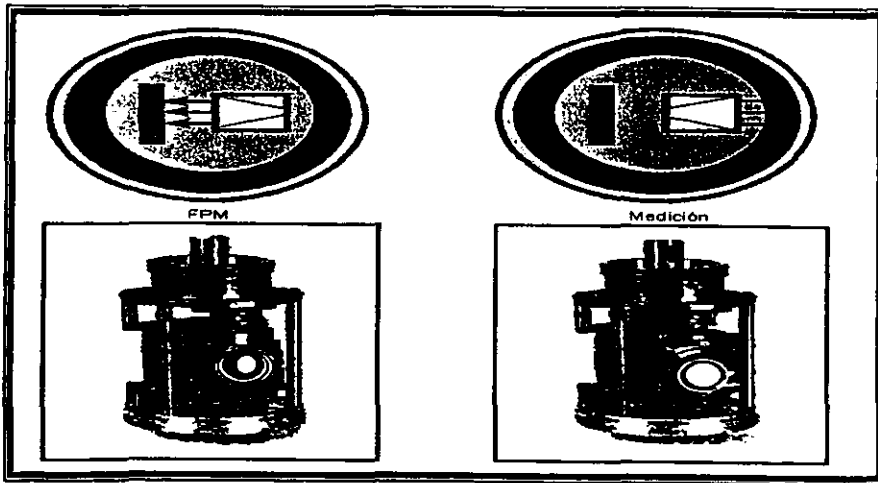


Fig.V.15. Posiciones del Transductor⁽²³⁾

Posición FPM. La posición FPM (Fluid Properties Measurement) es utilizada para medir las propiedades del fluido. El transductor está posicionado en dirección a la placa.

Posición de Medición. El transductor está posicionado en dirección a la pared de la T.R.

Existen tres áreas básicas de información en el registro del USIT:

Propiedades de los fluidos: Velocidad del fluido, impedancia acústica del fluido y espesor de la placa de calibración.

Datos del cemento: Impedancia acústica mínima, máxima y promedio, índice de adherencia mínimo, máximo y promedio y dos imágenes de cemento, con y sin umbral.

Datos de la T.R: Datos como el perfil, reflectividad y radio interno de la T.R, imagen del espesor, espesor máximo y promedio y curvas del radio interno y externo.

V.2.2 Descripción de las pistas⁽²³⁾

El registro cuenta diferentes informaciones dentro de estos se encuentran:

- 1.-Curvas auxiliares y de correlación
- 2.-Avisos (flags) del proceso
- 3.-Imagen de la amplitud
- 4.-Perfil interno de la T.R
- 5.-Imagen del perfil interno de la T.R
- 6.-Curvas de espesor
- 7.-Imagen del espesor
- 8.-Interpretación no procesada (raw) del cemento
- 9.-Índice de adherencia
- 10.-Interpretación procesada del cemento

Existen dos imágenes de la impedancia acústica presentadas, una en escala lineal y otra en escala con umbral, correspondiendo a la impedancia del gas y del lodo.

Escala lineal: Blanco < 0.5 Mrayl, de Amarillo hasta Marron con escalas de 0.5 Mrayl cada uno, Negro < 8 Mrayl.

Escala con umbral: Rojo < 3 Mrayl (impedancia acústica indica gas), Azul < 2.6 Mrayl (impedancia acústica indica fluido), Amarillo < 3 Mrayl, colores de Amarillo hasta Marron con escalas de 0.5 Mrayl cada uno e indican sólido (normalmente cemento), Negro < 8 Mrayl.

Estos umbrales pueden variar, por ejemplo cuando se usan lechadas extendidas (donde la impedancia acústica es más baja) o en lodos de alta densidad.

El USIT permite diversos modelos de perfiles y esto dependerá del tipo de operación a realizar. El perfil compuesto contiene datos del cemento, de la T.R y del fluido. En algunos registros varía el tipo de información, por ejemplo, podemos tener curvas de tensión y de excentricidad, curvas de amplitud, pistas de radio externo y radio interno promedio, así como pistas que contienen el CCL, rayos gama y espesor de la T.R, impedancia acústica, índice de adherencia e índice de gas.

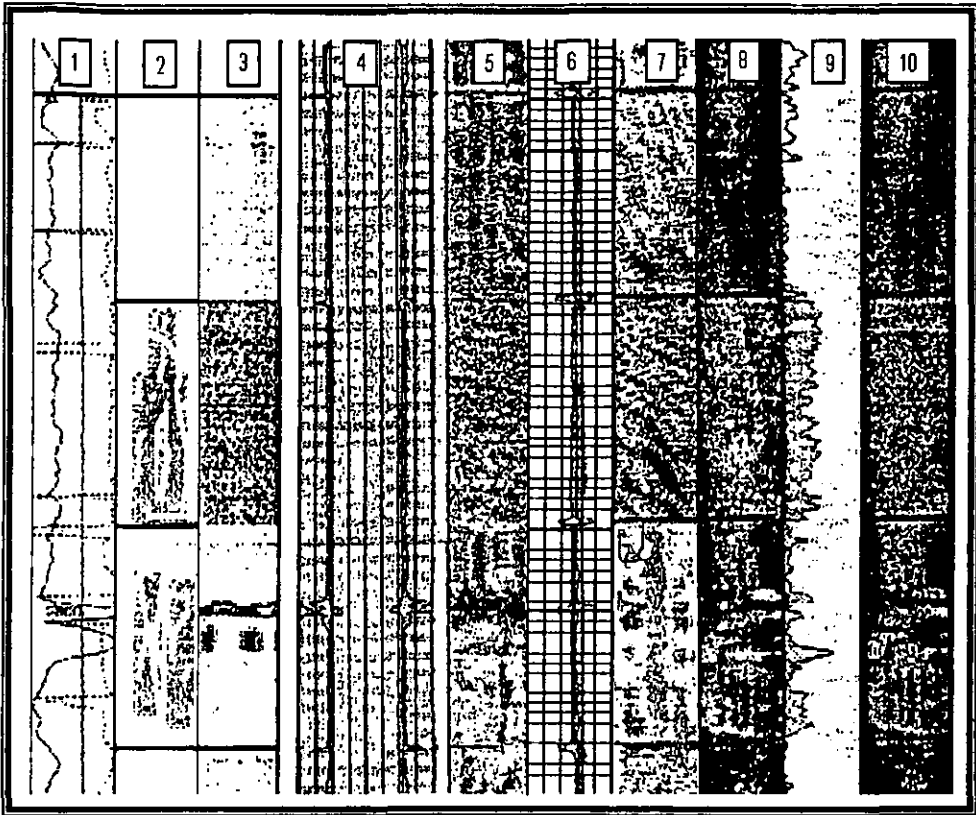


Fig.V.16. Descripción de las pistas⁽²³⁾

Una de las grandes ventajas del USIT es la confiabilidad de su respuesta. En el siguiente ejemplo (figura V.17) se tiene una combinación de 3 registros tomados con un mes de diferencia y los resultados son idénticos. La pista 1 y3 corresponden al índice de adherencia, mientras las pistas 2 y 4 corresponden al mapa de cemento.

V.2.3 Control de cementación⁽²²⁾

Para esta aplicación se mide la impedancia acústica entre el acero del revestimiento y el cemento. Dichas impedancias son convertidas en una imagen por la instrumentación de superficie del Maxis 500, permitiendo así la determinación de la calidad del cemento punto a punto. La medida presenta varias ventajas, ya que la impedancia acústica es insensible a los cambios de espesor del revestimiento como también a los cambios de diámetro externo; la sensibilidad a las reflexiones de formación se han reducido a un mínimo. Para evitar los problemas de normalización de la medida, se ha diseñado un proceso, el cual se basa en un modelo matemático.

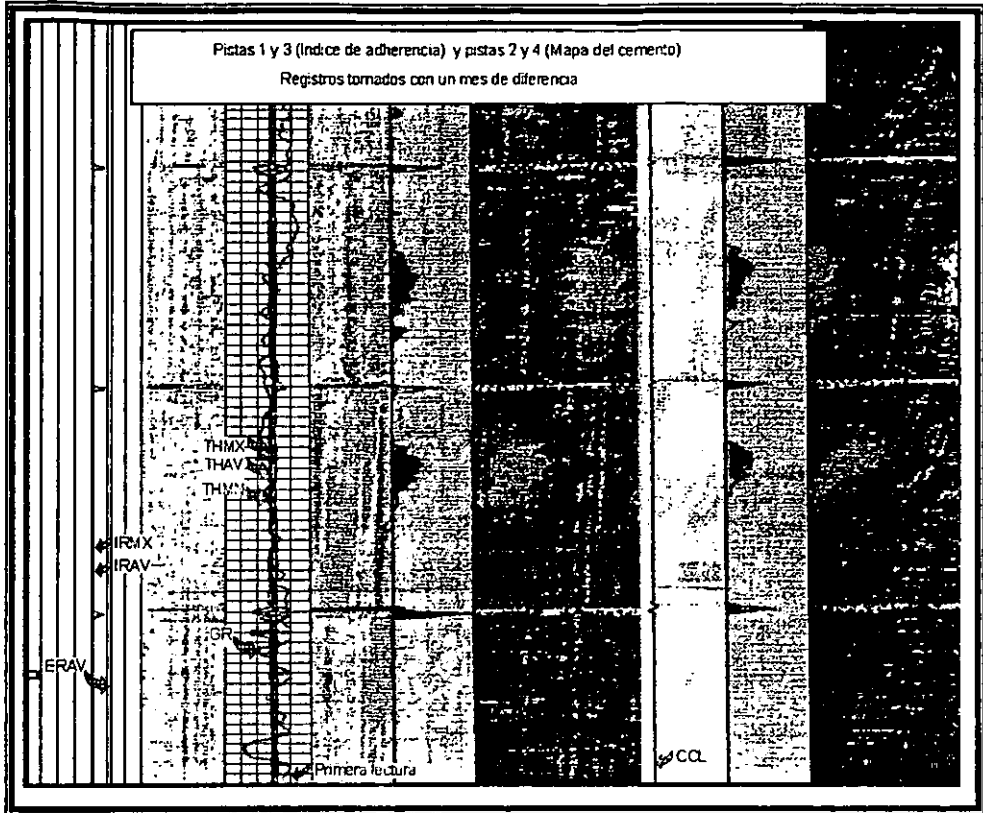


Fig.V.17. Ejemplo de la confiabilidad de las medidas⁽²³⁾

V.2.4 Control de corrosión

El tiempo empleado por el pulso ultrasónico para viajar desde el transductor hasta la pared de la tubería de revestimiento y regresar, se relacionan a la distancia por una simple fórmula de distancia –velocidad y tiempo. De aquí se obtiene el diámetro interno. La frecuencia de resonancia de otra parte de una medida del espesor del acero, utilizando ambas se obtiene el diámetro externo. Todas estas medidas se presentan en forma de imágenes.

La figura V.18 corresponde a una presentación especialmente adaptada a la evaluación de la cementación, se puede observar en ella que la cementación es pobre en todo el intervalo observado con efectos de gas, en la parte inferior. El índice de adherencia se puede observar en la segunda pista de derecha a izquierda y también se observa el estado mecánico de la tubería, donde se observa la tubería dañada al fondo (220-229 m).⁽²²⁾

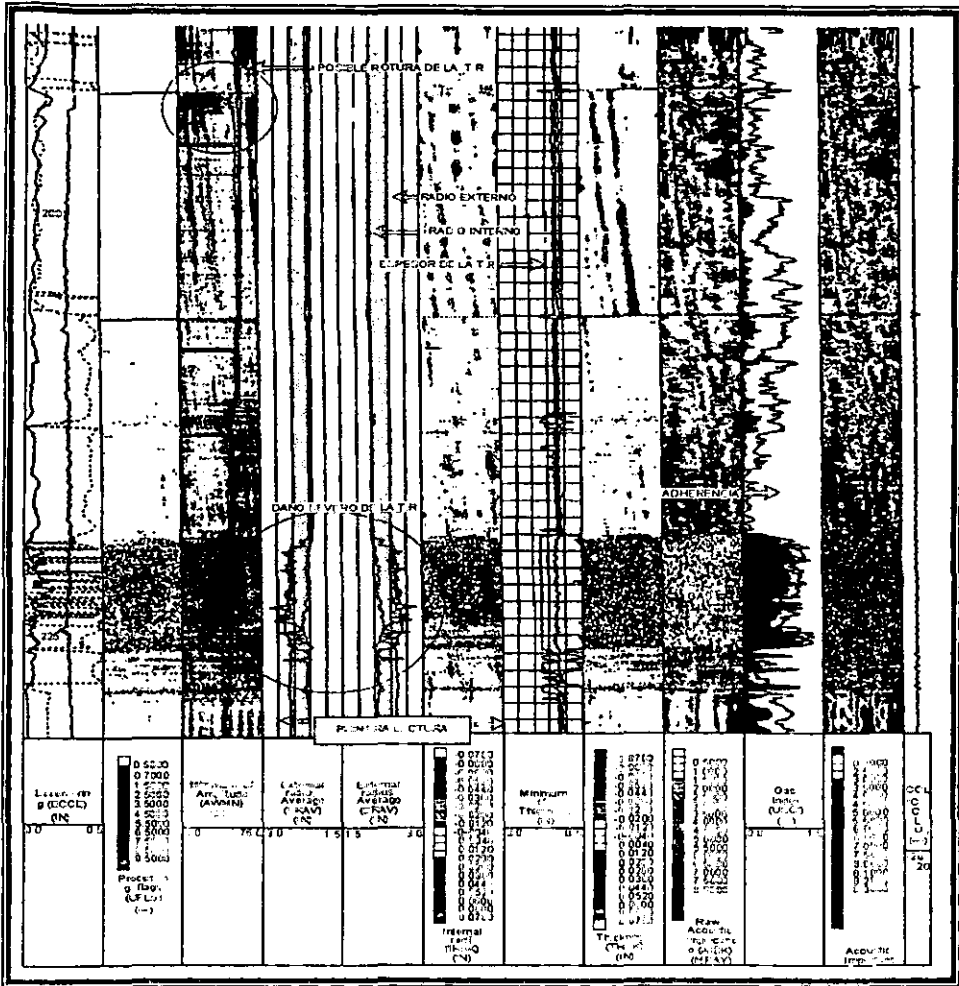


Fig.V.18. Ejemplo del registro USIT⁽²²⁾

V.3 PULSE ECHO TOOL (PET)

Esta herramienta esta compuesta por 8 transductores más un transductor de referencia. Los transductores están localizados a la mitad de la herramienta, estos transmiten un pulso y reciben el eco de la señal, la cual es digitalizada en el fondo del pozo y después es enviada a la línea, usa frecuencias ultrasónicas [≈ 500×10³ ciclos/seg (≈ 500 kHz)] para medir la adherencia cemento-T.R, el diámetro interior y el espesor de pared de la T.R. El principio de medición es radial y reduce el efecto de las señales de la formación y permite la medida de atenuación de la onda aún en la presencia de pequeños microanillos.⁽²⁵⁾

El transductor del PET emite un pulso ultrasónico que golpea la T.R y esto causa una resonancia en el espesor de pared, la resonancia distorsionada reflejada del pulso es indicativo de la impedancia acústica del material en el espacio anular^{(28), (29)}. El espesor de pared de la T.R es inversamente proporcional a la frecuencia resonante y es determinada para medir la frecuencia del eco de la señal en tiempo real con un algoritmo señal-proceso. La medición del espesor de pared y el diámetro interno de la T.R es para determinar las variaciones del espesor que resultan de la corrosión interior o exterior.

Los 8 transductores realizan una inspección total de 360°, en incrementos de 45°. El arreglo de los transductores es de doble hélice, el diseño de la hélice es ilustrado en la figura V.19a. La presentación del registro PET (fig. V.20)⁽²⁷⁾ incluyen: una curva de excentricidad (escala de 0 a 0.5 pg), una curva de rayos gama, un detector de coples de la T.R, una curva del rumbo relativo (escala de 0° a 360°), una de la resistencia a la compresión del cemento (mínimo, máximo y promedio) y una "imagen de adherencia".

El registro de ésta herramienta nos muestra lo siguiente:

- Evaluación de la adherencia del cemento
- Detección y orientación de canales
- Impedancia acústica
- Resistencia a la compresión
- Excentricidad de la herramienta
- Inclinación y Rumbo Relativo
- Rayos Gama
- Localizador de Coples

Además de que la herramienta es menos sensible a la descentralización, menos sensible a los microanillos, alta resolución circunferencial, reduce el tiempo de registro y se pueden correr simultáneamente con la herramienta CBL.

Para propósitos de identificación de canales, el transductor No.1 se alinea hacia la parte superior derecha del agujero, de 0° a 360°. El transductor No.2 esta a 180° en el lado superior del agujero. La imagen de adherencia puede ser rotada para mostrar los lados altos y bajos del agujero mediante la entrada de parámetros identificadores de curva en la computadora. Se le llama "O" cuando la imagen de adherencia esta siendo orientada y se le llama "F" cuando la imagen tiene una posición fija. Generalmente cuando se solicita que la posición sea orientada, la parte inferior del agujero es presentada en el centro de la imagen de adherencia.

Otro parámetro significativo identificable en la curva es el control de la coloración presentada en la imagen de adherencia. Los valores de coloración pueden ser ajustados con la mínima resistencia a la compresión del cemento (coloración blanca en la imagen de adherencia) y la máxima resistencia a la compresión del cemento (azul fuerte en la imagen de adherencia). Entre estos ajustes va disminuyendo el tono del color azul lo cual va indicando la disminución en la resistencia a la compresión del cemento.

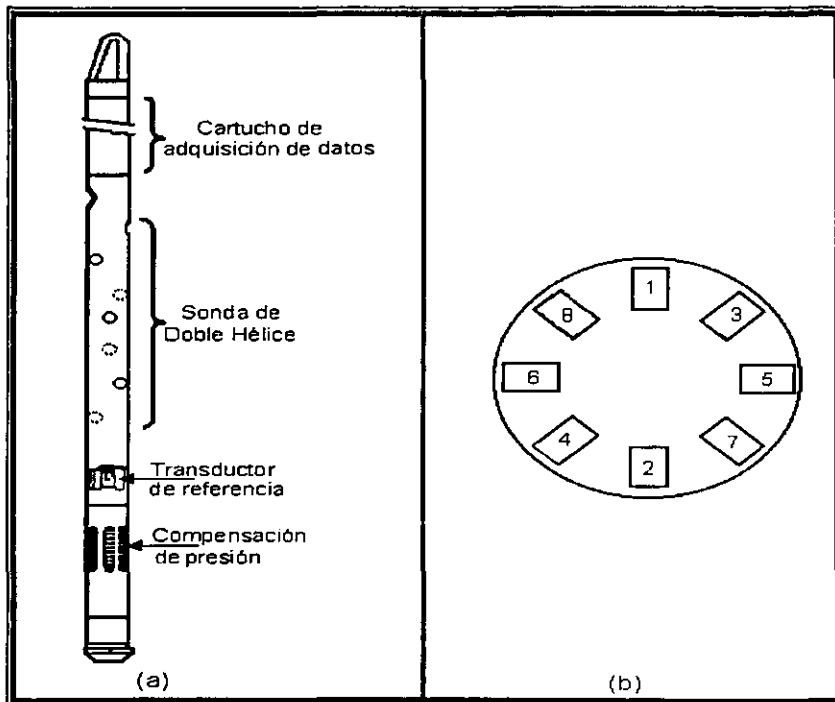


Fig.V.19. a) Herramienta P.E.T, b) diseño de la herramienta⁽³²⁾

Entre más pronto se haya esforzado, la resistencia de la capa de cemento no es tan importante, esto es simplemente necesario para diferenciar entre un sólido o un líquido en el espacio anular. Con este fin y para propósitos de coloración se recomienda que el conjunto de valores de coloración sea igual y suponiendo un valor mínimo de la resistencia a la compresión del cemento fraguado cuando la temperatura de curado se presente en la parte superior de la columna de cemento.

También como en el CET la coloración en la imagen de adherencia llega a ser muy difícil en casos cuando existen cementos espumosos o en cementos con algún contenido de gas. En otras palabras esto se simplifica con el índice de adherencia, ya que puede ser muy engañoso e intentar hacer una cementación forzada.

V.3.1 Principio de medición

La presentación de la resistencia a la compresión en el registro del PET es calculada en función de los valores medidos de la impedancia acústica, estos valores son basados de la relación de FA/RW (figura V.21)⁽³²⁾, es decir, la relación entre la tubería libre y la tubería cementada en el pozo. FA es el área máxima de la tubería libre y RW (resonance Windows, ventana de resonancia) representa el área máxima dentro de la ventana de medición. La herramienta debería ser calibrada ya sea en la tubería libre en el pozo o antes hacer una prueba para correrlo en el pozo. La calibración es una recomendación para todos los cálculos subsecuentes en la presentación del registro, por lo tanto es válido sólo para tuberías de revestimiento de un solo peso y tamaño.

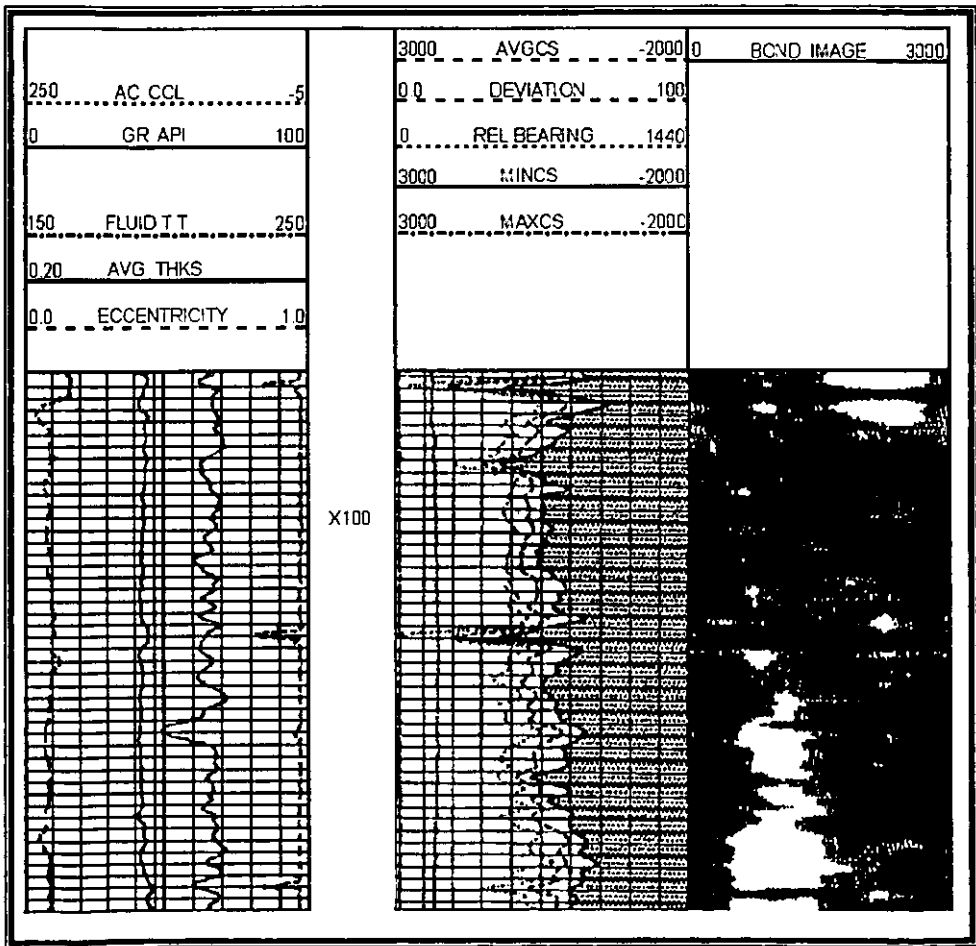


Fig. V.20. Presentación del registro P.E.T⁽²⁵⁾

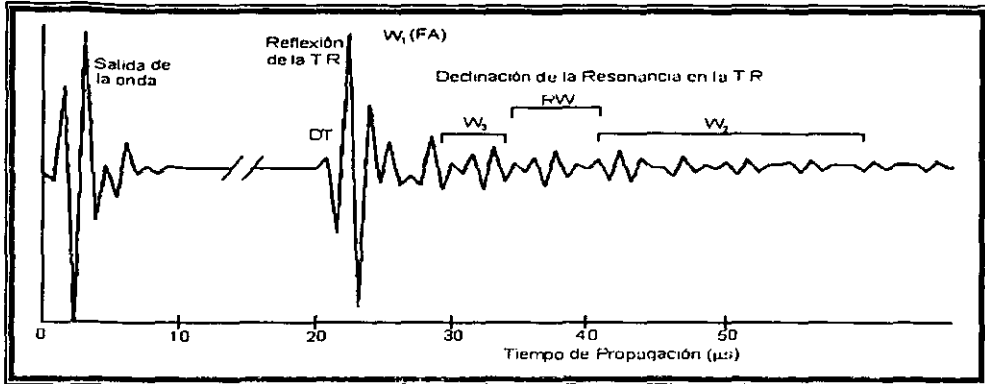


Fig.V.21. Medición de las formas de onda en el P.E.T.⁽³²⁾

La herramienta deberá ser calibrada para cada peso y tamaño de tubería de revestimiento en el pozo. La calibración en el taller incluye grabaciones de valores verdaderos de tubería libre de un peso y tamaño, dados en un recipiente a presión. Los valores de calibración de la herramienta es el producto de los valores de la calibración en el taller y de tres factores:

- El efecto de la temperatura
- Densidad de los fluidos en la T.R.
- El factor de cambio en el peso y tamaño de tuberías de revestimiento estipuladas

Todo esto es requerido para el registro en la identificación de la calidad del cemento, para identificar la presencia de canales rellenos de líquidos en el espacio anular, si esto puede ser aceptado, es solamente necesario para separar el material en el espacio anular en 2 categorías en líquido o en sólido, entonces la evaluación de la calidad del cemento puede llegar a ser mucho más fácil. Un segundo registro para mejorar la presentación del formato PET son los datos del registro de la impedancia acústica. El registro de la impedancia acústica es una presentación continua y nueva de los datos medidos por cada uno de los 8 transductores.

El propósito de la interpretación es para recordar que los valores de la impedancia acústica de los líquidos nunca cambian, por lo tanto, la medición de la impedancia acústica podría no variar cuando el líquido está en el espacio anular, en algunas operaciones, el registro podría exhibir una línea recta cuando algunos de los transductores "observa" líquido en contacto con la superficie exterior de la T.R, esto es verdad tanto en la parte teórica como en la realidad. La calidad de la línea recta dependerá de la calidad de los transductores y de la señal de los datos procesados por la compañía de servicio. La figura V.22 ilustra el registro de la impedancia acústica de un campo utilizando la herramienta PET en donde se observa la línea recta que sobresale.

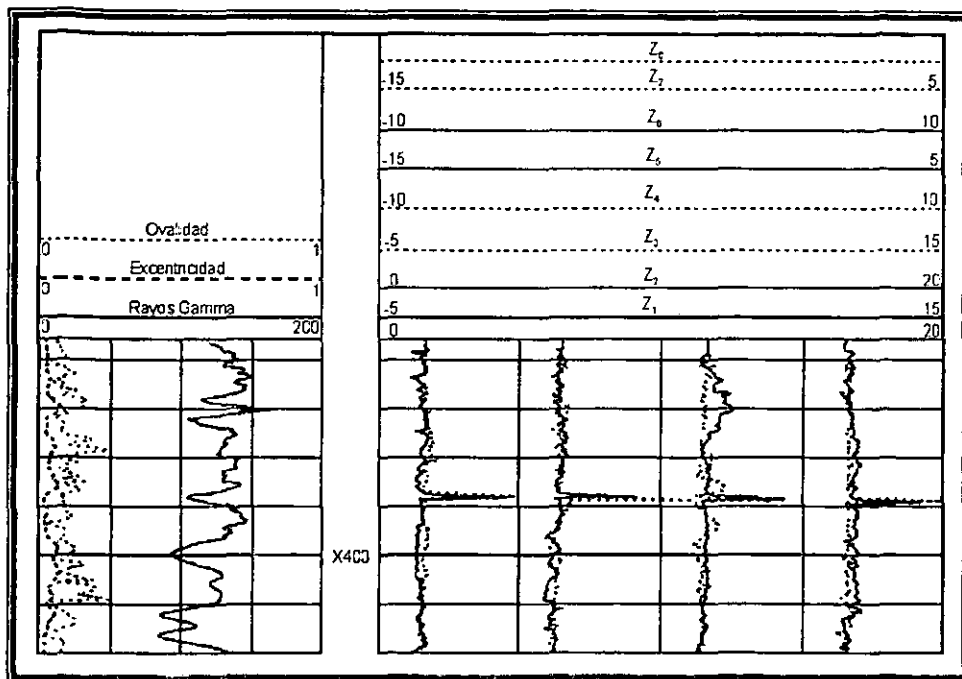


Fig.V.22. Señal del liquido en el P.E.T.⁽³²⁾

Con el uso de la impedancia acústica se evitan algunos o muchos problemas, y poniendo los parámetros correctos y mejorando los algoritmos del software se logra una mejor interpretación del mapa del cemento o de la imagen de adherencia. Esta innovación y tomando en cuenta los cambios impredecibles que ocurren durante y después de la colocación del cemento hacen que la interpretación del registro (mapa del cemento, imagen de adherencia, resistencia a la compresión, etc) vaya de nebulosa a clara.

La contaminación de gas en el cemento puede ocurrir ya sea por causa del diseño de la lechada (cemento espumoso) o se puede dar naturalmente durante o después de ser colocado el cemento, de ahí que existan aproximadamente 30 aditivos disponibles de compañías de servicio para prevenir la migración de gas después de la cementación. El gas en el cemento tiene una señal identificable en la impedancia acústica en la presentación del registro. El transductor "observa" el gas así como el cemento dentro de los confines del área de medición y la computadora interpreta la presencia de ambos materiales (gas y cemento). En la presentación del registro se ilustran las mezclas como una señal muy errática, los valores de la impedancia acústica son fuertes, que van de un valor bajo de 0.1 aproximadamente a un valor alto igual a la impedancia acústica de un cemento que no esta contaminado (de 3 a 7). La figura V.23 una señal típica del gas en el cemento.^{(26), (32)}

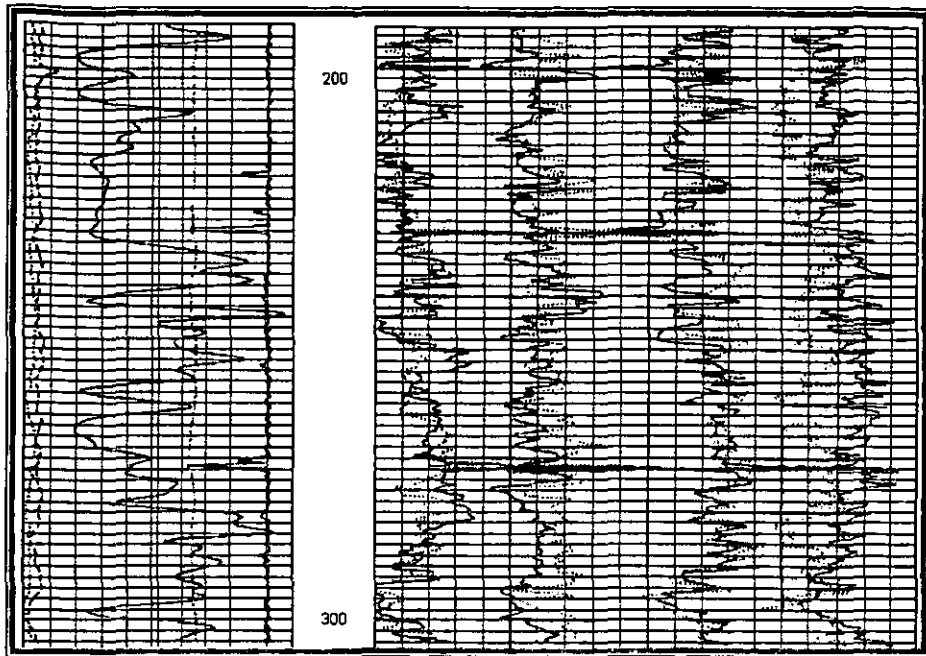


Fig.V.23. Impedancia acústica (señal típica del gas en el cemento)⁽³²⁾

El cemento es un material cristalino en la cual la impedancia acústica se incrementa con el tiempo aun cuando la densidad no cambie con el tiempo (siempre y cuando éste no este contaminado), este incremento es el resultado del crecimiento interno de la estructura cristalina, indicando el incremento de la resistencia estructural (esfuerzo cortante), éste incremento esta en función de la composición y de la reacción con el agua y la temperatura, por consiguiente, el sistema comprende la capa de cemento, la resistencia del cemento (esfuerzo cortante) que rara vez será idéntico vertical u horizontalmente de un punto de referencia dada. La impedancia acústica es el producto de la densidad y la velocidad, pero como la densidad del cemento no cambia, el incremento de la impedancia acústica es el resultado del incremento de la velocidad del sonido a través del medio, el cuál es paralelo al incremento del esfuerzo cortante, por lo tanto, la resistencia del cemento y la impedancia acústica no son constantes. El cemento no contaminado tiene una clara y reconocible característica en la señal, como se ilustra en la figura V.24.

Como ha sido enfatizado, esto es necesario para que nosotros seamos capaces de reconocer un cemento muy débil o con alguna cantidad de gas que debilite la columna de cemento. La habilidad de las herramientas ultrasónicas para identificar cualquier material sólido en el espacio anular (usando la presentación de la impedancia acústica) ya sea cemento, cemento contaminado, pozos colapsados o barita asentada (del lodo de perforación) y lejos de superar la habilidad del reconocimiento del cemento el registro es un recurso. Esto es importante para reconocer donde se encuentra la parte

superior de la barita depositada para recementar un pozo viejo (para extender la longitud de la columna de cementada) o para reconocer áreas cerca de la T.R donde partículas de la formación son colapsadas en el espacio anular.

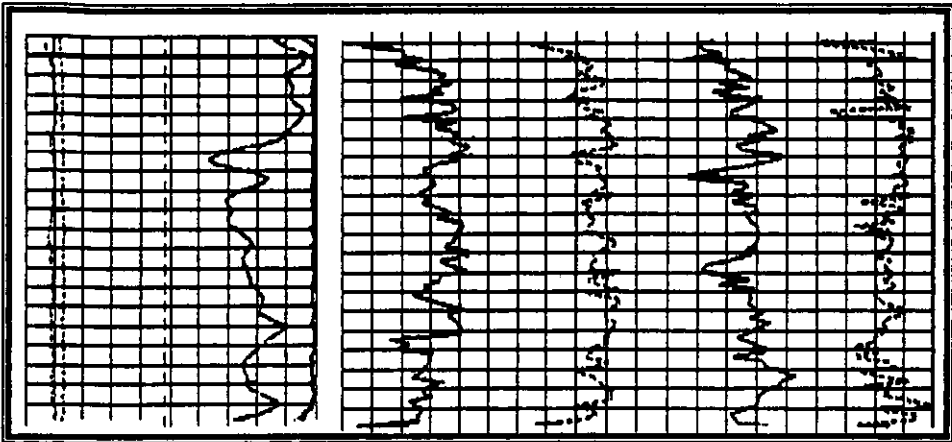


Fig.V.24. Impedancia Acústica del P.E.T (Señales del cemento no contaminado)⁽²⁵⁾

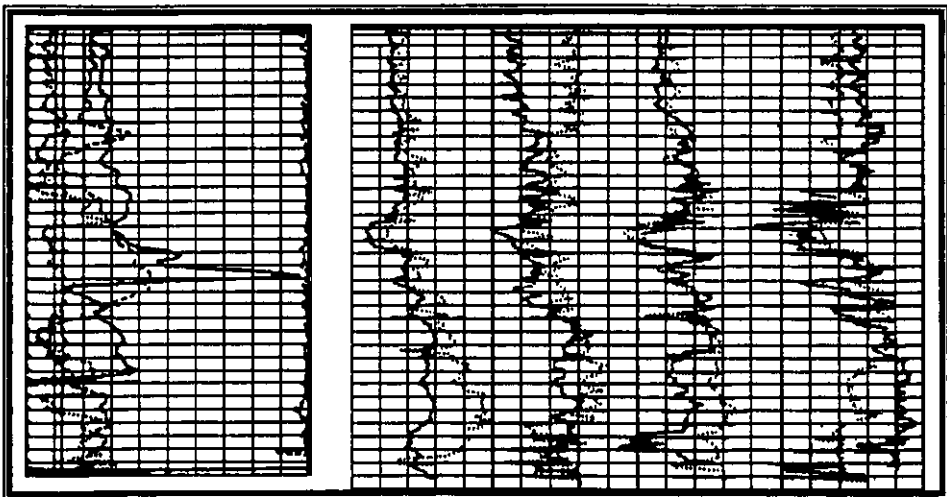


Fig.V.25. Impedancia Acústica del PET (señal del espacio anular sin cemento)⁽²⁵⁾

En cualquiera de estos casos, el espacio anular normalmente no se puede recementar por que las partículas sólidas no son removibles. La figura V.25 ilustra las respuestas del registro de adherencia del PET para reconocer el material no cementado en el espacio anular, los registros se corren sobre 4 juntas de 9 5/8", llevando una T.R de 53.3 lb/ft, donde sólo el material en contacto con el exterior de la T.R sean suelo seco y roca. La única indicación en el registro de adherencia de la existencia de algunos

materiales en el exterior de la T.R es la curva de amplitud. El VDL no muestra la señal de la formación cuando la roca ha sido pulverizada por las pulsaciones o vibraciones de la T.R durante la bajada de ésta. Las disminuciones en los valores de la amplitud indican que la formación triturada fue peor en la parte superior que en el fondo.

Comparando el registro del CBL con el PET, la interpretación de éste último es mucho más directa, además se identifican canales en el despliegue de la adherencia en áreas delgadas, se caracterizan por la reducción de los valores de la resistencia a la compresión. El porcentaje de cobertura circunferencial y radial pueden determinar la posición de los canales por mediciones a través de la visualización de la adherencia. Los límites para detectar el tamaño del canal es restringido por la cobertura radial de los 8 transductores, cada transductor emite una onda de energía ultrasónica alrededor de una pulgada de diámetro; por eso, el porcentaje de cobertura circunferencial de los transductores es determinada por el diámetro de la tubería de revestimiento. Por ejemplo para una tubería de 5 ½ pg. (14 cm), existe un espacio suficiente ($\approx 24^\circ$) entre los transductores para permitir la detección de canales cada 6° , pero cuando la rotación de la herramienta no sea la adecuada, estos canales no se podrán detectar (fig.V.26).⁽³²⁾

El diámetro de la herramienta es de 3 3/8 de pg, una longitud de 4.2 m, un peso de 215 libras, temperatura máxima de 350 °F, presión máxima de 20,000 psi y tuberías de revestimiento mínima de 4 ½ pg. y máxima de 7 pg.

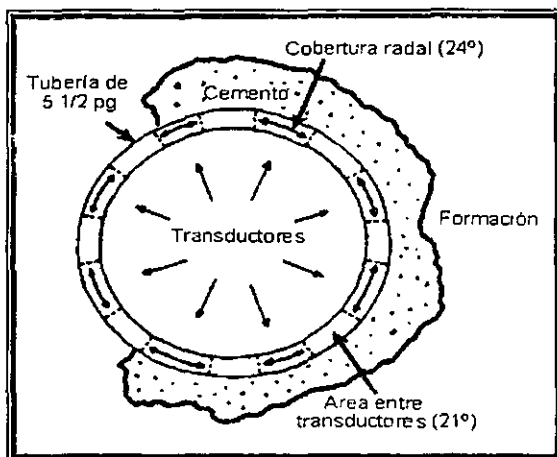


Fig.V.26. Medición de la cobertura radial del PET⁽²⁵⁾

V.4 RATIO BOND TOOL (Herramienta de Relación de Adherencia)

La introducción de nuevas técnicas y nuevos registros ultrasónicos han transformado dramáticamente la evaluación del cemento. Los métodos previos que han usado frecuencia baja [$\approx 20 \times 10^3$ ciclos/seg (aprox. 20 kHz)] en las señales acústicas y con la

combinación de un transmisor/dos receptores sufren de problemas inherentes de medición.^{(26), (27)}

Para eliminar los diversos problemas del CBL principalmente, existe una nueva herramienta de medición acústica con dos transmisores/multireceptores, de esta manera ha sido introducida la herramienta RBT, ésta herramienta mide directamente la atenuación a través de técnicas de proporción de adherencia, la herramienta es automática y es menos sensible a la centralización. Mientras las técnicas implementadas a la herramienta RBT mejoran la respuesta sobre el CBL, no serán eliminados los problemas inherentes; tales como microanillos y la menor sensibilidad a los canales.

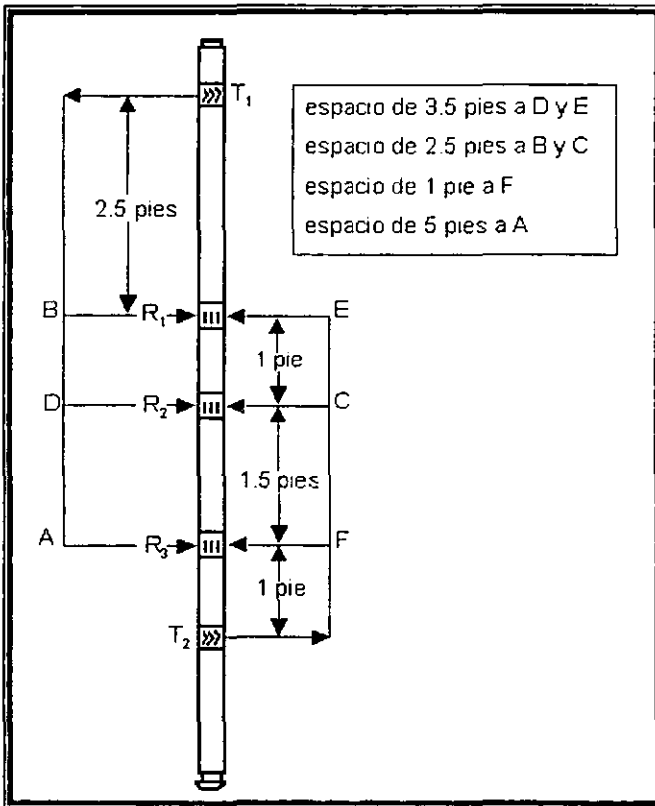


Fig.V.27. Herramienta RBT⁽²⁶⁾

V.4.1 Principio de medición⁽²⁶⁾

El RBT determina la calidad de adherencia por una técnica similar al registro sísmico compensado. El esquema de compensación usada en el RBT responde a las primeras amplitudes de llegada, para medir directamente la atenuación. El RBT tiene dos

receptores simétricamente posicionados entre el transmisor superior y el inferior, dos receptores a 2.5 pies (0.8m) de cada transmisor y dos receptores a 3.5 pies (1.1m) de cada transmisor, para medir valores de amplitud y tiempo de tránsito (fig.V.27). Con estos cuatro valores de amplitud, se expresarán como atenuación (db/ft) con la siguiente ecuación:

$$a = -10 \cdot \log[(A_D A_E)/(A_B A_C)] \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

- a = Atenuación
- A_D, A_E = Amplitudes a 3.5 pies y
- A_B, A_C = Amplitudes a 2.5 pies

Estas mediciones pueden ser insensibles a los cambios de temperatura, a la atenuación de los fluidos y a los cambios de sensor. Comparando las amplitudes unas con respecto a otras, la herramienta proporciona una auto-calibración y una menor sensibilidad a la descentralización. Además, la resolución vertical se mejoró porque la medición era limitada por el espacio entre receptor-transmisor que en el CBL es de 3 pies y se cambio a un espaciamiento de receptor a 1 pie. El tercer receptor a un espaciamiento de 5 pies es usado para registrar el espectro sísmico o representación visual de las señales.

En intervalos de carbonatos densos, el tiempo de tránsito a través de la capa de cemento y a lo largo de la pared de la formación es menor que el tiempo de propagación producida en la T.R. y que la señal de la T.R cuando llega a la cara de la formación, la interpretación de la primera llegada de amplitud implica una menor información de la adherencia de la interfase cemento-T.R. Al usarse el espaciamiento de 1 pie la señal del transmisor-receptor en el RBT provee una medición de la amplitud de llegada de la T.R libre de interferencia de las señales de la formación. Igualmente en casos extremos [tiempo de tránsito de la formación = 47 μ s/ft (154 μ s/m) y con una capa de cemento = ¾ pg (19 mm)], la señal proporcionada de la T.R precederá la llegada de la formación. El uso de estas mediciones se limita a T.R's más pequeñas.

La distorsión de la señal en la transmisión del cable analógico es eliminada, a través de la digitalización en el fondo del pozo después de la detección y pre-amplificación. El registro del RBT se presenta con rayos gama, y un detector de coples magnético en la pista 1, las amplitudes de 2.5 y 1 pie, así como el tiempo de propagación de 3.5 y 1 pie y el coeficiente de atenuación en la pista 2 y el aspecto sísmico a 5 pies en la pista 3.

La cobertura circunferencial indicada por la herramienta RBT puede ser calculado por el método de índice de adherencia. La relación obtenida de la atenuación puede ser usada en la ecuación del índice de adherencia, de este modo, el criterio de la detección de canales es igual que en la interpretación del CBL.

Se recomienda la herramienta RBT para eliminar las preocupaciones relacionadas con la calibración, además para mejorar la sensibilidad y simplificar la interpretación.

Además, se deben de continuar los esfuerzos para mejorar la sensibilidad de la herramienta para canales más pequeños.

La herramienta RBT tiene un diámetro de 3 3/8 pulgadas, una longitud de 14 pies, un peso de 175 libras, una temperatura máxima de 200 °C y una presión máxima de 20,000 psi, y opera en tuberías de revestimiento mínima de 4 ½ pg.

V.5 SEGMENTED BONDING TOOL (Herramienta de Adherencia Segmentado)

Esta herramienta mide la calidad de la adherencia del cemento lateralmente alrededor de la circunferencia de la tubería de revestimiento, así como también realizan las medidas tradicionales de evaluación del comportamiento vertical de la adherencia de cemento en el pozo.

Esta herramienta consiste de 6 cojinetes los cuales pueden ser colocados frente a la superficie interna de la T.R, para medir la atenuación promedio de las señales en db/ft, cada uno de estos cojinetes están separados 60° de la interfase T.R –Cemento.

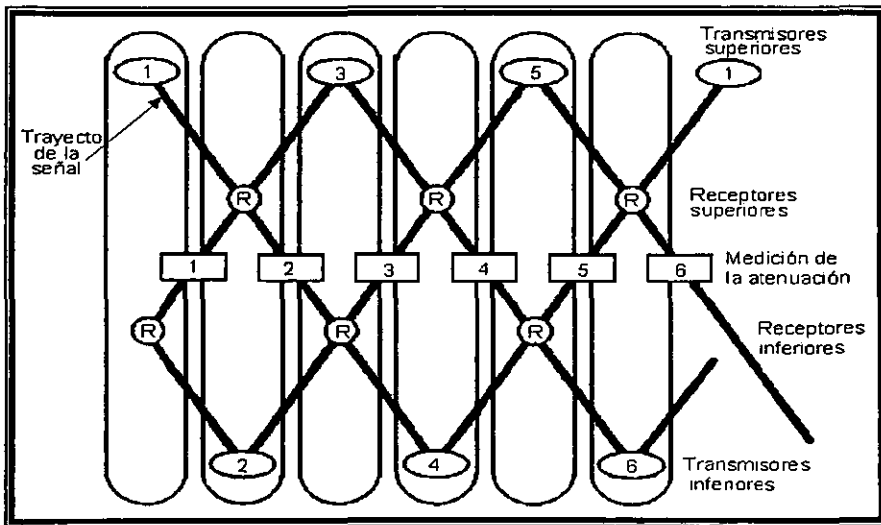


Fig.V.28. Herramienta SBT⁽³²⁾

La configuración básica de la herramienta se ilustra en la figura V.28. Esta usa un perfilado de alta frecuencia dirigido del transductor hacia las seis almohadillas, en los brazos de cada almohadilla contienen un transmisor y un receptor enfrente de la pared de la T.R, puede ser usada en T.R's de 4 ½ hasta 16 pg o en cualquier tipo de tuberías que contengan líquidos o gas. La onda completa es transmitida desde un módulo omnidireccional situado a 5 ft del receptor y es corrido en conjunto con la sección de cojinetes. Cada que el transmisor emite una onda, son recibidos por dos receptores: el

adjunto y el consecutivo. El transmisor sobre el cuarto sensor adyacente se enciende y las amplitudes son medidas en los mismos dos receptores (en dirección opuesta).^{(23), (24)}

Las pérdidas de energía a través de los receptores son promediadas produciendo una medida directa de atenuación sobre una distancia corta. Las mediciones son compensadas por variaciones en el transductor.

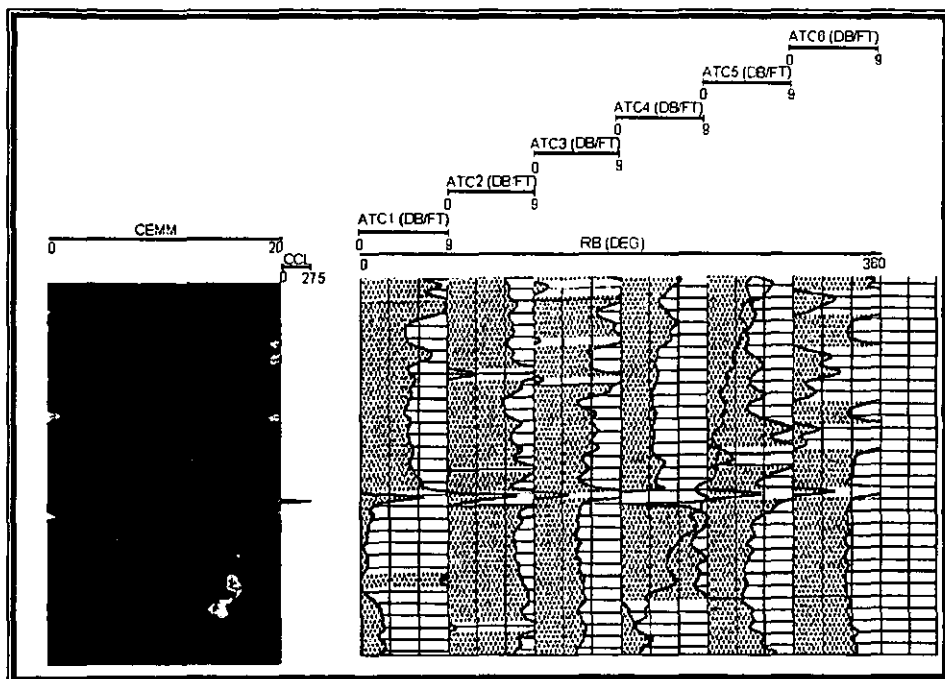


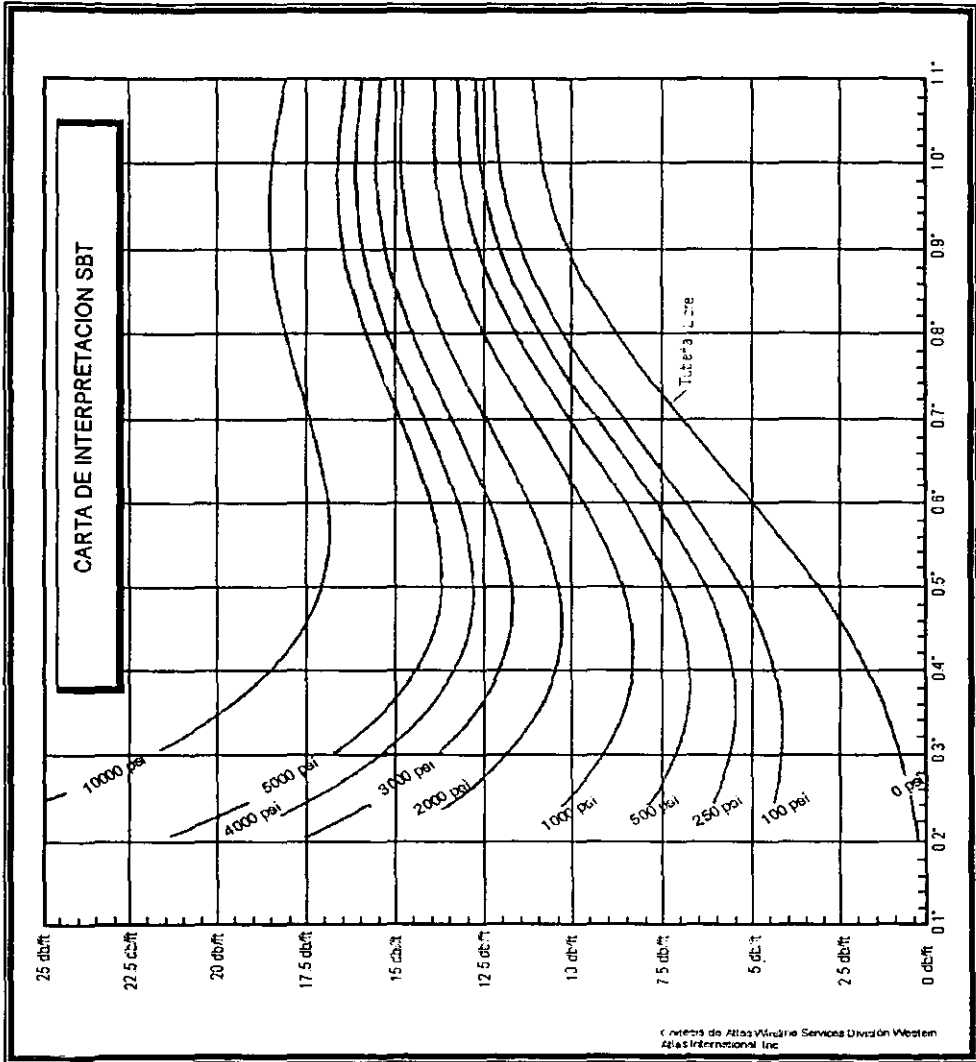
Fig.V.29. Presentación del registro del SBT⁽³²⁾

V.5.1 Principio de medición^{(25), (26), (32)}

Las calibraciones no se requieren en ésta herramienta. La presentación del SBT (figura V.29) de preferencia debe incorporar 6 pistas que presenta la atenuación medida de cada sensor, la orientación de la herramienta muestra el lado inferior del agujero y un mapa de atenuación variable en la pista 1.

En la figura V.29 la curva más importante esta en la pista 3, indicando la parte inferior del agujero, en este caso, la parte superior del agujero estará representada por la pista 6. La escala recomendada para la medición es de 0 a 9 decibeles. Esto mejora la presentación suficientemente para la evaluación del cemento de baja densidad, baja resistencia e incrementa la habilidad o capacidad para determinar si el material en cada segmento es sólido o líquido.

Teniendo en cuenta que la atenuación es un promedio a través de cada segmento de 60°, lo cual significa que puede existir más adelante un canal lleno de líquido, con una buena calidad de cemento en cada segmento y que la atenuación resultante parecería como un cementación débil en vez de una canalización.



Gráfica V.1. Carta de interpretación SBT⁽³²⁾

V.5.2 Descripción de las pistas

La presentación de la pista 1 del registro esta referida como un mapa de “atenuación variable”, representada por coloraciones de acuerdo a la figura anterior. Estos ajustes

deben ser coordinados con los valores de atenuación contenidos en la carta de interpretación SBT (gráfica V.1) basados en el espesor de la T.R y la resistencia a la compresión del cemento. Como guía, la resistencia a la compresión del cemento más débil deberá ser medida a la temperatura mínima para determinar cuando la capa de cemento debe ser registrada. La explicación de la información proporcionado por el registro SBT de la figura V.29 es la siguiente⁽³²⁾:

ATCn. 6 mediciones compensadas de la atenuación con escala de 0 a 15 db/ft. En cementos de baja resistencia a la compresión o en cementos espumosos deben de tener un ajuste de 0 -9 db/ft proporcionando un mejor trazo entre el líquido y el cemento.

ATAV -ATMN. Curvas de atenuación promedio y atenuación mínima registradas de las 6 curvas del ATCn.

Mapa del Cemento. Interpretación gráfica de la calidad del cemento, basada en la coloración de las curvas ATCn.

VDL. Presenta la onda completa

DTMX -DTMN. Curvas de calidad del registro, tiempo de tránsito más largos o más cortos, medidas del sensor divididas por el espaciamiento del receptor. Indican las variaciones de distribución del sensor, la calidad de los contactos del sensor, el diagnóstico de la herramienta, etc.

RB. Rumbo Relativo. Curvas punteadas presentadas con las curvas ATCn, son útiles en el mapa de cemento para identificar la parte inferior o superior del agujero.

1.- Excentricidad máxima de la herramienta es igual a 4 μ s.

La escala del tiempo de tránsito es máxima de 100 μ s (200 -300 o 300 -400) para una medida de excentricidad más exacta

2.-Escala de la amplitud de 0 a 100 mV y en registros de adherencia con una amplificación en la amplitud de 0 a 20 mV y la escala de atenuación va de 0 a 20 db/ft

3.-En el SBT la escala de atenuación es de 0 a 9 db/ft y el mapa de cemento usa la carta de interpretación SBT. El valor mínimo de coloración será igual a la de la tubería libre, como lo muestra la carta (basado en el espesor de la T.R)

4.-Los registros de adherencia no deben ser corridos en T.R's mayores a 9 5/8", pero el SBT puede ser corrido en T.R's de 16 pg o mayores

5.-Cuando se corren estos tipos de registros siempre se debe de hacer un paso de presurización y uno de no-presurización, además estas herramientas son muy sensibles a microanillos mayores que 0.0005 pg.

La presión interna de la T.R deberá igualar cualquier cambio de presión que haya ocurrido en el cemento hasta que alcance el estado de fraguado, esto incluye pruebas de presión y/o cambios de la presión hidrostática, más 500 psi para tener en cuenta la expansión de la T.R debido al calor de hidratación en el cemento, por ejemplo, si el tapón superior es desplazado a 8000 ft con un lodo de 12 lb/gal, entonces el lodo fue desplazado con un fluido de terminación al 2% de KCl antes del registro y la presión interna de la T.R debería ser 1976 psi (incluyendo los 500 psi por el calor de hidratación del cemento).

Cuando se prepara el paso de presurización se agrega una línea para la curva de tensión en el registro

6.- El registro no debe ser corrido cuando el cemento todavía esta débil, la columna de cemento debe de tener una resistencia a la compresión mínima de 250 psi con la temperatura más baja de la columna. La medición de la resistencia a la compresión en el laboratorio se puede llevar a cabo sobre una lechada guía con la temperatura estática de la parte superior de la misma y no con la temperatura estática de fondo.

7.- No es común correr los registros cuando se conoce o sospecha que la columna de cemento este contaminado con gas o para la evaluación del cemento espumoso. Esta recomendación también es aplicada cuando se utiliza en la cementación aditivos "generadores de gas" o aditivos usados para generar lechadas de baja densidad o cuando los aditivos contienen cualquier volumen de aire atrapado. De cualquier forma el SBT trabaja considerablemente en la identificación de gases impregnados en el cemento y de los líquidos en el espacio anular.

Ventajas:

Resolución circunferencial para identificación de canales

La amplia cobertura angular (igual a los dispositivos de alta frecuencia)

Presenta mayor resolución en espesores delgados de cemento, comparable con los dispositivos ultrasónicos de alta frecuencia

Menos afectado por descentralización en tuberías de revestimiento de diámetros pequeños o reducidos

Proporciona mejor resolución de la atenuación por encima del rango de interés

Su pequeño diámetro de 2.5 pg. permite registrar algunos revestimientos pequeños por debajo de 3.5 pg. de diámetro exterior y revestimientos grandes de 10.75 pg. de diámetro externo.

CONCLUSIONES

- ◆ Se integró un conjunto de herramientas existentes en la industria petrolera relacionadas con la evaluación de la cementación, con el objeto de tener un conocimiento amplio del funcionamiento de cada una de ellas para dicha evaluación. La impedancia acústica, la amplitud y la atenuación son solo unos de los muchos parámetros que influyen y que ayudaran a la interpretación de los registros acústicos.
- ◆ La herramienta más favorable para la evaluación de la calidad del cemento, no es solamente una, sino que el mejor resultado que se obtiene es con la combinación de ellas. La combinación que se tiene son con las herramientas CBL-VDL-CET, donde las deficiencias o limitaciones que pudieran presentarse en la interpretación de una de ellas se resolverían con la ayuda de las otras.
- ◆ La herramienta RBT, por si sola es favorable ya que el porcentaje de cobertura circunferencial en la tubería es mayor, por lo tanto es recomendable ya que proporciona más información que las demás herramientas.

RECOMENDACIONES

- ◆ Realizar más estudios sobre las posibles combinaciones que se puedan presentar con las diversas herramientas disponibles, para saber cuales se pueden combinar y cual es la que nos permite obtener mayor información, además de los avances que se tengan con la herramienta RBT.
- ◆ La principal recomendación, es la de no dejar este tipo de trabajos hasta aquí, sino ampliar estas investigaciones todavía más, conforme las innovaciones tecnológicas salgan al mercado. Seguir aportando ideas, propuestas, herramientas, software, técnicas, etc., todo para lograr solucionar una amplia gama de problemas que aún se presentan durante todo el proceso de las cementaciones de pozos petroleros, para lograr óptimos resultados y no generar más errores, que resultan en pérdidas de tiempo y dinero.

BIBLIOGRAFÍA

1. Garaicochea P. F. y Benitez H. M.A.: "Apuntes de Terminación de Pozos," Facultad de Ingeniería, UNAM, Abril 1983.
2. Garaicochea P. F., Bousiequez, L. M. y Becerra A. T.: "Temas Selectos sobre Cementaciones de Pozos," Facultad de Ingeniería, UNAM, Noviembre 1986.
3. Jones, P.H. and Berdine, D., "Oil-well Cementing," Oil and Gas Journal, Mar 21, 1940.
4. Schlumberger-Dowell "Aditivos de Cementación," Traducción Carlos Soares Junio 1997.
5. Schlumberger-Dowell "Cementación de Pozos Horizontales," Junio 1997.
6. American Petroleum Institute: Specifications for Materials and Testing for Well Cements, fourth edition. API Spec 10 API. Dallas (1988).
7. Schlumberger-Dowell "Cementación Primaria," Trad. Carlos Soares, Junio 1997.
8. Howard, G. C., and Clark, J. B., "Factors to be considered in obtaining proper cementing of casing," Drill and Prod. Prac., API 1948.
9. Casing Centralizers, API Specification, 10D, second edition, American Petroleum Institute, Dallas (1973).
10. Padilla Maltrana Ricardo "Selección del Tipo de Terminación para Pozos Horizontales," Tesis, Facultad de Ingeniería, Oct. 1992.
11. McLean, R.H., Manry, C. W., and Whitaker, W. W., "Displacement mechanics in primary cementing," Jour. Pet. Tech. 1967.
12. Haunt, R. C. and Crook, R. J.: "Primary Cementing: Optimizing for Maximum Displacement," World Oil (Nov. 1980) 105-16.
13. Brice, J. W., Jr. and Holmes, R. C., "Turbulent flow techniques," Jour. Pet. Tech., May 1964.
14. Tejeda Arias Jabal, "Ingeniería de Cementaciones," Subdirección de Perforación y Mantenimiento a Pozos, Petróleos Mexicanos.
15. Schlumberger- Dowell "Reología," Traducción de Carlos Soares, Agosto 1997.
16. PEMEX-IMP "Interpretación de Registros para Perforación" Subdirección de General de Capacitación y Servicios Técnicos, Mayo, 1995.

17. Sutton, D. L., Sabins, F. L., and Faul, R.: "Preventing Annular Gas Flow," Oil & Gas J., Part 1 (Dec.10, 1984); Part 2 (Dec. 17, 1984).
18. Sykes, R. L., and Logan, J. L.: "New Technology in Gas Migration Control," paper SPE 16653 presented at the 1987 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Sept. 27-30.
19. Schlumberger- Dowell "Migración de Gas" Trad. Por Carlos Soares, Junio, 1997.
20. Schlumberger "Principio / Aplicaciones de la Interpretación de Registros," MCA, México, 1989.
21. Arroyo Carrasco Francisco "Apuntes de Registros Geofísicos," U.N.A.M. Facultad de Ingeniería
22. Guzmán Poo Javier A. "Maxis 500: Un Sistema Innovador de Registro Geofísicos," AIPM, Vol. XXXII, No. 9, Sep. 1992.
23. Schlumberger-Dowell "Evaluación de la cementación," Trad. De Carlos Soares, Abril, 1997.
24. Schlumberger "Evaluación de formaciones en México," 50 Aniversario de Schlumberger en México, Sep. 1984.
25. Michael J. Economides., Larry T. Watters and Shari Dunn-Norman.: "Petroleum Well Construction," John Wiley & Sons, U.S.A., 1988.
26. Albert, L. E. et al.: "A Comparison of CBL, RBT, and PET Logs in a Test Well With Induced Channels ", JPT (Sept. 1988) 1211-16.
27. Sheives, T. C. Et al.: "A Comparison of New Ultrasonic Cement and Casing Evaluation Logs With Standard Cement Bond Logs," paper SPE 15436 presented at the 1986 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Oct. 5-8.
28. Froelich, B. Et al.: " Cement Evaluation Tool –A New Approach to Cement Evaluation," JPT (Aug. 1982) 1835-41.
29. Havira, R.M.: "Ultrasonic Cement Bond Evaluation," paper presented at the 1982 SPWLA Annual Logging Symposium, Corpus Christi, July 6-9.
30. Leigh, C.A. et al.: "Results of Field Testing the Cement Evaluation Tool," paper presented at the 1984 SPWLA Annual Logging Symposium, New Orleans, June 10-13.
31. Maki, V.: "Method and Apparatus for Acoustically Investigating a Borehole Casing Cement Bond," U.S. Patent 4, 709, 357 (Nov.24, 1986).
32. API Technical Report 10 TR1, First Edition, June 1996. "Cement Sheath Evaluation"

BIBLIOGRAFÍA

33. www.halliburton.com, Junio, 1999
34. www.computalog.com, Junio, 1999
35. www.exxon.com, Julio, 1999
36. www.dowell.com, Julio, 1999
37. www.schlumberger.com, Julio, 1999