

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO,  
GAS NATURAL Y PETROQUIMICA



**“EVALUACION DE CEMENTOS DE BAJA  
IMPEDANCIA ACUSTICA EMPLEANDO ONDAS  
FLEXURALES ULTRASONICAS”**

**TESIS**

PARA OPTAR POR EL TITULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO DE PETROLEO Y GAS NATURAL**

ELABORADO POR:

**CARLOS MARTIN HIDALGO CRUZALEGUI**

PROMOCION: 2011 – 2

LIMA – PERU  
2012

***Dedicatoria:***

***A MI MADRE***, por su incondicional apoyo y confianza, por ser una mujer digna, ejemplar, responsable y amorosa. Quiero agradecerle porque su corazón late por mí aun estando lejos y sus oraciones me acompañan a donde voy. A ella, quien sin escatimar esfuerzo alguno ha sacrificado por mi gran parte de su vida, quiero reafirmarle mi respeto y honrarla con este logro.

*A ella, por ser siempre ella, Mi Madre*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios, a mi familia, compañeros y amigos.*

*A Carolina Gutiérrez, Miguel del Águila, Juan Rabanal, Cristina Cavero, Charles Bedón y José Vásquez por su apoyo y colaboración en el desarrollo de esta investigación.*

*A la Facultad de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica, por el soporte institucional dado para la realización de este trabajo, en especial a los Señores Ingenieros Luis del Castillo Rodríguez, Edgar Argumé Chávez y José Ramos Rojas.*

*A Pedro López Lozano por su ayuda y apoyo en muchos de los procesos que aquí tuvieron lugar.*

*Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.*

## SUMARIO

La presente tesis muestra la última técnica de medición acústica disponible para la evaluación de los trabajos de cementación, que busca responder a las preguntas fundamentales relacionadas al aislamiento hidráulico de los pozos de producción de hidrocarburos.

Hasta hace poco las herramientas de evaluación de cemento ofrecían imágenes de la interface revestimiento/cemento o promedios cualitativos de la adherencia de cemento en las interfaces revestimiento/cemento/formación.

En la actualidad se tiene disponible una tecnología que elimina las ambigüedades generadas en la evaluación de cementos de baja impedancia acústica, además de brindar información sobre la corrosión de la tubería de revestimiento, erosión, el desgaste inducido por la perforación y hasta imágenes de la geometría anular. Esta tecnología combina las mediciones convencionales de impedancia acústica con una segunda medición que mejora notablemente la evaluación, denominada *atenuación flexural*.

De esta forma, por medio del procesamiento de las señales flexurales ultrasónicas se reduce la incertidumbre originada por la presencia de sólidos y líquidos con la misma impedancia acústica detrás de la pared del revestimiento, problema que no puede ser resuelto independientemente con las herramientas de evaluación de impedancia acústica ni con las herramientas de evaluación de cemento convencional CBL-VDL.

Así, esta tecnología nos permite afirmar sin ambigüedades si el aislamiento zonal existe o no, evitando las interpretaciones erróneas y la toma de decisiones equivocadas, que afectan económicamente los intereses de las compañías operadoras (reacondicionamientos innecesarios, tiempos no productivos, no apertura de zonas de interés, entre otros).

## INDICE

### SUMARIO

	4
<b>CAPITULO I.- Planteamiento del problema</b>	<b>8</b>
1.1 Problemática	8
1.2 Formulación del problema	9
1.3 Justificación	10
1.4 Objetivos	11
1.4.1 General	11
1.4.2 Específicos	11
1.5 Hipótesis General	11
1.6 Identificación de Variables	12
1.7 Operacionalización de Variables	13
1.8 Matriz de consistencia	14
<b>CAPITULO II.- Marco teórico</b>	<b>15</b>
2.1 Antecedentes de la investigación	15
2.2 Bases teóricas	19
2.2.1 Operación de Cementación	19
2.2.1.1 Cemento	20
2.2.1.2 Tipos de cemento	20
2.2.1.3 Objetivos de la cementación	22
2.2.1.4 Planificación y diseño de una cementación	22
2.2.1.5 Problemas comunes durante la cementación	24
2.2.1.6 Tipos de cementación	24
2.2.1.6.1 Cementación primaria	24
2.2.1.6.2 Cementación secundaria	25
2.2.1.6.2.1 Cementación forzada	25
2.2.1.6.2.2 Tapones de cemento	26
2.2.1.7 Diseño de lechada de cemento	26
2.2.1.7.1 Aditivos	28
2.2.1.7.1.1 Aceleradores	28
2.2.1.7.1.2 Retardadores	28
2.2.1.7.1.3 Extendedores	29
2.2.1.7.1.4 Controladores de filtrado	29
2.2.1.8 Equipo de cementación	29
2.2.1.8.1 Zapata de revestimiento	29
2.2.1.8.2 Cuello flotador	29
2.2.1.8.3 Centralizadores	30
2.2.1.8.4 Raspadores	30
2.2.1.8.5 Cabezales de cementación	30
2.2.1.8.6 Tapones de cementación	31
2.2.1.8.7 Espaciadores	31
2.2.2 Acústica de pozos	32
2.2.3 Ondas Sonoras	32
2.2.4 Registros de análisis de cemento	33

2.3 Marco conceptual	35
2.3.1 Cementos ligeros	35
2.3.1.1 ¿Qué es un cemento ligero?	35
2.3.1.2 Aplicaciones	38
2.3.1.3 Propiedades	40
2.3.2 Registros de Adherencia de Cemento y Registros de Densidad Variable	41
2.3.2.1 Registro de Adherencia de Cemento	42
2.3.2.1.1 Medición del Tiempo de Tránsito	43
2.3.2.1.2 Medición de Amplitud	44
2.3.2.1.3 Efecto de excentricidad	45
2.3.2.2 Registro de Densidad Variable	46
2.3.2.3 Principales Limitaciones	47
2.3.3 Registros de Imágenes Ultrasónicas	48
2.3.3.1 ¿Qué es la impedancia Acústica?	48
2.3.3.2 Principios de operación	48
2.3.3.3 Valores umbrales	52
2.3.3.4 Principales limitaciones	53
2.3.4 Ondas Flexurales	55
2.3.4.1 ¿Qué son las ondas flexurales?	55
2.3.4.2 Evaluación de ondas flexurales	56
2.3.4.3 Atenuación Flexural	57
2.3.4.4 Procesamiento	61
2.3.4.5 Ecos de Tercera Interface	63
<b>CAPITULO III.- Metodología de la investigación</b>	<b>65</b>
3.1 Tipo de investigación	65
3.2 Población y muestra	65
3.3 Instrumentos de recolección de datos	65
3.4 Análisis e interpretación de la información	66
<b>CAPITULO IV.- Desarrollo del Modelo</b>	<b>67</b>
4.1 Alcance	67
4.2 Antecedentes	67
4.3 Análisis	69
4.4 Evaluación económica	71
4.4.1 Condiciones del modelo	71
4.4.1.1 Costos de registros CBL-VDL y de Imágenes Ultrasónicas	75
4.4.1.2 Costos de Operación de Squeeze	76
4.4.1.3 Costos empleando Ondas Flexurales Ultrasónicas	78
4.4.2 Consideraciones del modelo	79
4.4.2.1 Costos	79
4.4.3 Comparación de las mediciones obtenidas Empleando Ondas Flexurales Ultrasónicas	82

<b>CAPITULO V.-</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>84</b>
<b>CAPITULO VI.-</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>86</b>
<b>CAPITULO VII.-</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>88</b>

## **CAPITULO I.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 PROBLEMATICA**

¿Por qué se usan cementos ligeros?

Cuando los fluidos de perforación y/o lechadas de cemento superan el gradiente de fractura de la formación pueden inducir el fracturamiento de la misma, lo que puede conllevar a problemas de pérdida de circulación, pérdida del control del pozo, problemas en la producción (los fluidos fluyen hacia cualquier parte que no sea el pozo mismo), lo cual implica gastos extras durante las operaciones de remediación asociadas.

Por esto, se han desarrollado nuevas tecnologías de cementación ligera de alta eficiencia que mejora el aislamiento de las formaciones. Los nuevos cementos ligeros logran bajas permeabilidades y la alta resistencia a la compresión necesarias para garantizar la integridad del pozo y el aislamiento de las formaciones con densidades suficientemente bajas como para impedir el fracturamiento de la formación y las pérdidas de circulación.

¿Cómo se evalúa la eficacia de estos cementos?

Una vez que la lechada ha sido bombeada y se convierte en cemento fraguado, es importante evaluarla para confirmar el éxito de su aplicación y su capacidad de satisfacer los objetivos establecidos, de modo que se han desarrollado herramientas que miden las propiedades mecánicas del cemento fraguado.

Sin embargo, las técnicas acústicas actuales (sónicas y ultrasónicas) han mostrado limitaciones en la evaluación de cementos ligeros en los cuales no diferencian entre cemento y lodo, debido a los valores similares de impedancia acústica que presentan, brindando un diagnóstico limitado del espacio anular revestimiento/formación.



Las técnicas de evaluación de ondas flexurales ultrasónicas, han sido desarrolladas para atender estas limitaciones.

Las nuevas tecnologías combinan la clásica medición de impedancias acústicas, con una nueva medición, la atenuación flexural. El procesamiento de estas señales permite caracterizar el ambiente de pozos entubados de una forma nunca antes alcanzada, determinando el estado de los materiales detrás del revestimiento en una de tres únicas opciones: Sólido, Líquido o Gas (SLG), además de establecer su naturaleza y velocidad acústica, la posición del revestimiento dentro del agujero, y la forma geométrica del agujero.

## **1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA**

Las técnicas acústicas actuales utilizadas para la evaluación de cemento han demostrado ser limitadas en la evaluación de cementos de baja impedancia acústica, en los cuales fallan al diferenciar entre el cemento y el lodo.

Entonces, empleando las técnicas acústicas disponibles actualmente ¿Es posible evaluar correctamente la calidad del cemento en ambientes de bajo contraste acústico?

### **1.3 JUSTIFICACION**

Los avances tecnológicos en lechadas de cementación representan un éxito para la industria petrolera, los nuevos cementos ligeros de alto rendimiento consiguen el aislamiento hidráulico de las formaciones con densidades lo suficientemente bajas como para impedir el fracturamiento de la formación y las pérdidas de circulación. Sin embargo, la falta de comprensión de sus propiedades mecánicas termina reduciendo las probabilidades de realizar evaluaciones exitosas.

La información entregada por las herramientas acústicas disponibles actualmente, como los Registros de Adherencia de Cemento, Registros de Densidad Variable y los Registros de Imágenes Ultrasónicas resulta siendo insuficiente, ambigua y hasta equivocada. Esto se debe a que resulta imposible diferenciar entre sólidos y líquidos en ambientes en los cuales no existe suficiente contraste acústico entre el lodo y el cemento.

Este nuevo ambiente de evaluación es precisamente el que imponen los nuevos cementos ligeros. Los cementos ligeros son de baja densidad y tienen una menor impedancia acústica que los sistemas convencionales de cemento que hacen más difícil su identificación.

Por tanto, dada la existente necesidad de conseguir una evaluación precisa y sin ambigüedades de la calidad del cemento, se propone la evaluación a través de las ondas flexurales ultrasónicas, ya que permiten superar las limitaciones actuales a través de una evaluación de datos mejorada y una caracterización del ambiente de pozos entubados sin precedentes, se reducen las interpretaciones erróneas y la toma de decisiones equivocadas que afecten los intereses económicos de las compañías operadoras.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 General**

Demostrar que las ondas flexurales ultrasónicas permiten una evaluación correcta y sin ambigüedades de la calidad del cemento, especialmente en las zonas con bajo contraste acústico, donde todas las demás tecnologías fallan.

### **1.4.2 Específicos**

- Mostrar como los cementos de baja impedancia acústica (cementos ligeros o contaminados) afectan la información entregada por las herramientas sónicas y ultrasónicas convencionales.
- Reducir la incertidumbre en la evaluación de la calidad del cemento y proponer el empleo de las ondas flexurales ultrasónicas como la alternativa de evaluación de cementos de baja impedancia acústica más segura, confiable y económicamente viable.

## **1.5 HIPOTESIS GENERAL**

Empleando las ondas flexurales ultrasónicas durante la evaluación de cementos de baja impedancia acústica se reducirá la incertidumbre en la determinación de la calidad del cemento.

## **1.6 IDENTIFICACION DE VARIABLES**

1. Densidad de la lechada de cemento
2. Fluido de registro en el pozo
3. Configuración mecánica del pozo
4. Angulo de incidencia de las ondas flexurales

## 1.7 OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

Variable	Definición conceptual	Importancia operacional	Indicadores
Densidad de la lechada de cemento	El cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominada hormigón o concreto.	El objetivo es evaluar correctamente los cementos que presentan bajas impedancias acústicas, por lo tanto, conocer el peso del cemento nos ayudará en la toma de decisiones durante el procesamiento de la información.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad de la lechada de cemento</li> <li>• Propiedades acústicas (densidad e impedancia acústica)</li> <li>• de las lechadas de cabeza y de cola.</li> </ul>
Fluido de registro en el pozo	Tipo de fluido presente en el pozo durante las operaciones de registro.	Se necesita conocer la densidad y tipo de fluido en el pozo al momento del registro, para una correcta medición de las propiedades del fluido (FPM).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impedancia acústica del fluido del pozo.</li> <li>• Velocidad de las ondas en el fluido del pozo.</li> <li>• Atenuación de las ondas en el fluido pozo.</li> </ul>
Configuración mecánica del pozo	Referida al tipo de completación del pozo	Ubicación de zapatos, zonas de doble tubería, propiedades del casing, herramientas de fondo, entre otros, que pueden producir variaciones en las señales generadas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Casing OD.</li> <li>• API Drift.</li> <li>• Espesor del casing.</li> <li>• Zonas de doble tubería</li> </ul>
Angulo de incidencia	Es el ángulo formado por un rayo que penetra en un medio refringente con respecto a una línea perpendicular a la superficie de dicho medio.	El ángulo de incidencia debe asegurar que el modo flexural del casing sea excitado y además debe asegurar la subsecuente detección de los rayos reflejados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excentricidad y standoff de la herramienta.</li> <li>• Tipo de fluido en el pozo.</li> </ul>

## 1.8 MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADOR	INSTRUMENTO
<p>Las técnicas acústicas actuales utilizadas para la evaluación de cemento han demostrado ser limitadas en la evaluación de cementos de baja impedancia acústica, en los cuales fallan al diferenciar entre el cemento y el lodo.</p> <p>¿Es posible evaluar correctamente la calidad del cemento en ambientes de bajo contraste acústico?</p>	<p>Demostrar que las ondas flexurales ultrasónicas permiten una evaluación correcta y sin ambigüedades de la calidad del cemento, especialmente en las zonas con bajo contraste acústico, donde todas las demás tecnologías fallan.</p>	<p>Empleando las ondas flexurales ultrasónicas durante la evaluación de cementos de baja impedancia acústica se reducirá la incertidumbre en la determinación de la calidad del cemento.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Densidad de la lechada de cemento</li> <li>2. Fluido de registro en el pozo</li> <li>3. Configuración mecánica del pozo</li> <li>4. Angulo de incidencia de las ondas flexurales</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.1 Propiedades acústicas de las lechadas de cabeza y de cola.</li> <li>1.2 Densidad de la lechada de cemento</li> <li>2.1 Impedancia acústica del fluido del pozo.</li> <li>2.2 Velocidad de las ondas en el fluido del pozo.</li> <li>2.3 Atenuación de las ondas en el fluido pozo.</li> <li>3.1 Casing OD.</li> <li>3.2 API Drift.</li> <li>3.3 Espesor.</li> <li>4.1 Excentricidad y standoff de la herramienta.</li> <li>4.2 Tipo de fluido en el pozo.</li> </ol>	<p>Herramientas ultrasónicas de evaluación de ondas flexurales e impedancia acústica.</p>

## **CAPITULO II.- MARCO TEORICO**

### **2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION**

Las ondas flexurales, son un tipo especial de vibración que ocurre principalmente en sólidos con forma de vigas o placas. Estas estructuras son relativamente delgadas en una o dos dimensiones y son capaces de actuar como guía de ondas, por ejemplo, transportando vibraciones a largo de grandes distancias. La flexura de las estructuras tipo placa está asociada principalmente con el movimiento normal a su superficie.

Debido al confinamiento de la onda flexural en un guía de onda, su propagación exhibe la propiedad especial de ser dispersiva, lo cual significa que diferentes frecuencias viajan a diferentes velocidades en el medio.

Horace Lamb, matemático inglés, fue uno de los primeros en analizar los modos de propagación estas de ondas en 1889, y en 1917 publicó un análisis y descripción de las ondas acústicas de este tipo, es por esta razón que este tipo de ondas son conocidas también como ondas de Lamb.

Las ondas acústicas pueden ser empleadas en la obtención de información acerca del medio sobre el cual se propagan, lo cual puede ser usado subsecuentemente para generar imágenes de las propiedades del medio.

La presente tesis muestra una técnica de evaluación ultrasónica efectiva e innovadora para generar imágenes a través de capas de acero. El propósito es detectar las dispersiones de onda y evaluar las propiedades acústicas de los materiales adheridos a la capa de acero. La técnica está basada en la propagación de las ondas flexurales en capas de acero y es implementada a través de un arreglo especial de transmisores y receptores. La principal aplicación de este proyecto toma lugar en los campos de petróleo para evaluar la calidad del cemento que ocupa el espacio anular entre el revestimiento de

acero y la roca de formación. Debido al gran contraste de impedancia acústica entre el acero y el medio a su alrededor, las técnicas actuales han demostrado ser limitadas, e investigan solo la región adyacente revestimiento/cemento.

Usando datos de campo adquiridos con un equipo experimental, se muestra que la técnica de generación de imágenes basada en las ondas flexurales permite investigar todo el cemento y particularmente generar una imagen de la geometría en la interface cemento-roca.

Las limitaciones actuales de las herramientas de imágenes ultrasónicas radica principalmente al contraste de impedancia acústica que representa el revestimiento de acero para la señal acústica, la mayor parte de la energía transmitida es reflejada por la pared interna del revestimiento, lo que resulta en que solo una pequeña fracción de la energía es transmitida a través del revestimiento para evaluar el cemento. Es por esta última razón, que las técnicas de generación de imágenes ultrasónicas actuales fallan al distinguir entre el lodo y los cada vez más usados cementos de bajo peso, debido a su similar impedancia acústica.

Alejándose de las técnicas convencionales de generación de imágenes, se han explorado métodos de solución que dejan de un lado los rayos acústicos de incidencia normal (como los usados por las herramientas de imágenes ultrasónicas actuales). Las recientes investigaciones del problema consideraron que el rayo acústico emitido por el transmisor incida a cierto ángulo alejado de la normal, para que así la tubería de revestimiento se viera como un guía de onda elástico que soporte una onda flexural.

Hay una extensa investigación en teoría y aplicaciones de las ondas de flexurales, en este caso particular, se enfoca en una aplicación que permite generar imágenes más allá del material a lo largo del cual la onda flexural se propaga.



Para la evaluación de cemento, se identificó que la propagación de la onda flexural, hacia posible la generación de imágenes a través del revestimiento de acero, al excitar las paredes del revestimiento

Muchas pruebas de laboratorio fueron llevadas a cabo con la nueva técnica de generación de imágenes. Durante esta fase, se desarrolló una herramienta experimental como una modificación de las herramientas de generación de imágenes ultrasónicas existentes, que terminó haciendo posible la selección del arreglo especial de transductores que utilizó el prototipo. La herramienta fue corrida en un pozo del campamento de pruebas de Schlumberger, localizado en Villejust, Francia.

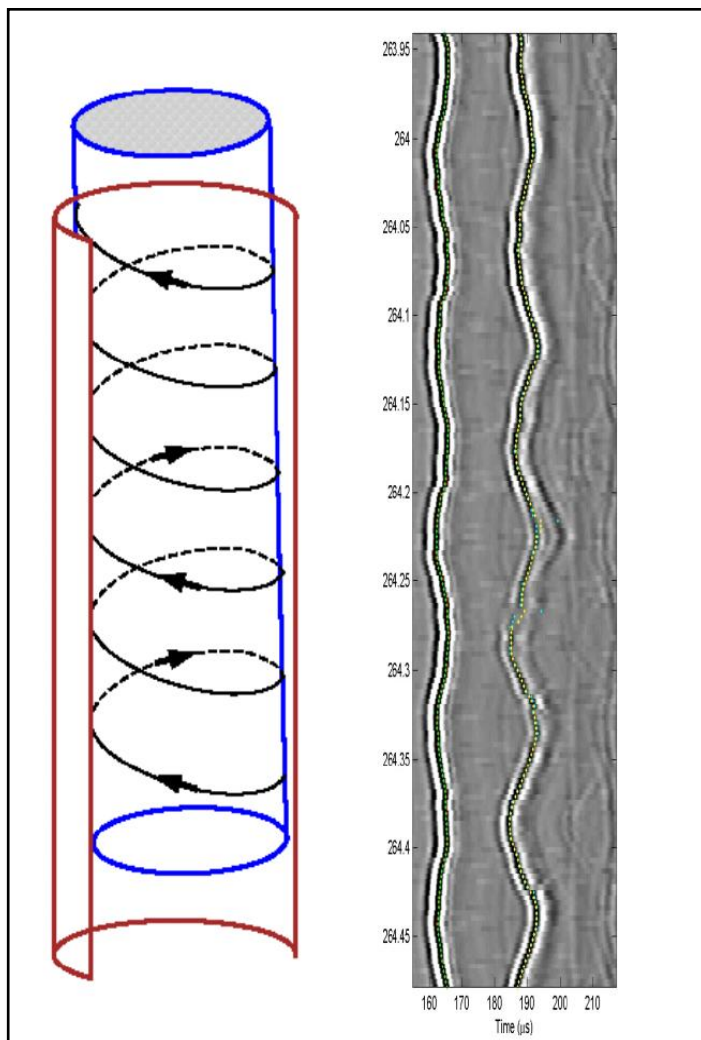


Figura 2.1

La figura 2.1 muestra en escala de grises una imagen de datos brutos adquiridos por el prototipo.

El sistema de transductores se situó en una conexión giratoria, *rotating sub*, que permitía escanear el revestimiento a cierta velocidad angular. La herramienta fue traída hacia la parte superior del pozo, y el haz acústico enviado hacia la pared interna de la tubería de revestimiento describía una trayectoria elíptica (como lo muestra la figura 2.1).

La señal bruta mostrada exhibe algunas características de interés, como los 2 fuertes ecos: el de arribo temprano (izquierda), que es originado por la propagación en la tubería de revestimiento como una onda flexural, y el arribo tardío, que es debido a la propagación en el espacio anular y la reflexión en la interface cemento/formación.

Adicionalmente, un producto del procesamiento de esta información, es la reconstrucción de la posición de la tubería de revestimiento dentro del agujero. Un ejemplo de esta reconstrucción es mostrado en la figura 2.2 en esta imagen, la variación del *offset* entre la tubería de revestimiento y el agujero, muestra excentricidad de la tubería de revestimiento y variaciones de las propiedades acústicas de los materiales en el anular.

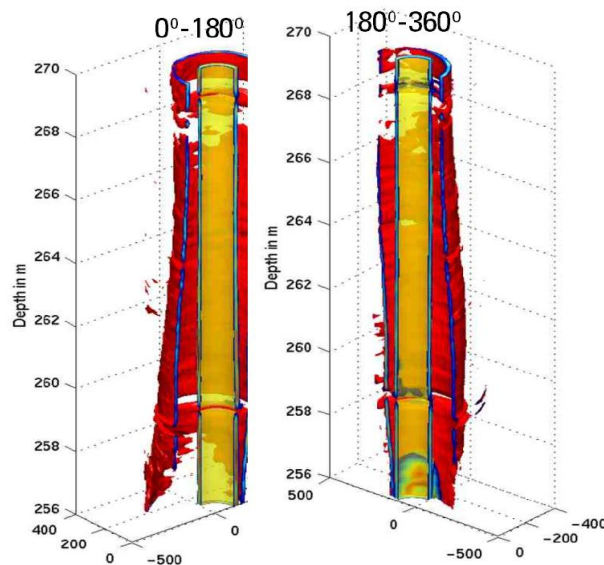


Figura 2.2

Imagen reconstruida del casing y su posición dentro del agujero registrada en el pozo de prueba.

Los datos correspondientes a las herramientas de imágenes ultrasónicas convencionales tomados en el mismo pozo (no mostrados aquí) mostraron el fuerte eco reflejado proveniente de la interface fluido/revestimiento. Típicamente no se tienen reflejos de la interface cemento/formación para esta técnica, como ya ha sido ampliamente documentado.

## **2.2 BASES TEORICAS**

- 2.2.1 Operación de cementación
- 2.2.2 Acústica de pozos
- 2.2.3 Ondas sonoras
- 2.2.4 Registros de análisis de cemento

### **2.2.1 Operación de cementación**

Durante la construcción de un pozo de petróleo el proceso de cementación es de vital importancia para el mismo, dado que una deficiente operación de cementación traería drásticas consecuencias; tales como incremento de los costos, riesgo de pérdida del pozo, riesgos hacia el ambiente y a la seguridad. Además, una deficiente operación de cementación origina que las lechadas de cemento se contaminen, haciendo que fragüen en mayor tiempo y presenten bajas impedancias acústicas como si fueran lechadas ligeras. De esta forma tanto los cementos ligeros y los cementos convencionales contaminados (con fluidos de formación, gas o lodo por una remoción ineficiente) presentan impedancias acústicas cercanas a las de los fluidos, haciendo difícil su diferenciación por medio de las herramientas ultrasónicas actuales de evaluación de cemento.

Por tal motivo, al momento de diseñar y cementar un pozo petrolero se deben llevar a cabo las mejores prácticas operacionales, que permitan diseñar y ejecutar los programas de cementación de manera óptima durante la construcción y/o reparación de un pozo.

### **2.2.1.1 Cemento**

Se denomina cemento a un conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (grava, arena, etc.) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, formando el llamado hormigón o concreto.

El primer tipo de cemento usado en un pozo petrolero fue el llamado cemento Portland, el cual fue desarrollado por Joseph Aspdin en 1824, esencialmente era un material producto de una mezcla quemada de calizas y arcillas. El cemento Portland es un material cementante disponible universalmente. Las condiciones a las cuales es expuesto en un pozo difieren significativamente de aquellas encontradas en operaciones convencionales de construcciones civiles.

### **2.2.1.2 Tipos de cemento**

El Instituto Americano de Petróleo, *American Petroleum Institute* (API) define 8 diferentes clases de cemento (de A a H) dependiendo de ciertas características físicas y químicas y en base al uso que se les puede dar en cuanto a rango de profundidad, presiones y temperaturas a soportar, etc.

El cuadro N° 2.1 muestra una tabla de clasificación de acuerdo al API:

TIPO	APLICACION
<b>Tipo A</b>	Usado generalmente para pozos desde superficie hasta 6000', cuando no se requieren propiedades especiales. La relación agua/cemento recomendada es 5.2 gal/sxs.
<b>Tipo B</b>	Usado generalmente para pozos desde superficie hasta 6000', cuando hay condiciones moderadas a altas resistencia al sulfato. La relación agua/cemento recomendada es 5.2 gal/sxs.
<b>Tipo C</b>	Usado generalmente para pozos desde superficie hasta 6000', cuando se requieren condiciones de alto esfuerzo. La relación agua/cemento recomendada es 6.3 gal/sxs.
<b>Tipo D</b>	Usado generalmente para pozos desde 6000' hasta 10000', para condiciones moderadas de presión y temperatura. Está disponible para esfuerzos moderados a altos. La relación agua/cemento recomendada es 4.3 gal/sxs.
<b>Tipo E</b>	Usado generalmente para pozos desde 10000' hasta 14000', para condiciones altas de presión y temperatura. La relación agua/cemento recomendada es 4.3 gal/sxs.
<b>Tipo F</b>	Usado generalmente para pozos desde 10000' hasta 16000', para condiciones extremas de presión y temperatura. Está disponible para esfuerzos moderados a altos. La relación agua/cemento recomendada es 4.3 gal/sxs.
<b>Tipo G y H</b>	Usado generalmente para pozos desde superficie hasta 8000' o puedan ser usados con aceleradores o retardadores para cubrir una amplia variedad de rangos de presión y temperatura. La relación agua/cemento recomendada es 5,0 gal/sxs. El cemento más comúnmente usado es el G.

CUADRO N° 2.1 – Tipos de Cemento según API, Elaboración propia.

### **2.2.1.3 Objetivos de la Cementación**

Entre los propósitos principales de la cementación se pueden mencionar los siguientes:

- Aislar zonas de diferentes fluidos.
- Proteger y asegurar la tubería de revestimiento en el hoyo.
- Aislar zonas de agua superficial y evitar la contaminación de las mismas por el fluido de perforación o por los fluidos del pozo.
- Evitar o resolver problemas de pérdida de circulación y pega de tuberías.
- Reparar pozos por problemas de canalización de fluidos.
- Reparar fugas en el revestidor.
- Proteger el hoyo de un colapso.

La cementación tiene gran importancia en la vida del pozo, ya que una correcta completación depende directamente de una buena cementación.

### **2.2.1.4 Planificación y Diseño de una Cementación**

La planificación para un trabajo de cementación consiste en evaluar cierta cantidad de características, incluyendo:

- Evaluación de condiciones de hoyo abierto (limpieza de hoyo, tamaño, desgastes en el hoyo, temperatura).
- Propiedades del lodo
- Diseño de Lechada
- Posicionamiento de la lechada
- Equipo adicional (equipo de flotación, centralizadores)

El programa de cementación debe diseñarse para obtener una buena cementación primaria. El trabajo debe aislar y prevenir la comunicación entre las formaciones cementadas y entre el hoyo abierto y las formaciones detrás del revestidor. Debe considerarse el no fracturar alrededor de la zapata del conductor o de la sarta de superficie durante las subsiguientes operaciones de perforación o cuando se corren las otras sargas de revestimientos. Al planificar una cementación, independientemente del tipo de revestidor debe considerarse información sobre:

- Referencia de pozos vecinos.
- Geometría del hoyo (diámetro/forma).
- Tipo de fluido de perforación existente en el sistema.
- Problemas presentados durante la perforación.
- Tipo de cemento, lechada y aditivos a utilizar por la compañía.
- Efectuar pruebas API para cada una de las lechadas de cemento.
- Equipos y herramientas a utilizar por la compañía de cementación.
- Centralización del revestidor.
- Condiciones óptimas de una cementación.
- Tener la densidad apropiada.
- Ser fácilmente mezclable en superficie.
- Tener propiedades reológicas óptimas para remover el lodo.
- Mantener sus propiedades físicas y químicas mientras se está colocando.
- Debe ser impermeable al gas en el anular, si estuviese presente.
- Desarrollar esfuerzo lo más rápido posible una vez que ha sido bombeado.
- Desarrollar una buena adherencia entre revestidor y formación.
- Tener una permeabilidad lo más baja posible.
- Mantener todas sus propiedades bajo condiciones severas de presión y temperatura.

### **2.2.1.5 Problemas comunes durante una cementación**

Entre los Problemas comunes que afectan todos los trabajos de cementación incluyen:

- Condición pobre del hoyo: patas de perro, estabilidad del hoyo desnudo, cama de recortes, etc.
- Condición pobre del lodo: altas resistencias de gel, alta pérdida de circulación o filtración, revoque grueso, alto contenido de sólidos, incompatibilidad de lodo/cemento.
- Centralización pobre: el cemento no se coloca uniformemente alrededor de la tubería de revestimiento, dejando lodo en el sitio.
- Pérdida de circulación.
- Presión anormal.
- Presión subnormal.

### **2.2.1.6 Tipos de Cementación**

#### **2.2.1.6.1 Cementación Primaria**

Se realiza al cementar los revestidores del pozo (conductor, superficial, intermedio, producción, etc.) durante la perforación. Entre los objetivos principales de esta cementación se pueden mencionar los siguientes:

- Adherir y fijar la sarta de revestimiento.
- Restringir el movimiento de fluidos entre las formaciones productoras y el confinamiento de los estratos acuíferos.
- Proteger la sarta contra la corrosión.
- Reforzar la sarta contra el aplastamiento debido a fuerzas externas y reforzar la resistencia de la sarta a presiones de estallido.



- Proteger la sarta durante los trabajos de cañoneo (completación).
- Sellar la pérdida de circulación en zonas "ladronas".

#### **2.2.1.6.2 Cementación Secundaria**

También llamada "Squeeze", es el proceso de forzamiento de la lechada de cemento en el pozo, que se realiza principalmente en reparaciones/reacondicionamientos o en tareas de terminación de pozos. Puede ser: cementaciones forzadas y taponos de cemento. Los propósitos principales de esta cementación son:

- Reparar trabajos de cementación primaria deficientes.
- Reducir altas producciones de agua y/o gas.
- Reparar filtraciones causadas por fallas del revestidor.
- Abandonar zonas no productoras o agotadas.
- Sellar zonas de pérdidas de circulación.
- Proteger la migración de fluido hacia zonas productoras.

Las cementaciones secundarias pueden definirse como procesos de bombear una lechada de cemento en el pozo, bajo presión, forzándola contra una formación porosa, tanto en las perforaciones del revestidor o directamente el hoyo abierto. Por lo que las cementaciones secundarias pueden ser: forzadas y/o taponos de cemento.

##### **2.2.1.6.2.1 Cementación Forzada**

Es el tipo más común de cementación secundaria. El proceso comprende la aplicación de presión hidráulica para forzar cemento en un orificio abierto a través de perforaciones en el revestidor, para corregir ciertas anomalías. La

cementación forzada puede hacerse: con empacadura y/o con retenedor. Cuando se diseña una cementación forzada se debe considerar:

- Tipo de cemento.
- Tiempo total de bombeo requerido.
- Tiempo para alcanzar las condiciones del pozo.
- Control de filtrado.
- Resistencia del cemento.
- Desplazamientos y cálculos básicos en condiciones del pozo.

#### **2.2.1.6.2.2 Tapones de Cemento**

Operación que consiste en colocar una columna de cemento en un hoyo abierto o revestido, con cualquiera de los siguientes objetivos:

- Aislar una zona productora agotada.
- Pérdida de control de circulación.
- Perforación direccional.
- Abandono de pozo seco o agotado.

#### **2.2.1.7 Diseño de la lechada de Cemento**

Una lechada de cemento es simplemente una mezcla de cemento seco y agua. En las cementaciones primarias las lechadas de cemento deben poseer una viscosidad o consistencia adecuada, de tal forma que ofrezcan un desplazamiento eficiente del lodo, y permitan una buena adherencia del cemento con la formación y el revestimiento. Para lograr esto, las lechadas son mezcladas con una cantidad específica de agua que impida una separación de agua libre. El tamaño de la partícula, el área superficial, y los aditivos, todo

influye en la cantidad de agua requerida en el mezclado para lograr una viscosidad particular de lechada.

Para determinar el tiempo durante el cual se bombeará la lechada, es necesario conocer las condiciones del pozo, así como la potencia hidráulica requerida, caudal de desplazamiento, volumen de lechada y relación entre el diámetro del pozo y el revestimiento. Los datos de resistencia del cemento están basados en las temperaturas y presiones a que está expuesta la lechada en el fondo del pozo, e indican el tiempo requerido para que el cemento resulte suficientemente fuerte para soportar el revestimiento. Más detalladamente, algunos de esos parámetros necesarios para el diseño son:

**Tiempo de cementación:** es el tiempo mínimo requerido para el endurecimiento de la lechada por la deshidratación del cemento; este tiempo es 1.5 veces mayor que el tiempo de duración de las operaciones de cementación; es decir si las operaciones duran 5 horas, el tiempo de fraguado del cemento será 7.5 horas.

**Tiempo de espesamiento:** Es el tiempo que se le da a una lechada para que permanezca lo suficientemente fluida para poder bombearse en el hoyo bajo determinadas condiciones de temperatura y presión.

**Tiempo de mezclado y bombeado:** es el tiempo mínimo para mezclar y bombear la lechada de cemento dentro del pozo hasta el espacio anular. Las consideraciones técnicas dependen del tipo de trabajo, condiciones de pozo y el volumen de cemento que se desea bombear.

**Tiempo soltando los tapones:** es el tiempo requerido para soltar los tapones antes y después de la lechada de cemento para iniciar el desplazamiento. El tiempo que dura colocar cada tapón es de aproximadamente 10 minutos.

Tiempo de desplazamiento: Es el tiempo requerido para que la columna de cemento se desplace dentro del revestimiento hasta llegar al fondo del hoyo. Este factor está en función de la profundidad de la sección a cementar, el caudal de bombeo y las características del revestidor.

#### **2.2.1.7.1 Aditivos**

Los aditivos tienen como función adaptar el cemento a las condiciones específicas de trabajo. Pueden ser sólidos y/o líquidos (solución acuosa). Pueden ser requeridos para:

- Variar la densidad de la lechada
- Cambiar la fuerza de compresión
- Acelerar o retardar el tiempo de asentamiento
- Controlar la filtración y la pérdida de fluido
- Reducir la viscosidad de la lechada.

Entre los principales aditivos tenemos:

**2.2.1.7.1.1 Aceleradores:** se usan en pozos donde la profundidad y la temperatura son bajas. Para obtener tiempos de espesamiento cortos y buena resistencia a la compresión en corto tiempo. Pueden usarse: cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ , el más usado, en una concentración de 1,5 - 2,0%), silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ , al 2.0 - 2.5%), ácido oxálico ( $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ), agua de mar, etc.

**2.2.1.7.1.2 Retardadores:** utilizados en secciones profundas donde las altas temperaturas promueven un asentamiento más rápido. Hacen que el tiempo de fraguado y el desarrollo de resistencia la compresión del cemento sean más

lentos. Los más usados son: lignitos, lignosulfonato de calcio (0,1 -1,5%), ácidos hidroxicarboxílicos, azúcares, derivados celulósicos, etc.

**2.2.1.7.1.3 Extendedores:** se añaden para reducir la densidad del cemento o para reducirla cantidad de cemento por unidad de volumen del material fraguado, con el fin de reducir la presión hidrostática (con el fin de evitar una fractura) y aumentar el rendimiento (pie<sup>3</sup>/saco) de las lechadas. También reducen la fuerza de compresión e incrementan el tiempo de fraguado. Entre los más usados se tienen: bentonita prehidratada (2 - 20%), silicato de sodio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), diatomeas (10 - 40%), mezclas 50:50 Pozolan con cemento Portland, etc.

**2.2.1.7.1.4 Controladores de Filtrado:** aditivos que controlan la pérdida de la fase acuosa del sistema cementante frente a una formación permeable. Previenen la deshidratación prematura de la lechada. Los más usados son: celulosa (CMHEC, 0,3 – 1%), polímeros orgánicos, reductores de fricción, etc.

## **2.2.1.8 Equipo de cementación**

**2.2.1.8.1 Zapata de revestimiento:** Su principal función es permitir correr la tubería de revestimiento hacia el fondo del pozo. Tiene un perfil redondeado para asistir en esta función. Se le conoce como zapata flotadora cuando es corrida con una válvula de bola.

**2.2.1.8.2 Cuello flotador:** Usualmente localizado 2 o 3 juntas sobre la zapata y actúa como un alto para los tapones de cemento. El cuello flotador asegura que habrá cemento sellando las últimas juntas de la tubería de revestimiento cuando cese el bombeo, es decir, cuando el tapón sea “sentado”. El cuello flotador también contiene una válvula de bola, la cual previene que el

cemento que se encuentra en el espacio anular fluya de regreso a la tubería de revestimiento, cuando el desplazamiento haya terminado.

**2.2.1.8.3 Centralizadores:** Estos son ya sea de tipo de fleje con bisagra o sólidos de tipo espiral o “rígido” y ambas sirven para centralizar la tubería de revestimiento en el hueco.

Ventajas de la tubería centralizada:

- Mejora la eficiencia del desplazamiento.
- Reduce el riesgo de pegas.
- Previene problemas clave de asentamiento.
- Reduce el arrastre en pozos direccionales.

Los centralizadores están amordazados a la tubería de revestimiento utilizando un mecanismo de bisagra o de clavado, mientras que un collar de parado sirve para colocarlos en posición. El espaciado y cantidad de centralizadores depende del ángulo del agujero, de la tubería de revestimiento y del lodo. Típicamente los centralizadores se concentrarían en la secciones críticas, de mayor ángulo, la zapata y justo debajo del colgador, mientras que en el resto de la tubería de revestimiento se los espaciará muy esporádicamente.

**2.2.1.8.4 Raspadores:** Son cepillos de acero que pueden ser amordazados a la tubería de revestimiento y aseguradas con collares de parada. Utilizados para remover físicamente el revoque, lodo gelificado y escombros.

**2.2.1.8.5 Cabezales de cementación:** El cabezal de cemento conecta la línea de descarga de la unidad de cemento con la parte superior de la tubería de revestimiento. Además, es el lugar donde se ubican los tapones antes de su lanzamiento. El lanzamiento incluye remover el reten y bombear el tapón adentro del hueco.

**2.2.1.8.6 Tapones de cementación:** Los tapones de cementación son utilizados para separar la lechada de cemento del espaciador o lodo para prevenir su contaminación. En tuberías de revestimiento largas, tapones adicionales son bombeados antes y entre el tren de espaciadores para minimizar la contaminación causada por varios regímenes dentro de diferentes espaciadores y para maximizar su efectividad cuando salgan hacia el espacio anular. Los tapones son normalmente fabricados de goma. El tapón de fondo tiene un delgado diafragma en su centro. Después de que aterriza en el collar flotador, el diafragma se ruptora cuando una presión diferencial predeterminada es alcanzada.

**2.2.1.8.7 Espaciadores:** No se podrían calificar como equipos, ni tampoco como aditivos. Antes de bombear cualquier lechada, usualmente se bombean una serie de limpiadores y espaciadores, incluyendo limpiadores detergentes, lodo desperdicio, y una pastilla de viscosidad. El propósito de los espaciadores es el de:

- Separar físicamente el lodo del cemento.
- Remover el revoque de lodo de la pared del espacio anular.
- Dejar mojada la tubería de revestimiento.
- Proveer menos hidrostática de cabeza, es decir, reducir las presiones de bombeo.

Características del espaciador:

- Se prefiere un régimen de flujo turbulento para generar un eficiente desplazamiento y erosión de revoque de pared.
- Un mínimo de tiempo de contacto de 10 minutos, es considerado suficiente y determinara el volumen bombeado.

### **2.2.2 Acústica de pozos**

Se refiere a la comprensión de la información contenida en las ondas acústicas y al entendimiento de como estas se propagan a través del pozo. Las ondas acústicas registradas por las herramientas de adquisición de registros sínicos dependen de la fuente de energía, la trayectoria que adoptan y de las propiedades de la formación y del pozo.

Así, las ondas acústicas de los pozos pueden ser tan simples o tan complejas como los medios a través de los cuales se propagan y comprender los principios de propagación de ondas es esencial para poder apreciar las modernas tecnologías de registros sínicos.

### **2.2.3 Ondas sonoras**

Se refiere a los conceptos fundamentales usados para describir a las ondas sonoras.

Entre los principales elementos de las ondas se encuentran:

- **Cresta:** La cresta es el punto de máxima elongación o máxima amplitud de la onda; es decir, el punto de la onda más separado de su posición de reposo.
- **Período:** El periodo es el tiempo que tarda la onda en ir de un punto de máxima amplitud al siguiente.
- **Amplitud:** La amplitud es la distancia vertical entre una cresta y el punto medio de la onda. Nótese que pueden existir ondas cuya amplitud sea variable, es decir, crezca o decrezca con el paso del tiempo.
- **Frecuencia:** Número de veces que es repetida dicha vibración por unidad de tiempo. En otras palabras, es una simple repetición de valores por un período determinado.
- **Valle:** Es el punto más bajo de una onda.



- Longitud de onda: Es la distancia que hay entre el mismo punto de dos ondulaciones consecutivas, o la distancia entre dos crestas consecutivas.
- Ciclo: es una oscilación, o viaje completo de ida y vuelta

Las ondas según su dirección de propagación se clasifican en:

- Ondas longitudinales (P): conocidas también como ondas compresionales, son aquellas que se caracterizan porque las partículas del medio se mueven o vibran paralelamente a la dirección de propagación de la onda.
- Ondas transversales (S): conocidas también como ondas de corte, son aquellas que se caracterizan porque las partículas del medio vibran perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.

Las ondas pueden experimentar los siguientes comportamientos:

- Difracción - Ocurre cuando una onda al topar con el borde de un obstáculo deja de ir en línea recta para rodearlo.
- Interferencia - Ocurre cuando dos ondas se combinan al encontrarse en el mismo punto del espacio.
- Reflexión - Ocurre cuando una onda, al encontrarse con un nuevo medio que no puede atravesar, cambia de dirección.
- Refracción - Ocurre cuando una onda cambia de dirección al entrar en un nuevo medio en el que viaja a distinta velocidad.

#### **2.2.4 Registros de evaluación de cemento**

Los registros de evaluación de cemento son usados en la evaluación final de la integridad del cemento y el aislamiento zonal. Usados en conjunción con los análisis de ejecución y de post cementación, los registros de evaluación pueden ayudar a identificar el pobre aislamiento y sus razones. Si es necesario un

trabajo de remediación, los registros de evaluación ayudan en su diseño para alcanzar el aislamiento requerido en el completamiento del pozo y la producción de los fluidos deseados. Cualquier problema identificado en estos análisis es objetivo de mejora en el diseño o fases de ejecución de pozos futuros.

Los registros de evaluación de cemento también juegan un rol importante en la confirmación de la integridad de la tubería y el aislamiento de fluidos de formación, porque la exposición de la tubería a fluidos de formación puede eventualmente inducir corrosión si la falta de aislamiento no es corregida.

Esta tesis se enfoca en la evaluación del cemento a partir de registros acústicos. Los registros acústicos se pueden dividir en dos grupos principales:

- Sónicos, con herramientas que proveen registros de amplitud y de densidad variable de la ondas.
- Ultrasónicos, con herramientas que proveen mapas de la distribución de cemento alrededor de la tubería.

## 2.3 MARCO CONCEPTUAL

### 2.3.1 CEMENTOS LIGEROS

#### 2.3.1.1 ¿Qué es un cemento ligero?

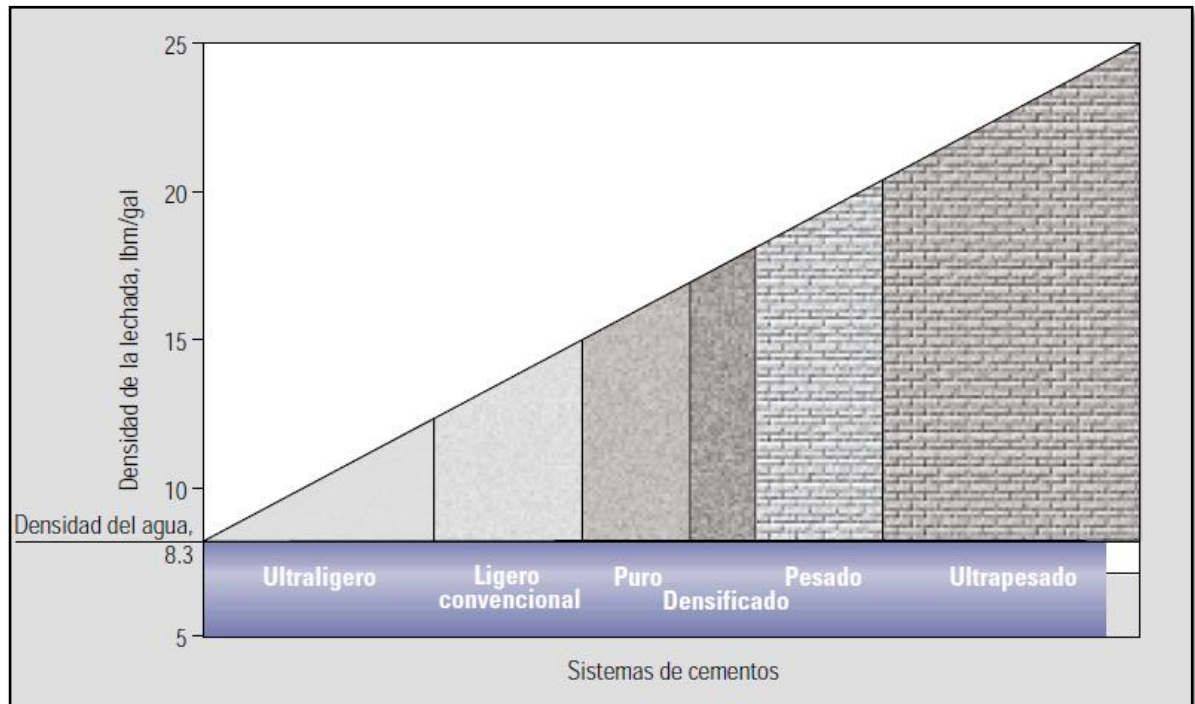


Figura 2.3 Clasificación del cemento por densidad de la lechada

La lechada de cemento neto estándar contiene sólo cemento y agua, donde el contenido de agua es lo suficientemente alto para asegurar la bombeabilidad y lo suficientemente bajo para evitar que el agua se separe de la lechada. El cemento clase G usado generalmente posee un densidad óptima de 15.8 ppg.

Históricamente, la reducción de la densidad de la lechada ha sido realizada para reducir los costos promedio de los trabajos de cementación. El método más barato para reducir la densidad es incrementar la cantidad de agua en adición con un agente gelificante, como la arcilla bentonita. Estas lechadas

tienen un bajo contenido de sólidos, o alta porosidad. El incremento de la cantidad de agua resulta en pobres propiedades mecánicas (baja resistencia a la compresión), alta permeabilidad del cemento fraguado, incremento de la separación del cemento y el agua y escasa protección de la tubería de revestimiento contra la corrosión.

Otro método de reducción de densidad es incluir gas nitrógeno en forma de pequeñas y bien distribuidas burbujas. La mezcla resultante es llamada cemento espumoso (*foam cement*) o cemento energizado. Los sistemas de cemento energizado requieren equipos especiales para incorporar el nitrógeno (o aire) a la lechada para reducir la densidad. Se agrega un surfactante a la lechada para generar y estabilizar la espuma hasta que se fragüe el cemento. Las densidades de estos cementos varían de los 3.5 a los 15.0 lbm/gal (0.42 a 1.80 g/cm<sup>3</sup>). Sin embargo, los cementos energizados se desempeñan eficazmente en un número limitado de aplicaciones específicas, tales como el control de flujos de agua desde capas cercanas a la superficie al perforar en zonas de aguas profundas.

Actualmente se han desarrollado sistemas de bajo peso que proveen buenas propiedades mecánicas manteniendo una baja densidad. Las lechadas de bajo de peso de alto rendimiento poseen un alto contenido de sólidos (baja porosidad), mejores propiedades mecánicas y baja permeabilidad.

Las nuevas tecnologías de lechadas de concreto ligeras optimizan el comportamiento de las lechadas durante su aplicación y aseguran una alta calidad del cemento fraguado. Para crear estas lechadas de alto rendimiento, se mezclan partículas de varios tamaños para maximizar la cantidad de partículas sólidas en un volumen dado.

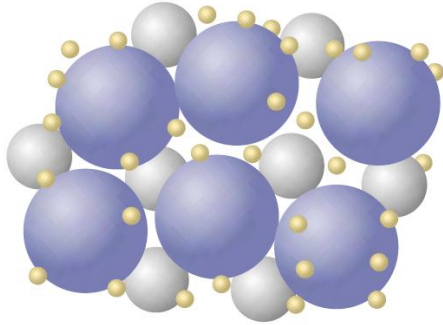


Figura 2.4 Distribución optimizada del tamaño de las partículas. Las partículas pequeñas ocupan el espacio vacío entre las partículas más grandes, lo cual resulta en una fracción más alta de sólidos en la lechada y una menor permeabilidad de cemento fraguado.

Las propiedades volumétricas del cemento, tales como la densidad dependen de las propiedades de las partículas más gruesas. Las partículas intermedias se seleccionan para ofrecer una respuesta química específica, como resistencia química o estabilidad térmica. Las partículas más pequeñas aseguran propiedades de matriz específicas, entre las que se incluyen la estabilidad, el control de la pérdida de fluidos y la permeabilidad. Se pueden combinar varios tipos de partículas y distribuciones del tamaño de partículas para lograr una densidad de lechada específica y que a la vez mantenga una reología deseada; la lechada debe ser homogénea, estable y fácil de bombear.

Las lechadas de bajo peso más ligeras tienen densidades menores a 8.34 lbm/gal ( $1.00 \text{ g/cm}^3$ ), suficientemente ligeras como para que un cubo de cemento fraguado flote en el agua. A pesar de su baja densidad, estas lechadas ultraligeras contienen un 60% de sólidos y 40% de agua cuando son bombeados. Una vez fraguados estos cementos ultraligeros logran una baja permeabilidad y una alta resistencia a la compresión, comparable a la de los cementos convencionales.

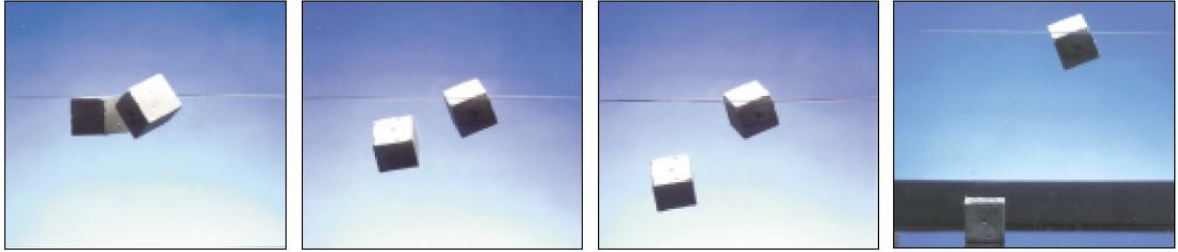


Figura 2.5 Comparación de la permeabilidad del cemento fraguado. Los cubos de 8.0 lbm/gal (0.96 g/cm<sup>3</sup>) de cemento energizado y el cemento ligero de alto rendimiento flotan inicialmente en el agua, como se muestra en la fotografía de la izquierda. Después de un periodo de segundos a minutos, la mayor permeabilidad del cemento energizado permite absorber agua y provoca su hundimiento, como se muestra en la fotografía de lapsos de tiempo.

### 2.3.1.2 Aplicaciones

Como se mencionó las lechadas ligeras, mantienen los estándares de alto rendimiento aun en las condiciones extremas del campo petrolífero, con un diseño de la distribución del tamaño de las partículas especialmente concebido para asegurar gran resistencia a la compresión y un completo aislamiento de las formaciones.

Quizás el mayor desafío de los ambientes de cementación ligera es controlar las pérdidas de circulación. Incluso los lodos de perforación más livianos y las lechadas de cemento más ligeras se pueden perder en formaciones débiles o fracturadas. La cementación de zonas de pérdida de circulación usualmente implica gastos extra para herramientas de trabajo por etapas, operaciones de remediación y otros métodos que aseguren el aislamiento de las formaciones débiles y de los acuíferos.

Los cementos ligeros permiten columnas más altas en el espacio anular que las lechadas convencionales, incluso en áreas con tendencia a pérdidas de circulación extremas. Las formaciones débiles se pueden cementar completamente con las lechadas ligeras ya que no exceden los bajos gradientes de fractura de la formación. Además los tapones de cemento ligero son lo suficientemente fuertes como para emplearse como tapones de

desviación o cucharas desviadoras, y las tuberías de revestimiento cementadas con estas lechadas se pueden perforar fácilmente sin provocar fracturamiento.

Las aplicaciones de esta tecnología son eficaces a temperaturas que varían de 80 a 450°F (27 a 232°C), presiones de fondo del pozo de hasta 8000lpc (55.15 MPa) y lechadas que varían de 8.2 a 12.5 lbm/gal (0.98 a 1.50 g/cm<sup>3</sup>).

### 2.3.1.3 Propiedades

Los cementos ligeros no están compuestos en un 100% de partículas de cemento. Tienen una menor impedancia acústica que los sistemas de cemento convencional (15.8 lbm/gal); densidad comúnmente usada para cementar las columnas de producción.

Es más difícil interpretar los registros de los sistemas ligeros que de los sistemas convencionales debido que se reduce el contraste de impedancia entre los sólidos y líquidos. Puesto que la densidad influye en la medición más que la velocidad, mientras más baja es la densidad más serio es el problema. Sin embargo, los sistemas ligeros de alto rendimiento también tienen una mayor impedancia acústica (debido a la mayor fracción sólida) que los sistemas de cemento convencionales con la misma densidad, de modo que es más fácil obtener registros en ellos que en cualquier otro sistema de cemento diseñado con la misma densidad.

CUADRO Nº 2.2 PROPIEDADES ACUSTICAS TIPICAS DE LOS MATERIALES ENCONTRADOS EN EL POZO

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Impedancia Acústica (Mrayl)
<b>Gas</b>	1.3 – 130	0.0004 – 0.04
<b>Agua</b>	1000	1.5
<b>Fluidos de perforación</b>	1000 – 2000	1.5 – 3.0
<b>Cementos ligeros</b>	1400	2.0 – 5.0
<b>Cemento clase G</b>	1900	5.0 – 7.0
<b>Acero</b>	7800	46



### 2.3.2 Registro de Adherencia de Cemento (CBL) y Registro de Densidad Variable (VDL)

Entre los muchos factores que pueden influenciar las propiedades acústicas de un casing cementado, está la calidad de la adherencia entre el cemento y el casing.

La herramienta sónica que se usa para evaluar la calidad del cemento, es esquematizada en la figura 2.6:

Un transmisor emite trenes de ondas acústicas de corta duración. La señal viaja a través del casing, cemento y formación antes de alcanzar los 2 receptores, ubicados a 3 y 5 pies desde el transmisor.

El Registro de Adherencia de Cemento (CBL), es una grabación de la amplitud del primer arribo de energía en el receptor de 3 pies.

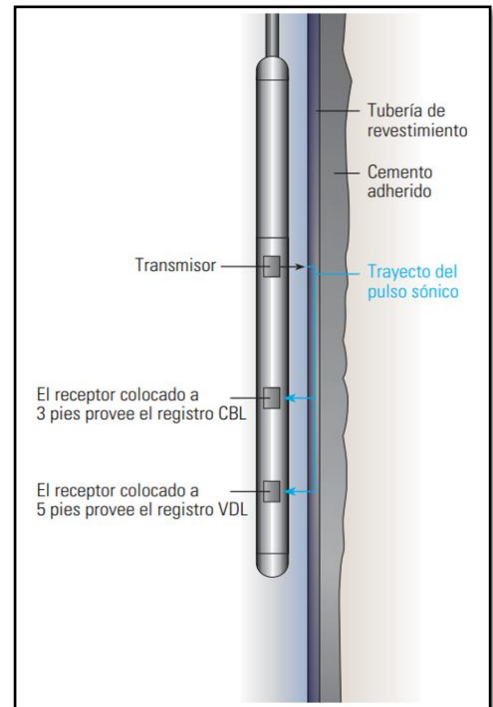


Figura 2.6  
Herramientas de adquisición de registros sónicos.

El Registro de Densidad Variable (VDL), es opcional y complementa la información brindada por el CBL, generando una imagen completa de la onda en el receptor de 5 pies.

Los 3 pies de espaciamiento fueron determinados experimentalmente para permitir el registro de un rango amplio de condiciones de cemento. Los 5 pies de espaciamiento permiten una separación de tiempo de los arribos rápidos y lentos antes de su presentación.

### 2.3.2.1 Registro de Adherencia de Cemento (CBL)

La onda compresional viajando a través del casing es generalmente la primera en alcanzar el receptor de 3 pies, los primeros 3 picos de la señal en el receptor son etiquetados como E1, E2, E3 como se muestra en la figura 2.7.

Cuando la adherencia entre el casing y el cemento es buena, las amplitudes E1, E2, E3 disminuyen.

Las amplitudes de E1, E2, E3 son proporcionales a la tasa de atenuación para un nivel dado de señal en el transmisor.

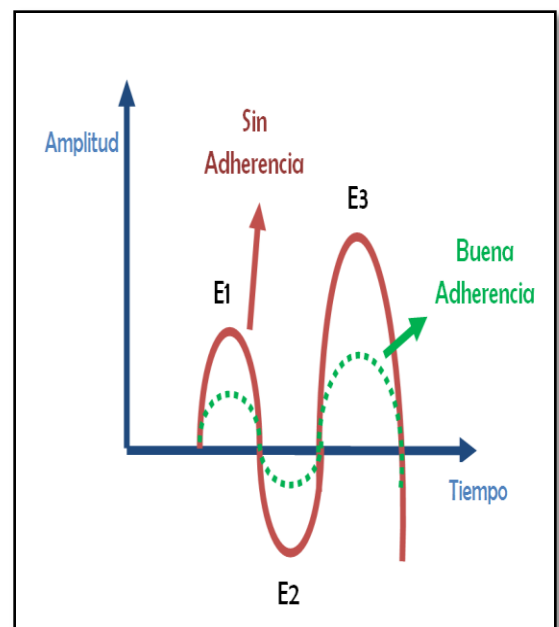


Figura 2.7

La tasa de atenuación, cuando existe una buena adherencia entre el cemento y el casing, depende de los esfuerzos compresivos del cemento y del porcentaje total de la circunferencia que esta adherido.

En un registro CBL se miden 2 cantidades:

- El tiempo de transito  $\Delta t$ : es el tiempo que se toma E1 en alcanzar el receptor.
- La amplitud de E1.

### 2.3.2.1.1 Medición del tiempo de tránsito

En el momento en que el pulso de sonido es transmitido desde la herramienta, un reloj electrónico comienza el conteo. El reloj es ajustado para que cuando E1 alcance el receptor se pare el conteo.  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido grabado por el reloj (ver figura 2.8).

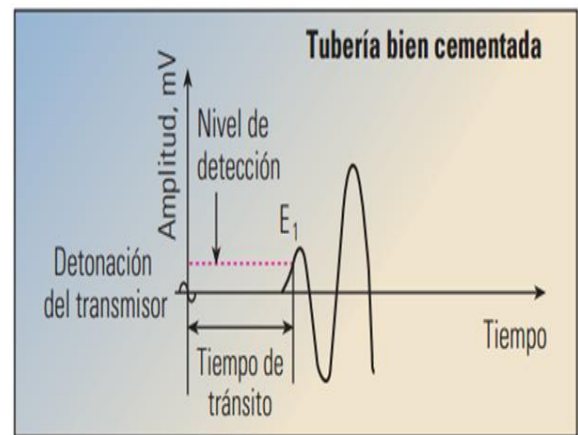


Figura 2.8

El nivel de detección debe ser lo suficientemente alto para que el *ruido* no sea detectado por el sistema.

Este método de medición muestra 2 características distintas cuando la amplitud de E1 disminuye debido a la buena adherencia entre el cemento y el casing: el estiramiento (*Stretching*) y el salto de ciclo (*Cycle Skipping*).

- Estiramiento, el efecto del estiramiento es una disminución en la amplitud de E1 que aparece como un “estiramiento” del tiempo de tránsito, ya que el nivel de detección es constante.
- Salto de Ciclo, en este caso la adherencia conlleva a una amplitud de E1 tan baja que está por debajo del nivel de detección, el tiempo de tránsito medido se realizaría en E3 en lugar de E1, este efecto es conocido como *salto de ciclo*.

Como resumen, una buena adherencia de cemento aparece en la medición del tiempo de tránsito como un incremento en  $\Delta t$ , que puede ser pequeño (en caso de un estiramiento) o uno largo (en caso de un salto de ciclo).

### 2.3.2.1.2 Medición de Amplitud

Para medir E1, una “ventana” electrónica es abierta por un corto intervalo de tiempo y se graba el máximo valor de señal recibida dentro de dicha ventana.

Dos sistemas de “ventanas” (*gates*) pueden ser usados en las herramientas CBL:

- Ventana flotante (*floating gate*), la ventana se activa por la medición del tiempo de tránsito, la amplitud medida es la del primer pico por encima del nivel de detección  $\Delta t$ .
- Ventana fija (*fixed gate*), el tiempo en que la ventana se abre es fijada por el operador, la amplitud grabada es la máxima o la de cualquier señal presente durante la apertura de la ventana; el operador establece la ventana para que la amplitud E1 sea grabada.

### 2.3.2.1.3 CBL en agujeros desviados: efecto de excentricidad

La centralización de la herramienta es un parámetro crítico para la respuesta de las herramientas CBL. El efecto de la excentricidad es que se generan 2 caminos para las ondas acústicas, uno más corto que el otro (ver figura 2.9). Este cambio en camino expande la señal en el receptor.

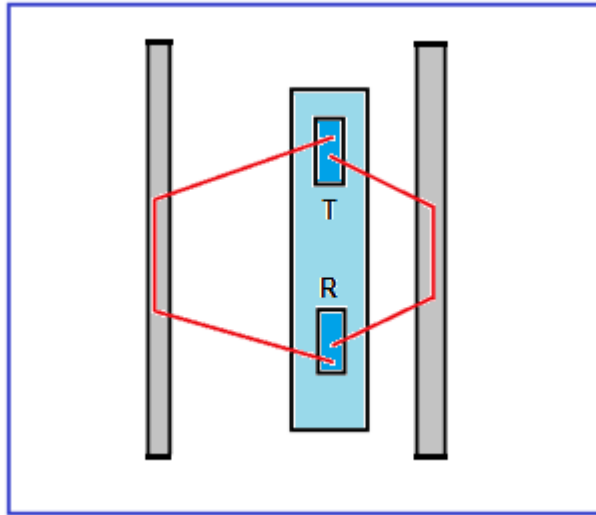


Figura 2.9  
Excentricidad de la herramienta. Muestra el camino largo al lado izquierdo y el camino corto a la derecha.

El efecto de la excentricidad en el registro CBL es doble:

- El tiempo de tránsito  $\Delta t$  disminuye.
- La amplitud de E1 disminuye (1/2" de excentricidad reduce E1 en más del 50%).

La aparición simultánea de estos 2 fenómenos en el registro CBL indica excentricidad.

### 2.3.2.2 Registro de Densidad Variable (VDL)

El tren de ondas completo es mostrado en el registro como rayas claras y oscuras, el contraste depende de la amplitud de los picos positivos.

Las diferentes partes de la onda pueden ser identificadas en el registro VDL: los arribos de casing muestran rayas regulares, mientras que los arribos de formación son caracterizados por su irregularidad.

El principio del registro de densidad variable es mostrado con la figura 2.10:

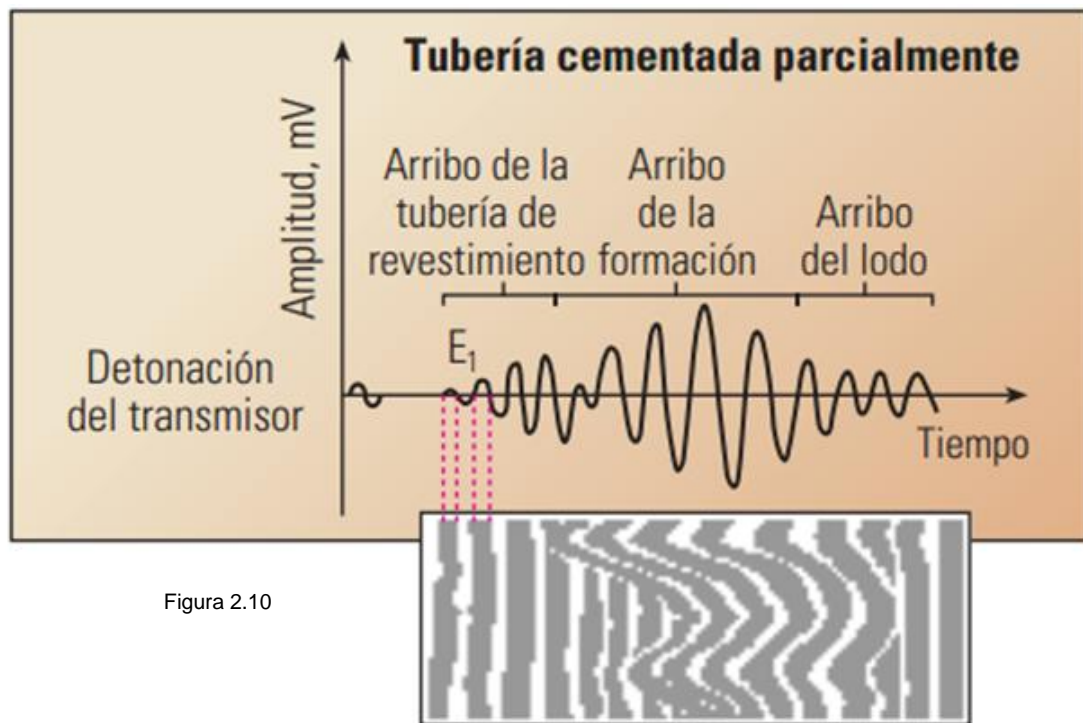


Figura 2.10

### **2.3.2.3 Principales limitaciones**

La herramienta sónica tradicional CBL-VDL no provee información radial o azimutal para diferenciar la presencia de canales, cemento contaminado, microespacios anulares y excentricidad de la herramienta, lo que dificulta la interpretación segura de los datos.

Por lo tanto hay respuestas que no pueden ser respondidas utilizando únicamente esta tecnología, como:

- ¿Existe microanillo?
- ¿El cemento está contaminado?
- ¿Existen canales?
- ¿Cómo responde el CBL-VDL frente a cementos ligeros?
- ¿Qué tan baja debe ser la amplitud del CBL para asegurar un buen aislamiento?

### **2.3.3 Registro de Imágenes Ultrasónicas (USI)**

#### **2.3.3.1 ¿Qué es la impedancia acústica (Z)?**

La impedancia acústica (Z) es una propiedad de estado intensiva. Es la resistencia que opone un medio a que las ondas se propagan sobre este, es decir, es una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio. La impedancia característica de un material puede calcularse como el producto entre la densidad ( $\rho$ ) y la velocidad del sonido (V) en el material.

$$Z = \rho * V$$

Las mediciones de impedancia acústica se expresan por lo general en Megarayleighs (Mrayl), o  $10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

#### **2.3.3.2 Principios de operación**

Las herramientas de imágenes ultrasónicas (USI) utilizan un transductor rotativo para emitir una onda ultrasónica perpendicular a la pared del revestimiento, con una frecuencia que puede ajustarse entre los entre 200 y 700 kHz (ver figura 2.11). El efecto consiste en excitar un modo de resonancia de la tubería de revestimiento a una frecuencia que depende del espesor de la tubería de revestimiento y con un decaimiento de la amplitud que depende de las impedancias acústicas de los medios situados a ambos lados de la tubería de revestimiento (lodo interno y cemento externo). La impedancia acústica del cemento se clasifica luego como gas, líquido o cemento según los valores umbrales fijados para los límites de impedancia acústica entre estos materiales.



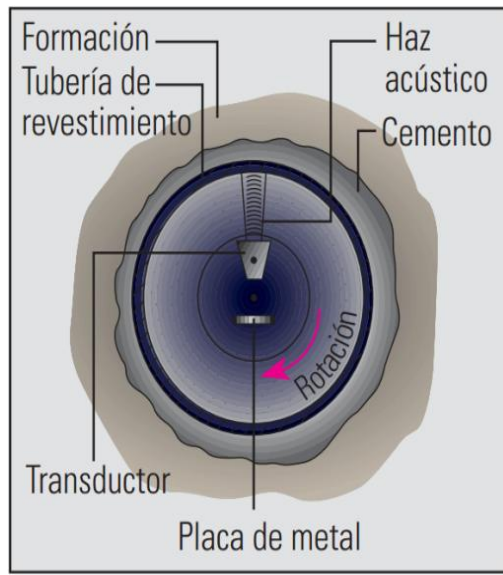


Figura 2.11  
Operación de las herramientas de  
Imágenes Ultrasónica



Figura 2.12  
Herramienta de Imágenes  
Ultrasónica

El transductor va colocado sobre un Sub Giratorio (*rotating sub*) en el fondo de la herramienta y permite escanear los 360° de la circunferencia del revestimiento, girando de 7 a 10 rps, y funciona como transmisor y receptor a la vez, como se muestra en la figura 2.12.

Como se mencionó, la energía de las ondas ultrasónicas reflejadas depende de la impedancia de la tubería de revestimiento y de los materiales adyacentes.

Se tienen 2 casos:

- Si las impedancias son muy disímiles en valor, la energía se reflejará casi en su totalidad (mal cemento, pobre adherencia).
- En caso de las impedancias sean parecidas la energía pasará al siguiente medio y habrá poco reflejo (buen cemento), ver figura 2.13.

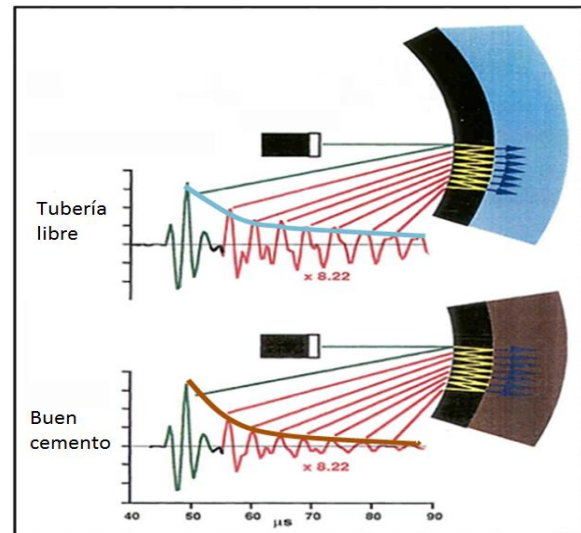


Figura 2.13

Una vez que la onda llega a la pared del revestimiento parte de la energía es reflejada y parte entra al acero originando una resonancia dentro de él. La amplitud de cada reflejo va decayendo de acuerdo a la diferencia de impedancias entre el revestimiento y el material exterior. A mayor contraste de impedancias entre el casing y el material exterior habrá mayor energía para cada reflexión.

De esta forma, el conocimiento de las propiedades del medio son muy importantes para la interpretación del registro, por ello, se realiza una medida de las propiedades del fluido del pozo, *Fluid Properties Measurement* (FPM). Estos valores son medidos usualmente mientras se están bajando las herramientas dentro del pozo, y en los registros se puede mostrar información de la velocidad del fluido y la impedancia acústica del fluido.

Así las herramientas USI resultan útiles no solo en la evaluación de la cementación, sino también, además, en la evaluación de integridad de la tubería de revestimiento.

Las herramientas USI brindan la siguiente información:

- Impedancia acústica del cemento ( $Z$ )
- Integridad del casing (rugosidad, radio interno, ovalidad, espesor)
- Corrosión

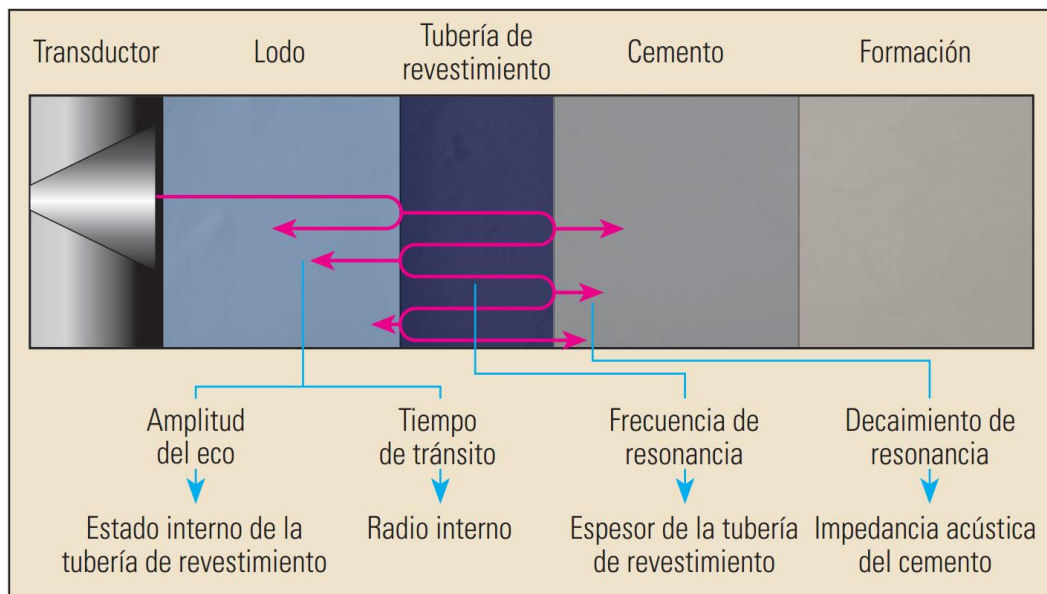


Figura 2.14

### 2.3.3.3 Valores umbrales (*Threshold Technique*)

Los mapas de impedancia acústica dependen del establecimiento de valores claves, los llamados Valores Umbrales (*Thresholds*). Es decir, valores que nos permitan diferenciar entre el gas, líquido y cemento a través de valores de impedancia acústica característicos, como lo representa la figura 2.15.

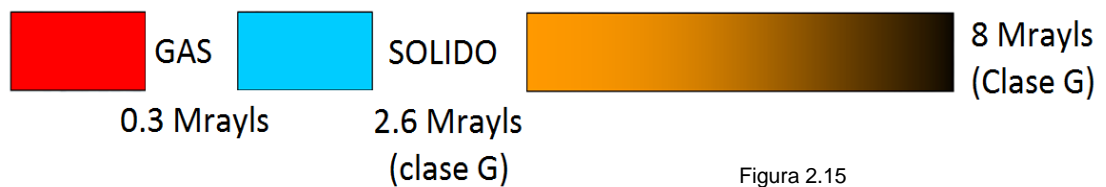


Figura 2.15

CUADRO Nº 2.3 VALORES UMBRALES TÍPICOS

Densidad de la lechada (lbm/gal)	Umbral Sólido (Mrayls)
<12.5	*
12.5	2.1
16	2.6
19	3.1



El umbral sólido es función de la densidad de la lechada.

### 2.3.3.4 Principales limitaciones

Según lo mencionado anteriormente se pueden definir las principales limitaciones de las herramientas USI:

- Las mediciones del registro, muestran información típicamente sólo de la vecindad inmediata de la interface revestimiento-cemento, y no más allá.
- El diagnóstico de los materiales detrás de la tubería de revestimiento se dificulta con la presencia de cementos de bajo peso o contaminados, debido por los valores similares de impedancia acústica con los de fluidos de perforación, que eliminan las diferencias mínimas requeridas por la técnica de umbrales.

Si el cemento de la zona registrada está contaminado o es de bajo peso, presentará una impedancia acústica similar a la de los líquidos. De esta forma, la técnica de umbrales no proveerá resultados consistentes y/o válidos para diferenciar el cemento (sólido) del lodo (líquido). Aún en condiciones favorables, el contraste de impedancia acústica entre el fluido de perforación y el cemento debe ser típicamente mayor que 0.5 Mrayl para que las herramientas USI puedan distinguirlos (ver figura 2.16).

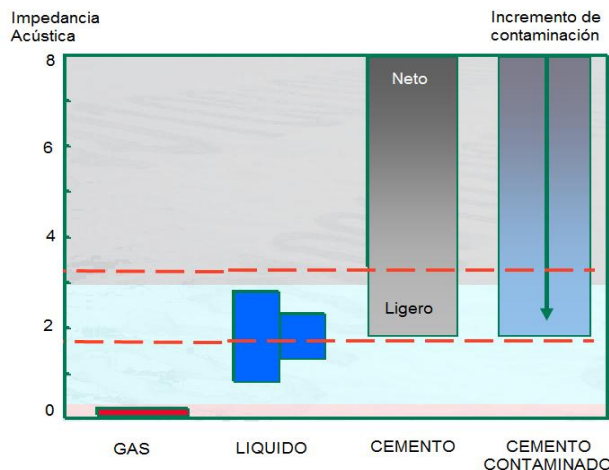


Figura 2.16

La figura demuestra que resulta muy complicado diferenciar entre líquidos, y cementos ligeros o contaminados a partir de las herramientas USI debido al bajo contraste de impedancia acústica.

Las líneas rojas punteadas abarcan un rango de 1.5 a 3.0 Mrayl aproximadamente.

- La determinación de la impedancia acústica de las herramientas USI muestra una gran dependencia en el manejo de la impedancia acústica del lodo ( $Z_{mud}$ ) y en su correcta selección. Es importante recordar que un cambio de 0.1 Mrayl en la impedancia acústica del lodo genera un cambio aproximado de 0.5 Mrayl en la impedancia del cemento.

## 2.3.4 Ondas Flexurales

### 2.3.4.1 ¿Qué son las ondas flexurales?

Una onda flexural es una onda orientada, generada por una fuente dipolar (ver figura 2.17). Para esta aplicación se consideran las ondas flexurales ultrasónicas (de alta frecuencia, generalmente entre los 100 y 400 kHz). La onda flexural viaja a lo largo en el plano de la fuente que lo generó. El movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la propagación de la onda, en forma similar a las ondas S.

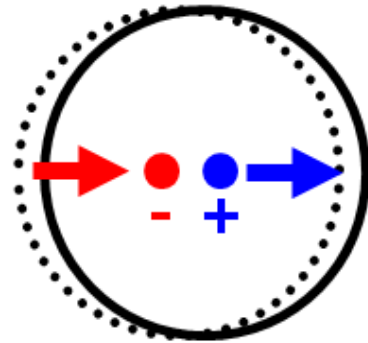


Figura 2.17  
Representación matemática  
de una fuente dipolar

El efecto consiste en excitar el modo flexural de la tubería de revestimiento. Además, las ondas flexurales son dispersivas, lo que significa que su lentitud varía con la frecuencia.

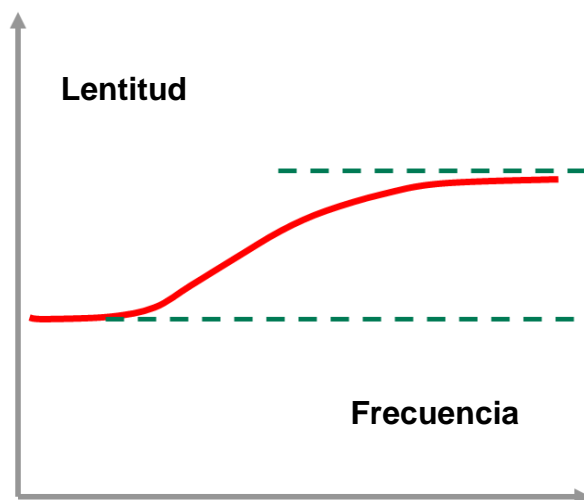


Figura 2.18  
Dispersión típica de una onda flexural.

En general, la frecuencia utilizada por la fuente dipolar depende de las condiciones del trabajo en particular (fluidos en el pozo, diámetro interno de la tubería de revestimiento, espesor, entre otros). La figura 2.18 muestra una

dispersión típica de la onda flexural, en la cual se puede observar que la lentitud de la onda permanece aproximadamente constante a las altas frecuencias. Una consecuencia directa de esta situación es que hace posible realizar mediciones precisas del tiempo de arribo y la amplitud de las ondas.

#### 2.3.4.2 Evaluación de ondas flexurales

La herramienta que permite la evaluación de ondas flexurales incluye un subconjunto giratorio que posee 4 transductores. Sobre un lado de la herramienta se coloca el transductor alineado en forma perpendicular a la tubería de revestimiento (A) para generar el modo de resonancia de la tubería de revestimiento, de manera semejante a las herramientas USI convencionales. Los otros 3 transductores se encuentran en el lado opuesto de la herramienta, alineados en forma oblicua. Uno de estos transductores transmite un haz pulsado de alta frecuencia para excitar el modo flexural del revestimiento (B). Los otros dos transductores (C y D) reciben el haz reflejado por el revestimiento para medir la atenuación flexural.

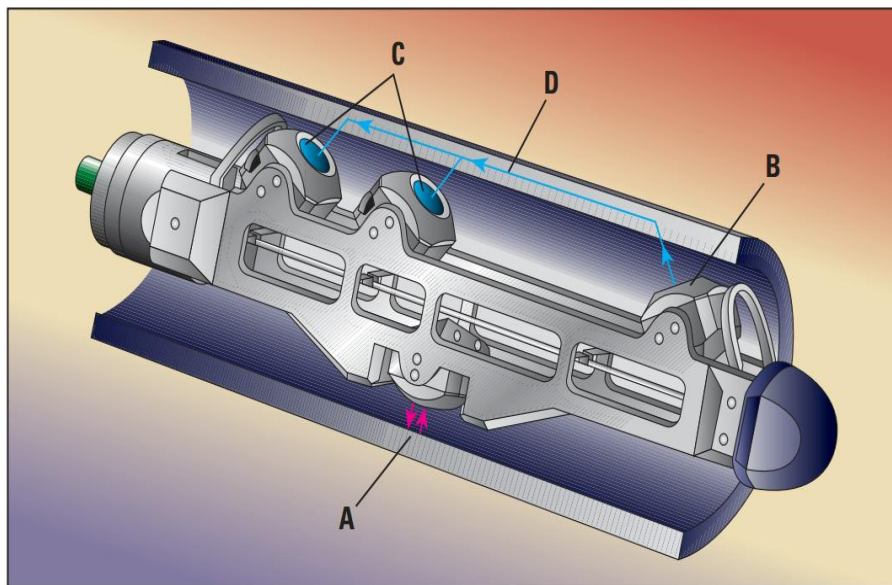


Figura 2.19  
Subconjunto de fondo que permite una evaluación combinada de impedancia acústica (A) y atenuación flexural (B, C y D).



A medida que se propaga, este modo irradia energía acústica en el espacio anular, esta energía se refleja en las interfaces que presentan un contraste acústico, tales como las interfaces cemento/formación y se vuelven a propagar a través de la tubería de revestimiento, predominantemente como onda flexural, para volver a irradiar energía en el fluido del pozo. Los 2 transductores receptores (C y D) se colocan de manera tal que permitan la adquisición óptima de estas señales, tal como lo muestra la figura 2.19.

El procesamiento de las señales resultantes provee información sobre la naturaleza y la velocidad acústica del material que rellena el espacio anular, la posición de la tubería de revestimiento en el pozo, y la forma geométrica de este.

El primer objetivo del procesamiento de estas señales es obtener una interpretación firme acerca del material que se encuentra inmediatamente detrás de la tubería de revestimiento. Los datos de entrada para esta secuencia de procesamiento son la impedancia acústica del cemento (obtenida del transductor orientado de manera perpendicular hacia la tubería de revestimiento), y la atenuación de la amplitud de la onda flexural (calculada a partir de la amplitud de los arribos de la tubería de revestimiento en los receptores orientados oblicuamente).

#### **2.3.4.3 Atenuación Flexural**

La medición de la atenuación flexural se puede describir como sigue: la onda flexural viaja a través del hoyo, la tubería de revestimiento y en el anular. Luego de propagarse a lo largo de la tubería de revestimiento (excitando el modo flexural de este) se detectan los arribos del revestimiento en los receptores cercano y lejano, finalmente se observa la amplitud de estos arribos y se procesa un cociente a escala logarítmica.

La siguiente figura demuestra que el proceso que se hace es en realidad bastante simple.

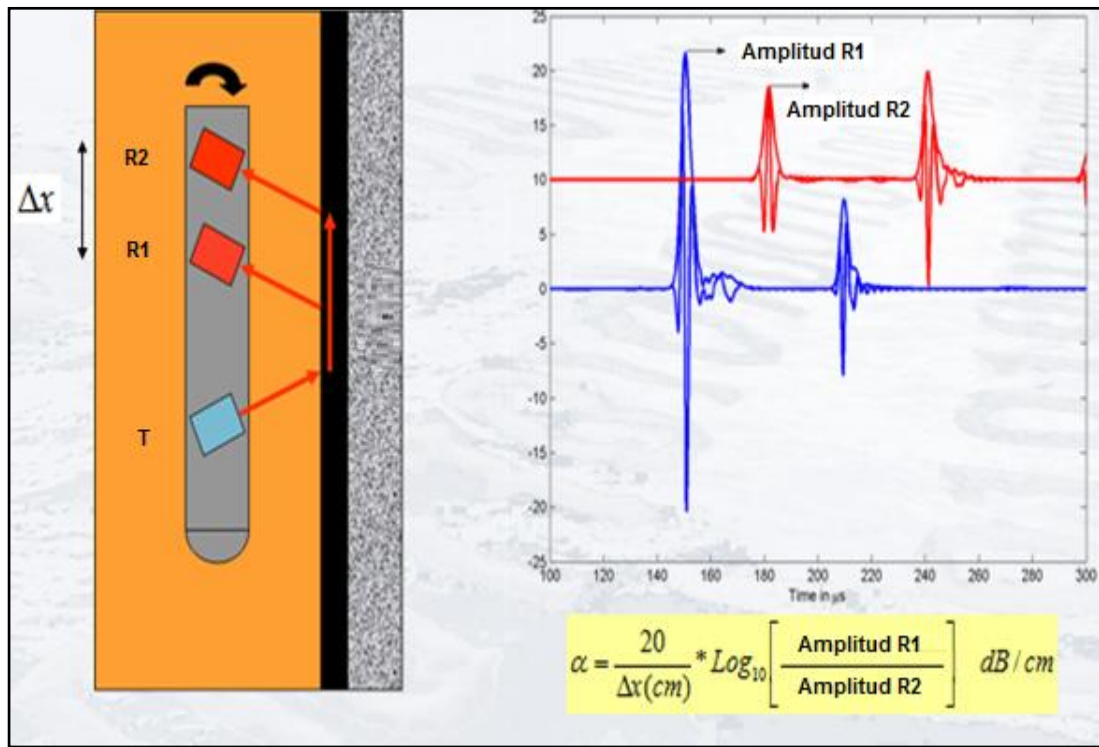


Figura 2.20  
Esquematización de la medición de la atenuación flexural.

En las formas de onda detectadas, los arribos de la tubería de revestimiento son el primer pico en llegar. La primera interface es la entrada al revestidor y la segunda interface es la salida de este. Luego de un tiempo, llega una reflexión desde una tercera interface, generada por una tubería de revestimiento (en caso de una sección de doble revestimiento) o por la formación. Estos ecos son por lo tanto llamados Ecos de Tercera Interface, *Third Interface Echo* (TIE).

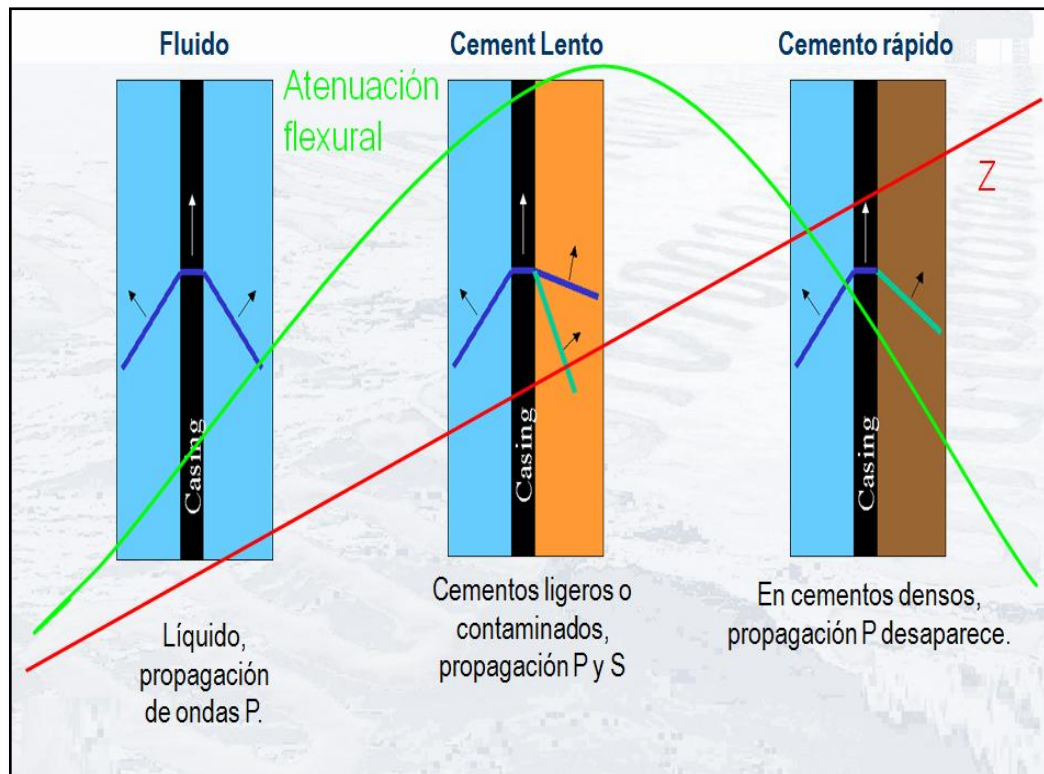


Figura 2.21  
 Respuesta de la atenuación flexura frente a ambientes de baja impedancia acústica.

Para explicar de manera sencilla cual es la importancia de realizar las dos mediciones a la vez (impedancia acústica y atenuación flexural) de forma independiente, se muestra la figura 2.21.

Se muestran tres diferentes materiales en el anular, de izquierda a derecha: lleno de líquido, lleno de cemento ligero o contaminado, y cemento neto (clase G o H).

De izquierda a derecha se observa claramente que la impedancia acústica de los materiales presentes en el anular se incrementa:

- Líquidos: 1.4 a 3 Mrayl in fluidos extremadamente pesados.
- Sólidos ligeros: 1.5 a 4-6 Mrayl
- Materiales pesados: 6 Mrayl a más.

En lo que se refiere a la atenuación flexural, la atenuación alcanza valores mayores mientras existan más modos de propagación.

- Cuando el anular está lleno de fluido, la única forma de propagación es la compresional (ondas P), no se desarrollan ondas de corte “ondas S” en fluido.
- Cuando el anular esta de lleno de material sólido (ligero), las ondas flexurales pueden propagarse como ondas P y S, por lo que alcanzan mayores valores de atenuación.
- En cementos de alta densidad, la propagación de ondas compresionales desaparece, por lo que el valor de atenuación flexural se reduce.

La desaparición de las ondas compresionales durante la propagación de ondas flexurales ocurre repentinamente y el efecto es conocido como “evanescencia” o como “valor crítico” como se detallará a continuación.

Por debajo del valor crítico de impedancia,  $Z_c$ , la atenuación flexural se incrementa linealmente con la impedancia acústica del material (líquido o sólido). Por encima de  $Z_c$ , la atenuación flexural cae rápidamente a valores muy pequeños. A una atenuación flexural dada (por ejemplo 0.30 dB/cm) le corresponde dos valores de impedancia acústica, que puede ser la de un líquido o la de un buen cemento.

Como consecuencia, la atenuación flexural por sí sola no puede diferenciar entre un líquido y un sólido, y debe ser combinada con otra medición, tal como la impedancia acústica obtenida del método de resonancia del casing.

La figura 2.22 muestra la relación explicada anteriormente. La zona de alta atenuación ocurre sólo en materiales sólidos de baja densidad, así se pueden “ver” los cementos ligeros a través de esta medición.

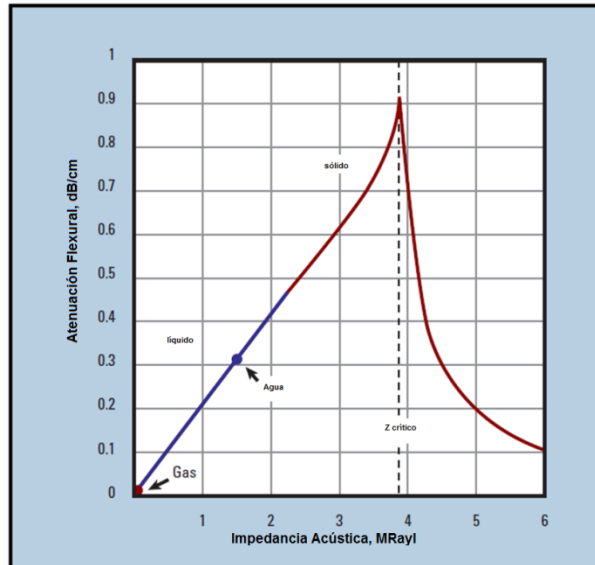


Figura 2.22  
Punto de evanescencia a 3.8 MRayl, que corresponde usualmente a cemento con densidad entre 13 y 14 lbm/gal. El comportamiento de Z y la atenuación flexural son independientes.

#### 2.3.4.4 Procesamiento

El primer objetivo del procesamiento de la información es proveer imágenes del material en contacto con la tubería de revestimiento.

Para la obtención de dichas imágenes, serán necesarias información de atenuación flexural y de impedancia acústica de la zona de interés. Como se dijo anteriormente estos datos de entrada son mediciones independientes ligadas a propiedades de los materiales presentes tanto dentro como fuera del pozo.

Así, los datos producidos a la salida del procesamiento son representados en forma de un mapa de estado Sólido-Líquido-Gas que muestra el estado del material detrás de la tubería de revestimiento, como se muestra en la figura 2.23.

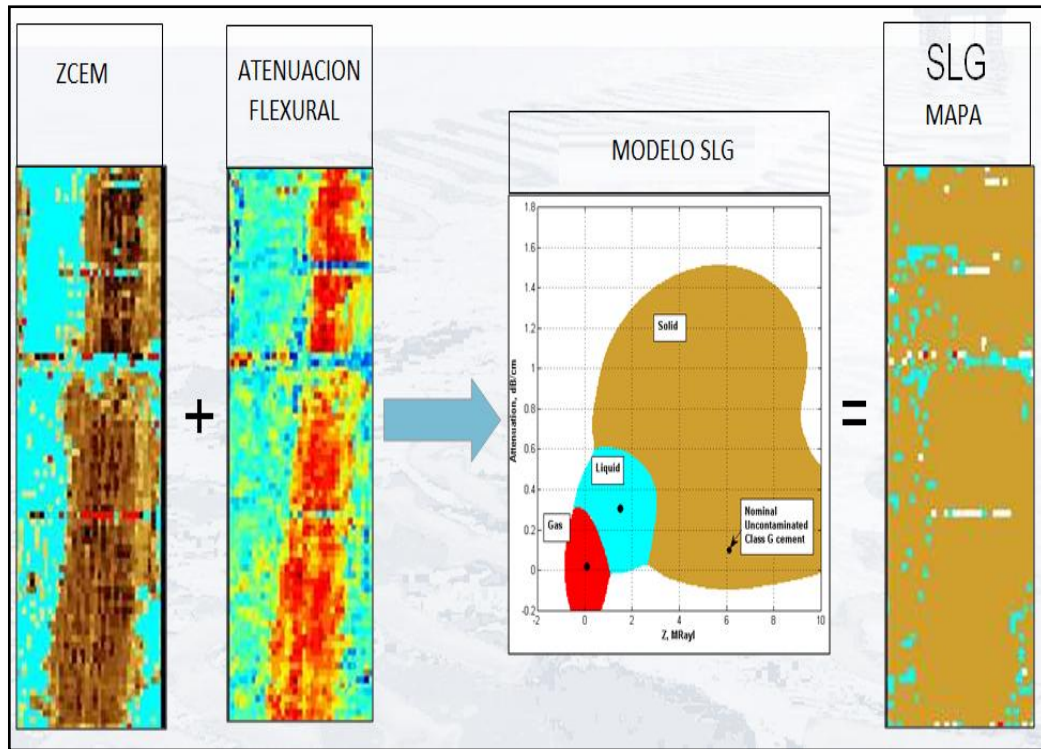


Figura 2.23

Imagen que representa los datos de entrada (impedancia acústica y atenuación flexural, izquierda) para la generación del mapa de estado del material detrás del revestimiento (derecha): sólido (marrón), líquido (azul), gas (rojo).

Por lo tanto a diferencia de los métodos tradicionales, que determinan la impedancia acústica estableciendo valores umbrales para discriminar entre los estados sólido, líquido y gas, el mapa originado a través de la adición de la atenuación flexural durante el procesamiento, nos permite diferenciar entre estos estados sin la necesidad de establecer ningún valor umbral.

Por otra parte, los datos de entrada (impedancia acústica y atenuación flexural) se combinan para eliminar el efecto del fluido interno y remover cualquier dependencia en el diagnóstico, eliminando la necesidad de cualquier “pasada” de registro separada o cálculo adicional.

### 2.3.4.5 Ecos de Tercera Interface, *Third Interface Echoes (TIE)*

Además de evaluar el material detrás de la tubería de revestimiento, un segundo objetivo del procesamiento es extraer información relevante de las reflexiones desde una tercera interfaz y caracterizar en forma más exhaustiva el espacio anular existente entre la tubería de revestimiento y la formación.

La información entregada por la atención flexural está relacionada con el estado del material en contacto con la tubería de revestimiento, y no evalúa más allá de esta zona dentro del cemento. Sin embargo, el pulso enviado por el paquete de onda flexural hacia el anular puede ser reflejado por una tercera interface. La tubería de revestimiento es comúnmente “transparente” a este pulso reflejado, y puede ser detectado por los receptores con la suficiente intensidad de señal (ver figura 2.24).

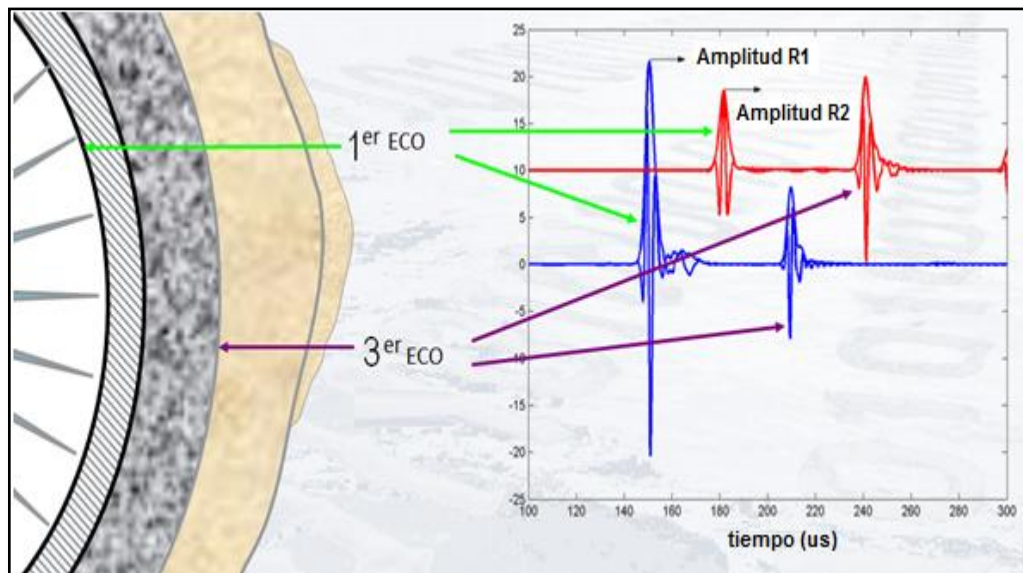


Figura 2.24  
Eco de Tercera Interface (TIE)

Como el eco de tercera interface (TIE) se propaga a través del anular, contiene información acerca de la geometría y de los materiales presentes en esta zona,



además de la geometría de la pared de las formaciones y los contrastes acústicos con los materiales del anular.

El principio de medición se explica a continuación. Primero se detectan los ecos de provenientes desde una tercera interface, y se mide su tiempo de arribo y amplitud. A partir de las diferencias de tiempo existentes entre los ecos de la tercera interface y los arribos de tubería de revestimiento, la determinación del grado de centralización de la tubería de revestimiento dentro del pozo es directa y se presenta como porcentaje, en donde el 100% representa un centrado perfecto y 0% indica que la tubería de revestimiento está en contacto con la pared del pozo.

Finalmente puede generarse un registro de densidad variable de las formas de onda flexurales obtenidas, que se representa en forma polar. Estas imágenes proveen una representación de la geometría de la tubería de revestimiento dentro del pozo y de la adherencia entre el cemento y la formación.

La figura 2.25 muestra un registro típico de densidad variable obtenido a partir de los ecos de tercera interface.

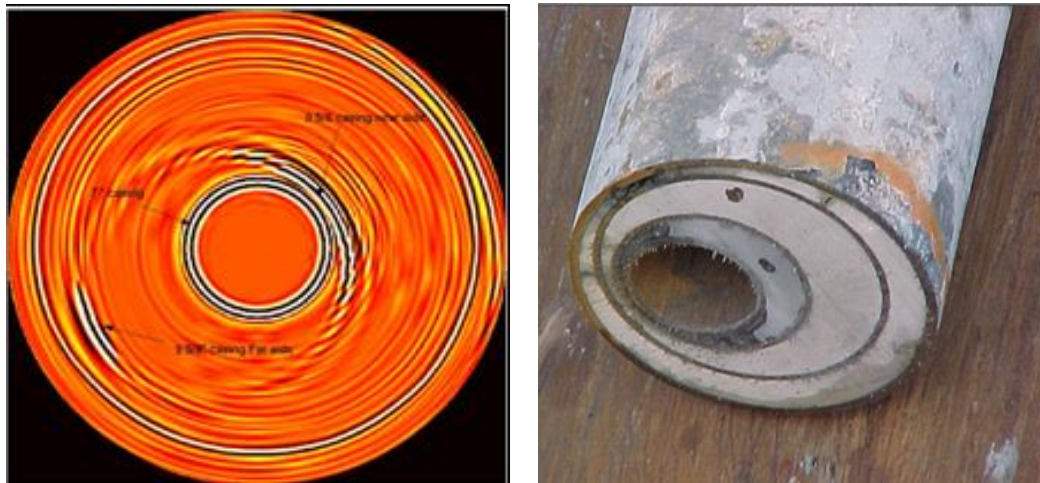


Figura 2.25

Imagen que demuestra uno de los principales beneficios de la interpretación de los ecos de tercera interface (TIE). El lado izquierdo muestra un VDL polar y el lado derecho la sección sobre la cual se hizo la prueba.



## **CAPITULO III.- METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION**

### **3.1 TIPO DE INVESTIGACION**

El tipo de investigación que se usará es el explicativo. Esto debido a que se enfoca el problema analizando el porqué de su ocurrencia y de cuáles son sus variables y características. El objetivo es conocer las relaciones causa-efecto que se dan entre los hechos para conocerlos a mayor profundidad y plantear la solución más eficiente.

De esta manera, se busca el porqué la industria ha requerido del uso de esta nueva clase de cementos ligeros, analizando cuáles son sus características y sus efectos durante la evaluación de la cementación en tuberías de revestimiento. Finalmente se plantea una solución eficaz, que reduce la incertidumbre asociada a la determinación del estado de los materiales ubicados detrás de la pared de la tubería de revestimiento.

### **3.2 POBLACION Y MUESTRA**

Los tipos de pozos que abarcan el análisis son aquellos han sido completados con cementos ligeros y/o ultraligeros, además de aquellos en los cuales se han usado cementos convencionales pero que debido a contaminación durante su desplazamiento han perdido sus propiedades mecánicas iniciales.

### **3.3 INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS**

La técnica utilizada para la recolección de datos es el análisis de contenidos, el cual tiene como objetivo el comparar y estudiar en profundidad diversos materiales y obtener la información necesaria para la investigación.

Los instrumentos utilizados en esta técnica son:

Investigación y recolección de información de libros, presentaciones, publicaciones de entidades públicas y privadas, manuales, revistas científicas, boletines informativos, bibliotecas públicas y/o privadas, redes informáticas, estándares internacionales, y otros.

### **3.4 ANALISIS E INTERPRETACION DE LA INFORMACION**

Mediante el procesamiento adecuado de la información (análisis e interpretación) obtenida a partir señales generadas por las ondas flexurales ultrasónicas, se reducirá significativamente la incertidumbre generada durante la evaluación de cementos de baja impedancia acústica (ligeros y/o contaminados), permitiendo determinar sin ambigüedades el estado del material ubicado detrás de la tubería de revestimiento como sólido, líquido o gas (SLG).

## **CAPITULO IV.- DESARROLLO DEL MODELO**

### **4.1 ALCANCE**

La evaluación de la cementación es un paso crítico en la construcción de un pozo, y de ella dependerán las decisiones a tomar para la planificación de trabajos futuros que van desde las siguientes fases a perforar hasta la puesta en producción.

Los problemas asociados a una mala interpretación generan grandes pérdidas a la industria petrolera. El factor económico impone la necesidad de disminuir la incertidumbre al analizar los registros, y así disminuir los costos asociados a reparos innecesarios, producción diferida y prolongar los tiempos entre los trabajos de rehabilitación.

El potencial del presente proyecto se basa justamente en la obtención de una evaluación sin precedentes de los trabajos de cementación, y finalmente a través de esta disminuir los costos asociados a la realización de trabajos innecesarios y fallas de aislamiento zonal.

### **4.2 ANTECEDENTES**

Para demostrar los beneficios de las técnicas de medición disponibles mostradas en los capítulos anteriores, se muestra la siguiente aplicación.

En el año 2003, el ensamble que combina las mediciones de impedancia acústica y la atenuación flexural fue probado en un pozo vertical de In Salah Gas, Argelia. La tubería de 9 5/8 pulgadas se cementó en un agujero de 12 1/4 pulgadas usando una lechada de baja densidad (baja impedancia acústica) de  $1.08 \text{ g/cm}^3$  (9 lbm/gal). La densidad del lodo en el pozo fue de  $1.3 \text{ g/cm}^3$  (10.8 lbm/gal).

El registro obtenido se muestra a continuación en la figura 4.1:

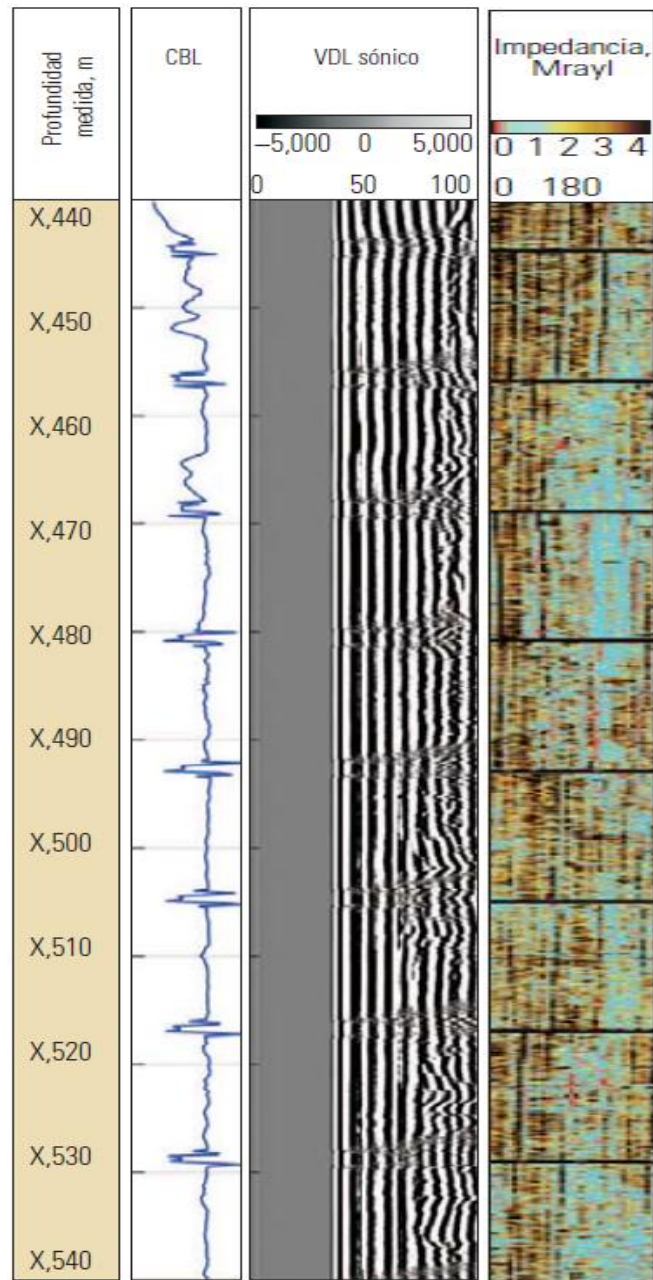


Figura 4.1  
Registro obtenido en el pozo In Salah Gas, Argelia. Se muestran el CBL-VDL y el mapa de impedancia acústica.

### **4.3 ANALISIS**

El registro CBL (carril 2) y el registro VDL (carril 3) muestran una respuesta de tubería casi libre con arribos intensos de la tubería de revestimiento en el registro VDL.

El mapa de impedancia acústica (carril 4) muestra fluido con manchas de sólido. Es claro que esta lectura es afectada por el cemento de baja impedancia utilizado. Finalmente bajo estas circunstancias la localización de un canal resulta casi imposible.

Por otro lado si se contrastan estos resultados con la información brindada por el mapa de atenuación de las ondas flexurales (carril 5), se provee un diagnóstico correcto de la presencia del sólido detrás de la tubería de revestimiento. Además se revela la presencia de un canal lleno de fluido entre X,465 y X,485. El mapa sólido-líquido-gas (SLG) (carril 6) sustenta claramente y simplifica esta información. Ver figura 4.2.

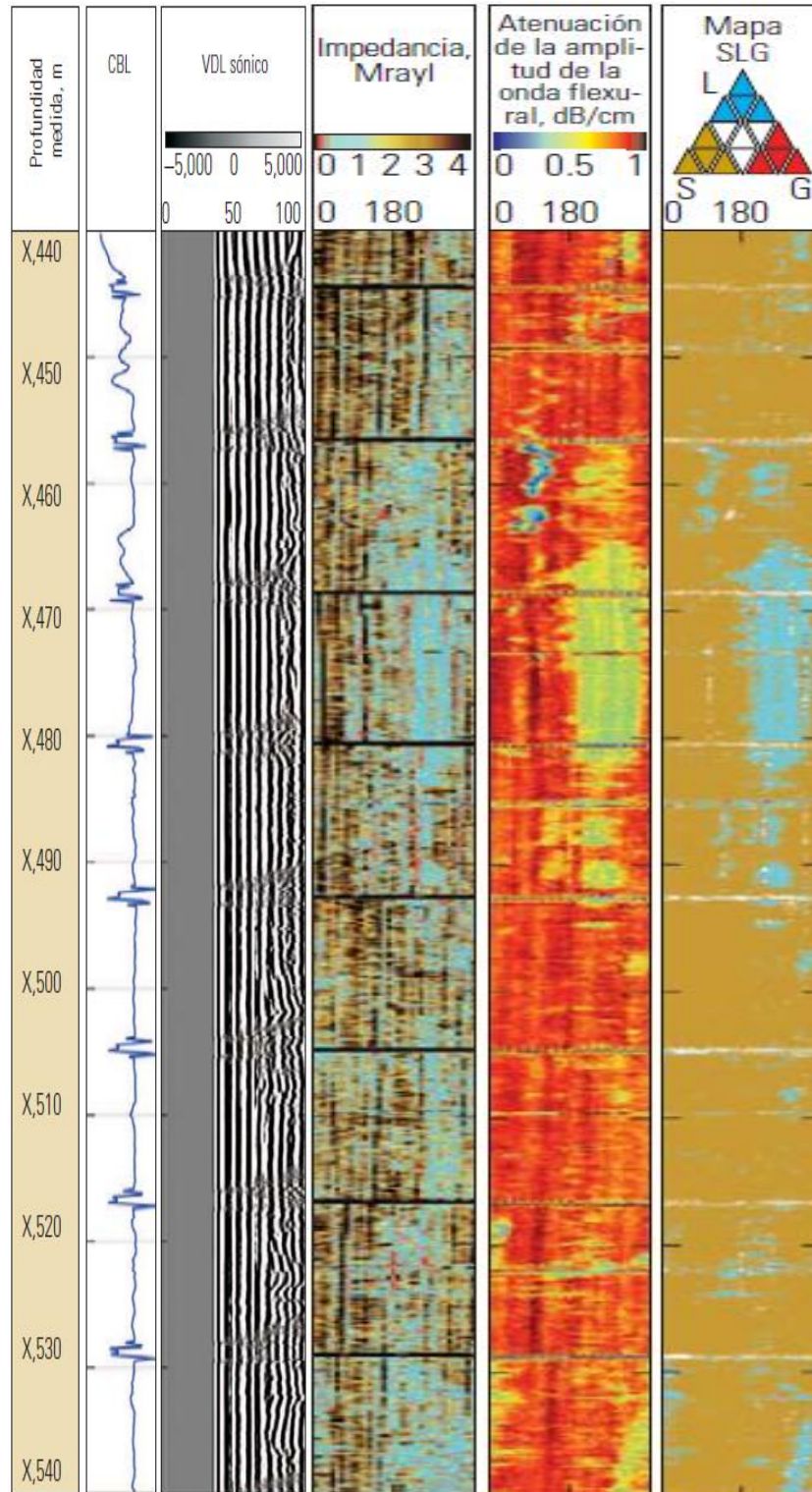


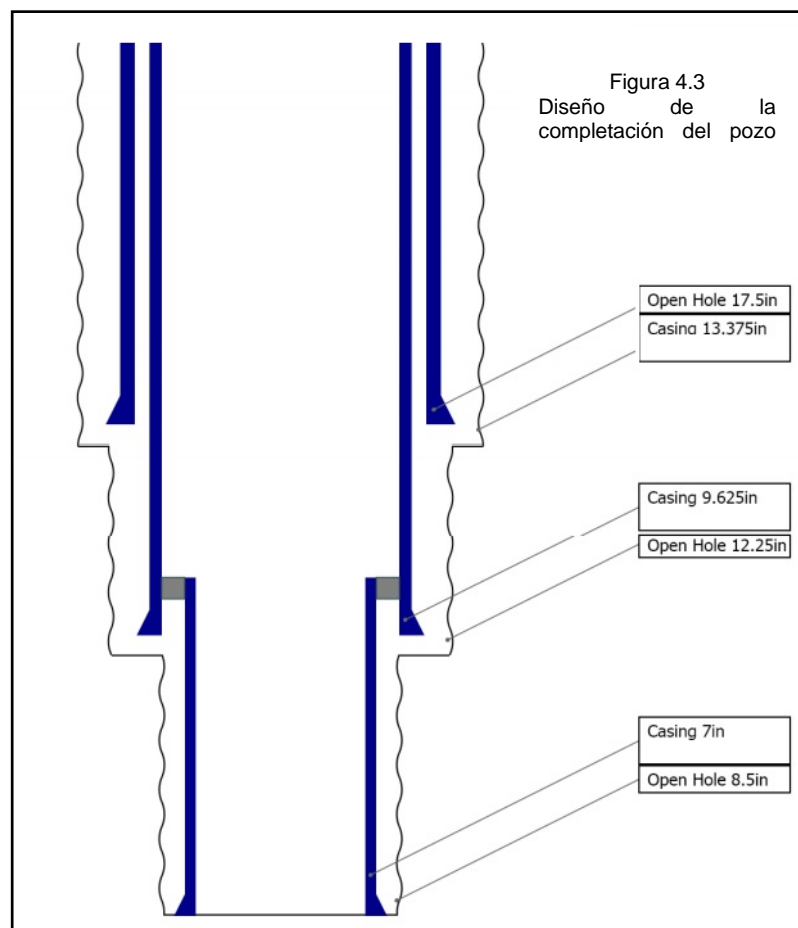
Figura 4.2  
Evaluación mejorada y determinación del material localizado detrás de la tubería de revestimiento mediante la generación del mapa SLG.

#### 4.4 EVALUACION ECONOMICA

Para demostrar la viabilidad económica de la aplicación del proyecto se modelará un caso simple, en el cual, a consecuencia de una evaluación incierta del trabajo de cementación, se decide realizar una operación de remediación secundaria, denominada cementación a presión o *Squeeze*.

Los precios utilizados para las comparaciones son valores aproximados promedio de acuerdo a los utilizados actualmente en el mercado peruano, específicamente para la zona de Selva central, en la cual, debido al difícil acceso, una mala decisión involucra la pérdida de varios miles y hasta millones de dólares para el operador del proyecto.

##### 4.4.1 CONDICIONES DEL MODELO



Se considerara un diagrama del pozo como el mostrado en la Figura 4.3, debido a que se ajusta bastante bien a los usados en la zona de Selva Central.

Esto es:

<b>Diámetro del Revestimiento (pulgadas)</b>	<b>Diámetro del agujero (pulgadas)</b>
<b>13 3/8</b>	<b>17 1/2</b>
<b>9 5/8</b>	<b>12 1/4</b>
<b>7</b>	<b>8 1/2</b>

CUADRO N° 4.1 ELABORACION PROPIA



En la zona de Selva Central, se tiene una columna estratigráfica de acuerdo a como se muestra la Figura 4.4.

Además la ubicación de los topes y espesores de formación dependen de la ubicación del pozo en particular. Para este modelo se considera una configuración como muestra el cuadro N° 4.2.

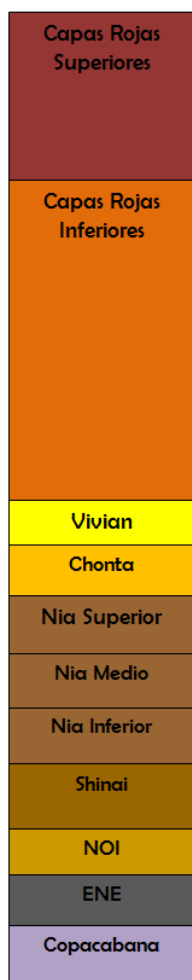


Figura 4.4

Formación	Tope (pies)	Base (pies)
<b>Capas Rojas superiores</b>	<b>0</b>	<b>3100</b>
<b>Capas Rojas inferiores</b>	<b>3100</b>	<b>7100</b>
<b>Vivian</b>	<b>7100</b>	<b>7350</b>
<b>Chonta</b>	<b>7350</b>	<b>7960</b>
<b>Nia superior</b>	<b>7960</b>	<b>8180</b>
<b>Nia medio</b>	<b>8180</b>	<b>8430</b>
<b>Nia inferior</b>	<b>8430</b>	<b>8900</b>
<b>Shinai</b>	<b>8900</b>	<b>9100</b>
<b>Noi</b>	<b>9100</b>	<b>9330</b>
<b>Ene</b>	<b>9330</b>	<b>9450</b>
<b>Copacabana</b>	<b>9450</b>	<b>9650</b>

CUADRO N° 4.2 ELABORACION PROPIA

De experiencias previas en la zona de Selva Central, se puede afirmar que las formaciones Vivian, Nia Superior y Nia Inferior ya han demostrado ser reservorios productivos. Por tanto, para este modelo estableceremos como el intervalo de interés al tramo comprendido entre 8000 y 9500 pies, que cubre las formaciones Nia (superior, medio e inferior), Shinai, Noi, Ene y Copacabana. Nuestro principal objetivo, bajo estas condiciones, es evaluar la calidad del trabajo de cementación en el *liner* de 7 pulgadas, como lo muestra la Figura 4.5.

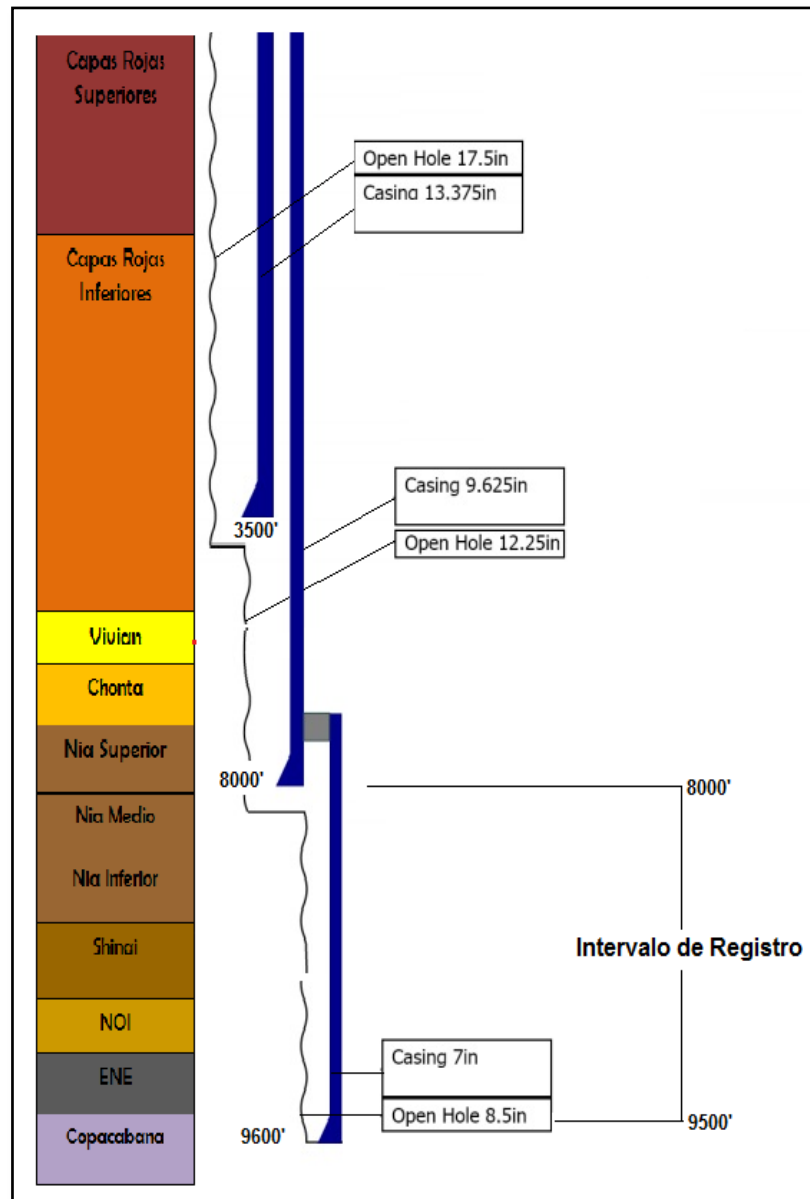


Figura 4.5

#### 4.4.1.1 COSTOS DE REGISTROS CBL-VDL Y DE IMÁGENES ULTRASONICAS

PERSONAL					Cantidades del servicio	
Nro.	Descripcion del servicio	Cantidad	Unidad medida	Precio en US\$	Cantidad	Total US\$
1	Ingeniero	1	DIA	1,158.05	1.00	1,158.05
2	Operador	1	DIA	432.04	1.00	432.04
3	Operador	1	DIA	432.04	1.00	432.04
4	Whincher	1	DIA	917.53	1.00	917.53
<b>Total</b>						<b>2,939.66</b>

CUADRO Nº 4.3

CBL_VDL - USI					Cantidades del servicio	
Nro.	Descripcion del servicio	Cantidad	Unidad medida	Precio en US\$	Cantidad	Total US\$
1	Cargo básico	1	UNI	2,800.00	1.00	2,800.00
2	USI Profundidad	1	PIE	3.28	9,500.00	31,160.00
3	USI Cemento Survey	1	PIE	4.26	1,500.00	6,390.00
4	USI Corrosion Survey	1	PIE	5.05	1,500.00	7,575.00
5	Equipo de control de presión	1	UNI	4,500.00	1.00	4,500.00
6	CBL-VDL Profundidad	1	PIE	1.03	9,500.00	9,785.00
7	CBL-VDL Survey	1	PIE	1.26	1,500.00	1,890.00
<b>Total</b>						<b>64,100.00</b>

CUADRO Nº 4.4

#### 4.4.1.2 COSTOS DE LA OPERACIÓN DE SQUEEZE

Servicios de Bombeo					Cantidades del servicio	
Nro.	Descripcion del servicio	Cantidad	Unidad medida	Precio en US\$	Cantidad	Total US\$
1	Cargo básico Tapón/Squeeze	1	UNI	17,000.00	1	17,000.00
<b>Total</b>						<b>17,000.00</b>

CUADRO Nº 4.5

Personal					Cantidades del servicio	
Nro.	Descripcion del servicio	Cantidad	Unidad medida	Precio en US\$	Cantidad	Total US\$
1	Cargo por Transporte	1	UNI	1,125.00	2	2,250.00
2	Cargo por cuadrilla de cementacion	1	UNI	1,500.00	2	3,000.00
<b>Total</b>						<b>5,250.00</b>

CUADRO Nº 4.6

Aditivos					Cantidades del servicio	
Nro.	Descripcion del servicio	Cantidad	Unidad medida	Precio en US\$	Cantidad	Total US\$
1	Retardador, Antiespumante, Agua libre, otros.	1	UNI	1,500.00	1	1,500.00
<b>Total</b>						<b>1,500.00</b>

CUADRO Nº 4.7

Equipo WO					Cantidades del servicio	
Nro.	Descripcion del servicio	Cantidad	Unidad medida	Precio en US\$	Cantidad	Total US\$
1	Rig	1	UNI	12,000.00	6	72,000.00
<b>Total</b>						<b>72,000.00</b>

CUADRO Nº 4.8

Supervisor					Cantidades del servicio	
Nro.	Descripcion del servicio	Cantidad	Unidad medida	Precio en US\$	Cantidad	Total US\$
1	Supervisor Company	1	UNI	450.00	6	2,700.00
<b>Total</b>						<b>2,700.00</b>

CUADRO Nº 4.9

Otros					Cantidades del servicio	
Nro.	Descripcion del servicio	Cantidad	Unidad medida	Precio en US\$	Cantidad	Total US\$
1	Catering y Otros	1	UNI	1,000.00	6	6,000.00
<b>Total</b>						<b>6,000.00</b>

CUADRO Nº 4.10

#### 4.4.1.3 COSTOS EMPLEANDO ONDAS FLEXURALES ULTRASONICAS

NUEVA TECNOLOGIA					Cantidades del servicio	
Nro.	Descripcion del servicio	Cantidad	Unidad medida	Precio en US\$	Cantidad	Total US\$
1	Cargo básico	1	UNI	2,800.00	1.00	2,800.00
2	Cargo por Porfundidad	1	PIE	4.57	9,500.00	43,415.00
3	Cemento Survey	1	PIE	5.89	1,500.00	8,835.00
4	Corrosion Survey	1	PIE	6.75	1,500.00	10,125.00
5	Equipo de control de Presión	1	UNI	4,500.00	1.00	4,500.00
6	CBL-VDL Profundidad	1	PIE	1.03	9,500.00	9,785.00
7	CBL-VDL Survey	1	PIE	1.26	1,500.00	1,890.00
<b>Total</b>						<b>81,350.00</b>

CUADRO Nº 4.11

## 4.4.2 CONSIDERACIONES DEL MODELO

Para la aplicación del modelo consideraremos las siguientes condiciones:

Locación	:	Selva Central Peruana.
Intervalo de registro	:	8000 – 9500 pies
Sección	:	7 pulgadas
Cemento	:	9 lbm/gal (1.08 g/cm <sup>3</sup> )
Lodo en pozo	:	Base agua de 10.8 lbm/gal (1.3 g/cm <sup>3</sup> )
Objetivo	:	Evaluar cementación del liner de 7”.

Además, para simplificar el modelo, solo se considerarán en el análisis económico los costos operacionales, sin tomar en cuenta las pérdidas de producción asociadas al retraso de las operaciones de producción obtenidas a consecuencia de la toma de decisiones equivocadas y operaciones innecesarias.

Ver figura 4.5.

### 4.4.2.1 Costos

Como se observa, bajo estas condiciones se esperaría una respuesta en los registros de imágenes ultrasónicas (USI) y CBL-VDL similar a la mostrada en la aplicación de Argelia (ver figura 4.1).

Los costos asociados a la toma de estos registros se detallan en los Cuadros 4.3 y 4.4. Estos costos se resumen el Cuadro N° 4.12.

ITEM	COSTO US\$
Personal	2,939.66
CBL_VDL_USI	64,100.00
<b>Total</b>	<b>67,039.66</b>

CUADRO N° 4.12  
COSTOS ASOCIADOS A REGISTROS  
ELECTRICOS (USI, CBL-VDL). TIEMPO DE  
OPERACIÓN APROXIMADO: 1 DIA.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se decidirá realizar un trabajo de remediación, denominado *Squeeze*.

Para esto se considera un tiempo promedio de operación de 6 días, según lo muestra el Cuadro N° 4.13.

Labor	Horas	Dias	Dias Acumulados
Rig up de la unidad	4	0.17	0.17
Correr anillo de Calibración	8	0.33	0.50
Sentar Tapón	8	0.33	0.83
RIH Tuberia de perforar + Packer	15	0.63	1.46
Squeeze	10	0.42	1.88
Esperar cemento con presión	6	0.25	2.13
POOH Tuberia de perforar	15	0.63	2.75
Esperar frague	24	1.00	3.75
RIH Junk mill	12	0.50	4.25
Perforar cemento	10	0.42	4.67
POOH Junk mill	15	0.63	5.29
Circulación & Limpieza	7	0.29	5.58
Otros	10	0.42	6.00

CUADRO N° 4.13  
TIEMPOS ESTIMADOS PARA OPERACION DE SQUEEZE EN LA  
SELVA PERUANA



Los costos asociados a esta operación se detallan en los Cuadros 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10. Estos costos se resumen en el Cuadro N° 4.14, mostrado a continuación:

ITEM	COSTO US\$
<b>Servicios de Bombeo</b>	<b>17,000.00</b>
<b>Personal</b>	<b>5,250.00</b>
<b>Aditivos</b>	<b>1,500.00</b>
<b>Equipo de WO</b>	<b>72,000.00</b>
<b>Supervisor</b>	<b>2,700.00</b>
<b>Otros</b>	<b>6,000.00</b>
<b>Total</b>	<b>104,450.00</b>

CUADRO N° 4.14  
COSTOS ASOCIADOS A UNA  
OPERACIÓN DE SQUEEZE (TIEMPO  
DE OPERACIÓN APROXIMADO: 6  
DÍAS)

La probabilidad de éxito de esta operación de remediación es nula, debido a que el cemento en realidad se encuentra en buenas condiciones. La situación más probable es que el cemento no sea admitido a lo largo de todo el intervalo, sin embargo, la decisión ya se tomó, y los costos deben ser asumidos.

El costo total, de toda la operación hasta este punto se muestra en el Cuadro N° 4.15.

ITEM	COSTO US\$
<b>Registros USI-CBL-VDL</b>	<b>67,039.66</b>
<b>Squeeze</b>	<b>104,450.00</b>
<b>Total</b>	<b>171,489.66</b>

CUADRO N° 4.15  
COSTOS ASOCIADOS A LA  
TOMA DE REGISTROS Y  
SQUEEZE.

Según este cuadro, se observa que ya hemos invertido **US\$ 171. 489.66** en operaciones que no nos han presentado ningún beneficio.

#### **4.4.3 Comparación con las mediciones obtenidas empleando ondas Flexurales Ultrasónicas**

Bajo las condiciones del modelo, las ondas flexurales presentan una gran ventaja durante la evaluación, y entregan respuestas certeras sobre la calidad del trabajo de cementación, ver figura 4.2.

Por otra parte, si comparamos los costos del empleo de las herramientas de evaluación de ondas flexurales ultrasónicas desde el inicio del proyecto contra los costos asumidos si se decide evaluar el trabajo de cementación mediante las técnicas convencionales, la importancia de una correcta decisión, aun en este modelo sencillo, muestra una gran ventaja económica.

El Cuadro 4.11 muestra a detalle un estimado de los costos asociados al empleo de ondas flexurales ultrasónicas durante la evaluación de los trabajos de cementación. Estos costos se resumen en el Cuadro N° 4.16 mostrado a continuación.

<b>ITEM</b>	<b>COSTO US\$</b>
<b>Personal</b>	<b>2,939.66</b>
<b>Ondas Flex.</b>	<b>81,350.00</b>
<b>Total</b>	<b>84,289.66</b>

CUADRO N° 4.16  
COSTOS ASOCIADOS A LA TOMA DE REGISTROS EMPLEANDO HERRAMIENTAS DE EVALUACION DE ONDAS FLEXURALES ULTRASONICAS. TIEMPO DE OPERACIÓN APROXIMADO 1 DIA.

Para este modelo, el empleo de las ondas flexurales desde el inicio de la operación representa un ahorro de **US\$ 87,200.00**, según lo muestra el Cuadro N° 4.17.

<b>CASO</b>	<b>LABOR</b>	<b>COSTO US\$</b>
<b>1</b>	<b>USI-CBL-VDL + Squeeze</b>	<b>171,489.66</b>
<b>2</b>	<b>Ondas Flexurales</b>	<b>84,289.66</b>
<b>TOTAL AHORRADO</b>		<b>87,200.00</b>

CUADRO N° 4.17

Finalmente, en el Cuadro N° 4.18 se presenta una comparación entre el costo asociado a una operación de registro CBL-VDL-USI frente al costo asociado a la evaluación del cemento mediante Ondas Flexurales.

<b>CASO</b>	<b>LABOR</b>	<b>COSTO US\$</b>
<b>1</b>	<b>USI-CBL-VDL</b>	<b>67,039.66</b>
<b>2</b>	<b>Ondas Flexurales</b>	<b>84,289.66</b>
<b>TOTAL ADICIONAL</b>		<b>-17,250.00</b>

CUADRO N° 4.18

EL SIGNO NEGATIVO INDICA QUE EXISTE UN COSTO ADICIONAL DE LA EVALUACION MEDIANTE ONDAS FLEXURALES SOBRE LOS COSTOS ASOCIADOS A LAS TECNICAS DE EVALUACION USI-CBL-VDL

## CAPITULO V.- ANALISIS DE RESULTADOS

- El caso presentado de Argelia, muestra claramente las ventajas de la aplicación de las nuevas técnicas de evaluación de la calidad del cemento, ya que permite determinar sin ambigüedades el estado del material detrás de la tubería de revestimiento. Se pudo observar además la eficiencia de estas nuevas mediciones en un caso real que demuestra y deja clara la validez de estas mediciones.
- Además, como lo demuestra el caso modelo, utilizando los precios actuales del mercado peruano, la evaluación de los trabajos de cementación empleando las ondas flexurales resulta una alternativa económicamente viable. Si bien es cierto que acorde a nuestro análisis, los costos del empleo de ondas flexurales en el análisis exceden en US\$ **17,250.00** a los costos de la evaluación mediante USI-CBL-VDL, la subsecuente mitigación de la incertidumbre de la evaluación del trabajo de cementación y la reducción significativa de la toma de decisiones equivocadas, promueven la aplicación de esta nueva forma de evaluación.
- Quedó claramente demostrado, que la toma de una decisión equivocada a consecuencia de una interpretación errónea, involucra la pérdida de varios miles y hasta millones de dólares. En este caso, se modeló un caso en el cual las pérdidas de dinero alcanzan los US\$ **171,489.66**.
- Este modelo no consideró, por simplicidad, la pérdida de días de producción asociados a los días tomados para “reparar el pozo”. Teniendo esto en cuenta, la suma de dinero perdido sería aun mayor. Además se pone en un riesgo innecesario a nuestra operación, ya que

siempre existe un riesgo asociado al desarrollo de los trabajos de remediación.

- Si se analiza el modelo por el lado de la Autorización de Gastos, *Athorization for Expenditure* (AFE) de los proyectos, esta técnica sigue siendo muy tentadora de usar, debido a que los US\$ **17,250.00** adicionales originados por el uso de las ondas flexurales durante la evaluación, no representan una suma significativa para el AFE de un proyecto en el cual el desarrollo total alcanza varios millones de dólares.

## **CAPITULO VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- La interpretación de registros de cementación, no se basa sólo en leer la información directamente del registro, ya que también es necesaria información de la operación de perforación, cementación, completación y en algunos casos del historial de producción del pozo, con la finalidad de realizar una buena interpretación de la condición del cemento.
- Se remueve la necesidad de realizar la medición de las propiedades del fluido del pozo (FPM), debido a que con las mediciones combinadas de impedancia acústica y atenuación flexural se elimina el efecto del fluido interno, obviando de este modo la necesidad de contar con un equipo específico para la medición de propiedades del fluido requerido por las herramientas USI.
- Se obtienen imágenes de la centralización de la tubería de revestimiento en el agujero.
- Registros en ambientes de lodos pesados.
- Capacidad de generación de imágenes en profundidad, sobre formaciones o secciones de doble tubería.
- Información disponible en tiempo real.
- Imágenes de la geometría anular en 3D.
- Espesor azimutal de cemento.
- Optimización del baleo direccionado.

- Se consigue probar el principal objetivo del proyecto y se comprueba una evaluación de cemento mejorada en ambientes con cementos de bajo peso y/o contaminados.
- Se muestra claramente que la principal razón por la cual fallan las herramientas de imágenes ultrasónicas es su gran dependencia en el establecimiento adecuado de los valores umbrales que permitan distinguir el estado de los materiales ubicados detrás del revestimiento a partir de sus valores de impedancia acústica.
- Se propone la evaluación del cemento empleando ondas flexurales no sólo en ambientes con cementos de bajo peso, sino también en ambientes cementados con sistemas convencionales, debido a la alta confiabilidad y precisión que muestra la información obtenida empleando esta técnica de evaluación.

Además, la probabilidad de que los sistemas de cemento convencionales se contaminen durante el desplazamiento de las lechadas es bastante alta, esto ocasionará la reducción de la impedancia acústica de la misma, originando finalmente un ambiente propicio para la aplicación de esta tecnología.

- Es una alternativa económicamente viable (como se demostró en el modelo), y de hecho, su eficacia ya ha sido comprobada por operadores del mercado peruano, demostrando una gran ventaja sobre las demás técnicas de evaluación del cemento

## CAPITULO VII.- BIBLIOGRAFIA

- Schlumberger (2006). Well cementing, 2da Ed., Sugar Land, Texas, USA.
- A pioneering ultrasonic technique that enhances light weight cement evaluation and allows cement sheath thickness imaging  
1st annual Middle East regional SPWLA symposium, April 15-19, 2007
- SPE-120061-PP  
Increased certainty in the determination of zonal isolation through the integration of annulus geometry imaging and improved solid-fluid discrimination  
A.S. Al-Suwaidi, Faisal M Al-Marri, Emad Sultan, Moh'd El-Sayed Ibrahim & Kamal Jammeli (ADMA-OPCO) Zaid Al-Kindi & Antoine Elkadi (Schlumberger)
- ULTRASONIC LEAKY-LAMB WAVE IMAGING THROUGH A HIGHLY CONTRASTING LAYER  
Smaine Zeroug and Bonoit Froelich, Schlumberger-Doll Research, Old Quarry Road, Ridgefield, CT 06877, USA.  
Schlumberger-Riboud Product Center, Clamart, Paris, France
- R.M Havira, "Ultrasonic techniques in oil well logging", in *Proc. IEEE Ultrasonic Symposium*, 563-571 (Nov. 1986)