

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y  
PETRÓLEOS**

**ANÁLISIS TÉCNICO E INTERPRETACIÓN DE REGISTROS DE  
CEMENTACIÓN EN POZOS DEL ORIENTE ECUATORIANO  
CEMENTADOS CON SISTEMAS ELÁSTICOS**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
PETRÓLEOS  
OPCIÓN: ESTUDIOS DE CASOS**

**SANTIAGO ANDRÉS SISALEMA IBARRA  
san\_andres691@hotmail.com**

**Director: MSc. Raúl Valencia T.  
raul.valencia@epn.edu.ec**

**Quito, Marzo 2017**

## DECLARACIÓN

Yo, Santiago Andrés Sisalema Ibarra, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este proyecto, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

**SANTIAGO SISALEMA IBARRA**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Santiago Andrés Sisalema Ibarra, bajo mi supervisión.

---

**MSc. RAÚL VALENCIA**

**DIRECTOR**

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su infinito apoyo durante todos estos años de estudio, de manera especial a mi madre, quien con su paciencia y amor me ha inculcado los mejores valores

A Halliburton, de manera especial a los Ingenieros Aníbal Flores, Marco Cayo y Jeimmy Fuerte de las líneas Cementing y Wireline & Perforating por la paciencia y apoyo en la realización de este trabajo, y un agradecimiento personal al equipo de Sperry por la oportunidad brindada.

A la Escuela Politécnica Nacional como mentora y a los docentes de Ingeniería en Petróleos por los conocimientos compartidos.

A mi amor Anabel quien siempre estuvo a mi lado en los desvelos, en los trabajos interminables, en el corre corre que la vida Universitaria conlleva. La distancia que nos separó todos estos años no fue un inconveniente para sentir todo su apoyo y amor que día a día necesite para seguir adelante.

A mis compañeros que hicieron que estos años de universidad fueran más llevaderos.



## DEDICATORIA

Dedicada con todo mi amor a mis padres, quienes con esfuerzo y dedicación han logrado forjar en mí una persona de bien.

## CONTENIDO

CONTENIDO.....	VI
CAPÍTULO 1 .....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 GENERALIDADES EN LA EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN.....	1
1.2 CEMENTACIÓN.....	1
1.2.1 MONITOREO DE LA CEMENTACIÓN.....	2
1.3 DESCRIPCIÓN DE LA LECHADA CONVENCIONAL.....	4
1.3.1 ADITIVOS DEL CEMENTO .....	4
1.3.2 PROBLEMAS COMUNES PRESENTADOS EN LAS LECHADAS CONVENCIONALES .....	4
1.4 DESCRIPCIÓN DE LA LECHADA ELÁSTICA.....	5
1.4.1 NUEVOS DESAFÍOS .....	5
1.4.2 APLICACIONES .....	5
1.4.3 DESVENTAJAS.....	6
1.5 BUENAS PRÁCTICAS EN LA CEMENTACIÓN DE POZOS .....	6
1.5.1 ACONDICIONAMIENTO DEL LODO .....	7
1.5.2 USO DE LAVADORES Y ESPACIADORES .....	7
1.5.3 CENTRALIZACIÓN DE LA TUBERÍA.....	8
1.5.4 MOVIMIENTO DE LA TUBERÍA.....	9
1.5.5 CAUDALES DE FLUJO.....	9
1.6 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CEMENTO .....	10
1.6.1 DEFINICIONES BÁSICAS.....	10
1.6.1.1 Esfuerzo .....	10
1.6.1.2 Deformación Unitaria.....	11
1.6.2 PROPIEDADES ELÁSTICAS Y DE ESFUERZOS .....	12
1.6.2.1 Módulo de Young .....	12
1.6.2.2 Relación de Poisson.....	14
1.6.2.3 Criterio de Mohr-Coulomb .....	14
1.7 PRUEBAS DE LABORATORIO APLICADOS A LECHADAS CONVENCIONALES Y LECHADAS ELASTOMÉRICAS.....	15
1.7.1 REOLOGÍA.....	15
1.7.2 TIEMPO DE BOMBEO .....	16
1.7.3 PÉRDIDA DE FLUIDO.....	16

1.7.4	AGUA LIBRE .....	17
1.7.5	FUERZA COMPRESIVA .....	17
1.7.6	PRUEBA DE RESISTENCIA DE GEL ESTÁTICO (SGS) .....	18
1.8	MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN .....	18
1.8.1	PRINCIPIOS BÁSICOS DE ONDAS .....	18
1.8.2	TIPOS DE ONDAS .....	19
1.8.2.1	Ondas P .....	19
1.8.2.2	Ondas S .....	20
1.8.2.3	Ondas Stoneley .....	20
1.8.3	AMPLITUD .....	21
1.8.4	TIEMPO DE TRÁNSITO .....	22
1.8.5	PROPAGACIÓN DE ONDAS Y REFRACCIÓN .....	22
1.8.5.1	Propiedades acústicas en formaciones .....	23
1.8.5.2	Propiedades acústicas de los cementos .....	24
1.8.5.3	Propiedades acústicas de los fluidos .....	25
1.8.6	EVALUACIÓN ACÚSTICA DEL CEMENTO .....	27
1.8.6.1	Registro de adherencia del cemento (CBL).....	27
1.8.6.2	Principio físico del CBL.....	28
1.8.6.3	Amplitud .....	29
1.8.6.4	Tiempo de tránsito.....	30
1.8.7	REGISTRO DE DENSIDAD VARIABLE (VDL).....	32
1.8.7.1	Microanillos .....	33
1.8.7.2	Canalización.....	34
1.8.7.3	Tipo de cemento y resistencia a la compresión.....	34
1.8.7.4	Excentricidad de la herramienta .....	34
1.8.7.5	Anillo de cemento inferior a $\frac{3}{4}$ de pulgada .....	35
1.8.7.6	Burbujas de gas en el fluido de completación .....	36
1.8.8	EVALUACIÓN ULTRASÓNICA DE CEMENTO. ....	36
1.8.8.1	Herramienta Ultrasónica.....	36
1.8.8.2	Principio físico de la herramienta ultrasónica .....	37
1.8.8.3	Impedancia acústica.....	38
1.8.8.4	Mapa de impedancia .....	39
1.8.8.5	Limitantes en los registros ultrasónicos.....	39
CAPÍTULO 2 .....		41

2	MANUAL PARA LA INTERPRETACIÓN DE REGISTROS DE CEMENTACIÓN PARA POZOS CEMENTADOS CON SISTEMAS ELÁSTICOS	41
2.1	CEMENTOS ELÁSTICOS Y REGISTROS DE ADHERENCIA	41
2.1.1	CBL	41
2.1.2	ULTRASÓNICOS	42
2.1.3	ANÁLISIS DE DERIVADA	44
2.2	PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN	44
2.2.1	PROCEDIMIENTOS GENERALES DE CORRIDA DE CASING Y CEMENTACIÓN	44
2.2.2	CALIBRACIÓN DE HERRAMIENTAS	44
2.2.2.1	CBL	44
2.2.2.2	Ultrasónica	45
2.2.3	REGISTRO DE TUBERÍA LIBRE	45
2.2.4	CENTRALIZACIÓN	45
2.2.5	REGISTRO CON PRESIÓN	45
2.2.6	PROBLEMAS ESPECÍFICOS DE LAS HERRAMIENTAS	46
2.2.6.1	CBL	46
2.2.6.2	Ultrasónica	46
2.3	INTERPRETACIÓN	48
2.3.1	CANALES	48
2.3.2	MICROANILLOS	49
2.3.2.1	Formaciones rápidas	50
2.3.2.2	Fuerza de compresión del cemento e índice de adherencia	51
2.4	PISTAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE REGISTROS DE CEMENTACIÓN	52
	CAPÍTULO 3	56
3	ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS REGISTROS DE CEMENTACIÓN	56
3.1	ANÁLISIS DEL POZO A1	56
3.1.1	EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN POZO A1	56
3.1.1.1	Basal Tena	57
3.2	ANÁLISIS DEL POZO A2	58
3.2.1	EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN POZO A2	61
3.2.1.1	Arena Basal Tena	61
3.2.1.2	Arena Hollín	63
3.3	ANÁLISIS DEL POZO A3	65

3.3.1	EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN POZO A3 .....	66
3.3.1.1	Arena T.....	66
3.4	ANÁLISIS DEL POZO A4.....	69
3.4.1	EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN.....	70
3.4.1.1	Arena U .....	70
CAPÍTULO 4 .....		74
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
4.1	CONCLUSIONES.....	74
4.2	RECOMENDACIONES .....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		77
GLOSARIO.....		79
ANEXOS .....		82

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1.1</b> CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE FORMACIONES Y FLUIDOS COMUNES PARA SÓLIDOS NO POROSOS .....	23
<b>TABLA 1.2</b> CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE FORMACIONES PARA ROCAS SATURADAS DE AGUA.....	24
<b>TABLA 1.3</b> PROPIEDADES ACÚSTICAS DE CEMENTOS.....	24
<b>TABLA 1.4</b> PROPIEDADES ACÚSTICAS PARA FLUIDOS HOMOGÉNEOS ....	26
<b>TABLA 1.5</b> PROPIEDADES ACÚSTICAS PARA VARIOS TIPOS DE FLUIDOS DE FONDO .....	27
<b>TABLA 3.1</b> PROFUNDIDAD MD DE LAS ZONAS DE INTERÉS - POZO A1 .....	56
<b>TABLA 3.2</b> PROFUNDIDAD MD DE LAS ZONAS DE INTERÉS - POZO A2 .....	60
<b>TABLA 3.3</b> PROFUNDIDAD MD DE LAS ZONAS DE INTERÉS - POZO A3 ....	66
<b>TABLA 3.4</b> PROFUNDIDAD MD DE LAS ZONAS DE INTERÉS - POZO D .....	70
<b>TABLA 4.1</b> CONCLUSIONES.....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1</b> CARTA DE BOMBEO DE LA CEMENTACIÓN .....	3
<b>FIGURA 1.2</b> DEFINICIÓN DE STAND OFF .....	8
<b>FIGURA 1.3</b> EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE STAND-OFF.....	8
<b>FIGURA 1.4</b> MOVIMIENTO DE TUBERÍA .....	9
<b>FIGURA 1.5</b> COMPONENTES DEL TENSOR DEFORMACIÓN .....	11
<b>FIGURA 1.6</b> TRASLACIÓN DE ESFUERZOS EN EL CÍRCULO DE MOHR.....	11
<b>FIGURA 1.7</b> DEFORMACIÓN POR ACCIÓN DE FUERZAS NORMALES Y DE CORTE.....	12
<b>FIGURA 1.8</b> DIAGRAMA DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN.....	13
<b>FIGURA 1.9</b> EJEMPLOS DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD PARA DIVERSOS SISTEMAS DE CEMENTO .....	13
<b>FIGURA 1.10</b> DEFORMACIÓN RADIAL.....	14
<b>FIGURA 1.11</b> CRITERIO DE MOHR-COULOMB EN UN ESPACIO $\tau$ - $\sigma$ .....	15
<b>FIGURA 1.12</b> SONDA ACÚSTICA Y TIPOS DE ONDAS .....	21
<b>FIGURA 1.13</b> VIAJE DE ONDAS DE ACUERDO A LA LEY DE SNELL .....	22
<b>FIGURA 1.14</b> FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA IMPEDANCIA PARA FLUIDOS BASE AGUA Y BASE ACEITE .....	26
<b>FIGURA 1.15</b> HERRAMIENTA CBL.....	28
<b>FIGURA 1.16</b> TIPOS DE ONDAS EN EL POZO.....	29
<b>FIGURA 1.17</b> ESQUEMA DE SEÑAL RECIBIDA PARA CASING CON BUENA Y MALA ADHERENCIA .....	30
<b>FIGURA 1.18</b> SALTO DE CICLO O CYCLE SKIPPING .....	31
<b>FIGURA 1.19</b> RESPUESTA EN EL TT POR EFECTO DE LA EXCENTRICIDAD.....	32
<b>FIGURA 1.20</b> REPRESENTACIÓN DE LAS ONDAS EN EL CBL.....	33
<b>FIGURA 1.21</b> EFECTO DE LA EXCENTRICIDAD.....	35
<b>FIGURA 1.22</b> EFECTO DEL ESPESOR DEL CEMENTO SOBRE LA ATENUACIÓN EN EL CBL.....	35
<b>FIGURA 1.23</b> PROPAGACIÓN DE PULSOS ULTRASÓNICOS EN EL FONDO DEL POZO .....	37
<b>FIGURA 1.24</b> PULSO ULTRASÓNICO Y SU FRECUENCIA .....	38
<b>FIGURA 1.25</b> VENTANA DE RESONANCIA .....	39
<b>FIGURA 1.26</b> PALETA DE VALORES DE IMPEDANCIA.....	40
<b>FIGURA 2.1</b> CARTA CBL-3 .....	43
<b>FIGURA 2.2</b> CARTA CBL-4 .....	43
<b>FIGURA 2.3</b> CORRECCIONES EN LA IMPEDANCIA DE ACUERDO AL TAMAÑO DEL CASING .....	47
<b>FIGURA 2.4</b> COMPARACIÓN DE PROFUNDIDAD CONTRA AMPLITUD Y TIEMPO DE TRÁNSITO .....	47
<b>FIGURA 2.5</b> RELACIÓN ENTRE TAMAÑO DE CASING Y PRESIÓN REQUERIDA PARA MICROANILLOS .....	49

<b>FIGURA 2.6</b> FIGURA COMPARATIVO PARA DATOS DE CBL CON Y SIN PRESIÓN .....	50
<b>FIGURA 2.7</b> DETERMINACIÓN DE MICROANILLOS EN EL SISMOGRAMA....	51
<b>FIGURA 2.8</b> CARTA CBL-1 .....	52
<b>FIGURA 2.9</b> REGISTRO CONVENCIONAL DE CEMENTACIÓN .....	53
<b>FIGURA 3.1</b> DIAGRAMA DE CEMENTACIÓN - POZO A1.....	57
<b>FIGURA 3.2</b> REGISTRO DE CEMENTO - POZO A1 CON Y SIN PRESIÓN - ARENA BASAL TENA.....	59
<b>FIGURA 3.3</b> INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A1 - ARENA BASAL TENA.....	60
<b>FIGURA 3.4</b> DIAGRAMA DE CEMENTACIÓN - POZO A2.....	61
<b>FIGURA 3.5</b> REGISTRO DE CEMENTO - POZO A2 - ARENA BASAL TENA...	62
<b>FIGURA 3.6</b> INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A2 - ARENA BASAL TENA.....	63
<b>FIGURA 3.7</b> REGISTRO DE CEMENTO - POZO A2 - ARENA HOLLÍN .....	64
<b>FIGURA 3.8</b> INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A2 - ARENA HOLLÍN....	65
<b>FIGURA 3.9</b> DIAGRAMA DE CEMENTACIÓN - POZO A3.....	67
<b>FIGURA 3.10</b> REGISTRO DE CEMENTO - POZO A3 - ARENA T .....	68
<b>FIGURA 3.11</b> INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A3 - ARENA T .....	69
<b>FIGURA 3.12</b> DIAGRAMA DE CEMENTACIÓN - POZO A4.....	71
<b>FIGURA 3.13</b> REGISTRO DE CEMENTO - POZO A4 - ARENA U .....	72
<b>FIGURA 3.14</b> INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A4 - ARENA U .....	73



## SIMBOLOGÍA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSIONES
A	Amplitud (mV)	W/A
API	American Petroleum Institute	
Bc	Unidades Bearden de consistencia	
BAPD	Barriles de agua por día	L <sup>3</sup>
BHCT	Temperatura de fondo circulante	T
BHST	Temperatura de fondo estática	T
Bls	Barriles	L <sup>3</sup>
BPPD	Barriles de petróleo por día	L <sup>3</sup> /t
BSW	Sedimentos básicos y agua	L <sup>3</sup>
BWOC	Bulk wait of cement	
D	Diámetro	L
dB	Decibeles	
E	Erodabilidad	
ECD	Densidad Equivalente de Circulación	M/Lt <sup>2</sup>
f	Frecuencia	t <sup>-1</sup>
ft	Pies	L
Gal	Galones	L <sup>3</sup>
GPM	Galones por minuto	L <sup>3</sup> /t
HPHT	Alta presión y alta temperatura	
hrs	Horas	t
ID	Diámetro Interno de la tubería	L
Inches	Pulgadas	L
LEAD	Lechada de cemento liviana o de tope	
Lb/gal	Libras por galón (psi)	M/Lt <sup>2</sup>
MD	Profundidad medida	L
Min	Minutos	t
mm	Milímetros	L
MRP	Máxima pérdida de presión posible en el valor de la resistencia de gel estática = 500 lb/100 ft <sup>2</sup> , psi	M/Lt <sup>2</sup>
MSG	Microsismograma	W/A
mV	Milivoltios	
OBM	Fluido base aceite	
OD	Diámetro Externo de la tubería	L
PCS	Pies cúbicos estándar	L <sup>3</sup>
PSI	Libras por pulgada cuadrada	M/Lt <sup>2</sup>
q (API)	Pérdida de filtrado API	
Q	Caudal de flujo	L
SGS	Resistencia de gel estático	

t	Tiempo	t
TAIL	Lechada de cemento pesada o de fondo	
TVD	Profundidad Vertical Verdadera	L
UCA	Ultrasonic Cement Analyzer	
WBM	Fluido base agua	
WOC	Wait of cement	
YP	Yield Point	
z	Impedancia acústica	

## RESUMEN

El presente trabajo es un Estudio de Caso cuyo objetivo final es interpretar los resultados obtenidos en los registros de cementación que evaluaron la calidad de adherencia en pozos cementados con sistemas elásticos utilizando un método combinatorio de herramientas sónicas, ultrasónicas y un estudio de su varianza a lo largo de la zona evaluada.

El Capítulo 1 presenta la teoría detrás de la aplicabilidad de los cementos elásticos y además el principio físico de funcionamiento de las herramientas sónicas y ultrasónicas que sirven como referencia para el desarrollo del siguiente trabajo.

El Capítulo 2 es el desarrollo de un manual de interpretación de registros de cementación, inicialmente para pozos que utilicen sistemas elásticos, pero con el fin ambicioso de servir como guía de evaluación para los diferentes tipos de sistemas cementantes.

El Capítulo 3 abarca el estudio y análisis de los resultados obtenidos en la evaluación de los pozos mediante el método descrito, el cual consiste en verificar la calidad de la información receptada, corroborarla con los métodos convencionales y determinar su efectividad.

El Capítulo 4 contiene las conclusiones y recomendaciones obtenidas del presente estudio.

## PRESENTACIÓN

El presente estudio describe los resultados obtenidos a partir de la utilización de la técnica de Evaluación Avanzada de la cementación aplicada en pozos, cuya característica fundamental, es la utilización de un sistema de cementación que presenta propiedades del tipo elásticas, lo cual es parte de la vanguardia en pozos de la actualidad.

El análisis se realizó como un proceso que involucró la evaluación previa de varias operaciones envueltas, como son los registros eléctricos a hueco abierto y la posición final de los diferentes tipos de fluidos utilizados en la cementación. Para ello se evaluaron 4 pozos, de los cuales 2 presentaban características convencionales en sus sistemas de cementación y los 2 restantes se aislaron con lechadas con propiedades elásticas.

El estudio permitió corroborar, entre varias cosas, la posición final de la lechada principal en el pozo, su calidad de aislamiento para casing y formación y el comportamiento acústico de este tipo de sistemas, con el fin de comparar las respuestas finales versus un pozo cementado con sistemas convencionales.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

La evaluación de la calidad de adherencia del cemento es considerado uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta previo a la puesta en producción del pozo, ya que, al mantener la certeza de un correcto sello hidráulico entre el casing y la formación, se tendrá seguridad en que el pozo alcanzará su máximo potencial sin ninguna falla asociada a una mala calidad de aislamiento.

### 1.1 GENERALIDADES EN LA EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN

Smolen (1995), menciona que, como aspecto previo a una evaluación de la cementación, debemos entender que todo aislamiento del cemento no debe ser perfecto en cada pulgada de la columna; para alcanzar una adherencia efectiva el anillo de cemento alrededor del casing debe estar, en medida de lo posible, libre de canales con el fin de prevenir filtración de fluido del pozo en la zona de interés. Los canales pueden existir en intervalos pequeños en completaciones que presenten aislamiento efectivo. Casos históricos de pozos han demostrado que, aunque los registros de cementación muestren canales en secciones cortas, han producido con efectividad durante décadas sin pérdida de potencial, salvo el caso en que los canales se extiendan a lo largo de la columna de cemento, el aislamiento continúa siendo efectivo.

La evaluación de la cementación con herramientas como el CBL surge como un requerimiento de las Organizaciones Ambientales de mantener un registro sobre la eficiente extracción de los recursos, regulando las prácticas y conociendo los posibles impactos en el ambiente.

### 1.2 CEMENTACIÓN

La cementación de pozos es el proceso, desarrollado por Halliburton desde 1920, mediante el cual un pozo es revestido después de haber sido perforado a través

de lechadas compuestas por cemento, agua y aditivos químicos con el fin de obtener una mezcla eficaz, dependiendo de las características y los problemas presentados en las formaciones del hueco a revestir (Castro y Velasco, 2015).

Entre las principales funciones sobre la importancia de revestir un pozo tenemos:

- Aislar las zonas inestables de las formaciones como son: zonas de alta presión, acuíferos, zonas de gas, formaciones frágiles, cavernas, etc.
- Impedir que se derrumben las formaciones dentro del pozo.
- Aislar zonas problemáticas o de pérdida de circulación antes de continuar la perforación.
- Evitar la corrosión de la tubería
- Facilitar la conexión de equipos de superficie y producción.
- Proteger formaciones productivas.
- Ayudar a controlar los reventones provenientes de zonas sobrepresionadas.

Existen diversos métodos de evaluación de calidad de la cementación primaria, entre los cuales tenemos:

- Pruebas hidráulicas.
- Registros de temperatura – tope del cemento.
- Métodos acústicos.

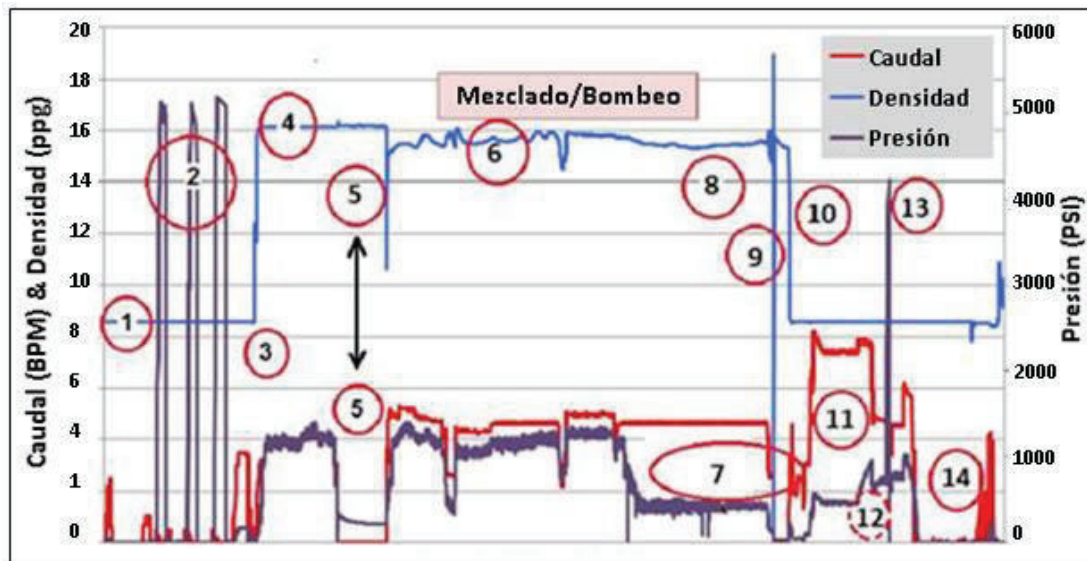
### **1.2.1 MONITOREO DE LA CEMENTACIÓN**

El registro primario de una cementación efectiva consiste en interpretar correctamente la carta de bombeo y en realizar una prueba de presión después de haber colocado el cemento.

La secuencia de operación de la figura 1.1 consiste en lo siguiente:

- 1) Llenado del equipo de superficie con agua fresca previo a la prueba de presión.
- 2) Chequeo de la presión del equipo de superficie, donde se la aumenta por sobre la presión esperada en el trabajo.

**FIGURA 1.1 CARTA DE BOMBEO DE LA CEMENTACIÓN**



Fuente: Koel, 2014

- Bombeo del espaciador para separar el lodo del cemento.
- Densidad constante del espaciador.
- Apagado de bombas para el asentamiento del tapón e iniciar el bombeo del cemento mezclado.
- Bombeo del cemento tratando de mantener la densidad constante con una variación de 0,5 lb/gal máxima.
- El cemento se posiciona y la presión cae debido a la salida del lodo de la columna.
- Variación en la densidad de la cementación por la presencia de un cemento tail de menor densidad.
- Apagado de bombas para limpieza de las líneas de superficie y lanzamiento del plug.
- Desplazamiento de la lechada con agua una vez calculado el volumen de cemento necesario. El plug, asentado en la zapata, separa la lechada con el fluido de desplazamiento.
- Se aumenta el caudal para limpiar el agujero, además se reciproca la sarta.
- Se desplaza el cemento con mayor presión debido al peso de la columna.
- El top plug se acopla y el asentamiento del cemento está completo.
- Se enjuaga el equipo y se prueban las válvulas.

### **1.3 DESCRIPCIÓN DE LA LECHADA CONVENCIONAL**

Los cementos convencionales se caracterizan por tener densidades entre los 16 y 16,5 lb/gal y por mostrar una alta resistencia a la compresión y baja resistencia tensil, en una relación de uno a diez (1:10:RT:RC) (Estrada y Olivo, 2009).

Otras de las características del cemento convencional son las siguientes:

- Sello hidráulico efectivo.
- Capacidad de suspensión de la lechada para su posicionamiento.
- Sólida en resistencia.
- Impermeable.
- Costo económico bajo.
- Alta disponibilidad.

#### **1.3.1 ADITIVOS DEL CEMENTO**

Los aditivos usados en el cemento convencional para mejorar su rendimiento son:

- Densificantes
- Aditivos para el control de gas
- Sílice para impartir estabilidad térmica al cemento
- Dispersantes
- Retardadores
- Antiespumantes
- Aditivos para el control de filtrado

#### **1.3.2 PROBLEMAS COMUNES PRESENTADOS EN LAS LECHADAS CONVENCIONALES**

En la actualidad la mayoría de los campos han iniciado la etapa de declinación de producción, producto de ello los reservorios se van depletando y tenemos manifestaciones de agua más tempranas en la producción, lo que ha motivado a dejar de lado un poco la utilización de cementos convencionales debido a los problemas que generan, la necesidad subsiguiente de optar por cementaciones remediales o, en casos extremos, al abandono definitivo del pozo (Villalva, 2013).



Estrada y Olivo (2009) mencionan que las lechadas convencionales muestran normalmente una adherencia casing-cemento intacta, basándose en los registros CBL y VDL, pero sus condiciones desfavorecen en los siguientes casos:

**Pérdida de adherencia en la formación:** debido a la incapacidad de adherencia y posterior falla en el aislamiento efectivo.

**Deterioro por esfuerzos de corte:** los esfuerzos de cizalla suelen tener baja aplicación.

**Agrietamiento radial del cemento:** la capacidad de resistencia a los esfuerzos cíclicos es del orden del 10%, por lo que es inminente el riesgo de falla.

## 1.4 DESCRIPCIÓN DE LA LECHADA ELÁSTICA

La lechada elástica es una mezcla de materiales elastoméricos diseñados para mejorar la elasticidad del cemento en fraguado, modificando sus propiedades mecánicas como son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, cuyas definiciones se muestran más adelante.

### 1.4.1 NUEVOS DESAFÍOS

Los pozos actuales presentan desafíos en su diseño, debido a los cambios y alternabilidad en los reservorios donde las lechadas convencionales no responden de manera eficiente, entre los principales problemas tenemos:

- Envejecimiento y depletación de campos.
- Inyección de vapor y estimulaciones.
- Taponamiento y abandono.
- Adherencia en pozos alta presión y alta temperatura (HPHT).
- Márgenes muy cortos de presiones de fractura y poro.
- Pozos de aguas profundas y con bajas temperaturas.

### 1.4.2 APLICACIONES

Las lechadas del tipo elásticas poseen múltiples beneficios comparados con lechadas convencionales, entre ellas tenemos:

- Incrementa la capacidad del cemento en resistencia de cargas cíclicas.
- Mezclado con otros aditivos se logra minimizar las pérdidas de circulación y permite puentear formaciones porosas o con presencia de fracturas.
- Pueden usarse a condiciones de temperatura mayores a 600 °C, es decir para aquellos que necesiten inyección de vapor, pozos HPHT, aguas profundas y pozos geotermales.
- Compatibilidad con cualquier aditivo siempre y cuando su diseño permita controlar parámetros como bombeabilidad, viscosidad, espaciadores, entre otros.

#### **1.4.3 DESVENTAJAS**

- La baja gravedad específica de algunos aditivos elastoméricos genera tendencia a separarse o flotar en la superficie de la lechada.
- Las lechadas de este tipo son más viscosas a temperatura ambiente pudiendo presentar inestabilidad en la lechada.
- Requiere de técnicas especiales de laboratorio para el diseño, tales como: pruebas de mezclabilidad, de sedimentación, reológicas de densidad API, entre otras.
- Su lectura en los registros de cementación convencionales (CBL) muestra baja adherencia debido a su baja resistencia a la compresión, relacionado directamente por su bajo módulo de Young y Coeficiente de Poisson.

### **1.5 BUENAS PRÁCTICAS EN LA CEMENTACIÓN DE POZOS**

La obtención de una cementación primaria efectiva radica en el cumplimiento adecuado de los procesos predefinidos, éstos ayudarán en la evaluación posterior del trabajo y permitirá encontrar con mejor eficiencia las fallas en el caso de haber ocurrido.

Estrada y Olivo (2013), mencionan que para obtener una adherencia de calidad reflejada en los registros de cementación debemos cumplir una serie de factores básicos:

- Acondicionamiento del lodo.
- Uso de lavadores y espaciadores.
- Centralización de la tubería.
- Movimiento de la tubería.
- Caudales de flujo.

### 1.5.1 ACONDICIONAMIENTO DEL LODO

El lodo presente durante las operaciones de corrida de tubería previa a la cementación permanece, en su mayoría de tiempo, estático tendiendo a gelificarse, por lo que su correcto acondicionamiento permitirá mejorar su función en la remoción de residuos y evitar la contaminación del cemento.

La eficiencia del desplazamiento se basa en el estudio de la *erodabilidad*, que se considera como la fuerza necesaria para remover o erosionar la costra de lodo tomando en cuenta la geometría y centralización de la sarta de revestimiento (Castro y Velasco, 2015)

El cálculo de la erodabilidad en el laboratorio viene dado por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{600}{\tau_y} \quad (1)$$

Donde:

$\tau_y$  es el esfuerzo de corte mínimo y necesario para empezar el movimiento en un lodo gelificado en lbf/100 ft<sup>2</sup>.

$E$  es la erodabilidad

### 1.5.2 USO DE LAVADORES Y ESPACIADORES

El uso de lavadores es importante debido a que ayudan con el desplazamiento y separación de fluidos incompatibles, tales como lodo de perforación y cemento, mejorando la eficiencia de limpieza del hoyo (Castro y Velasco, 2015).

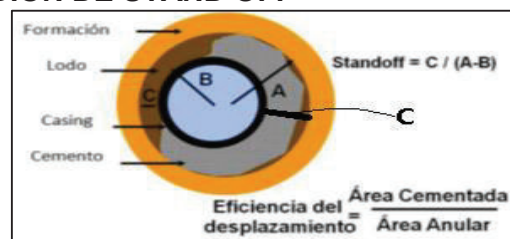
### 1.5.3 CENTRALIZACIÓN DE LA TUBERÍA

Una correcta centralización de la tubería ayuda a evitar que el cemento se canalice logrando la eficiencia de desplazamiento óptimo y el tope deseado (Estrada y Olivo, 2009).

El concepto de *stand off* se introduce al analizar la centralización y se define como el porcentaje que representa el espacio anular con buena centralización de la tubería con respecto al hoyo. La figura 1.2 muestra la definición de stand off de manera gráfica y explicativa, denotando que C es el área anular, A es el radio del hoyo y B es el radio de la tubería.

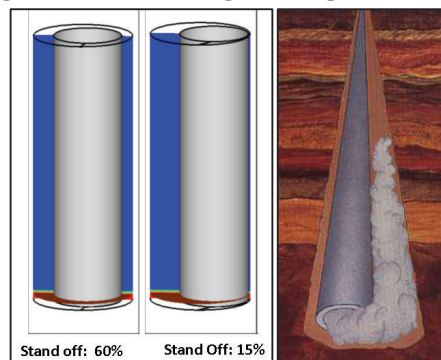
Villalva (2013) menciona que la centralización de la tubería es muy importante, sobre todo en la zona de interés, donde se requiere de una eficiencia de desplazamiento superior al 95% y, si el stand off es bajo, la eficiencia se ve afectada ya que disminuye y desembocaría en el efecto péndulo mostrado en la figura 1.3.

**FIGURA 1.2 DEFINICIÓN DE STAND OFF**



FUENTE: Villalva, 2013.

**FIGURA 1.3 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE STAND-OFF**



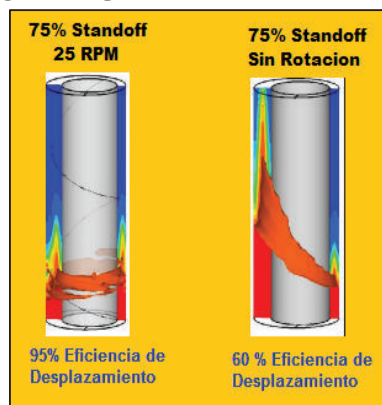
FUENTE: Villalva, 2013.

### 1.5.4 MOVIMIENTO DE LA TUBERÍA

Rotar y reciprocarse la tubería permite obtener una mayor remoción del fluido de perforación, creando una pequeña turbulencia que ayuda al flujo de fluidos inmóviles y además ayuda en la ruptura de geles formados en el fluido favoreciendo en la circulación (Castro y Velasco, 2015).

La figura 1.4 muestra un ejemplo de la efectividad de reciprocarse la tubería, donde al tener un buen porcentaje de stand off (75%), la eficiencia de desplazamiento se ve mermada al perder rotación (60% de eficiencia), caso contrario ocurre al tener movimiento donde la eficiencia de desplazamiento sube al 95%.

**FIGURA 1.4 MOVIMIENTO DE TUBERÍA**



FUENTE: Castro y Velasco, 2015.

### 1.5.5 CAUDALES DE FLUJO

El caudal de flujo permite mejorar la eficiencia en la remoción, donde el escenario óptimo sería con el mayor caudal posible y la mayor velocidad para incidir sobre la fricción y lograr la remoción eficiente.

Los caudales pueden ser de los siguientes tipos:

- Flujo tapón: con remoción mínima del lodo.
- Flujo Laminar: la velocidad de flujo y fricción aumentan, mejorando en la remoción del lodo.

- Flujo turbulento: se obtiene la mayor capacidad de remoción debido a su alta velocidad y alta fricción.

## 1.6 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CEMENTO

Lograr un cemento perdurable en el tiempo es muy importante para los aspectos económicos y medioambientales y experiencias pasadas han demostrado que después de operaciones como: completaciones, pruebas de presión y producción de pozos el cemento tiende a fallar limitando la productividad con producciones con altos cortes de agua (Estrada y Olivo, 2009).

Como se mencionó anteriormente, los pozos actuales se encuentran cada día con nuevos desafíos para un aislamiento efectivo con el cemento y las operadoras deben permanecer a la vanguardia, satisfaciendo la mayor cantidad de requerimientos, al menor tiempo y con el menor costo posible; por lo que se han creado lechadas alternativas que modifican sus propiedades mecánicas para cubrir las necesidades, entre ellas el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

### 1.6.1 DEFINICIONES BÁSICAS

#### 1.6.1.1 Esfuerzo

Risnes, R. (1992), define al esfuerzo como la fuerza aplicada ( $F_n$ ) sobre un área determinada clasificándola de acuerdo a la dirección en la que se encuentre, obteniendo:

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \quad (2)$$

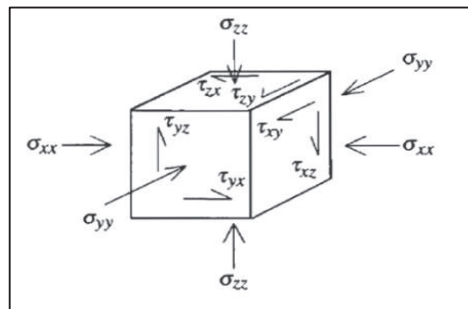
Donde  $\sigma$  es el denominado esfuerzo normal, y

$$\tau = \frac{F_p}{A} \quad (3)$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte. Tanto esfuerzo normal como de corte tienen unidades de  $lb/pulg^2$ .

Harrison, J. y Hudson, J., (1997), definen que el tensor esfuerzo como las fuerzas aplicadas a un cuerpo sobre un área orientada en 3 direcciones ortogonales, con la presencia de 3 componentes normales ( $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ ) y 6 componentes tangenciales o de corte ( $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ ) tal como se muestran en la Fig. 1.5.

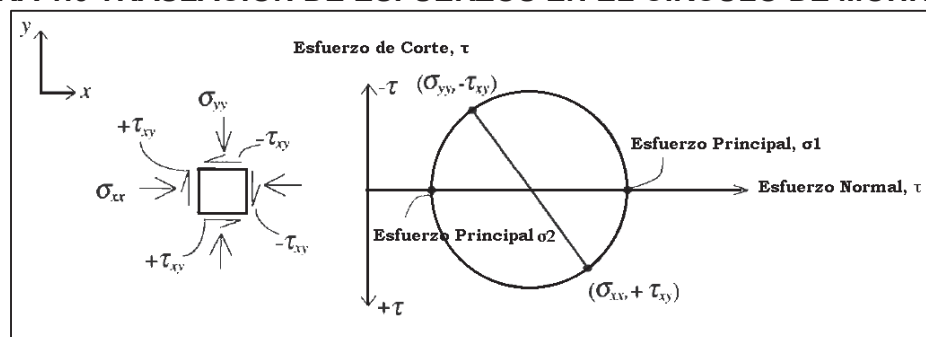
**FIGURA 1.5 COMPONENTES DEL TENSOR DEFORMACIÓN**



FUENTE: Harrison y Hudson, 2008.

Para su representación en equilibrio, se utiliza un plano principal en 2 dimensiones con los esfuerzos normales por ejemplo: máximo  $\sigma_{(xx)}$  y mínimo ( $\sigma_{yy}$ ); y 2 esfuerzos de corte  $+\tau_{xy}$  y  $-\tau_{xz}$ , los cuales se grafican en el círculo de Mohr (Fig. 1.6).

**FIGURA 1.6 TRASLACIÓN DE ESFUERZOS EN EL CÍRCULO DE MOHR**



FUENTE: Risnes, 1992.

### 1.6.1.2 Deformación Unitaria

Se define deformación ( $\epsilon$ ) como el cambio de posición ( $L'$ ) de una partícula en una muestra a una posición inicial ( $L$ ) por la acción de una fuerza externa y, al igual que el esfuerzo, se lo define como un tensor de segundo orden, que cuenta con

deformaciones normales y de corte (Harrison y Hudson, 2008), matemáticamente la deformación se encuentra expresada así:

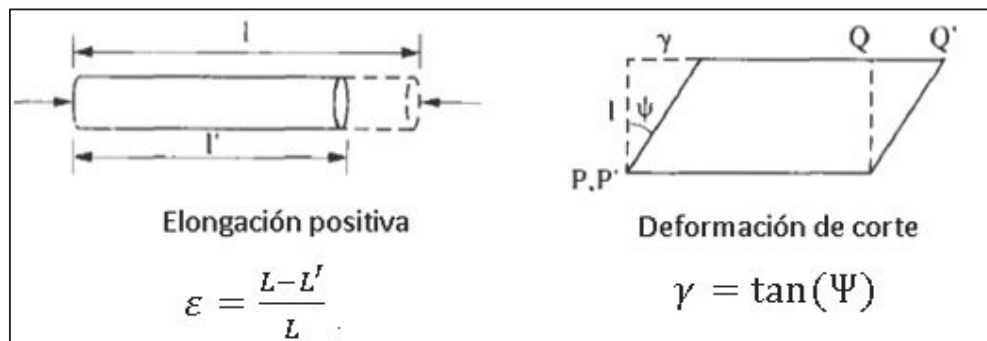
$$\varepsilon = \frac{L-L'}{L} \quad (4)$$

Y la deformación de corte como:

$$\gamma = \tan(\Psi) \quad (5)$$

Donde  $\Psi$  es el cambio del ángulo en 2 direcciones que, antes de la deformación, eran perpendiculares, tal como se muestran en la fig. 1.7; presentando unidades adimensionales.

**FIGURA 1.7 DEFORMACIÓN POR ACCIÓN DE FUERZAS NORMALES Y DE CORTE**



FUENTE: Harrison y Hudson, 2008.

## 1.6.2 PROPIEDADES ELÁSTICAS Y DE ESFUERZOS

Nelson, E. y Guillot, D. (2006) menciona que una muestra de cemento o de cualquier material se deforma cuando están sujetas a esfuerzo y determinar una relación entre esfuerzo y deformación es un aspecto importante en la mecánica de sólidos.

### 1.6.2.1 Módulo de Young

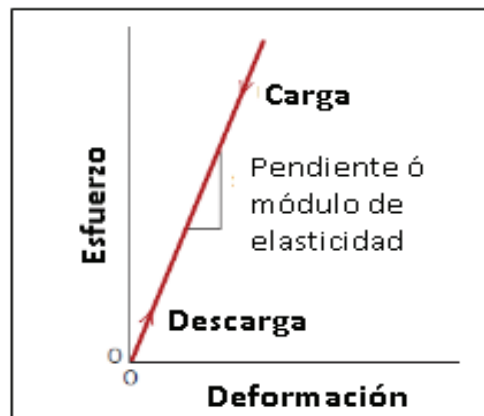
El módulo de elasticidad ( $E$ ) en un gráfico de esfuerzos ( $\sigma$ ) versus deformación ( $\varepsilon$ ), resulta en una relación lineal y se denomina deformación elástica; y su pendiente corresponde al módulo de elasticidad o módulo de Young ( $E$ ) (Callister, W. 2007), expresado matemáticamente así:



$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6)$$

La deformación para un material elástico e isótropo no es permanente, por lo que al retirar la fuerza deformadora éste retornará a su posición inicial tal como se muestra en la figura 1.8.

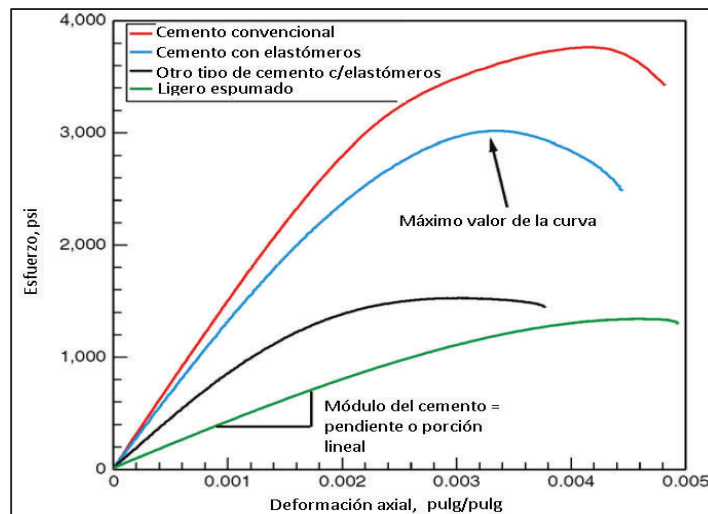
**FIGURA 1.8 DIAGRAMA DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN**



FUENTE: Callister, 2007.

La figura 1.9 muestra el comportamiento del módulo de elasticidad para diferentes tipos de cementos, donde observamos que la pendiente disminuye en cementos elásticos comparado con convencionales.

**FIGURA 1.9 EJEMPLOS DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD PARA DIVERSOS SISTEMAS DE CEMENTO**

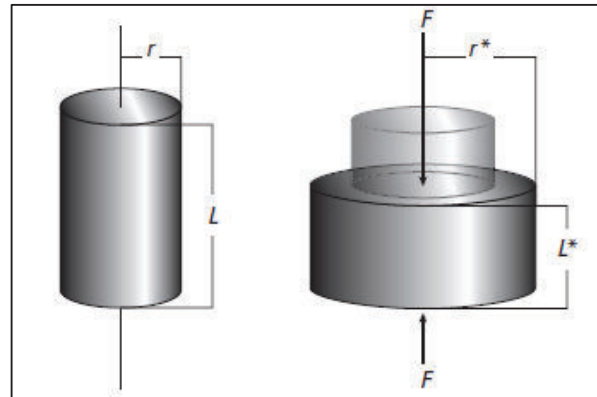


FUENTE: Darbe, Gordon y Morgan, 2008.

### 1.6.2.2 Relación de Poisson

Risnes, R. (1992) relata que otra consecuencia de la aplicación de un esfuerzo ( $\sigma$ ), es la expansión lateral o deformación radial, tal como se muestra en la figura 1.10.

**FIGURA 1.10 DEFORMACIÓN RADIAL**



FUENTE: Nelson y Guillot, 2006

La elongación lateral está definida como  $\varepsilon_z = \varepsilon_y = (D - D') / D$  con  $D' > D$ , por lo que  $\varepsilon_z$  y  $\varepsilon_y$  son negativas, y su relación con la deformación axial se expresa así:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (7)$$

Dicha medida de la expansión lateral relativa a la contracción longitudinal se conoce como Relación de Poisson ( $\nu$ ).

Los valores en la Relación de Poisson varían entre 0 y 0,5; obtener un valor de 0,5 significa que el material tiene deformación lateral y longitudinal en la misma proporción, por ejemplo el caucho. Los cementos convencionales tienen una relación de Poisson de aproximadamente 0.15 (Nelson y Guillot, 2006)

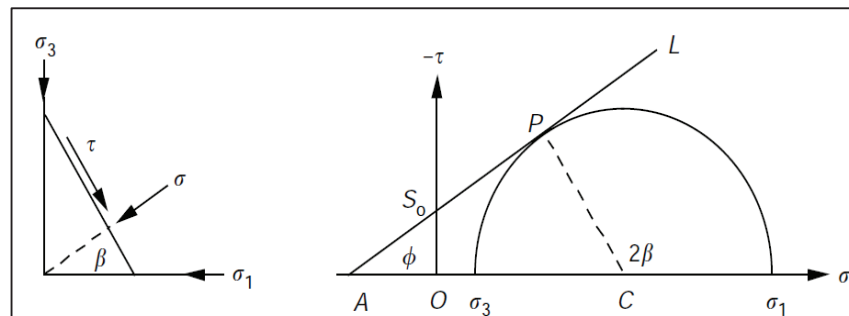
### 1.6.2.3 Criterio de Mohr-Coulomb

La representación del criterio de Mohr-Coulomb asume una función lineal para valores de falla, los cuales incluye la fuerza de cohesión ( $S_0$ ) que es la fuerza interna que mantiene unido al material en una sola masa, coeficiente de fricción ( $\mu$ ) y la fuerza normal al cuerpo ( $\sigma$ ), matemáticamente queda expresado así:

$$|\tau| = S_0 + \mu\sigma \quad (8)$$

En la figura 1.11 se representa gráficamente el círculo de Mohr tocado tangencialmente por la línea de falla, representado así el criterio de Mohr-Coulomb con un ángulo de fricción interna  $\phi$  el cual se relaciona con el coeficiente interno de fricción por la pendiente  $\tan \phi = \mu$ . (Risnes, 1992).

**FIGURA 1.11 CRITERIO DE MOHR-COULOMB EN UN ESPACIO  $\tau$ - $\sigma$**



FUENTE: Harrison y Hudson, 2008.

Estrada y Olivo (2009) dictan que, en términos físicos si un círculo de Mohr yace enteramente por debajo de la envolvente, el cemento se encuentra en condiciones estables; en cambio si el círculo de Mohr toca envolvente, la resistencia del cemento ha sido alcanzada y por ende la falla ha ocurrido.

## 1.7 PRUEBAS DE LABORATORIO APLICADOS A LECHADAS CONVENCIONALES Y LECHADAS ELASTOMÉRICAS

Las lechadas convencionales se diferencian de las elastoméricas en su composición, por lo que sus comportamientos son diferentes en las pruebas de laboratorio, a continuación las detallaremos:

### 1.7.1 REOLOGÍA

La reología es la parte de la física que estudia la relación entre esfuerzo y deformación de los materiales con capacidad de fluir, y para dicho análisis se utilizó un viscosímetro Fann 35 que determina las propiedades reológicas como viscosidad plástica (PV) y punto de cedencia (YP). Estos valores indican la

capacidad de remoción de lodo en zonas de difícil acceso, es por ello que se recomienda obtener valores altos de punto cedente y viscosidad plástica.

Las lechadas convencionales presentan viscosidades de ~126 cp y puntos de cedencia de ~10 lbf/100ft<sup>2</sup> (Villalva, 2013), mientras que las lechadas con propiedades elásticas presentan viscosidades de ~500 cp y punto de cedencia de ~25 lbf/100ft<sup>2</sup> (Castro y Velasco, 2015), demostrando así que las lechadas elastoméricas presentan viscosidades y puntos de cedencia mas altos, mejorando la remoción y desplazamiento del lodo.

### **1.7.2 TIEMPO DE BOMBEO**

Los resultados de ésta prueba de laboratorio provee un indicador del tiempo en el que la lechada permanecerá bombeable dentro del pozo, simulando las condiciones de presión y temperatura de fondo.

Para realizar esta prueba se utiliza un consistómetro HPHT (altas presiones – altas temperaturas), el cual determina la consistencia de la lechada a medida que se le somete a condiciones del pozo, utilizando un software que simula el escenario de fondo tratando de obtener resultados apegados a la realidad.

El tiempo de bombeabilidad de una lechada convencional es de alrededor de 3 horas hasta alcanzar los 70 Bc en un liner de producción (Villava, 2013), mientras que para una lechada elastomérica, debido a su alta viscosidad, éste tiempo se reduce hasta aproximadamente la mitad pero la aplicación de aditivos permite que ésta alcance los tiempos bombeables (Estrada y Olivo, 2009) de la lechada convencional para el mismo caso.

### **1.7.3 PÉRDIDA DE FLUIDO**

Esta prueba es desarrollada para determinar la cantidad de agua que se pierde en la lechada o su deshidratación por las condiciones de presión y temperatura de fondo.

En esta prueba la lechada se somete a una presión diferencial de 1000 psi y a temperatura de BHCT durante 30 minutos con el fin de obtener la cantidad de líquido perdido a través de una malla producto de la deshidratación de la lechada a condiciones de fondo (Castro y Velasco, 2015). Las lechadas convencionales y elastoméricas presentan relativa similitud de resultados de pérdida de fluido, la cual se presenta en alrededor de 25 a 30 cc/30 min, los cuales están dentro de los parámetros establecidos en la norma API que establece que sean menores a 50 cc/30 min (Villalva, 2013).

#### **1.7.4 AGUA LIBRE**

El propósito de esta prueba es determinar la estabilidad de una lechada de cemento, el procedimiento consiste en dejar la lechada estática en una probeta a condiciones de BHCT, inclinándola para simular las condiciones de fondo en un lugar libre de vibración con el fin de determinar si hay agua libre separada de la lechada o precipitación de sólidos. Los resultados son esenciales en la determinación de la calidad de estabilidad de la lechada, ya que excesiva agua libre y precipitación se consideran perjudiciales para la calidad de cemento (Castro y Velasco, 2015).

Las lechadas convencionales y elastoméricas presentan valores de 0% de agua libre, convirtiéndose en ideales sobre todo con el fin de evitar la mezcla con fluidos del pozo (Villalva, 2013).

#### **1.7.5 FUERZA COMPRESIVA**

La fuerza de compresión es aquella fuerza requerida para soportar el peso de la tubería de revestimiento en la lechada fraguada, permitiendo estimar el tiempo de espera del cemento (WOC) necesario para desarrollar la siguiente operación en el pozo.

La prueba de resistencia a la compresión puede ser realizada mediante dos métodos:

- **Método destructivo:** que emplea una prensa hidráulica y un auto clave que permite determinar la fuerza de compresión
- **Método no destructivo:** mediante un analizador ultrasónico de cemento (UCA) que brinda información del tiempo de fraguado hasta que la lechada obtenga 500 psi de resistencia a la compresión.

El método más común de la evaluación de resistencia a la compresión es el UCA, donde un aparato transmite la señal sónica a través del cemento y el tiempo de tránsito puede ser correlacionado con el tiempo y desarrollo del esfuerzo compresivo; así a medida que la lechada adquiere resistencia, la velocidad de la onda aumenta (Castro y Velasco, 2015).

### 1.7.6 PRUEBA DE RESISTENCIA DE GEL ESTÁTICO (SGS)

La resistencia de gel estático se define como la resistencia que presenta la lechada de cemento para impedir la percolación de gas o agua a través de ella, por lo tanto la prueba consiste en determinar el tiempo de transición de fluido a sólido que es considerada el momento de potencial influjo por la pérdida de presión hidrostática.

Tanto para lechadas convencionales como elastoméricas, la transición ocurre en etapas clasificadas que van desde los 100 lbf/ft<sup>2</sup>, punto en el que la lechada se encuentra aún en estado líquido o *zero gel time*, hasta los 500 lbf/ft<sup>2</sup> donde se considera que la lechada deja de transmitir presión hidrostática a la formación.

El API determina que dicha transición debe ocurrir en un tiempo menor a 30 minutos

## 1.8 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN

### 1.8.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE ONDAS

Las ondas acústicas se definen como un tren de ondas sinusoidales con picos y valles. El tiempo entre picos se denomina período (T), y sus unidades son los segundos. La frecuencia es el inverso del período, donde:

$$f = \frac{1}{T} \quad (9)$$

$f$  está definido como ciclos por segundo o Hertz (Smolen, 1995).

Mientras  $T$  es el período de tiempo entre picos adyacentes medidos en segundos, la longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre picos medidos en unidades de longitud; teniendo la velocidad ( $V$ ) de una onda acústica relación entre la longitud de onda y frecuencia por la ecuación:

$$V = f\lambda \quad (10)$$

Siendo la velocidad expresada en unidades de pie/seg o m/seg (Smolen, 1995).

## 1.8.2 TIPOS DE ONDAS

Existen tres tipos de ondas de interés para los registros acústicos. Éstas son las ondas compresionales, corte y Stoneley.

### 1.8.2.1 Ondas P

Las ondas compresionales, llamadas también primarias u ondas P, se propagan a lo largo del pozo en forma paralela a la dirección del desplazamiento de las partículas. La velocidad de la onda compresional,  $V_C$ , en un medio isotrópico se expresa como:

$$V_C = \left[ \frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Donde  $K$  representa el módulo de compresibilidad o bulk modulus,  $\mu$  o módulo de corte y  $\rho$  que representa la densidad (Smolen 1995).

Las ondas de compresión pueden transmitirse a través de líquidos y sólidos (columna de lodo, casing, cemento, formación), y su amplitud (a través del casing) provee una indicación de la adherencia del cemento. Es posible predecir con facilidad el arribo de la onda compresional al receptor (Espinoza, J. 2007).

### 1.8.2.2 Ondas S

Las ondas de corte, también llamadas secundarias u ondas S, se propagan en dirección perpendicular al movimiento de las partículas. Para sólidos isotrópicos, la velocidad de corte ( $V_S$ ) se expresa como:

$$V_S = \left[ \frac{\mu}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Las ondas de corte se mueven más lentamente que las ondas compresionales. Típicamente, las ondas de corte se propagan en cerca de la mitad a un tercio de la velocidad de las ondas compresionales en el pozo (Smolen 1995).

Dado que los gases y los líquidos no tienen esfuerzo de corte, solamente los sólidos pueden sustentar una onda de corte. Cuando las condiciones de adherencia son buenas, tanto la onda compresional con la de corte se propagan al interior del sólido ubicado en la interfaz cemento/formación y pueden ser detectadas por el receptor.

En la mayoría de los casos, la propia presencia de la onda de corte es un indicio de que la adherencia es buena. Las ondas de corte pueden identificarse mediante dos condiciones: 1) cambios en el tiempo de arribo de corte que no siempre son paralelos a los tiempos de arribo de compresión, y 2) un aumento de la amplitud acústica. Los tiempos de arribo de la onda de corte pueden quedar ocultos tras los tiempos de arribo de la onda compresional tardíos y, en general, no es posible identificarlos en formaciones de baja velocidad (Espinoza, J. 2007).

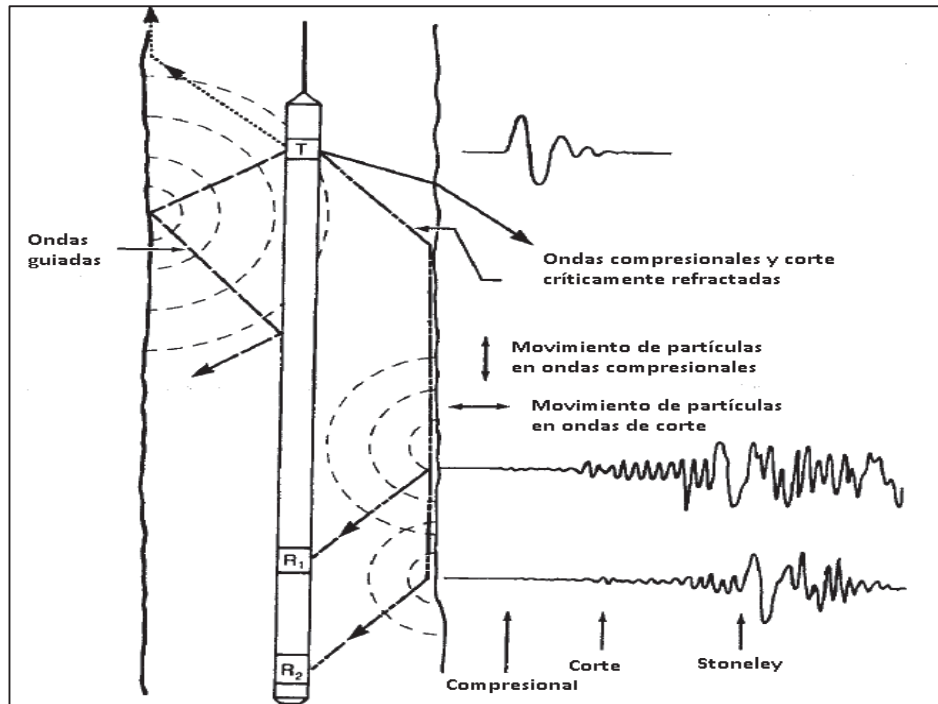
### 1.8.2.3 Ondas Stoneley

Las ondas Stoneley se propagan a lo largo de las paredes del pozo y son resultado de la interacción de las paredes del pozo y de los fluidos de fondo. Tienen velocidades típicamente menores que las velocidades en los fluidos de fondo (Smolen 1995). El análisis de éstas ondas tiene particular importancia, especialmente para detectar fracturas y capas delgadas de gas (Tang y Cheng, 2004).



La fig. 1.12 muestra el comportamiento de las ondas en el fondo del pozo originados por una herramienta acústica.

**FIGURA 1.12 SONDA ACÚSTICA Y TIPOS DE ONDAS**



FUENTE: Smolen, 1995.

### 1.8.3 AMPLITUD

La amplitud es determinada como la cantidad de energía acústica en el receptor medida en milivoltios (mV), del cual se obtienen resultados cuantitativos de la resistencia a la compresión y el índice de adherencia. Por el contrario, la pérdida de energía durante la propagación de la onda en el material se denomina atenuación e incrementa con la frecuencia de la onda y se expresa en decibeles (dB) por unidad de distancia (Nelson y Guillot, 2006).

Espinoza, J. (2007) menciona que en la interpretación cualitativa, la adherencia del cemento se calcula a partir de la amplitud de la siguiente manera:

- Una elevada amplitud indicaría libertad del casing para vibrar.
- Una amplitud baja indicaría adherencia del cemento al casing, provocando atenuación de la energía de la onda.

#### 1.8.4 TIEMPO DE TRÁNSITO

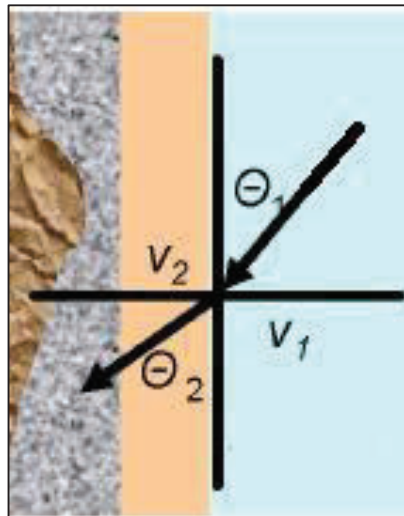
Es el tiempo requerido para detectar el primer arribo de suficiente amplitud en el receptor, su utilidad radica en la determinación de la centralización del instrumento y los efectos de formaciones rápidas.

El análisis del tiempo de viaje permite conocer si la herramienta no se encuentra centrada en forma adecuada, para ello se calibra en tubería libre y debe ser igual al tiempo de viaje para casing. (Frisch y Goodwin, 2009).

#### 1.8.5 PROPAGACIÓN DE ONDAS Y REFRACCIÓN

La herramienta acústica emite un pulso de energía acústica, dichos pulsos viajan a través del fluido como una onda circular expansiva y, al chocar con la pared del casing, ésta se refracta de acuerdo a la Ley de Snell, como se muestra en la fig. 1.13

**FIGURA 1.13 VIAJE DE ONDAS DE ACUERDO A LA LEY DE SNELL**



FUENTE: Frisch y Goodwin, 2009.

En base a la figura, se plantea la siguiente ecuación:

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_r} = \frac{V_f}{V_b} \quad (13)$$

Donde,  $\alpha$  representa el ángulo de incidencia ( $i$ ) y refracción ( $r$ ), y  $V_b$  es la velocidad para la onda compresional o de corte y  $V_f$  es la velocidad del fluido de fondo (Frisch y Goodwin, 2009).

### 1.8.5.1 Propiedades acústicas en formaciones

Bravo, D. (2012) menciona que las propiedades acústicas de las formaciones tienen una influencia en los registros acústicos. En términos familiares, formaciones rápidas y formaciones lentas se refiere a la velocidad de propagación del sonido. Tradicionalmente, para propósitos de evaluación de la cementación, una formación es llamada “rápida” cuando el sonido viaja a través de ella más rápido que a lo largo de la tubería de revestimiento, es decir, con un valor menor que 57  $\mu\text{s}/\text{ft}$ .

Características de formaciones y fluidos se muestran en las Tablas 1.1 y 1.2.

**TABLA 1.1 CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE FORMACIONES Y FLUIDOS COMUNES PARA SÓLIDOS NO POROSOS**

Sólidos no porosos				
Tipo de material	$\Delta T$ ( $\mu\text{s ft}^{-1}$ )	Velocidad del sonido		Impedancia acústica
		( $\text{ft}\cdot\text{s}^{-1}$ )	( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Mrayl
Casing	57,0	17500	5,334	41,60
Dolomita	43,5	23000	7,010	20,19
Anhidrita	50,0	20000	6,096	18,17
Caliza	47,6	21000	6,400	17,34
Calcita	49,7	20100	6,126	16,60
Cuarzo	52,9	18900	5,760	15,21
Yeso	52,5	19000	5,791	13,61
Halita	66,6	15000	4,572	9,33

FUENTE: Nelson y Guillot, 2006.

ELABORADO POR: Santiago Sisalema

**TABLA 1.2 CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE FORMACIONES PARA ROCAS SATURADAS DE AGUA**

Roca porosa saturada de agua					
Tipo de material	Porosidad	$\Delta T$ ( $\mu\text{s ft}^{-1}$ )	Velocidad del sonido		Impedancia acústica
	%		( $\text{ft}\cdot\text{s}^{-1}$ )	( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	MRayl
<b>Dolomita</b>	5 a 20	50,0 a 66,5	20000 a 15000	6,096 a 4,572	16,95 a 11,52
<b>Caliza</b>	5 a 20	54,0 a 76,9	18500 a 13000	5,639 a 3,962	14,83 a 9,43
<b>Arenisca</b>	5 a 20	62,5 a 86,9	16000 a 11500	4,877 a 3,505	12,58 a 8,20
<b>Arena</b>	20 a 35	86,9 a 111,1	11500 a 9000	3,505 a 2,743	8,20 a 6,0
<b>Lutita</b>	-	58,8 a 143,0	17000 a 7000	5,181 a 2,133	12,0 a 4,3

FUENTE: Nelson y Guillot, 2006.

ELABORADO POR: Santiago Sisalema.

### 1.8.5.2 Propiedades acústicas de los cementos

Nelson y Guillot (2006) mencionan que la respuesta acústica en hueco entubado depende de las propiedades del cemento utilizado, las cuales cambian a lo largo de su vida útil. La tabla 1.3 incluye las propiedades acústicas de varias formulaciones de cementos a condiciones de ambiente.

**TABLA 1.3 PROPIEDADES ACÚSTICAS DE CEMENTOS**

Tipo de lechada	Densidad (lbm/gal)	Tiempo (días)	Velocidad del sonido en el cemento (m/s)	Impedancia acústica MRayl	Cambio en la impedancia acústica por cada día (%)
<b>Neat Clase G</b>	15,8	1	3	5,68	0
		2	3,25	6,16	8
		7	3,4	6,44	13
<b>Látex + Clase G + microesferas de sílica</b>	11,2	1	1,65	2,21	0
		2	2,2	2,95	33
		7	2,5	3,36	52

Tabla 1.3. Continúa

Clase G + microesferas de sílica + 4% CaCl <sub>2</sub>	12	1	2,6	3,74	0
		2	2,8	4,03	8
		7	3	4,32	16
Clase G + solicato soluble	13,3	1	1,75	2,79	0
		2	2,2	3,51	26
		7	2,5	3,99	43
Clase G + hematita	19	1	3,3	7,59	0
		2	3,4	7,74	2
		7	3,53	8,04	6
36% de espuma	10	7	2,3	2,76	-
Sistema ultraliviano	8,61	7	2,79	2,87	-

FUENTE: Nelson y Guillot, 2009

ELABORADO POR: Santiago Sisalema

### 1.8.5.3 Propiedades acústicas de los fluidos

La evaluación ultrasónica debe tener registros correctos y adecuados de la impedancia acústica de los fluidos inmersos con el fin de obtener correctas diferencias entre los otros componentes de evaluación en el pozo (Nelson y Guillot, 2006).

La impedancia de un fluido puede ser determinado mediante la siguiente ecuación:

$$Z_{fluido} = B \rho_{fluido} \times V_{fluido} \quad (14)$$

Donde:

B= factor de corrección (normalmente entre 0,8 y 1,0).

$V_{fluido}$ = velocidad acústica a través del fluido.

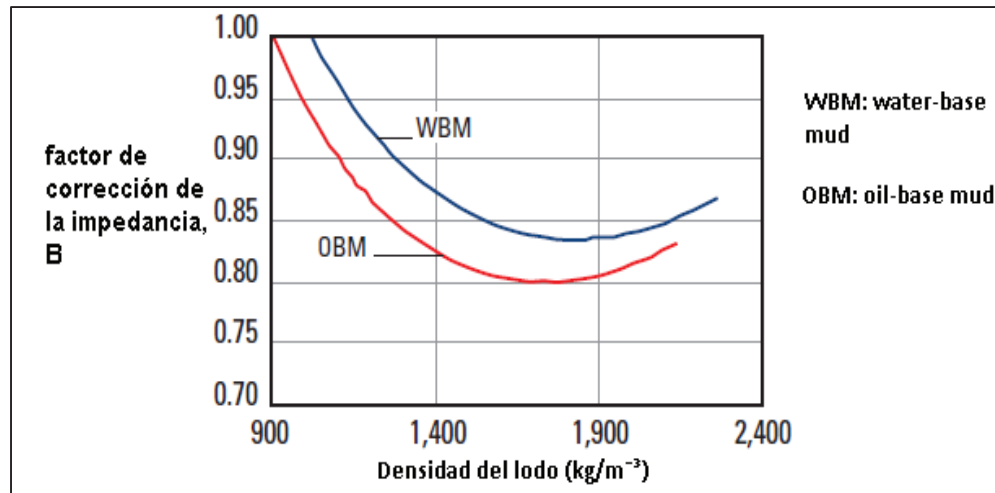
$Z_{fluido}$ = impedancia acústica.

$\rho_{fluido}$ = densidad estática del fluido

La atenuación del ultrasonido para un fluido de completación se convierte, a veces, en una limitante en las técnicas de interpretación debido a que incrementa con el aumento de la frecuencia y del contenido de sólidos; por ejemplo, los fluidos base aceite normalmente presentan mayor atenuación que los fluidos base agua de la misma densidad (Nelson y Guillot, 2006).

La figura 1.14 muestra una aproximación semi-empírica para B, la cual depende de las densidades de sólidos, líquidos y fracciones de volumen.

**FIGURA 1.14 FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA IMPEDANCIA PARA FLUIDOS BASE AGUA Y BASE ACEITE**



FUENTE: Nelson y Guillot, 2009.

Las tablas 1.4 y 1.5 muestran las propiedades acústicas de algunos tipos de fluidos, salmueras y aceites.

**TABLA 1.4 PROPIEDADES ACÚSTICAS PARA FLUIDOS HOMOGÉNEOS**

Material	Densidad		Lentitud ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )	Velocidad ( $\text{ft}/\text{sec}$ )	Impedancia acústica ( $\text{Mrayl}$ )
	( $\text{lbm}/\text{gal}$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			
Agua	8,33	998	206	4860	1,48
Agua + 10%NaCl	8,98	1075	193	5180	1,7
Agua + KCl	9,18	1100	189	5280	1,77
Agua de mar	8,56	1025	199	5020	1,57
Diésel	7,09	850	221	4530	1,17
Aire @ 3000 psi, 212 °F	1,59	190	780	1280	0,1

FUENTE:: Nelson y Guillot, 2009.

ELABORADO POR: Santiago Sisalema

**TABLA 1.5 PROPIEDADES ACÚSTICAS PARA VARIOS TIPOS DE FLUIDOS DE FONDO**

Material	Densidad		Lentitud ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )	Velocidad ( $\text{ft}/\text{sec}$ )	Impedancia acústica ( $\text{Mrayl}$ )	
	( $\text{lbm}/\text{gal}$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			Baja frecuencia	a 0,5 MHz
Fluidos base agua 1	12,6	1510	215	4660	2,14	1,85
Fluidos base agua 2	15,4	1850	216	4630	2,6	2,14
Fluido base aceite	7,79	933	231	4330	1,23	1,25
Lodo base aceite	12,6	1510	245	4070	1,87	1,54

FUENTE: Nelson y Guillot, 2009

ELABORADOR POR: Santiago Sisalema

### 1.8.6 EVALUACIÓN ACÚSTICA DEL CEMENTO

Los registros de cemento miden la pérdida de energía acústica que se propaga a través del casing y formación, así, una zona invadida o alguna alteración en la formación provoca cambios en las propiedades acústicas reflejadas en los registros en intervalos de tiempo (Smolen, J. 1995).

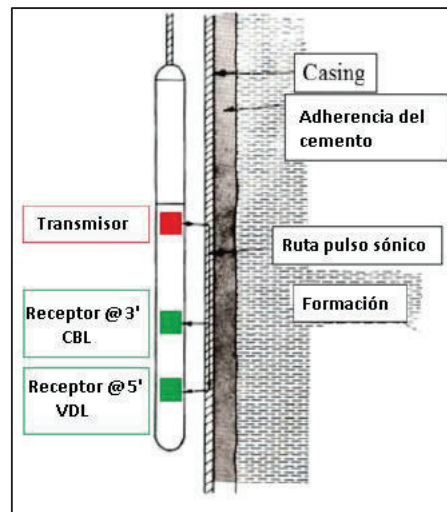
#### 1.8.6.1 Registro de adherencia del cemento (CBL)

El registro de adherencia de cemento o CBL (Cement Bond Log) es una herramienta acústica omnidireccional que, mediante un transmisor, emite pulsos acústicos a través de los materiales que rodean la herramienta y sus 2 receptores captan las medidas de amplitud y tiempos de las ondas acústicas (Espinoza 2009).

La interpretación de las señales en el CBL permiten identificar dos adherencias; la tipo cemento-casing y la tipo cemento-formación, además de una medida adicional que es el tiempo de viaje del sonido el cual confirma la presencia de cemento, correcta centralización de la herramienta y la adherencia cemento-casing.

La figura 1.15 muestra la herramienta CBL que consiste de un transmisor y dos receptores, el más cercano se ubica a 3 pies del transmisor y mide la amplitud, y el más alejado se ubica a 5 pies del transmisor y se usa para las grabaciones del tren de ondas (Bateman 2016).

**FIGURA 1.15 HERRAMIENTA CBL**



Fuente: Bateman, 2015

### 1.8.6.2 Principio físico del CBL

Nelson y Guillot (2006) refieren que el transmisor emite repetidamente disparos de energía acústica con una duración de 50  $\mu$ s con tasas de repetición entre 10 a 60 Hz dependiendo del diseño de la herramienta. La frecuencia de cada disparo es de alrededor de 20 kHz para herramientas de diámetro mayor (> 3 pulgadas) y cercano a 30 kHz para herramientas de menor diámetro (< 2 pulgadas).

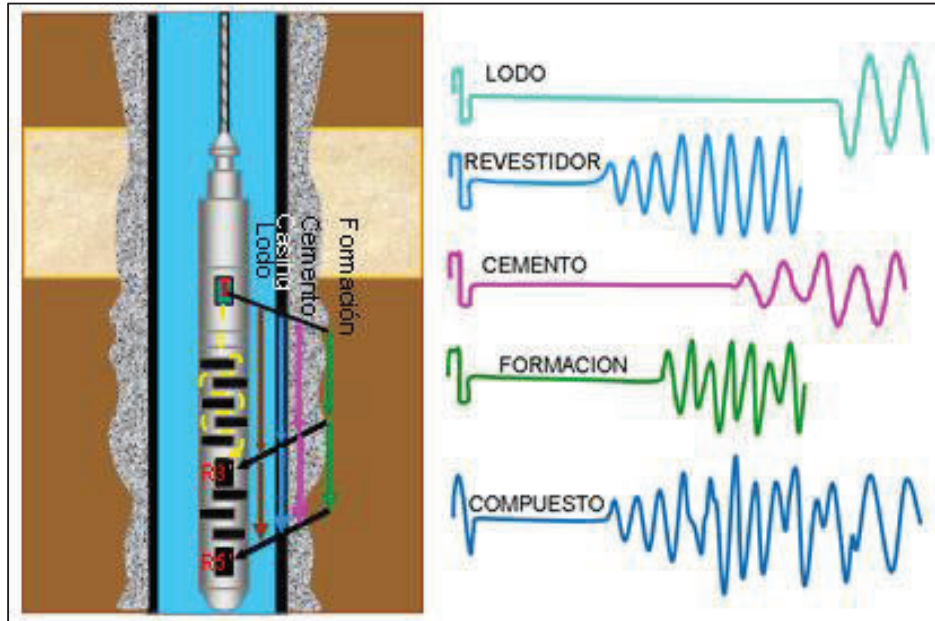
El transmisor crea un frente de ondas esférico que se expande en todas las direcciones, chocando en primera instancia con la pared del casing; parte de la energía se refracta de acuerdo a la ley de Snell por el acero, cemento y formación para posteriormente reflejarse a lo largo de los trayectos de transmisión. (Espinoza 2009).

Al tener factores de atenuación altos, el receptor de 3 pies permite obtener la máxima resolución vertical y, con el espaciado largo de 5 pies, se muestra la forma de onda completa de la respuesta en la formación (Espinoza 2009).



La fig. 1.16 muestra el comportamiento de las ondas que se generan en el pozo, entre ellas las de lodo, casing, cemento y formación.

**FIGURA 1.16 TIPOS DE ONDAS EN EL POZO**



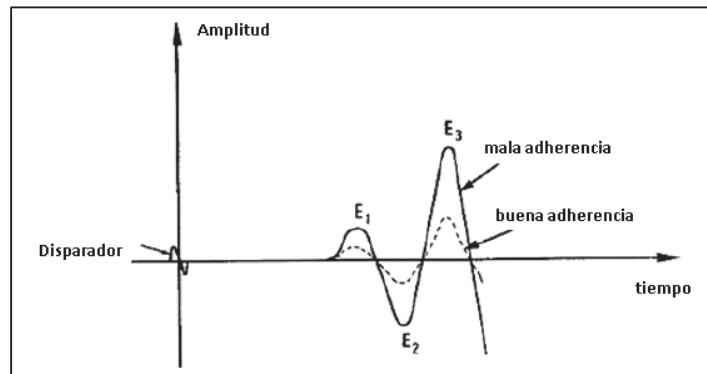
FUENTE: Frisch y Goodwin, 2009.

### 1.8.6.3 Amplitud

Smolen (2009) menciona que la curva de amplitud en el CBL es la medida de la amplitud de la señal receptada desde el casing. Debido a que el fluido de completación, peso, tamaño y material del casing no varían y si la herramienta se encuentra centralizada, la señal acústica a través de la tubería deberá ser siempre la misma y su única afectación en su amplitud se deberá por la presencia de cemento.

La forma de arriba de la onda se muestra en la figura 1,17, donde se han nombrado a los picos como  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ , etc., siendo  $E_1$  el primer arribo positivo y  $E_2$  el arribo negativo.

**FIGURA 1.17 ESQUEMA DE SEÑAL RECIBIDA PARA CASING CON BUENA Y MALA ADHERENCIA**



FUENTE: Bateman, 2016.

Si no existe cemento, la amplitud para  $E_1$  es mayor y su atenuación disminuye, por el contrario, si el cemento se encuentra sellando el casing, la amplitud de  $E_1$  es menor y su atenuación incrementa (Bateman, 2015).

La amplitud se muestra en milivoltios en el registro, representando bajos valores en milivoltios para un buen cemento y valores altos en milivoltios resultado de una pobre cementación. Típicamente las amplitudes se registran en tracks de 0-50 mV (Bateman, 2015).

#### 1.8.6.4 Tiempo de tránsito

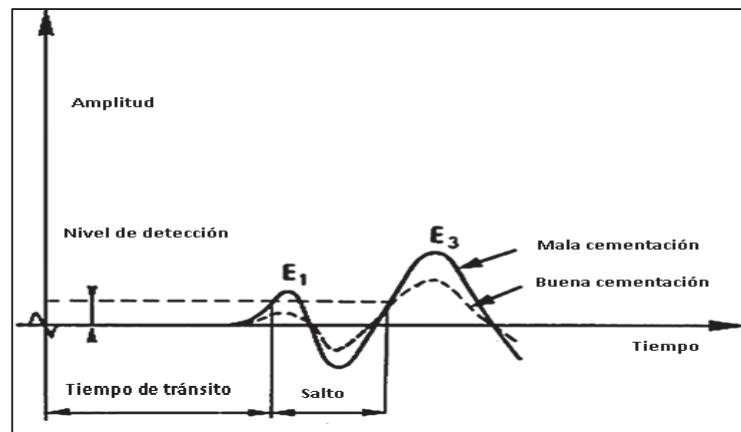
La curva de tiempo representa el tiempo requerido para la detección del primer arribo con suficiente amplitud en el receptor el cual, al usar una escala sensible, permite determinar la centralización de la herramienta y los efectos de formaciones rápidas.

Para este procedimiento se utiliza el sistema de detección de compuerta flotante, donde dicha compuerta se mantiene abierta desde el disparo de ondas hasta la recepción del pulso cuya amplitud sea lo suficientemente fuerte para alcanzar la configuración del nivel de umbral o threshold, convirtiéndose en el primer arribo acústico. Este valor de detección de umbral se lo establece como un valor menor al 10% de la amplitud de la tubería libre, pero se lo puede configurar según el usuario. (Espinoza, 2009).

Una mala configuración del threshold puede provocar un salto de ciclos o cycle skipping si se le aplica un valor muy alto, o la activación prematura de la compuerta si se le aplica un valor muy bajo. (Espinoza, 2009; Mosquera, 2015).

La figura 1.18 muestra el efecto de salto de ciclo donde, al ubicar mal el punto de detección de umbral podríamos configurar amplitudes muy altas como correctas cuando en realidad representarían una mala cementación (Bateman, 2016).

**FIGURA 1.18 SALTO DE CICLO O CYCLE SKIPPING**

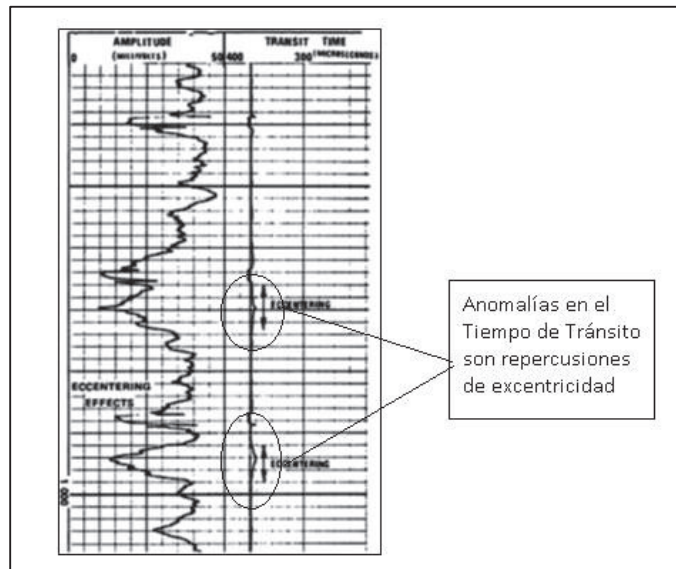


FUENTE: Bateman, 2016

Otra de las aplicaciones del tiempo de tránsito es la detección de la excentricidad de la herramienta en el casing. Este efecto de descentralización trae consigo arribos muy rápidos de señal, que pueden llegar a ser confundidos como el efecto de formaciones rápidas por lo que, con el fin de evitar errores en la determinación de la excentricidad, se debe conocer previamente la litología envuelta en el análisis (Frisch y Goodwin, 2009).

La figura 1.19 muestra el efecto de la excentricidad de la herramienta, donde el tiempo de tránsito disminuye con la amplitud, indicando mala centralización.

**FIGURA 1.19 RESPUESTA EN EL TT POR EFECTO DE LA EXCENTRICIDAD**



Fuente: Smolen. 1995.

### 1.8.7 REGISTRO DE DENSIDAD VARIABLE (VDL)

El Registro de Densidad Variable o VDL (Variable Density Log) es la representación de la onda total o compuesta medida en el receptor ubicado a 5 pies del transmisor.

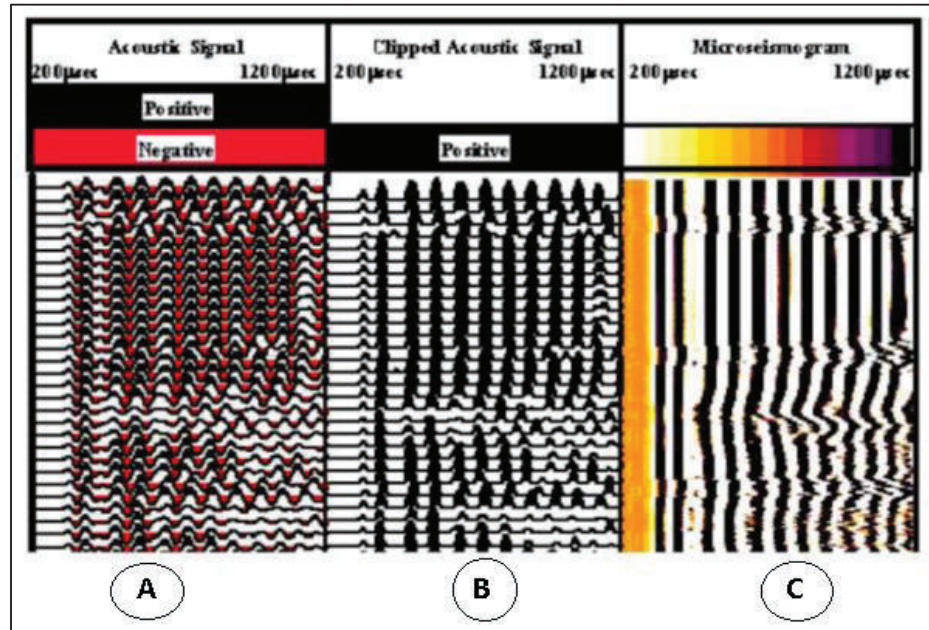
Frisch y Goodwin (2009), en la figura 1.20 muestra la señal acústica en una escala de 200 a 1200  $\mu$ seg resaltando los picos positivos y negativos (A), posteriormente se realiza un procesamiento para eliminar los picos negativos (B) para finalmente obtener una imagen en 2D denominado microsismograma (C) o MSG (microseismogram) en la que se muestra las curvas de actividad en el cemento y formación.

Espinoza (2009), menciona que entre la variedad de condiciones que pueden afectar la calidad de respuesta de la herramienta tenemos:

- Microanillos
- Canalización
- Tipo de cemento y resistencia a la compresión
- Excentricidad de la herramienta
- Anillo de cemento inferior a  $\frac{3}{4}$  de pulgada

- Burbujas de gas en el fluido de completación

**FIGURA 1.20 REPRESENTACIÓN DE LAS ONDAS EN EL CBL**



FUENTE: Spooner, 2009.

### 1.8.7.1 Microanillos

Smolen (1995) denomina microanillos a la pequeña separación existente entre el casing y el cemento debido a la falta de adherencia, entre las razones por las que se provocan los microanillos tenemos:

- Liberación de presión después del fraguado provocando contracción de la tubería.
- Expansión termal durante el fraguado.
- Contracción termal del casing por la adición de fluidos más fríos.
- Contracción del casing por la reducción del peso del fluido en el perfilaje.

Además, como buena práctica de operación, se sugiere que capas externas aplicadas al casing como: grasas, aceites, ceras e incluso paños industriales deben ser removidos correctamente debido a que podrían afectar la cementación, provocando microanillos (Spooner, 2009).

### **1.8.7.2 Canalización**

Nelson y Guillot (2009) mencionan que una canalización es un desplazamiento irregular de lodo en el cemento que deja un espacio entre el casing y la formación, reduciendo la efectividad de aislamiento.

Frisch y Goodwin (2009) comentan que la canalización durante la cementación puede ser resultado de:

- Pobre centralización del casing.
- Fallas durante el movimiento del casing en la circulación y cementación.
- Asentamiento de sólidos en la parte baja del anular.
- Entrada de fluido o gas antes del fraguado.

### **1.8.7.3 Tipo de cemento y resistencia a la compresión**

Espinoza (2009) respecto a los cementos de baja y alta resistencia a la compresión menciona que:

Los cementos con baja resistencia a la compresión, es decir, aquellos con bajo módulo de Young y coeficiente de Poisson, hacen que el factor de atenuación de la señal acústica sea bajo, mientras que los cementos cuya resistencia a la compresión es elevada exhiben un factor de atenuación alto. Para una interpretación precisa del perfil de cemento, es de vital importancia conocer el tipo de cemento utilizado, su resistencia a la compresión desarrollada, y si se lo modificó durante las operaciones de cementación, de terminación o de producción. Un cemento de baja resistencia a la compresión puede, de todas formas, brindar un sello hidráulico y aislamiento de zona, siempre que no se lo someta a fuerzas que pudieran romperlo (p. 28).

### **1.8.7.4 Excentricidad de la herramienta**

La propagación omnidireccional de la onda exige que, como garantía de una respuesta adecuada, la herramienta se encuentre en una posición centralizada con respecto al pozo para obtener arribos simultáneos desde todas las direcciones. Se ha comprobado que con una excentricidad de sólo  $\frac{1}{4}$  de pulgada se pueden provocar reducción de amplitud de hasta un 50% por el desfase en la

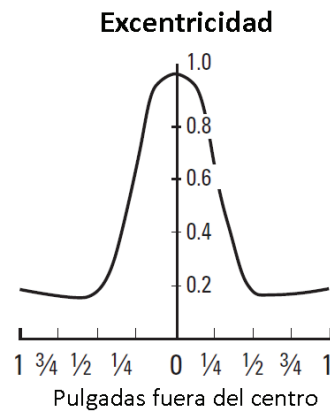
recepción, lo que podría inducir a una interpretación errónea en la calidad de adherencia del cemento. (Espinoza, 2009).

La figura 1.21 muestra el % de reducción de amplitud con respecto a la excentricidad medida en pulgadas.

#### 1.8.7.5 Anillo de cemento inferior a $\frac{3}{4}$ de pulgada

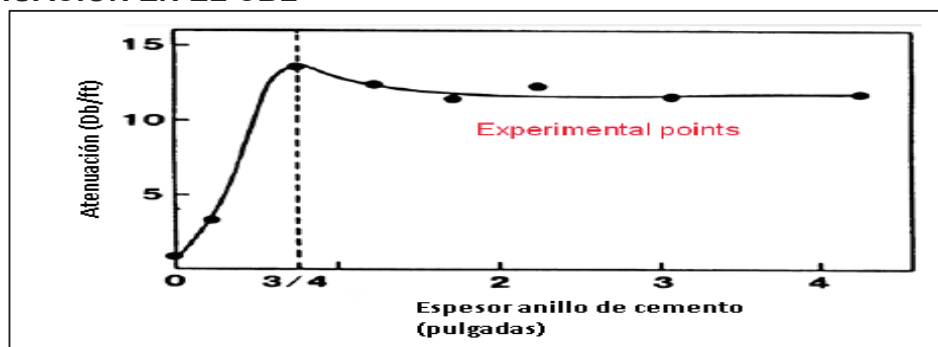
Mediante la figura 1.22, se explica que anillos de cemento inferiores a  $\frac{3}{4}$  de pulgada producen efectos considerables en la atenuación del CBL provocando amplitudes más elevadas que las esperadas para una buena adherencia (Espinoza, 2009; Spooner, 2009).

**FIGURA 1.21 EFECTO DE LA EXCENTRICIDAD**



FUENTE: Nelson y Guillot

**FIGURA 1.22 EFECTO DEL ESPESOR DEL CEMENTO SOBRE LA ATENUACIÓN EN EL CBL**



FUENTE: Spooner, 2009.

#### **1.8.7.6 Burbujas de gas en el fluido de completación**

La señal acústica puede ser atenuada debido a la invasión de burbujas de gas en el fluido del pozo, e incluso pueden eliminarla por completo. La solución a este problema consiste en aumentar la altura hidrostática, eliminando así las burbujas de gas (Espinoza, 2009).

### **1.8.8 EVALUACIÓN ULTRASÓNICA DE CEMENTO.**

Herramientas de imagen ultrasónicas han sido ampliamente utilizadas en registros a hueco abierto y recientemente en huecos entubados. Su funcionamiento se basa en el funcionamiento de dos transductores, el primario actúa como emisor rotatorio de ondas ultrasónicas que viajan a través del fluido y se reflejan desde la pared del casing o formación; y un transductor secundario fijo que está en contacto directo con el fluido del pozo (Bateman, 2015).

Las herramientas ultrasónicas normalmente requieren de un contraste de impedancia en el material detrás del casing para diferenciar cemento de fluido, comúnmente en lechadas complejas o espumosas éstos valores de impedancia son mas bajos que el agua, lodo de perforación, fluido espaciador e incluso pueden alcanzar al de gas libre; razón por la cual los datos e imágenes pueden ser confundidos con fluido detrás del casing cuando en realidad se ha logrado alcanzar el sello (Frisch y Goodwin, 2009).

#### **1.8.8.1 Herramienta Ultrasónica**

La herramienta ultrasónica es un transductor que emite pulsos de energía ultrasonido en una banda de 195 a 650 kHz, provocando una resonancia en el espesor del casing y atravesando hasta poca porción del cemento (Bateman, 2015).

Según Nelson y Guillot (2009), de las herramientas ultrasónicas podemos obtener cuatro tipos de mediciones:

- Condición del casing
- Radio interno del casing
- Espesor del casing
- Impedancia acústica del material detrás del casing

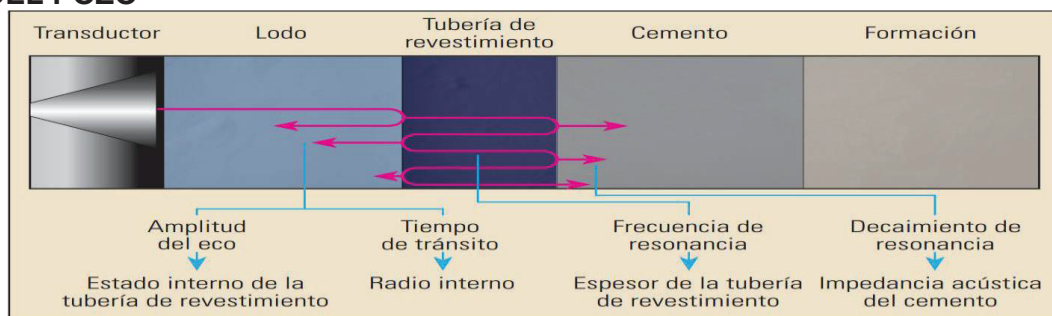


La figura 1.23 muestra las mediciones de la herramienta ultrasónica y la actuación de los pulsos en su transferencia sobre diferentes medios.

### 1.8.8.2 Principio físico de la herramienta ultrasónica

Graham, W; Silva, C; Leimguhler, J; y Kock, A (1997), respecto al principio físico de la herramienta mencionan que el modelo consiste en la reflexión y transmisión de los pulsos ultrasónicos en múltiples capas; la cabeza o escáner rota a 10 revoluciones por segundo y utiliza una técnica de emisión de pulsos escalonados que producen 100 disparos ultrasónicos por profundidad muestreada que puede ser de 1, 3 o 6 pulgadas, obteniendo una cobertura horizontal de 3,6°.

**FIGURA 1.23 PROPAGACIÓN DE PULSOS ULTRASÓNICOS EN EL FONDO DEL POZO**



FUENTE: Hidalgo, 2012

La señal del segundo transductor se refleja en un plato plano, obteniendo un tiempo de viaje doble y, al estar en contacto directo con el fluido del pozo permite obtener el tiempo de retraso usado como control de calidad

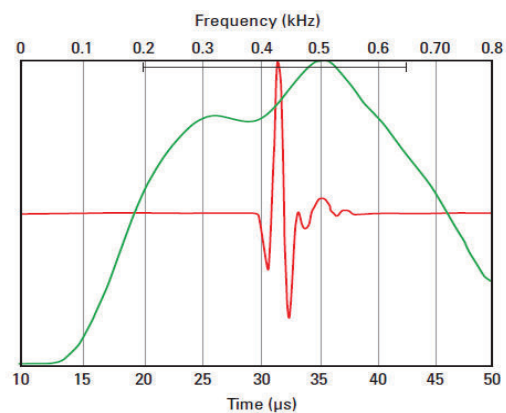
La impedancia acústica ( $Z$ ) del material ocupado en el anular es derivado del decaimiento de la señal reflejada. La amplitud del primer arribo es constante para un diámetro y peso determinado del casing, pero el decaimiento de la onda (onda de resonancia) es función de la densidad del material.

El principal componente de la onda empieza con la resonancia en el espesor del casing, una transformada de Fourier es aplicada para determinar la frecuencia de resonancia del casing, la cual es directamente proporcional a su espesor.

La señal ultrasónica emitida por el transductor excita el casing y se debe asegurar en que la frecuencia de resonancia tenga la suficiente amplitud para el procesamiento, ya que dicha frecuencia disminuye con el aumento del espesor del casing.

La figura 1.24 muestra al pulso de energía en el rango de 200 a 650 kHz en el espectro de frecuencia, correspondiente a la resonancia en el espesor de un casing de 0.18 a 0.6 pulgadas.

**FIGURA 1.24 PULSO ULTRASÓNICO Y SU FRECUENCIA**



FUENTE: Wireline & Perforating Documento Técnico, 2014.

### 1.8.8.3 Impedancia acústica

La impedancia acústica ( $Z$ ) es la resistencia que presenta un medio a la propagación de ondas sobre éste, es decir, una forma de disipación de la energía de ondas desplazadas en un medio (Hidalgo 2012).

La señal de resonancia es analizada para calcular el espesor del casing y el material detrás de él. El espesor se determina por la frecuencia de resonancia:

$$f_0 = \frac{1}{\Delta t} = \frac{V_{acero}}{2h_{casing}} \quad (15)$$

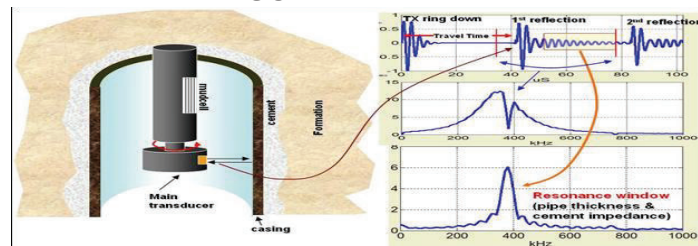
Donde  $f_0$  es la frecuencia de resonancia,  $V_{acero}$  es la velocidad acústica en el casing y  $h_{casing}$  es el espesor del casing.

Correcciones aplicadas en tiempo real son llevadas a cabo para cálculos de impedancia que incluyen correcciones por lodo, curvatura de tubería y correcciones por espesor de casing, la cual se muestra en la siguiente fórmula:

$$Z = a_0 + b_0 \cdot C_t + c_0 \cdot \log(\text{Sum}) + d_0 \cdot C_t \cdot \log(\text{Sum}) \quad (16)$$

Donde  $z$  es la impedancia del material detrás del casing,  $C_t$  es el espesor del casing,  $\text{Sum}$  es la suma de las máximas amplitudes del medio ciclo en la ventana de resonancia  $a_0$ ,  $b_0$  y  $c_0$ ; y  $d_0$  es el coeficiente calculado de las simulaciones teóricas de datos conocidos de impedancia y espesor de casing. La Figura 1.25 muestra la ventana de resonancia para los cálculos de espesor de casing e impedancia del cemento.

**FIGURA 1.25 VENTANA DE RESONANCIA**



FUENTE: Wireline & Perforating Documento Técnico – Halliburton

#### 1.8.8.4 Mapa de impedancia

La figura 1,26 muestra la paleta de valores de impedancia para varios tipos de cemento, incluyendo ligeros y fluidos. La impedancia es mostrada en una escala de 0 a 5 MRayls y a su vez es mostrada en el registro en el mapa de impedancia para su posterior interpretación (Thomas, Smith, Williams y Hamilton, 2015).

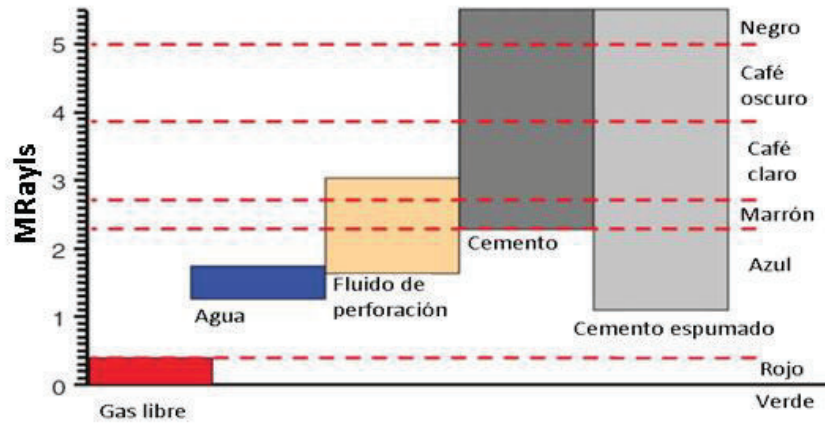
#### 1.8.8.5 Limitantes en los registros ultrasónicos

Hidalgo (2012); Frisch y Goodwin (2009) mencionan que entre las limitantes que se presentan en la evaluación de calidad de cemento con el método ultrasónico tenemos:

- Evaluación somera, únicamente hasta la interface cemento – casing.

- La similitud en los valores de impedancia para materiales ubicados detrás del casing puede generar confusiones, sobre todos en aquellos que presentan bajas densidades.
- Lecturas erróneas en lodos de alta viscosidad

**FIGURA 1.26 PALETA DE VALORES DE IMPEDANCIA**



FUENTE: Thomas, 2015

## CAPÍTULO 2

# MANUAL PARA LA INTERPRETACIÓN DE REGISTROS DE CEMENTACIÓN PARA POZOS CEMENTADOS CON SISTEMAS ELÁSTICOS

### 2.1 CEMENTOS ELÁSTICOS Y REGISTROS DE ADHERENCIA

Los cementos de propiedades elásticas presentan varios desafíos en su interpretación debido a la ductilidad y ligereza de su mezcla y dependen además de la herramienta utilizada para su registro.

#### 2.1.1 CBL

Los registros convencionales de adherencia CBL miden la amplitud y atenuación radial de la señal acústica en un receptor ubicado a 3 pies del emisor; suponiendo que el anillo de cemento es mayor a 0,75 pulgadas de espesor tenemos que:

- El módulo de corte del cemento es la variable primaria que afecta la atenuación.
- La atenuación es proporcional a la densidad del cemento.
- La atenuación es inversamente proporcional al espesor del casing.
- La amplitud medida depende del espesor del casing.
- La amplitud medida depende de la atenuación de fluido del pozo.

Las lechadas elásticas no son consideradas de baja densidad al ser comparadas con cementos espumados, pero sí presentan un bajo módulo de corte debido a su elasticidad, lo que lleva a presentar una más baja tasa de atenuación que un cemento convencional clase G de la misma densidad, llevando a una interpretación pesimista con los procedimientos normales.

La medida principal de un registro de adherencia puede ser comparada con golpear una campana con un martillo; al no tener nada detrás, éste resonará pero

con un sólido cubriéndolo el sonido se atenuará. Entre más sólido es el medio recubriendo la campana, su módulo de corte será mayor, su atenuación aumentará y resonará menos. Las lechadas elásticas en su diseño presentan un bajo módulo de corte, por lo tanto son menos sólidos y resonará con mayor fuerza, deduciendo mala cementación cuando en realidad se encuentra con buen aislamiento y adherencia.

Los registros de adherencia de cemento deben ser calibrados en tubería libre y mostrar la correspondiente amplitud o atenuación en base a la carta CBL-3 (figura 2.1) del Halliburton Chart Book EL 1001 para fluidos base agua y para fluidos con diferentes densidades deben responder a la carta CBL-4 (figura 2.2).

Además del receptor de 3 pies, la herramienta CBL presenta un segundo receptor a 5 pies que permite obtener la forma de onda completa o también llamada VDL. El VDL provee una indicación cualitativa de la adherencia cemento formación y la amplitud un dato cuantitativo del casing – cemento.

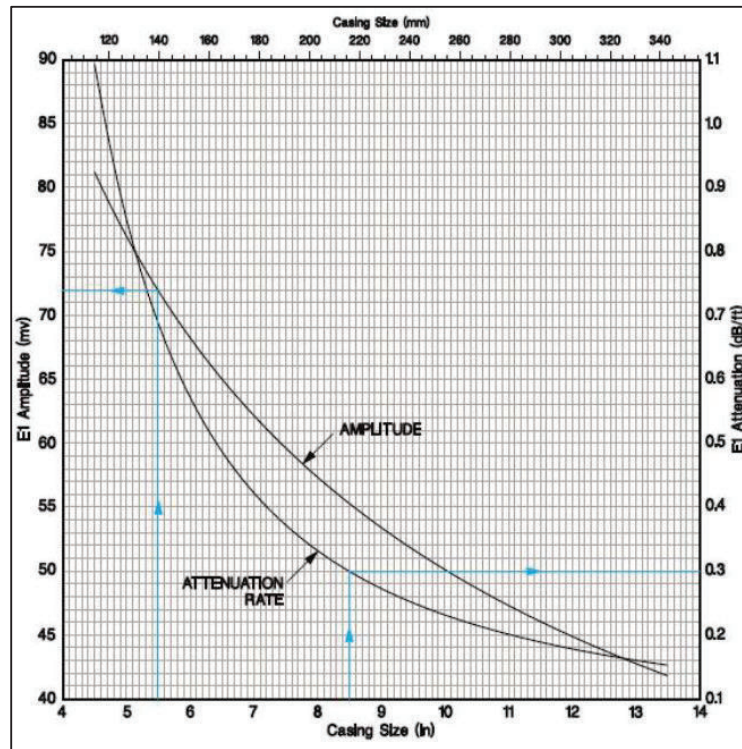
### **2.1.2 ULTRASÓNICOS**

Las herramientas ultrasónicas emiten pulsos a una frecuencia de entre 250 kHz a 350 kHz con el fin de medir la impedancia acústica del material detrás del casing. Estas herramientas no requieren calibración en campo ya que presentan auto calibración con las medidas de amplitud de la primera reflexión.

La impedancia acústica se define como el producto de la densidad por la velocidad, por lo que la impedancia acústica del cemento es proporcional a su densidad.

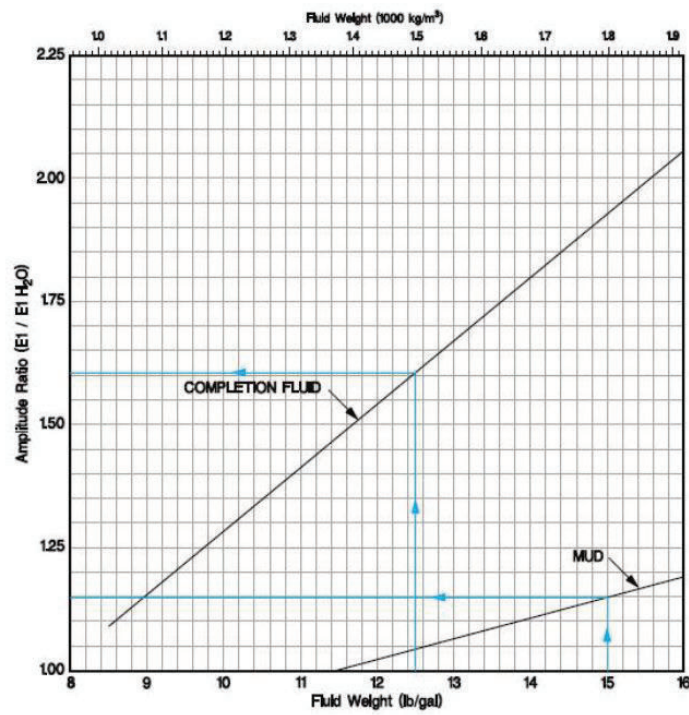
Lechadas ligeras y especialmente las espumadas pueden tener valores incluso menores al agua, mientras los cementos elásticos no se destacan por su baja densidad presentan en cambio baja velocidad, reduciendo su impedancia volviendo incierta la interpretación de resultados.

FIGURA 2.1 CARTA CBL-3



Fuente: Spooner, 2009

FIGURA 2.2 CARTA CBL-4



Fuente: Spooner, 2009.



### **2.1.3 ANÁLISIS DE DERIVADA**

Es un análisis novedoso que permite la evaluación de la varianza, por ejemplo, los líquidos a lo largo de la columna son muy homogéneos y no varían de muestra a muestra vertical, por el contrario, los cementos de baja densidad aunque presenten la misma impedancia promedio no son homogéneos y presentan alta varianza y alta derivada siendo muy notorio ya que las herramientas tienen alta resolución con evaluación cada 0.3 pulgadas.

## **2.2 PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN**

### **2.2.1 PROCEDIMIENTOS GENERALES DE CORRIDA DE CASING Y CEMENTACIÓN**

Entre las consideraciones a tener en cuenta tenemos:

- El casing debe ser adecuadamente centralizado y recíprocado para asegurar el correcto desplazamiento de la lechada y obtener el espesor adecuado del cemento, el cual debe ser al menos de  $\frac{3}{4}$  de pulgada.
- Preflujos y surfactantes deben ser usados para la limpieza del hoyo con el fin de obtener una correcta adherencia del cemento al casing.
- Recubridores de tubería deben ser limpiados antes de ser bajados. Inhibidores de corrosión como grasas, aceites, ceras e incluso paños de limpieza dejados por error afectan la respuesta actuando como microanillos que no pueden ser cerrados con presión.
- Raspadores para la remoción de algún elemento contaminante en el pozo.
- Magnetos y canastas deben ser bajados para limpiar residuos metálicos ya que cualquier metal fino puede afectar las reflexiones del pulso e incluso el CCL podría detectarlos obteniendo una interpretación de registro con ruido.

### **2.2.2 CALIBRACIÓN DE HERRAMIENTAS**

#### **2.2.2.1 CBL**

Idealmente, la calibración debe darse en tubería libre del mismo tamaño, peso y grado del intervalo a registrar a las condiciones de fondo ya que la temperatura y



presión pueden influenciar en la calidad de señal y además alterar los acoples de la cara del transductor y el fluido del pozo.

Si no existiera la posibilidad de encontrar tubería libre debido a que existe tubería cementada desde la superficie puede calibrarse en una tubería libre de diferente tamaño tratando de igualar las condiciones de fondo y usar la carta de conversión CBL-3 la figura 2.1.

Si la tubería libre no está disponible en ningún caso, la herramienta debe tener una calibración Máster desde la base con presurización en el pozo de prueba; y finalmente si no existiera alguna facilidad para llevar a cabo la calibración, la herramienta tiene un protector o sleeve de aluminio la cual puede presurizarse hasta los 500 psi que sería suficiente y utilizar un software de conversión para la tasa de atenuación llevada al acero.

#### **2.2.2.2 Ultrasonica**

Como se mencionó anteriormente, la herramienta ultrasónica no necesita calibración.

#### **2.2.3 REGISTRO DE TUBERÍA LIBRE**

Para la herramienta CBL es necesario un registro de alrededor de 200 pies para el chequeo de respuesta en tubería libre a una velocidad de 30 pies por minuto (fpm).

#### **2.2.4 CENTRALIZACIÓN**

Una buena centralización de la herramienta es requerida para obtener datos válidos tanto para el CBL como la ultrasónica y, aunque los pozos desviados representan un problema, la configuración de la sarta debe configurarse de tal manera que los accesorios centralizadores no provoquen fricción.

#### **2.2.5 REGISTRO CON PRESIÓN**

Los registros con presión se realizan por dos importantes razones: para proveer un buen acople acústico al fluido del pozo cuando la presión hidrostática es insuficiente y evaluar posibles microanillos; esto para la sección repetida y con

presiones requeridas entre los 1000 a 3000 psi, por lo que una adecuada planeación en superficie es requerida.

## **2.2.6 PROBLEMAS ESPECÍFICOS DE LAS HERRAMIENTAS**

### **2.2.6.1 CBL**

Las correcciones por fluido son requeridas para la CBL y deben ser usadas en tiempo real para los valores correctos de amplitud y guardarlas en archivo .LAS.

### **2.2.6.2 Ultrasonica**

Existen diferentes tipos de transductores que, de acuerdo a las características a evaluar, cumplen con los requerimientos de obtención de registros de calidad, como son: diámetro interno del casing (ID), espesor del casing, presión y temperatura del pozo y tipo de fluido a ser utilizado.

Las herramientas ultrasónicas utilizan un principio de reflexión de ondas sobre superficies planas para el cálculo de la impedancia acústica, las cuales se obtienen teóricamente en ID mayores a 7 pulgadas, para el caso de diámetros internos menores, el haz reflejado tiende a ser una parábola, aumentando la fuerza del primer arribo, por lo que se realizan correcciones en la medida de la impedancia tal como se muestra en la figura 2.3.

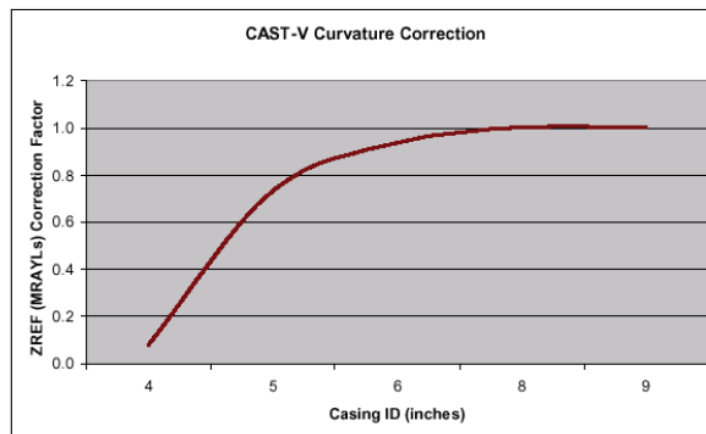
Los mapas de impedancia acústica son presentados en modo orientado, es decir, en el registro la parte inferior del casing es mostrada en el centro del mapa y la parte inferior a los lados y para ello la herramienta posee acelerómetros de los que se puede comprobar su funcionalidad en una posición orientada del pozo.

El tiempo de tránsito o TT es un medidor de control de calidad para el primer arribo de la onda y es además un indicador de la centralización de la herramienta. Para un ID y diámetro externo (OD) dados, además del dato de tiempo de retraso para un fluido, las compañías de servicios han creado cartas y tablas para distintos valores; si se presenta el caso de no coincidencia.

La figura 2.4 presenta un ejemplo de tiempo de tránsito y amplitud para un liner de 7" 26#, donde el TT, mostrado en el lado izquierdo, se estimaba en 235  $\mu$ s y

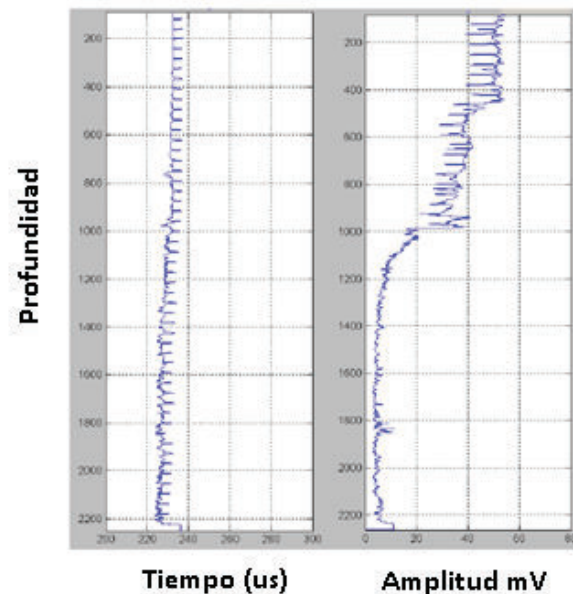
notándose además la tendencia a disminuir ligeramente producto del cambio de comportamiento del lodo con la profundidad, volviéndose mas densos. Otro de los puntos a tener en cuenta son los picos formados debido a la respuesta en los collares del casing, los cuales deben correlacionarse con el CCL y chevrones en el VDL.

**FIGURA 2.3 CORRECCIONES EN LA IMPEDANCIA DE ACUERDO AL TAMAÑO DEL CASING**



FUENTE: Wireline & Perforating Documento Técnico, 2014.

**FIGURA 2.4 COMPARACIÓN DE PROFUNDIDAD CONTRA AMPLITUD Y TIEMPO DE TRÁNSITO**



FUENTE: Wireline & Perforating Documento Técnico, 2014.

La amplitud provee información cuantitativa de la adherencia del cemento a la tubería mientras que el VDL provee información cualitativa de la adherencia tanto cemento – casing como cemento - formación.

La amplitud debe ser revisada para la consistencia de la amplitud de referencia para el tamaño de tubería, para el caso del ejemplo de la figura 2 en la parte derecha, donde se leen 50 mV en la parte superior, debe ser interpretada como tubería libre, ya que el estándar para este tamaño de tubería es 62 mV; la diferencia existente entre el valor real y el estándar fue por la presencia del casing de 9-5/8" detrás de la tubería.

Otro medio que permite corroborar datos es la evaluación del VDL el cual debe mostrar fuertes arribos de casing sin arribos de formación, en caso de presentar lecturas de formación con arribos de casing la herramienta podría estar sobrecalibrada.

## **2.3 INTERPRETACIÓN**

### **2.3.1 CANALES**

Los efectos de un canal dependen de su tamaño, pero a la vez puede darse el caso extremo de tener la mitad de tubería libre y la otra completamente adherida. Debido a que el CBL es un promedio de la medida de amplitud podría darse el caso de tener la mitad de amplitud como tubería libre y la otra amplitud como completamente adherida. Asimismo, el VDL obtiene los arribos de casing y formación que, en casos extremos, podrían ser la respuesta de tener la mitad de adherencia al casing y también a la formación, por estas razones el CBL no puede ser utilizado en la determinación de un canal.

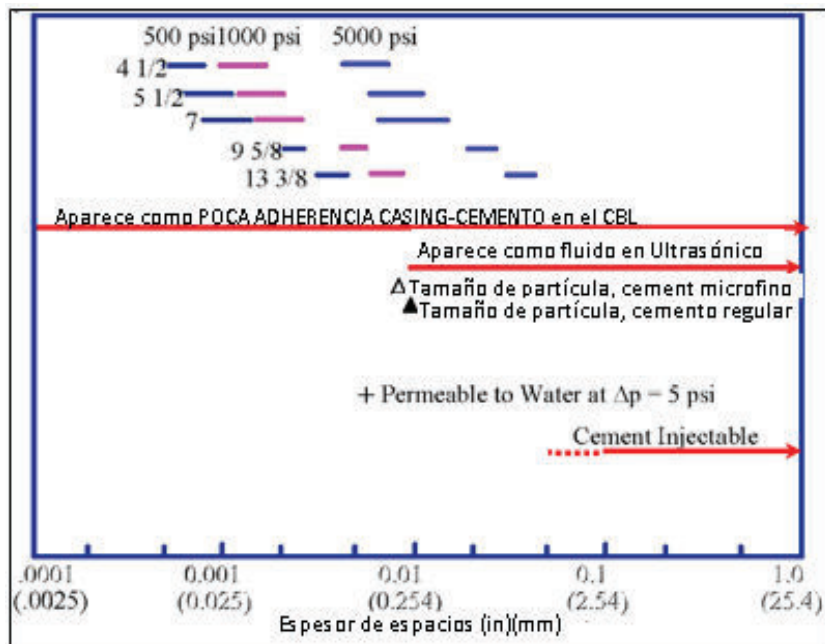
Los registros ultrasónicos proveen un mapa circunferencial de impedancia acústica donde los canales pueden identificarse en base a la resolución de la herramienta. Debe existir una marcada separación en las curvas máximas y mínimas de impedancia acústica y una baja región de impedancia vertical, donde dicha separación puede ser ruido o mala data.

### 2.3.2 MICROANILLOS

Dependiendo del tamaño del vacío, el fluido inmerso y el intervalo intervenido, un micro-anillo puede proveer un sello hidráulico aunque afecte la respuesta acústica de los registros.

La figura 2.6 muestra la relación entre el tamaño del micro-anillo, la cantidad de presión requerida para cerrar los micro-anillos y cuando éstos aparecen en los registros.

**FIGURA 2.5 RELACIÓN ENTRE TAMAÑO DE CASING Y PRESIÓN REQUERIDA PARA MICROANILLOS**



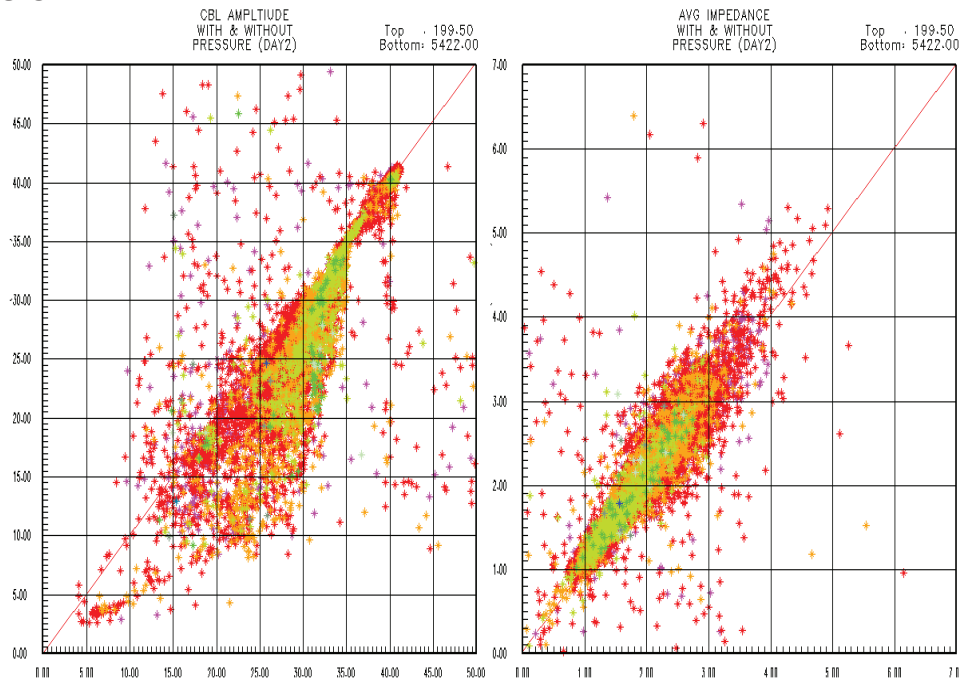
FUENTE: Wireline & Perforating Documento Técnico, 2014

El efecto del micro-anillo en el CBL es permitirle resonar y obtener alta amplitud y por ende fuertes arribos en el VDL, tal como ocurre con la presencia de canales; el efecto en la herramienta ultrasónica es reducir la impedancia acústica pero pueden diferenciarse de canales por su distribución en el mapa de cemento y por la pequeña separación en las máximas y mínimas amplitudes.

La figura 2.7 compara la amplitud del CBL con presión en el eje Y y sin presión en el eje x para el FIGURA en la derecha y la impedancia acústica en la herramienta

ultrasonica con presión para el eje Y y sin presión para el eje X en el FIGURA de la derecha. El CBL muestra reducción de la amplitud con presión mientras que la impedancia acústica muestra tan sólo una pequeña diferencia indicando la presencia de micro-anillos pero con tamaños entre 0,0001 y 0,01 pulgadas.

**FIGURA 2.6 FIGURA COMPARATIVO PARA DATOS DE CBL CON Y SIN PRESIÓN**



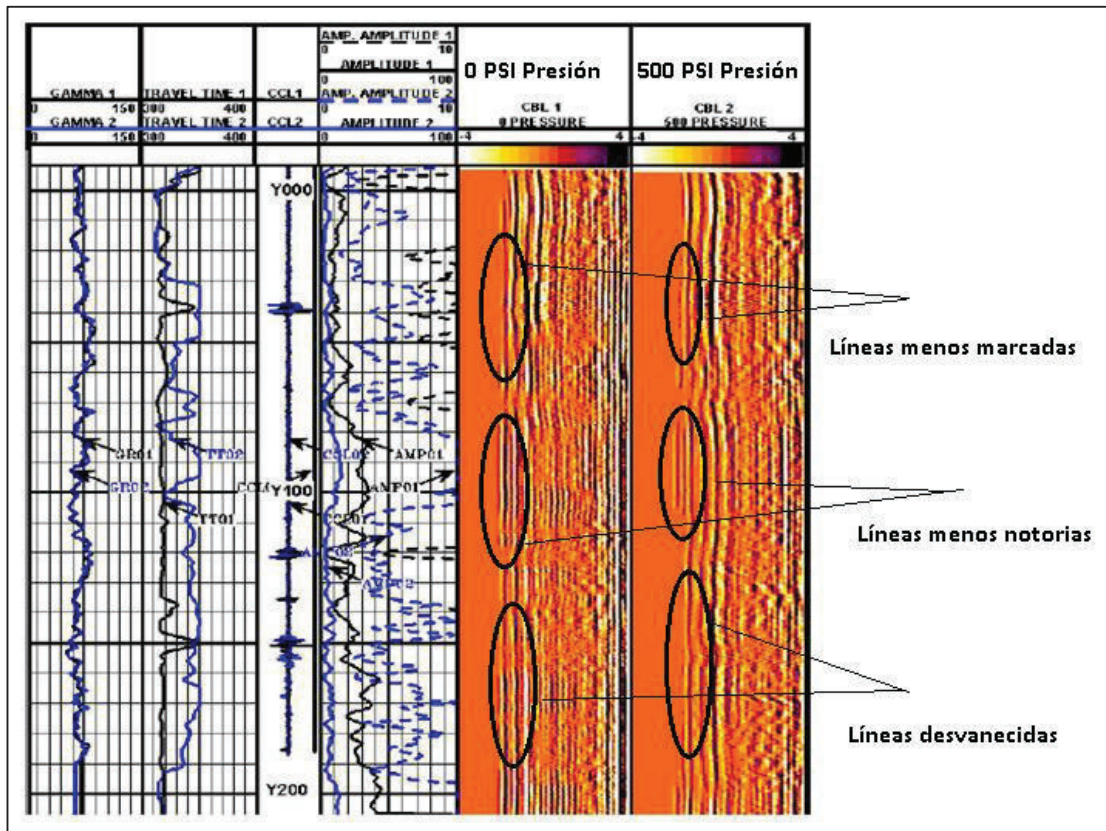
FUENTE: Wireline & Perforating Documento Técnico, 2014.

Comparando la onda en el CBL en la figura 2.8 con y sin presión se demuestra que, al aplicar 500 psi de presión, las amplitudes bajan en magnitud, mostrando curvas menores a la original corroborando la presencia de microanillos.

### 2.3.2.1 Formaciones rápidas

Son aquellas formaciones con velocidad de propagación de ondas mayores al acero, por ejemplo carbonatos, anhidritas y halitas; los arribos pueden ocurrir antes del arribo de tubería en cuyo caso la medida de amplitud no tendrá relación a la adherencia del cemento sino a la atenuación en la formación. En esos casos el análisis cualitativo no puede realizarse debido a que los arribos de formación implican presencia de cemento.

**FIGURA 2.7 DETERMINACIÓN DE MICROANILLOS EN EL SISMOGRAMA**



FUENTE: Wireline & Perforating Documento Técnico, 2014.

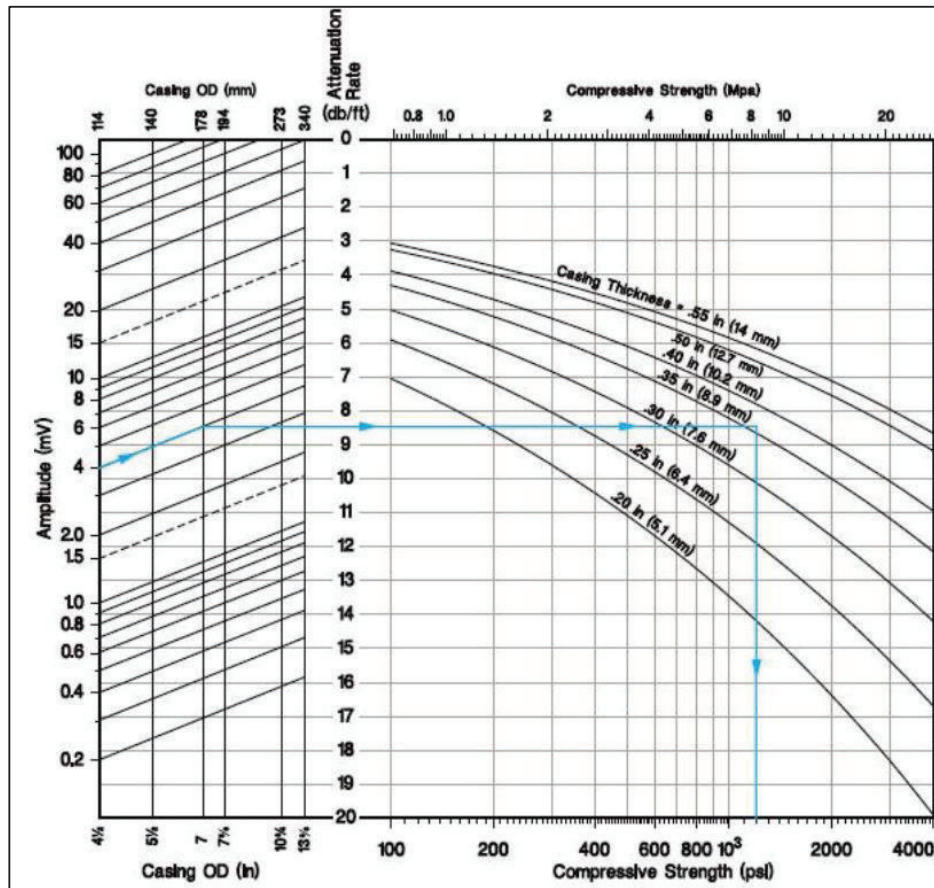
La herramienta ultrasónica es efectivamente inmune a formaciones rápidas ya que no está en su radio de alcance impidiendo que se afecten sus mediciones.

### 2.3.2.2 Fuerza de compresión del cemento e índice de adherencia

La carta CBL-1 (figura 2.9) permite convertir las mediciones de amplitud, atenuación e impedancia acústica a fuerza de compresión de cemento y, una vez determinado, transformarlo en Índice de Adherencia el cual es un indicador lineal con un valor de 0 para tubería libre y 1 para adherencia total.



FIGURA 2.8 CARTA CBL-1



FUENTE: Wireline & Perforating Documento Técnico, 2014.

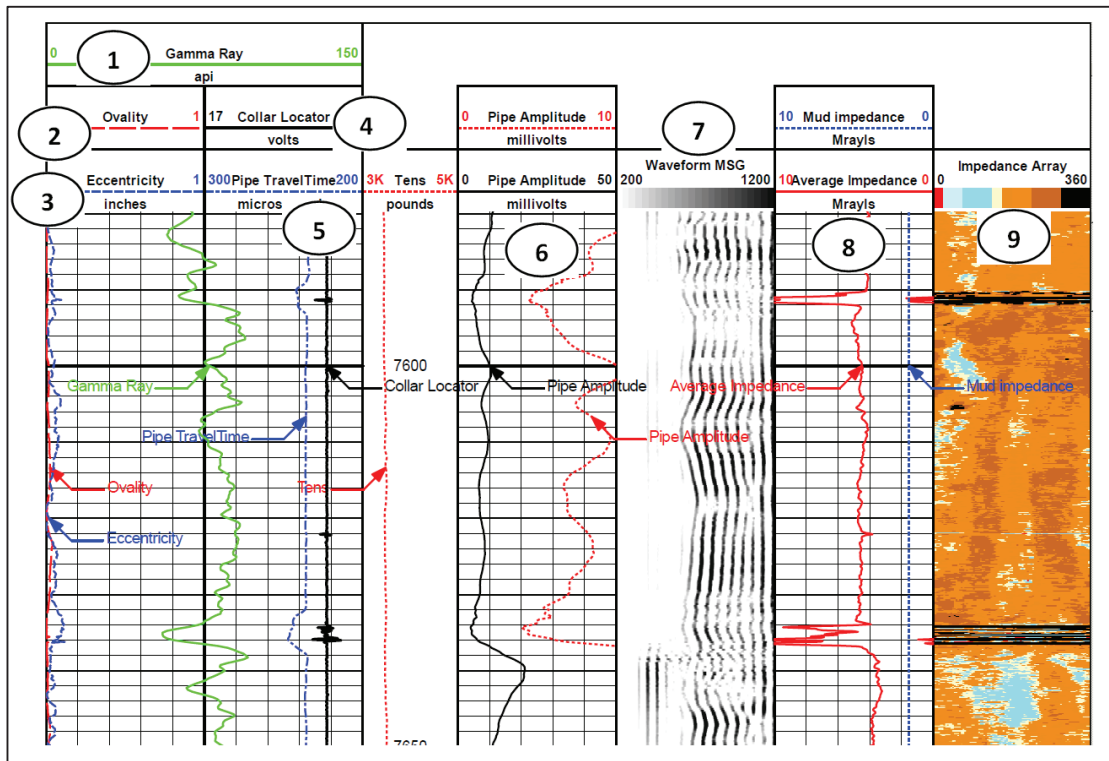
La desventaja del Índice de Adherencia radica en el principio físico empleado, ya que es un promedio circunferencial de adherencia, lo mismo ocurre para la herramienta ultrasónica que mide la impedancia acústica promedio usada para la relación de fuerza de compresión del cemento.

## 2.4 PISTAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE REGISTROS DE CEMENTACIÓN

La figura xx muestra un registro convencional de cementación con la enumeración de las pistas más importantes descritas a continuación:



**FIGURA 2.9 REGISTRO CONVENCIONAL DE CEMENTACIÓN**



### 1. Gamma Ray

El registro de Gamma Ray cumple primariamente la medición de la radioactividad de las rocas, pero para un registro de cementación su función principal se convierte en un método primario de correlación de profundidad ya que permite ubicarnos con certeza en la posición requerida comparándola con la mostrada por registros eléctricos previos a hueco abierto o de LWD.

### 2. Excentricidad

Tal como se describió previamente, una herramienta centralizada permite obtener información fiable, mientras que al mostrarse descentrada en tan sólo  $\frac{1}{4}$  de pulgada la reducción de su amplitud es cercana al 50%; por lo que éste parámetro es fundamental para una correcta validación de la información.

### 3. Ovalidad

La finalidad de la ovalidad es mostrar si la tubería revestida presenta alguna anomalía en su forma, aplicable para evaluaciones cemento en pozos con

tuberías desgastadas por corrosión o sobrepresionadas por colapso; éste dato se obtienen mediante la herramienta ultrasónica por la medición constante de la velocidad de propagación y la impedancia del acero.

#### 4. Localizador de collares CCL

El localizador de collares es otro parámetro de medición de profundidad, su principio radica en la medición del hierro ubicado en las juntas de casing, a manera de imán, correlacionando la profundidad; además con su presencia se justifica algunos cambios típicos ocurridos por el aumento de la densidad del material en esos puntos.

#### 5. Tiempo de tránsito

El tiempo de tránsito es el medidor primario en la determinación de la centralización de la herramienta, a partir de ella se consiguen los valores de excentricidad de la pista 2 y como se mencionó en este mismo capítulo, su calibración se realiza en tubería libre. Si la herramienta muestra inconsistencias en la medición del tiempo de tránsito, éstos se afectan automáticamente los valores de excentricidad y, si su valor sobrepasa las 0,25 pulgadas, la información obtenida se anula.

#### 6. Amplitud

El track de amplitud se divide en 2 escalas para mostrar información más amigable, su escala se encuentra, de manera primaria entre los 0 a 50 mV, y con el fin de tener un control visual más rápido, se muestra otra pista con una escala menor, de 0 a 10 mV, ya que típicamente una buena cementación no sobrepasa éstos valores.

#### 7. Tren de ondas ó VDL

Como se mencionó en el capítulo anterior, el tren de ondas es producto de la refracción de ondas en el pozo receptadas y grabadas en el VDL; el tener ondas fuertes demuestra la falta de adherencia del cemento, dejando a la tubería su capacidad de resonar y por el contrario, al tener una buena adherencia entre la

tubería y cemento, la tubería no resonará o lo hará en menor proporción y serán visibles las ondas reflejadas desde la formación.

#### 8. Impedancia

En la pista 8 se muestran 2 tracks de evaluación que a su vez sirven de control de calidad, el primero muestra la impedancia del fluido de fondo, el cual debe permanecer constante si no existieran anomalías y el segundo muestra la impedancia promedio azimutal, tal como se explicó en el capítulo anterior, producto de la densidad del material ubicado detrás del casing. Todos estos datos se obtienen de la medición de la herramienta ultrasónica.

#### 9. Escala de Impedancia

La escala de impedancia es la representación gráfica de los datos obtenidos por la herramienta ultrasónica, para ello se utiliza la paleta mostrada en la figura 1.26, y se muestran en su escala respectiva de colores. Cabe recalcar que la herramienta puede realizar hasta 100 disparos por cada pie de evaluación, por los que se puede identificar los lugares en donde la impedancia es más baja o alta, pudiendo obtener colores claros y oscuros en una misma sección de evaluación y lo que se muestra en la pista 8 es únicamente el promedio azimutal.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS REGISTROS DE CEMENTACIÓN

Éste capítulo se desarrolla con la finalidad de describir los resultados obtenidos a partir de los registros de cementación para pozos cementados tanto con lechada elástica y lechada convencional. Los pozos cementados con sistemas convencionales corresponden a los pozos A1 y A2 mientras que los pozos cementados con sistemas elásticos corresponden a los pozos A3 y A4.

#### 3.1 ANÁLISIS DEL POZO A1

El pozo A1 fue perforado en 4 secciones; 20", 16", 12-1/4" y 8-1/2", dejando la formación Hollín como único objetivo en la sección de 8-1/2".

La tabla 3.1 resume las arenas de interés y la profundidad MD a la que se localizan.

**TABLA 3.1 PROFUNDIDAD MD DE LAS ZONAS DE INTERÉS - POZO A1**

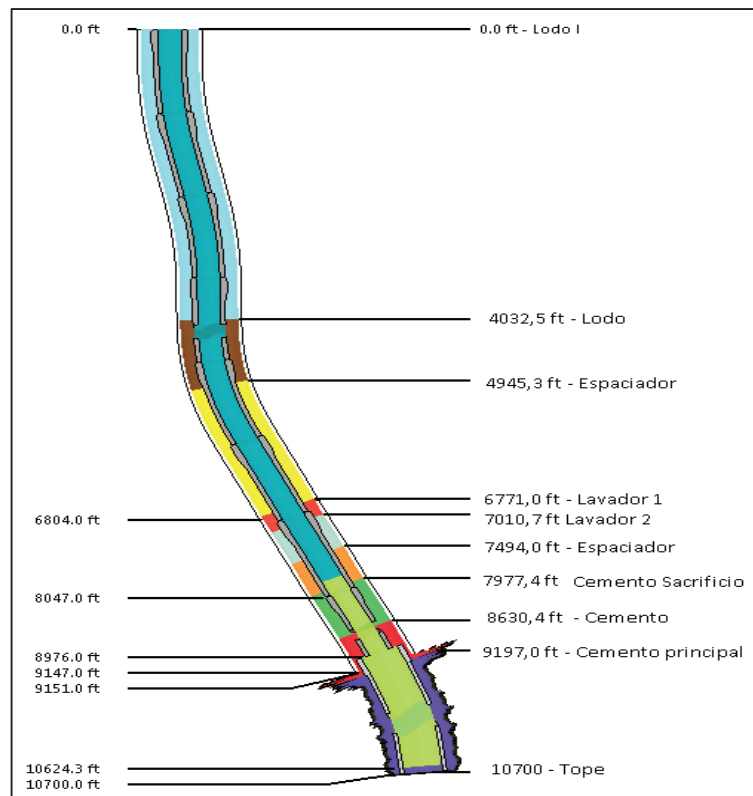
Sección	Formación	Profundidad (MD)
12-1/4"	Basal Tena	9318
8-1/2"	Hollín Superior	10459
	Hollín Inferior	10517

Fuente: Cementing - Halliburton  
Elaborado por: Santiago Sisalema

##### 3.1.1 EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN POZO A1

La evaluación de cemento se realizará para la arena Hollín del pozo A1, proyectada en la sección de 8-1/2". Este pozo utilizó un colgador de liner de 7" de OD, 6,276" ID y 26 lbm/ft de peso desde los 8976' hasta los 10700' MD para su completación, por lo que se utilizó la lechada principal del tipo convencional desde los 9197' hasta la profundidad de asentamiento mostrado en la figura 3.1.

**FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE CEMENTACIÓN - POZO A1**



Fuente: Cementing - Halliburton  
Elaborado por: Santiago Sisalema

Es importante mencionar que como control de calidad es necesaria esta información previa, ya que al saber concretamente las profundidades en las que se disponen los diferentes tipos de cemento se podrá atender a la calidad de respuesta de las herramientas.

### 3.1.1.1 Basal Tena

El intervalo comprendido entre 9326' y 9400' MD muestra la prospección de la zona de interés mediante registros eléctricos (Anexo A.1). La figura 3.2 es el resultado del registro de cemento, el primero con operación normal y el segundo con 600 psi de presión, para ambos se evidencia una muy buena adherencia de la tubería con el casing, arrojando valores de amplitud entre 2 y 3 mV, el microsismograma muestra una fuerte señal de arribos de formación y nulos

arribos de tubería, lo cual se correlaciona con el mapa de impedancias que muestra colores oscuros corroborando la presencia de cemento asociados a los valores de impedancia, los cuales están en el orden de 6 y 7 MRaysls, demostrando el sello hidráulico de la zona

Como se mencionó en capítulos previos, el procesamiento de Evaluación Avanzada permite evaluar de una forma más efectiva y detallada la calidad del cemento con las herramientas sónica y ultrasónica, detectando los menores cambios en la composición del fluido detrás del casing.

La figura 3.3 muestra la Evaluación Avanzada para la zona prospectiva, en la pista 3 se muestran 2 curvas, la primera llamada FCBIF que mide la calidad de adherencia proveniente de la herramienta ultrasónica y la FCBI que proviene del procesamiento de Evaluación Avanzada; para este caso, la calidad de adherencia varía entre 0,93 y 1 (donde 1 representa una adherencia del 100%).

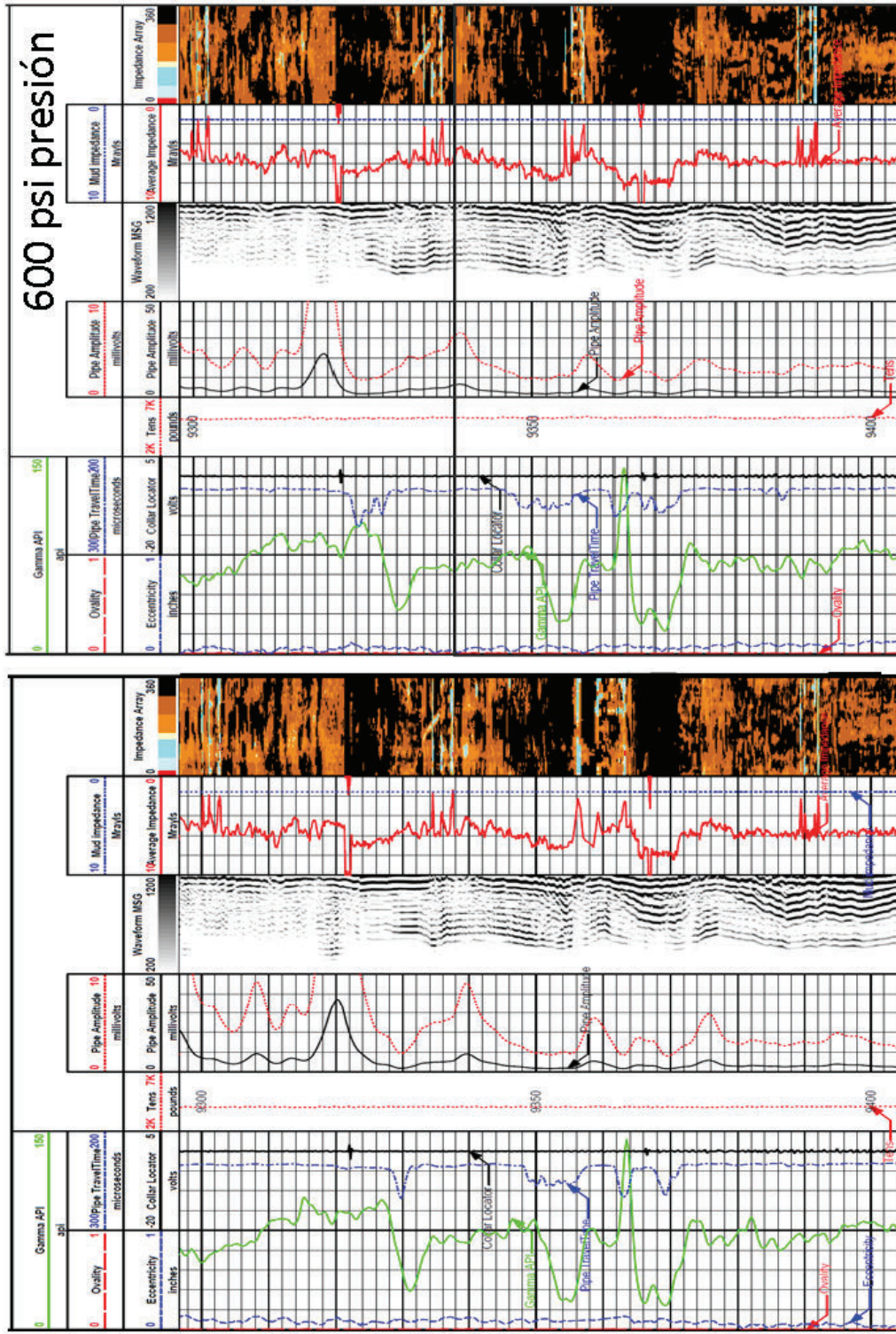
Las pistas 7 y 8 muestran el mapa de cemento, distinguiéndose entre volumen de cemento (color naranja), cemento contaminado (color verde) y volumen de fluido (color celeste); para este caso el volumen de cemento en la zona de interés alcanza hasta un 100%, lo que resulta concluyente para la evaluación y toma de decisiones finales.

## **3.2 ANÁLISIS DEL POZO A2**

El pozo A2 fue perforado en 4 secciones: 20", 16", 12-1/4" y 8-1/2", donde las zonas de interés se ubicaron en las secciones de 12-1/4" y 8-1/2", las cuales se encuentran resumidas en la tabla 3.2.

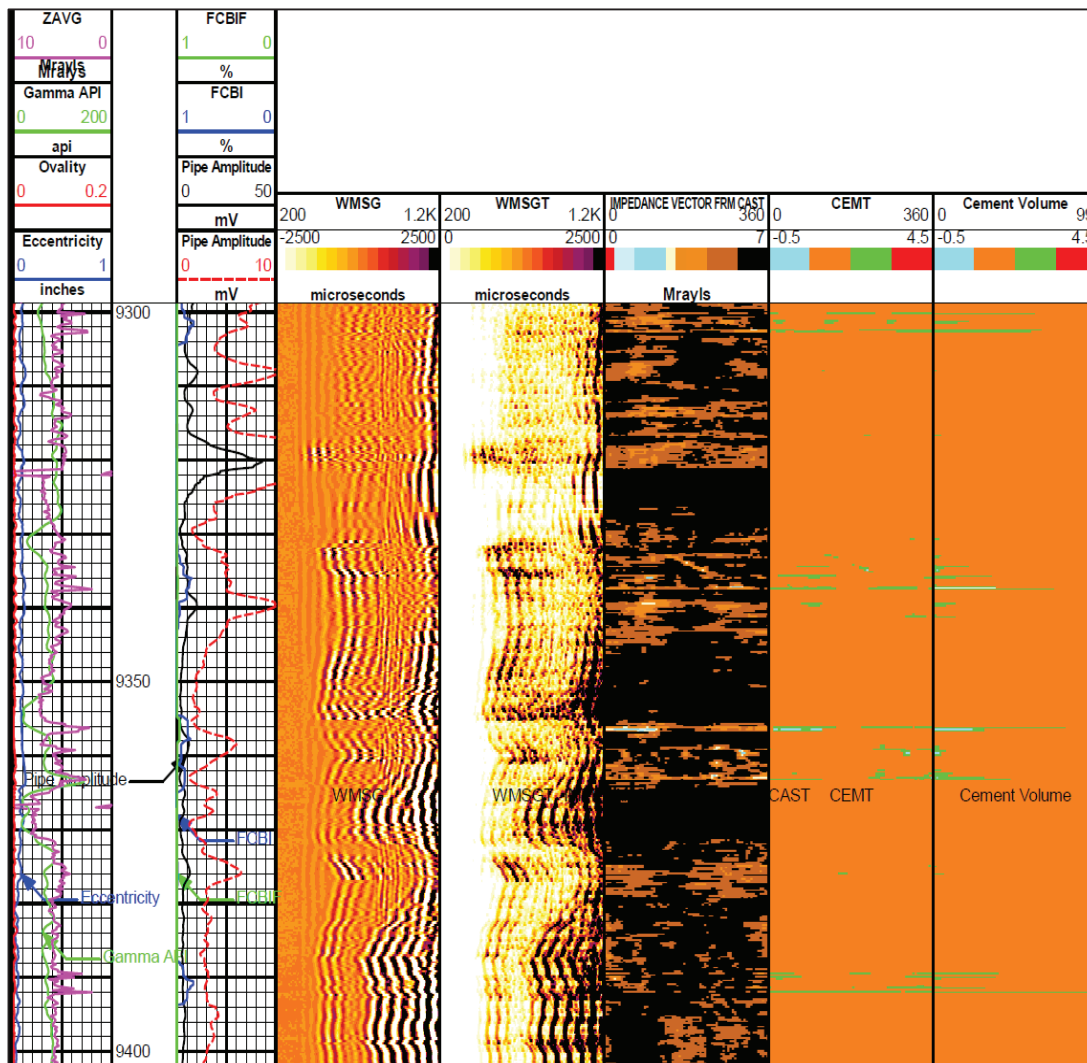


FIGURA 3.2 REGISTRO DE CEMENTO - POZO A1 CON Y SIN PRESIÓN - ARENA BASAL TENA



FUENTE: Wireline & Perforating  
 ELABORADO POR: Santiago Sisalema

**FIGURA 3.3 INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A1 - ARENA BASAL TENA**



FUENTE: FRS - Wireline & Perforating  
 Elaborado por: Santiago Sisalema

**TABLA 3.2 PROFUNDIDAD MD DE LAS ZONAS DE INTERÉS - POZO A2**

Sección	Formación	Profundidad (MD)
12-1/4"	Basal Tena	9327,36
	U Superior	9908,32
	U Inferior	9946,17
8-1/2"	Hollín Superior	10454,99
	Hollín Inferior	10491,14

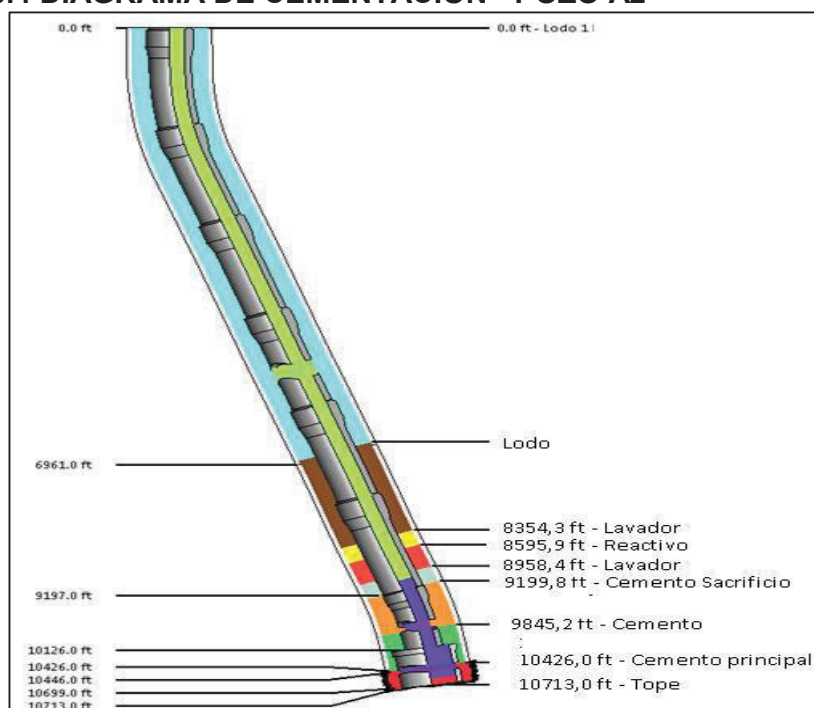
FUENTE: Cementing Halliburton  
 ELABORADO POR: Santiago Sisalema



### 3.2.1 EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN POZO A2

La evaluación de la cementación se realizó para las arenas Basal tena y Hollín del pozo A2, como objetivos en las secciones de 12-1/4" y 8-1/2". Este pozo utilizó un colgador de liner de 7" de OD, 6,276" ID y 26 lbm/ft de peso desde los 10126' hasta los 10713' MD para la completación de la última sección, por lo que se utilizó la lechada principal del tipo convencional desde los 10426' hasta la profundidad de asentamiento tal como lo demuestra la figura 3.4.

**FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE CEMENTACIÓN - POZO A2**



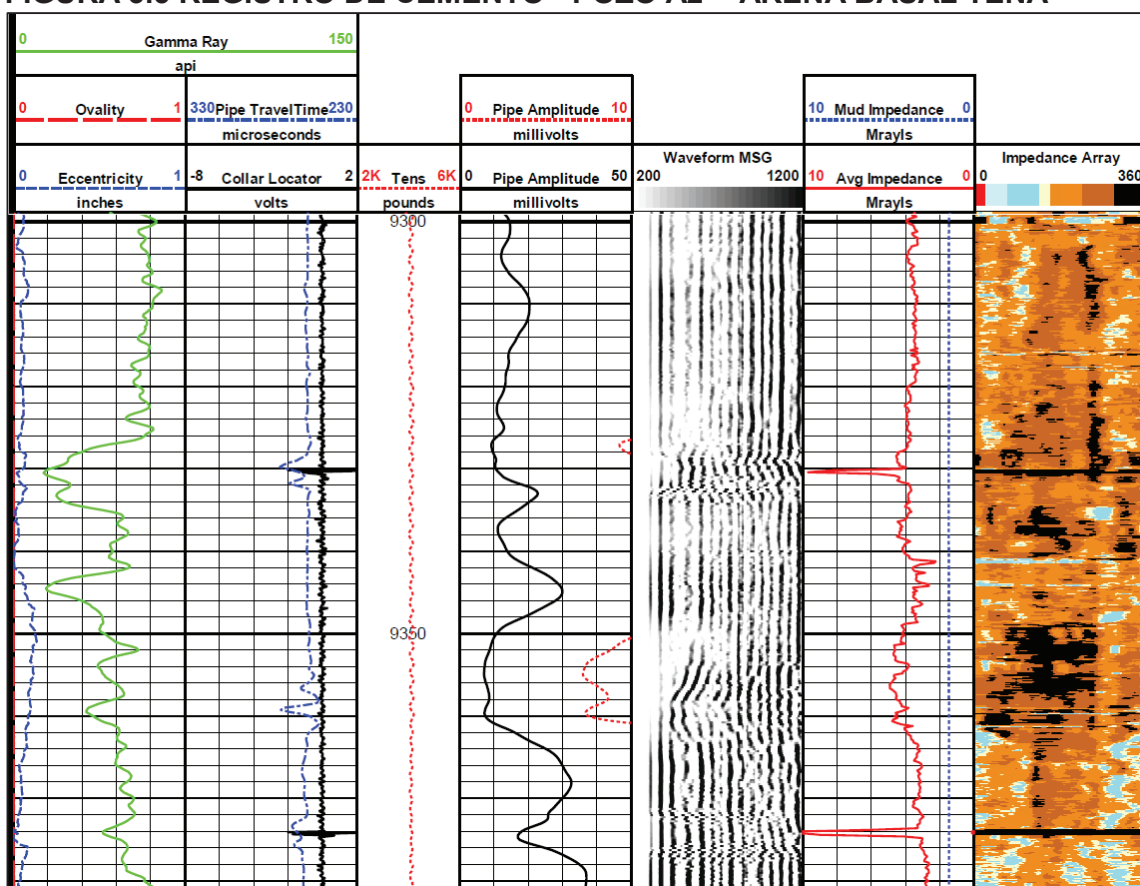
FUENTE: Cementing Halliburton  
ELABORADO POR: Santiago Sisalema

#### 3.2.1.1 Arena Basal Tena

La arena Basal Tena se encuentra localizada entre los 9300' y 9370' MD, correspondiente a la sección de 12-1/4", tal como lo demuestran los registros LWD mostrados en el Anexo 2.2. La figura 3.5 muestra el registro de cementación del cual se observa baja adherencia entre tubería y cemento con valores de amplitud mayores a 10 mV, el microsismograma muestra señal fuerte de arribos de tubería y formación, correlacionado con el mapa de impedancia que muestra

colores claros como evidencia de fluido detrás del casing, sobre todo en la base de la arena, aunque la predominancia siga en los colores oscuros a lo largo de la zona evaluada.

**FIGURA 3.5 REGISTRO DE CEMENTO - POZO A2 - ARENA BASAL TENA**

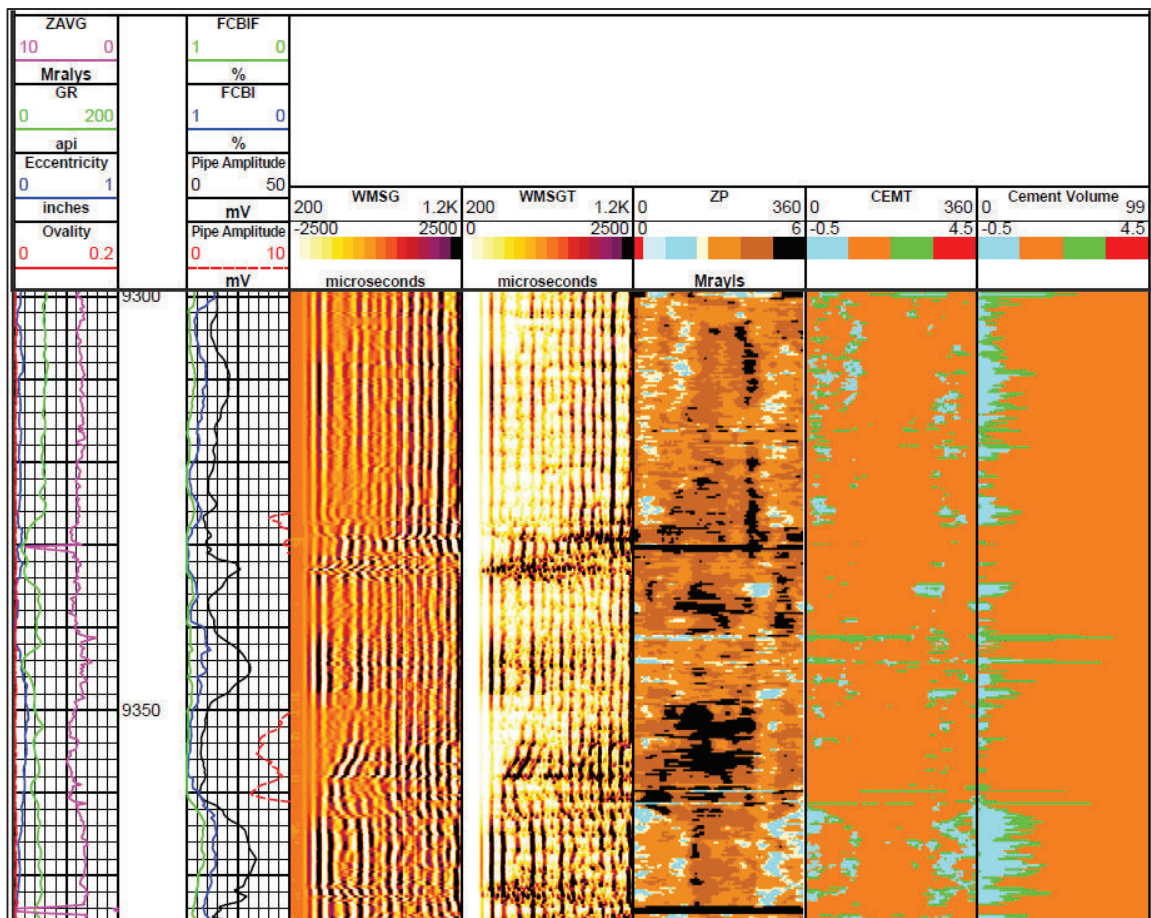


FUENTE: Wireline & Perforating  
ELABORADO POR: Santiago Sisalema

La figura 3.6 muestra el resultado de la Evaluación Avanzada para la arena Basal Tena del pozo A2 en la sección 12-1/4"; las curvas de adherencia se representan en la tercera pista tanto para la herramienta ultrasónica como para la resultante del procesamiento de Interpretación Avanzada con resultados variantes entre 0,9 y 1 (donde 1 representa el 100% de adherencia).

En las pistas 7 y 8 se representa el mapa de cemento el cual muestra que el fluido indicado en el mapa de impedancia es en cierta parte cemento contaminado. El resultado final es una proporción promedia de 90% de cemento, 5% de cemento contaminado y el restante 5% es fluido.

**FIGURA 3.6 INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A2 - ARENA BASAL TENA**

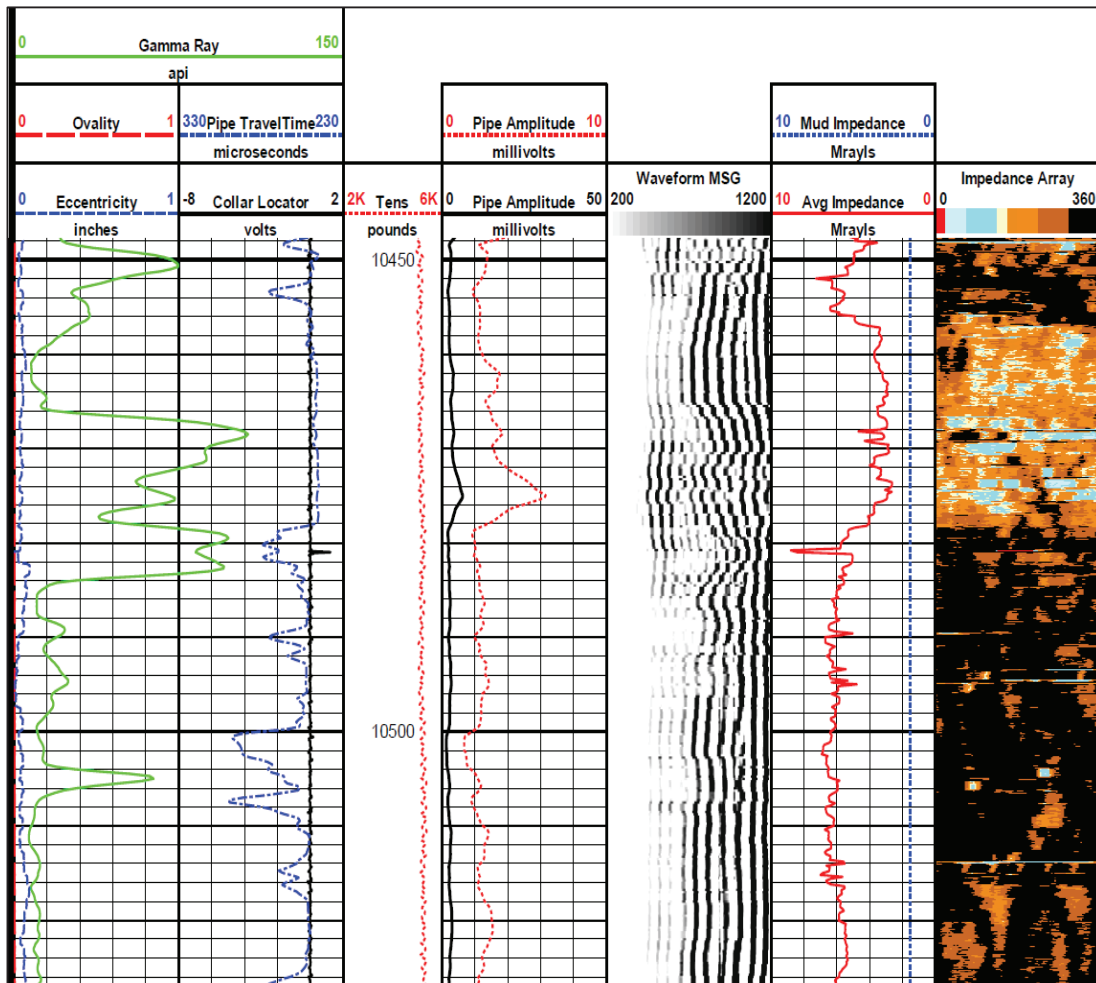


FUENTE: FRS – Wireline & Perforating  
ELABORADO POR: Santiago Sisalema

### 3.2.1.2 Arena Hollín

La arena Hollín se encuentra ubicada entre los 10450' y 10500' MD, correspondiente a la sección de 8-1/2", tal como lo demuestran los registros a hueco abierto mostrados en el Anexo A.1. La figura 3.7 muestra el registro de cementación del cual se observan valores muy bajos de amplitud a lo largo de la zona no sobrepasando los 10mV, el microsismograma muestra señal de arribos de formación y nullos arribos de tubería, el mapa de impedancia muestra colores oscuros como evidencia de una buena adherencia casing-cemento exceptuando un pequeño intervalo del cual resaltan los colores claros.

**FIGURA 3.7 REGISTRO DE CEMENTO - POZO A2 - ARENA HOLLÍN**

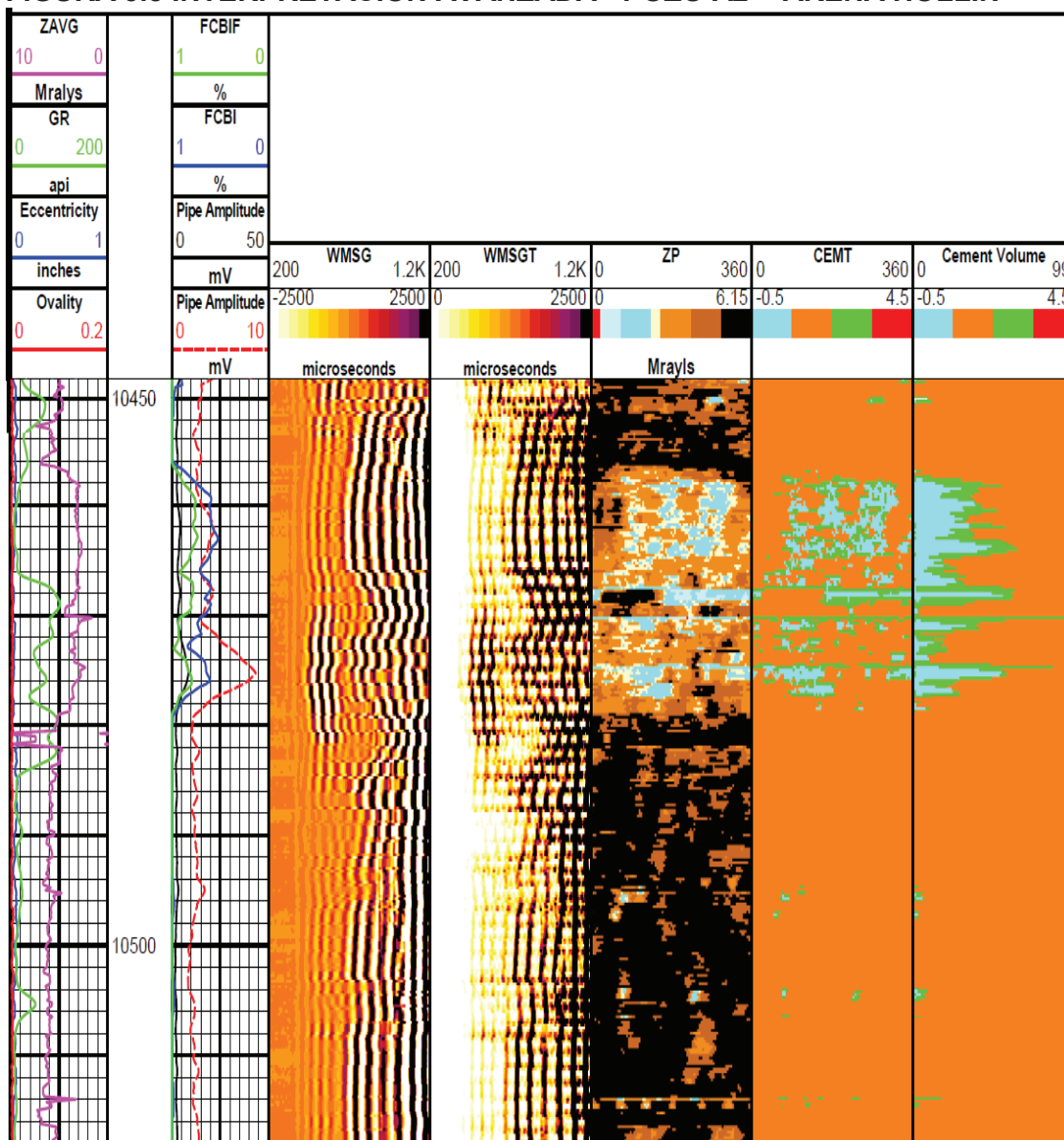


FUENTE: Wireline & Perforating.  
Elaborado por: Santiago Sisalema

La figura 3.8 muestra el resultado de la Evaluación Avanzada para la arena Hollín del pozo A2 en la sección 8-1/2"; las curvas de adherencia tanto para la herramienta ultrasónica como para en la Evaluación Avanzada muestran valores altos, exceptuando el intervalo ubicado entre los 10460' – 10480', punto donde baja a 0,75 en promedio (donde 1 representa el 100% de adherencia).

En las pistas 7 y 8 se representa el mapa de cemento y se evidencia de manera clara la presencia de cemento al 100% detrás de la tubería y para el intervalo mencionado, la presencia de fluido alcanza el 12% en promedio con poco más de presencia de cemento contaminado.

**FIGURA 3.8 INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A2 - ARENA HOLLÍN**



FUENTE: FRS - Wireline & Perforating.  
Elaborado por: Santiago Sisalema

### 3.3 ANÁLISIS DEL POZO A3

El pozo A3 fue perforado en 3 secciones: 20", 16" y 12-1/4", donde las zonas de interés se ubicaron enteramente en la sección de 12-1/4", a continuación en la tabla 3.3 se resumen su ubicación.



**TABLA 3.3 PROFUNDIDAD MD DE LAS ZONAS DE INTERÉS - POZO A3**

Sección	Formación	Profundidad (MD)
12-1/4"	U Inferior	10350,33
	T Inferior	10580,33

FUENTE: Cementing Halliburton  
ELABORADO POR: Santiago Sisalema

### 3.3.1 EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN POZO A3

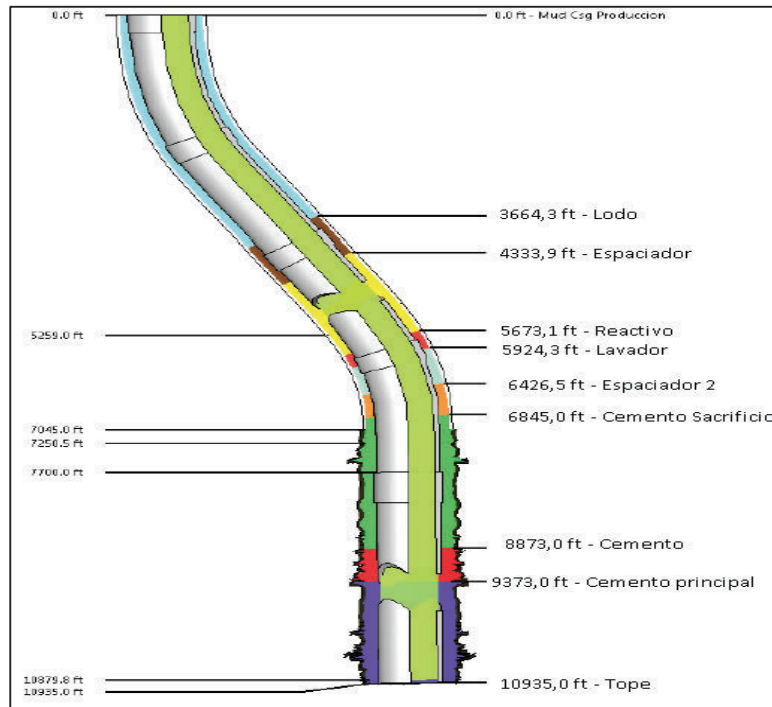
Para este análisis se escogerá la arena T, la evaluación de las zonas de interés restantes se encuentran en el Anexo A.2. Este pozo utilizó un casing de 9-5/8" de OD, 8,681" ID y 47 lbm/ft de peso desde la superficie hasta los 7700' MD y otro casing de 9-5/8" OD, 8,535" ID y 53,5 lbm/ft de peso desde los 7700' hasta los 10935' MD para su completación, por lo que se utilizó la lechada principal del tipo elastomérica desde los 9373' hasta la profundidad de asentamiento tal como se muestra en la figura 3.9.

#### 3.3.1.1 Arena T

La arena T se encuentra ubicada entre los 10530' y los 10610' MD de profundidad tal como lo demuestran los registros LWD del Anexo A.1. El registro de cemento, indicado en la figura 3.10 muestra amplitudes por sobre los 10 mV a lo largo de toda la sección de interés y además el microsismograma indica fuertes arribos de formación aunque muy pocos arribos de tubería, por el contrario el mapa de impedancia muestra la presencia de fluidos detrás del casing con la presencia de varias canalizaciones extendidas a lo largo de la sección de interés.

El efecto mencionado se debe a la baja resistencia a la compresión del cemento que recubre la tubería, ya que aunque los registros de ondas muestran buena adherencia entre el casing y el cemento, el mapa de impedancias dicta que, por su bajo valor en MRays, el material detrás de la tubería es fluido, llevando a interpretar una mala calidad en el sello final.

**FIGURA 3.9 DIAGRAMA DE CEMENTACIÓN - POZO A3**

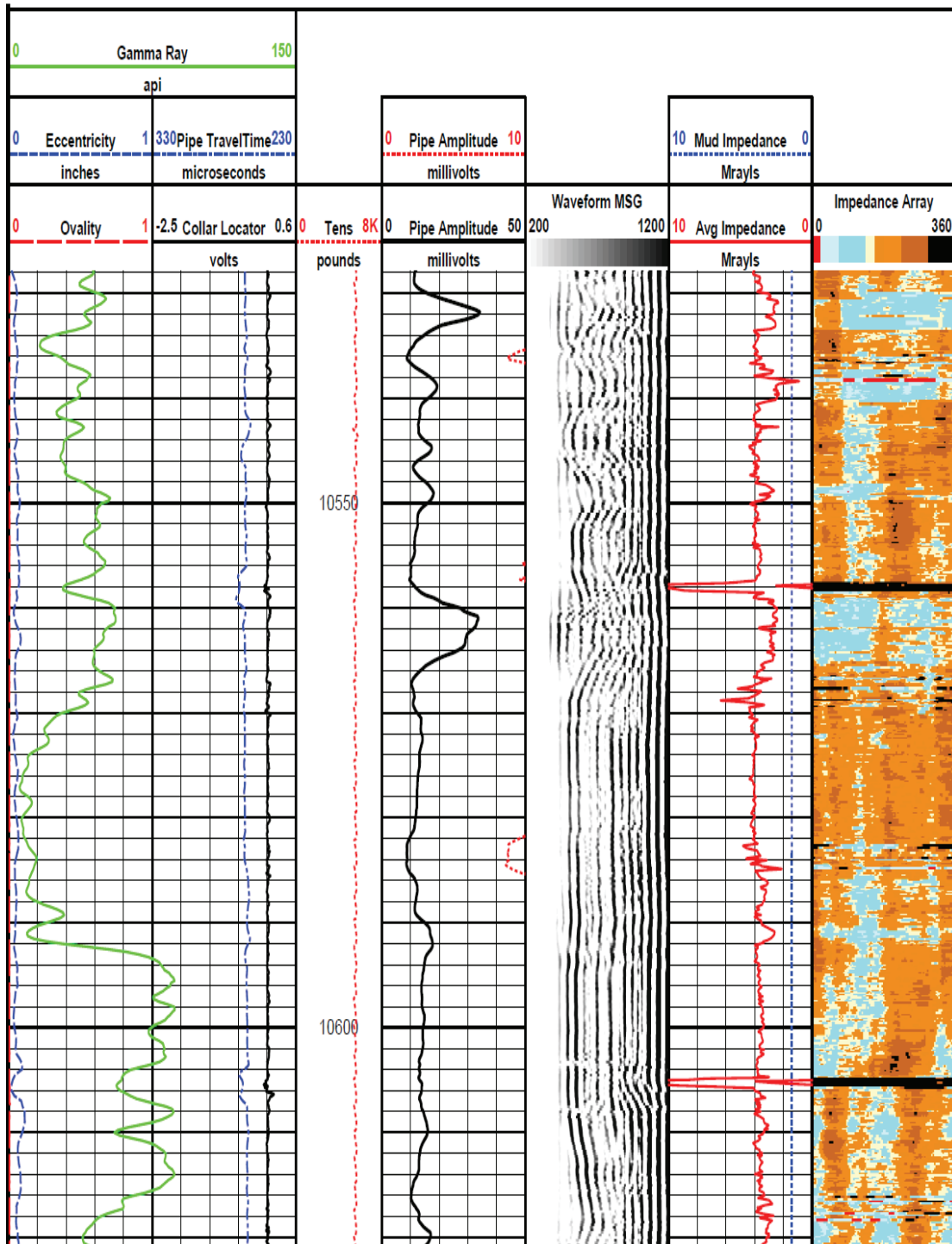


Fuente: Cementing - Halliburton  
Elaborado por: Santiago Sisalema

En la Evaluación Avanzada de la cementación, mostrado en la figura 3.11 podemos evidenciar que en la pista 3 las curvas de adherencia tanto para la herramienta ultrasónica como para la resultante del procesamiento de Interpretación Avanzada muestran curvas fluctuantes entre picos, con un promedio de 0,75 a lo largo de la zona, lo cual puede ser correlacionado con los valores de amplitud mostrados en la misma pista.

Como evaluación final, las pistas 9 y 10 muestran el mapa de cemento donde presencia de fluido es un poco menor a la mostrada en el mapa de impedancias siendo de alrededor del 5%, se evidencian canales aislados y poco conectados por sobre la zona de interés, el cemento contaminado presente se encuentra en el orden del 10% y el 85% restante es cemento cubriendo la tubería evidenciando la variación en las respuestas finales entre los registros convencionales y el nuevo método de procesamiento.

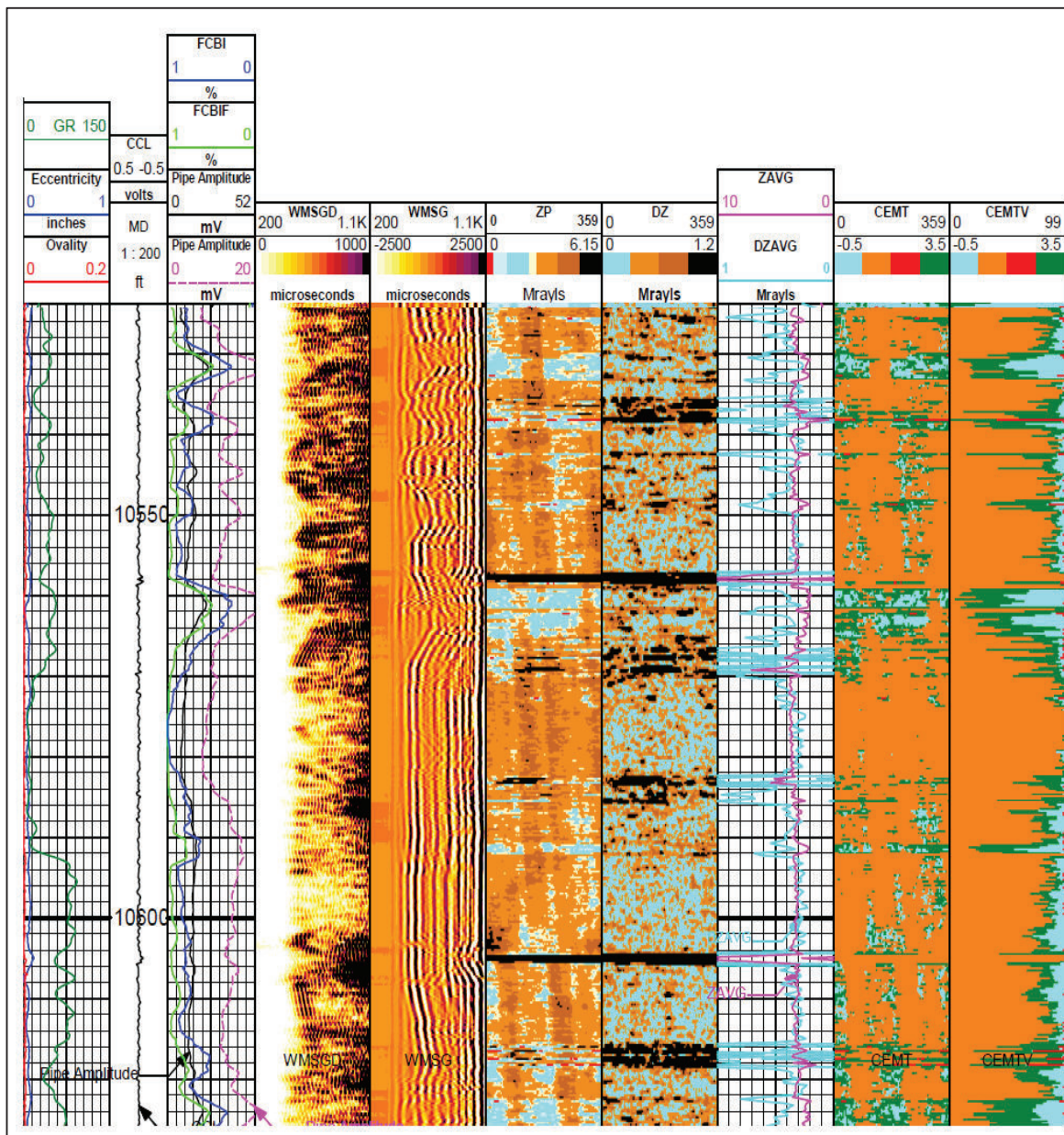
FIGURA 3.10 REGISTRO DE CEMENTO - POZO A3 - ARENA T



FUENTE: Wireline & Perforating.  
 Elaborado por: Santiago Sisalema



**FIGURA 3.11 INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A3 - ARENA T**



FUENTE: FRS - Wireline & Perforating.  
Elaborado por: Santiago Sisalema

### 3.4 ANÁLISIS DEL POZO A4

El pozo D fue perforado en 4 secciones: 20", 16", 12-1/4" y 8-1/2", donde las zonas de interés se ubicaron enteramente en la sección de 8-1/2", a continuación en la tabla 3.4 se resumen las mismas.

**TABLA 3.4 PROFUNDIDAD MD DE LAS ZONAS DE INTERÉS - POZO D**

Sección	Formación	Profundidad (MD)
8-1/2"	U Superior	9779,93
	U Inferior	9825,34
	T Superior	10050,92
	T Inferior	10100,43
	Hollín Superior	10220,93
	Hollín Inferior	10280,93

FUENTE: Cementing Halliburton  
ELABORADO POR: Santiago Sisalema

### 3.4.1 EVALUACIÓN DE LA CEMENTACIÓN

Para este análisis se escogerá la arena U del pozo A4, la evaluación de las zonas de interés restantes se encuentran en el Anexo A.2. Este pozo utilizó un colgador de liner desde los 9435' hasta los 10480' MD para su completación, por lo que se utilizó la lechada principal del tipo elastomérica desde los 9735' hasta la profundidad de asentamiento tal como se muestra en la figura 3.12.

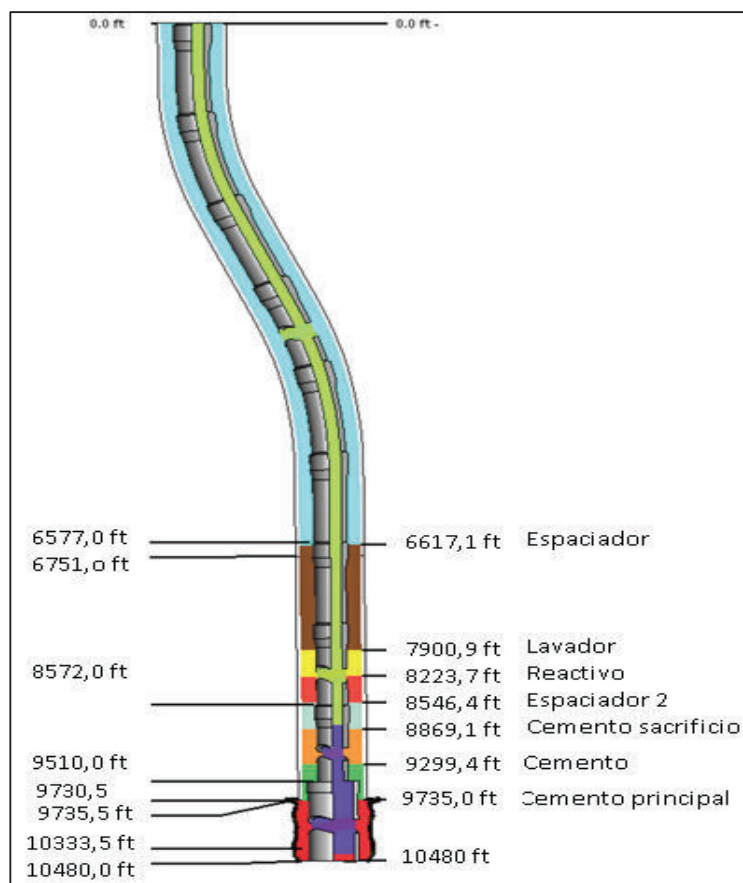
#### 3.4.1.1 Arena U

La arena de interés U se encuentra en el intervalo ubicado entre los 9760' y 9830' MD, tal como lo demuestran los registros LWD en el Anexo A.1. En la figura 3.13, que corresponde al mapa de cemento convencional, se muestran amplitudes promedio mayores a 10 mV en el intervalo de interés, sinónimo de una baja adherencia, el microsismograma muestra medianos arribos de tubería y formación y el mapa de impedancia indica alta presencia de fluido detrás de la tubería con canales muy definidos, lo que indicaría baja calidad de adherencia.

Como ya se mencionó para el anterior pozo, la baja resistencia a la compresión del cemento puede provocar que las lecturas en el mapa de impedancia lleguen a mostrar colores bajos, sinónimo de presencia de fluido, lo cual puede asegurarse o desestimarse en base al mapa de cemento producto de la Evaluación Avanzada de la cementación.

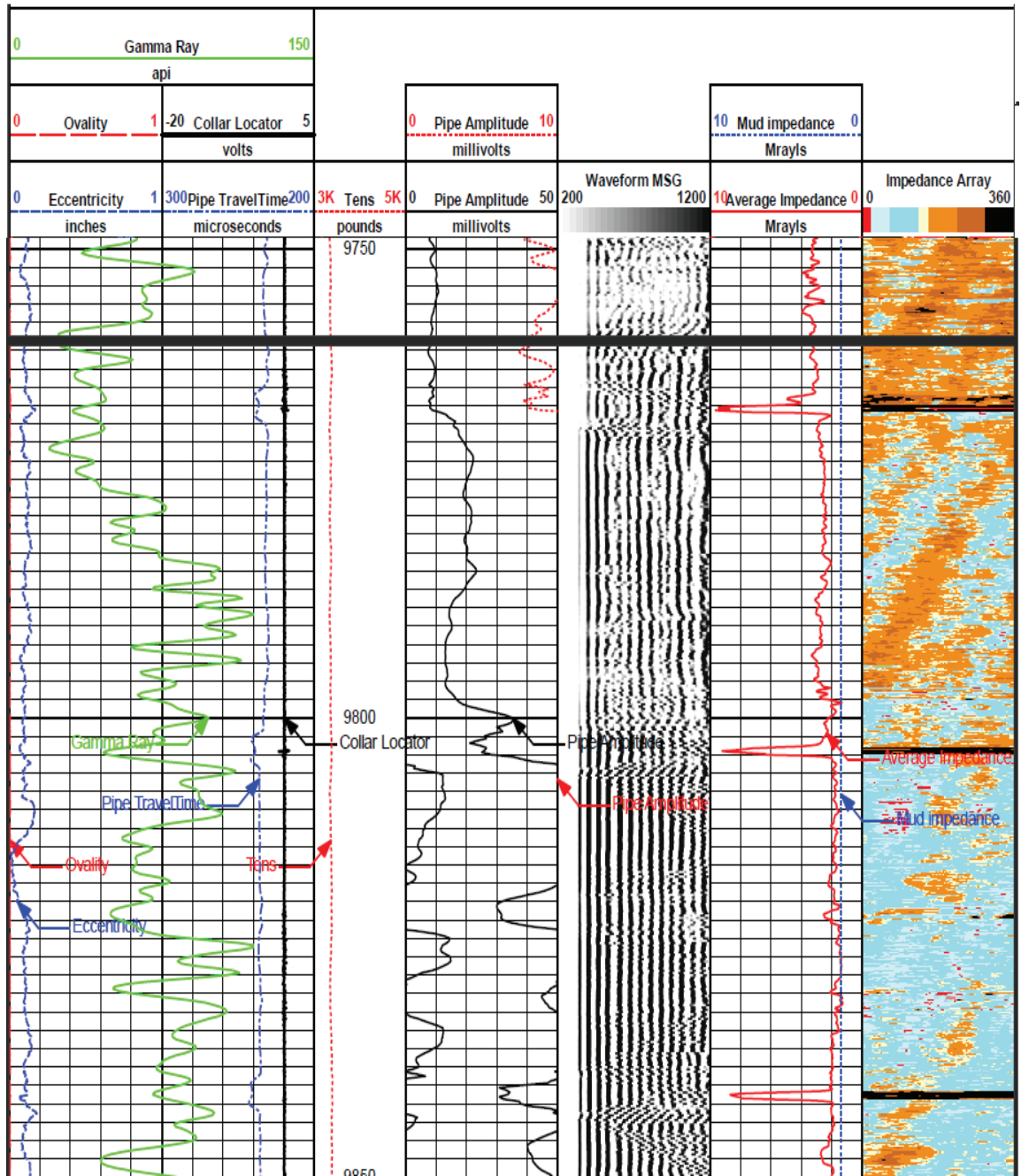
En la Evaluación Avanzada, que corresponde a la figura 3.14, la curva de adherencia para la herramienta ultrasónica y su procesamiento es de alrededor de 0,75 y su correspondiente mapa de cemento y volumen muestra la presencia de alta cantidad de cemento contaminado detrás del casing, alrededor de un 25%, fluido en un 20% y el restante 55% corresponde a la presencia de cemento.

**FIGURA 3.12 DIAGRAMA DE CEMENTACIÓN - POZO A4**



Fuente: Cementing - Halliburton  
Elaborado por: Santiago Sisalema

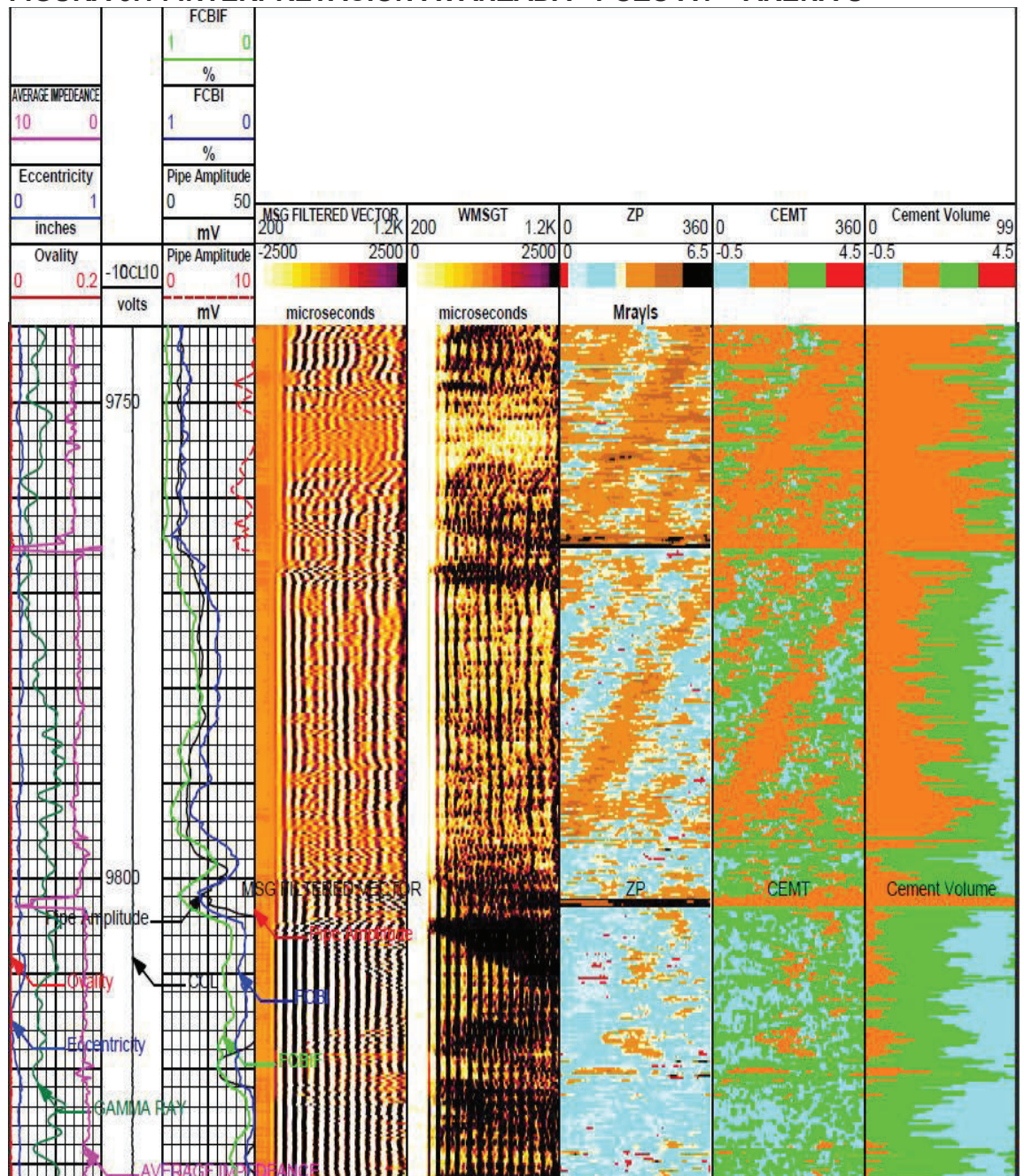
FIGURA 3.13 REGISTRO DE CEMENTO - POZO A4 - ARENA U



FUENTE: Wireline & Perforating.  
 Elaborado por: Santiago Sisalema



**FIGURA 3.14 INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A4 - ARENA U**



FUENTE: FRS - Wireline & Perforating.  
 Elaborado por: Santiago Sisalema

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

En base al trabajo realizado se alcanzaron las siguientes conclusiones:

- El análisis técnico de los registros de cementación para pozos cementados con sistemas elásticos es posible y fiable mediante la técnica de Evaluación Avanzada, reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones.
- La alta fuerza de compresión de un cemento permite obtener una mejor respuesta en los registros de cementación pero no necesariamente determinan el haber alcanzado un aislamiento efectivo. Propiedades mecánicas como el módulo de Young o relación de Poisson deben considerarse en la elección del tipo de cemento que deba aislar el pozo sobre todo en procesos post-operacionales.
- Tal como se muestra en la Tabla 4.1, cuantitativamente el método de Evaluación Avanzada provee información más detallada de la cementación; para los pozos A1 y A2, donde se utilizó lechada convencional, el método de interpretación únicamente corrobora lo mostrado en los registros convencionales por lo que su utilización no sería necesaria, caso contrario ocurre en los pozos que usaron propiedades elásticas en sus lechadas, donde aparentemente los registros convencionales mostraban aislamiento deficiente lo cual quedó parcialmente descartado con el método de Evaluación Avanzada, demostrando la presencia notable de cemento detrás de la tubería.
- La limitada información que provee un mapa de impedancias queda demostrado en los pozos A3 y A4, el cual puede orillar a tomar decisiones incorrectas sobre la calidad de adherencia final del cemento de propiedades elásticas.

- Es importante tener información previa sobre las profundidades a las que se disponen los distintos tipos de lechadas ya que facilita en prever el tipo de respuesta de la herramienta por el efecto de formaciones rápidas.
- La correlación de resultados es muy importante para el control de calidad por lo que deben tenerse muy en cuenta, entre ellos tenemos el tiempo de tránsito ya que determina los valores de excentricidad de la herramienta, la amplitud, cuyo valor debe ser semejante a la imagen mostrada en el microsismograma; y la impedancia acústica, la cual es el resultado del comportamiento de las ondas en el medio evaluado y provee los valores cuantitativos para el procesamiento y traslación de resultados como mapas, todos ellos presentan una concatenación y deben ser revisados con minuciosidad.
- Valores de amplitudes mayores a los 10 mV son reflejo de una mala calidad de cementación, por lo que al momento de realizar una interpretación rápida éste parámetro debe ser de consideración primaria.

## **4.2 RECOMENDACIONES**

Para el presente estudio se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Recopilar la mayor cantidad de datos respecto a operaciones previas en el pozo, especialmente los relacionados a registros a hueco abierto con el fin de evaluar a detalle la zona a intervenir posteriormente.
- Se recomienda realizar corridas con presión durante la evaluación para identificar la presencia de microanillos y microcanales que pudieran afectar en la interpretación.
- Las operaciones de evaluación de la cementación deben realizarse luego de haber transcurrido el tiempo prudencial sugerido por la gente de cementación, ya que un registro temprano puede no conseguir los resultados reales.
- Utilizar el servicio de Evaluación Avanzada con el fin de obtener un método fiable, fácil y seguro de interpretación del registro, sobre todo en pozos que presentan lechadas con propiedades diferentes a las convencionales.

TABLA 4.1 CONCLUSIONES

POZO (arena)	TVD (pies)	ANÁLISIS CUANTITATIVO PARA COMBINACIÓN DE HERRAMIENTAS SÓNICA Y ULTRASÓNICA						ANÁLISIS CUANTITATIVO PARA PROCESAMIENTO DE EVALUACIÓN AVANZADA		
		Excentrici- dad * < 2,5 in	Travel Time (µs)	Amplitud (mV) * < 10 mV	Arribo ondas MSG		Impdancia Promedio (MRayls)	Índice de Adherencia		Volumen de Cemento %
					T-C	C-F		FCBIF %	FCBI %	
A1 (Hollin)	10470 - 10490	0,1	235	4	nulo	fuerte	5	95	95	100
	10490 - 10510	0,1	235	3	nulo	fuerte	6	95	95	100
	10510 - 10530	0,1	235	2	nulo	fuerte	5	95	95	100
	10530 - 10550	0,1	235	6	nulo	fuerte	6	95	95	100
A2 (Hollin)	10450 - 10460	0,05	250	2	nulo	fuerte	5	90	90	100
	10460 - 10470	0,05	250	3	nulo	fuerte	3	80	60	80
	10470 - 10480	0,05	250	4	nulo	fuerte	3	85	70	90
	10480 - 10490	0,05	260	2	nulo	fuerte	6	100	100	100
A3 (T)	10490 - 10500	0,05	260	2	nulo	fuerte	6	100	100	100
	10530 - 10550	0,08	268	15	medio	medio	4	75	65	85
	10550 - 10570	0,08	268	15	medio	medio	4	80	65	80
	10570 - 10590	0,08	268	10	medio	medio	4	95	90	95
A4 (U)	10590 - 10610	0,08	268	13	medio	medio	4	90	85	85
	9760 - 9770	0,17	235	10	medio	medio	5	90	70	90
	9770 - 9780	0,17	235	20	fuerte	nulo	2,5	60	40	75
	9780 - 9790	0,17	235	20	fuerte	nulo	2,5	70	45	75
	9790 - 9800	0,17	235	15	medio	medio	2,3	70	50	90
	9800 - 9810	0,17	235	50+	fuerte	nulo	2	55	35	60
	9810 - 9820	0,17	235	50+	fuerte	nulo	2	30	15	50
	9820 - 9830	0,17	235	50+	fuerte	nulo	2	20	10	50

\*Valores sugeridos

Elaborado por: Santiago Sisalema



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bateman, R. (2015). *Cased Hole Analysis and Reservoir Performance Monitoring*. Lubbock, TX, Springer.
- Benge, G. (2014, October 27). Cement Evaluation - A Risky Business. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/170712-MS
- Bravo, D. (2012). *Análisis Técnico Detallado e Interpretación de los Registros de Cementación CBL (Cement Bond Log) y VDL (Variable Density Log)*. (Tesis Pregrado). Recuperado de: [repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/6059/1/50404\\_1.pdf](http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/6059/1/50404_1.pdf)
- Castro, W. & Velasco, T. (2015). *Estudio de diseños especializados para cementar hoyos de calibres extendidos*. (Tesis Pregrado). Recuperado de: [bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10789/3/CD-6321.pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10789/3/CD-6321.pdf)
- Estrada, P., & Olivo, J. (2009). *Análisis y Aplicación del Sistema WellLife 3 para Incrementar la Vida Útil del Cemento en Pozos del Oriente Ecuatoriano*. (Tesis Pregrado). Recuperado de: [bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1319/1/CD-2016.pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1319/1/CD-2016.pdf)
- Frisch, G. (2000). *Cement Sheat Evaluation*. Houston, TX, Halliburton Energy Systems.
- Frisch, G., Graham, L., & Griffith, J. (2000, January 1). A Novel And Economical Processing Technique Using Conventional Bond Logs And Ultrasonic Tools For Enhanced Cement Evaluation. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Frisch, G. J., Fox, P. E., Hunt, D. A., & Kaspereit, D. (2005, January 1). Advances in Cement Evaluation Tools and Processing Methods Allow Improved Interpretation of Complex Cements. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/97186-MS
- Morris, C. W., Sabbagh, L., Wydrinski, R., Hupp, J. L., van Kuijk, R., & Froelich, B. (2007, January 1). Application of Enhanced Ultrasonic Measurements for Cement and Casing Evaluation. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/105648-MS

Morris, C. W., Zanutto, S. L., & Dacres, W. G. (2000, January 1). Lightweight Cement Evaluation Using Ultrasonic Measurements. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/62517-MS

Spooner, P. (2009). *Guidelines for Running and Interpreting Bond Logs with WellLife® Cement*. Aberdeen, Senergy LTD & Halliburton Energy Services.

Thomas, S. J., Smith, C., Williams, B. W., & Hamilton, L. (2014, September 30). Ultrasonic Log Response in Lightweight Cement Conditions. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/171612-MS

Villalva, M. (2013). *Estudio de la aplicación de un cemento autocurable y elástico para cementaciones en pozos de alto ángulo en campos de Petroamazonas*. (Tesis Pregrado). Recuperado de: [repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/5221/1/53320\\_1.pdf](http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/5221/1/53320_1.pdf)

Yépez, N. (2012). *Factibilidad de la Cementación de Zonas Productoras con la Tecnología CemCrete en los Campos VHR y Cuyabeno*. (Tesis Pregrado). Recuperado de: [dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/398/1/T-UCE-0012-125.pdf](http://dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/398/1/T-UCE-0012-125.pdf)

## **GLOSARIO**

**Acústica:** La acústica es una rama de la física interdisciplinaria que estudia el sonido, infrasonido y ultrasonido, es decir ondas mecánicas que se propagan a través de la materia (tanto sólida como líquida o gaseosa) (no pueden propagarse en el vacío) por medio de modelos físicos y matemáticos. A efectos prácticos, la acústica estudia la producción, transmisión, almacenamiento, percepción o reproducción del sonido.

**Atenuación:** En telecomunicación, se denomina atenuación de una señal, sea esta acústica, eléctrica u óptica, a la pérdida de potencia sufrida por la misma al transitar por cualquier medio de transmisión. La atenuación del sonido es el reparto de energía de la onda entre un volumen de aire cada vez mayor.

**Decibeles:** Planteado en principio como magnitud de relación de parámetros (tensión, corriente, potencia, densidad de flujo, ruido, etc.), puede utilizarse como magnitud de medida cuando a uno de los parámetros de referencia se le asigna un valor unitario o un valor constante.

**Dosificación:** La dosificación implica establecer las proporciones apropiadas de los materiales que componen al concreto, a fin de obtener la resistencia y durabilidad requeridas, o bien, para obtener un acabado o pegado correctos. Generalmente expresado en gramos por metro (g/m).

**Frecuencia:** La frecuencia es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

**Gelificación:** Coagulación en masa de una solución coloidal por formación de una red sólida extremadamente fina que contiene un líquido en sus mallas.

**Homogéneo:** Que está formado por elementos con una serie de características comunes referidas a su clase o naturaleza que permiten establecer entre ellos una relación de semejanza.

**Impedancia Acústica:** La impedancia acústica ( $Z$ ) es una propiedad de estado intensiva. Es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este y por lo tanto es equivalente a la impedancia eléctrica, es decir una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio. Se define como la

razón entre la presión sonora ( $p$ ) y la velocidad de las partículas ( $v$ ) de un medio material.

**Número de Reynolds:** El número de Reynolds ( $Re$ ) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds.

**Polímeros:** Los polímeros no son más que unas sustancias formadas por una cantidad finita de moléculas que le confieren un alto peso molecular que es una característica representativa de esta familia de compuestos orgánicos.

**Percolación:** Fluido capaz de moverse a través de un medio poroso.

**Rayleigh:** En física, rayl es una de las dos unidades de impedancia acústica, que equivale a la presión del sonido de una  $\text{DINA/cm}^2$ , dividida por la velocidad de  $1 \text{ cm/s}$ . Cuando las ondas acústicas pasan a través de cualquier sustancia física, la presión de las ondas hace que las partículas de la sustancia se muevan. La impedancia acústica es el cociente entre la presión y la velocidad que produce en la partícula. La impedancia es 1 rayl si la presión de la unidad produce una unidad de velocidad.

**Transductor:** Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente a la salida.

## **ANEXOS**

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

### **ANEXO 1**

#### **EVALUACIÓN DE REGISTROS ELÉCTRICOS PARA LOS POZOS A1, A2, A3 Y A4**

A.1. REGISTROS ELÉCTRICOS POZOS A1, A2, A3 Y A4

### **ANEXO 2**

#### **INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS DE CEMENTACIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE EVALUACIÓN AVANZADA**

A.2. EVALUACIÓN POR ARENAS PARA LOS POZOS A3 Y A4

### **ANEXO 3**

#### **PRUEBAS MECÁNICAS Y DE FLUIDOS EN LECHADAS CONVENCIONALES Y ELÁSTICAS**

A.3. INFORMACIÓN DE LA LECHADA ELÁSTICA Y CONVENCIONAL

A.3.1. Información de pruebas de fluido aplicadas a las lechadas convencionales y elásticas

A.3.2. Información de pruebas mecánicas aplicadas a las lechadas convencionales y elásticas

### **ANEXO 4**

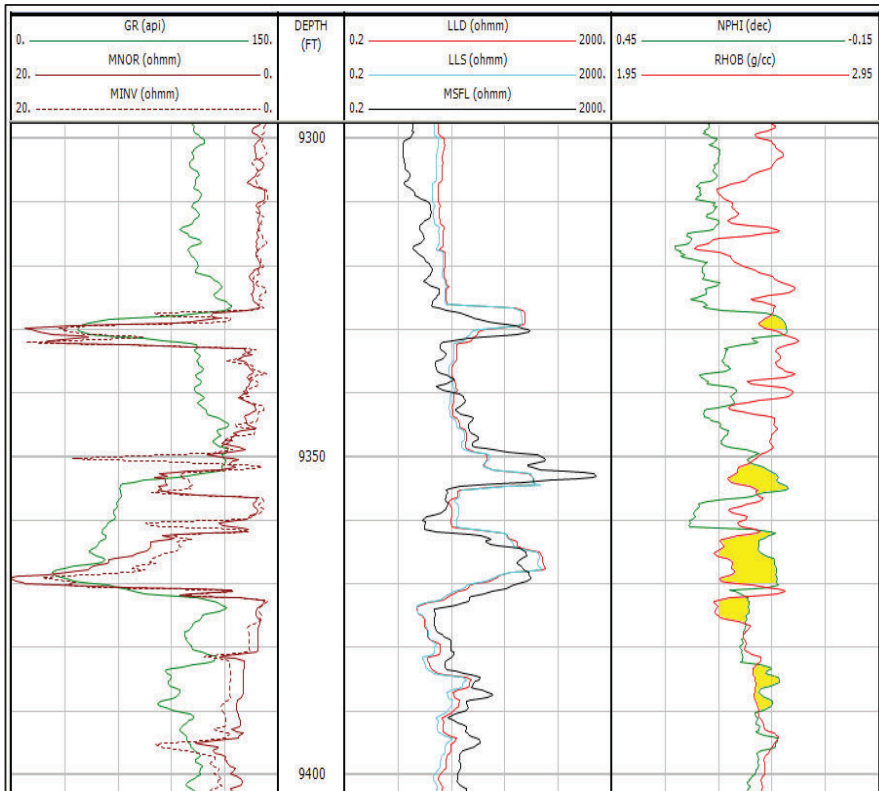
A.4. PROPIEDADES Y ESTADO DE PRODUCCIÓN DE LOS POZOS EVALUADOS

**ANEXO 1**  
**EVALUACIÓN DE REGISTROS ELÉCTRICOS PARA LOS**  
**POZOS A1, A2, A3 Y A4**

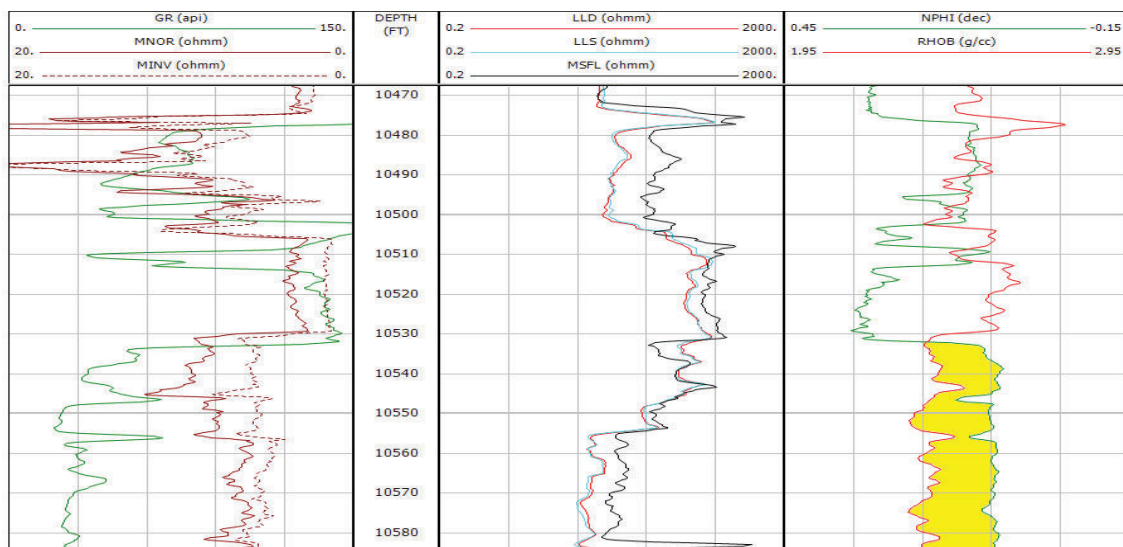


### A.1. REGISTROS ELÉCTRICOS POZOS A1, A2, A3 Y A4

#### Registros eléctricos para la arena Basal Tena



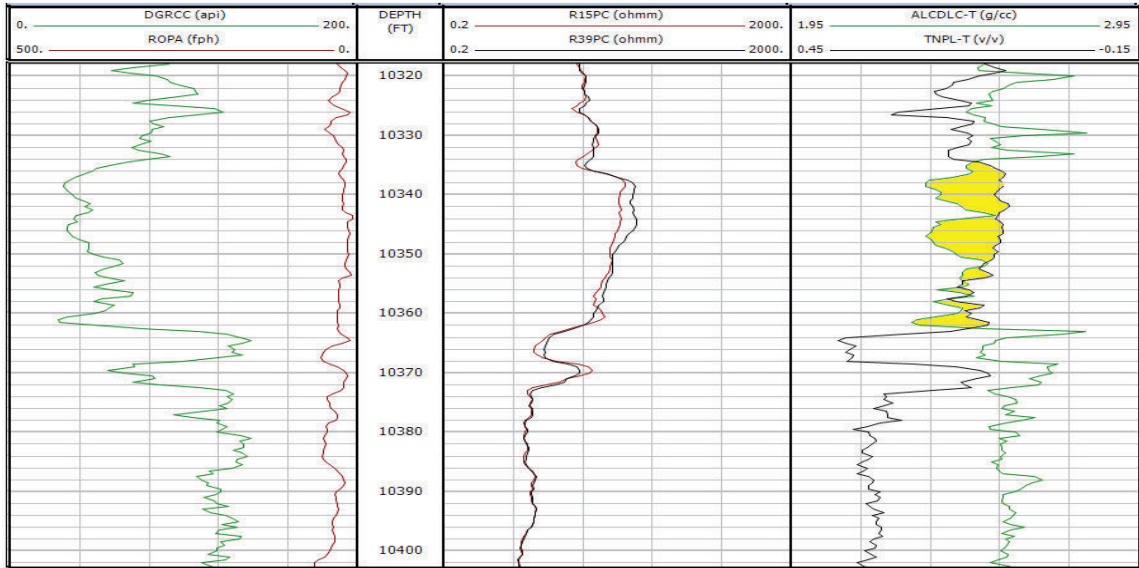
#### Registro eléctricos para la arena Hollín



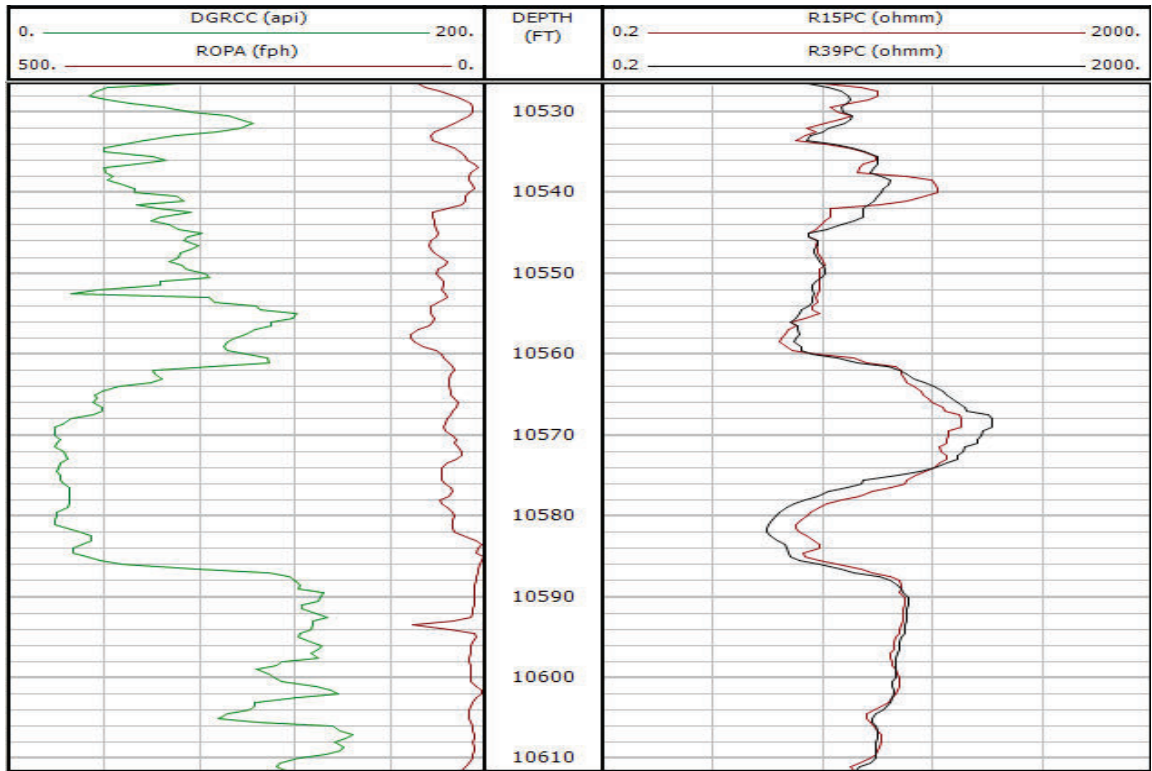


## REGISTROS ELÉCTRICOS POZO A3

### Registros eléctricos de la arena U



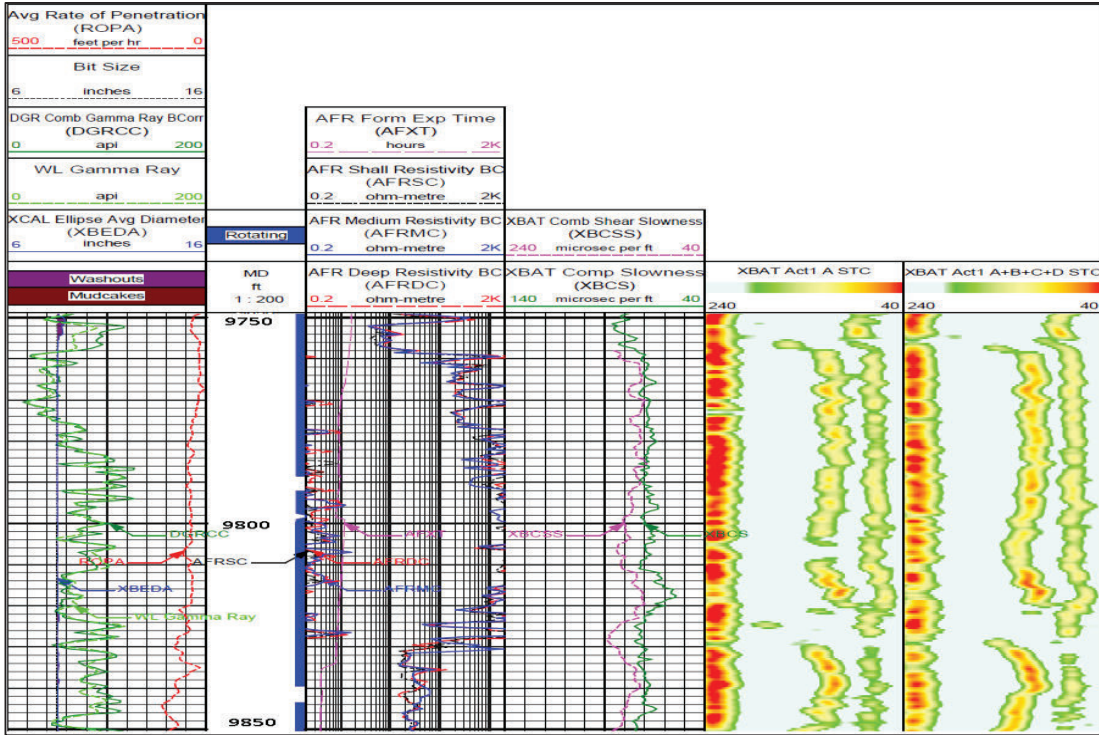
### Registros eléctricos de la arena T



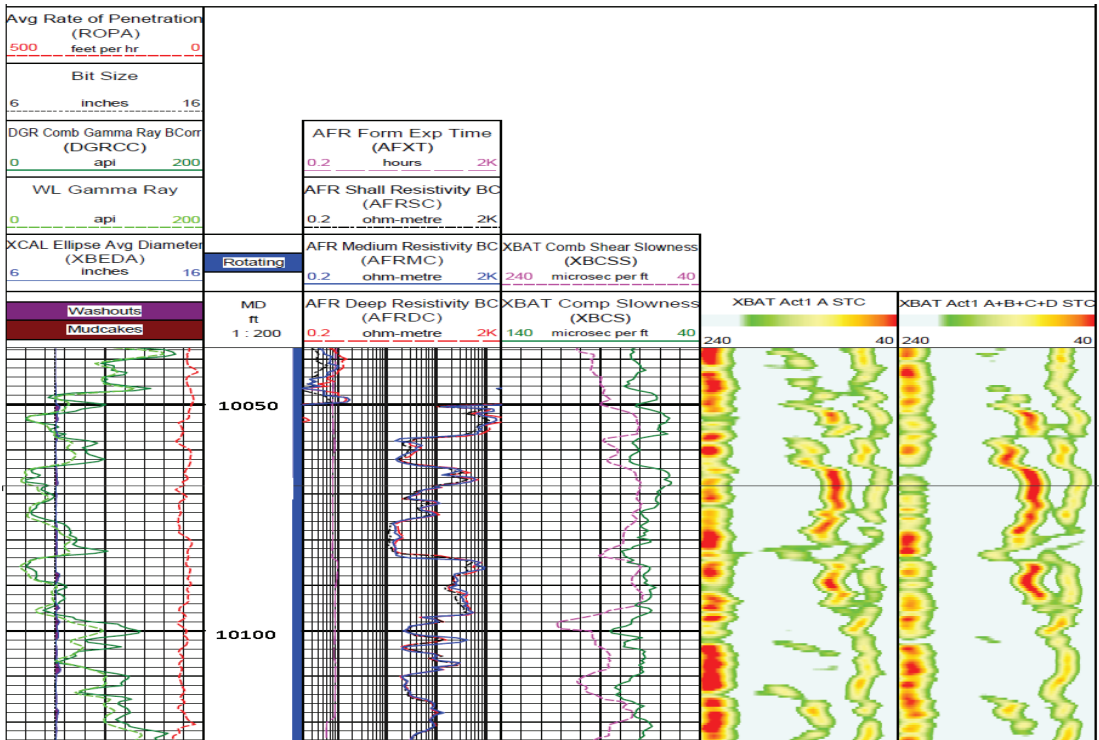


## REGISTROS ELÉCTRICOS POZO A4

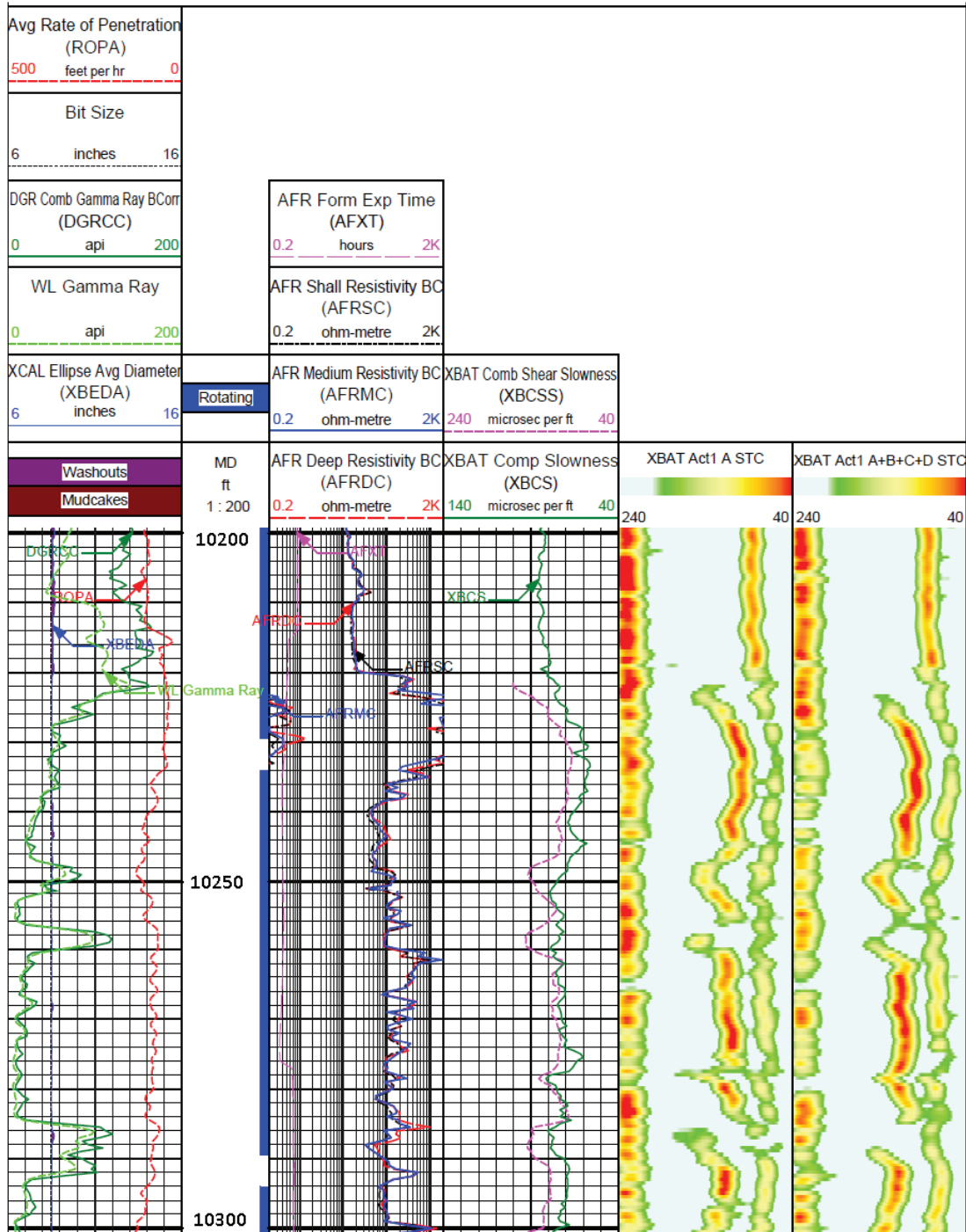
### Registros eléctricos de la arena U



### Registros eléctricos de la arena T



### Registro eléctricos para la arena Hollín



**ANEXO 2**

**INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS DE  
CEMENTACIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE  
EVALUACIÓN AVANZADA**

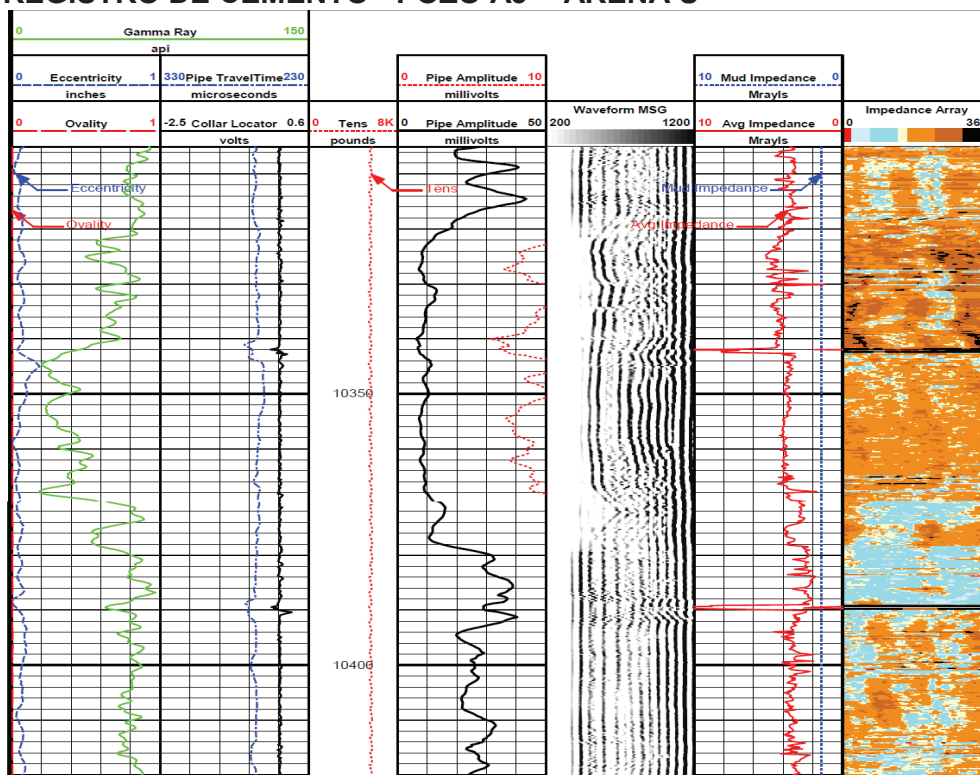
## A.2. EVALUACIÓN POR ARENAS PARA LOS POZOS A3 Y A4

### POZO A3

#### Arena U

La arena de interés U se encuentra en el intervalo ubicado entre los 10322' y 10402' MD, en el registro de cemento del pozo A3 se muestran amplitudes promedio de 10 mV en el intervalo de interés, valor relativamente alto en base a la experiencia de interpretación; el microsismograma muestra arribos débiles arribos de tubería y medianos arribos de formación, mientras el mapa de impedancia indica alta presencia de fluido detrás de la tubería con microcanales lo que podría suponer que no se logró un aislamiento efectivo.

#### REGISTRO DE CEMENTO - POZO A3 - ARENA U



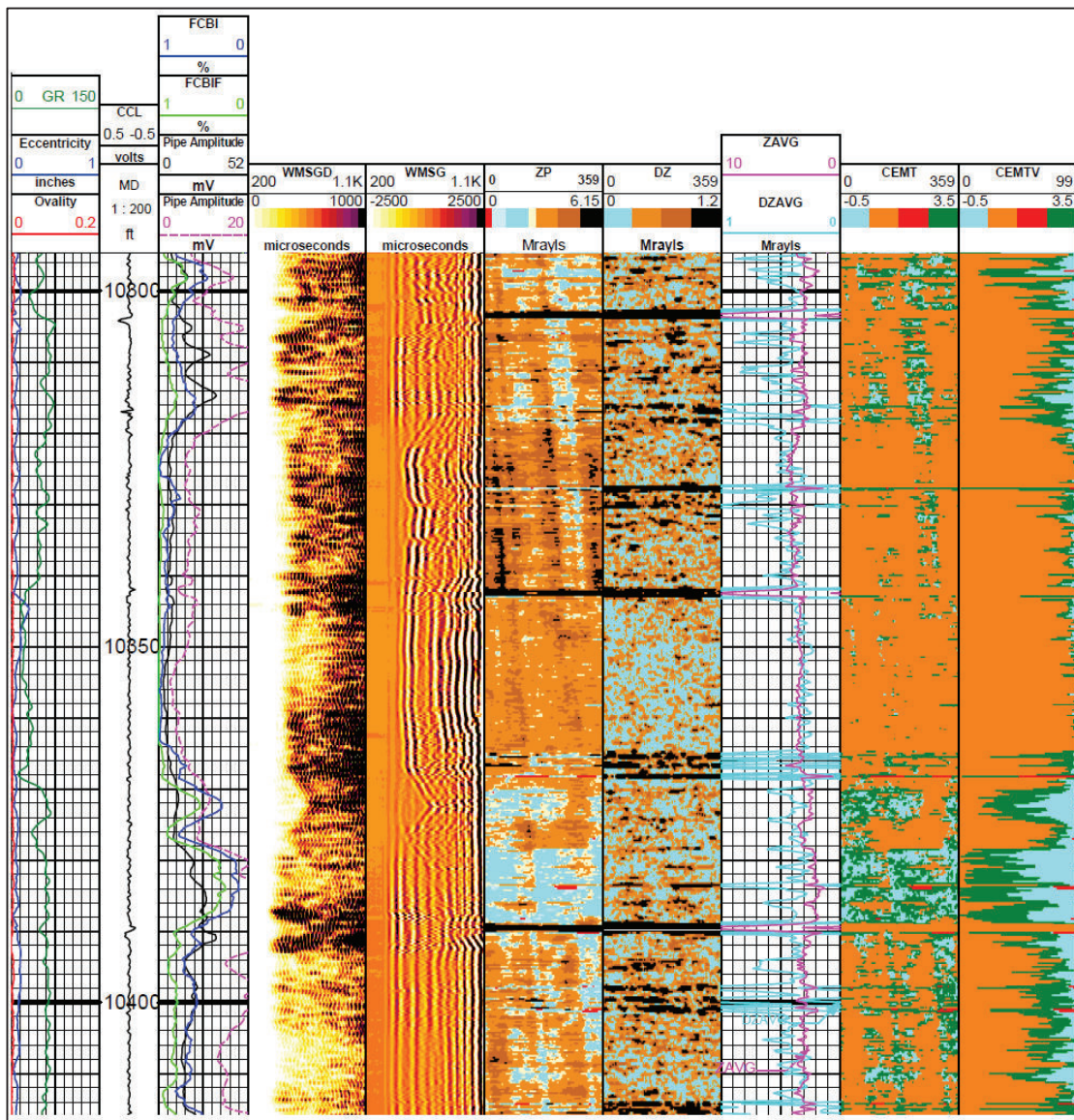
FUENTE: Wireline & Perforating.  
Elaborado por: Santiago Sisalema

En la Evaluación Avanzada las curvas de adherencia están en el orden de los 0,8 en promedio a lo largo de la zona evaluada.



Las pistas 7 y 8 muestran el mapa de cemento, donde el resultado final es la poca presencia de fluido y un valor un poco más alto de cemento contaminado hasta los 10550', punto donde el cemento llega a tener hasta el 95% de presencia.

**INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A3 - ARENA U**



FUENTE: FRS - Wireline & Perforating.  
Elaborado por: Santiago Sisalema

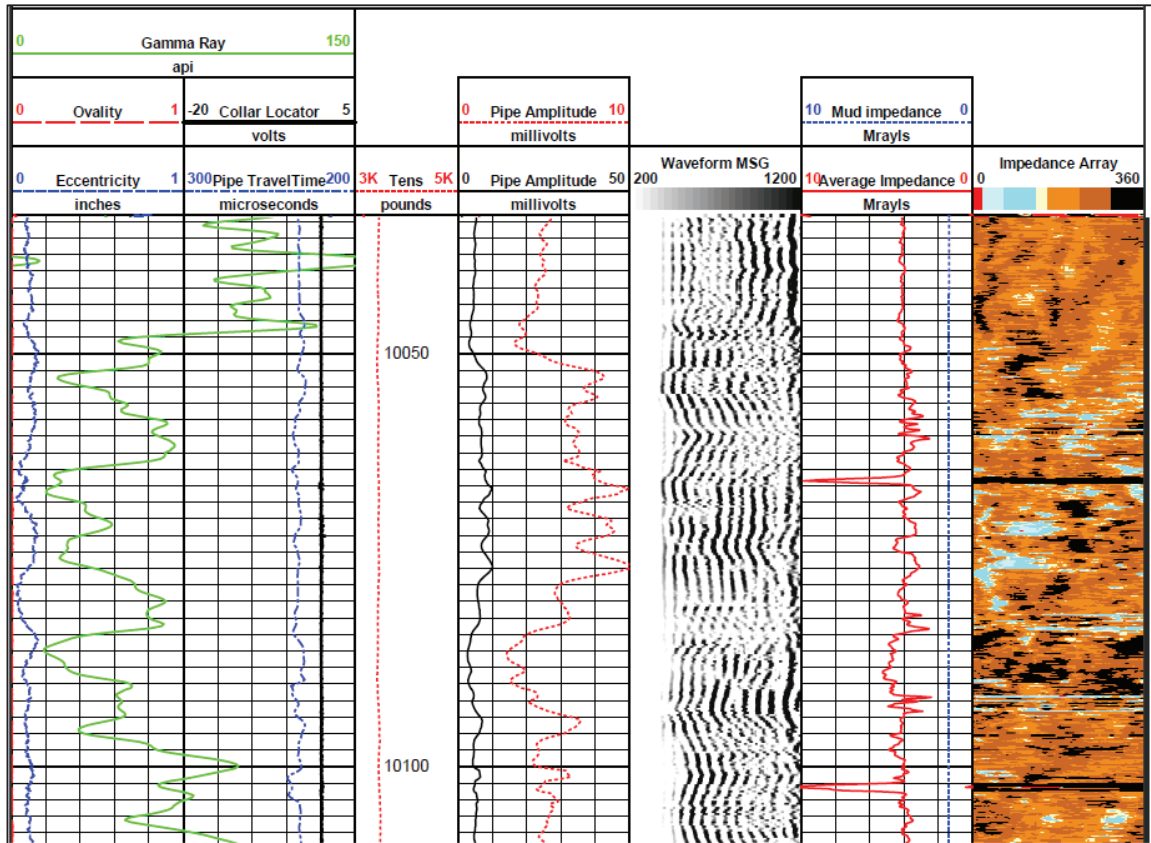
**POZO A4**

**Arena T**



La arena de interés T se encuentra en el intervalo ubicado entre los 10050' y 10100' MD. En el registro de cemento para el pozo A4 se muestra el registro de cemento, el cual proyecta amplitudes promedio de 6-7 mV en el intervalo de interés, sinónimo de una alta adherencia, el microsismograma muestra leves arribos de tubería y formación y el mapa de impedancia indica muy poca presencia de fluido detrás de la tubería con microcanales cortos y aislados.

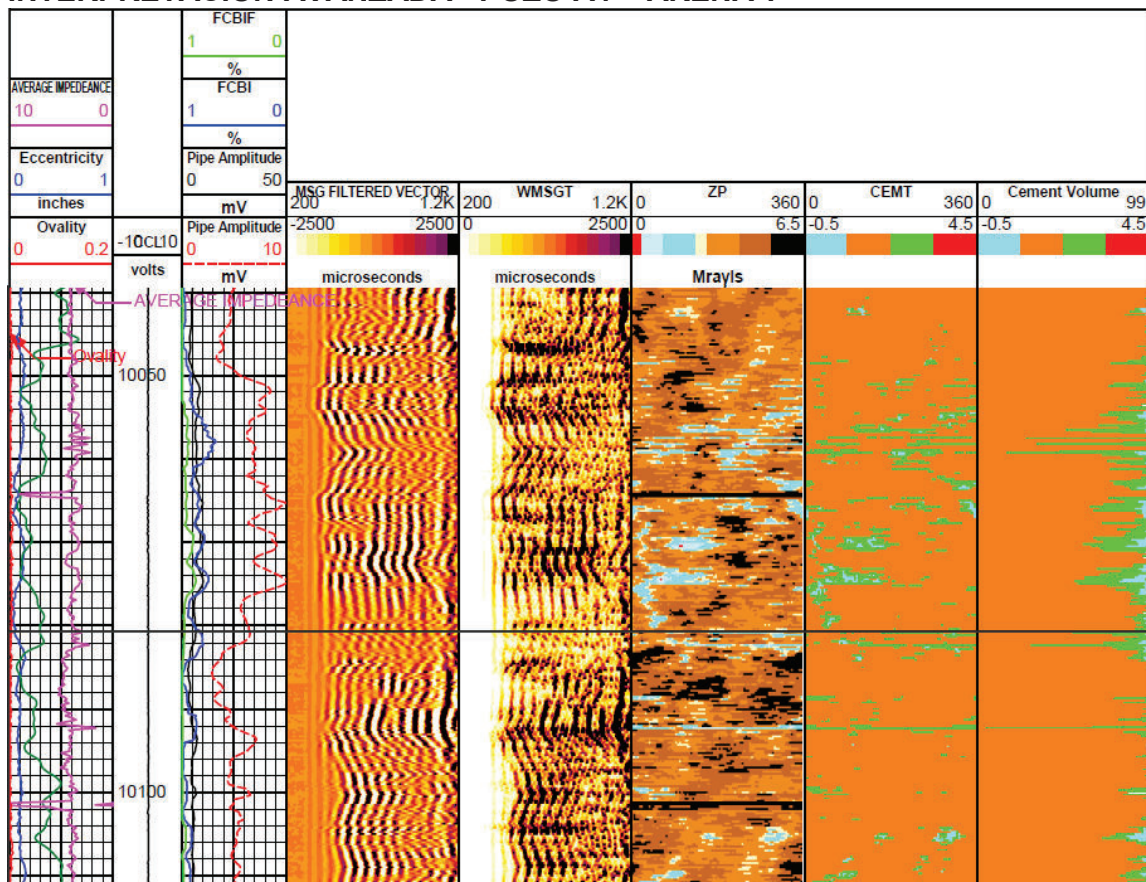
### REGISTRO DE CEMENTO - POZO A4 - ARENA T



FUENTE: Wireline & Perforating.  
Elaborado por: Santiago Sisalema

En la Evaluación Avanzada de la cementación en la zona de interés, gráficamente se muestran las curvas de adherencia, las cuales están en 0,9 en todo el intervalo y el mapa de cemento y volumen, el cual indica que la zona está libre de fluido detrás del casing, con cerca de alrededor de un 10% de cemento contaminado y el restante 90% corresponde a cemento recubriendo la tubería.

## INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A4 - ARENA T

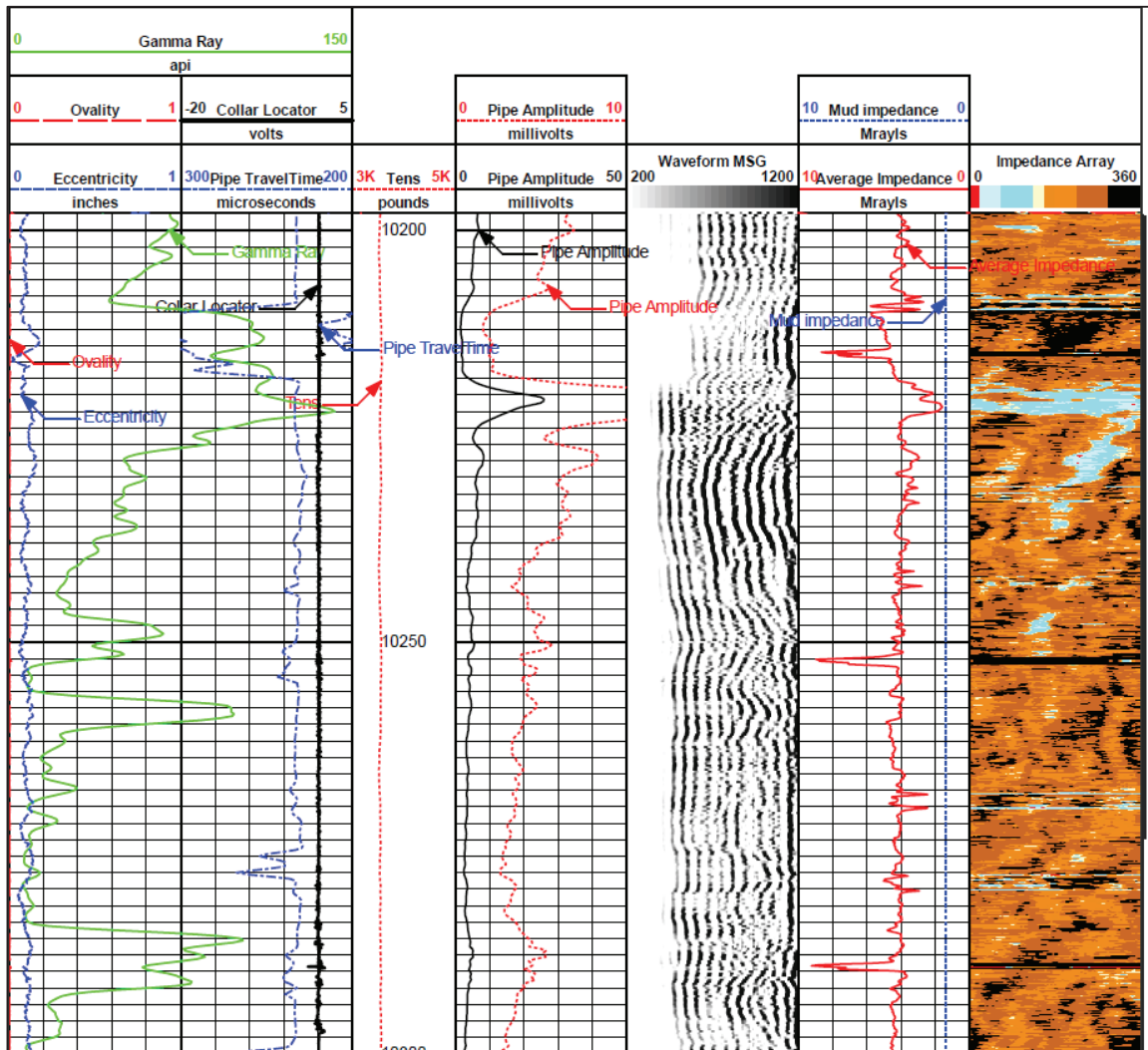


FUENTE: FRS - Wireline & Perforating.  
Elaborado por: Santiago Sisalema

### Arena Hollín

La arena de interés Hollín se encuentra en el intervalo ubicado entre los 10220' y 10280' MD. En el registro de cemento del pozo A4, el cual proyecta amplitudes promedio de 4-6 mV en el intervalo de interés, sinónimo de una alta adherencia, el microsismograma muestra leves arribos de tubería y formación y el mapa de impedancia indica muy poca presencia de fluido detrás de la tubería con aislados puntos de fluido.

## REGISTRO DE CEMENTO - POZO A4 - ARENA HOLLÍN

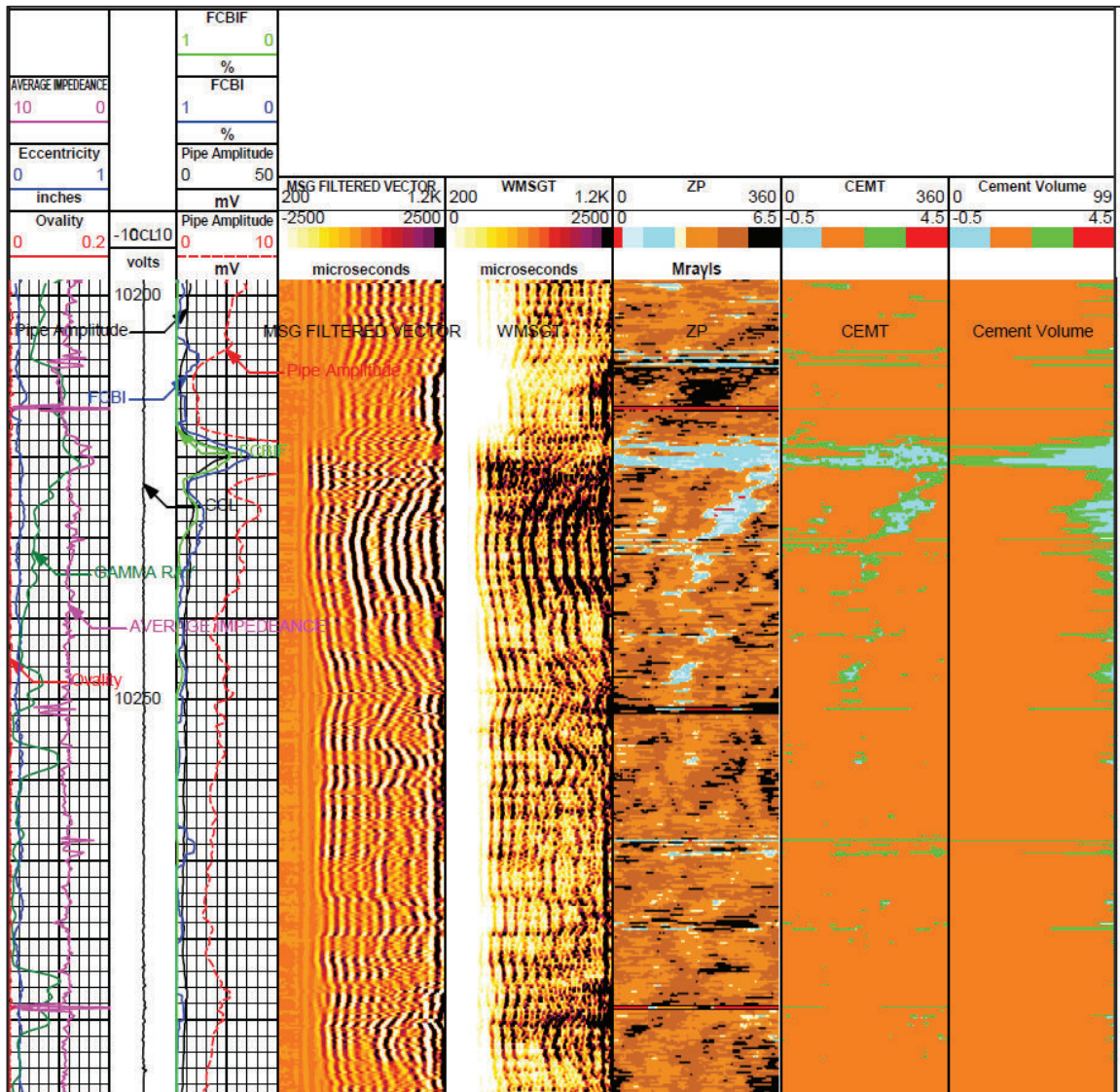


FUENTE: Wireline & Perforating.  
Elaborado por: Santiago Sisalema

La Evaluación Avanzada de la cementación muestra que las curvas de adherencia ultrasónica y procesada presentan altos valores, 0,95 en promedio a lo largo de la zona de interés, salvo una pequeña sección en la parte superior donde se tiene una baja, llegando a ser de 0,5; mientras tanto el mapa de cemento y su volumen muestran que efectivamente la zona muestra buen aislamiento a lo largo del intercalo de interés, salvo dicha sección corta mencionada donde la presencia de fluido es muy alta, cerca del 75% y necesitará una evaluación de otro tipo para determinar la afectación.



### INTERPRETACIÓN AVANZADA - POZO A4 - ARENA HOLLÍN



FUENTE: FRS - Wireline & Perforating.  
 Elaborado por: Santiago Sisalema

## **ANEXO 3**

# **PRUEBAS MECÁNICAS Y DE FLUIDOS EN LECHADAS CONVENCIONALES Y ELÁSTICAS**

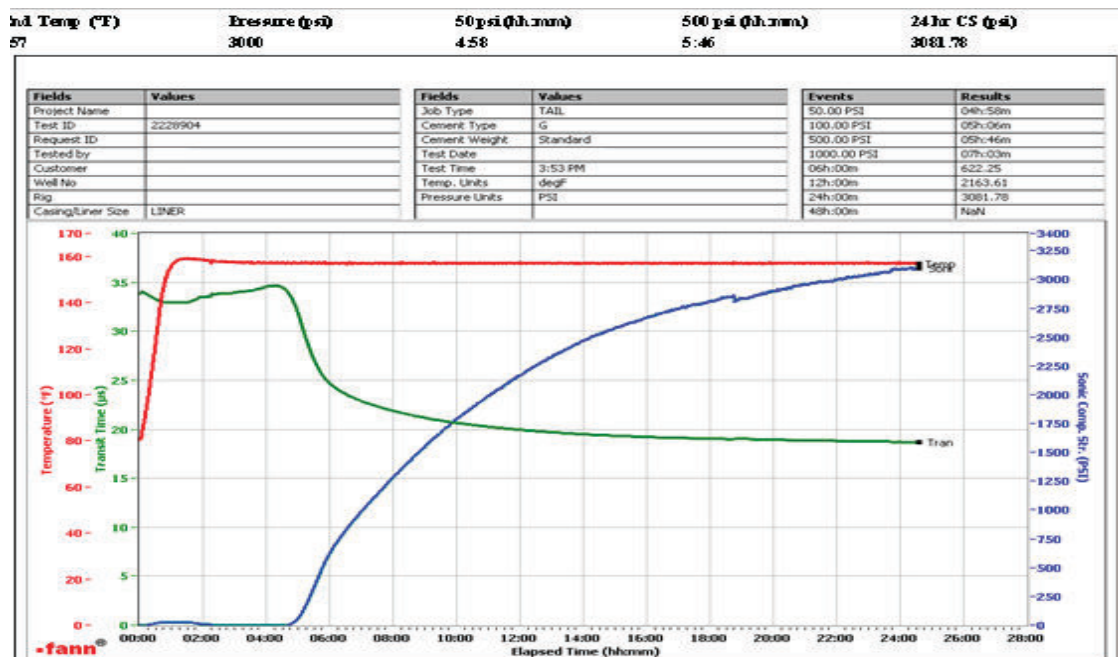
### A.3. INFORMACIÓN DE LA LECHADA ELÁSTICA Y CONVENCIONAL

#### A.3.1. Información de pruebas de fluido aplicadas a las lechadas convencionales y elásticas

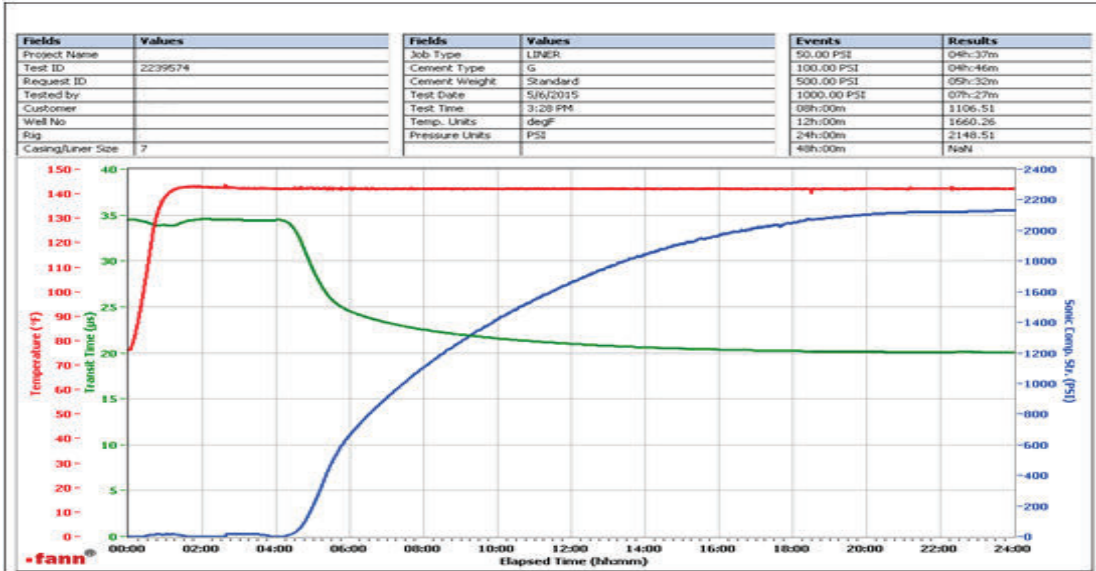
Estrada y Olivo (2009) mencionan que las lechadas convencionales y elásticas deben cumplir parámetros básicos de ensayo, los cuales son resumidos en la tabla A.1.

Tipo de lechada	Ensayo	Densidad (lb/gal)	Agua Libre (cc)	Tiempo Bombeable (hh:mm)	Ensayo destructivo de resistencia a la compresión (psi)
Convencional	EC-1602	16	50	12:10	3796
Convencional	ECWL-1603	16,5	26	08:00	3746
Elástica	ECLX1655	16,5	20	05:30	2129
Elástica	ECWL1654	16,5	22	04:20	1180

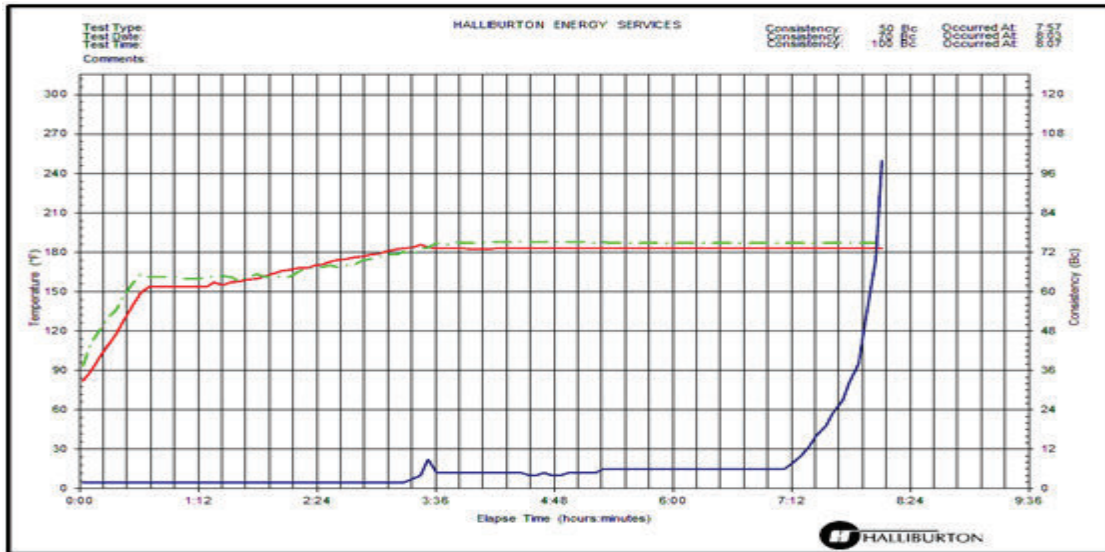
La figura 1 muestra el análisis UCA para los pozos evaluados con lechadas convencionales y la figura 1.2 para los de lechadas elásticas.



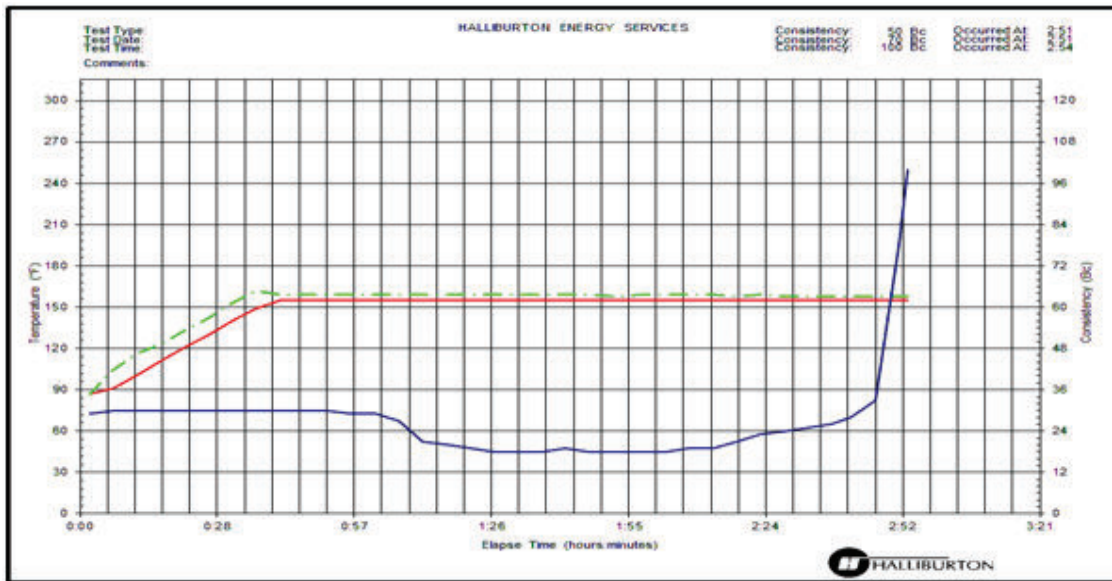
Prueba UCA para una lechada convencional



Prueba UCA para una lechada elástica



Prueba de tiempo bombeable para una lechada convencional



Prueba de tiempo bombeable para una lechada elástica

### A.3.2. Información de pruebas mecánicas aplicadas a las lechadas convencionales y elásticas

Estrada y Olivo (2009) mencionan además las propiedades mecánicas producto de las pruebas sin confinamiento.

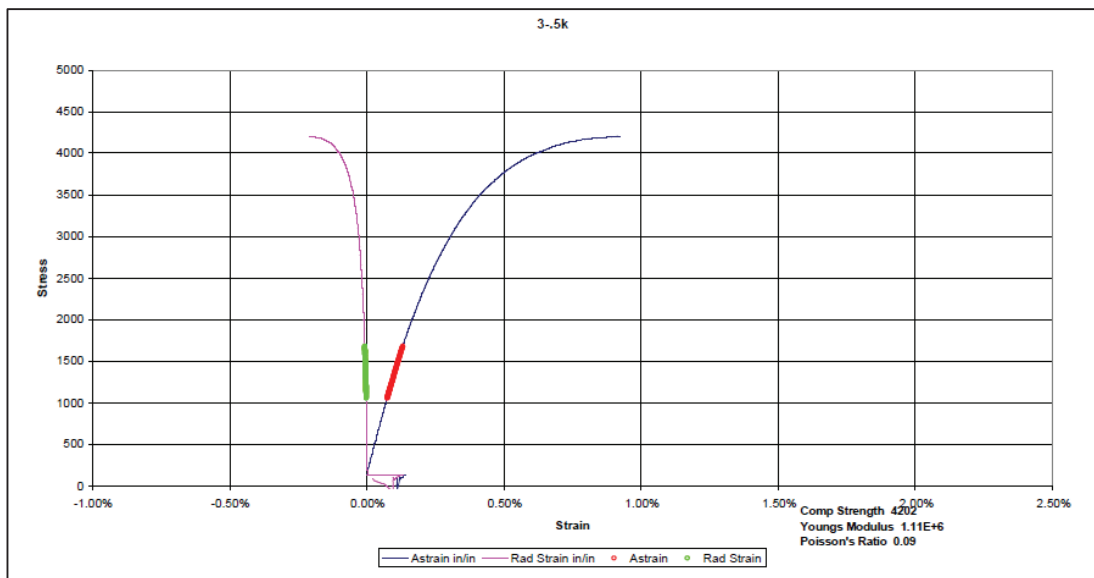
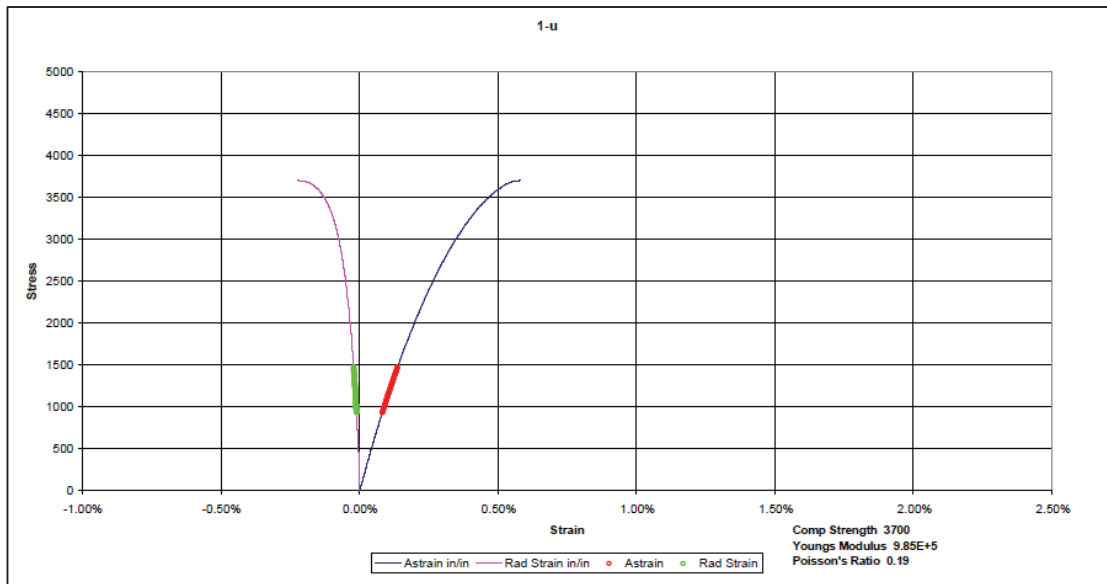
Tipo de lechada	Ensayo	BHS T (°F)	Resistencia a la compresión (psi)	Ángulo de fricción (°)	Esfuerzo o tensil (psi)	Módulo de Young	Radio de Poisson
Convencional	EC1602	189	3798	36,18	339	1,07E+6	0,160
Convencional	ECWL1603	189	3746	18,09	427	1,00E+6	0,187
Elástica	ECLX1655	208	2129	27,70	205	7,05E+5	0,182
Elástica	ECWL1654	208	1180	19,36	176	4,96E+5	0,175

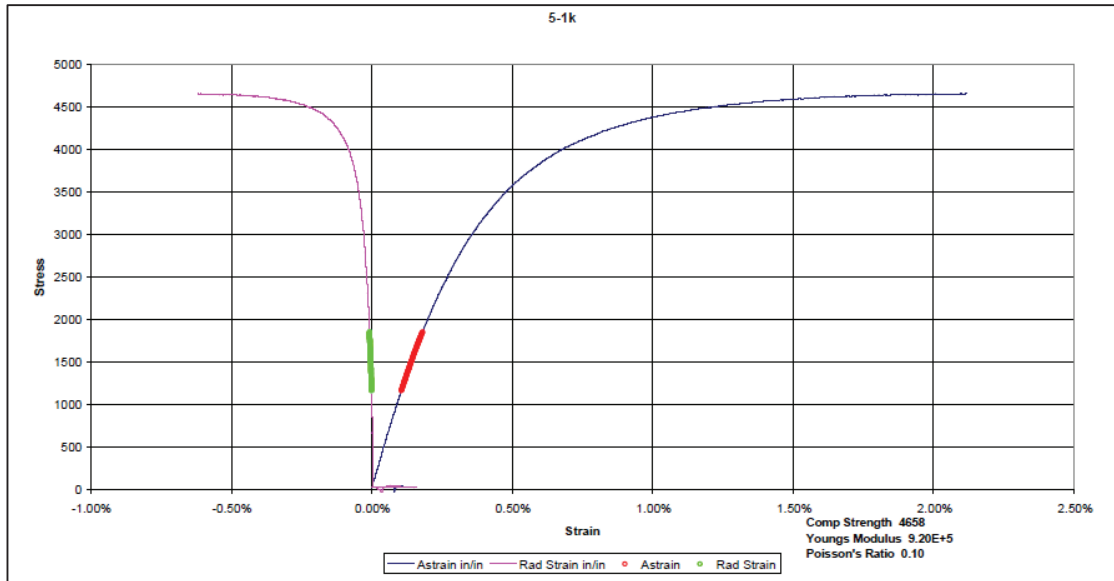
A continuación se muestran pruebas de propiedades mecánicas para lechadas convencionales y para elastoméricas.



Lechadas Convencionales

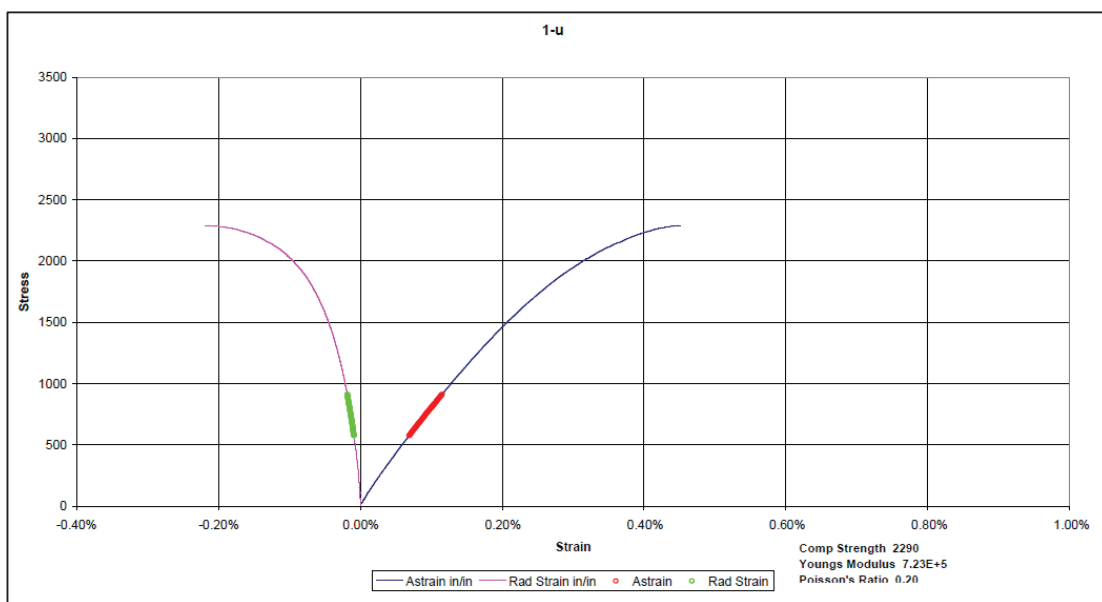
Fecha de prueba	Muestra	Presión de confinamiento psi	Esfuerzo compresivo psi	Módulo de Young	Coefficiente de Poisson
8/14/08	1	0	3700	0,99E+06	0,187
8/25/08	3	500	4202	1,11E+06	0,092
8/25/08	5	1000	4658	0,92E+06	0,095

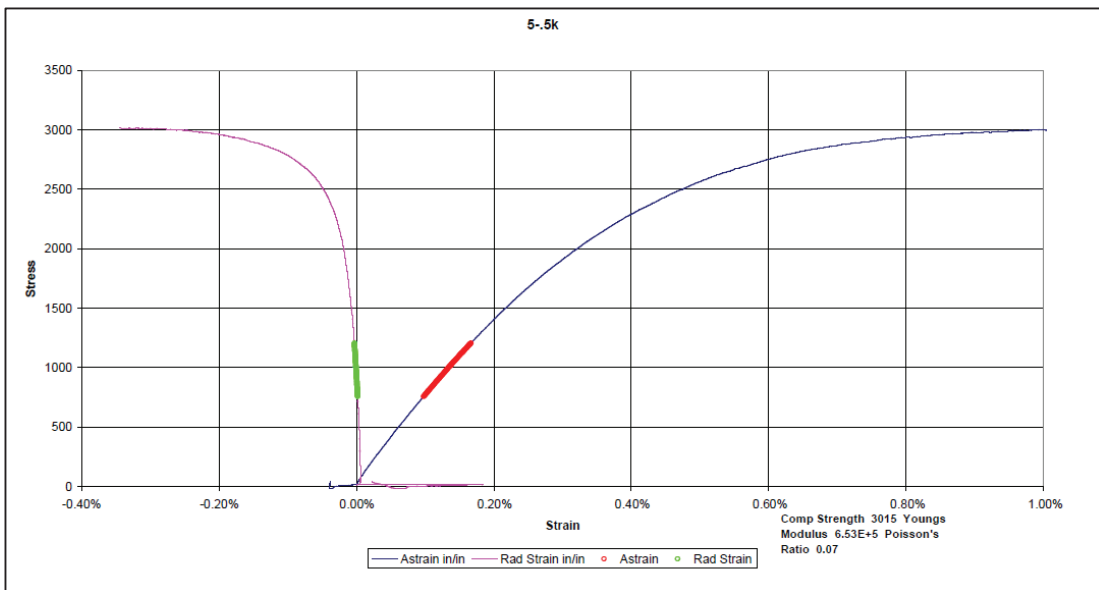
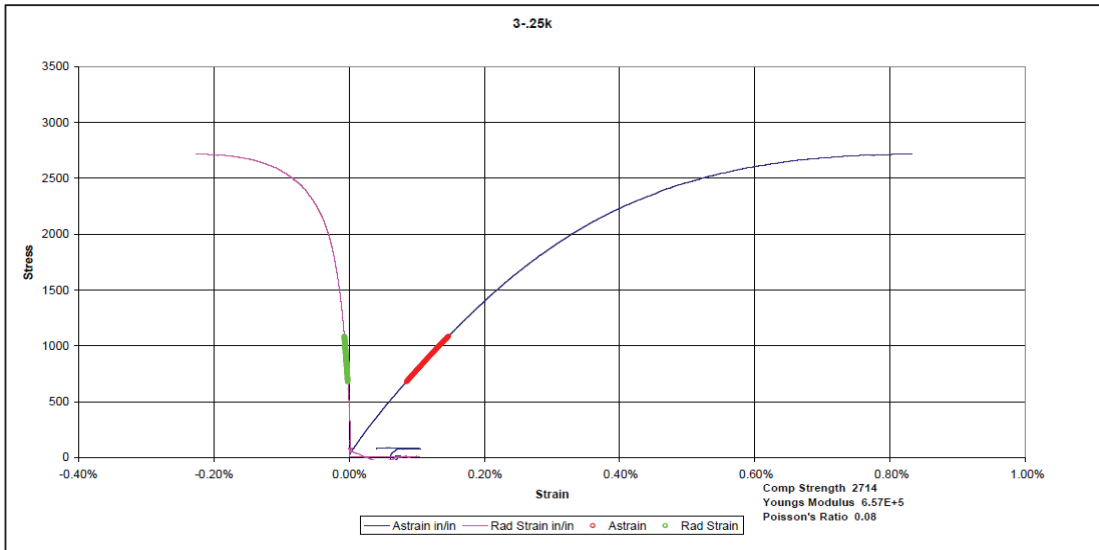




Lechadas elásticas

Fecha de prueba	Muestra	Presión de confinamiento psi	Esfuerzo compresivo psi	Módulo de Young	Coficiente de Poisson
8/20/08	1	0	2290	7,23E+05	0,203
8/25/08	3	250	2714	6,57E+05	0,079
8/25/08	5	500	3015	6,53E+05	0,069





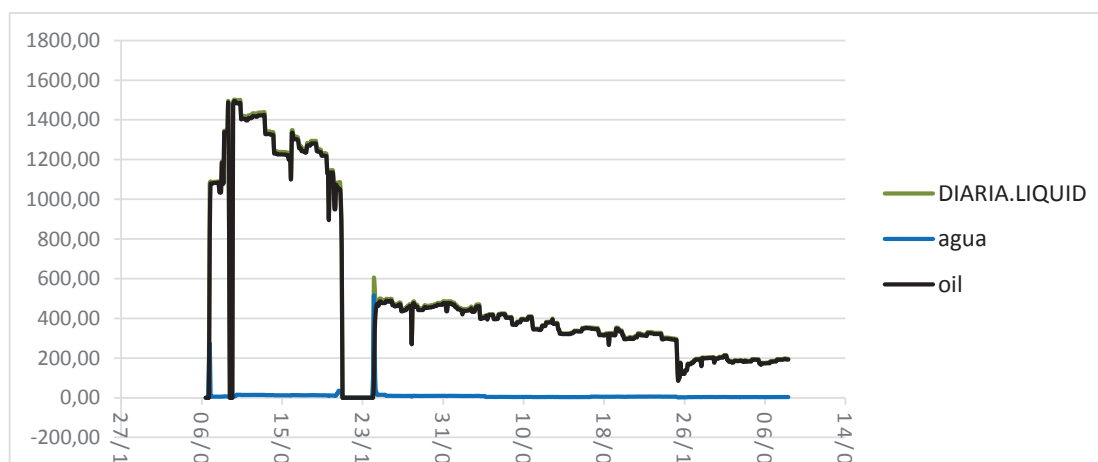
**Anexo 4**

**PROPIEDADES Y ESTADO DE PRODUCCIÓN DE POZOS  
EVALUADOS**

## Propiedades del pozo A1

PROPIEDADES DEL POZO A1		
Arena	Basal Tena	
Intervalo	9326" - 9400"	ft
Salinidad	44000	Ppm
Corte de agua actual	2	%
Producción Inicial Fluido	1080	Bbl
Producción Inicial Oil	1070	Bbl
Producción Inicial Agua	10	Bbl

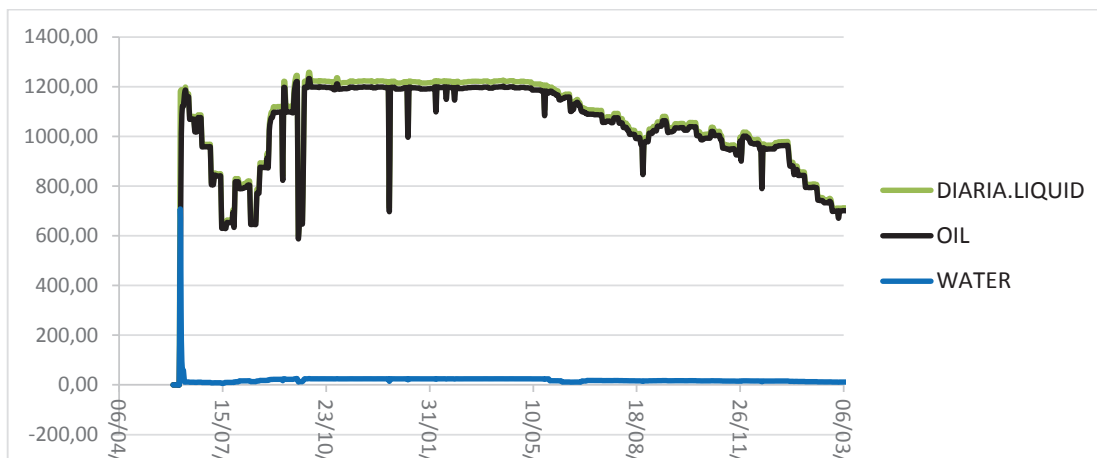
## Producción pozo A1 (Basal Tena)



## Propiedades del pozo A2

PROPIEDADES DEL POZO A2		
Arena	Basal Tena	
Intervalo	9300" - 9370"	ft
Salinidad	40000	Ppm
Corte de agua	2	%
Producción Inicial Fluido	1181	Bbl
Producción Inicial Oil	1169	Bbl
Producción Inicial Agua	12	Bbl

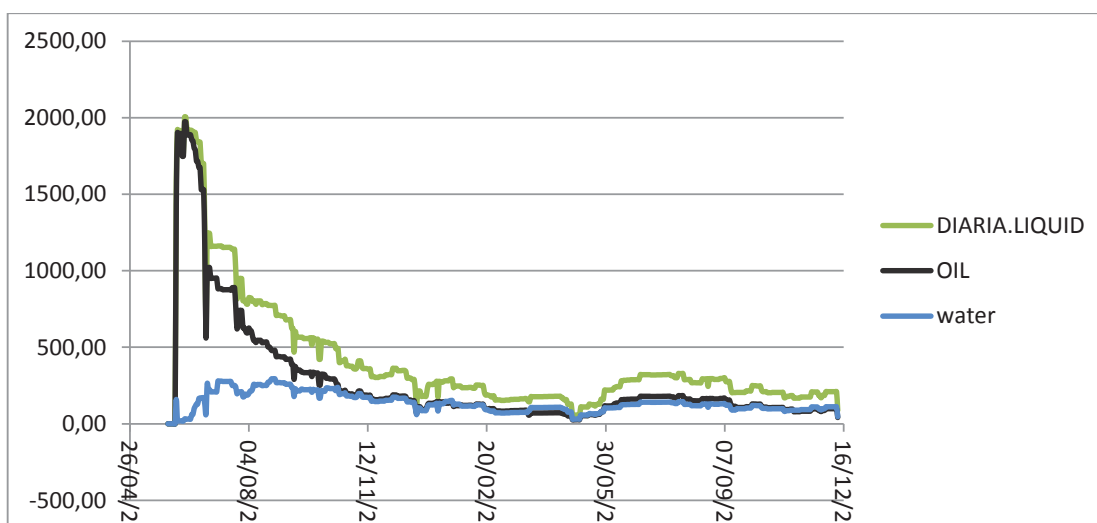
### Producción pozo A2 (Basal Tena)



### Propiedades del pozo A2

PROPIEDADES DEL POZO A2		
Arena	Hollín	
Intervalo	10460" - 10480"	ft
Salinidad	10000	Ppm
Corte de agua actual	53	%
Producción Inicial Fluido	2005	Bbl
Producción Inicial Oil	1972	Bbl
Producción Inicial Agua	33	Bbl

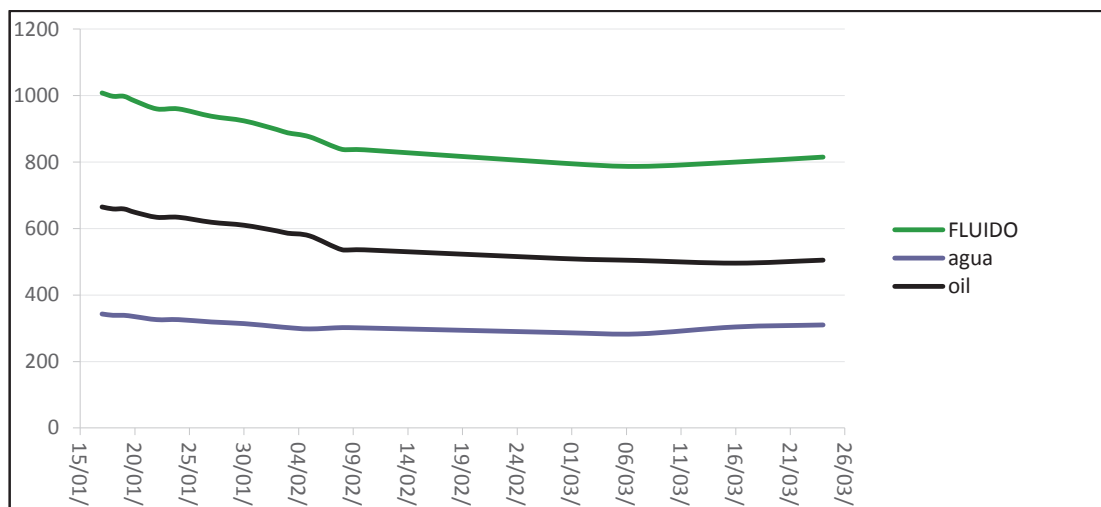
### Producción pozo A2 (Hollín)



## PROPIEDADES POZO A3

PROPIEDADES DEL POZO A3		
Arena	T	
Intervalo	10530 – 10610	Ft
Salinidad	64000	Ppm
Corte de agua actual	38	%
Producción Inicial Fluido	1008	Bbl
Producción Inicial Oil	665	Bbl
Producción Inicial Agua	343	Bbl

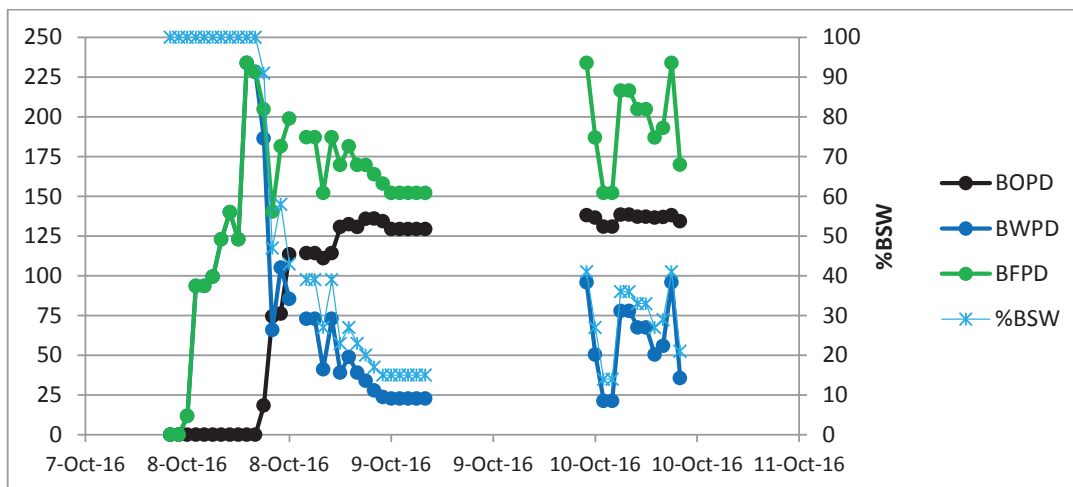
### Producción pozo A3 (Arena T)



### Propiedades del pozo A4

PROPIEDADES DEL POZO A4		
Arena	Hollín Inferior	
Intervalo	10334' - 10340'	ft
Salinidad	9500	Ppm
Corte de agua actual	15	%
Producción Inicial Fluido	205	Bbl
Producción Inicial Oil	18	Bbl
Producción Inicial Agua	186	Bbl

### Producción pozo A4 (Hollín)



### Propiedades del pozo A4

PROPIEDADES DEL POZO A4		
Arena	U	
Intervalo	9868'-987'	ft
Salinidad	25000	Ppm
Corte de agua actual	100	%
Producción Inicial Fluido	86	Bbl
Producción Inicial Oil	86	Bbl
Producción Inicial Agua	0	Bbl

### Producción pozo A4 (Arena U)

