

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ANÁLISIS Y APLICACIÓN DEL SISTEMA WELL-LIFE 3 PARA INCREMENTAR LA VIDA ÚTIL DEL CEMENTO EN POZOS DEL ORIENTE ECUATORIANO

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIEROS EN
PETRÓLEOS**

PAÚL FERNANDO ESTRADA MOROCHO

paulfernando18@gmail.com

JUAN CARLOS OLIVO FERNÁNDEZ

juank21ec@hotmail.com

DIRECTOR: ING. RAÚL VALENCIA, Msc

raul.valencia@epn.edu.ec

Quito, marzo 2009

DECLARACIÓN

Nosotros, Paúl Fernando Estrada Morocho y Juan Carlos Olivo Fernández, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normatividad institucional vigente.

Paúl Fernando Estrada Morocho

Juan Carlos Olivo Fernández

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Paúl Fernando Estrada Morocho y Juan Carlos Olivo Fernández, bajo mi supervisión.

Ing. Raúl Valencia, Msc

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A todos los profesores y personal administrativo que conforman la carrera de Ingeniería en Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional, por sus conocimientos impartidos durante estos años.

Al Ing. Raúl Valencia, Msc por su excelente dirección en el desarrollo este proyecto de titulación.

A HALLIBURTON LATIN AMERICA, especialmente a PSL CEMENTING, por su colaboración para que el presente proyecto se lleve a cabo.

A los Ingenieros Juan Carlos Proaño, Marco Cayo y de manera especial al Ingeniero Carlos Martínez, por compartir su tiempo y conocimientos para la realización de este proyecto.

A mi familia que de una u otra manera contribuyeron para que éste proyecto se lleve a cabo.

A todos mis amigos por el apoyo brindado.

Paúl Fernando

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia por creer en mí y apoyarme en todo momento.

A la Escuela Politécnica Nacional, a mis compañeros testigos de una vida politécnica llena de alegría, humildad, y sacrificio.

A Halliburton, Cementing PSL representada por el Ing. Juan Carlos Proaño. Gracias a todo el equipo por compartir sus conocimientos de manera desinteresada y abierta.

A los Ingenieros Carlos Martínez y Marco Cayo, por confiar en nosotros y proveernos las herramientas necesarias para la elaboración de este proyecto.

Al Ing. Raúl Valencia, docente de la Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional y director del presente proyecto al transmitir sus ideas y experiencia.

Juan Carlos

DEDICATORIA

A mi madre, por el esfuerzo realizado durante toda su vida.

Paúl Fernando

DEDICATORIA

Con mucho amor y eterna gratitud a mis padres, Sergio y Mariana.

Juan Carlos

CONTENIDO GENERAL

CAPÍTULO I

| | |
|--|-----------|
| FUNDAMENTOS TEÓRICOS----- | 1 |
| 1.1 CEMENTO PORTLAND----- | 1 |
| 1.1.1 DEFINICIÓN ----- | 1 |
| 1.1.2 NOTACIÓN QUÍMICA ----- | 2 |
| 1.1.3 FABRICACIÓN ----- | 2 |
| 1.1.3.1 Materias primas----- | 2 |
| 1.1.3.2 Proceso seco----- | 3 |
| 1.1.3.3 Proceso húmedo ----- | 3 |
| 1.2 PRINCIPALES COMPUESTOS DEL CEMENTO Y SUS FUNCIONES----- | 6 |
| 1.2.1 SILICATO TRICÁLCICO ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)----- | 6 |
| 1.2.2 SILICATO DICÁLCICO ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) ----- | 6 |
| 1.2.3. ALUMMINATO TRICÁLCICO ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) ----- | 6 |
| 1.2.4. ALUMINOFERRITA TETRACÁLCICO ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) ----- | 7 |
| 1.3 HIDRATACIÓN DE LAS FASES DE CLINKER----- | 7 |
| 1.3.1 HIDRATACIÓN DE LAS FASES DE SILICATO. ----- | 8 |
| 1.3.2 HIDRATACIÓN DE LAS FASES DE ALUMINATO. ----- | 9 |
| 1.3.3 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND – SISTEMA MULTICOMPONENTE. ----- | 10 |
| 1.4 EFECTOS DE LA HIDRATACIÓN----- | 12 |
| 1.4.1 CAMBIO DE VOLUMEN DURANTE EL FRAGUADO ----- | 12 |
| 1.4.2 EFECTO DE LA TEMPERATURA.----- | 13 |
| 1.4.3 FRAGUADO RELÁMPAGO Y FRAGUADO FALSO----- | 14 |
| 1.4.4 EFECTOS DEL ENVEJECIMIENTO----- | 15 |
| 1.4.5 RESISTENCIA A LOS SULFATOS----- | 15 |
| 1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ----- | 16 |
| 1.5.1 CEMENTO CLASE A ----- | 16 |
| 1.5.2 CEMENTO CLASE B ----- | 16 |
| 1.5.3 CEMENTO CLASE C ----- | 16 |
| 1.5.4 CEMENTO CLASE D ----- | 17 |
| 1.5.5 CEMENTO CLASE E Y F----- | 17 |
| 1.5.6 CEMENTOS CLASE G Y H----- | 17 |

| | |
|--|-----------|
| 1.5.7 CEMENTO CLASE J----- | 17 |
| 1.5.8 OTROS TIPOS DE CEMENTOS ----- | 17 |
| 1.6 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS CEMENTOS ----- | 19 |
| 1.6.1 Ge = GRAVEDAD ESPECÍFICA ----- | 19 |
| 1.6.2 PV= PESO VOLUMÉTRICO ----- | 19 |
| 1.6.3 FINEZA DE LOS GRANOS DE CEMENTO----- | 19 |
| 1.6.4 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA ----- | 20 |
| 1.6.5 TAMAÑO PROMEDIO DE PARTÍCULAS ----- | 20 |
| 1.6.6 REQUERIMIENTO DE AGUA NORMAL----- | 20 |
| 1.6.7 REQUERIMIENTO DE AGUA MÍNIMA----- | 20 |
| 1.6.8 DENSIDAD DE LA LECHADA----- | 20 |
| 1.7 CEMENTACIÓN PRIMARIA----- | 21 |
| 1.7.1 DEFINICIÓN ----- | 21 |
| 1.7.2 OBJETIVOS----- | 21 |
| 1.7.3 TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO ----- | 21 |
| 1.7.3.1 Tubería Conductora----- | 22 |
| 1.7.3.2 Tubería Superficial ----- | 22 |
| 1.7.3.3 Tubería Intermedia----- | 22 |
| 1.7.3.4 Tubería de Producción----- | 23 |
| 1.7.3.5 Tubería de Revestimiento Corta (Liner) ----- | 23 |
| 1.7.4 INFORMACIÓN NECESARIA PARA REALIZAR TRABAJOS DE CEMENTACIÓN----- | 24 |
| 1.7.4.1 Datos del pozo: ----- | 24 |
| 1.7.4.2 Datos de la formación: ----- | 24 |
| 1.7.4.3 Datos del lodo de perforación: ----- | 25 |
| 1.7.5 DISPOSITIVOS, HERRAMIENTAS, Y EQUIPOS PARA CEMENTACIÓN.----- | 25 |
| 1.7.5.1 Cabezas de Cementación ----- | 25 |
| 1.7.5.2 Zapatos Guías ----- | 25 |
| 1.7.5.3 Collares Flotadores ----- | 26 |
| 1.7.5.4 Dispositivos de Llenado Automático ó Diferencial (Zapatos y Collares)----- | 26 |
| 1.7.5.5 Dispositivos de Etapas----- | 27 |
| 1.7.5.6 Tapones de Goma ----- | 28 |
| 1.7.5.7 Centralizadores ----- | 28 |
| 1.7.5.8 Raspadores ó Limpiadores ----- | 29 |
| 1.7.5.9 Colgadores----- | 29 |
| 1.7.6 CHECK-LIST EN EL POZO ----- | 30 |
| 1.7.7 SECUENCIA OPERATIVA ----- | 31 |
| 1.7.8 CEMENTACIÓN DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA - SECUENCIA OPERATIVA | 32 |
| 1.8 MEJORES PRÁCTICAS EN LA CEMENTACIÓN DE POZOS----- | 34 |
| 1.8.1 ACONDICIONAMIENTO DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN----- | 34 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 1.8.2 | USO DE LAVADORES Y ESPACIADORES | 35 |
| 1.8.3 | CENTRALIZACIÓN DE LA TUBERÍA | 37 |
| 1.8.4 | MOVIMIENTO DE LA TUBERÍA | 39 |
| 1.8.5 | CAUDALES DE FLUJO | 40 |
| 1.9 | FALLAS DE LA CEMENTACIÓN | 41 |
| CAPÍTULO II | | |
| CEMENTACIÓN DE POZOS MEDIANTE EL SISTEMA WELL LIFE III™ | | |
| 2.1 | INTRODUCCIÓN | 42 |
| 2.1.1 | CONCEPTOS DEL SISTEMA WELL LIFE III™ | 42 |
| 2.2 | MODELAMIENTO | 43 |
| 2.2.1 | PROPIEDADES MECÁNICAS | 43 |
| 2.2.1.1 | Propiedades Elásticas | 43 |
| 2.2.1.1.1 | Módulo de Young | 43 |
| 2.2.1.1.2 | Módulo ó Relación de Poisson | 45 |
| 2.2.1.2 | Límites mecánicos (Fuerzas) | 47 |
| 2.2.1.2.1 | Resistencia a la tensión | 47 |
| 2.2.1.2.2 | Resistencia a la compresión | 48 |
| 2.2.1.2.3 | Resistencia al impacto | 49 |
| 2.2.1.3 | Otras propiedades importantes | 49 |
| 2.2.1.3.1 | Encogimiento | 49 |
| 2.2.1.3.2 | Fatiga | 51 |
| 2.2.1.3.3 | Envolvente de Morh | 51 |
| 2.2.2 | CAPACIDAD REMANENTE | 52 |
| 2.2.3 | FORMAS EN LAS QUE FALLA EL CEMENTO | 53 |
| 2.3 | SOFTWARE WELL LIFE | 56 |
| 2.3.1 | MÉTODO DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS | 56 |
| 2.3.1.1 | Definición del método | 56 |
| 2.3.1.2 | Aplicación computacional del método. | 57 |
| 2.3.1.2.1 | Pre-procesamiento | 58 |
| 2.3.1.2.2 | Análisis (cómputo de la solución) | 58 |
| 2.3.1.2.3 | Post-procesamiento (visualización) | 59 |
| 2.4 | DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO | 59 |
| 2.4.1 | ADITIVOS | 59 |
| 2.4.1.1 | Aditivos para lechadas de cemento convencionales. | 60 |
| 2.4.1.1.1 | Aceleradores | 60 |
| 2.4.1.1.2 | Alivianadores de Peso | 61 |
| 2.4.1.1.3 | Densificantes | 62 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.1.1.4 Retardadores----- | 62 |
| 2.4.1.1.5 Controladores de Pérdida de Fluido----- | 63 |
| 2.4.1.1.6 Dispersantes ó Reductores de Fricción ----- | 64 |
| 2.4.1.1.7 Controladores de Gas ----- | 65 |
| 2.4.1.1.8 Antiespumantes ----- | 66 |
| 2.4.1.1.9 Expansivos ----- | 66 |
| 2.4.1.1.10 Aditivos especiales----- | 67 |
| 2.4.1.2 Nueva tecnología de aditivos para modificar las propiedades mecánicas del cemento ----- | 67 |
| 2.4.1.2.1 Well Life 665™ ----- | 68 |
| 2.4.1.2.2 Well Life 734™ ----- | 69 |
| 2.4.1.2.3 Well Life 809™ ----- | 70 |
| 2.4.1.2.4 Well Life 684™ ----- | 71 |
| 2.4.1.2.5 EZ-FLO™ ----- | 71 |
| 2.4.1.2.6 MICROMAX™----- | 72 |
| 2.4.1.2.7 FWCA™ ----- | 73 |
| 2.4.1.2.8 Latex 2000 ----- | 73 |
| 2.4.1.2.9 Stabilizer 434C (Estabilizador de Latex)----- | 74 |
| 2.4.1.2.10 Super CBL ----- | 74 |
| 2.4.2 LABORATORIO DE CEMENTACIÓN ----- | 75 |
| 2.4.2.1 Diseño y evaluación de nuevas lechadas Well Life con propiedades mecánicas modificadas----- | 76 |
| 2.4.2.1.1 Propósito ----- | 76 |
| 2.4.2.1.2 Discusión ----- | 76 |
| 2.4.2.2 Pruebas para obtener las propiedades mecánicas del cemento ----- | 78 |
| 2.4.2.2.1 Ensayo para determinar la resistencia a la compresión----- | 79 |
| 2.4.2.2.2 Ensayos Static Gel Strength (SGS)----- | 79 |
| 2.4.2.2.3 Ensayo de compresión sin confinamiento ----- | 81 |
| 2.4.2.2.4 Ensayo de compresión bajo confinamiento ----- | 84 |
| 2.4.2.2.5 Resistencia a la Tensión ----- | 85 |
| 2.4.2.3 Resultados ----- | 86 |
| 2.5 CEMENT ASSURANCE TOOL ----- | 91 |
| 2.5.1 TECNOLOGÍA HINCHABLE ----- | 91 |
| 2.5.1.1 Historia----- | 91 |
| 2.5.1.2 Principios de Funcionamiento ----- | 92 |
| 2.5.1.2.1 Proceso de Ósmosis.----- | 93 |
| 2.5.1.2.2 Proceso termodinámico de absorción ----- | 93 |
| 2.5.1.3 Packers hinchables en hidrocarburos. ----- | 94 |
| 2.5.1.4 Packers hinchables en agua ----- | 95 |
| 2.5.1.5 Tipos de packers hinchables de acuerdo a su aplicación----- | 96 |

| | |
|---|-----|
| 2.5.2 DESCRIPCIÓN DEL CEMENT ASSURANCE TOOL ----- | 97 |
| 2.5.3 INSTALACIÓN----- | 98 |
| 2.5.4 CARACTERÍSTICAS----- | 98 |
| 2.5.5 VENTAJAS ----- | 99 |
| 2.5.6 COLOCACIÓN----- | 100 |

CAPITULO III

| | |
|--|------------|
| ANÁLISIS COMPARATIVO DE POZOS CEMENTADOS MEDIANTE EL SISTEMA CONVENCIONAL Y POZOS CEMENTADOS MEDIANTE EL SISTEMA WELL LIFE III™ ----- | 101 |
|--|------------|

| | |
|---|------------|
| 3.1 DATOS PARA EL DISEÑO----- | 101 |
| 3.1.1 POZO X - ORIENTE ECUATORIANO----- | 101 |
| 3.1.2 PROPIEDADES DE LA FORMACIÓN----- | 103 |
| 3.1.3 PROBLEMAS OBSERVADOS EN POZOS DEL ÁREA----- | 103 |
| 3.2 CEMENTACIONES CONVENCIONALES ----- | 104 |
| 3.2.1 IDENTIFICACIÓN DEL MODO DE FALLA Y CAPACIDAD REMANENTE – CEMENTO CONVENCIONAL ----- | 104 |
| 3.2.2 EVALUACIÓN DEL DAÑO POTENCIAL POR PÉRDIDA DE ADHERENCIA A LA FORMACIÓN – CEMENTO CONVENCIONAL. ----- | 105 |
| 3.2.3 EVALUACIÓN DEL DAÑO POTENCIAL POR ESFUERZO CORTANTE-CEMENTO CONVENCIONAL ----- | 106 |
| 3.3 IDENTIFICACIÓN DEL MODO DE FALLA Y CAPACIDAD REMANENTE – CEMENTO WELL-LIFE ----- | 107 |
| 3.4 COMPARATIVO DE LAS LECHADAS DISEÑADAS ----- | 109 |

CAPITULO IV

| | |
|--|------------|
| ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO----- | 110 |
| 4.1 INTRODUCCIÓN ----- | 110 |
| 4.2 TIEMPO Y COSTO DE INTERVENCIONES DE WORKOVER (CEMENTACIÓN REMEDIAL) ----- | 111 |
| 4.3 PÉRDIDA EN PRODUCCIÓN----- | 113 |
| 4.3.1 ANÁLISIS DEL AHORRO EN DÍAS DE TALADRO, COMPLETACIÓN----- | 113 |
| 4.3.2 COSTO DE PRODUCCIÓN Y MANEJO DE AGUA ----- | 113 |
| 4.4 COSTO DE LA CEMENTACIÓN WELL LIFE III™ ----- | 115 |

| | |
|--|------------|
| 4.5 BALANCE GENERAL DE LA OPERADORA | 116 |
|--|------------|

CAPITULO V

| | |
|---------------------------------------|------------|
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 117 |
|---------------------------------------|------------|

| | |
|-------------------------|------------|
| 5.1 CONCLUSIONES | 117 |
|-------------------------|------------|

| | |
|----------------------------|------------|
| 5.2 RECOMENDACIONES | 119 |
|----------------------------|------------|

| | |
|-----------------------------------|------------|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 120 |
|-----------------------------------|------------|

| | |
|---------------------|------------|
| ABREVIATURAS | 122 |
|---------------------|------------|

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

| | |
|--|----|
| <i>Tabla 1.1 Zonas del horno</i> | 5 |
| <i>Tabla 1.2 Características de la hidratación de los compuestos del cemento</i> | 7 |
| <i>Tabla 1.3 Secuencia de la reacción</i> | 11 |
| <i>Tabla 1.4 Clasificación API del Cemento</i> | 18 |
| <i>Tabla 1.5 Centralización de tubería</i> | 38 |
| <i>Tabla 1.6 Caudales de desplazamiento</i> | 41 |

CAPÍTULO II

| | |
|--|----|
| <i>Tabla 2.2 Composición del cemento para 16.50 lb/gal ElastiCem cement.</i> | 77 |
| <i>Tabla 2.3 Composición del cemento para 16 lb/gal LifeCem cement.</i> | 77 |
| <i>Tabla 2.4 Composición del cemento para 16.50 lb/gal LifeCem cement</i> | 78 |
| <i>Tabla 2.5 Requerimientos básicos para diseño de lechadas ElastiCem y LifeCem convencionales</i> | 86 |
| <i>Tabla 2.6 Propiedades Mecánicas (resultados promedios de las pruebas sin confinamiento)</i> | 90 |

CAPITULO III

| | |
|---|-----|
| <i>Tabla 3.1 Parámetros para el diseño Well Life III™</i> | 102 |
| <i>Tabla 3.2 Propiedades de la formación</i> | 103 |

CAPITULO IV

| | |
|---|-----|
| <i>Tabla 4.1 Costos asociados a una cementación convencional de un liner de 7" para una empresa operadora</i> | 111 |
| <i>Tabla 4.2 Costos asociados a una cementación remedial</i> | 112 |
| <i>Tabla 4.4 Costo del manejo del agua al primer año de vida productiva</i> | 115 |
| <i>Tabla 4.5 Pérdidas previstas para la empresa operadora por mala cementación</i> | 115 |
| <i>Tabla 4.6 Costo de la cementación Well Life III™</i> | 115 |
| <i>Tabla 4.7 Costo del manejo del agua al primer año de vida productiva – Cementación Well Life III™</i> | 116 |
| <i>Tabla 4.8 Beneficio para la empresa operadora por pozo.</i> | 116 |

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

| | |
|--|---------------------------------|
| <i>Figura 1.1 Diagrama de flujo sistemático del proceso seco</i> ----- | 3 |
| <i>Figura 1.2 Diagrama de flujo sistemático del proceso húmedo</i> ----- | 3 |
| <i>Figura 1.3 Diagrama de flujo sistemático proceso de quema</i> ----- | 4 |
| <i>Figura 1.4 Zonas del horno</i> ----- | 4 |
| <i>Figura 1.5 Diagrama de flujo sistemático del proceso de molido y almacenamiento</i> ----- | 5 |
| <i>Figura 1.6 Estructura del cristal de las fases silicato</i> ----- | 8 |
| <i>Figura 1.7 Formación de cristales de etringita</i> ----- | 10 |
| <i>Figura 1.8 Rata de hidratación de las fases puras</i> | 10 |
| <i>Figura 1.9 Representación sistemática de la hidratación del cemento portland</i> ----- | 11 |
| <i>Figura 1.10 Modelo de la hidratación del cemento</i> ----- | 12 |
| <i>Figura 1.11 Efectos de la temperatura sobre la velocidad de hidratación del cemento Portland Tipo G</i> ----- | 13 |
| <i>Figura 1.12 Tuberías de Revestimiento</i> ----- | 24 |
| <i>Figura 1.13 Cabeza de Cementación</i> ----- | 25 |
| <i>Figura 1.14 Zapato Guía</i> ----- | 26 |
| <i>Figura 1.15 Collar Flotador</i> ----- | 26 |
| <i>Figura 1.16 Dispositivos de Llenado Automático ó Diferencial (Zapatos y Collares)</i> ----- | 27 |
| <i>Figura 1.17 Dispositivos de Etapas</i> ----- | 27 |
| <i>Figura 1.18 Tapones de Goma</i> ----- | 28 |
| <i>Figura 1.19 Centralizador</i> ----- | 28 |
| <i>Figura 1.20 Raspadores ó Limpiadores</i> ----- | 29 |
| <i>Figura 1.21 Colgador expandible (Versaflex)</i> ----- | 30 |
| <i>Figura 1.22 Instalación de un colgador expandible</i> ----- | 32 |
| <i>Figura 1.23 Remoción del fluido de perforación en la cara de la formación y el casing</i> ---- | 35 |
| <i>Figura 1.24 Uso de lavadores y espaciadores</i> ----- | 36 |
| <i>Figura 1.25 Efecto del tiempo estático en la eficiencia de desplazamiento.</i> ----- | 37 |
| <i>!Final de fórmula inesperado</i> | |
| <i>Figura 1.27 Porcentaje de Stand Off</i> ----- | 38 |
| <i>Figura 1.28 Efecto de péndulo de la tubería</i> ----- | 38;Error! Marcador no definido. |
| <i>Figura 1.29 Tubería centralizada</i> ----- | 39 |
| <i>Figura 1.30 Movimiento de la tubería en forma rotacional</i> ----- | 39 |
| <i>Figura 1.31 Movimiento de la tubería</i> ----- | 40 |

CAPITULO II

| | |
|---|--------------------------------------|
| Figura 2.1 Sistema Well Life III™ ----- | 43 |
| Figura 2.2 Módulo de Young ----- | 44 |
| Figura 2.3 Elasticidad de diferentes materiales ----- | 45 |
| Figura 2.4 Deformación de un cuerpo al aplicar una carga (a) Tensión y (b) Compresión -- | 46 |
| Figura 2.5 Relación de Poisson ----- | 46 |
| Figura 2.6 Relación de Poisson para materiales confinados ----- | 47 |
| Figura 2.7 a) Barra antes de aplicarle la fuerza b) Barra sometida a una fuerza de tensión uniaxial ----- | 47 |
| Figura 2.8 Límite de fatiga de un material ----- | 51 |
| Figura 2.9 Envolvente de Mohr ----- | 52 |
| Figura 2.10 Capacidad remanente del cemento ----- | 53 |
| Figura 2.11A Agrietamiento Radial ----- | 55 |
| Figura 2.11B Cizallamiento por compresión ----- | ¡Error! Marcador no definido. |
| Figura 2.11C Despegadura en la interfaz roca-cemento ----- | 55 |
| Figura 2.11D Despegadura en la interfaz cemento-casing ----- | 56 |
| Figura 2.12 Grilla para el análisis de elementos finitos ----- | 58 |
| Figura 2.13 Aditivo Well Life 665™ ----- | 68 |
| Figura 2.14 Aditivo Well Life 734™ ----- | 70 |
| Figura 2.15 Laboratorio de cementación de Halliburton ----- | 75 |
| Figura 2.16 Elaboración de la lechada de cemento ----- | 78 |
| Figura 2.17 Ultrasonic Cement Analyzer ----- | 79 |
| Figura 2.18 Esfuerzo axial versus tensión en confinamiento ----- | 82 |
| Figura 2.19 Deformación versus esfuerzo para la muestra N° 4 (confinada a 994 psi) ----- | 82 |
| Figura 2.20 Ensayo de compresión sin confinamiento antes de la destrucción ----- | 83 |
| Figura 2.21 Ensayo de compresión sin confinamiento después de la destrucción para una lechada convencional ----- | 83 |
| Figura 2.22 Ensayo de compresión sin confinamiento después de la destrucción para una lechada Well Life ----- | 83 |
| Figura 2.23 Instrumentación instalada en la muestra. ----- | 84 |
| Figura 2.24 Muestra confinada con instrumentación ----- | 84 |
| Figura 2.25 Ensayo de resistencia a la tensión ----- | 85 |
| Figura 2.26 Rampa de temperatura para las lechadas lead EC-1602&ECWL 1603 | 86 |
| Figura 2.27 Rampa de temperatura para las lechadas tail ECLX1655&ECWL 1654 ----- | 87 |
| Figura 2.28 Esfuerzo compresivo para diseño de la lechada lead EC-1602 ----- | 87 |
| Figura 2.29 Esfuerzo compresivo para diseño de la lechada lead ECWL 1603 ----- | 88 |
| Figura 2.30 SGS para diseño de la lechada ElastiCem ECLX1655 ----- | 88 |
| Figura 2.31 SGS para diseño de la lechada LifeCem ECWL 1654 ----- | 89 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 2.32 Rampa de temperatura para el tiempo de curado de las lechadas de 16 Lb/gal en el autoclave ----- | 89 |
| Figura 2.33 Rampa de temperatura para el tiempo de curado de las lechadas de 16.50 Lb/gal en el autoclave ----- | 90 |
| Figura 2.34 (a,b,c,d) Comparación de las propiedades mecánicas entre las distintas lechadas ----- | 90 |
| Figura 2.35 Representación del proceso de ósmosis ----- | 93 |
| Figura 2.36 Packer hinchable ----- | 96 |
| Figura 2.37 Descripción de funcionamiento del Cement Assurance Tool ----- | 97 |
| Figura 2.38 Cement Assurance Tool ----- | 99 |
| Figura 2.39 Protección del micro espacio anular ----- | 99 |

CAPITULO III

| | |
|--|------------|
| Figura 3.1 Estado mecánico del pozo X ----- | 102 |
| Figura 3.2 Registro de propiedades mecánicas de rocas ----- | 103 |
| Figura 3.3 Capacidad remanente - Cemento Convencional ----- | 105 |
| Figura 3.4 Evaluación de la pérdida de adherencia cemento-formación ----- | 106 |
| Figura 3.5 Evaluación del deterioro por esfuerzos de corte ----- | 107 |
| Figura 3.6 Capacidad Remanente lechada Well Life ----- | 108 |
| Figura 3.7 Capacidad Remanente lechada convencional Vs. Well Life ----- | 109 |

CAPITULO IV

| | |
|--|------------|
| Figura 4.1 Canal de flujo a través de la tubería de revestimiento ----- | 112 |
|--|------------|

ANEXOS

| | |
|---|------------|
| Figura A2.1 Software CemLab ----- | 126 |
| Figura A2.2 Software CemLab, elección de los componentes del cemento ----- | 126 |
| Figura A2.3 Balanza digital ----- | 128 |
| Figura A2.4 Recipientes con aditivos pesados | 128 |
| Figura A2.5 Constant Speed Mixer ----- | 129 |
| Figura A2.7 Obtención de una lechada homogénea ----- | 129 |
| Figura A2.8 Viscosímetro de Fann 35 ----- | 130 |
| Figura A2.9 Consistómetro HPHT ----- | 132 |
| Figura A2.10 Recipientes para la prueba de bombeabilidad | 132 |
| Figura A2.11 Comportamiento de la lechada durante la prueba de bombeabilidad ----- | 134 |
| Figura A2.12 Prensa Hidráulica ----- | 135 |
| Figura A2.13 Autoclave ----- | 136 |
| Figura A2.14 Prueba de Fuerza de Compresión mediante método destructivo ----- | 137 |

| | |
|---|------------|
| Figura A2.15 Ultrasonic cement analyzer (UCA) ----- | 138 |
| Figura A2.16 Consistómetro atmosférico ----- | 140 |
| Figura A2.17 Celda de filtrado Atmosférico ----- | 141 |
| Figura A2.18 Malla de 325 micrones para filtrado | 141 |
| Figura A2.19 Cilindro para prueba de sedimentación ----- | 143 |
| Figura A2.20 Anillos de expansión y micrómetro ----- | 144 |

ÍNDICE DE ANEXOS

CAPÍTULO I

| | |
|--|-----|
| <i>Anexo 1.1 Composición Química Del Cemento Portland (Determinada por Análisis Químico Analítico)</i> ----- | 124 |
|--|-----|

CAPÍTULO II

| | |
|---|-----|
| <i>Anexo 2.1 Procedimiento previo a la elaboración de una lechada de cemento</i> ----- | 125 |
| <i>Anexo 2.2: Elaboración de una lechada de cemento según la norma API RP 10 B</i> ----- | 128 |
| <i>Anexo 2.3: Pruebas y Equipos Utilizados para evaluar una lechada de cemento convencional</i> ----- | 130 |
| <i>Anexo 2.4 Determinación de las propiedades mecánicas muestra EC-1602 Well Life</i> ----- | 146 |
| <i>Anexo 2.5 Determinación de las propiedades mecánicas muestra ECWL 1603</i> ----- | 151 |
| <i>Anexo 2.6 Determinación de las propiedades mecánicas lechada ECLX 1655</i> ----- | 156 |
| <i>Anexo 2.7 Determinación de las propiedades mecánicas lechada ECWL 1603</i> ----- | 161 |

RESUMEN

El primordial objetivo del presente Proyecto de Titulación es incrementar la vida útil del cemento mediante la implementación del sistema Well Life III™ en pozos del oriente ecuatoriano. El contenido del proyecto se sintetiza en cinco capítulos, divididos de la siguiente forma:

El capítulo I empieza con una recopilación de los fundamentos teóricos de la cementación de pozos, con miras a establecer las bases para el desarrollo del presente análisis.

Presentadas estas bases, en el capítulo II se realiza un análisis de la cementación de pozos mediante el sistema Well Life III™. Se especifica los pasos o etapas de los que consta el sistema y se realiza el diseño de lechadas Well Life.

En el capítulo III se elabora un análisis comparativo de pozos cementados mediante el sistema convencional y pozos cementados mediante el sistema Well Life III™.

En el capítulo IV se desarrolla un análisis técnico y de costos del sistema de cementación Well Life III™ para establecer las conclusiones y recomendaciones del proyecto en el capítulo V.

PRESENTACION

Durante los años recientes, uno de los mayores esfuerzos de las compañías petroleras ha sido realizar investigaciones sobre la integridad de la cementación a largo plazo. Se ha definido este concepto como “*Cemento para la Vida del Pozo*”. Esta metodología de diseño emplea un Análisis de Elementos Finitos (FEA) para evaluar el efecto de los esfuerzos a que estará sometido el cemento durante la vida productiva del pozo hasta su abandono.

Éste esfuerzo ha resultado en un procedimiento para diseñar un sistema de cementación específico para cada tipo de pozo que permita mantener la integridad del aislamiento durante su vida productiva al cual llamamos **Well Life™**. El cemento puede ser diseñado para un máximo beneficio técnico y económico mediante una evaluación del riesgo de falla potencial asociado con diferentes escenarios y sistemas de cementación.

Para asegurar el aislamiento requerido durante la vida del pozo, existen dos factores críticos en el diseño de cementaciones que deben de considerarse por el equipo de construcción de pozos:

1. El cemento debe ser colocado en la totalidad del espacio anular mediante el desplazamiento eficiente del lodo de perforación y siguiendo todas las buenas prácticas operativas de cementación existentes.
2. Las propiedades de los cementos deberán ser optimizadas de tal manera que puedan soportar los esfuerzos de las diferentes operaciones que se llevarán a cabo durante la vida del pozo.

Numerosas operaciones pueden efectuarse en pozos de petróleo y gas durante su vida productiva. Ejemplos de dichas operaciones son: pruebas de presión-producción, inducciones con nitrógeno, estimulaciones y producción de

hidrocarburos. Estas operaciones resultan en cambios de presión y temperaturas aplicadas durante la vida del pozo. La magnitud de dichos cambios dependerá de las condiciones operativas de cada pozo pero, en todos los casos generan una serie de esfuerzos que actúan sobre el cemento pudiendo perder su integridad original, de ahí la necesidad de considerar en nuestro diseño las operaciones que se llevarán a cabo en los pozos para proveer un aislamiento duradero.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 CEMENTO PORTLAND

1.1.1 DEFINICIÓN

El cemento es una mezcla compleja de caliza (u otros materiales con alto contenido de carbonato de calcio), sílice, hierro y arcilla, molidos y calcinados, que fragua y se endurece al reaccionar con el agua.

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

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

De todos los cementos, el Portland es el más importante en cuanto a términos de calidad, desarrollo de resistencia a la compresión, tensión y a los sulfatos; por lo cual es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos petroleros.

Algunos cementos Portland son de fabricación especial debido a que las condiciones de los pozos difieren significativamente entre sí al variar su profundidad, temperatura, ubicación geográfica; etc.

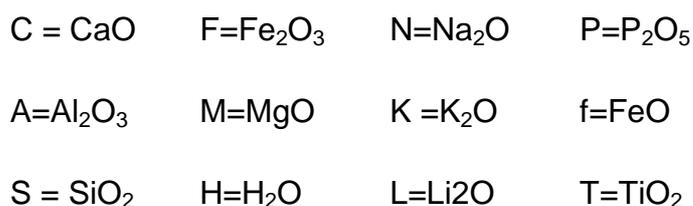
El fraguado y endurecimiento se presenta si el cemento se coloca en agua. El desarrollo de resistencia es predecible, uniforme y relativamente rápido.

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

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

1.1.2 NOTACIÓN QUÍMICA

Una notación química especial ha sido empleada, las fórmulas químicas de muchos componentes del cemento pueden ser expresadas como una suma de óxidos; por ejemplo, el silicato tricálcico Ca_3SiO_5 , puede ser escrito como $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Muchas abreviaciones son dadas para los óxidos más comúnmente encontrados, tales como es C para CaO y S para SiO_2 . Por lo tanto Ca_3SiO_5 se abrevia en C_3S . Una lista de las abreviaturas es dada a continuación.



Otras son comúnmente usados, tales como $\bar{\text{S}} = \text{SO}_3$ y $\bar{\text{C}} = \text{CO}_3$. Esta notación ha sido adoptada como un simple método para describir compuestos cuyas formulas moleculares ocupan mucho espacio.

1.1.3 FABRICACIÓN

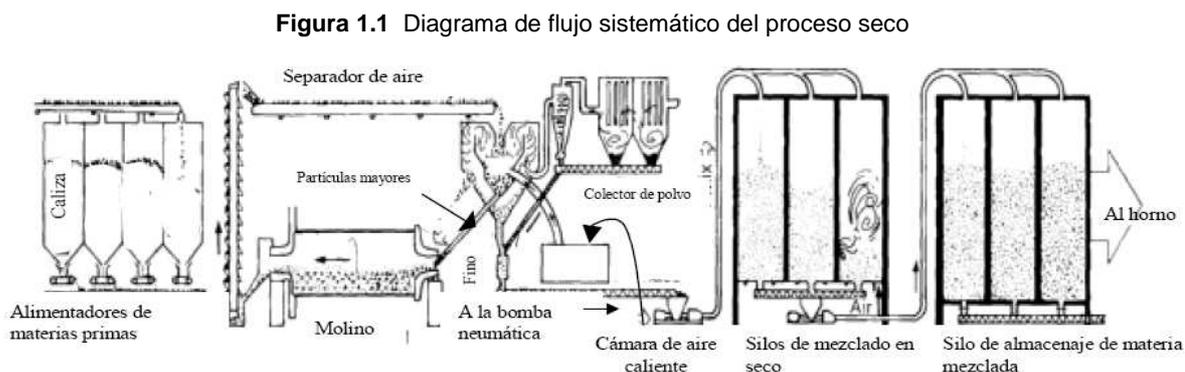
1.1.3.1 Materias primas

Las materias primas fundamentales son las rocas calcáreas y arcillas. Estas se extraen de yacimientos a cielo abierto. La otra materia prima que se utiliza es el yeso, que se incorpora en el proceso de la molienda, para regular el tiempo de fraguado.

Los materiales crudos se muelen y mezclan vigorosamente, así se obtiene una mezcla homogénea en las proporciones requeridas, para lograrlo existen dos procesos, seco y húmedo.

1.1.3.2 Proceso seco

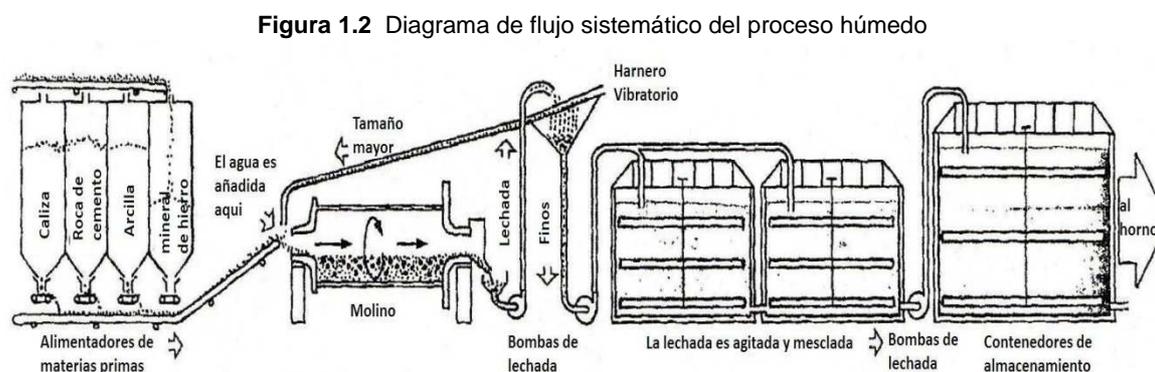
Se preparan las materias primas y se pasan a un molino para homogeneizar el tamaño de las partículas y su cantidad. A continuación se pasan por un separador de aire y se les lleva a silos mezcladores para su almacenamiento antes de pasarse al horno rotatorio.



Fuente: Portland Cement Association, 1969

1.1.3.3 Proceso húmedo

A diferencia del anterior, este proceso efectúa una mezcla de las materias primas con agua para mantener en forma más homogénea la mezcla. También se les pasa por un molino para uniformar el tamaño de partícula y, posteriormente, se pasa a unos contenedores que mantienen en movimiento la mezcla antes de pasarla al horno rotatorio.

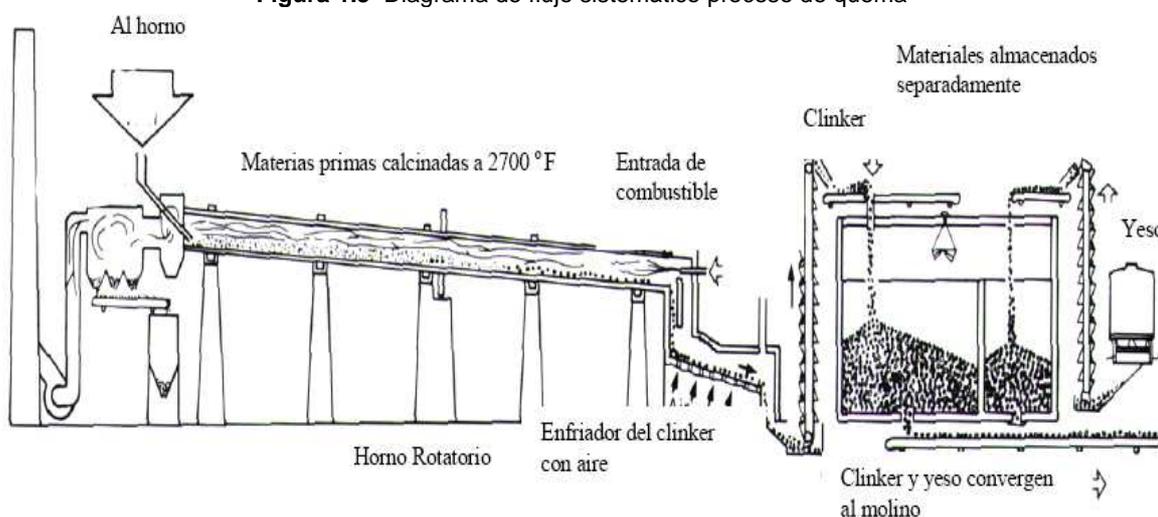


Fuente: Portland Cement Association, 1969

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

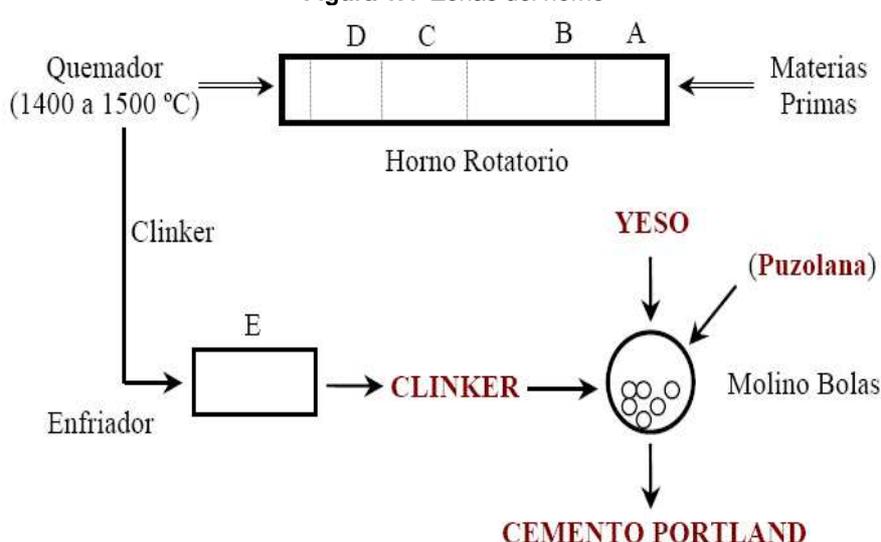
El horno se calienta con gas a temperaturas de 1430 a 1540°C (aproximadamente la mitad de la temperatura del sol), estas temperaturas originan reacciones químicas entre los ingredientes de la mezcla cruda, resultando un material llamado clinker.

Figura 1.3 Diagrama de flujo sistemático proceso de quema



Fuente: Portland Cement Association, 1969

Figura 1.4 Zonas del horno



Fuente: Componentes del Cemento, C. Videla, 1982

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

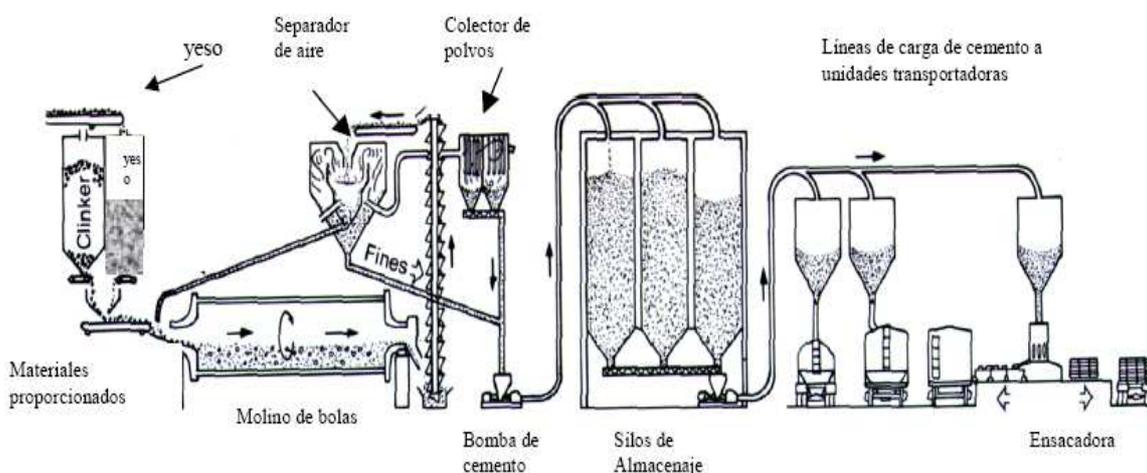
El clinker se alimenta al molino de cemento conjuntamente con una dosificación de sulfato de calcio di hidratado, con lo que se obtiene el producto terminado de cemento Portland.

Tabla 1.1 Zonas del horno

| ZONAS DEL HORNO | | |
|-----------------|-----------------|--|
| Zona | Rango Temp (°C) | Perfil de Reacción |
| A | Sube hasta 200 | Secado, se elimina agua |
| B | 200-800 | Descarbonatación, se libera CO ₂ : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ |
| C | 800-1100 | Se forma C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF |
| D | 1100-1300 | Clinkerización o fusión parcial, se forma C ₃ S: $\text{C}_2\text{S} + \text{C} \rightarrow \text{C}_3\text{S}$ |
| E | 1300-1000 | Si enfriamiento es lento, se revierte formación de C ₃ S y se forma cal libre. |

Fuente: Componentes del Cemento, C. Videla, 1982

Figura 1.5 Diagrama de flujo sistemático del proceso de molido y almacenamiento



Fuente: Portland Cement Association, 1969)

1.2 PRINCIPALES COMPUESTOS DEL CEMENTO Y SUS FUNCIONES

Las reacciones de carbonatos y arcillas producidas por la manufactura del cemento Portland, conduce a la formación de 4 principales productos, que incluyen cuatro distintas fases cristalinas:

1.2.1 SILICATO TRICÁLCICO ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)

Habitualmente conocido como C_3S , es el componente más abundante en la mayoría de los cementos y, además, el factor principal para producir la resistencia temprana o inmediata (1 a 28 días) Reacciona rápido con el agua, liberando calor y formando silicato de calcio hidratado (CSH).

Generalmente, los cementos de alta consistencia inmediata contienen en mayor concentración este compuesto.

1.2.2 SILICATO DICÁLCICO ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)

Conocido como C_2S , es un compuesto de hidratación lenta para formar el mismo tipo de compuestos que el C_3S (CSH), que proporciona una ganancia gradual de resistencia; esto ocurre en un período largo: después de 28 días.

1.2.3. ALUMMINATO TRICÁLCICO ($3\text{CaO}\cdot\text{AL}_2\text{O}_3$)

Se lo conoce también como C_3A y tiene influencia en el tiempo de bombeabilidad de la lechada. Es responsable de la susceptibilidad al ataque químico de los sulfatos sobre los cementos. Esta susceptibilidad se clasifica en moderada y alta resistencia al ataque químico, cuando contienen este compuesto en un 8% y 3% respectivamente. Reacciona muy rápido y libera mucho calor al hidratarse. Contribuye a resistencia a muy temprana edad, pero poco a la resistencia final. Los cementos resistentes a sulfatos deben limitar el contenido de este compuesto, lo que se logra añadiendo óxido férrico transformándolo en C_4AF .

1.2.4. ALUMINOFERRITA TETRACÁLCICO ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)

También conocido como C_4AF , reacciona rápido con el agua pero no produce mucho calor de hidratación y resistencia a la compresión; influye en la reología del cemento, formación de geles, y durabilidad.

Un análisis de la composición química del cemento portland se encuentra detallado en el **Anexo 1.1**

La hidratación del cemento es un proceso exotérmico, y cada uno de los componentes del cemento tiene un característico calor de hidratación que contribuye al total de calor de hidratación liberado. Generalmente la cantidad total del calor de hidratación depende de las cantidades relativas de cada uno de los constituyentes en el cemento. Un cemento con una alta proporción de fases de aluminato y ferrita generara una gran cantidad de calor de hidratación.

Tabla 1.2 Características de la hidratación de los compuestos del cemento

| Componente | Velocidad de reacción | Cantidad de calor liberada | Contribución a la resistencia del cemento |
|--|-----------------------|----------------------------|---|
| C_3S | Moderada | Moderada | Alta |
| C_2S | Lenta | Baja | Inicialmente baja, alta posteriormente |
| $\text{C}_3\text{A}+\text{C}_2\text{H}_2$ | Rápida | Muy alta | Baja |
| $\text{C}_4\text{AF}+\text{C}_2\text{H}_2$ | Moderada | Moderada | Baja |

Fuente: Basic Cement Chemistry, Halliburton 2001

1.3 HIDRATACIÓN DE LAS FASES DE CLINKER

Los compuestos presentes en el cemento portland son anhídridos, cuando lo ponemos en contacto con el agua, ellos se unen o descomponen formando compuestos hidratados. Se forman soluciones supersaturadas inestables, depositándose gradualmente los excesos de sólidos.

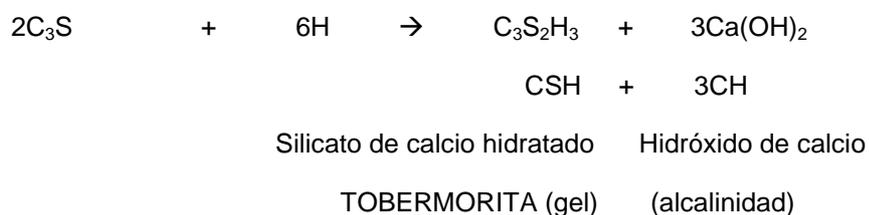
Los principales componentes del cemento portland (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF), presentan diferentes cinéticas de hidratación para diferentes productos de hidratación.

1.3.1 HIDRATACIÓN DE LAS FASES DE SILICATO.

Los silicatos en el cemento portland son los más abundantes, cerca del 80% del total del material. El C_3S es el principal constituyente con una concentración de cerca del 70%. La cantidad de C_2S normalmente no excede el 20%.

La ecuación química idealizada se muestra a continuación, los productos de la hidratación de las dos fases son hidróxido de calcio (conocido como portlantina) y silicato de calcio hidratado.

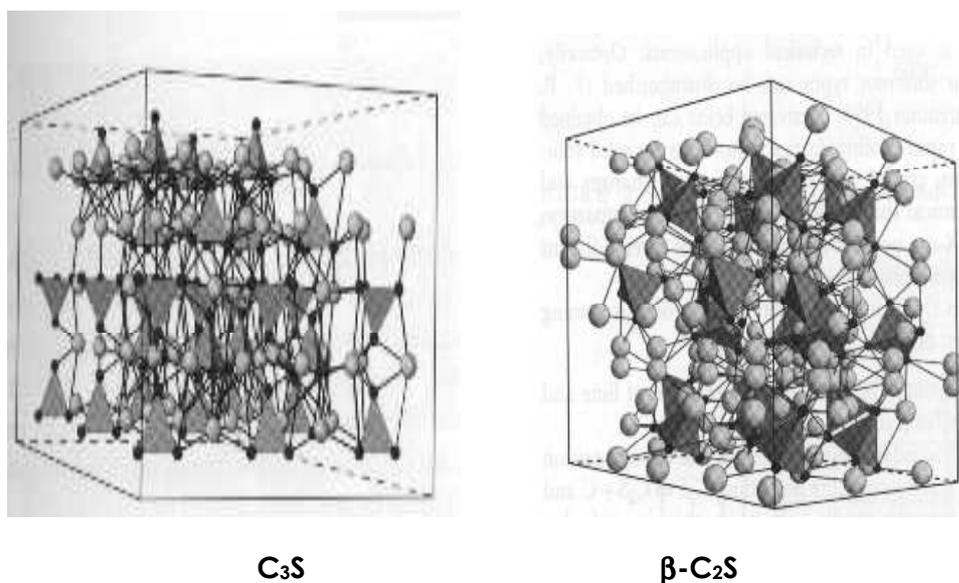
Para C_3S



Para C_2S



Figura 1.6 Estructura del cristal de las fases silicato



Fuente: Componentes del Cemento, C. Videla, 1982

1.3.2 HIDRATACIÓN DE LAS FASES DE ALUMINATO.

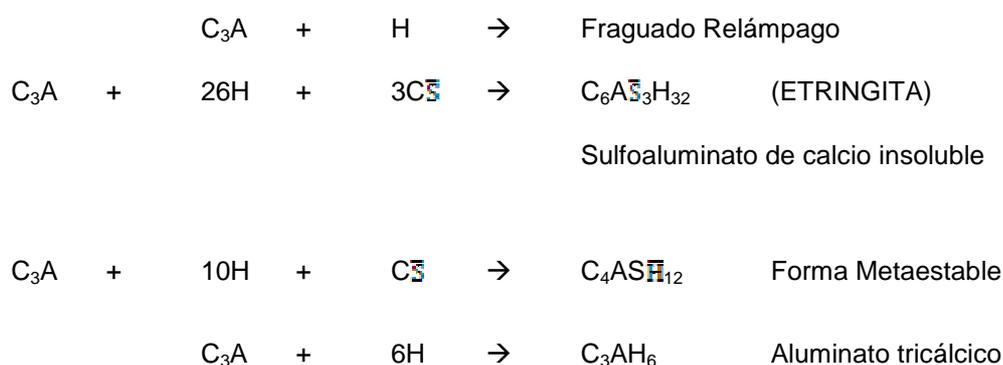
Las fases aluminato especialmente el C_3A , son las más reactivas en tiempos de hidratación cortos. Sin embargo su abundancia es considerablemente menor que los silicatos, tienen una significativa influencia sobre la reología de la lechada de cemento, y en el desarrollo de resistencia temprana.

La primera etapa de la hidratación del C_3A es igual a la del C_3S , es una reacción interfacial entre la superficie del anhídrido sólido y el agua. La solución inmediatamente empieza a super saturarse respecto a algunos aluminatos de calcio hidratados, precediendo a su precipitación.

El aluminato de calcio hidratado es metaestable, y aparece como cristales hexagonales. Ellos eventualmente se convierten en una forma cubica más estable, esta reacción ocurre dentro de varios días.

El calcio y los iones sulfato sueltos en la solución reaccionan con el aluminato y los iones hidróxido sueltos por el C_3A para formar trisulfoaluminato hidratado, conocido como mineral de etringita.

Para C_3A



La etringita aparece como cristales en forma de agujas que se precipitan en la superficie del C_3A (véase figura 1.7). De manera diferente al silicato de calcio hidratado, el aluminato de calcio hidratado no es amorfo, y no forma una capa protectora en la superficie del C_3A .

En la figura 1.8 se muestra la rata de hidratación para las fases puras del cemento portland.

Figura 1.7 Formación de cristales de etringita

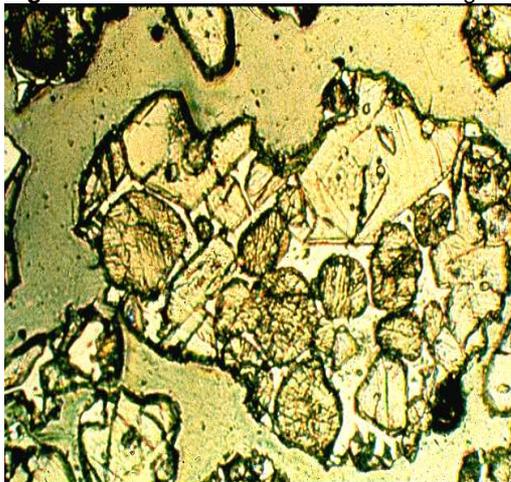
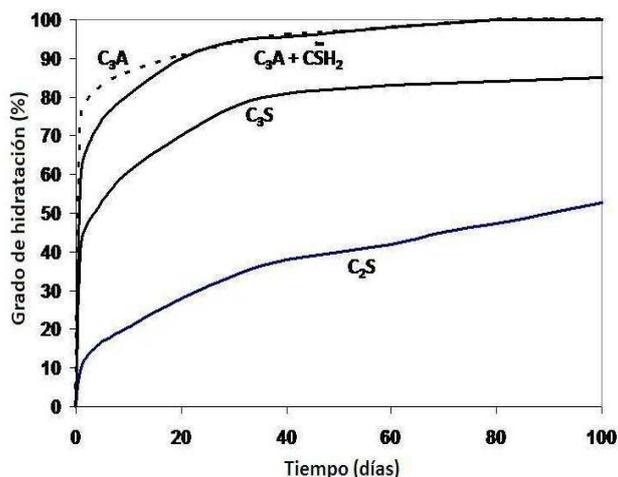
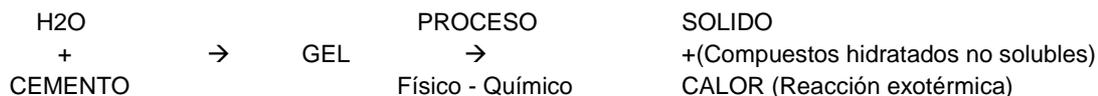


Figura 1.8 Rata de hidratación de las fases puras



Fuente: Chemistry and charecterization of Portland Cement, Michel Michaux, Erik B, 1996

1.3.3 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND – SISTEMA MULTICOMPONENTE.



(Compuestos anhídridos solubles)

La hidratación del cemento portland, como se puede ver en la figura 1.9 y 1.10; es una secuencia de relaciones químicas entre los componentes del clinker, sulfato de calcio y el agua. Aunque la hidratación del C₃S es a menudo usada como un modelo de la hidratación del cemento portland, se debe tener presente que involucra muchos parámetros adicionales.

Desde el punto de vista químico, la hidratación del cemento Portland es un complejo proceso de disolución/precipitación. Las varias reacciones de hidratación se dan simultáneamente a diferentes velocidades. Cada una de las fases son influenciadas por la presencia de otras. Por ejemplo, la hidratación del C₃A es modificada por la presencia de C₃S hidratado, porque la producción de hidróxido de calcio refuerza la acción retardante del yeso.

El sulfato de calcio CaSO₄, y los óxidos de magnesio MgO, sodio Na₂O, potasio K₂O y otros óxidos e impurezas pueden estar presentes en cantidades variables,

dependiendo de la composición de los materiales crudos, los cuales alteran su reactividad.

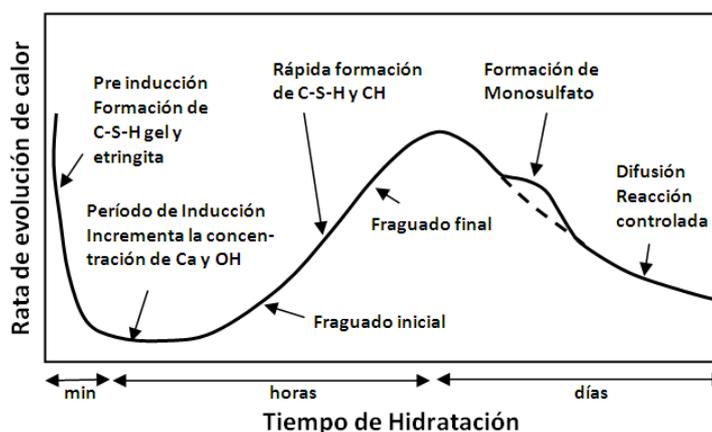
Tabla 1.3 Secuencia de la reacción

| Etapa | Reacción Química | Cinética | Propiedades de la lechada |
|-----------------------------------|---|-----------|--|
| Pre-inducción | Humedecimiento de la superficie del grano: disolución de los iones: producción de productos tempranos de la hidratación | Rápida | Determina la capacidad de mezclado |
| Período de Inducción (Aletargado) | Continúa la disolución de los iones | Muy lenta | Determina el tiempo de fraguado. |
| Aceleración | Disolución de los iones: formación de productos de la hidratación. | Rápida | Determina las propiedades de fraguado y la resistencia a la compresión inicial |
| Desaceleración | Continúa la formación de los productos de la hidratación | Lenta | Determina el desarrollo de la resistencia a la compresión inicial |
| Período de Difusión | Continúa la formación de productos de la hidratación | Muy lenta | Determina rata del desarrollo de resistencia a largo plazo |

Fuente: Basic Cement Chemistry, Halliburton 2001

Los productos de la hidratación son también impuros. El gel C-S-H contiene cantidades significantes de aluminio, hierro, y azufre, mientras que la etringita y las fases monosulfoaluminato contienen silicio. El hidróxido de calcio también contiene pequeñas cantidades de iones extraños, sobretodo silicato.

Figura 1.9 Representación sistemática de la hidratación del cemento portland

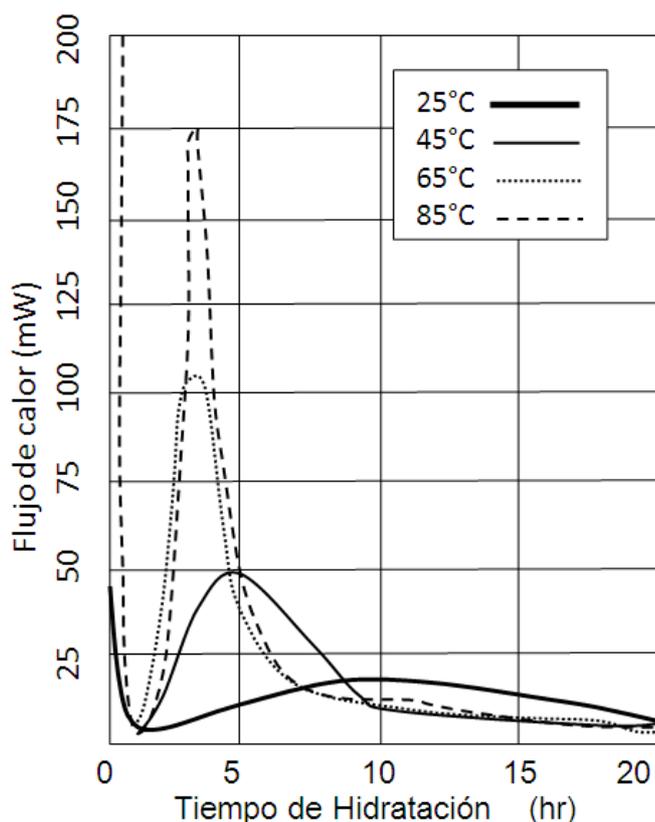


Fuente: Chemistry and charecterization of Portland Cement, Michel Michaux, Erik B, 1996

1.4.2 EFECTO DE LA TEMPERATURA.

La temperatura es uno de los principales factores que afectan la hidratación del cemento portland. La velocidad de hidratación del cemento portland y su naturaleza, estabilidad y morfología de los productos de la hidratación dependen considerablemente de este parámetro.

Figura 1.11 Efectos de la temperatura sobre la velocidad de hidratación del cemento Portland Tipo G



Fuente: Chemistry and characterization of Portland Cement, Michel Michaux, Erik B, 1996

Elevadas temperaturas acelera la hidratación del cemento. Como se muestra en la curva calorimétrica, figura 1.11, la duración del Período de inducción y fraguado son acortados, y la velocidad de hidratación durante el tiempo de fraguado es mucho mayor.

Sin embargo, sobre el fraguado largo, el grado de hidratación y resistencia final es reducido. Esto es relacionado probablemente con la formación de una densa lamina de C-S-H gel alrededor de la superficie de las moléculas de C_3S dificultando su completa hidratación.

1.4.3 FRAGUADO RELÁMPAGO Y FRAGUADO FALSO

Cuando el clinker del cemento portland solo (sin yeso) es mezclado con agua, el C_3A reacciona rápidamente, la temperatura aumenta significativamente, y un endurecimiento irreversible ocurre seguido rápidamente de un pseudo-fraguado. Este fenómeno es llamado un “fraguado relámpago” o algunas veces “fraguado rápido”. La hidratación incontrolada del C_3A puede ser prevenida con la adición de yeso al sistema. Esto es el por qué el yeso es mezclado con el clinker durante la manufacturación del cemento portland. Para un óptimo desempeño del cemento, la cantidad de yeso debe ser balanceada de acuerdo a la reactividad del clinker.

Es importante advertir que el fraguado relámpago puede ocurrir todavía si la cantidad de yeso en el cemento es insuficiente con respecto a la reactividad del clinker. Desafortunadamente, no existe una regla simple para determinar el contenido óptimo de yeso, cuando de esto depende de una gran variedad de parámetros, incluyendo la distribución del tamaño de la partícula y el contenido de la fase aluminato.

El yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) es añadido al clinker durante el molido con el propósito de retardar las fases de aluminato y prevenir el fraguado relámpago.

A temperatura ambiente, las solubilidades del sulfato de calcio hemihidratado $C\bar{S}H_{1/2}$ y/o la anhidrita soluble $C\bar{S}$, son aproximadamente dos veces la del yeso; por lo cual, en la hidratación, la fase acuosa de la lechada de cemento se supersatura rápidamente con respecto al yeso. Para aliviar esta condición, un supuesto “yeso secundario” es precipitado. Un marcado endurecimiento o gelatinización de la lechada de cemento, conocida como “fraguado falso” es observado.

El fraguado falso es reversible solamente con una agitación vigorosa; sin embargo, dicha agitación no puede ser realizada durante la mayoría de operaciones de cementación, particularmente si la lechada de cemento es mezclada continuamente. La adición de un dispersante puede ser utilizada para

reducir el impacto reológico del fraguado falso con cementos que se sabe que tienen esta inclinación.

1.4.4 EFECTOS DEL ENVEJECIMIENTO

El desempeño del cemento portland puede ser afectado significativamente por la exposición al ambiente y/o altas temperaturas durante su almacenamiento en sacos o silos. Las principales afecciones sobre el cemento del pozo incluyen lo siguiente.

- Incremento del tiempo de fraguado.
- Disminución de la resistencia a la compresión.
- Disminución del calor de hidratación.
- Incremento de la viscosidad de la lechada.

Los efectos se deben principalmente a la carbonatación de las fases de silicato de calcio hidratado, e hidratación parcial del CaO libre. La rata a la cual estos procesos ocurren está directamente relacionada a la humedad relativa del ambiente de almacenamiento.

1.4.5 RESISTENCIA A LOS SULFATOS

La salmuera de fondo del pozo contiene comúnmente sulfatos de magnesio y sodio, los cuales pueden causar efectos perjudiciales cuando dichas soluciones reaccionan con ciertos productos de la hidratación del cemento. Los sulfatos de magnesio y sodio reaccionan con hidróxido de sodio hidratado para formar hidróxidos de sodio y magnesio, y sulfato de calcio; esto causa un progresivo decremento en el encogimiento (en ambientes secos), debido al efecto retardante que tienen los sulfatos en la formación de cristales de etringita.

El efecto que tienen los sulfatos en la lechada de cemento dependerá del grado de fraguado que tenga esta antes de su exposición a la solución de sulfato. El ataque de los sulfatos puede conducir a la disminución de resistencia compresiva, expansión, y desintegración. Cementos portland con poco contenido de C₃A son menos susceptibles a un ataque de sulfatos después del fraguado.

1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS

El American Petroleum Institute (API) ha identificado nueve tipos de cementos de acuerdo a su composición química y propiedades físicas, y estos son:

- API Clase A y B
- API Clase C
- API Clase D, E y F
- API Clase G y H
- API Clase J

1.5.1 CEMENTO CLASE A

Diseñado para utilizarlo hasta una profundidad de 6000 ft, con temperaturas de hasta 170°F, donde no se requieran propiedades especiales y las condiciones del pozo lo permiten. No brinda ninguna resistencia a los sulfatos.

1.5.2 CEMENTO CLASE B

Diseñado para emplearse hasta una profundidad de 6000 ft, con temperaturas de hasta 170°F, donde no se requieran propiedades especiales y las condiciones del pozo lo permiten, Brinda una moderada resistencia a los sulfatos.

1.5.3 CEMENTO CLASE C

Se emplea hasta una profundidad de 6000ft, con temperaturas de hasta 170°F, puede emplearse donde se requiere alta resistencia a la compresión temprana; genera una moderada y alta resistencia a los sulfatos.

1.5.4 CEMENTO CLASE D

Es empleado hasta una profundidad de 12000 ft, con temperaturas entre 170°F y 230°F, y puede soportar una presión moderada. Tiene una moderada y alta resistencia a los sulfatos.

1.5.5 CEMENTO CLASE E Y F

Este cemento se emplea en profundidades entre 14000 ft y 16000 ft, con temperaturas entre 170°F Y 230°F, puede soportar altas presiones. Genera una moderada y alta resistencia a los sulfatos.

1.5.6 CEMENTOS CLASE G Y H

Comúnmente conocidos como cementos petroleros, pueden emplearse desde la superficie hasta profundidades de 10000 ft, tal como se fabrican; y pueden modificarse con aceleradores y retardadores para usarlos en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura.

En cuanto a su composición química son similares al cemento API Clase B. Están fabricados con especificaciones más rigurosas tanto físicas como químicas, por ello son productos más uniformes.

1.5.7 CEMENTO CLASE J

Se quedó en fase de experimentación y fue diseñado para usarse a temperatura estática de 351°F de 16.000 ft de profundidad, sin necesidad del empleo de harina sílica, que evite la regresión de la resistencia a la compresión.

En la tabla 1.4 se detalla propiedades importantes de los cementos API de acuerdo a su clasificación.

1.5.8 OTROS TIPOS DE CEMENTOS

Además en la industria petrolera existen otros tipos de cementos como son:

- *Cemento Standard.*- tiene características similares a los cementos API clases A y B, sin embargo este cemento puede no reunir especificaciones API como los de clase A o B.
- *Cemento Premium.*- tiene características similares a los cementos API clases G y H, sin embargo este cemento puede no reunir especificaciones API como los de clase G o H.
- *Cemento Premium Plus.*- tiene características similares a los cementos API clase C, sin embargo este cemento puede no reunir especificaciones API como los de clase C.
- *Cemento Dyckerhoff.*- El cemento Dyckerhoff es un cemento tipo G, especial usado ampliamente para la cementación de pozos petroleros. Disponible en moderada y alta resistencia a los sulfatos. Este no contiene sulfato de calcio y/o agua mezclada con el clinker. Las lechadas de cemento Dyckerhoff tienen un requerimiento de agua del 44%. El cemento Dyckerhoff se encuentra disponible en bulks o es sacos de 94 lb. Tiene una PH de 12.4, gravedad específica de 3.15 y una densidad de 94 lb/ft³.

Tabla 1.4 Clasificación API del Cemento

| Clase de Cemento | Requerimiento de agua (gal/sk) | Densidad de la mezcla (lb/gal) | Profundidad recomendada (ft) | Temperatura estática (°F) |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| A | 5,2 | 15,6 | 6.000 | 60-170 |
| B | 5,2 | 15,6 | 6.000 | 60-170 |
| C | 6,3 | 14,8 | 6.000 | 60-170 |
| D | 4,3 | 16,4 | 12.000 | 170-230 |
| E | 4,3 | 16,4 | 14.000 | 170-230 |
| F | 4,3 | 16,4 | 16.000 | 230-320 |
| G | 5,0 | 15,8 | 10.000 | 60-200 |
| H | 4,3 | 16,4 | 10.000 | 60-200 |
| J | - | - | 16.000 | 351 |

Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.6 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS CEMENTOS

Las propiedades de los cementos usados en diferentes campos de petróleos varían de acuerdo a los siguientes factores:

- Ubicación geográfica
- Condiciones del fondo del pozo
- Tipo de trabajo de cementación
- Tipo de lechada

Las propiedades del cemento pueden ser modificadas mediante la utilización de aditivos y así cumplir los requerimientos para realizar un trabajo en particular.

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

Las principales propiedades físicas de los cementos son:

1.6.1 G_e = GRAVEDAD ESPECÍFICA

Denota el peso por unidad de volumen, sin tomar en consideración otros materiales, tales como el aire o el agua; es decir, el peso de los granos de cemento específicamente; sus unidades son gr/cm^3 , kg/lit y ton/m^3 .

1.6.2 P_V = PESO VOLUMÉTRICO

Denota el volumen por unidad de masa. Se toma en consideración el aire contenido entre los granos de cemento; sus unidades son gr/cm^3 , kg/lit y ton/m^3 .

1.6.3 FINEZA DE LOS GRANOS DE CEMENTO

Indica el tamaño de los granos del cemento. Su mayor influencia se da sobre el requerimiento de agua para la preparación de la lechada. Esta característica es un factor determinante, pero no único, para la clasificación de los cementos. Sus

unidades son cm^2/gr , m^2/kg . Representa el área expuesta al contacto con el agua y se determina como una función de permeabilidad al aire.

1.6.4 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

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

1.6.5 TAMAÑO PROMEDIO DE PARTÍCULAS

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

1.6.6 REQUERIMIENTO DE AGUA NORMAL

Es el agua necesaria para la lechada con cemento solo. Debe dar 11 unidades de consistencia Bourden (Bc) a los 20 minutos de agitarse en el consistómetro de presión atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en por ciento por peso de cemento.

1.6.7 REQUERIMIENTO DE AGUA MÍNIMA

Denota el agua necesaria para la lechada de cemento. Debe dar 30 Bc a los 20 minutos de agitarse en el consistómetro de presión atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en por ciento por peso de cemento.

1.6.8 DENSIDAD DE LA LECHADA

Es la relación entre la masa de la lechada de cemento y su volumen, y está en función de la cantidad de agua requerida. Sus unidades son gr/cm^3 , lbs/gal , ton/m^3 .

1.7 CEMENTACIÓN PRIMARIA

1.7.1 DEFINICIÓN

La cementación de pozos petroleros es el proceso mediante el cual se bombea una lechada de cemento al fondo del pozo a través de la tubería de revestimiento, con el propósito de obtener una buena adherencia entre las fases formación-cemento - tubería y asegurar el sello efectivo.

1.7.2 OBJETIVOS

Algunos de los objetivos de la cementación son los siguientes:

- Aislar zonas para evitar el movimiento de fluidos por el espacio anular y así evitar la contaminación de las zonas productivas, y para diferenciar la producción de las distintas zonas de producción.
- Proteger el casing de la corrosión.
- Soportar los esfuerzos producidos por la re-perforación cuando se desea profundizar el pozo o durante el cañoneo para la producción (punzado).

1.7.3 TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

Las tuberías de revestimiento (TR) poseen un cierto grado, peso y junta que permita resistir sin fallas la fuerza a la que estará sujeta.

Las principales funciones de la tubería de revestimiento son:

- Evitar derrumbes y concavidades.
- Prevenir la contaminación de los acuíferos.
- Confinar la producción del intervalo seleccionado.
- Dar un soporte para la instalación del equipo de control superficial.
- Facilitar la instalación del equipo de terminación, así como los sistemas de levantamiento artificiales de producción.

Las tuberías de revestimiento se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.7.3.1 Tubería Conductora

Es la primera que se cementa al iniciar la perforación, la profundidad de asentamiento varía entre 90 y 150 ft, y en pocas ocasiones hasta 300 ft.

Su objetivo principal es el de establecer un medio de circulación y control de los fluidos de perforación que retornan del pozo hacia el equipo de eliminación de sólidos y los tanques de tratamiento.

Permite continuar perforando hasta alcanzar la profundidad de asentamiento del revestimiento superficial.

El diámetro seleccionado de la tubería por emplear varía entre 16 y 30 in. Esto depende en gran parte de la profundidad total programada del pozo.

1.7.3.2 Tubería Superficial

Tiene por objeto instalar conexiones superficiales de control y al mismo tiempo proteger el pozo descubierto, aislando así flujos de agua y zonas de pérdida de lodo cercanas a la superficie.

Estas tuberías se instalan entre 150 y 3500 ft, los diámetros se seleccionan de acuerdo a la profundidad total del pozo.

1.7.3.3 Tubería Intermedia

Se instalan con la finalidad de aislar zonas que contengan presiones normales de formación, flujos de agua, derrumbes y pérdidas de circulación.

En sí, se utiliza como protección del pozo descubierto para tratar en la mayoría de los casos de incrementar la densidad de los fluidos de perforación y controlar las zonas de alta presión.

Dependiendo de la profundidad del pozo o de los problemas que se encuentran durante la perforación, será necesario colocar una o más sargas de tuberías de revestimiento intermedias, que aislaran la zona del problema.

1.7.3.4 Tubería de Producción

Tienen como meta principal aislar el yacimiento de fluidos indeseables en la formación productora y de otras zonas del pozo.

También se utilizan para la instalación de empacadores de producción y accesorios utilizados en la terminación del pozo.

Para la cementación de esta tubería es necesario utilizar lechadas de cemento con aditivos especiales de acuerdo a las condiciones del pozo como las altas temperaturas y presiones entre otros parámetros.

1.7.3.5 Tubería de Revestimiento Corta (Liner)

Constituye una instalación especial que evita utilizar una sarta desde la superficie al fondo del pozo.

La longitud de esta tubería permite cubrir el pozo descubierto, quedando una parte traslapada dentro de la última tubería que puede variar entre 150 a 450 ft y en ocasiones se emplea una longitud mayor, dependiendo del objetivo.

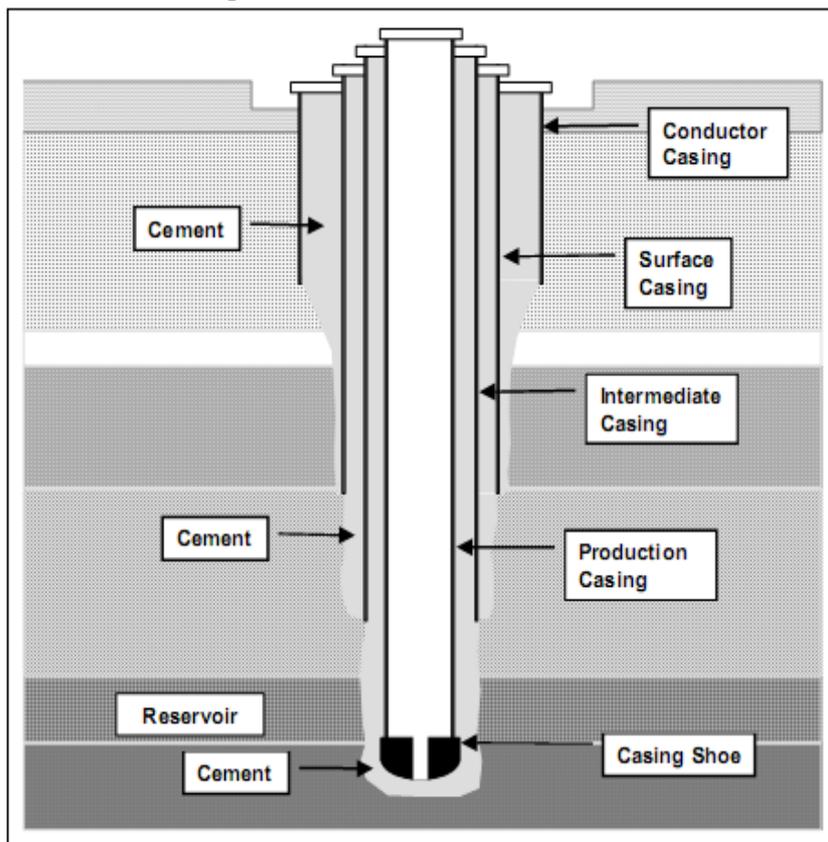
Estas tuberías cortas pueden colocarse en el intervalo deseado mucho más rápido que las normales.

Al continuar con la perforación existe un desgaste de la tubería de revestimiento, por lo tanto estas tuberías cortas ayudan a corregir este desgaste.

Evita volúmenes muy grandes de cemento, debido a que estas tuberías no son cementadas hasta la superficie.

En la figura 1.12 se representa un ejemplo de la distribución de tuberías de revestimiento.

Figura 1.12 Tuberías de Revestimiento



Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.7.4 INFORMACIÓN NECESARIA PARA REALIZAR TRABAJOS DE CEMENTACIÓN

Para realizar una cementación primaria se requiere la siguiente información básica:

1.7.4.1 Datos del pozo:

Diámetro de hueco abierto, profundidad (MD/TVD), desviación; diámetro, peso, y grado necesarios de la TR a cementar y de la TR previa de existir.

1.7.4.2 Datos de la formación:

Temperatura de fondo estática y circulante, tipo de formación, profundidades de los objetivos y contacto agua petróleo, presión de poro y presión de fractura.

1.7.4.3 Datos del lodo de perforación:

Es indispensable conocer:

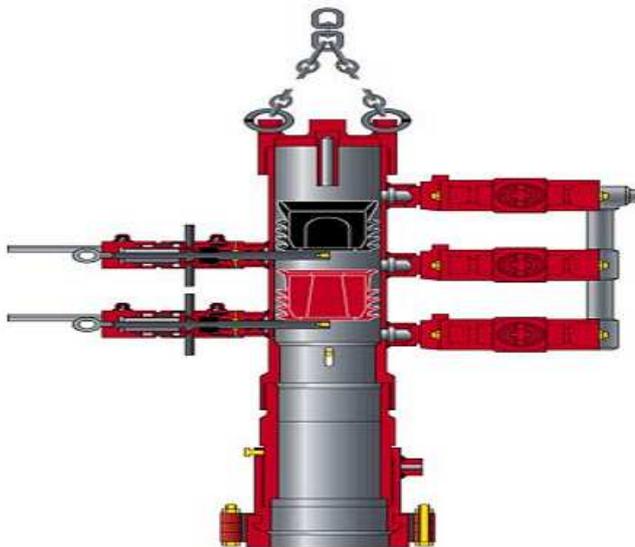
- Tipo de lodo
- Densidad del lodo de perforación.
- Geles
- Reología: punto de cedencia (Y_p), viscosidad plástica (V_p) y viscosidad (μ).

1.7.5 DISPOSITIVOS, HERRAMIENTAS, Y EQUIPOS PARA CEMENTACIÓN.

1.7.5.1 Cabezas de Cementación

Se colocan en la parte superior del último casing instalado en el pozo, y su función es alojar los tapones de goma que se enviarán durante el bombeo y desplazamiento de la lechada, por medio de un manifold de válvulas. Se fabrican de diferentes configuraciones para uno o dos tapones y distintos sistemas de roscado o acople rápido (quick latch).

Figura 1.13 Cabeza de Cementación



Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.7.5.2 Zapatos Guías

Se utilizan para guiar el casing cuando se baja en el pozo abierto y evitar derrumbes. Están instalados en el extremo inferior del primer casing que se baja al pozo.

Figura 1.14 Zapato Guía

Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.7.5.3 Collares Flotadores

Se utilizan para evitar el retorno del cemento una vez que el mismo ha sido ubicado en el espacio anular, y para asiento de los tapones de goma. Se instalan una o dos tramos por encima del zapato, hacia la superficie.

Figura 1.15 Collar Flotador

Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.7.5.4 Dispositivos de Llenado Automático ó Diferencial (Zapatos y Collares)

Cumplen la misma función que los anteriores, pero el llenado del casing se realiza por presión diferencial entre el fluido existente en el pozo y el fluido dentro del casing. Estos equipos permiten que dentro del casing quede una altura del 90% de la columna de fluido exterior (anular)

Figura 1.16 Dispositivos de Llenado Automático ó Diferencial (Zapatos y Collares)

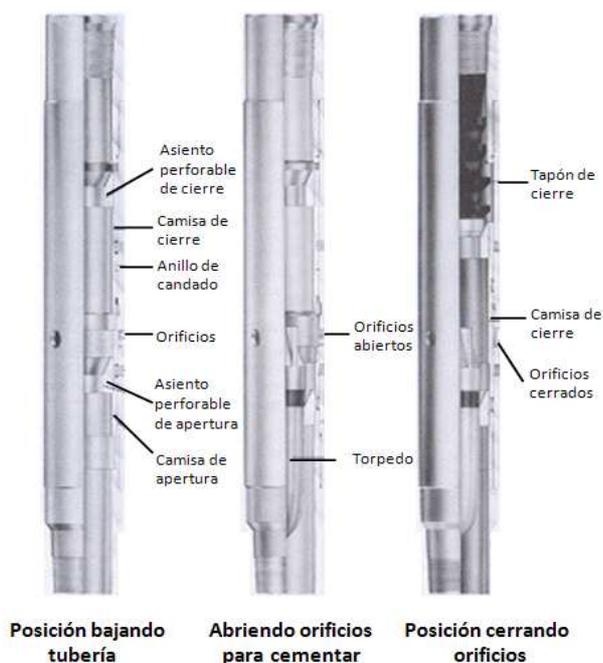


Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.7.5.5 Dispositivos de Etapas

Se utilizan para realizar cementaciones en etapas cuando las presiones hidrostáticas que quedarán en el anular superan los valores de presión de fractura de la formación o para resolver algún problema al utilizar dos lechadas diferentes en el anular y también para separar capas productoras indeseables. Pueden ser dispositivos de una etapa, dos, tres y con diferentes tapones.

Figura 1.17 Dispositivos de Etapas

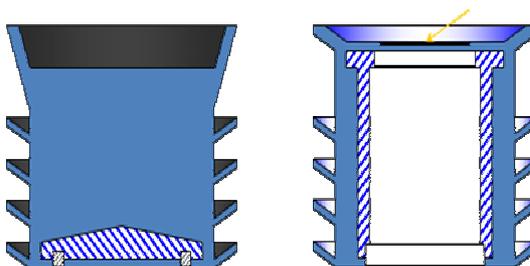


Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.7.5.6 Tapones de Goma

Generalmente se utilizan dos: uno inferior o fusible y otro superior o de cierre. La función principal es separar físicamente los fluidos que se envían al pozo a través del casing y hacia el espacio anular y limpiar los residuos de los fluidos que se encuentran en las paredes del casing.

Figura 1.18 Tapones de Goma



Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.7.5.7 Centralizadores

El objetivo de su aplicación es el de centralizar el casing en el espacio anular para lograr una distribución uniforme del cemento alrededor del pozo, evitar zonas sin cemento y lodos no removidos.

Se construyen dos tipos de centralizadores; de arco flexible y rígido. Los centralizadores de arco flexible tienen una gran habilidad de mejorar el standoff donde el pozo ha sido ensanchado. Los de tipo rígido brindan un standoff positivo mayor donde el hueco se encuentra en calibre.

Figura 1.19 Centralizador

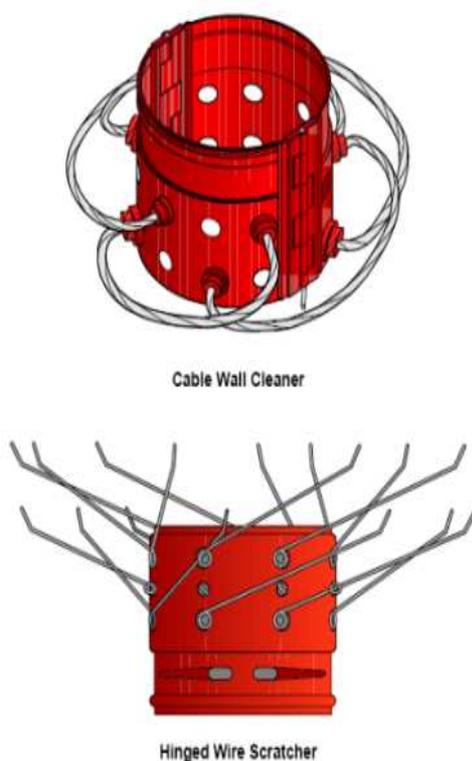


Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.7.5.8 Raspadores ó Limpiadores

Se colocan en la parte exterior del casing y su función es eliminar el revoque grueso dejado en las paredes del pozo por el lodo de perforación, se construyen del tipo “rotativo” y “reciproco” para aplicarlos cuando se utilizan las buenas prácticas de rotar o reciprocarse el casing durante el desplazamiento de la lechada.

Figura 1.20 Raspadores ó Limpiadores



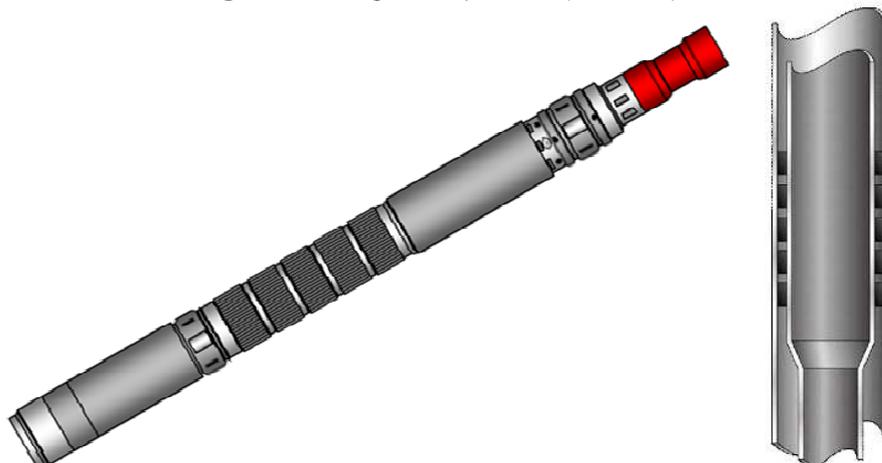
Fuente: Cementing 1, Halliburton, 2001

1.7.5.9 Colgadores

Son dispositivos que se emplean para colgar tuberías cortas (liners) dentro de otras (casing intermedio), hay disponibles diferentes tipos de colgadores entre los cuales tenemos.

- Colgador mecánico
- Colgador hidráulico
- Colgador expandible

Figura 1.21 Colgador expandible (Versaflex)



Fuente: Documento técnico Halliburton

1.7.6 CHECK-LIST EN EL POZO

El propósito de realizarlo es verificar que tanto instalaciones, equipos, y herramientas, se encuentren en optimas condiciones; a la vez que se cuente con los materiales necesarios para realizar los trabajos de cementación eficazmente.

El procedimiento es detallado a continuación:

- Verificar ajuste final y profundidad total de la tubería de revestimiento.
- Verificar el peso físico de la tubería de revestimiento.
- Reciprocarse la tubería para limpiar y mejorar el flujo en el espacio anular de acuerdo con el programa.
- Verificar la cantidad de cemento y química necesaria de acuerdo al programa.
- Verificar que el volumen de lodo sea el suficiente para el desplazamiento.
- Verificar que el volumen de agua sea el suficiente para la operación.
- Verificar la correcta ubicación de los tapones de limpieza y desplazamiento en la cabeza de cementación.
- En la cabeza de cementación, revisar que los pines funcionen correctamente, verificando las vueltas para enroscar y desenroscar el vástago que soporta el tapón de desplazamiento y el buen funcionamiento del indicador del paso del tapón.
- Verificar la instalación y la prueba con presión del equipo de cementación.

- Verificar la circulación y la reología del fluido de control según programa.
- Realizar un chequeo completo de las unidades a ser utilizadas en el trabajo (Bulk de cemento, compresor, silos, unidad cementadora, batch mixer)

1.7.7 SECUENCIA OPERATIVA

Efectuar una junta de seguridad con el personal involucrado en la operación.

- Instalar zapato y correr revestimiento hasta la profundidad final. Instalar los centralizadores de acuerdo al programa.
- Circular en los puntos que encuentre obstrucción.
- Romper circulación y circular a limpio (2 fondos arriba), acondicionar lodo hasta obtener un Yp menor de 16 lb/100 ft² y perfil plano de geles. (pozo vertical)
- Instalar la cabeza de cementación y armar las líneas de Halliburton. Continuar circulando para romper geles y estabilizar presiones.
- Mezclar espaciadores, lavadores y agua de mezcla del cemento.
- Realizar reunión de seguridad pre - operacional y asignar labores y responsabilidades.
- Probar líneas con 3000 psi.(1000 psi sobre la presión máxima de trabajo)
- Soltar tapón inferior.
- Bombear lavador químico
- Bombear el espaciador mecánico.
- Mezclar y bombear la lechada de relleno
- Mezclar y bombear la lechada principal
- Soltar tapón superior.
- Desplazar con las bombas del taladro, últimos barriles de desplazamiento, disminuir el caudal. En caso de no asentar el tapón continuar desplazamiento considerando la mitad del shoe track.
- Sentar tapón con 500 psi por encima de la presión final de bombeo. Chequear back flow.

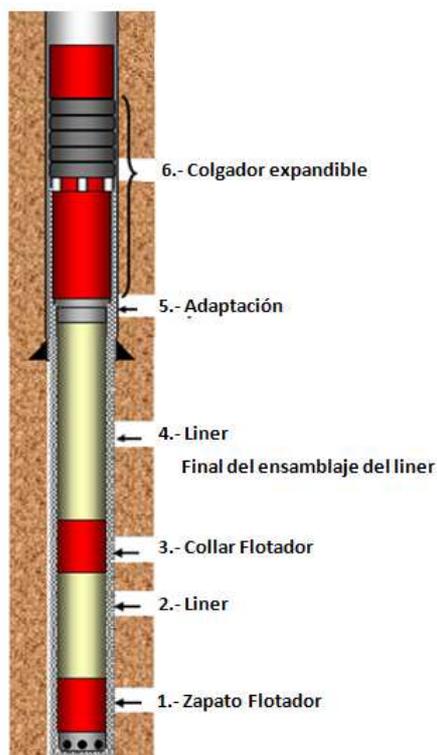
Espera de fraguado. El tiempo de espera de fraguado está en función de las pruebas de esfuerzo compresivo, en el cual el cemento alcanza un

esfuerzo compresivo de 500 psi (35 kg/cm²) (8 a 12 horas después de realizada la operación para reanudar la perforación).

1.7.8 CEMENTACIÓN DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA - SECUENCIA OPERATIVA

A continuación vamos a describir el procedimiento operativo para una cementación utilizando un colgador expandible (véase figura 1.22). Cada tipo de colgador tiene su propia metodología y procedimiento de trabajo.

Figura 1. 22 Instalación de un colgador expandible



Fuente: Documento técnico Halliburton

- Instalar Zapato Flotador, Collar Flotador, centralizadores y raspadores frente a las arenas productivas según tally y bajo la supervisión del Company Man. Se recomienda al menos dejar dos juntas de casing de shoe track.
- Asegurar un standoff mínimo del 70% en la tubería a cementarse.
- Continuar corriendo el liner e instalar sus elementos según la recomendación del especialista del liner.

- Conectar el liner con tubería Drill Pipe, registrar peso del conjunto del liner, liner hanger y setting tool. Establecer circulación para asegurar que el equipo de flotación funciona correctamente.
- Al llegar al zapato del casing previo establecer circulación, monitorear la presión de circulación. Determinar peso de la sarta subiendo y bajando, así como el torque generado por la misma.
- Continuar corriendo el liner en hueco abierto, circular según se requiera, circular en frente de las zonas productoras para remover el enjarre del lodo. Es recomendable circular en frente de las zonas productoras, donde se irá a cañonear posteriormente, para remover el lodo de baja movilidad del hueco.
- A profundidad de punto de casing, circular hasta observar zarandas limpias, para luego conectar el manifold de cementación y cabeza de cementación según instrucciones del especialista del liner.
- Proceder a probar línea de cementación con 1000 psi sobre la presión máxima de trabajo.
- Establecer circulación para acondicionar el Yp del lodo a BHCT dependiendo de la desviación del pozo hasta obtener un perfil de geles con comportamiento plano a BHCT (mínimo dos fondos arriba).
- Iniciar el trabajo de cementación bombeando pre flujos y espaciador mecánico.
- Bombear las lechadas de cemento.
- Lanzar el Pump Down Plug (verificar la banderilla de la cabeza de cementación), iniciar desplazamiento con la unidad cementadora.
- Reducir el caudal de desplazamiento 10 bls antes de alcanzar el wiper plug. El tapón wiper. Recalcular el volumen de desplazamiento después de observar el enganche del wiper plug. Desplazar el volumen teórico más la mitad del shoe track.
- Asentar Tapón con 500 psi sobre la presión final de desplazamiento. Chequear el funcionamiento del equipo de flotación y medir el retorno de fluido.
- Lanzar la bola para expansión del liner. (50 minutos).

- Colocar el setting tool en tensión previo a la expansión del liner. Presurizar con la unidad cementadora a aproximadamente 4500 psi para iniciar la expansión del liner.
- Liberar presión en el camión cementador y registrar volúmenes de retorno.
- Después de asegurar el asentamiento del liner. Tensionar para chequear el asentamiento.
- Levantar y circular en reverso reciprocando la sarta todo el tiempo (revisar tiempo de trabajo vs tiempo de bombeabilidad de la lechada de cabeza).
- El tiempo de espera para el fraguado (WOC) debe ser mínimo de 48 horas, antes de realizar registros eléctricos.

1.8 MEJORES PRÁCTICAS EN LA CEMENTACIÓN DE POZOS

Los factores básicos que los ingenieros y operadores deben considerar para lograr una cementación exitosa no han cambiado en más de 50 años, estos factores son resumidos en las siguientes ideas básicas.

1.8.1 ACONDICIONAMIENTO DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

El factor más importante para predecir si se va a tener una buena o mala eficiencia de desplazamiento durante la cementación es el estudio de la *erodabilidad*, en donde se realiza un análisis del fluido de perforación para diseñar ratas de flujo, lavadores, espaciadores para un lodo y geometría en particular.

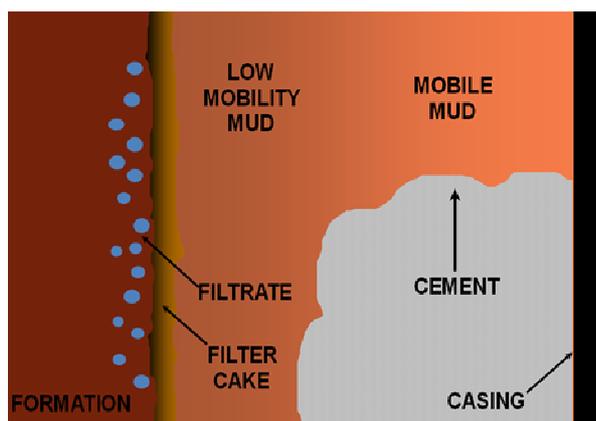
La *erodabilidad*, mide la fuerza necesaria para remover el lodo deshidratado y gelificado, después de permanecer un tiempo estático y este ha creado una capa o costra sobre la formación, mientras más alto sea el valor obtenido, más fácil será la remoción del lodo y el lodo cubrirá en un mayor porcentaje la tubería proporcionando el sello hidráulico y la adherencia entre la tubería — cemento — formación, para el cálculo de la erodabilidad en el laboratorio se emplea la ecuación 1.2.

$$E = \frac{600}{\tau_y} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

En donde τ_{cy} es el esfuerzo de corte mínimo necesario para empezar un movimiento en el lodo deshidratado y gelificado, la manera de obtener este valor es dejando el lodo por una hora a la temperatura de fondo estática (BHST) y luego realizando una medición en el viscosímetro Fann 35A a 3rpm y de acuerdo al resultado obtenido del cálculo se puede saber si:

- $5 \leq E$ Sistema de lodo muy duro para ser removido
- $5 < E \leq 10$ Sistema de lodo moderadamente duro para ser removido
- $10 < E \leq 20$ Sistema de lodo moderadamente fácil para remover
- $20 < E \leq 30$ Sistema de lodo bastante fácil de remover
- $E > 30$ Sistema de lodo muy fácil de remover

Figura 1.23 Remoción del fluido de perforación en la cara de la formación y el casing



Fuente: Primary Cementing Best Practices, Halliburton 2002

1.8.2 USO DE LAVADORES Y ESPACIADORES

Se utilizan varios tipos de fluidos (espaciadores químicos y mecánicos) que mejoran la eficiencia de limpieza del hoyo. Entre algunas propiedades de los lavadores químicos están:

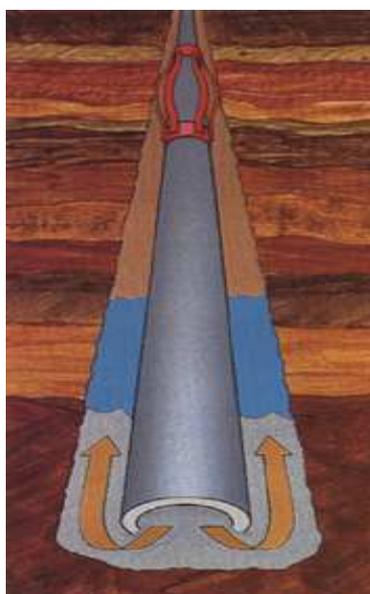
- Separación
- Remover lodo y revoque
- Dejar superficies mojadas por agua
- Lograr flujo turbulento
- Proteger las formaciones

- Compatibilidad.

Las funciones de los espaciadores mecánicos son:

- Separación
- Remover el lodo del pozo y revoque
- Dejar las superficies mojadas por agua
- Proveer erodabilidad necesaria
- Proteger las formaciones
- Transportar los sólidos removidos

Figura 1.24 Uso de lavadores y espaciadores

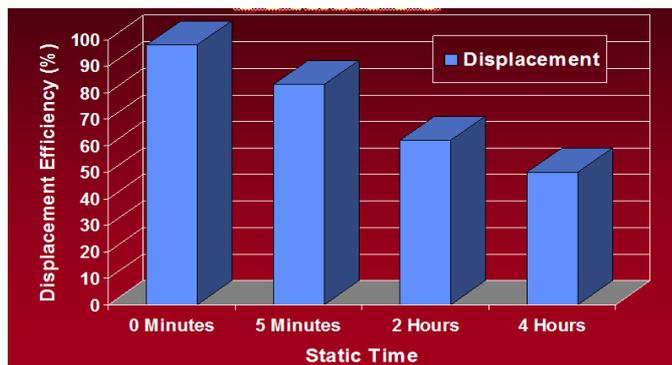


Fuente: Primary Cementing Best Practices, Halliburton 2002

Se debe tener en cuenta la compatibilidad entre el lodo, espaciadores y la lechada de cemento, para evitar la floculación del lodo de perforación como también disminuir la contaminación de la lechada.

Efectos del tiempo estático.- el tiempo estático es un factor importante que hay que tomar en cuenta ya que mientras se realiza un trabajo de cementación y por algún motivo éste tiene que detenerse por un determinado tiempo; en dicho período, el cemento empieza a desarrollar un estado de gel, dependiendo del diseño de la lechada de cemento. El gel producirá un alto o bajo esfuerzo, al momento de reanudar la operación y esto influye directamente en la eficiencia de desplazamiento como podemos ver en la figura 1.25.

Figura 1.25 Efecto del tiempo estático en la eficiencia de desplazamiento.



Fuente: Primary Cementing Best Practices, Halliburton 2002

Por tanto, mientras menor sea el tiempo en que la lechada de cemento se encuentre en estado estático mayor será la eficiencia de desplazamiento.

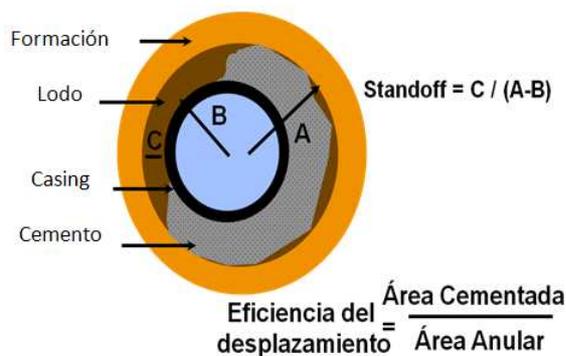
1.8.3 CENTRALIZACIÓN DE LA TUBERÍA

Stand off.- es el porcentaje que representa el espacio anular con buena centralización de la tubería respecto al hoyo.

Eficiencia de desplazamiento.- indica el porcentaje de espacio anular cementado en relación al espacio anular total.

En la Figura 1.26 observamos la forma de obtener el valor del stand off, que es la relación de C, para el radio del hueco A menos el radio de la tubería B, y la eficiencia de desplazamiento es igual a la relación de áreas entre la cementada y la del anular.

Figura 1.26 Definición de stand off y eficiencia de desplazamiento



Fuente: Primary Cementing Best Practices, Haliburton 2002

Un ejemplo de esto ha sido estudiado para un caso específico de cementación en donde se tiene un lodo de 16.7 lb/gal, una lechada de cemento de 16.7 lb/gal y una rata de flujo de 7 bpm, de donde se obtuvo los siguientes resultados:

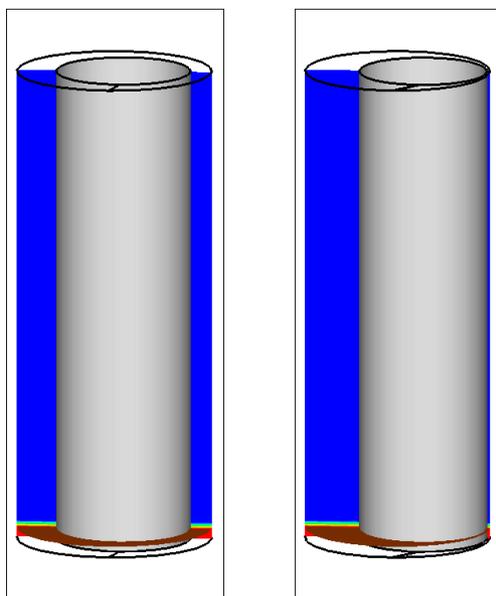
Tabla 1.5 Centralización de tubería

| Stand off | Desplazamiento (%) |
|-----------|--------------------|
| 17 | 45 |
| 35 | 77 |
| 60 | 88 |
| 72 | 97 |

Fuente: Primary Cementing Best Practices, Halliburton 2002

La centralización de la tubería es muy importante, en especial en la zona de interés, en donde se requiere un buen desplazamiento del lodo y una buena eficiencia de desplazamiento (95% en adelante); mientras menor sea el standoff, menor será la eficiencia del desplazamiento (figura 1.27) y en muchos de los casos se podrá experimentar el efecto de péndulo (figura 1.28).

Figura 1.27 Porcentaje de Stand Off



Standoff: 60%

Standoff: 15%

Figura 1.28 Efecto de péndulo en la tubería



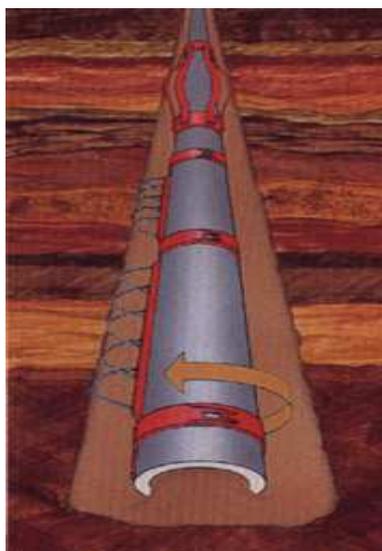
Fuente: Primary Cementing Best Practices, Halliburton 2002

Figura 1.29 Tubería centralizada

Fuente: Primary Cementing Best Practices, Halliburton 2002

1.8.4 MOVIMIENTO DE LA TUBERÍA

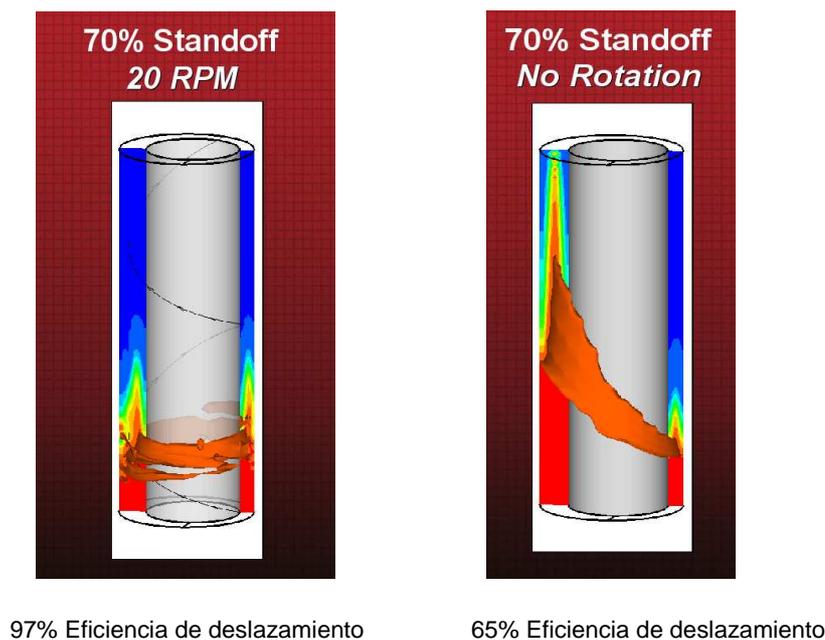
Se ha demostrado que el movimiento de la tubería durante la cementación ayuda a obtener un mayor porcentaje de desplazamiento, puesto que durante el movimiento de la tubería se remueve la gelificación del lodo formado en el momento de la cementación, los movimientos realizados pueden ser rotacionales o recíprocos (movimientos ascendentes y descendentes de la tubería), observándose una mayor canalización de fluidos en el caso en que no se rote ni se recíproque.

Figura 1.30 Movimiento de la tubería en forma rotacional

Fuente: Primary Cementing Best Practices, Halliburton 2002

Por ejemplo en un trabajo de cementación, con un lodo de 16.0 lb/gal, una lechada de cemento de densidad 16.7 lb/gal, a una rata de 4 bpm y un 70% de Standoff, se pudo observar que sin movimiento de tubería se tuvo una eficiencia en el desplazamiento del 65% y cuando se movió a 20 rpm se obtuvo un 97% de eficiencia, éste efecto se puede observar en la figura 1.31.

Figura 1.31 Movimiento de la tubería



Fuente: Primary Cementing Best Practices, Halliburton 2002

1.8.5 CAUDALES DE FLUJO

En las operaciones de cementación una de las prácticas que varía constantemente dependiendo de la operación, es el caudal y la velocidad, en donde se obtendrán diferentes patrones de flujo entre los que tenemos:

- Flujo tapón,
- Flujo laminar
- Flujo turbulento.

De igual manera se ha realizado un estudio para diferentes ratas, para un lodo de 12 lb/gal de densidad y para un cemento de 16.8 lb/gal de densidad. Los resultados son mostrados en la tabla 1.6

Tabla 1.6 Caudales de desplazamiento

| Caudal | Eficiencia de desplazamiento |
|---------------|-------------------------------------|
| 1 | 48 |
| 4 | 75 |
| 7 | 98 |

Fuente: Primary Cementing Best Practices, Halliburton 2002

1.9 FALLAS DE LA CEMENTACIÓN

Las cementaciones en los pozos pueden fallar, por las siguientes razones:

- Contaminación del agua de mezcla con materiales orgánicos o inorgánicos.
- Temperaturas de circulación de fondo de pozo (BHCT) estimadas incorrectamente.
- Falta de homogeneidad de la mezcla entre cementos y aditivos.
- Volúmenes de pre flujos, lavadores químicos y espaciadores insuficientes para la limpieza adecuada y eliminación del lodo de perforación.
- Falta o concentración inadecuada de aditivos para controlar el tiempo de bombeabilidad, filtrado, reología, etc.
- Tapones de goma mal ubicados.
- Dispositivos de casing, zapatos y collares en mal estado.
- Mala o falta de centralización de casing en el espacio anular(stand off bajo)
- Diseño de la lechada no adecuado para controlar las presiones porales elevadas.
- Fallas de los equipos de mezcla de superficie y bombeo al pozo.
- Deshidratación prematura de la mezcla de cemento.
- Gelificación del cemento por contaminación.
- Densidad equivalente de circulación (ECD) elevada que fractura la formación y ocasionan pérdidas.
 - Lodo no acondicionado previo a la cementación.

CAPÍTULO II

CEMENTACIÓN DE POZOS MEDIANTE EL SISTEMA WELL LIFE III™

2.1 INTRODUCCIÓN

El principal propósito de una cementación de producción es que se pueda producir un aislamiento efectivo para la vida del pozo, permitiendo que el petróleo o gas se pueda producir de manera segura y económica, por este motivo es muy importante que se realice un diseño de la lechada acorde a las propiedades de la formación, también es muy importante que se sigan las buenas prácticas de cementación, y se empleen todas las herramientas al alcance para que el trabajo sea exitoso; asegurando un buen aislamiento zonal, y alargando la vida útil del pozo.

Experiencias han mostrado que después de operaciones como: completaciones, pruebas de presión y producción de pozos; el cemento puede fallar y como consecuencia limitar la productividad del pozo (producción con alto corte de agua).

Por esta razón, se ha desarrollado el sistema de cementación Well Life III™ con la finalidad de prevenir y evitar posibles fallas del cemento; asegurando y alargando la vida útil de un pozo.

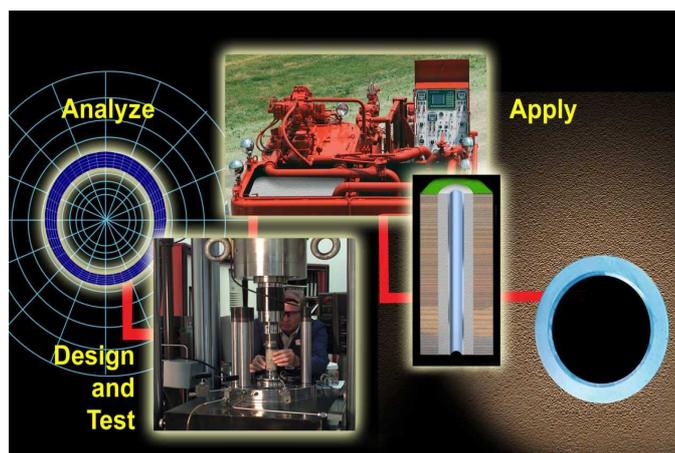
2.1.1 CONCEPTOS DEL SISTEMA WELL LIFE III™

El sistema Well Life III™ consta de tres pasos o etapas que serán descritas a continuación:

- El modelamiento de la cementación.
- Diseño de la lechada de cemento (Nuevas Tecnologías).
- Utilización del Cement Assurance Tool (CAT)

Dentro del modelamiento se realiza el análisis de las propiedades mecánicas del cemento, y posteriormente se diseña una lechada de cemento con propiedades mecánicas modificadas de acuerdo a las necesidades del pozo y por último la utilización del CAT como respaldo en el caso que el sello de cemento falle.

Figura 2.1 Sistema Well Life III™



Fuente: Documento técnico, Halliburton

2.2 MODELAMIENTO

Tradicionalmente, la industria se ha concentrado en las propiedades como son reología, tiempos bombeables, densidad; que son aplicables cuando el cemento todavía se encuentra en forma fluida. Esto es necesario e importante para obtener una mezcla y un desplazamiento efectivo, sin embargo los requerimientos para asegurar la integridad del cemento durante la vida productiva del pozo dependen de las propiedades mecánicas del mismo. La necesidad de considerar estas propiedades son críticas ya que el pozo está sujeto a cambios y esfuerzos.

2.2.1 PROPIEDADES MECÁNICAS

2.2.1.1 Propiedades Elásticas

2.2.1.1.1 Módulo de Young

Cuando a un cuerpo se le aplica una fuerza, éste normalmente reacciona contra esa fuerza deformadora, dado que tiende a tener una forma estable debido a su estructura molecular. Estas fuerzas de reacción suelen llamarse elásticas, y podemos clasificar los cuerpos según el comportamiento frente a la deformación.

Muchos cuerpos pueden recuperar su forma al desaparecer la acción deformadora, y los denominamos cuerpos elásticos. Otros cuerpos no pueden recuperar su forma después de una deformación, y los llamamos plásticos. Evidentemente, un material elástico lo es hasta cierto punto, más allá de un valor determinado de la fuerza deformadora, la estructura interna del material queda tan deteriorada que le es imposible recuperarse. Hablaremos por tanto, de un límite elástico, más allá del cual el cuerpo no recupera la forma, y aún más, de un límite de ruptura, sobre el cual se deteriora completamente la estructura del material, rompiéndose.

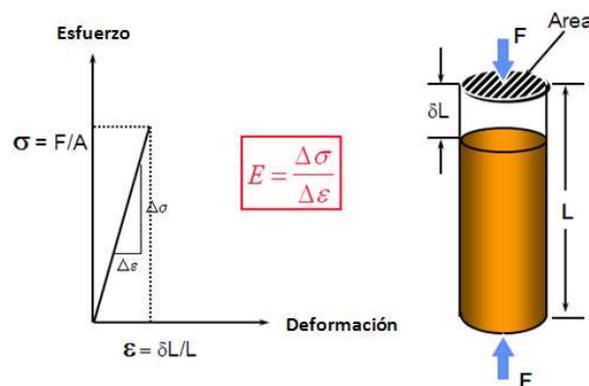
Robert Hooke (1635-1703) estableció una ley fundamental que relaciona la fuerza aplicada y la deformación producida. Para deformaciones que no sean muy grandes, es decir, que no superen el límite elástico, se cumple que:

$$F = K * x \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde: F es la fuerza deformadora aplicada y x es la deformación relativa.

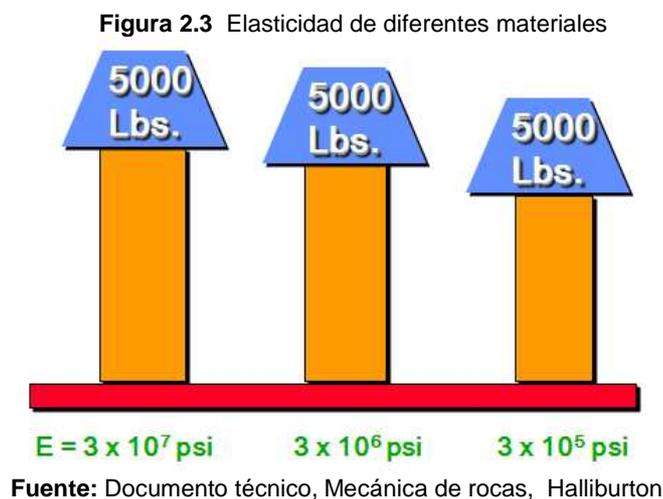
Por lo tanto, el módulo de Young ó módulo de elasticidad, es determinado por el cambio en la longitud de un material que resulta cuando el material está sujeto a una fuerza de tensión o de compresión. Este módulo es básicamente una medida de la rigidez del material.

Figura 2.2 Módulo de Young



Fuente: Documento técnico, Mecánica de rocas, Halliburton

Entonces, cuando un material tiene un módulo de elasticidad grande, posee también una rigidez relativa grande, es decir que lo que debemos obtener en relación a nuestro análisis es que los cementos a diseñar tengan módulos de Young menores a los que se tiene con los cementos convencionales.



2.2.1.1.2 Módulo ó Relación de Poisson

Siempre que un cuerpo se somete a la acción de una fuerza, se deformará en la dirección de la fuerza. Este concepto y el método para calcular la deformación se discutieron con anterioridad. Sin embargo, siempre que se producen deformaciones en la dirección de la fuerza aplicada, también se producen deformaciones laterales. La Figura 2.4 muestra la deformación total de un cuerpo durante la carga.

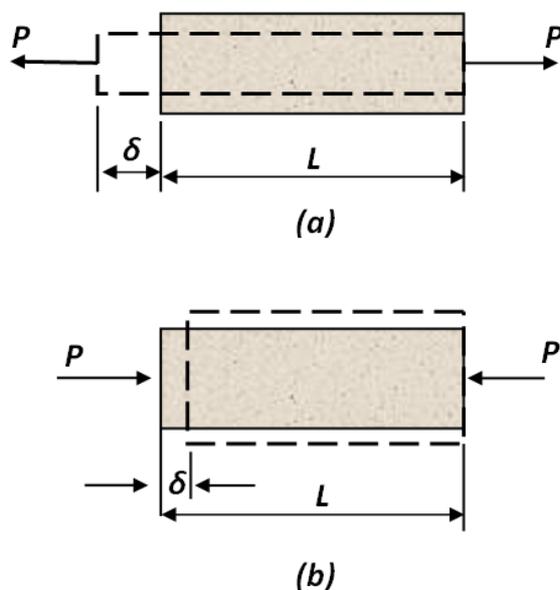
Las deformaciones laterales que se producen tienen una relación constante con las deformaciones axiales o longitudinales. Mientras que el material se mantenga dentro del rango elástico de esfuerzos, esta relación es constante:

$$\nu = \frac{\text{deformación lateral}}{\text{deformación axial}}$$

El término ν se llama módulo de Poisson, en honor a S.D. Poisson, quien expresó este concepto en 1828. En general, el valor de ν está comprendido entre 0 y 0.5 pero para la mayoría de los materiales está entre 0.25 y 0.35. La única

excepción se presenta cuando se impide que se efectúe libremente el movimiento lateral.

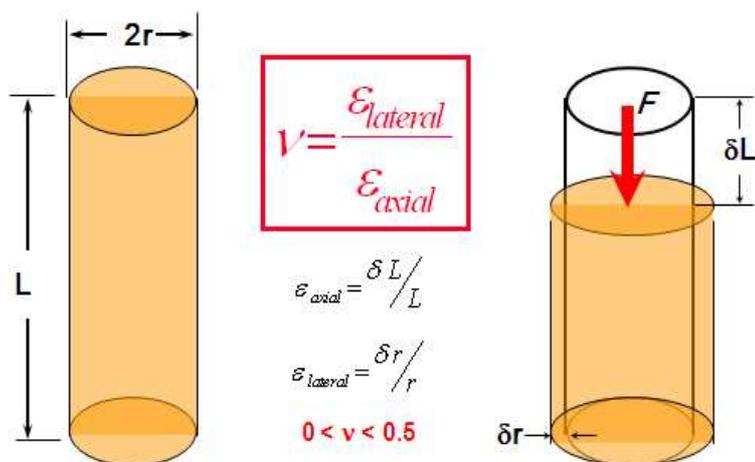
Figura 2.4 Deformación de un cuerpo al aplicar una carga (a) Tensión y (b) Compresión



Fuente: Figura tomada de página de internet (www.wikipedia.com)

Un material que, bajo un esfuerzo, se deforma lateralmente tanto como lo hace longitudinalmente debería tener una relación de Poisson de 0.5, si un material no se deforma lateralmente bajo una carga longitudinal debería tener una relación de Poisson de 0.

Figura 2.5 Relación de Poisson

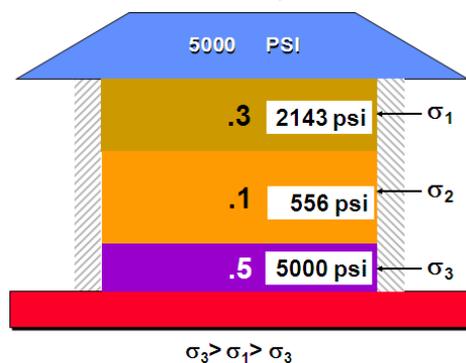


Fuente: Documento técnico, Mecánica de rocas, Halliburton

Un material, cuando se encuentra desconfinado y sometido a una carga, soporta un mayor esfuerzo a medida que el módulo de Poisson sea menor pero ocurre todo lo contrario cuando el material es confinado.

En la industria petrolera, específicamente en la cementación de pozos, el cemento es confinado dentro de un pozo entre el casing y la formación, por lo tanto; lo que nos interesa es conseguir módulos de Poisson altos ya que estos soportan mayores cargas tal como podemos ver en la figura 2.6.

Figura 2.6 Relación de Poisson para materiales confinados



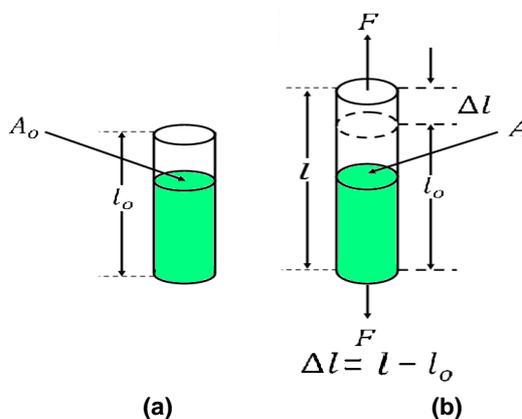
Fuente: Documento técnico, Mecánica de rocas, Halliburton

2.2.1.2 Límites mecánicos (Fuerzas)

2.2.1.2.1 Resistencia a la tensión

Por definición, la tensión es igual al cociente entre la fuerza de tensión uniaxial aplicada y la sección transversal original del material, como podemos ver en la figura 2.7.

Figura 2.7 a) Barra antes de aplicarle la fuerza b) Barra sometida a una fuerza de tensión uniaxial



Fuente: Figura tomada de página de internet (www.wikipedia.com)

Por lo tanto la resistencia a la tensión es una fuerza de oposición que realiza el material para evitar su deformación.

La resistencia a la tensión es un parámetro útil para la determinación o medición de la resistencia que tiene o que va a soportar la envoltura de cemento durante las diferentes etapas de la vida productiva de un pozo.

2.2.1.2.2 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la resultante de las presiones que existe dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen o un acortamiento en determinada dirección, siempre manteniendo una masa constante.

Esta propiedad mecánica nos ayuda a conocer la capacidad del cemento para resistir los esfuerzos ejercidos sobre él en el fondo del pozo.

En general, cuando se somete al cemento a un conjunto de fuerzas se produce tanto flexión, como torsión, todos estos esfuerzos conllevan la aparición de tensiones tanto de tracción como de compresión.

Compresión.- *Es la fuerza que actúa en un material, suponiendo que esté compuesto por planos paralelos, lo que hace la fuerza es intentar aproximar estos planos, manteniendo su paralelismo.*

Tracción.- *Es lo inverso de la compresión, ya que los planos paralelos, que suponemos que componen el material, intentan o tienden a separarse.*

Flexión.- *Es la fuerza externa que comprime las caras cercanas a la fuerza y tracciona la cara contraria.*

Torsión.- *Es provocado por dos fuerzas de sentido inverso en el que el eje de la muestra coincide con el eje de giro.*

Corte o cizalladura.- *Es parecido a la compresión, en el que hay un plano de cizalladura o cortadura.*

2.2.1.2.3 Resistencia al impacto

Se define la resistencia al impacto como la energía absorbida por un material por unidad de área, en un ensayo a muy alta velocidad de deformación (impacto). La capacidad de absorber energía depende no sólo del tipo y micro estructura del material, sino también de su forma, tamaño, espesor, etc.,

En general cabe esperar que materiales con valores altos de resistencia, límite elástico y ductilidad; presenten valores altos de energía absorbida en el impacto pero a veces estos valores son inferiores a los esperados debido al efecto de la concentración de esfuerzos.

La resistencia al impacto, es un parámetro importante para determinar la calidad de lechada de cemento que se va a obtener, ya que mediante esta, se puede analizar el fenómeno del agrietamiento en los cementos y cuánto estos se pueden propagar por las cargas existentes dentro del pozo.

2.2.1.3 Otras propiedades importantes

2.2.1.3.1 Encogimiento

Desde la perspectiva de la cementación, un canal para la migración de fluidos puede ser creado (1) si el fluido de perforación no es removido correctamente, (2) si la lechada de cemento no es colocada en el anular totalmente, y/o (3) si el revestimiento de cemento falla debido al encogimiento y/o por la pérdida de integridad estructural por la falta de capacidad de soportar las tensiones de las operaciones en el pozo.

Los productos creados en mayor cantidad durante la hidratación del cemento es el C-S-H gel y el hidróxido de calcio, los cuales tienen menor densidad (mayor volumen) en relación con el C_3S o C_2S ; en el caso de los productos que contienen aluminio, las densidades de los productos de la hidratación son también menores que los reactantes.

En general, el volumen de los productos formados es menor que el volumen ocupado por los reactantes, este fenómeno es conocido como encogimiento volumétrico. Se debe esperar que el encogimiento sea el máximo cuando el

cemento es completamente hidratado y los productos no se encuentran bajo transformaciones.

Factores que afectan el encogimiento del cemento.

En la cementación de un pozo, el resultado final del encogimiento del cemento depende mayormente del proceso de alivio de la tensión. Esto hace que sea importante cuantificar el encogimiento final de la hidratación del cemento para definir el sistema de cemento, para que este pueda proveer el deseado aislamiento zonal.

Las condiciones del fondo del pozo que tendrán un fuerte impacto en el encogimiento de cemento son temperatura, presión, y la exposición al agua. En vista de la porosidad o el desarrollo nulo de un mecanismo de alivio de la tensión. Un aumento en la temperatura tiene dos efectos: la expansión de volumen fluido y disminuye el tiempo de fraguado.

El efecto de exposición a la humedad es reducir la presión capilar, haciendo que el cemento sea permeable. El verdadero impacto de humedad en el encogimiento parece depender de la profundidad de la capa de cemento accesible al agua.

Las características de la mezcla, por ejemplo tixotropía, comportamiento del desarrollo de resistencia estática a la compresión, tiempo de transición, tiempo de la hidratación Vs. tiempo de fraguado, tienen un fuerte impacto en el encogimiento y por ende en el sistema de cementación.

El fracaso del revestimiento de cemento de proveer el aislamiento zonal debido al encogimiento podría ser un resultado de:

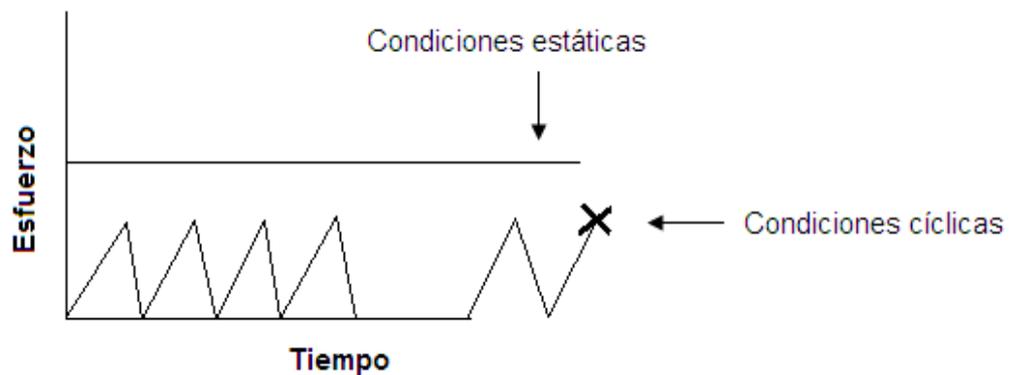
- Encogimiento volumétrico que causaría despegadura y formación de micro anulares.
- Grietas por tensión y consecuentemente incremento de la permeabilidad resultan de las tensiones del encogimiento.
- Ambas causas

2.2.1.3.2 Fatiga

La resistencia a la fatiga de un material se expresa a través del número de ciclos de carga que puede soportar, a un valor dado del esfuerzo y frecuencia aplicada (carga cíclica en flexión, compresión, tracción, torsión), antes de la rotura.

Cualquier material sometido a cargas variables en el tiempo tiende a fallar a tensiones muy inferiores a las que serían necesarias en condición estática.

Figura 2.8 Límite de fatiga de un



material

Fuente: Documento técnico, Mecánica de rocas, Halliburton

2.2.1.3.3 Envolvente de Mohr

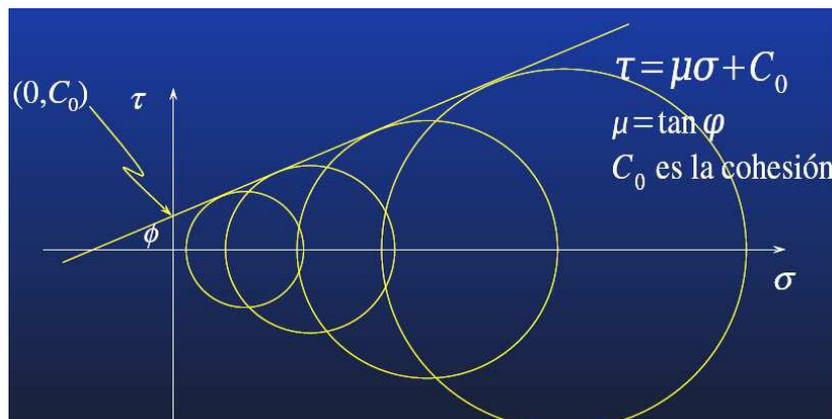
A partir de una serie de pruebas de compresión, llevadas a cabo sobre muestras idénticas de cemento, con presiones de confinamiento diferentes, representadas por un conjunto de círculos de Mohr que representan la falla (véase figura 2.9). Una envolvente de falla es tangente a estos círculos, la que es representada aproximadamente como una línea recta sobre un amplio rango de tensiones descrita por la ecuación 2.2.

$$\tau = \mu\sigma + C_0 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

El círculo de Mohr se traza en coordenadas cartesianas donde el eje horizontal representa los esfuerzos normales (σ) y el eje vertical los esfuerzos cortantes (τ).

La forma de la envolvente es conocida como el diagrama de Mohr.

Figura 2.9 Envolvente de Mohr



Fuente: Documento técnico, Mecánica de rocas, Halliburton

Fricción ($\tan \varphi$) que se debe al enlace entre partículas y al roce entre ellas cuando están sometidas a esfuerzos normales.

Cohesión (C_0) que se debe a fuerzas internas que mantienen unidas a las partículas en una masa.

En términos físicos, si un círculo de Mohr para estados particulares de esfuerzo, yace enteramente por debajo de la envolvente, el cemento se encuentra en condiciones estables. Si el círculo de Mohr toca la envolvente (figura 2.9), la resistencia máxima del cemento ha sido alcanzada, es decir, la falla ha ocurrido.

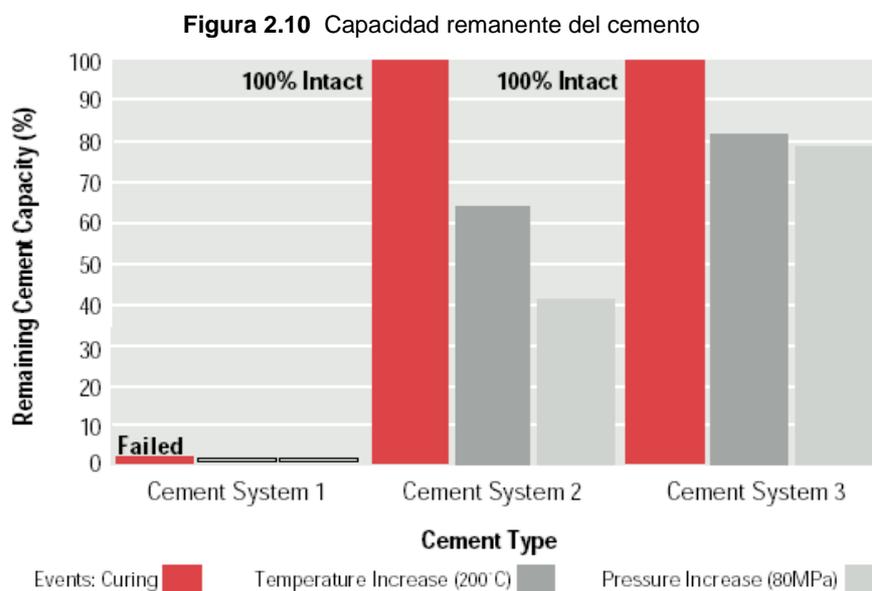
2.2.2 CAPACIDAD REMANENTE

La capacidad remanente es una medida de cómo el cemento puede perder o ver reducida su capacidad original de aislamiento después de ser sometido a diferentes esfuerzos. Se define como la vida útil que le resta al cemento para seguir resistiendo a los diferentes esfuerzos antes de fallar.

En la Ingeniería de materiales es común describir un rango de seguridad operativa para reducir la falla por fatiga. Es recomendable que el nivel de esfuerzo en el material sea mantenido por debajo del límite de resistencia para reducir la falla por fatiga. Por ejemplo en el acero el límite de resistencia es considerado cerca de 0.45 veces su último esfuerzo a la tensión. Aplicando la misma lógica de diseño, la falla por fatiga en el cemento puede ser reducida diseñándolo para una capacidad remanente alta, figura 2.10, permitiendo optimizar los diseños de

cementaciones cuando los esfuerzos cíclicos son determinantes. Un cemento con 100% de capacidad remanente significa que está operando dentro de su límite elástico, un cemento con capacidad remanente del 50% a 80% sufre deformación plástica sin llegar a punto de falla y con capacidad de seguir soportando esfuerzos , sin embargo cuando la capacidad remanente es menor al 50% pero mayor de cero el material no ha fallado aún pero deben analizarse detenidamente los resultados de la simulación, pues el riesgo de pérdida de adherencia o integridad es alto y se deben tomar medidas preventivas de ingeniería de diseño.

Capacidad remanente cero significa simplemente que el cemento falla y no cumple con su función de aislamiento



Fuente: Documento técnico, Análisis Well Life, Halliburton

2.2.3 FORMAS EN LAS QUE FALLA EL CEMENTO

Para que el recubrimiento de cemento garantice un buen aislamiento zonal se deben considerar las condiciones siguientes:

- Agrietamiento del revestimiento de cemento.
- Cizallamiento del cemento por esfuerzos compresivos.
- La adherencia entre la formación y el cemento tanto como entre el cemento y el casing deben permanecer intactas.

- El revestimiento de cemento debe mantener su integridad.

La integridad del cemento puede ser evaluada desde que la lechada de cemento es bombeada en el anular a través de varios eventos que ocurren en la vida del útil del pozo. Ejemplos de estos eventos pueden ser:

1. Hidratación de la lechada de cemento.
2. Cambio de fluidos en el pozo.
3. Pruebas de presión en el casing.
4. Completación y pruebas iniciales.
5. Producción/Inyección.

Es recomendable que el nivel de esfuerzo del material se mantenga por debajo del límite de resistencia para reducir fallas por fatiga, entonces, la fatiga en cementos pueden ser reducidas diseñando un cemento que tenga una capacidad remanente significativa.

Las fallas en el recubrimiento de cemento son usualmente causadas por la presión o la temperatura inducida por los esfuerzos durante las operaciones en los pozos. Bajo estas condiciones, el cemento puede experimentar una o más formas de falla: Agrietamiento, cizallamiento, despegadura o deformación plástica.

El cemento puede agrietarse si los esfuerzos radial o tangencial son mayores que la resistencia a la tensión, ejemplos de eventos que pueden causar el agrietamiento del cemento son la hidratación del cemento (reducción de volumen) y pruebas de presión del casing, cuando éste se expande y el esfuerzo tangencial en el cemento excede la resistencia a la tensión. En este caso el(los) agrietamiento(s) en el cemento son radiales y podrían propagarse desde la interfaz casing-cemento, Figura 2.11 A.

Las fallas de corte (cizallamiento) por esfuerzos compresivos en el cemento son debido a las amplias diferencias de los principales esfuerzos (radiales/tangenciales). Estas pueden ser causadas por decrecimiento de la naturaleza compresiva del esfuerzo tangencial, por ejemplo durante el encogimiento de la lechada de cemento. Esto también puede ser causado por un

incremento en la naturaleza compresiva de los esfuerzos radiales, por ejemplo durante la expansión del casing. Figura 2.11B

Figura 2.11A Agrietamiento Radial

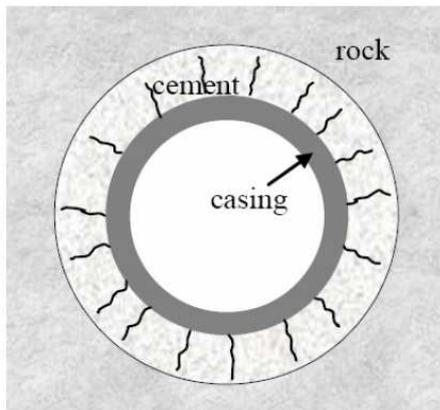
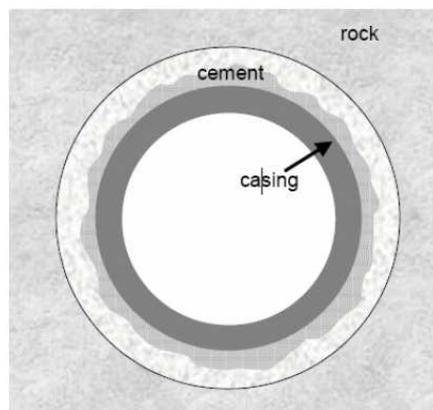


Figura 2.11B Cizallamiento por compresión



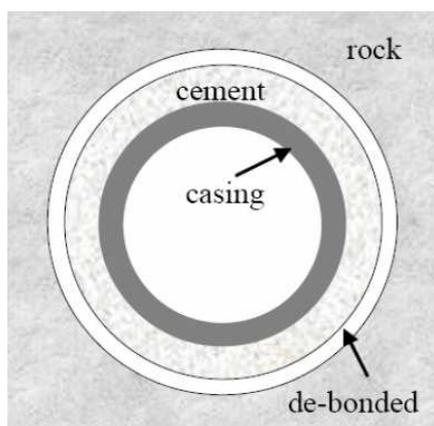
Fuente: Documento técnico, Análisis Well Life, Halliburton

El revestimiento de cemento podría despegarse en dos diferentes formas:

- Despegadura de la interfaz roca-cemento, Figura 2.11C,
- Despegadura de la interfaz cemento-casing, Figura 2.11D.

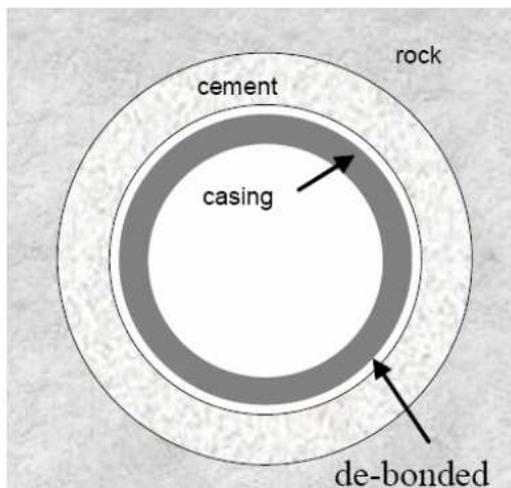
Las despegaduras de las interfaces pueden producir la migración vertical de fluidos. La magnitud de la migración de fluidos puede ser estimada por la presión diferencial, las propiedades de los fluidos y el ancho de los micro anulares creados. Incluso si el flujo de fluidos no es alto en el inicio, cualquier influencia química de los fluidos en el cemento deben ser considerados en la decisión.

Figura 2.11C Despegadura en la interfaz roca-cemento



Fuente: Documento técnico, Análisis Well Life, Halliburton

Figura 2.11D Despegadura en la interfaz cemento-casing



Fuente: Documento técnico, Análisis Well Life, Halliburton

2.3 SOFTWARE WELL LIFE

El software Well Life considera un método de análisis de elementos finitos (FEA) que ha sido desarrollado para analizar el efecto de varios eventos y operaciones en los pozos petroleros, como es la hidratación del cemento, pruebas de presión del casing, completación, y producción; en la integridad del cemento durante la vida del pozo.

El modelamiento FEA tetra-dimensional considera las propiedades mecánicas de la capa de cemento, como son el módulo de Young, relación de Poisson, resistencia a la tensión, a demás de la resistencia a la compresión en confinamiento, y ayuda al usuario a diseñar una cementación que pueda mantener el sello en el anular durante toda la vida del pozo

2.3.1 MÉTODO DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

2.3.1.1 Definición del método

Es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de partes. “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados

a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.

- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación.
- El método de Elementos Finitos por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

2.3.1.2 Aplicación computacional del método.

Mediante la simulación numérica es posible generar sólidos de aspecto casi real, comprobar su comportamiento bajo diversas condiciones de trabajo, estudiar el movimiento conjunto de grupos de sólidos, etc. Esto permite un conocimiento mucho más profundo de un producto antes de que exista físicamente, siendo posible detectar muchos de los problemas que de otro modo se hubieran detectado en el servicio real.

Este método se aplica computacionalmente mediante tres fases que son:

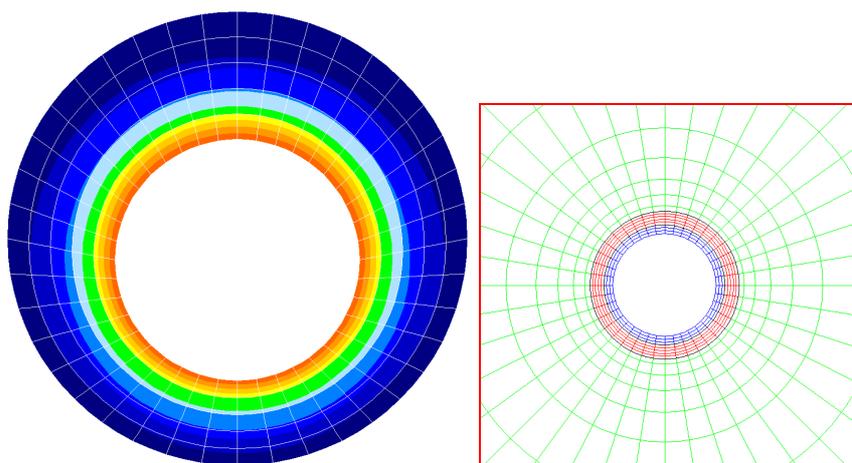
1. Pre-procesamiento.
2. Solución del análisis.
3. Post-procesamiento de resultados usando herramientas de visualización.

2.3.1.2.1 Pre-procesamiento

El primer paso, es decir en el pre-procesamiento, se construye un modelo de elementos finitos de la estructura a ser analizada. En el método de análisis de elementos finitos, la roca, el cemento y casing (figura 2.12), se dividen en un número finito de partes de modo que la ecuación pueda ser resuelta. Estos elementos individuales deberían satisfacer las relaciones del problema original, por lo que al usar este proceso, se tiene una aproximación del problema original. Las dimensiones de los elementos deberían permitir minimizar el error y así la solución aproximada se enmarque en la solución original.

La interface de los elementos son usados para analizar la interface cemento – casing y la interface cemento – roca.

Figura 2.12 Grilla para el análisis de elementos finitos



Fuente: Documento técnico de Halliburton (Cementing White Paper)

2.3.1.2.2. Análisis (cómputo de la solución)

En la siguiente etapa del análisis de elementos finitos se lleva a cabo una serie de procesos computacionales que involucran los esfuerzos aplicados, y las propiedades de los elementos para encontrar un modelo de solución. Tal análisis estructural permite la determinación de efectos como deformaciones, estiramiento o esfuerzos que son causados por fuerzas estructurales aplicadas (presión, gravedad).

2.3.1.2.3. *Post-procesamiento (visualización)*

Estos resultados pueden ser estudiados utilizando herramientas visuales dentro del ambiente del análisis de elementos finitos para ver e identificar completamente las implicaciones del análisis. Herramientas numéricas y gráficas permiten la localización precisa de información como esfuerzos y deformaciones a ser identificadas.

2.4 DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO

Una vez realizado el análisis de las propiedades mecánicas que afectan la integridad del cemento a lo largo de su vida útil, el siguiente paso es elaborar una lechada en laboratorio y someterla a diferentes pruebas que permitan simular y determinar los esfuerzos a los que estará expuesto en el pozo.

Únicamente los resultados de las pruebas nos permitirán conocer si la lechada es óptima y aplicable para un pozo en particular; es por esto que es necesario conocer cuáles son los procedimientos para diseñar una lechada y las pruebas a las que será sometida.

Es de vital importancia conocer los efectos que provocarán los aditivos una vez que se han mezclado con el agua y el cemento, ya que solo así podremos diseñar una lechada que cumpla con todos los requerimientos de un pozo.

2.4.1 ADITIVOS

La variedad de temperaturas, presiones, y otros parámetros que se encuentran en los pozos obliga a diseñar lechadas con propiedades adecuadas a cada condición. Para adecuarlas existen compuestos que se agregan a la mezcla y que modifican las propiedades de la misma. Estos compuestos, denominados aditivos, permiten que la lechada llegue a la zona de interés, fragüe correctamente y que el cemento cumpla con la función para la que fue diseñado.

A continuación detallaremos los aditivos más utilizados en la industria petrolera.

2.4.1.1 Aditivos para lechadas de cemento convencionales.

Son aditivos utilizados para obtener lechadas de cemento que nos permitan cubrir los requerimientos de un pozo. Las características más comunes a ser afectadas por estos aditivos son:

- Densidad
- Resistencia a la compresión
- Tiempo de bombeabilidad
- Propiedades de fluido (reología)
- Agua libre
- Pérdida de Fluido, etc.

2.4.1.1.1 Aceleradores

Los aditivos aceleradores de cemento cumplen con la función de acortar el tiempo de fraguado y reducir el tiempo de espera para el fraguado del cemento (WOC). Los aceleradores son ampliamente usados en tuberías superficiales, pozos poco profundos y tapones de cemento. Los más comunes son:

Cloruro de calcio (CaCl_2):

- El más comúnmente usado.
- 2 a 4% por peso de cemento
- Temperatura circulante 50 a 100 °F
- Disminuye la viscosidad a bajas concentraciones
- Incrementa la viscosidad y la pérdida por filtrado a altas concentraciones

Cloruro de sodio (NaCl):

- No es tan efectivo como el cloruro de calcio
- 1 a 5% por peso de cemento
- 50 a 120 °F
- Incrementa pérdida por filtrado
- Reduce la viscosidad

2.4.1.1.2 Alivianadores de Peso

En ocasiones, el peso de la lechada necesita ser reducido para proteger formaciones que tienen un bajo gradiente de fractura o por razones económicas. Las formas de alivianar la lechada es adicionando agua, agregando sólidos con peso específico inferior al del cemento, o ambos.

Los alivianadores de peso también se usan para reducir el agua libre. En otras palabras, “extienden” la fase sólida y así evitan la pérdida de agua, con las dificultades que eso podría traer.

Los más usados son:

Bentonita

- Para aligerar el peso de la columna hidrostática.
- En presencia de agua aumenta hasta 10 veces su volumen seco.
- Dosificación: 0.1 – 12% BWOC
- Pre hidratada: Hasta 3% BWOC
- Temperatura: 60 - 500 ƒ
- Efectos secundarios:
 - ✓ Incrementa la viscosidad.
 - ✓ Incrementa el requerimiento de agua y disminuye el esfuerzo de compresión.

Silicalita

- Dosificación: 1 – 30% BWOC
- Temperatura: 60 - 500 ƒ
- Efectos secundarios:
 - ✓ Aumenta la viscosidad.
 - ✓ Retiene agua libre.
 - ✓ Incrementa la viscosidad.
 - ✓ Incrementa el requerimiento de agua y disminuye el tiempo de bombeabilidad.

Esferilita

- Recomendado entre 9,5 – 12 lb/gal.
- Ofrece mayor esfuerzo compresión.
- Efectos secundarios:
 - ✓ Aumenta viscosidad.

2.4.1.1.3 Densificantes

El principal propósito de los aditivos densificantes es el de contrarrestar altas presiones de formación. Estos aditivos son usados para obtener lechadas con densidades mayores a 18 lb/gal las cuales tienen un bajo requerimiento de agua y tiene un tamaño de partícula uniforme. Los densificantes son aditivos químicamente inertes y compatibles con otros aditivos.

El material más comúnmente usado es:

Barita

- Requiere agua adicional de mezcla (0.0264 gal/lb)
- Rango de Temperatura: 80 – 500 °F
- Concentración: hasta 135 lb/sk, dando un máximo de 19 lb/gal.
- Efectos Secundarios:
 - ✓ Puede causar asentamiento e incremento de viscosidad
 - ✓ Reduce la resistencia a la compresión

Además se pueden emplear otros materiales como:

- Hematita
- Sílice
- Sal
- Carbonato de calcio

2.4.1.1.4 Retardadores

En pozos profundos y de altas temperaturas, el fraguado puede ocurrir antes de llegar a la zona de interés. Para evitar esto, se agregan aditivos retardadores, es

decir, que hacen que la lechada fragüe en tiempos más largos; aunque reducen la resistencia a la compresión.

Los compuestos químicos retardadores usados comúnmente son:

HR-800

- No-Lignosulfanato
- Ambientalmente amigable
- Buen desarrollo de resistencia temprana
- Mejora el control de filtrado a altas temperaturas
- Rango de Temperatura: 80 – 220 °F
- Concentración: 0.1 – 2% BWOC
- Efectos Secundarios:
 - ✓ Viscosifica

SCR-100

- Retardador no-lignosulfanato
- Rango de Temperatura: 250 °F (agua dulce), 250 – 350°F (agua salada)
- Concentración: 0.1 – 2% BWOC
- Efectos Secundarios:
 - ✓ Mayor resistencia a la compresión temprana.
 - ✓ Mejor predicción del desarrollo de la resistencia a la compresión.
 - ✓ Dispersa

2.4.1.1.5 Controladores de Pérdida de Fluido

Tienen como propósito evitar la deshidratación de la lechada de cemento durante el bombeo cuando pasa frente a zonas permeables, donde se presenta el proceso de filtración.

Estos aditivos funcionan evitando el flujo de agua desde la lechada hacia la formación y mejorando la distribución de los tamaños de partículas.

Los aditivos más comunes son:

HALAD 400 L

- Efectivo a altas temperaturas
- Efectivo a alta concentración de sal
- Biodegradable
- Puede usarse en combinación con otros aditivos como Halad 300L
- Rango de Temperatura: 100 – 400 ƒ
- Efectos Secundarios:
 - ✓ No construye viscosidad

HALAD 300 L

- Funciona en una amplia variedad de condiciones
- Compatible con la mayoría de aditivos
- Tolerante a la sal
- Rango de Temperatura: 100 – 400 ƒ
- Efectos Secundarios:
 - ✓ Viscosifica ligeramente

2.4.1.1.6 Dispersantes ó Reductores de Fricción

Estos aditivos son añadidos a la lechada de cemento para mejorar sus propiedades de flujo. Bajan la viscosidad y pueden ser bombeados en régimen turbulento a bajas presiones. Con esto se minimiza la potencia requerida y se disminuyen las posibilidades de pérdida de circulación y de deshidratación prematura.

Los aditivos dispersantes más ampliamente utilizados son:

CFR - 3

- Reduce viscosidad aparente y mejora propiedades reológicas
- Rango de Temperatura: mayor a 60 ƒ
- Concentración: 0.3 – 1 % BWOC
- Efectos Secundarios:
 - ✓ Leve efecto retardante

CFR - 8

- Biodegradable
- Dosificación: 0,3 – 1 % BWOC
- Temperatura: 60 - 500 °F
- Efectos secundarios:
 - ✓ Disminuye la viscosidad
 - ✓ Aumenta la pérdida por filtrado
 - ✓ Puede producir segregación

2.4.1.1.7 Controladores de Gas

La migración de gas a través del cemento es una de las mayores preocupaciones. Las lechadas de cemento son capaces de transmitir presión hidrostática y mantener el control de presiones mientras está en estado fluido. Sin embargo, el cemento naturalmente tiende a desarrollar una fuerza de gel cuando se encuentra estático, este período puede ser de varias horas y durante éste la lechada no transmitirá presión de fluido.

Mientras la lechada se encuentra en estado de gel, y antes de endurecerse, el cemento podría también perder una pequeña cantidad de filtrado a zonas porosas resultando en una reducción del volumen.

Como la presión no se transmite en este estado, una reducción de presión ocurre en el punto donde existe filtración, es aquí donde el gas de zonas porosas cercanas puede ingresar al cemento y dirigirse a otras zonas o a la superficie.

El camino de esta migración de gas es permanente y existe incluso después de que el cemento se haya endurecido totalmente.

Para combatir este problema varios aditivos pueden ser usados en la lechada de cemento. Se utiliza para minimizar el tiempo en el que el cemento se encuentra en estado de gel.

El aditivo más utilizado es:

GAS STOP

- Dosificación: 0.4 – 1% BWOC
- Temperatura: 60 - 230 Ƒ
- Efectos secundarios:
 - ✓ Aumenta ligeramente la viscosidad.
 - ✓ Disminuye la pérdida por filtrado.

2.4.1.1.8 Antiespumantes

Utilizado para prevenir la formación de espuma, la cual aparece durante la agitación mientras se está preparando la lechada de cemento. Este aditivo debe ser capaz de funcionar a altas temperaturas.

D-AIR 3000 L

- Ayuda a controlar la formación de espuma en las lechadas
- Puede emplearse en cementos con Latex
- Concentración: 0.005 a 0.5 gal/sk
- Mejores características anti-espumantes que aditivos anteriores

2.4.1.1.9 Expansivos

Son añadidos en la lechada de cemento para contrarestar el efecto de encogimiento que sufre el cemento por una rápida hidratación una vez desplazado en el pozo, de esta manera también se puede controlar la migración de gas.

Entre los aditivos utilizados tenemos:

Microbond M

- Rango de Temperatura: 130 - 210Ƒ (BHST)
- Concentración: 5%
- Buena expansión en 3 días
- Leve aceleración de tiempo bombeable y tiempo de fraguado

Microbond HT

- Rango de Temperatura: 170 – 400Ƒ (BHST)

- 170-210°F: expansión significativa en 7 a 28 días
- En temperaturas mayores a 240°F: expansión significativa en 3 a 7 días
- Concentración: 3 - 5%
- Acelera el tiempo de bombeo

2.4.1.1.10 Aditivos especiales

Permiten obtener diferentes propiedades para los distintos requerimientos del pozo; entre estos tenemos:

UNIVERSAL CEMENT SYSTEMS

- Prevenir problemas de gelificación con cementos reactivos (Clase A)
- Rango de Temperatura: 80 – 250°F
- Efectos secundarios:
 - ✓ Puede provocar incremento de agua libre

WG-17

- Agente gelificante
- Mayor viscosidad inicial y mejor mantenimiento de viscosidad
- Se requiere menos dosificación que otros gelificantes
- Agente de control de agua libre
- Píldoras viscosas

BE – 4

- Bactericida
- Dosificación: 0.042 gal/10Bbl - 1 gal/10000gal

2.4.1.2 Nueva tecnología de aditivos para modificar las propiedades mecánicas del cemento

Las nuevas tecnologías en aditivos permiten modificar las propiedades mecánicas del cemento y a la vez son compatibles con los aditivos convencionales. Entre estos aditivos tenemos:

2.4.1.2.1 *Well Life 665™*

Es un elastómero diseñado para ayudar a proveer de elasticidad al cemento fraguado. Este modifica las propiedades mecánicas del cemento, primeramente disminuyendo el módulo de Young y luego aumentando la relación de Poisson. El aditivo *Well Life 665™* es un material de partículas sólidas que es usualmente mezclado en seco.

Ventajas

Incrementa la capacidad del cemento para resistir cargas cíclicas.

Mezclado con otros aditivos de la tecnología *Well Life*, minimiza las pérdidas por circulación.

Este aditivo al estar formado por partículas elastómeras, si entran en contacto con hidrocarburos, se hincha y cambian las propiedades físicas del cemento.

Desventajas

Requiere técnicas especiales de laboratorio para elaborar la lechada de cemento o consideraciones especiales al momento de bombear la lechada en un determinado pozo, debido a las propiedades del elastómero.

Con una gravedad específica de 1.0, las partículas de este aditivo tienden a separarse o flotar hacia la parte superior de la lechada a elevadas temperaturas.

Figura 2.13 Aditivo *Well Life 665™*



Fuente: Documento técnico Halliburton, Aditivos

Rango de temperatura

El Well Life 665™ puede ser usado a temperaturas superiores a 500°F. Sin embargo, a temperaturas por encima de 400°F, es recomendable usarlo en combinación con otro aditivo Well Life para ayudarle a mejorar su rendimiento.

Rango de concentración

Es típicamente usado en concentraciones de 5 a 12% BWOC, pero puede ser usado en altas concentraciones si es necesario, siempre y cuando la lechada sea estable y bombeable.

2.4.1.2.2 Well Life 734™

Contiene fibra de vidrio, diseñado para incrementar la fuerza de tensión del cemento una vez que se ha fraguado sin que exista una significativa disminución de la fuerza compresiva.

Ventajas

Ayuda a prevenir las posibles fallas en el cemento debido a la tensión a la que se encuentra expuesto el cemento durante su vida, también previene la pérdida de fluido por circulación.

Desventaja

Las fibras del aditivo Well Life 734™ son quebradizas y requieren consideraciones especiales en laboratorio ya que las fibras de este aditivo no pueden ser mezcladas en seco mientras se prepara la lechada para las pruebas mediante el método API.

Rango de temperatura

Puede ser utilizado a temperaturas que estén por encima de los 600°F.

Concentración

Se usa en concentraciones de 0.5 a 2% BWOC, dependiendo de las propiedades finales deseadas.

Figura 2.14 Aditivo Well Life 734™



Fuente: Documento técnico Halliburton, Aditivos

2.4.1.2.3 *Well Life 809™*

Es un elastómero diseñado para ayudar a proveer elasticidad al cemento, es muy parecido al Well Life 665™ ya que también permite disminuir el módulo de Young y aumentar la relación de Poisson.

Es un material de partículas sólidas que es usualmente mezclado en seco.

Ventajas

Incrementa la elasticidad del cemento, esto permite que le cemento resista de una mejor manera los esfuerzos y cargas cíclicas de un pozo.

De igual manera que el aditivo Well Life 665™; permite controlar las pérdidas de fluido por circulación al combinarlo con otros aditivos de similar tecnología.

Desventajas

Puede requerir técnicas especiales de laboratorio para el diseño de la lechada.

Las partículas de este aditivo tienen la tendencia de separarse o flotar a la parte superior de la lechada cuando se encuentra a elevadas temperaturas.

Las lechadas que lo contienen son más viscosas a temperatura ambiente ya que incrementa la relación sólido – líquido, por lo que es necesario incrementar la concentración de un dispersante y esto podría causar inestabilidad en la lechada.

Rango de temperatura

Puede ser utilizado a temperaturas mayores a 500°F.

Concentración

Es normalmente usado en concentraciones de 5 a 12 % BWOC, puede ser usado en altas concentraciones si es necesario siempre y cuando la lechada se mantenga estable y bombeable.

2.4.1.2.4 Well Life 684™

Muy parecido al aditivo Well Life 734™, ya que de igual manera es una fibra de vidrio diseñado para incrementar la fuerza de tensión del cemento una vez que se ha fraguado sin que exista una significativa disminución de la fuerza compresiva. Posee las mismas especificaciones, ventajas y desventajas que el Well Life 734™ con la diferencia de que puede ser utilizado a temperaturas mayores de 650 °F sin que pierda su estabilidad.

2.4.1.2.5 EZ-FLO™

Mejora la habilidad de brindar fluidez a materiales pesados. Las partículas de cemento tratadas con EZ FLO™ son separadas más fácilmente. Consecuentemente, puede reducirse la turbulencia de la lechada, resultando en un flujo de cemento parejo y mejor control de densidad.

Aplicaciones

Las cargas positivas y negativas son distribuidas a través de las superficies de las partículas de cemento, resultando fuerzas de atracción y repulsión. Estas fuerzas son las responsables en mayor parte de la habilidad del cemento de mezclarse o la inhabilidad para fluir bien en un sistema de transferencia neumática.

Para algunas lechadas de cemento que han mostrado históricamente pérdidas de materiales entre el 30% y 60%, el EZ-FLO™ ha podido reducir las pérdidas a menos del 10%.

Compatibilidad

Las concentración del tratamiento con el aditivo EZ-FLO™ son normalmente muy pequeñas, Así los materiales deben ser medidos cuidadosamente y mezcladas

completamente; debido a las reacciones químicas que ocurren entre el EZ-FLO™ y el cemento.

Ventajas

Puede mejorar en gran medida la transferencia de materiales pesados, reducir la turbulencia. Éste puede mejorar el flujo, mediante la reducción del efecto de los factores medioambientales (temperatura, humedad), y las condiciones de transferencia (sistema de presión)

2.4.1.2.6 MICROMAX™

El aditivo MICROMAX™ está elaborado en base a sedimentos minerales, y tiene un tamaño promedio de partícula de 5 micrones. Es usado para incrementar la densidad de la lechada.

Temperatura

El MICROMAX™ puede ser usado a temperaturas de fondo circulante entre 80°F y 500°F.

Concentración

La concentración del aditivo MICROMAX™ depende de los requerimientos de la densidad de las lechadas para cada pozo.

Características

A causa de la inusual finesa del aditivo MICROMAX™, se requieren altas concentraciones de aditivos retardadores para alcanzar el mismo tiempo de bombeabilidad que brindan otros aditivos densificantes.

Las lechadas que lo contienen pueden requerir la adición de aditivos dispersantes.

Ventajas

En pozos profundos de altas temperaturas y presiones, el aditivo MICROMAX™ ayuda a contrarrestar la presión de formación y mejora el desplazamiento del lodo.

A diferencia de los aditivos densificadores convencionales, el MICROMAX™ puede mantenerse en suspensión cuando es añadido directamente en el agua de mezcla.

2.4.1.2.7 FWCA™

Es un controlador de pérdida de fluido, actúa suspendiendo a los sólidos de la lechada.

Aplicaciones

Se usa para prevenir el asentamiento de sólidos y controlar el agua libre. Puede ser utilizado como agente retardador moderado de las lechadas de cemento, e incrementar su viscosidad.

Temperatura

Efectivo en rangos de temperaturas entre los 180°F y 200°F.

Compatibilidad

Incompatible con aditivos oxidantes fuertes.

Ventajas

Se encuentra disponible como un sólido en polvo, no contiene ingredientes tóxicos o sustancias extremadamente peligrosas.

2.4.1.2.8 Latex 2000

Es un aditivo líquido que mejora propiedades importantes de las lechadas de cemento como son el control a la migración de gas y resistencia a los ácidos.

Ventajas

Provee al cemento excelentes propiedades humectantes, bajas viscosidades e incremento de la elasticidad. Estas propiedades ayudan a incrementar la fuerza de adherencia del cemento al casing y a la formación, permitiendo tener un sello anular más hermético.

Protege las lechadas contra fluidos corrosivos tales como los ácidos, además que al controlar la migración de gas reduce las pérdidas de fluido de la lechada de cemento.

Desventajas

Necesita del complemento de un aditivo estabilizador, también necesita de dispersantes ya que puede presentar altas viscosidades la momento de la mezcla, por lo que se debe tener cuidado de que la lechada no pierda estabilidad.

Rango de temperatura

Utilizado en un amplio rango de condiciones de pozos y temperaturas de circulación que van desde la temperatura ambiente hasta temperaturas de 380°F.

Concentración

Generalmente, de 0.5 a 3.0 galones de Latex 2000 es usado por saco de cemento.

2.4.1.2.9 Stabilizer 434C (Estabilizador de Latex)

Material líquido usado con el Latex 2000 para estabilizarlo en la lechada de cemento. Es un polímero emulsionado, el cuál en presencia de sales como los iones de calcio, tiende a salir de emulsión, perdiendo efectividad contra la migración de gas. Lo que realiza el Stabilizer 434C es prevenir la de-emulsificación del Latex.

2.4.1.2.10 Super CBL

Aditivo expansivo de nueva tecnología, una vez que ha sido mezclado en la lechada libera gas permitiendo que el cemento se expanda. La liberación de gas empieza después de un tiempo de haber sido mezclado.

Ventaja

Permite que el cemento se expanda, de esta manera se puede contra restar el efecto de encogimiento que sufre el cemento al disminuir su volumen cuando empieza la hidratación del cemento.

Desventaja

De acuerdo a la cantidad utilizada puede empezar su reacción tempranamente lo que no permite tener mucho tiempo para realizar la operación de desplazamiento de la lechada de cemento en el pozo.

Rango de temperatura

Normalmente puede ser utilizado hasta temperaturas de 400°F.

2.4.2 LABORATORIO DE CEMENTACIÓN

El laboratorio de cementación es el lugar en donde se diseñan y evalúan las lechadas de cemento y mediante diferentes pruebas verificar que las cantidades a utilizar tanto de agua, cemento y aditivos sean las adecuadas para poder cubrir los requerimientos de un pozo en particular.

Las pruebas realizadas en laboratorio, simulan las condiciones que se tendrán en el pozo (presiones, temperaturas) con el fin de obtener resultados más cercanos a los reales. Para realizar dichas pruebas se debe recopilar la información necesaria para diseñar la lechada de cemento, los procedimientos se detallan en los **Anexos 2.1 y 2.2**

En resumen, los resultados obtenidos en laboratorio son los únicos que nos permiten tener la seguridad de utilizar o no, una determinada lechada en un pozo.

Figura 2.15 Laboratorio de cementación de Halliburton



Fuente: Fotografía tomada por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Las pruebas que se realizan a lechadas convencionales para determinar sus propiedades son desarrolladas de acuerdo con la norma API 10B, estas son:

- Reología
- Tiempo de bombeo
- Pérdida de fluido

- Agua libre
- Fuerza compresiva
- Sedimentación
- Expansión

Estas pruebas se describen detalladamente en el **Anexo 2.3**

2.4.2.1 Diseño y evaluación de nuevas lechadas Well Life con propiedades mecánicas modificadas

Las lechadas de cemento Well Life son diseñadas considerando esfuerzos debidos a las operaciones en los pozos y básicamente describiendo el desarrollo seguro de las operaciones para reducir fallas por fatiga.

2.4.2.1.1 Propósito

Diseñar dos lechadas de cemento usualmente bombeadas (16 y 16.50 lbs/gal) y rediseñar dos nuevas lechadas Well Life, para determinar las propiedades físicas y químicas como son: Tiempo de fraguado, Pérdida de filtrado, Static gel strength, etc., además para cemento fraguado propiedades mecánicas como: Resistencia a la tensión, Resistencia a la compresión, módulo de Young, Relación de Poisson, Ángulo de fricción y cohesión.

2.4.2.1.2 Discusión

Cuatro diseños de lechadas se presentan en las tablas 2.1 a 2.4. Las lechadas de 16 lb/gal *HalCem cement* y 16.50 lb/gal *ElastiCem cement* son lechadas convencionales que han sido bombeadas usualmente en los pozos del oriente ecuatoriano. Las otras lechadas de 16 lb/gal y 16.50 lb/gal, ambas *LifeCem cement* son lechadas mejoradas las cuales son diseñadas para soportar los procesos operacionales que pueden jugar un papel crucial en el desempeño del recubrimiento de cemento una vez que el pozo ha sido perforado, completado y durante su vida útil ya sea como pozo productor o inyector. Las fallas mecánicas que se presentan durante el proceso operacional (agrietamiento, despegadura, falla por cizallamiento) fueron mencionadas anteriormente.

Tabla 2.1 Composición del cemento para 16lb/gal HalCem cement

| EC—1602 - 16 lb/gal HalCem™ cement | | | | | | |
|---|-------------------------|-----------------|------------|---------------|--------------|--------------|
| %Label | Material | Amount | Unit | (gram) | Gravity | Activity |
| | Water | 40.95 % | bwc | 245.73 | 0.998 | 0.0 |
| | Class G Dyckerho | 100.00 % | bwc | 600.00 | 3.200 | 100.0 |
| | SCR-100 | 0.30 % | bwc | 1.80 | 1.420 | 100.0 |
| | MicroBond HT | 5.00 % | bwc | 30.00 | 3.570 | 100.0 |
| | Halad 300L | 0.60 | gal/sk | 34.45 | 1.078 | 20.2 |
| | BE-4 | 0.001 | gal/sk | 0.06 | 1.160 | 100.0 |
| | D-AIR 3000L | 0.012 | gal/sk | 0.64 | 1.000 | 100.0 |

Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Tabla 2.2 Composición del cemento para 16.50 lb/gal ElastiCem cement.

| ECLX1655 - 16.50 lb/gal ElastiCem™ cement | | | | | | |
|--|-------------------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| %Label | Material | Amount | Unit | (gram) | Gravity | Activity |
| | Water | 19.83 % | bwc | 158.62 | 0.998 | 0.0 |
| | Class G Dyckerho | 100.00 % | bwc | 800.00 | 3.200 | 100.0 |
| | SCR-100 | 0.15 % | bwc | 1.20 | 1.420 | 100.0 |
| | MicroBond HT | 5.00 % | bwc | 40.00 | 3.570 | 100.0 |
| | WellLife 734 | 0.50 % | bwc | 4.00 | 2.620 | 100.0 |
| | Halad 400L | 0.15 | gal/sk | 11.93 | 1.120 | 22.0 |
| | Stabilizer 434B | 0.20 | gal/sk | 15.06 | 1.060 | 100.0 |
| | LATEX 2000 | 2.00 | gal/sk | 141.48 | 0.996 | 50.0 |
| | Super CBL EXP | 0.05 | gal/sk | 4.32 | 1.216 | 42.0 |
| | BE-4 | 0.001 | gal/sk | 0.08 | 1.160 | 100.0 |
| | D-AIR 3000L | 0.06 | gal/sk | 4.26 | 1.000 | 100.0 |

Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Tabla 2.3 Composición del cemento para 16 lb/gal LifeCem cement.

| ECWL1603 - 16 lb/gal LifeCem™ cement | | | | | | |
|---|-------------------------|-----------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| %Label | Material | Amount | Unit | (gram) | Gravity | Activity |
| | Water | 46.62 % | bwc | 279.75 | 0.998 | 0.0 |
| | Class G Dyckerho | 100.00 % | bwc | 600.0 | 3.200 | 100.0 |
| | SCR-100 | 0.30 % | bwc | 1.8 | 1.420 | 100.0 |
| | Silicalite | 7.00 % | bwc | 42.0 | 2.520 | 100.0 |
| | WellLife 665 | 6.00 % | bwc | 36.0 | 1.000 | 100.0 |
| | WellLife 684 | 1.00 % | bwc | 6.0 | 1.760 | 100.0 |
| | WellLife 734 | 0.50 % | bwc | 3.0 | 2.620 | 100.0 |
| | MICROMAX FF | 12.00 % | bwc | 72.0 | 4.730 | 100.0 |
| | EZ-Flo | 0.10 % | bwc | 0.6 | 1.620 | 100.0 |
| | MicroBond HT | 5.00 % | bwc | 30.00 | 3.570 | 100.0 |
| | FWCA | 0.10 % | bwc | 0.60 | 1.400 | 100.0 |
| | Halad 300L | 0.30 | gal/sk | 17.23 | 1.120 | 22.0 |
| | BE-4 | 0.001 | gal/sk | 0.06 | 1.160 | 100.0 |
| | D-AIR 3000L | 0.05 | gal/sk | 2.66 | 1.000 | 100.0 |

Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Tabla 2.4 Composición del cemento para 16.50 lb/gal LifeCem cement

| ECWL1654 - 16.50 lb/gal LifeCem™ cement | | | | | | |
|--|-------------------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| %Label | Material | Amount | Unit | (gram) | Gravity | Activity |
| | Water | 32.01 % | bwc | 192.01 | 0.998 | 0.0 |
| | Class G Dyckerho | 100.00 % | bwc | 600.0 | 3.200 | 100.0 |
| | SCR-100 | 0.10 % | bwc | 0.60 | 1.420 | 100.0 |
| | CFR-3 | 0.60 % | bwc | 3.60 | 1.280 | 100.0 |
| | Halad 400L | 0.15 | gal/sk | 8.95 | 1.120 | 22.0 |
| | LATEX 2000 | 2.00 | gal/sk | 106.11 | 0.996 | 50.0 |
| | Stabilizer 434B | 0.20 | gal/sk | 11.29 | 1.060 | 100.0 |
| | MICROMAX FF | 38.00 % | bwc | 228.00 | 4.730 | 100.0 |
| | EZ-Flo | 0.15 % | bwc | 0.90 | 1.620 | 100.0 |
| | WellLife 809 | 10.00 % | bwc | 60.0 | 0.960 | 100.0 |
| | WellLife 734 | 0.50 % | bwc | 3.0 | 2.620 | 100.0 |
| | WellLife 684 | 1.50 % | bwc | 9.0 | 1.760 | 100.0 |
| | MicroBond HT | 5.00 % | bwc | 30.0 | 3.570 | 100.0 |
| | Silicalite | 4.00 % | bwc | 24.0 | 2.520 | 100.0 |
| | Super CBL EXP | 0.050 | gal/sk | 3.24 | 1.216 | 42.0 |
| | BE-4 | 0.001 | gal/sk | 0.06 | 1.160 | 100.0 |
| | D-AIR 3000L | 0.05 | gal/sk | 2.66 | 1.000 | 100.0 |

Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

2.4.2.2 Pruebas para obtener las propiedades mecánicas del cemento

La lechada de cemento es mezclada en concordancia a la norma API RP 10B (**Anexo 2.3**). La única excepción ocurre cuando se usan fibras. La integridad de la fibra es susceptible a ser dañada por las cuchillas en el interior del Mixer. Por consiguiente, son añadidas a la lechada una vez que esta ha sido mezclada, con una velocidad de mezcla no mayor que 4000 RPM.

Figura 2.16 Elaboración de la lechada de cemento



Fuente: Fotografías tomada por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

2.4.2.2.1 Ensayo para determinar la resistencia a la compresión

El Ultrasonic Cement Analyzer (UCA) es programado a una presión y temperatura previamente determinada, las cuales alcanzará en el fondo del pozo en condiciones estáticas. El ensayo en el UCA es monitoreado hasta un valor en el cual el cemento ha adquirido una resistencia a la compresión de 500 Psi. Una vez este valor ha sido alcanzado, el cemento se considera que se encuentra cerca a lograr su resistencia final (véase figuras 2.28 y 2.29). Este procedimiento ayuda a garantizar que las muestras han alcanzado condiciones estables similares a las que deberían experimentar en el fondo del pozo.

Figura 2.17 Ultrasonic Cement Analyzer



Fuente: Fotografía tomada por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Simultáneamente a los ensayos en el UCA, las muestras son colocadas en una cámara de curado autoclave, a similares condiciones (usualmente con un límite de presión de 1000 psi) y son fraguadas en un tiempo equivalente al del UCA. Tanto tiempo como sea razonablemente posible es usado para aliviar la presión y temperatura de la cámara de curado. Este es un intento de evitar cualquier deterioro de la muestra que podría ocurrir debido a los cambios en las condiciones de curado. Usualmente, una rampa lineal es usada durante un período de doce horas.

2.4.2.2.2 Ensayos Static Gel Strength (SGS)

El ensayo de Static Gel Strength (SGS) determina las características del desarrollo de fuerzas de gel para un fluido estático bajo condiciones de presión y

temperatura. Los analizadores Mini MACS son empleados para este ensayo. Este equipo mide la resistencia al cizallamiento (esfuerzos de corte) de una lechada de cemento bajo condiciones de presión y temperatura del reservorio mientras el cemento se queda esencialmente estático.

El ensayo es realizado mezclando la lechada y colocándola en el dispositivo especializado para la prueba (Mini MACS). La lechada es entonces agitada a 150 RPM y calentada hasta alcanzar BHCT, y la presión de fondo del pozo, con los mismos parámetros tomados para la prueba de tiempo de fraguado, es sujeto a BHCT mientras el tiempo de bombeo es alcanzado, y entonces este entra en la fase estática. La temperatura entonces se ha incrementado hasta alcanzar BHST en 4 horas tiempo total transcurrido del ensayo. La paleta de agitación es girada a 0.2 grados/min mientras la resistencia al cizallamiento es medida en la paleta. La resistencia al cizallamiento es correlacionada con el SGS (las unidades son $\text{lb}/100\text{ft}^2$) y una grafica del desarrollo de SGS es realizada como función del tiempo (véase figuras 2.30 y 2.31).

Todas las muestras, cuando son removidas de la cámara de curado antes del ensayo son mantenidas en un ambiente húmedo para prevenir que las muestras se sequen y agrieten. Tales ambientes pueden incluir inmersión en un recipiente con agua, o almacenar en gabinetes con humedad controlada. Las muestras preparadas son usadas para determinar las propiedades mecánicas del cemento diseñado.

Zero gel Time (ZGT) y el tiempo de transición pueden ser obtenidos de la carta del SGS, el valor de ZGT refleja la cantidad de tiempo que la lechada puede permanecer estática (después del tiempo de desplazamiento) y todavía transferir casi toda la presión hidrostática de los fluidos anteriores, antes de alcanzar una SGS de $100 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2$, y el tiempo de transición, es definido como la cantidad de tiempo que toma para el SGS cambie de $100 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2$ a $500 \text{ lb}/100 \text{ lb}/\text{ft}^2$. El tiempo de transición es importante porque este refleja la capacidad de la lechada de minimizar los influjos de gas (canalización). Durante este tiempo de transición, la presión hidrostática aplicada por los fluidos anteriores podría ser disminuida y puede permitir el influjo de gas a través del cemento. Cuando el valor del SGS alcanza los $500 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2$, el fluido ya no transfiere toda la presión hidrostática de

los fluidos anteriores, pero tiene suficiente fuerza de gel para bloquear el influjo del gas a través de la lechada de cemento.

2.4.2.2.3 Ensayo de compresión sin confinamiento

Este tipo de ensayos son usados para determinar las características del material como el módulo de Young y la relación de Poisson. El aparato de ensayo tiene un marco fabricado para cargas de 500.000 lb e instrumentados usando extensómetros axiales y radiales.

Una muestra cilíndrica de cemento se carga axialmente para determinar el sistema de falla, figuras 2.20 a 2.22, la deformación axial y lateral se monitorea para encontrar el módulo de Young y la relación de Poisson.

Un gráfico del esfuerzo axial, σ_1 , versus la tensión en confinamiento, σ_3 , figura 2.18, es empleado para determinar el ángulo de fricción y fuerza de cohesión (Envolvente de Mohr). La pendiente del gráfico es definida como μ y la intersección en el eje Y es el valor de C_0 . Usando μ y C_0 en la ecuación 2.2 y 2.3 desarrolladas por Zoback¹, el ángulo de fricción ϕ y el factor de cohesión S_0 pueden ser determinados.

$$\phi = \frac{(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)}{(\sqrt{\mu^2 + 1} - \mu)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$S_0 = \frac{C_0 * (1 - \sin \phi)}{2(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

μ = Pendiente de la gráfica de la resistencia a la compresión Vs. presión de confinamiento

C_0 = Valor de la tensión sin confinamiento, psi.

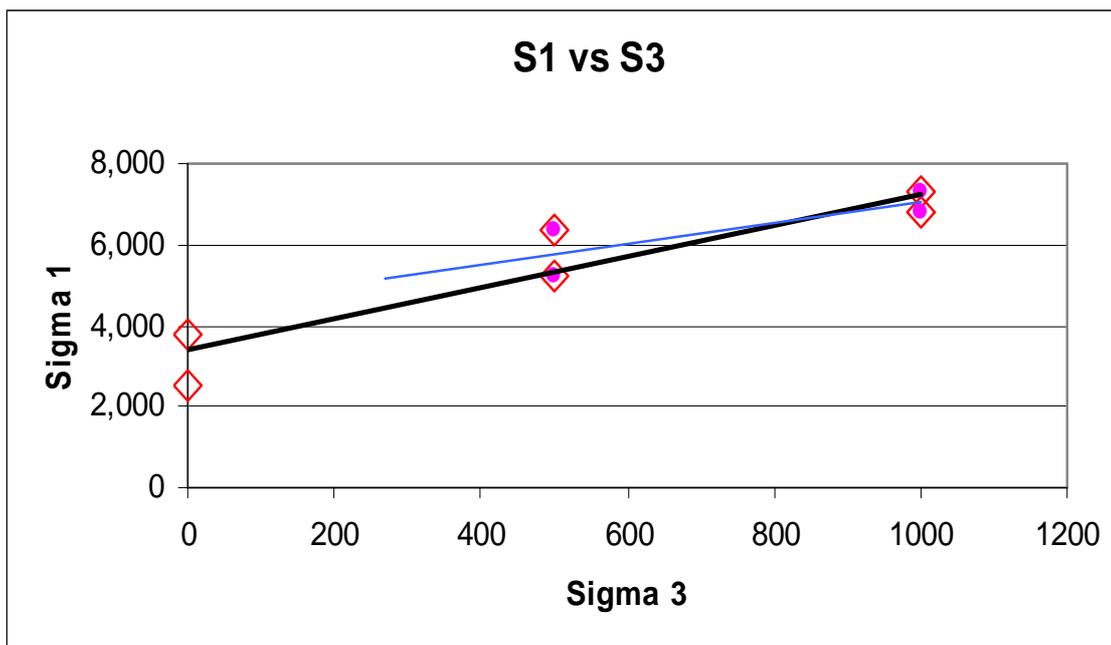
ϕ = Ángulo de fricción

S_0 = Factor de cohesión, psi

¹ <http://pangea.stanford.edu/~jack/GP170/MarkZoback.pdf>

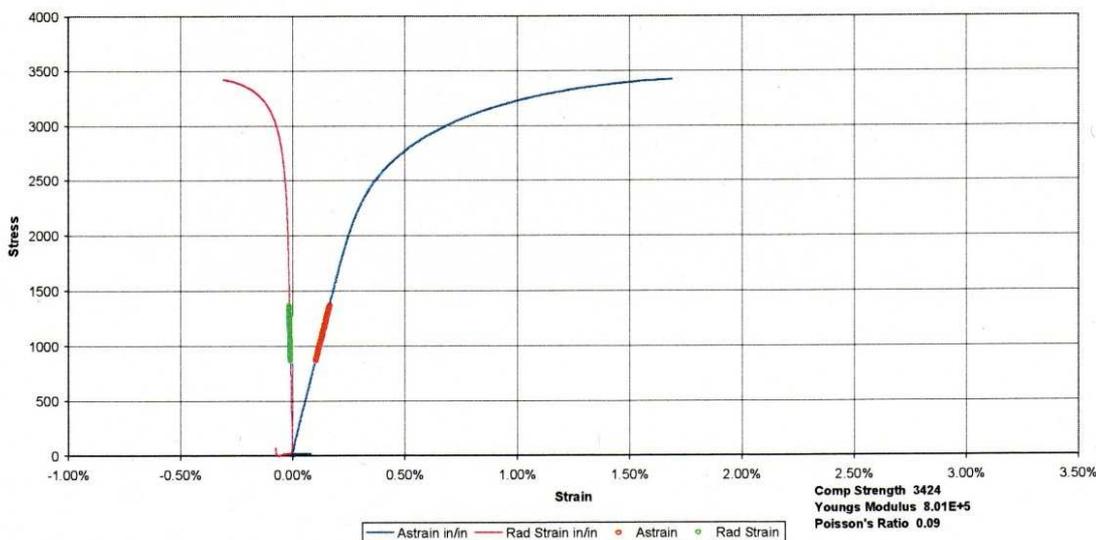
Un promedio de los módulos de la parte lineal de las curvas esfuerzo-deformación, figura 2.19, son usados para obtener estos valores. También, el tamaño de la tensión radial para tensiones axiales es promediado en la misma parte de las curvas de tensión y se calcula la relación de Poisson.

Figura 2.18 Esfuerzo axial versus tensión en confinamiento



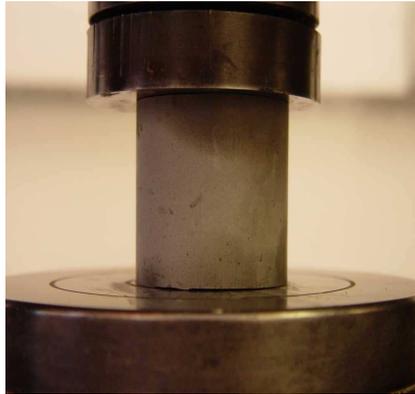
Fuente: Software para ensayos sin confinamiento, Halliburton-Cementing

Figura 2.19 Deformación versus esfuerzo para la muestra N° 4 (confinada a 994 psi)



Fuente: Software para ensayos sin confinamiento, Halliburton-Cementing

Figura 2.20 Ensayo de compresión sin confinamiento antes de la destrucción



Fuente: Fotografía tomada por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Figura 2.21 Ensayo de compresión sin confinamiento después de la destrucción para una lechada convencional



Fuente: Fotografía tomada por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Figura 2.22 Ensayo de compresión sin confinamiento después de la destrucción para una lechada Well Life



Fuente: Fotografía tomada por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

2.4.2.2.4 *Ensayo de compresión bajo confinamiento*

Usualmente usado para la caracterización de fallas por cizallamiento de diferentes materiales. El ensayo en confinamiento se maneja de manera similar al ensayo sin confinamiento, pero con la adición de un fluido hidráulico aplicando una presión de aproximadamente 1000 psi sobre los lados de la muestra, la cual es separado del fluido por una funda de goma, como se muestra en las figuras 2.23 y 2.24. Estos ensayos son corridos en condiciones de vacío.

La presión de confinamiento incrementa el estado de esfuerzo del material, y el esfuerzo neto para fallar es a menudo función de la carga de confinamiento. Promedios estáticos de los ensayos de las muestras a dos presiones de confinamiento y sin confinamiento son usados para calcular la falla de cizallamiento consistente en el factor de cohesión y el ángulo de fricción.

Figura 2.23 Instrumentación instalada en la muestra.



Fuente: Halliburton, Duncan Technology Center

Figura 2.24 Muestra confinada con instrumentación



Fuente: Halliburton, Duncan Technology Center

2.4.2.2.5 Resistencia a la Tensión

La resistencia a la tensión es determinada por el Brazilian Tensile Strength Test donde una carga lineal es aplicada a una muestra cilíndrica de cemento que es cortada perpendicularmente a su eje, en dimensiones de aproximadamente 1" de ancho por 2" de diámetro. La muestra es colocada en reposo, con su eje paralelo a la superficie de reposo, entonces es comprimida hasta que ésta falla, como se muestra en la figura 2.25. La resistencia a la tensión es obtenida de acuerdo a la ecuación 2.4 y los resultados se muestran en la tabla 2.6.

$$\sigma \approx -\frac{2P}{\pi LD} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde,

P= Carga compresiva, lbf

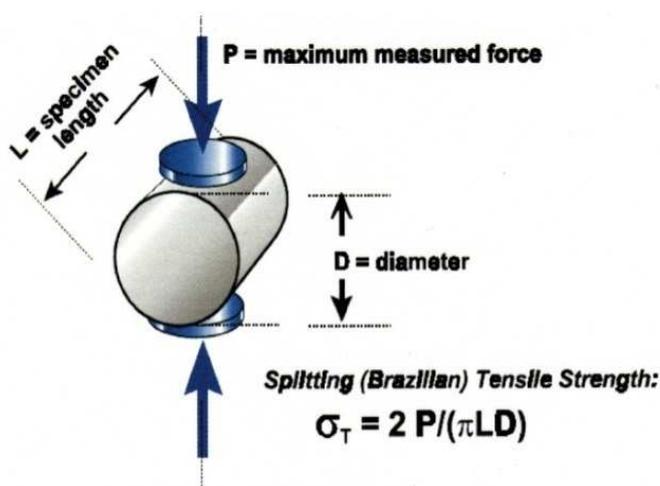
L= Longitud de la muestra, in.

D= Diámetro de la muestra, in.

σ = Resistencia compresiva, psi.

Las propiedades expansivas del cemento fueron ajustadas para no tener efecto de encogimiento; cuidando de no exceder la cantidad de aditivos expansivos requeridos, lo cual podía generar una pérdida de resistencia a la tensión del cemento.

Figura 2.25 Ensayo de resistencia a la tensión



Fuente: Documento técnico Halliburton

2.4.2.3 Resultados

Las lechadas ElastiCem y LifeCem convencionales fueron inicialmente diseñadas para reunir los parámetros básicos que se presentan en la tabla 2.5; estos ensayos fueron realizados usando Cemento Tipo “G” Dyckerhoff y aditivos locales, la BHCT es 172 °F, la BHST al inicio del liner es 189°F y BHCT a TVD es 208°F.

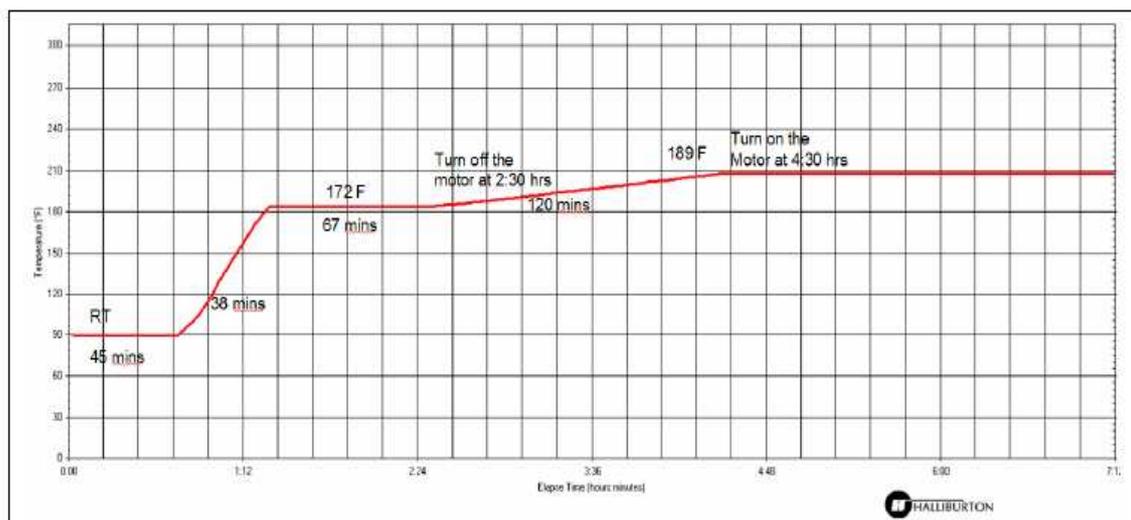
Tabla 2.5 Requerimientos básicos para diseño de lechadas ElastiCem y LifeCem convencionales

| Ensayo | Densidad (lb/gal) | Agua Libre (cc) | Pérdida de filtrado (cc) | Tiempo bombeable (hr:min) | Ensayo destructivo de resistencia a la compresión (psi) |
|----------|-------------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|---|
| EC-1602 | 16.00 | 1 | 50 | 12:10 | 3796 |
| ECWL1603 | 16.00 | 0 | 26 | 08:00 | 3746 |
| ECLX1655 | 16.50 | 0 | 20 | 05:30 | 2129 |
| ECWL1654 | 16.50 | 0 | 22 | 04:20 | 1180 |

Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

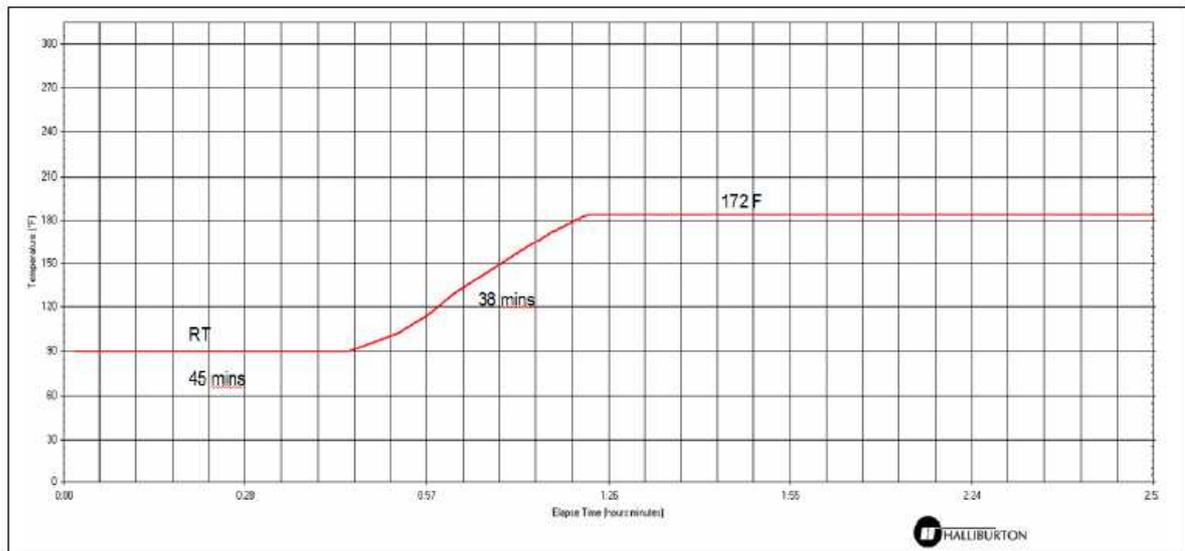
- Se usó dos diferentes rampas de temperatura para obtener el tiempo de fraguado, las cuales son presentadas en las figuras 2.26 y 2.27. Éstas nos permiten evaluar la evolución de la temperatura en función del tiempo transcurrido (Tiempo bombeable).

Figura 2.26 Rampa de temperatura para las lechadas lead EC-1602&ECWL1603



Fuente: Grafica dada por HPHT Software

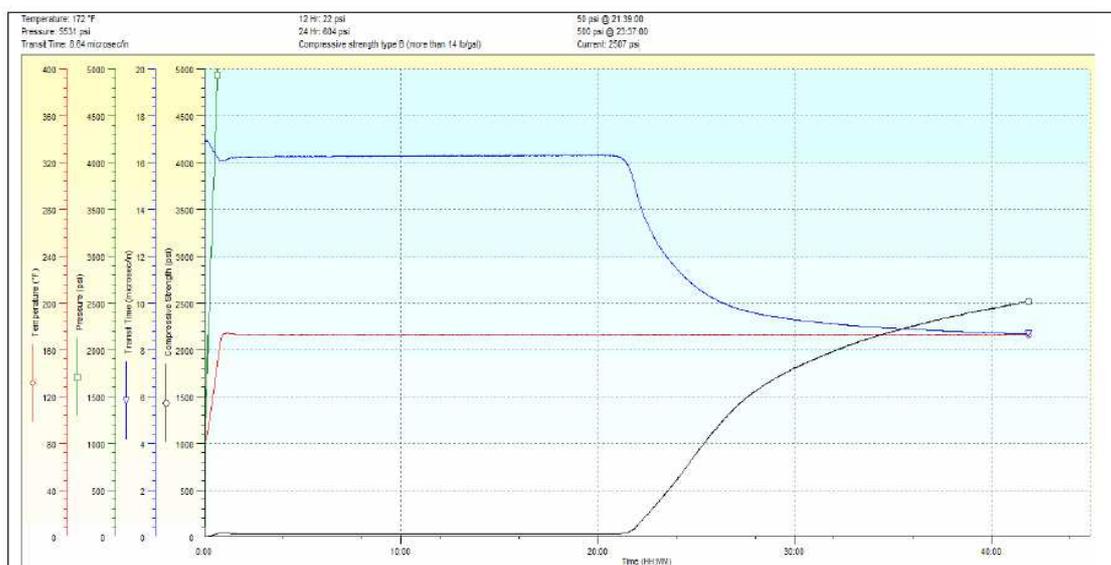
Figura 2.27 Rampa de temperatura para las lechadas tail ECLX1655&ECWL1654



Fuente: Grafica dada por HPHT Software

- Para determinar la resistencia a la compresión se uso una temperatura de 172 °F en lechadas de 16 lb/gal, como el peor escenario y los resultados son presentados en las figuras 2.28 y 2.29. Éstas muestran un incremento de la resistencia a la compresión del cemento a medida que el tiempo de transito de la onda ultrasónica disminuye, además proporciona información de la evolución de la presión y temperatura en la cámara de curado del UCA, garantizando que se asemeje a las condiciones de fondo del pozo.

Figura 2.28 Esfuerzo compresivo para diseño de la lechada lead EC-1602



Fuente: Grafica dada por UCA Software

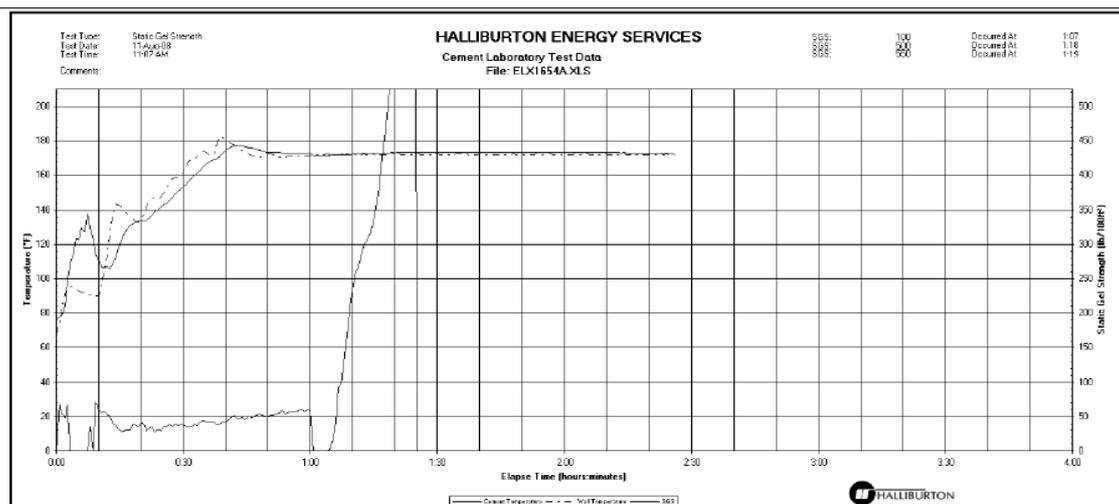
Figura 2.29 Esfuerzo compresivo para diseño de la lechada lead ECWL1603



Fuente: Grafica dada por UCA Software

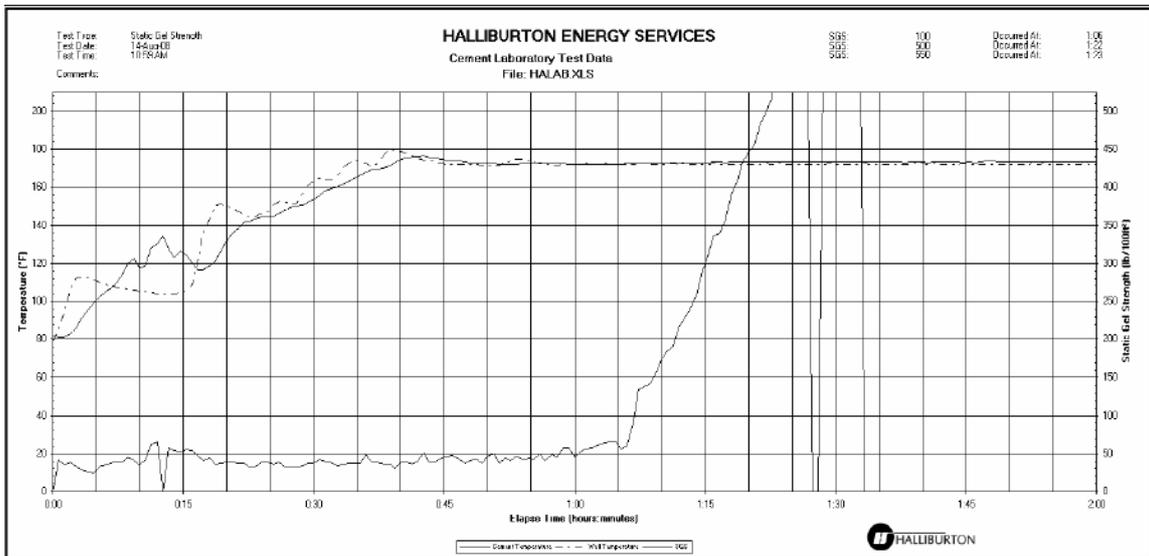
- Los resultados del SGS de las lechadas tail ECLX1655 y ECWL1654 son presentadas en las figuras 2.30 y 2.31. Éstas muestran el desarrollo de la gelificación del cemento en función del tiempo, y así tener un rango de seguridad en el cual se podrá mantener el cemento estático y posteriormente seguir bombeándolo sin inconvenientes. Además nos permite verificar que el cemento adquiriera la temperatura de la formación a medida que es bombeado dentro del pozo.

Figura 2.30 SGS para diseño de la lechada ElastiCem ECLX1655



Fuente: Grafica dada por SGS Software

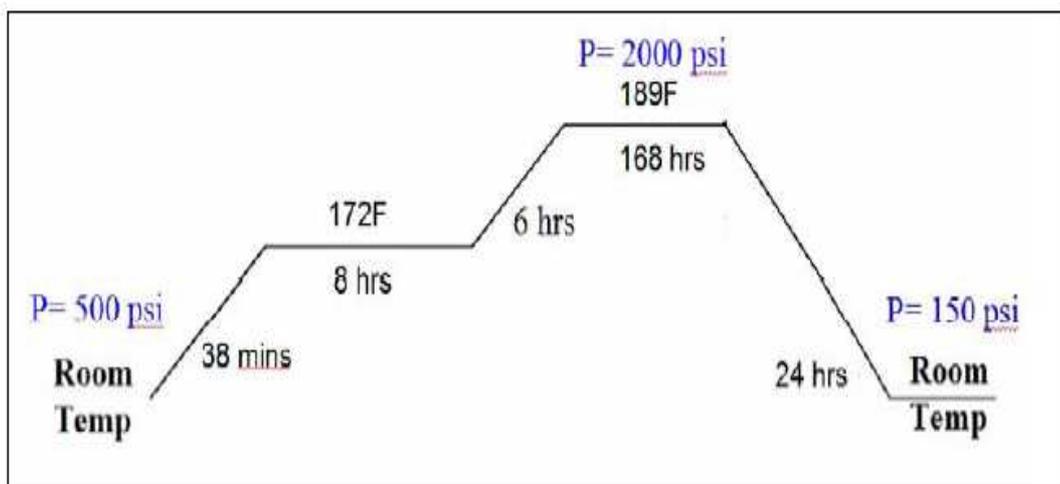
Figura 2.31 SGS para diseño de la lechada LifeCem ECWL1654



Fuente: Grafica dada por SGS Software

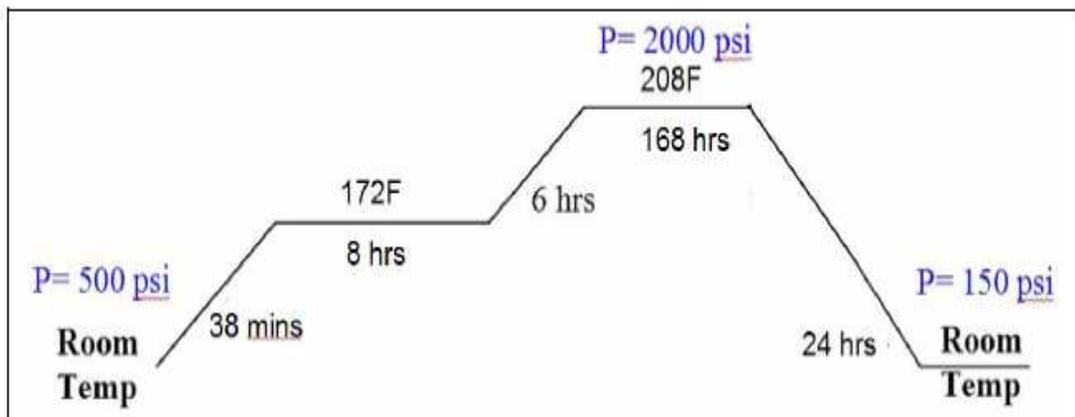
Las propiedades mecánicas fueron tomadas en las muestras descritas en las tablas 2.1 a 2.4, y los resultados se presentan en la tabla 2.6. Las condiciones para el curado del cemento en el autoclave son presentadas en las figuras 2.32 y 2.33, las cuales muestran la evolución de la temperatura y presión en el dispositivo; todos los cilindros fueron presurizados con 2000 psi durante 7 días.

Figura 2.32 Rampa de temperatura para el tiempo de curado de las lechadas de 16 Lb/gal en el autoclave



Fuente: Grafica generada por SGS Software

Figura 2.33 Rampa de temperatura para el tiempo de curado de las lechadas de 16.50 Lb/gal en el autoclave



Fuente: Grafica generada por SGS Software

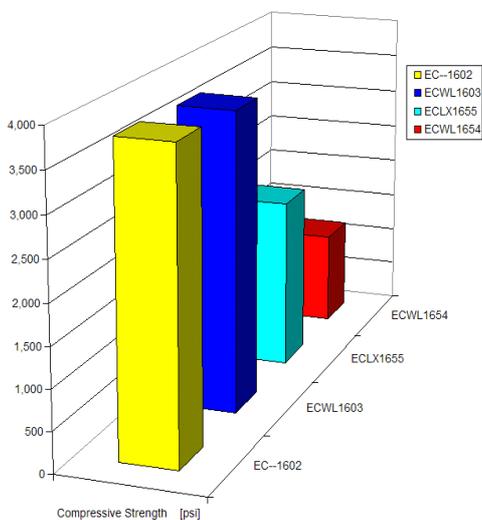
Tabla 2.6 Propiedades Mecánicas (resultados promedios de las pruebas sin confinamiento)

| Ensayo | BHST (F) | Resistencia la compresión | Cohesión* (psi) | Angulo de fricción* (°) | Brazilian Tensile Strength (psi) | Módulo de Young* | Radio de Poisson* |
|----------|----------|---------------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------|
| EC-1602 | 189 | 3796 | 861 | 36.18 | 339 | 1.07E+6 | 0.160 |
| ECWL1603 | 189 | 3746 | 1371 | 18.09 | 427 | 1.00E+6 | 0.187 |
| ECLX1655 | 208 | 2129 | 660 | 27.70 | 205 | 7.05E+5 | 0.182 |
| ECWL1654 | 208 | 1180 | 471 | 19.36 | 176 | 4.96E+5 | 0.175 |

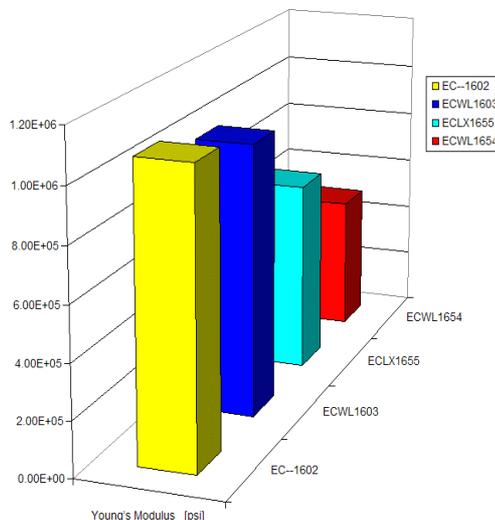
* Resultados promedios para los ensayos sin confinamiento
 Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

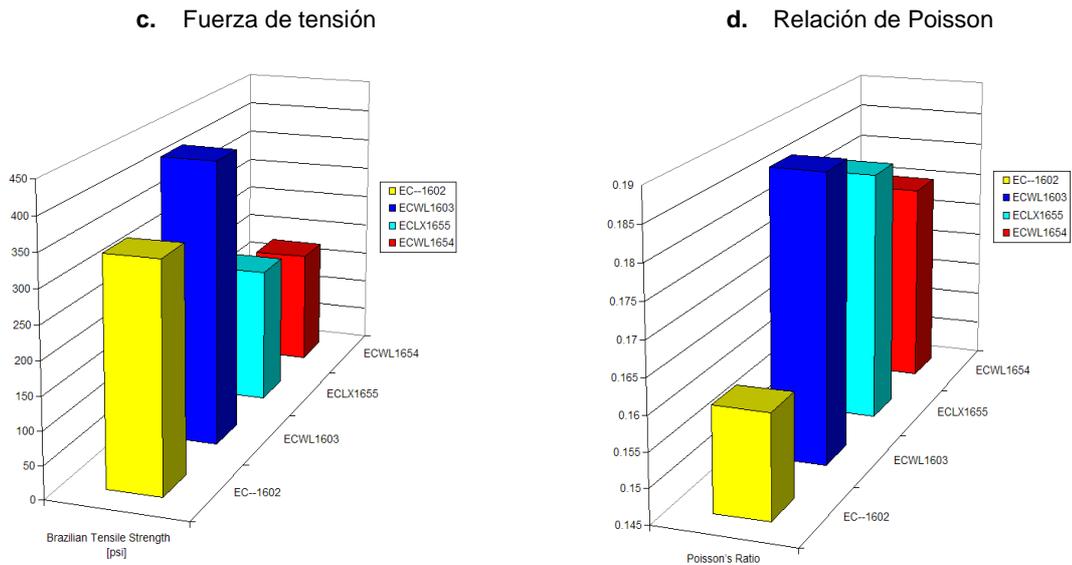
Figura 2.34 (a,b,c,d) Comparación de las propiedades mecánicas entre las distintas lechadas

a. Fuerza compresiva



b. Módulo de Young





Fuente: Software Well Life
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Las curvas reales generadas por cargas tri-axiales para cada muestra son presentadas en los **Anexos 2.4 al 2.7**

2.5 CEMENT ASSURANCE TOOL

El sistema Well Life III™ presenta como último paso la utilización de la herramienta de respaldo CAT, la cual nos permitirá proveer un buen sello entre el casing – cemento- formación para la vida del pozo, en el caso que el cemento falle y se creen canales o agrietamiento.

Emplea como base la tecnología de packers hinchables utilizados en la industria en diferentes aplicaciones.

2.5.1 TECNOLOGÍA HINCHABLE

2.5.1.1 Historia

La tecnología hinchable y más específicamente, la tecnología de packers hinchables fueron desarrollados en Noruega y fue introducida por primera vez en el campo de petróleo pesado “Grane” en Norwegian en el sector del Mar del Norte en el año 2001. A través de extensos y continuos estudios y pruebas, la tecnología hinchable ha sido aplicada en muchos países en un amplio rango de

aplicaciones en diferentes condiciones como en pozos a bajas temperaturas, pozos de crudo pesado a hueco abierto, completaciones inteligentes multilaterales, pozos con altas presiones y temperaturas, etc.

En campos petroleros esta tecnología ha sido adaptada a equipos de fondo para proveer una aislación zonal tanto para pozos entubados como para pozos a hueco abierto. En muchas aplicaciones, esta tecnología puede ser un método alternativo para solucionar muchos de los defectos y dificultades asociadas con el cemento y otros dispositivos de aislación del anular.

Los packers hinchables en la actualidad son globalmente utilizados para eliminar muchos de los problemas que afectan la producción de formaciones productoras cuando una aislación es requerida.

2.5.1.2 Principios de Funcionamiento

Los packers hinchables utilizan un elastómero que posee propiedades de expansión, este elastómero rodea un tubo estándar para proveer el sello necesario en el anular cuando este sea expuesto a hidrocarburos o agua.

El elastómero es básicamente un caucho o una goma con propiedades que le permiten reaccionar cuando se exponen a los fluidos mencionados anteriormente. Dos principios básicos para el mecanismo de hinchamiento son usados y su aplicación depende de las condiciones a las que se les va a exponer a los elastómeros.

Packers diseñados para hincharse con agua utilizan el *proceso de ósmosis* como principio de hinchamiento; sin embargo, la mayoría de packers hinchables corridos hasta la fecha han usado hidrocarburos líquidos, los cuales se desarrollan bajo el *principio de absorción termodinámica* para el proceso de hinchamiento.

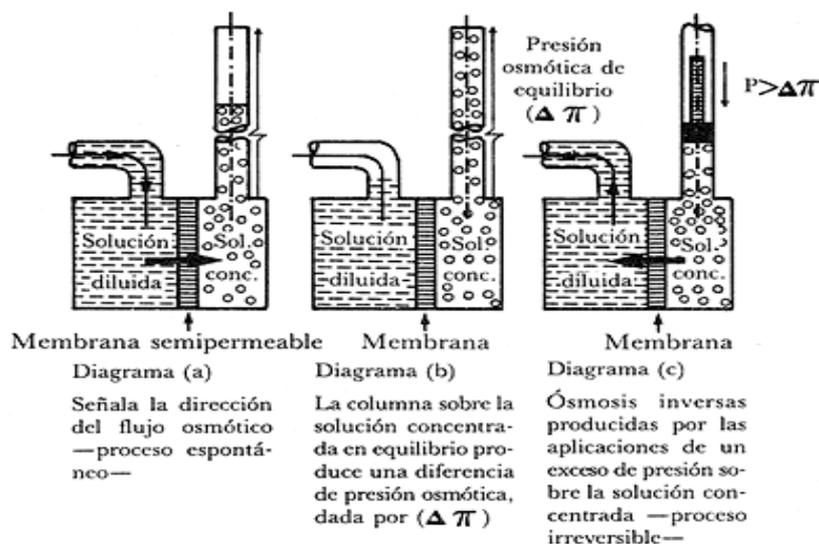
Este método resulta en un estable y predecible mecanismo de aislación, ya que una vez hinchado con hidrocarburo líquido, la envoltura operativa del packer no cambiará a pesar de que cambie su medio circundante.

2.5.1.2.1 Proceso de Ósmosis.

El fenómeno de ósmosis normal o directa, representa la respuesta de un sistema discontinuo cuando dos recipientes con solución a diferentes concentraciones se ponen en contacto por medio de una membrana semipermeable.

El flujo osmótico se origina del recipiente de solución diluida al recipiente de solución concentrada (diagrama a, figura 2.35). Es un proceso espontáneo para llevar el sistema a su estado de equilibrio. Ello ocurre cuando el flujo osmótico eleva una columna de líquido sobre la solución concentrada, cuyo peso produce la presión osmótica de equilibrio (diagrama b, figura 2.35).

Figura 2.35 Representación del proceso de ósmosis



Fuente: Figura tomada de página de internet (www.wikipedia.com)

Este proceso es irreversible, en vista de que para reintegrar el sistema a su estado inicial es necesario realizar un trabajo mecánico neto. Esta labor mecánica se realiza en la solución concentrada, de tal manera que el flujo del solvente ocurre en dirección opuesta al flujo osmótico original. Para que tal cosa se realice, es obligatorio que la presión aplicada tenga un valor mayor a la diferencia de las presiones osmóticas entre los recipientes (véase el diagrama c, figura 2.35).

2.5.1.2.2 Proceso termodinámico de absorción

La absorción termodinámica es un proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente de ellas

aumentando la *entropía* del sistema conjunto formado por las partículas difundidas o soluto y el medio donde se difunden o disolvente.

La membrana permeable puede permitir el paso de partículas y disolvente siempre a favor del gradiente de concentración, generando un hinchamiento irreversible.

2.5.1.3 Packers hinchables en hidrocarburos.

Elementos hinchables son hechos de varios tipos de gomas que a nivel molecular forman vueltas de hélices estrechas. A través del proceso termodinámico de absorción enunciado anteriormente, las moléculas de hidrocarburo son absorbidas dentro del material y llenan los espacios existentes entre las hélices. Las moléculas de hidrocarburos más grandes causan que la hélice se extienda o se expanda.

El hinchamiento puede causar un incremento de volumen de la goma considerablemente. Típicamente el hinchamiento en crudo es de 300 a 400 % en relación al tamaño del packer, pero en la mayoría de aplicaciones en el fondo del pozo se logra el sellamiento con menos del porcentaje de hinchamiento total mencionado.

En condiciones de gas, el hinchamiento es reducido pero podría, en muchas aplicaciones, ser suficiente para sellar eficientemente, sin embargo el hinchamiento en hidrocarburos líquido es más deseable. El hinchamiento es homogéneo a lo largo de la longitud del packer, el hinchamiento reduce las propiedades mecánicas tales como la dureza, la fuerza de tensión de la goma. Con el decremento de la dureza, la goma se ajusta a la forma irregular del pozo tal como la deformación de la geometría de hueco.

El hinchamiento es un proceso dependiente del tiempo. Las dinámicas son controladas por la viscosidad del fluido, bajas viscosidades resultan en hinchamientos más rápidos. Han existido muchas aplicaciones de estos packers en crudos de alta viscosidad, pero el hinchamiento del packer es generalmente obtenido inyectando diesel o fluidos de baja viscosidad para ayudar acelerar el proceso de hinchamiento antes de que el pozo sea puesto en producción.

Esta práctica también ha sido implementada en pozos inyectoros de agua donde el packer es hinchado con diesel antes de que el pozo este sujeto a la inyección de agua. El proceso de hinchamiento en un packer que se hincha en petróleo no es reversible; es por esto que, este tipo de packer son muy confiables incluso en medios circundantes de agua y gas seco.

También hay que recalcar que la presión de hinchamiento es muy diferente a la presión de sellamiento. La presión de sellamiento es la máxima diferencia de presión estimada por el elemento. La capacidad de sellamiento depende absolutamente del hinchamiento (tamaño del agujero versus la dimensión del packer), antes que del fluido de hinchamiento.

En general estos packers han mostrado una adecuada capacidad de trabajo cuando son sometidos a altas presiones, en la mayoría de los casos los packers han sido probados a una presión de 10000 psi y han sido capaces de hincharse y proveer un buen sello a estas condiciones.

2.5.1.4 Packers hinchables en agua

Como habíamos enunciado anteriormente los packers hinchables en agua están constituidos por una goma que se hincha o expande cuando está expuesto al agua. El agua es absorbida por un polímero impregnado en la estructura molecular de la goma hasta cuando el nivel de salinidad en la goma es próximo al nivel de salinidad del fluido circundante, entonces el proceso termina.

Como el hinchamiento se realiza en un medio confinado o restringido el proceso osmótico se desarrolla al interior de la goma.

La velocidad del hinchamiento depende de la salinidad y de la temperatura, es decir que cuando existe agua fresca o dulce, el hinchamiento es rápido pero a medida que existe un incremento de salinidad la velocidad de hinchamiento disminuye, es por esto que cuando tenemos altas concentraciones de salinidad existe un volumen de hinchamiento reducido, de aquí la explicación de porque los packers hinchables en hidrocarburos son más utilizados que los hinchables en agua.

También existe hinchamiento rápido cuando el packer está expuesto a altas temperaturas.

Estos packers presentan la ventaja de ser estables en presencia del petróleo una vez que se han hinchado en agua.

2.5.1.5 Tipos de packers hinchables de acuerdo a su aplicación

Hoy en día, existen diversos tipos de packers hinchables para diferentes aplicaciones y condiciones ambientales, hay packers en los que el elastómero es conectado directamente en la tubería, y hay otros que son enroscados a la tubería de revestimiento o de producción.

Es importante entender que éstos deben ejercer un sello completo tanto en la base de la tubería sobre la cual es enroscada como en la parte de la superficie del sello anular.

Existen packers hinchables para sistemas de lodos base agua (WBM) o lodos base aceite (OBM). Para la instalación en un sistema OBM, el packer es fabricado normalmente con un diseño de construcción multi-capas para demorar el comienzo del hinchamiento mientras el packer es ubicado dentro del pozo.

Figura 2.36 Packer hinchable



Fuente: Documento de Halliburton presentado en el Offshore Technology Conference en Mayo del 2008

Generalmente, estos packers son fabricados con tres diferentes velocidades de hinchamiento: rápido, lento y una barrera de difusión que es revestida en el exterior lo que permite que el operador tenga el tiempo suficiente para correr la herramienta hasta el fondo del pozo sin tener que preocuparse por un hinchamiento prematuro.

2.5.2 DESCRIPCIÓN DEL CEMENT ASSURANCE TOOL

Frecuentemente los pozos desviados y horizontales tienen mayor exposición al yacimiento que los pozos verticales. La tecnología hinchable del Cement Assurance Tool cuando se la combina con operaciones de cementación primaria, puede brindar aislamiento zonal total a largo plazo, aumentando la vida productiva del pozo y minimizando el potencial de una operación costosa de reparación.

Un recubrimiento incompleto de cemento alrededor del revestidor puede ocurrir cuando la centralización del mismo es menos que óptima, la remoción de los recortes de perforación es incompleta o hay bolsillos de lodo viscoso que permanecen en el pozo. El Cement Assurance Tool está diseñado para hincharse hacia los espacios del espacio anular que estén libres de cemento u otros sólidos para establecer el sello hidráulico necesario. La naturaleza reactiva en el fondo del pozo de la tecnología hinchable complementa al cemento como medio para lograr un aislamiento zonal.

Figura 2.37 Descripción de funcionamiento del Cement Assurance Tool



Fuente: Documento técnico Halliburton H05159S, Cement Assurance Tool

Usando remanentes de lodo, otros líquidos o gases, el Cement Assurance Tool se hinchará hacia cualquier porción del espacio anular adaptándose a cualquier geometría irregular en el revestidor o en el cemento.

Esta herramienta brinda un mecanismo sellante flexible sin intervención que funciona autónomamente cuando hace falta.

2.5.3 INSTALACIÓN

La utilización del Cement Assurance Tool no podría ser más simple. La herramienta se sujeta al revestidor mediante una serie de tornillos de ajuste. Su ensamble de tres piezas, consistentes en dos aros en los extremos y un elemento de goma, puede instalarse en el revestidor en cuestión de minutos. La herramienta se coloca en la sarta del revestidor distribuidos en forma tal que den un mejor resultado. Una vez que la herramienta está sujeta al revestidor, no se requiere ninguna otra manipulación de la misma para que funcione correctamente. El revestidor se baja hasta la profundidad total como de costumbre. No hay bolas que dejar caer, movimiento de sarta, bombeos, ni cambios de presión necesarios para que funcione. No hay partes móviles ni se requiere intervención adicional para obtener todas las ventajas del Cement Assurance Tool.

2.5.4 CARACTERÍSTICAS

- Un metro de longitud del elemento.
- Se instala sobre cualquier tubo base.
- Fabricación robusta.
- Sin partes móviles.
- No requiere especialista para su instalación.
- Sin agujeros en el tubo base.
- Disponibles para lodos a base de agua y de aceite.
- Sin intervención.
- Contribución mínima a la ECD (densidad equivalente de circulación).

Figura 2.38 Cement Assurance Tool

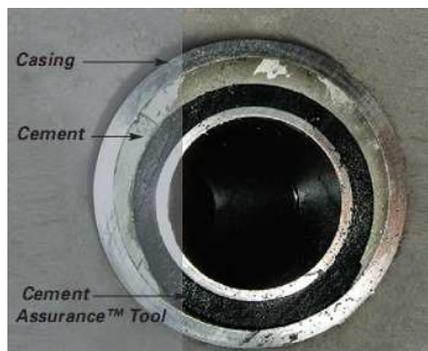


Fuente: Documento técnico Halliburton H05483S, Cement Assurance Tool

2.5.5 VENTAJAS

- Específicamente diseñada para resolver problemas de canalización de lodo
- Disponible para cualquier tamaño de revestidor API (se dispone de tamaños especiales)
- Puede sellar pozos con geometría irregular
- Complementa todos los diseños de lechadas
- Funciona independientemente del tipo de pozo
- Bajo arrastre durante la corrida
- Como ventaja adicional, el Cement Assurance Tool brinda un medio reactivo dentro del pozo para eliminar el microespacio anular que se da cuando el cemento fragua o se desprende del revestidor.

Figura 2.39 Protección del micro espacio anular



Fuente: Documento técnico Halliburton H05158S, Cement Assurance Tool

La herramienta permanecerá inactiva mientras está encajada en el recubrimiento de cemento. Una vez que el microespacio anular se ha abierto y los líquidos o el gas tienden a fluir a través del mismo, el Cement Assurance Tool se hinchará para cerrar el microespacio anular restableciendo el sello hidráulico. El elemento sellante de goma puede adaptarse a casi cualquier geometría irregular en el revestidor o en el cemento.

2.5.6 COLOCACIÓN

EL Cement Assurance Tool es eficaz cuando se coloca en un pozo en el que el distanciamiento de centralización es de 50% ó menos. La colocación típica en el pozo es por encima de zonas con tendencia a generar influjos de líquidos o gas y entre zonas donde pudiera ocurrir un flujo transversal. El Cement Assurance Tool puede colocarse también en sitios estratégicos cerca de fallas, empalmes de multilaterales, viejos orificios de cañoneos u otras porciones del pozo que requieran aislamiento zonal a largo plazo.

CAPITULO III

ANÁLISIS COMPARATIVO DE POZOS CEMENTADOS MEDIANTE EL SISTEMA CONVENCIONAL Y POZOS CEMENTADOS MEDIANTE EL SISTEMA WELL LIFE

IIITM

El objetivo del presentar análisis es determinar los elementos de falla y las modificaciones en las condiciones de diseño actual que permitan mejorar la eficiencia del cemento a largo plazo para lo cual realizaremos un análisis comparativo entre las lechadas convencionales y Well Life utilizadas para cementar liners de producción en pozos del oriente ecuatoriano.

3.1 DATOS PARA EL DISEÑO

El análisis comparativo se lo realizará mediante la utilización del simulador especializado Well Life, el cual nos permitirá obtener valores de capacidad remanente de las lechadas a ser evaluadas.

La información esencial para realizar la simulación proviene de registros eléctricos de propiedades mecánicas de rocas (véase figura 3.2), base de datos del simulador Well Life, y las propiedades mecánicas de las lechadas diseñadas anteriormente.

3.1.1 POZO X - ORIENTE ECUATORIANO

Para el análisis tomamos un caso típico de un pozo del oriente ecuatoriano con características de presión de 5000 Psi y temperaturas mayores a 200 °F, profundidades del orden de los 12000 pies, normalmente terminados con Liner de 7" (véase figura 3.1), areniscas de permeabilidad horizontales del orden de 2000

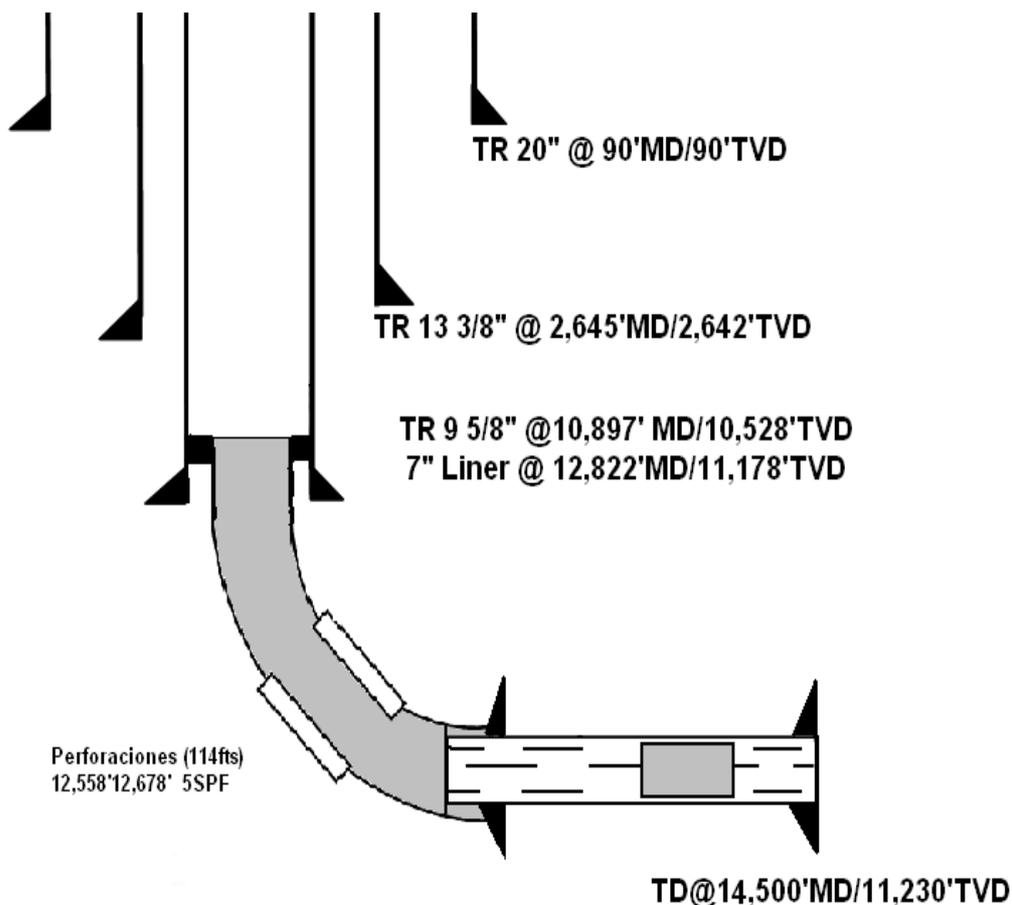
md y verticales de 500 md, los cuales son candidatos a tratamientos de estimulación ácida.

Tabla 3.1 Parámetros para el diseño Well Life III™

| Parámetro | Valor | Unidades |
|------------------------------------|--------|----------|
| Temperatura de superficie | 80 | °F |
| Gradiente de temperatura | 1.4 | °F/ft |
| MD | 14,500 | pies |
| TVD | 11,230 | pies |
| Tamaño del agujero | 8.5 | plg |
| Liner OD | 7 | plg |
| Liner ID | 6,276 | plg |
| Densidad del fluido de perforación | 9.3 | lb/gal |
| Densidad de la lechada de cemento | 16,5 | lb/gal |

Fuente: Halliburton- Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Figura 3.1 Estado mecánico del pozo X



Fuente: Halliburton-Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

3.1.2 PROPIEDADES DE LA FORMACIÓN

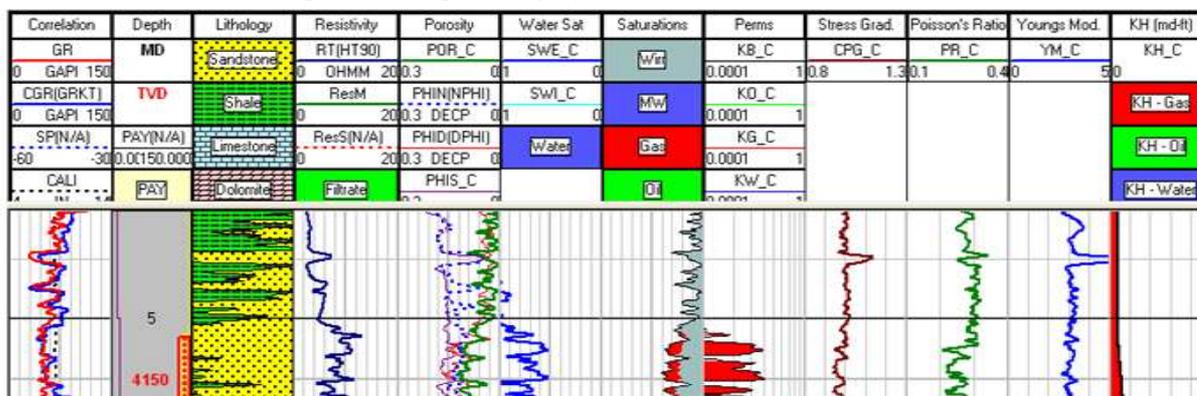
Las propiedades de la formación que serán empleadas para el presente análisis se muestran en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Propiedades de la formación

| PROPIEDADES DE LA FORMACIÓN | |
|--|------------------------------------|
| Litología | Arenisca |
| Módulo de Young | 4.5E+6 |
| Relación de Poisson | 0.15 |
| Calor específico volumétrico | 33.0624 BTU/ft ³ *°F |
| Conductividad térmica | 1.32986 BTU/hr*ft ² *°F |
| Expansión Térmica | 0.00000556 (1/°F) |
| Gradiente de Esfuerzo Vertical | 1 psi/ft |
| Relación Máxima Esfuerzo Horizontal | 1.01 |
| Relación Mínima de Esfuerzo Horizontal | 0.95 |
| Presión de Yacimiento | 5000 psi |

Fuente: Base de datos Software Well Life
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Figura 3.2 Registro de propiedades mecánicas de rocas



Fuente: Halliburton, Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

3.1.3 PROBLEMAS OBSERVADOS EN POZOS DEL ÁREA

Existen evidencias de pozos similares del oriente ecuatoriano que indican pérdida de la integridad o de la adherencia del cemento.

- Registros tomados después de estimulaciones ácidas mostrando canalización detrás de la tubería.
- Trabajos de estimulación inconclusos (pérdida de fluidos excesiva)

- Producción de agua en etapas tempranas en la vida productiva del pozo, aun en casos en los cuales por registros eléctricos no debería haber presencia de agua en las arenas productoras.

En lo referente al ataque químico sobre el cemento, el principal factor es la presencia de H₂S, casos de corrosión en instalaciones de fondo y superficiales han sido documentados para esta área.

3.2 CEMENTACIONES CONVENCIONALES

Normalmente el tipo de lechadas de cemento utilizadas son densidades entre los 16&16.5 lbs/gal utilizando los siguientes aditivos:

- Densificantes
- Aditivos para controlar la migración de gas
- Sílice para impartir estabilidad térmica al cemento
- Dispersantes
- Retardadores
- Antiespumantes
- Aditivos para controlar la pérdida de filtrado

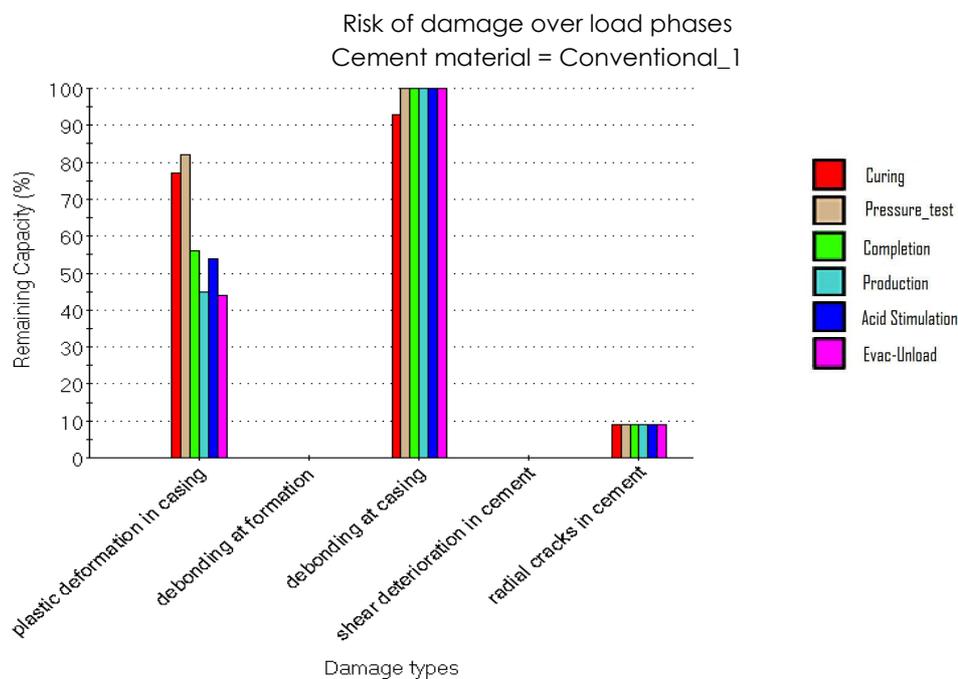
3.2.1 IDENTIFICACIÓN DEL MODO DE FALLA Y CAPACIDAD REMANENTE – CEMENTO CONVENCIONAL

Mientras la adherencia del cemento a la tubería permanece prácticamente intacta y la tubería en sí se encuentra dentro de los parámetros operativos aceptables (figura 3.3), las condiciones no son favorables para los casos de:

- **Pérdida de adherencia en la formación**, presenta falla en el aislamiento, cero capacidad remanente.
- **Deterioro por esfuerzos de corte** (cizallamiento), presenta falla en el aislamiento, cero capacidad remanente.
- **Agrietamiento radial del cemento**, no presenta falla en los eventos analizados, sin embargo su capacidad remanente para resistir esfuerzos

cíclicos es del orden del 10%, factor que necesita ser incrementado para prolongar la vida útil del cemento y minimizar el riesgo de falla.

Figura 3.3 Capacidad remanente - Cemento Convencional



Fuente: Software Well Life, Halliburton
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

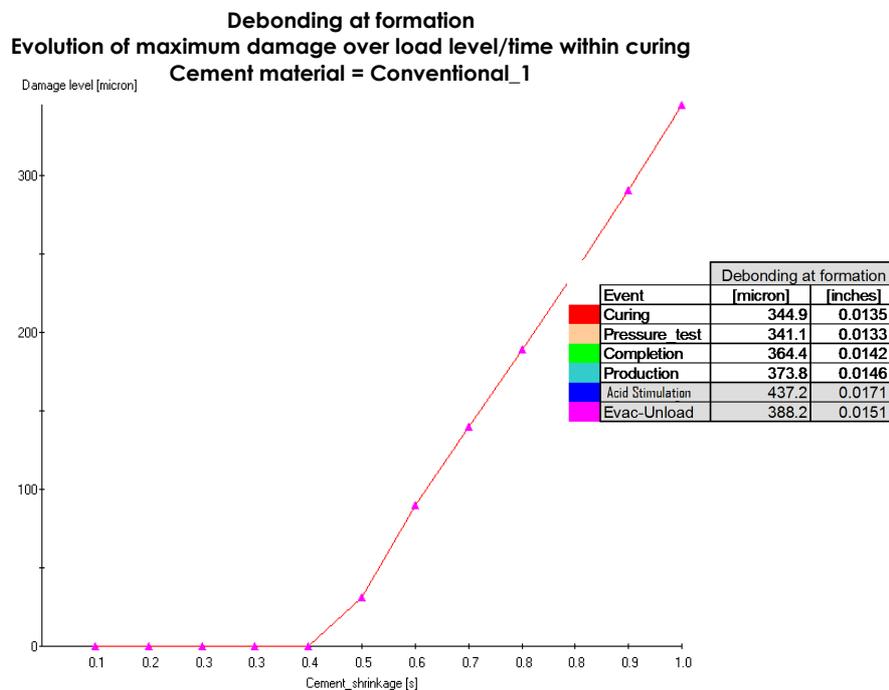
3.2.2 EVALUACIÓN DEL DAÑO POTENCIAL POR PÉRDIDA DE ADHERENCIA A LA FORMACIÓN – CEMENTO CONVENCIONAL.

Las lechadas convencionales analizadas en estos pozos poseen típicamente un esfuerzo a la tensión adecuado en el orden de los 100 a 200 psi para soportar los esfuerzos inducidos, sin embargo el porcentaje de encogimiento que este tipo de lechadas exhibe durante el proceso de hidratación del cemento (que oscila entre 1 y 4%) puede resultar en un estado de pre-esfuerzos adicional en el cemento después de su colocación en el espacio anular, disminuyendo así la resistencia a la tensión del cemento.

Como ya se determinó en la figura 3.3, el cemento tiende a fallar por pérdida de adherencia en la interfaz roca-cemento, en la figura 3.4, se observa la evolución del nivel del daño en micrones, conforme el encogimiento va incrementándose, presentando un resumen tabular de eventos en los cuales el desprendimiento máximo se tiene durante la estimulación ácida con 437 micrones (0.0171 plg) el

cual puede permitir el flujo vertical por ejemplo, de un aproximado de 17 bpd de agua (viscosidad 1cp a máxima caída de presión).

Figura 3.4 Evaluación de la pérdida de adherencia cemento-formación



Fuente: Software Well Life, Halliburton
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

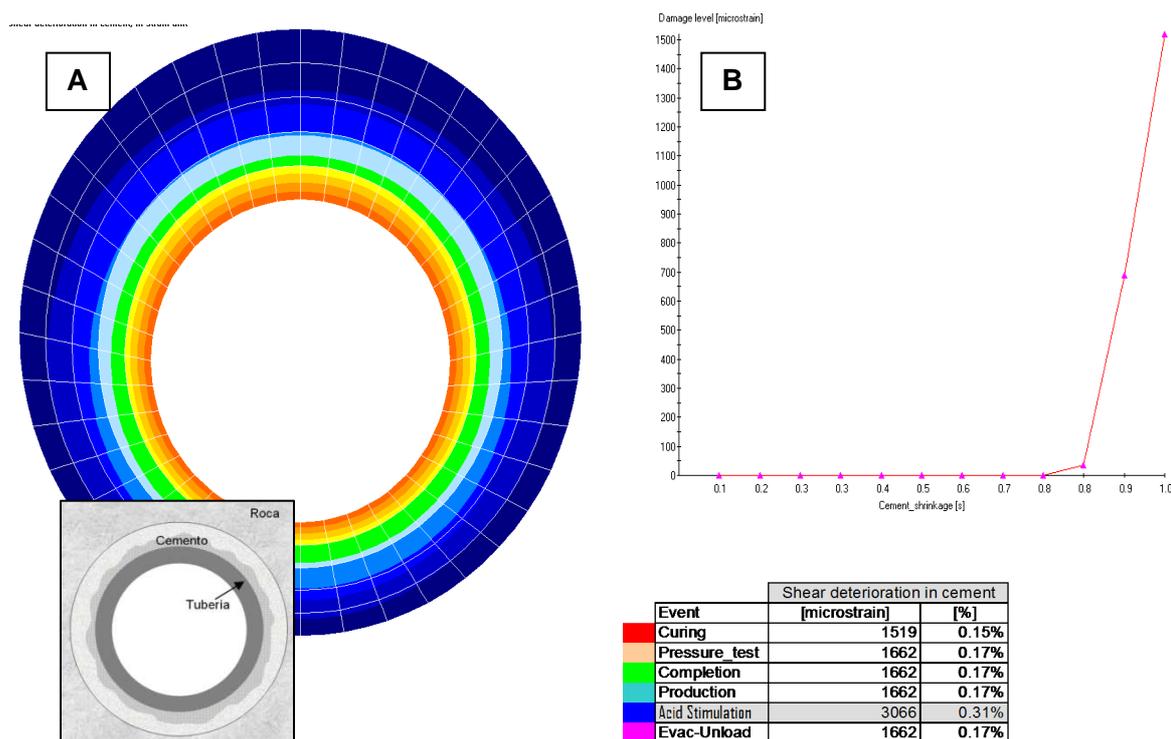
3.2.3 EVALUACIÓN DEL DAÑO POTENCIAL POR ESFUERZO CORTANTE-CEMENTO CONVENCIONAL

Cuando existen daños por esfuerzos cortantes, se presenta una pérdida de cohesión irreversible del cemento durante una carga combinada de esfuerzos compresivos y de corte, en este caso la zona compactada o dañada por corte aparece como micro-agrietamiento, aplastamiento o deslizamiento de capas.

En la figura 3.5 A se presentan los resultados del análisis de malla de elementos finitos mostrando los niveles y ubicación de las zonas dañadas con colores más claros y las zonas con condiciones aceptables en colores oscuros, presentándose en este caso el problema de daño por esfuerzo cortante en la interfaz cemento-tubería.

La evolución de estos valores relacionados con el porcentaje de encogimiento del cemento se observan en la figura 3.5 B, siendo notorio que el caso más crítico se presenta durante la estimulación ácida.

Figura 3.5 Evaluación del deterioro por esfuerzos de corte



Fuente: Software Well Life, Halliburton
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

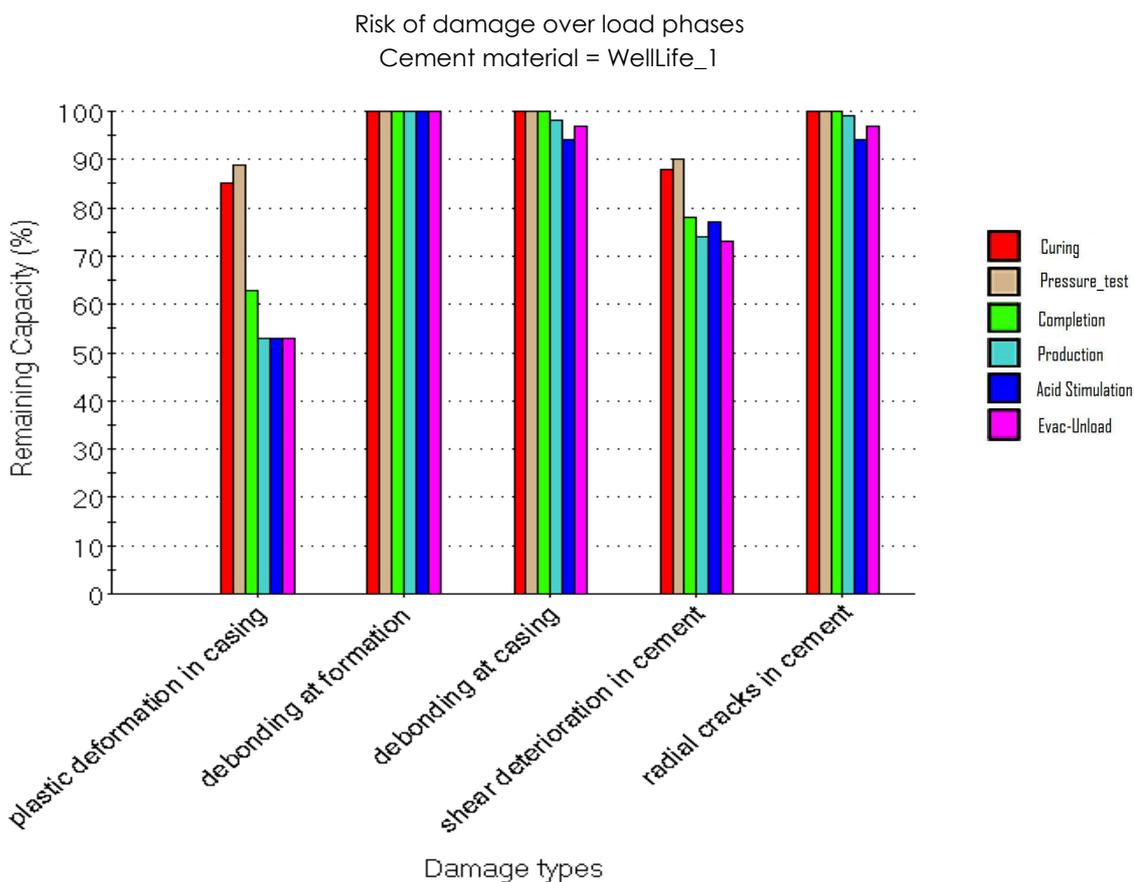
3.3 IDENTIFICACIÓN DEL MODO DE FALLA Y CAPACIDAD REMANENTE – CEMENTO WELL-LIFE

Tomando en cuenta los diferentes modos de falla identificados, se efectúan diferentes interrelaciones optimizando el desempeño del material aislante bajo diferentes cargas y escenarios hasta obtener un 70% de capacidad remanente en el caso más crítico y manteniendo el cemento en su etapa lineal-elástica con 100% de capacidad remanente para varias condiciones de prueba (véase figura 3.6).

El diseño de la lechada ECWL1654 de 16.5 lb/gal LifeCem™, se basó principalmente en mejorar dos factores clave:

1. Cambiar el modo de encogimiento del cemento a expansivo, utilizando aditivos generadores de gas in-situ que trabajan durante el período de hidratación compensando la pérdida volumétrica generada durante el proceso de fraguado en su etapa plástica, así como la inclusión de aditivos que permitan la expansión post-hidratación.
2. Modificar las propiedades mecánicas del cemento mediante la inclusión de aditivos que impartan elasticidad al cemento, bajando su módulo de Young y mejorando su esfuerzo a la tensión y que permitan a la vez mejorar la resistencia a los ataques químicos por H₂S.

Figura 3.6 Capacidad Remanente lechada Well Life

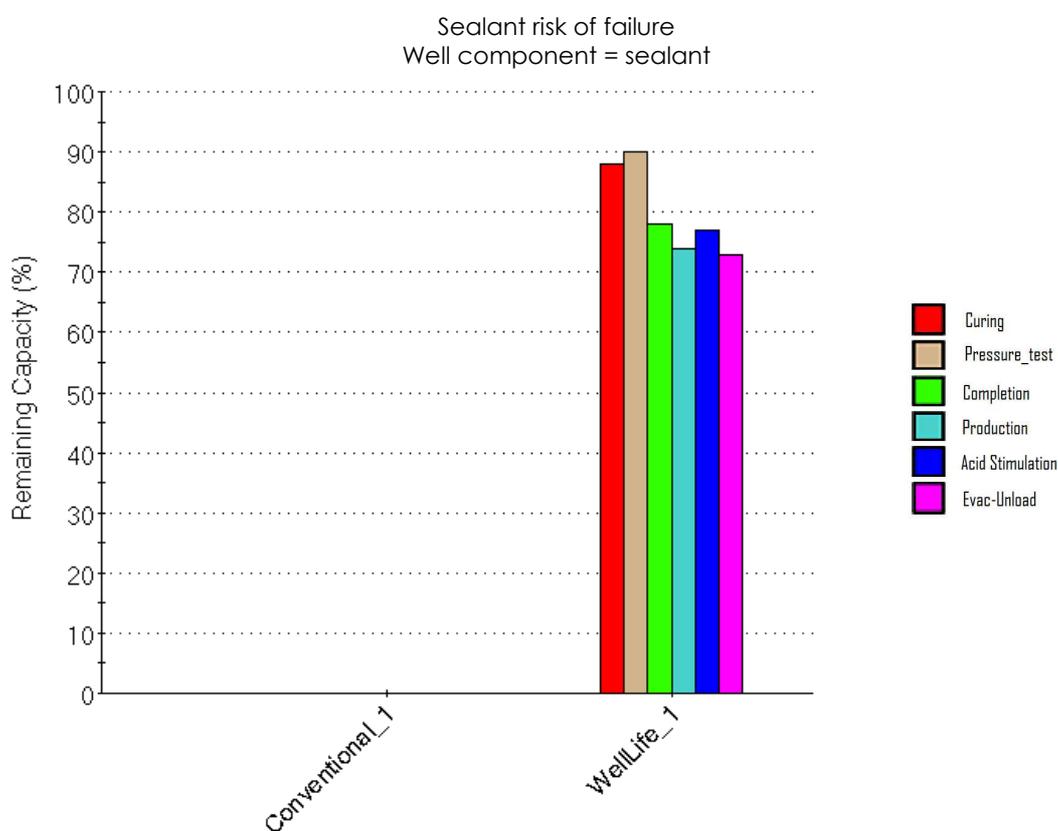


Fuente: Software Well Life, Halliburton
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

3.4 COMPARATIVO DE LAS LECHADAS DISEÑADAS

En la figura 3.7 se presenta un comparativo promedio del desempeño de las dos lechadas de cemento analizadas (Convencional y Rediseñada Well Life) en la cual es evidente el amplio margen de mejora existente con respecto a los diseños actuales y hace latente la necesidad del uso de aditivos no convencionales que permitan mejorar las propiedades del cemento para obtener un aislamiento efectivo en estas tuberías.

Figura 3.7 Capacidad Remanente lechada convencional Vs. Well Life



Fuente: Software Well Life, Halliburton
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

CAPITULO IV

ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO

4.1 INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera siempre se está buscando medios para optimizar los costos, mediante el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías. En cementación la hipótesis es que al tener un sistema más eficiente se alargará la vida útil de un pozo y con esto su producción se incrementará al mismo tiempo que el agua asociada a la producción será minimizada.

Para poder cumplir con las expectativas del presente proyecto se van a considerar dos parámetros económicos importantes como: el tiempo y costo de intervenciones de workover (cementación remedial), el incremento de la producción, el ahorro en días de perforación, completación y el costo de la posible producción y manejo de agua no deseada debido a una mala cementación. Al final se verá un balance general de la economía del sistema Well Life III™.

Para el presente nos basaremos en costos de cementaciones promedio de liners de 7" debido a que estos trabajos son frecuentes en el oriente ecuatoriano, asumiendo como escenario el primer año de vida productiva de un pozo.

Ahora bien, para hablar de costos debemos tener clara las diferencias entre los conceptos costo y gasto, precio y utilidad.

Gasto. *Es el flujo de efectivo que se ve reflejado directamente en caja. En algunos casos se puede igualar al costo; esto es, cuando los servicios utilizados en la intervención son proporcionados por las compañías de servicios. En caso contrario, cuando son por administración, siempre serán menores al costo.*

Costo. Es el flujo de efectivo reflejado en caja, más los gastos contables como depreciación de los equipos, servicios y productos proporcionados por otras entidades, tales como servicio médico, telecomunicaciones, combustibles, lubricantes, etc.

Precio. Es el costo del servicio proporcionado. Se establece de acuerdo con el comportamiento del mercado y engloba los conceptos de gasto, riesgo y utilidad.

Riesgo.- Son aquellos eventos imponderables que pueden o no ser del conocimiento del Diseñador y afectan el estado de resultados de la intervención, por lo deben ser considerados en el costeo del pozo.

El promedio del costo total de la cementación convencional de un liner de 7", para una empresa operadora bordea los 107,000.00 USD, este valor no considera los riesgos (cementación remedial) que se pueden presentar al realizar la operación.

Tabla 4.1 Costos asociados a una cementación convencional de un liner de 7" para una empresa operadora

| DETALLE | VALOR |
|--------------|-------------------|
| Servicios | 42,000.00 |
| Accesorios | 12,000.00 |
| Aditivos | 44,000.00 |
| Cemento | 9,000.00 |
| TOTAL | 107,000.00 |

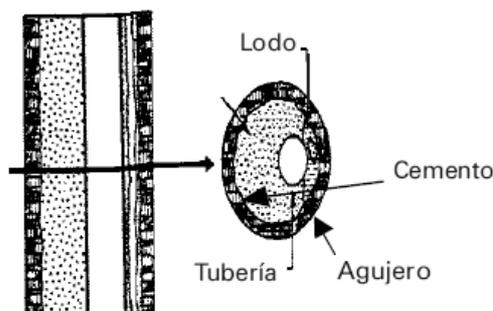
Fuente: Halliburton- Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

4.2 TIEMPO Y COSTO DE INTERVENCIONES DE WORKOVER (CEMENTACIÓN REMEDIAL)

El proceso de cementación primaria ha sido usado por más de 70 años para sellar y soportar las tuberías de revestimiento en un pozo. Desafortunadamente, los resultados no son siempre exitosos, y durante la vida de muchos pozos se han requerido de ciertos trabajos de corrección, éstos son los riesgos que se tienen al realizar una cementación el cuales tienen tiempos y costos asociados. La técnica, comúnmente llamada cementación remedial o forzada, es más difícil y más amplia

en su aplicación que la cementación primaria. Las operaciones de cementación forzada pueden ser desarrolladas durante la perforación o la terminación de un pozo para su reparación o intervención posterior.

Figura 4.1 Canal de flujo a través de la tubería de revestimiento



Fuente: Documento Técnico, Halliburton

La cementación forzada es necesaria por muchas razones, pero probablemente el uso más importante es el de aislar la producción de hidrocarburos de aquellas formaciones que producen otros fluidos. Puede ser descrita como el proceso de forzar la lechada de cemento dentro de los agujeros en la tubería de revestimiento y las cavidades detrás del mismo. Los problemas que soluciona una cementación forzada se relacionan con el objetivo de aislar las zonas productoras.

Para fines de estudio se ha determinado tiempos y costos promedios de una intervención workover los cuales se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Costos asociados a una cementación remedial

| DETALLE | VALOR | DÍAS | TOTAL |
|------------------------|-----------|------|-------------------|
| Taladro de perforación | 30,000.00 | 5* | 150,000.00 |
| Servicios | 45,000.00 | - | 45,000.00 |
| Accesorios | 12,000.00 | - | 12,000.00 |
| Aditivos | 44,000.00 | - | 44,000.00 |
| Cemento | 4,000.00 | - | 4,000.00 |
| Total | | | 255,000.00 |

* Los días dependen de la complejidad del trabajo.

Fuente: Halliburton – Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

4.3 PÉRDIDA EN PRODUCCIÓN

4.3.1 ANÁLISIS DEL AHORRO EN DÍAS DE TALADRO, COMPLETACIÓN

El reducir los tiempos de completación como resultado de una exitosa cementación (eliminación del riesgo de workover), resulta una idea atractiva, y más aun si se observa la perspectiva siguiente:

Datos:

Producción del pozo: 8,000 BFPD

BSW: 5%

Precio barril petróleo: 40 USD

Duración Workover: 5 días

Los 5 días se transforman en 38,000 barriles que se dejará de producir como producción asociada. Con los precios actuales del barril de petróleo, para fines prácticos 40 USD por barril, los 38,000 barriles se traducen en 1'520,000 USD, que en términos económicos representarían un retorno temprano de la inversión.

$$\frac{8,000BF}{\text{día}} \times \frac{5BW}{100BF} = 400 \frac{BW}{\text{día}}$$

$$8,000 \frac{BF}{\text{día}} - 400 \frac{BW}{\text{día}} = 7,600 \frac{BP}{\text{día}}$$

$$7,600 \frac{BP}{\text{día}} \times 5 \text{ días} = 38,000BP \times 40USD = 1'520,000USD$$

4.3.2 COSTO DE PRODUCCIÓN Y MANEJO DE AGUA

Hoy en día, las compañías operadoras producen un promedio de dos a tres barriles de agua por cada barril de petróleo que se extrae de yacimientos agotados. En muchos casos, las tecnologías innovadoras tales como el Sistema de cementación Well Life III™, (utilización del Cement Assurance Tool CAT); pueden resultar en una optimización del tiempo de completamiento del pozo.

Se gastan miles de millones de dólares al año para hacer frente al agua indeseada, estos costos entre otros incluyen:

- La producción, separación, tratamiento químico, el descarte o re-inyección.
- Inversiones en las instalaciones de superficie para el manejo del agua.
- Costos de evitar o tratar: incrustaciones, la corrosión y las bacterias.
- Producción de arena.
- Los esfuerzos de cumplir las reglamentaciones ambientales.

Los valores correspondientes al manejo del tratamiento de agua dependen de la locación; éstos pueden variar significativamente debido a costos de producción, transporte, tratamiento y reinyección (véase tabla 4.3). Para el caso del Oriente Ecuatoriano este valor se encuentra entre los 0.28 USD hasta 1.50 USD, para nuestros fines tomaremos un valor promedio de 0.75 USD por barril de agua producida, valor que será elemento de vital importancia para el desarrollo de nuestro análisis.

Tabla 4.3 Costo del manejo del agua por barril producido

| Lugar | USD/Bls |
|-----------------------------|-------------|
| Lago de Maracaibo Venezuela | 1.00 - 1.90 |
| US Land | 0.75 - 3.00 |
| US Offshore | 1.50 - 4.00 |
| Bahía de Campos (Brasil) | 1.11 |
| Ecuador | 0.28 – 1.50 |

Fuente: Halliburton – Cementing

Con fines de efectuar el presente análisis, y teniendo como escenario la posible producción de agua durante el primer año de vida productiva del pozo en discusión, el cual tiene un corte de agua del 5%, y se espera que al segundo trimestre aumente al 20%, al tercer al 35% y al cuarto al 40%. El porcentaje total del corte de agua se debe a fallas en el sello de cemento, y al agua misma de la formación; los valores se presentan en la tabla 4.4.

$$400 \frac{BW}{\text{día}} \times \frac{90 \text{ días}}{1 \text{ trimestre}} = 36,000 \frac{BW}{\text{trimestre}}$$

$$36,000 \frac{BW}{\text{trimestre}} * 0.75 \frac{USD}{BW} = 27,000 \frac{USD}{\text{trimestre}}$$

Tabla 4.4 Costo del manejo del agua al primer año de vida productiva

| Trimestre | BSW (%) | Barriles de agua producido (bls/trimestre) | Costo del manejo del agua (USD) |
|--------------|---------|--|---------------------------------|
| 1 | 5% | 36,000 | 27,000.00 |
| 2 | 20% | 114,000 | 85,500.00 |
| 3 | 35% | 252,000 | 189,000.00 |
| 4 | 40% | 288,000 | 216,000.00 |
| TOTAL | | | 517,500.00 |

Fuente: Halliburton, Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Tabla 4.5 Pérdidas previstas para la empresa operadora por mala cementación

| Detalle | Valor (USD) |
|------------------------------|---------------------|
| Cementación remedial | 255,000.00 |
| Pérdida en producción | 1'520,000.00 |
| Producción y manejo de agua* | 517,500.00 |
| Total | 2'292,500.00 |

* Al primer año de vida productiva
Fuente: Halliburton – Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

4.4 COSTO DE LA CEMENTACIÓN WELL LIFE III™

En el costo de una cementación mediante el sistema Well Life III™ intervienen valores como el de diseño de la lechada, aditivos, herramientas y equipos empleados y el del servicio de cementación en sí. Estos valores se presentan en forma tabular en la tabla 4.6

Tabla 4.6 Costo de la cementación Well Life III™

| DETALLE | VALOR |
|-----------------------|-------------------|
| Servicios | 42,000.00 |
| Accesorios | 12,000.00 |
| Aditivos | 71,000.00 |
| Cemento | 9,000.00 |
| Cement Assurance Tool | 11,000.00 |
| TOTAL | 145,000.00 |

Fuente: Halliburton – Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Mediante la implementación del CAT, se espera que la producción de agua no deseada debido a fallas en el cemento se minimice, con lo cual se tendrá un corte de agua del 5% al primer trimestre, y se espera que al segundo trimestre aumente al 9%, al tercer al 16% y al cuarto al 22%. Los valores se presentan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Costo del manejo del agua al primer año de vida productiva – Cementación Well Life III™

| Trimestre | BSW (%) | Barriles de agua producido (bls/trimestre) | Costo del manejo del agua (USD) |
|--------------|---------|--|---------------------------------|
| 1 | 5% | 36.000 | 27,000.00 |
| 2 | 9% | 64.800 | 48,600.00 |
| 3 | 16% | 115.200 | 86,400.00 |
| 4 | 22% | 158.400 | 118,800.00 |
| TOTAL | | | 280,800.00 |

Fuente: Halliburton, Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

4.5 BALANCE GENERAL DE LA OPERADORA

Al final del análisis se presenta un balance en el que se muestra claramente que si bien a la empresa operadora le va a costar más el servicio, los números muestran que se suple la inversión realizada en gran forma al efectuar la cementación mediante el sistema Well Life III™.

Tabla 4.8 Beneficio para la empresa operadora por pozo.

| Beneficio para la empresa operadora | |
|---|---------------------|
| Detalle | Valor (USD) |
| Pérdidas previstas | 2'292,500.00 |
| Costo Cementación WellLife III™ | (-)145,000.00 |
| Costo del manejo del agua*- Cementación WellLife III™ | (-)280,800.00 |
| Total | 1'866,700.00 |

* Al primer año de vida productiva

Fuente: Halliburton – Cementing
Elaborado por: Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La implementación exitosa del sistema Well Life III™ radica básicamente en el desarrollo de lechadas de cemento, que en todo el tiempo de su funcionamiento brinde confiabilidad, utilidad y eficiencia.
- La segura y económica producción de hidrocarburos depende de la integridad del sello de cemento la cual es controlada por sus propiedades mecánicas, las propiedades de la formación y los parámetros de operación de un pozo.
- La tecnología Well Life™ logra que el recubrimiento de cemento provea un excelente aislamiento zonal una vez que éste se encuentra confinado en el anular, su integridad y la adhesión formación-cemento y cemento-casing es mantenida.
- Para conseguir que el cemento una vez que se encuentre colocado en el espacio anular de Young y una alta relación de Poisson aunque no siempre es la mejor solución. logre soportar los esfuerzos a los que estará sometido en el pozo, se debe conseguir un bajo módulo
- Si el módulo de Young del cemento es más alto que el de la formación, éste se cuarteará cuando la presión o la temperatura en el interior del casing incrementa.
- Un buen sello de cemento diseñado para mantener su integridad durante la vida del pozo puede reducir el riesgo de que el cemento falle y así lograr la meta de producir hidrocarburos de manera segura y rentable.

- La nueva tecnología de aditivos tales como: WellLife 665™, WellLife 734™, WellLife 809™ y WellLife 684™, muestran un buen rendimiento con todos los tipos de cementos utilizados, sin embargo, minerales como el NaCl no puede ser agregada indiscriminadamente a lechadas donde la expectativa de la expansión es grande ya que puede afectar la estabilidad de dichos aditivos.
- La composición del cemento es un factor importante para la aparición de la deformación plástica bajo condiciones de esfuerzo cíclico, por lo que la introducción de la nueva tecnología Well Life III™ se hace imprescindible para poder alargar la vida del pozo.
- En general, la composición del cemento que le permite a éste comportarse como un sólido lineal elástico tiene una mayor capacidad de resistencia cuando está expuesto a esfuerzos cíclicos.
- La fuerza compresiva de un cemento, el cual es usado tradicionalmente como un indicador cualitativo, no es suficiente para decidir si debería ser colocado para aislar efectivamente un pozo. Otras propiedades mecánicas como el módulo de Young, la relación de Poisson y la fuerza de tensión son también requeridas al momento de elegir el mejor cemento a ser utilizado para aislar un pozo.
- Una herramienta integrada como es el software Well Life puede ayudar a proveer la evaluación más exacta de los acontecimientos en el pozo durante su perforación, completación y producción; y la influencia del sello de cemento a su alrededor. Cuando se combina con un correcto estudio de las propiedades mecánicas del cemento, el estudio Well Life brinda mejores resultados.
- Al garantizar un buen sello como resultado de una cementación exitosa, se reduce el riesgo de cementación remedial con lo cual la producción empieza inmediatamente; con lo cual se tendrá un retorno temprano de la inversión lo que permitirá que se generen dividendos e intereses para la compañía operadora a corto plazo.

- Un estudio de la eficiencia del espaciador nos brinda la oportunidad de obtener la reología requerida del espaciador, combinación del espaciador/pre flujo, volumen y rata de bombeo para obtener una eficiente remoción del lodo de perforación.
- El modelo y equipos de prueba pueden ser modificados para lograr un acercamiento más representativo a las condiciones tanto de fondo del pozo como de superficie.

5.2 RECOMENDACIONES

- Cuando las presiones de cabeza, el equipo superficial y de fondo lo permitan desplazar con agua tratada, salmueras o lodo de la menor densidad posible, esta es una práctica común para agilizar el proceso de terminación del pozo, pero además coadyuva de manera importante a mantener el diámetro de la tubería en un valor mínimo durante el curado del cemento permitiendo el máximo nivel de relajación de esfuerzos de la formación sobre el cemento mejorando la adherencia entre ambos.
- Es importante mencionar que para lograr exitosamente la aplicación de esta tecnología, la ejecución del servicio deberá apegarse a las buenas prácticas de cementaciones para lograr una eficiencia de desplazamiento adecuada.
- Se recomienda el uso de herramientas de evaluación de registros avanzadas al menos durante los primeros trabajos con los diseños optimizados Well Life pues muchos de los materiales que imparten sus propiedades mecánicas al cemento dan una lectura de amplitud mayor a la del cemento convencional, el uso de trazadores radioactivos han sido otro método empleado para evaluar satisfactoriamente aplicaciones similares identificando que las fracturas se mantienen en la zona.
- Se recomienda un estudio de geomecánica aplicado a la cementación para poder complementar de una mejor manera la implementación de la nueva tecnología descrita en la presente tesis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **B.R. REDDY, JOHNNY DENNIS AND BRYAN WAUGH;** “A Method for Studying Pressure Cycling Effects on Cement Integrity in an Annulus”, Documento Técnico Halliburton, Halliburton
2. **B.R. REDDY, YING XU, KRIS RAVI, DENNIS GRAY AND P.D. PATILLO;** “Cement Shrinkage Measurement in Oilwell Cementig – A Comparative Study of Laboratory Methods and Procedures”, Documento Técnico SPE 103610, Halliburton-BP América, 2007
3. **D. L. SUTTON AND D. A. PRATHER;** “New Expansion Additive Gives Good Results With Low C₃A Cements”, Documento Técnico Halliburton, Halliburton.
4. **EDUARDO MIDULFO UETA, JOSÉ AUGUSTO DA SILVA NETO, MAX SAMUEL NUNES, OSCAR BARRIOS AND EDISON BARRETO;** “Swellable Packer Technology Resolves Water Production Problem – Case History in Campos Basin, Brazil”, Documento Técnico Halliburton OTC 19612, Halliburton, 2008.
5. **HALLIBURTON ENERGY INSTITUTE FOR THE HES CEMENTING PRODUCT SERVICE LINE;** “Cementing 1” Halliburton, 2001.
6. **KRIS RAVI;** “Cementing White Paper, Improve The Economics Of Oil And Gas Wells By Reducing The Rick Of Cement Failure” Documento Técnico SPE 74497, Halliburton, 2002.
7. **KRIS RAVI AND JOSE VELA;** “Cement Desing to Optimize Producción in a Highly Active Waterdrive Reservoir”, Documento Técnico SPE 107701, Halliburton-Perenco, 2007.
8. **MARTIN BOSMA, SHELL INTERNATIONAL E&P, AND KRIS RAVI;** “Desing Approach to Sealant Selection for the Life of the Well”, Documento Técnico 56536, Halliburton European Research Center, 1999.

9. **MICHEL MICHAUX, ERIK B. NELSON AND BENOIT VIDICK;** “Chemistry and Characterization of Portland Cement”, Documento Técnico Schlumberger
10. **SPECIFICATION FOR CEMENTS AND MATERIALS FOR WELL CEMENTING**, API Specification 10B, Twenty – Third Edition, April 2002.
11. **WWW.HALLIBURTON.COM (INTERNET)**
12. **WWW.HALWORLD.COM \ CEMENTING WEB (INTERNET)**
13. **WWW.MONOGRAFÍAS.COM**
14. **WWW.ES.WIKIPEDIA.ORG**

ABREVIATURAS

| | |
|-------|---------------------------------------|
| API: | American Petroleum Institute. |
| BAPD: | Barriles de Agua por Día |
| BHCT: | Temperatura de fondo circulante. |
| BHST: | Temperatura de fondo estática |
| Bls: | Barriles |
| BPPD: | Barriles de Petróleo por Día |
| BSW: | Basic Sediments and water |
| BWOC: | Bulk Wait of Cement |
| ECD: | Densidad Equivalente de Circulación |
| LEAD: | Lechada de cemento liviana o de tope. |
| MD: | Measured depth |
| OBM: | Oil Based Mud |
| PCS: | Pies Cúbicos estandar |
| PSI: | Pound per square inch. |
| TAIL: | Lechada de cemento pesada o de fondo. |
| TVD: | Total vertical depth |
| WBM: | Water Based Mud |
| WOC: | Wait of Cement |

ANEXOS

Anexo 1.1 Composición Química Del Cemento Portland (Determinada por Análisis Químico Analítico)

| Componentes Principales | Notación Química | Origen | Proporción (%) | Características |
|--|------------------|------------------------------|----------------|--|
| CaO (cal) | C | Carbonato de calcio (caliza) | 60 - 67 | - Componente principal - Prop. mecánicas aumentan con cantidad de cal - Cal libre, encima de ciertos límites, perjudica estabilidad de volumen |
| SiO ₂ (sílice) | S | Arcillas | 17 - 25 | - Por combinación con la cal resultan los compuestos más importantes del cemento |
| Al ₂ O ₃ (alúmina) | A | Arcillas | 3 - 8 | - Fundente - Acelera fraguado cemento - Reduce resistencia a los sulfatos |
| Fe ₂ O ₃ (óxido de fierro) | F | Arcillas | 0,5 - 6 | - Fundente más energético - Junto con alúmina facilita producción comercial de cemento con alto % de cal sin tener cal libre |
| SO ₃ (sulfatos) | S | Sulfato de calcio (yeso) | ≤ 3 | - Retarda fraguado - En exceso produce sulfoaluminato que perjudica estabilidad de volumen |
| MgO (Magnesia) | | Caliza o arcilla | 0,1 - 4 | - En grandes cantidades actúa como expansivo |
| K ₂ O y Na ₂ O (álcalis) | | Caliza o arcilla | 0,2 - 1,3 | - Fundente - Provee alcalinidad al hormigón - Acelerador fraguado - Reacción alcali-agregado (expansión) |
| TiO ₂ - MnO ₃ -P ₂ O ₅ | | | | |
| Residuo insoluble | | Impurezas yeso | ≤ 0,5 | - Medida adulteración cemento |
| Pérdidas al fuego | | | 2 | - Medida carbonatación e hidratación de cal y magnesio libre por exposición atmosférica |
| H ₂ O | H | | | |

Fuente: Documento Técnico, Halliburton

Anexo 2.1 Procedimiento previo a la elaboración de una lechada de cemento

Para elaborar una lechada de cemento se debe seguir los siguientes pasos:

a. Recibir la solicitud de trabajo

Esta solicitud proviene del departamento de ingeniería, ésta contiene la información del pozo en el cual se va a realizar el trabajo. Como mínimo debe proveer la siguiente información:

- Datos del pozo:
 - ✓ Cliente
 - ✓ Tipo de trabajo
 - ✓ Profundidad
 - ✓ Gradiente temperatura
 - ✓ Gradiente de presión
- Información proporcionada:
 - ✓ Densidad del fluido de perforación
 - ✓ Lechadas requeridas
 - ✓ Tipo de cemento
 - ✓ Programa de trabajo
 - ✓ Formulación sugerida
- Pruebas solicitadas
 - ✓ LEAD
 - ✓ TAIL
 - ✓ Espaciador, lavador

b. Revisar y discutir el diseño

Debe existir un diálogo entre el ingeniero de campo y el supervisor del laboratorio, ya que puede existir la posibilidad de que no se encuentren disponibles el tipo de cemento y los aditivos recomendados en la solicitud de trabajo, de esta manera

se puede llegar a un acuerdo de las composiciones y rangos de uso de los aditivos que van a ser utilizados en la lechada.

c. Cálculo de los parámetros básicos

Se realiza el cálculo de los valores fundamentales como el de presiones inicial y final, temperaturas de fondo circulante (BHCT) y estática (BHST), densidades y tiempos basándose en la norma API RP 10 B.

d. Utilización del software CemLab

Este es un software de propiedad de la compañía HALLIBURTON, aquí se ingresan los datos calculados anteriormente y todos los datos proporcionados por el cliente.

Figura A2.1 Software CemLab



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Luego se ingresa el valor de la densidad que necesitamos que tenga la lechada, el tipo de cemento y los aditivos con los cuales se va a preparar la dicha lechada.

Figura A2.2 Software CemLab, elección de los componentes del cemento



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Una vez realizado esto, el programa se encarga de calcular los porcentajes y pesos de cada uno de los componentes de la lechada en base a un volumen de 600 cc, que es el volumen que recomienda la norma API RP 10B para elaborar una lechada homogénea.

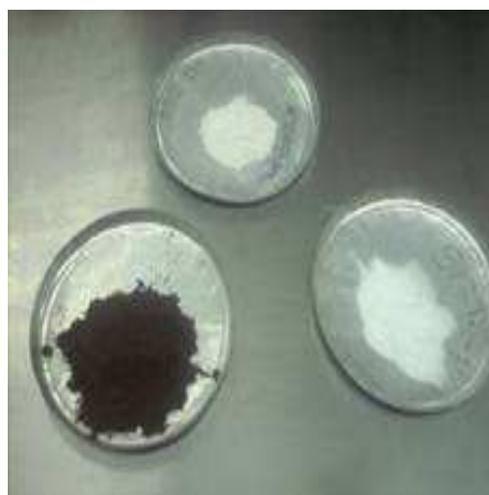
Anexo 2.2: Elaboración de una lechada de cemento según la norma API RP 10 B

Una vez que hemos obtenido los porcentajes y pesos de cada componente de la lechada, procedemos a pesarlos en una balanza digital de peso muerto, es decir se la encera colocando el recipiente en el que va a colocarse los diferentes componentes como son: un envase de cristal para el cemento, un envase de plástico para el agua, pequeños recipientes de aluminio para los aditivos en polvo y jeringas para los aditivos líquidos. (Estos recipientes se los usa por la experiencia de laboratorio y no porque sea alguna norma que hay que cumplir).

Figura A2.3 Balanza digital



Figura A2.4 Recipientes con aditivos pesados



Fuente: Fotografías tomadas por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Una vez que se obtiene el peso exacto de cada componente, se procede a mezclarlos en el Constant Speed Mixer siguiendo los siguientes pasos:

- Adecuar el mixer para operarlo manualmente, colocar el agua en el envase y ponerlo en funcionamiento a bajas revoluciones por minuto (rpm)
- Luego colocar cada uno de los aditivos de manera cuidadosa evitando que exista pérdidas de masa, además se debe colocar los aditivos de manera específica, es decir primero se debe añadir los aditivos viscosificantes, luego los aditivos que causen dispersión y por último los aditivos antiespumantes.

Figura A2.5 Constant Speed Mixer**Figura A2.6** Colocación de aditivos en el mixer

Fuente: Fotografías tomadas por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

- El siguiente paso es parar el mixer y cambiarlo a operación automática, una vez realizado esto se dispone de 15 segundos para añadir el cemento mientras el mixer opera a 4000 ± 200 rpm, luego de este tiempo, la mezcla completa estará sometida a 12000 ± 500 rpm durante 35 segundos. De esta manera se llega a obtener la lechada de cemento lista para someterla a las diferentes pruebas.

Figura A2.7 Obtención de una lechada homogénea

Fuente: Fotografía tomada por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Anexo 2.3: Pruebas y Equipos Utilizados para evaluar una lechada de cemento convencional

REOLOGÍA

La reología estudia el flujo (Viscosidad: Líquidos) y la deformación (Elasticidad: Sólidos) de la materia. Mediante ciertas mediciones sobre un fluido es posible determinar cómo fluirá un fluido bajo diferentes condiciones, como la temperatura y presión.

La determinación de las propiedades reológicas de una lechada de cemento pueden ser sensibles a los procedimientos que están siendo usados. Un procedimiento estandarizado ha sido desarrollado para generar resultados adecuados para la industria petrolera.

Equipo para realizar la prueba

Un viscosímetro de Fann 35, es usado para determinar las propiedades reológicas como la viscosidad plástica (PV) y el punto de cedencia (YP) de las lechadas de cemento.

Figura A2.8 **Viscosímetro de Fann 35**



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Este viscosímetro posee las siguientes características:

- tipo cilindro
- rotacional
- Dos tipos de velocidades, baja y alta.

- La velocidad baja opera a 300, 100 y 3 rpm.
- La velocidad alta opera a 600, 200 y 6 rpm.
- Trabaja a temperatura ambiente, intermedia y de fondo circulante.

Procedimiento para realizar la prueba

- Obtener una lechada homogénea y bien pasada.
- Colocar la lechada en el vaso del viscosímetro hasta el nivel indicado en éste
- Leer los valores de de la siguiente forma: 300 rpm después de 1 minuto y a 200, 100, 6 y 3 rpm cada 10 segundos.
- Por último leer el valor a 3 rpm después de 10 minutos de dejar la lechada en estado estático.
- Repetir este procedimiento a la temperatura intermedia y a la temperatura circulante de fondo.

TIEMPO DE BOMBEABILIDAD

Es el tiempo requerido para que un cemento llegue a ser imbombeable. Estos tiempos son establecidos en respuesta a:

- Resultados de pruebas de laboratorio
- Condiciones actuales del pozo

Hay que recordar que la temperatura tiene un mayor efecto en el tiempo de bombeabilidad que la profundidad.

El tiempo de bombeabilidad es también afectado por condiciones que no siempre son controladas durante las pruebas de laboratorio tales como:

- Invasión de agua
- Pérdida de agua a la formación
- Contaminación

Equipo para realizar la prueba

Para realizar esta prueba utilizamos un consistómetro HPHT (altas presiones – altas temperaturas), el cual nos ayudará a determinar la consistencia que va adquiriendo la lechada a medida que se le somete a las condiciones del pozo. Para conseguir esto, el equipo utiliza un software que simula condiciones de presión y temperatura con el fin de que los resultados sean los más reales posibles. Este equipo posee las siguientes características:

- Permite obtener el tiempo de bombeo de las lechadas
- Esquema de prueba, obtenidos según normas y tablas API
- Velocidad de giro de la paleta o del vaso: 150 rpm
- Unidad de medida: Bc, Bearden Unit
- Máximas: $70Bc/100Bc = 70/100$ poises
- Medios de calentamiento: Agua o Aceite
- Exactitud: $\pm 3Bc$
- Frecuencia de Calibración: 1 vez por mes

Figura A2.9 **Consistómetro HPHT**



Figura A2.10 **Recipientes para la prueba Bombeabilidad**



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Procedimiento para realizar la prueba

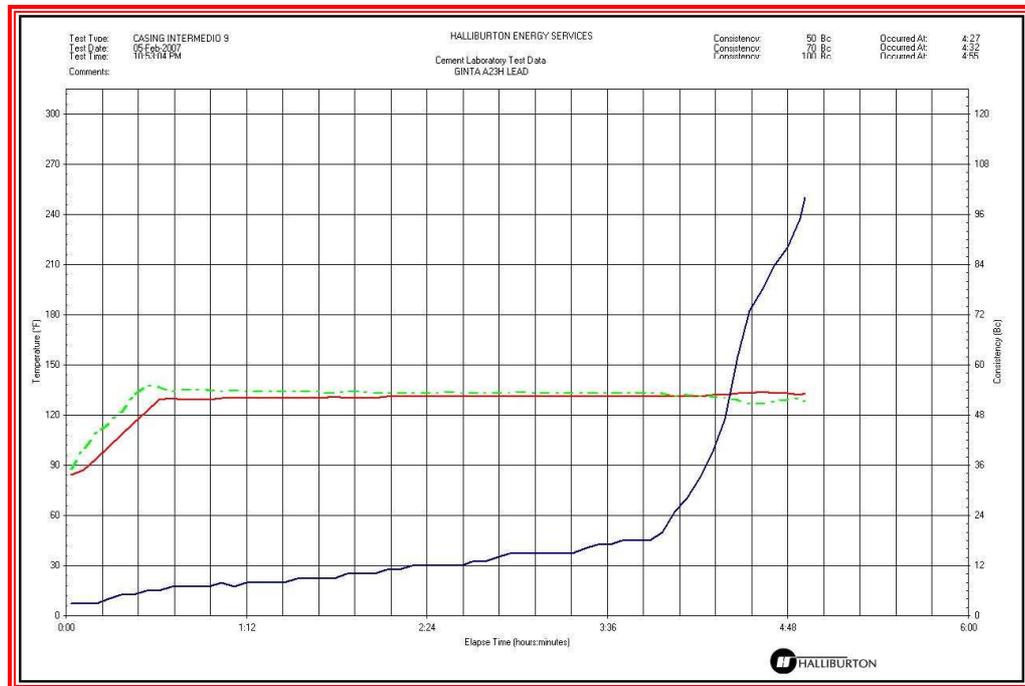
- Obtener una lechada homogénea y bien pasada.
- Colocar la lechada en el recipiente diseñado exclusivamente para este equipo y para esta prueba.
- Colocar el recipiente en el consistómetro asegurando de que no existan fallas al momento de cerrar el mismo.
- Verificar que el potenciómetro este trabajando óptimamente.
- Ingresar los siguientes datos en el software del equipo:
 - ✓ Tiempo de mezclado en superficie.
 - ✓ Temperatura en superficie.
 - ✓ Tiempo para que la lechada alcance el fondo.
 - ✓ Presión en fondo.
 - ✓ Presión inicial
 - ✓ Gradiente de presión hasta la profundidad final:
 - ✓ Temperatura de circulación en fondo.
- Correr la prueba

La prueba finaliza una vez que la lechada alcanza los 70 Bc de consistencia ya que en la práctica, ésta consistencia es imposible seguir bombeando puesto que el cemento está prácticamente fraguado.

Un gráfico en el cual podemos observar el comportamiento de la lechada a medida que va ganando consistencia nos da el tiempo en el que la lechada ha alcanzado estos 70 Bc, y entonces podemos verificar si está dentro del tiempo que se espera, de no ser así se debe repetir la prueba con una nueva formulación

de concentraciones de los componentes utilizados y así poder aumentar o disminuir el tiempo según sean las necesidades requeridas.

Figura A2.11 Comportamiento de la lechada durante la prueba de bombeabilidad



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

FUERZA COMPRESIVA

La fuerza compresiva es la cantidad de fuerza requerida para soportar el peso de la tubería de revestimiento. La fuerza compresiva provee la base regular del tiempo de espera del cemento (WOC). El API recomienda que esta fuerza después de 24 horas de fraguado no debe ser menor de 500 psi.

La prueba para determinar el esfuerzo compresivo, nos indica el tiempo de espera necesario, entre la colocación de una lechada y la siguiente operación a desarrollar en el pozo como seguir perforando o realizar completaciones.

La fuerza compresiva puede ser medida mediante dos métodos:

- Método destructivo
- Método no destructivo

Equipos para realizar la prueba mediante el método destructivo

Para realizar esta prueba utilizamos dos equipos: un auto clave y una prensa hidráulica la que nos permitirá determinar el valor de la fuerza compresiva.

Figura A2.12 Prensa Hidráulica



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

El autoclave posee las siguientes características:

- Utilizado para colocar los cubos de lechada para pruebas destructivas.
- Se presuriza con 1000 Psi, por 24 horas.
- Posee un controlador de Temperatura

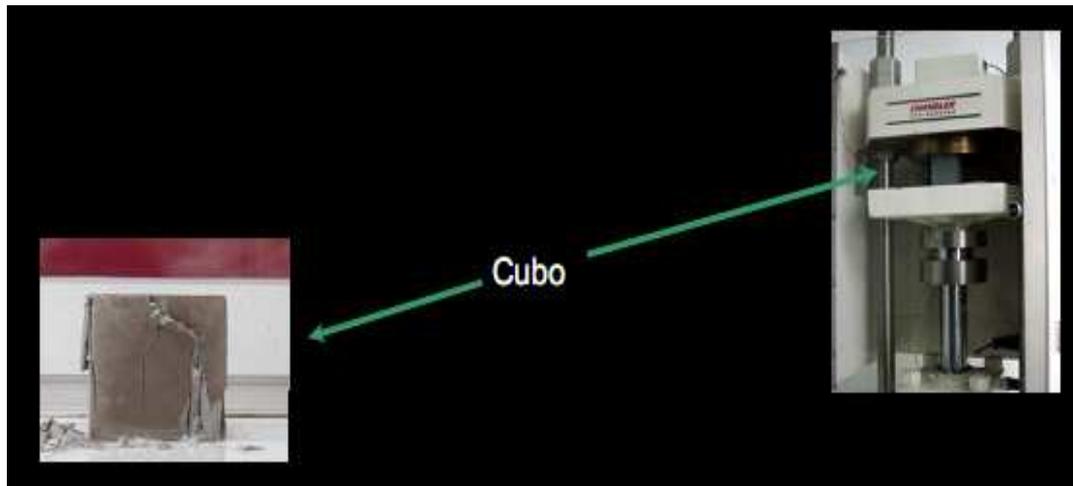
Figura A2.13 Autoclave

Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Procedimiento para realizar la prueba

- Obtener una lechada homogénea y bien pasada.
- Colocar la lechada en los moldes diseñados para esta prueba (cubos de 2 pulgadas por lado).
- La lechada deberá ser agitada convenientemente en los moldes, previo a introducirla en el autoclave, para eliminar el aire entrampado y homogeneizarla adecuadamente.
- Los moldes deben estar totalmente inmersos en el autoclave
- Presurizar y programar la temperatura de acuerdo a los requerimientos de la solicitud de trabajo.
- Dejar durante 24 horas que es el tiempo de ensayo.
- Cuarenta y cinco minutos antes de finalizado el tiempo de ensayo, el cubo fraguado deberá ser enfriado a 27°C ($\pm 3^{\circ}\text{C}$), para luego determinar su resistencia.
- Colocar los cubos de cemento fraguado en la prensa hidráulica y medir la fuerza compresiva como podemos observar en la siguiente figura.

Figura A2.14 Prueba de Fuerza de Compresión mediante método destructivo



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Equipo para realizar la prueba mediante el método no destructivo

Para realizar la prueba de la fuerza compresiva mediante el método no destructivo utilizamos un analizador ultrasónico de cemento (UCA) el cual nos permitirá determinar el tiempo en el que la lechada de cemento fraguada alcanza los 500 psi de resistencia a la compresión que es lo que recomienda el API para poder avanzar en las operaciones de un pozo.

El equipo emite una onda ultrasónica a través de la lechada, por lo que existirá un tiempo de viaje de la onda, la cual se tardará más tiempo en viajar mientras el cemento se encuentra fluido pero a medida que el cemento adquiere consistencia la onda viajará mucho más rápido, los datos son enviados a un software el cual mediante correlaciones emite valores de tiempo en función de la resistencia a la compresión.

Este equipo posee las siguientes características:

- Simula las condiciones del pozo: presiones, temperaturas, tiempos de alcance.
- Mide el tiempo de tránsito del pulso a través de la lechada.
- Calcula la Resistencia a la compresión.
- Emite Ondas ultrasónicas.
- Posee un emisor y Receptor de Ondas.

Figura A2.15 Ultrasonic cement analyzer (UCA)



Fuente: Fotografía tomada por Paúl F. Estrada, Juan Carlos Olivo.

Procedimiento para realizar la prueba

- Obtener una lechada homogénea y bien pasada.
- Colocar la lechada en el recipiente del UCA.
- Programar los datos de presión, temperatura y tiempos de alcance en el equipo.
- Iniciar la prueba.
- Programar en el software los datos del cliente, del pozo, composición de la lechada, su densidad y la correlación adecuada para los cálculos.
- Verificar que la grafica de resultados emitida por el software este corriendo sin problemas.

La prueba se corre durante 24 horas, posteriormente se analiza los resultados y en función de esto se toma las decisiones correspondientes de si el cemento es el adecuado o hay que repetir la prueba con una nueva formulación.

Ventajas y desventajas de la utilización del UCA

Ventajas

- Se determina el setting time o valor inicial de fragüe (50 psi).
- Permite determinar el WOC (500 psi).
- Permite evaluar la evolución de la resistencia a la compresión de la lechada en función del tiempo. El ensayo puede extenderse tanto como uno lo desee.
- La lechada permanece a la temperatura de ensayo sin enfriamiento previo a la determinación.
- Posibilita la determinación de la resistencia a la compresión destruyendo la muestra en la prensa hidráulica, una vez finalizado el ensayo para comparar con el de resistencia con destrucción propiamente dicho.

Desventajas

- No nos provee valores absolutos; pues, los valores son obtenidos por un software diseñado a partir de los ensayos de destrucción (limitados) y depende de cuan cercana se encuentra la lechada en ensayo de la incorporada en el programa.

AGUA LIBRE

La prueba de agua libre determina si un cemento puede tener problemas con la separación de agua de la lechada después de ser desplazado en el interior del pozo. Si la lechada libera agua, podemos tener aéreas canalizadas en el cemento fraguado, agua o cemento blando en la parte superior de la columna de cemento, o asentamiento de sólidos en la columna de cemento.

Equipo para realizar la prueba

Para realizar esta prueba utilizamos un consistómetro atmosférico en cual acondicionamos la lechada a la temperatura circulante, además de esto utilizamos una probeta de 250 ml según los especificado por la norma API.

El consistómetro atmosférico posee las siguientes características:

- Permite acondicionar la lechada según las Normas API
- Posee un controlador de temperatura.

- Temperatura máxima de 180°F
- Opera a 150 RPM

Figura A2.16 Consistómetro atmosférico



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Procedimiento para realizar la prueba

- Obtener una lechada homogénea y bien pasada.
- Colocar la lechada en el envase del consistómetro hasta el nivel indicado por éste.
- Programar la temperatura circulante de fondo para simular las condiciones del pozo.
- Acondicionar durante 20 minutos a esta temperatura.
- Después de este tiempo colocar la lechada en la probeta de 250 ml
- Colocar una envoltura de aluminio sobre la probeta
- Medir el agua libre después de 2 horas.

De la misma manera que en las pruebas anteriores, una vez que tenemos el resultado verificamos si este es el adecuado según las necesidades requeridas caso contrario debemos repetir la prueba con una nueva concentración de aditivos que nos permitan obtener el resultado deseado.

PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO

Una prueba de pérdida de fluido por filtrado determina la relativa efectividad de una lechada de cemento para retener su fase acuosa, o para perder una porción de esta fase como filtrado hacia la formación. Un control insuficiente de pérdida de filtrado da como resultado una lechada deshidratada y puenteada, evitando que esta pueda ser bombeada hasta su posición final; y dejando un exceso de cemento dentro del casing que deberá ser molido durante operaciones de cementación forzada.

Controlar la pérdida de fluido es muy importante ya que puede producir diferentes efectos como:

- Variación en las propiedades de la lechada de cemento predeterminadas (Incremento de la densidad con posibilidades de fracturar la formación y/o modificación del Tiempo de bombeabilidad y la reología).
- Bloqueo en el espacio anular.
- Daño de la formación.

Equipo para realizar la prueba

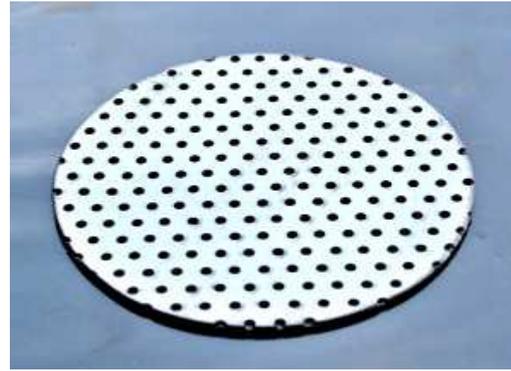
Para realizarla utilizamos una celda para filtrado atmosférica o un celda agitadora para filtrado; éstos equipos se diferencian en que en el atmosférico la lechada debe ser acondicionada a las condiciones del pozo en el potenciómetro atmosférico mientras que el de de celda agitadora se lo hace directamente, los dos equipos permiten que la lechada atraviese un medio filtrante adaptado en la celda de ensayo en un tiempo predeterminado, en general a 30 minutos a la TBHC y a 1000 psi de presión diferencial.

Estos equipos tienen las siguientes características:

- Se presuriza con Nitrógeno
- Opera a la Temperatura Circulante
- Posee un termostato eléctrico
- Posee mallas 325 y 600 micrones (figura A2.18)

Figura A2.17 Celda de filtrado Atmosférico

Figura A2.18 Malla de 325 micrones para filtrado



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Procedimiento para realizar la prueba

- Obtener una lechada homogénea y bien pasada.
- Si utilizamos el equipo atmosférico, acondicionar la lechada en el consistómetro atmosférico hasta alcanzar la temperatura circulante y programar la temperatura circulante en el termostato de la celda.
- Una vez realizado, se coloca la lechada en la celda que ya debe estar a la temperatura circulante.
- Presurizar la celda con 1000 psi.
- Ubicar una probeta debajo de la celda para recoger el fluido que se filtra.
- Correr la prueba.
- Si utilizamos el equipo con agitador, colocar la lechada directamente en la celda y acondicionarla a la temperatura circulante.
- Una vez realizado esto, correr la prueba en estado estático.

Los resultados de la prueba se muestran en cc/30min. Para obtener el resultado final leemos la cantidad de fluido obtenido en la probeta y aplicamos la siguiente fórmula:

$$\text{perdida de fluido} = V_t * \frac{10.954}{\sqrt{t}}$$

Donde:

V_t = la cantidad de fluido recogido en la probeta expresado en mililitros.

t = tiempo en el que se recogió el fluido expresado en minutos.

SEDIMENTACIÓN

Indica la estabilidad de la lechada en condiciones estáticas y el grado de segregación, ya que en el cemento desplazado en el interior del pozo puede existir un asentamiento de las partículas más grandes, lo que no permitirá tener una columna homogénea. Es por eso que se realiza esta prueba, con el fin de asegurar que el cemento tenga las mismas propiedades a lo largo de toda la columna.

Figura A2.19 Cilindro para prueba de sedimentación



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Equipo para realizar la prueba

Para realizar esta prueba utilizamos un cilindro de ocho pulgadas y el autoclave.

Procedimiento para realizar la prueba

- Obtener una lechada homogénea y bien pasada.
- Colocar la lechada en el cilindro.
- Colocar el cilindro en el autoclave y verificar que esté totalmente sumergido.
- Programar las condiciones de temperatura circulante y presurizar a 1000 psi.
- Correr la prueba durante 24 horas.
- Posteriormente sacar el cilindro de cemento fraguado y cortarlo en 3 partes iguales.
- Medir la densidad de cada cilindro por el método más conveniente y verificar las diferencias.

Una variación de densidades de menos de 0.5 lb/gal es un resultado aceptable.

EXPANSIÓN

La prueba de expansión se la realiza únicamente cuando utilizamos aditivos expansivos.

Figura A2.20 Anillos de expansión y micrómetro



Fuente: Slurry Design Course, Halliburton

Equipos para realizar la prueba

Para ejecutar esta prueba necesitamos unos anillos de expansión, un micrómetro y el autoclave.

Procedimiento para realizar la prueba

- Obtener una lechada homogénea y bien pasada.
- Colocar la lechada en los anillos de expansión
- Registrar la separación inicial con el micrómetro.
- Someter al proceso de curado.
- Registrar la separación final con el micrómetro.
- Calcular porcentaje expansión mediante la siguiente fórmula:

$$\%E = (M2 - M1) * 10,95 \text{ [mm]}$$

COMPATIBILIDADES

Ayuda a determinar reacciones adversas entre dos fluidos, evidenciadas en el incremento de la reología. Es muy importante ya que si llega a tener dos fluidos

incompatibles al momento del desplazamiento simplemente la operación fallaría ya que los fluidos de tornan imbombeables.

Un ejemplo de dos fluidos incompatibles es el del cemento con los fluidos de perforación los cuales al ponerse en contacto forma un fluido extremadamente viscoso.

Es por eso que en las buenas prácticas de cementación se recomienda utilizar lavadores y espaciadores para evitar el contacto de los dos fluidos antes mencionados.

Equipos para realizar la prueba

Para realizarla utilizamos el viscosímetro de Fann 35 y el consistómetro atmosférico descritos anteriormente.

Procedimiento para realizar la prueba

- Obtener una lechada homogénea y bien pasada.
- Obtener el espaciador y el lavador a utilizarse correctamente preparados.
- Obtener la muestra del fluido de perforación que se esté utilizando en el pozo.
- Acondicionar los fluidos a la temperatura media y circulante en el consistómetro atmosférico.
- Realizar la mezcla de los siguientes fluidos en proporciones: 25:75, 50:50, 75:25
 - ✓ Lodo – espaciador
 - ✓ Lodo – lavador
 - ✓ Espaciador – cemento
- Tomar la reología de las mezclas a las tres temperaturas (de superficie, media, de fondo circulante)

Una vez obtenidos los resultados realizar el cálculo de las viscosidades plásticas y de los puntos de cedencia y verificar que cumplan con los requerimientos del pozo.

Anexo 2.4 Determinación de las propiedades mecánicas muestra EC-1602 Well Life

| Date Tested | Sample | Confining Pressure Psi | Compressive Strength psi | Young's Modulus | Poisson's Ratio |
|-------------|--------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| 8-14-08 | 1 | 0 | 3,796 | 1.07E+06 | 0.160 |
| 8-15-08 | 2 | 0 | 2,549 | 0.72E+06 | 0.090 |
| 8-22-08 | 3 | 500 | 5,831 | 1.03E+06 | 0.102 |
| 8-22-08 | 4 | 500 | 4,704 | 0.65E+06 | 0.079 |
| 8-22-08 | 5 | 1,000 | 6,288 | 1.02E+06 | 0.084 |
| 8-22-08 | 6 | 1,000 | 5,821 | 1.27E+06 | 0.093 |

| Date Tested | Sample | Tensile Strength psi | Density Lbs/gal |
|-------------|--------|-------------------------|--------------------|
| 8-14-08 | A | 350 | 16.08 |
| 8-14-08 | B | 317 | 16.00 |
| 8-14-08 | C | 325 | 16.02 |
| 8-14-08 | D | 364 | 16.31 |

Average Brazilian Tensile Strength = 339 psi

Density Variation = 1.9 %

Summary

| | #1 | #2 | Average |
|--|----------|--------------|--------------|
| Unconfined Compressive Strength | | | values |
| Co | 3,796 | 2,549 psi | 3,173 psi |
| E | 1.07E+06 | 7.22E+05 psi | 8.94E+05 psi |
| v | 0.160 | 0.090 | 0.125 |

Confined Compressive Strength

| | | | |
|----------|-------|-----------|-----------|
| Compress | 5,831 | 4,704 psi | 5,267 psi |
|----------|-------|-----------|-----------|

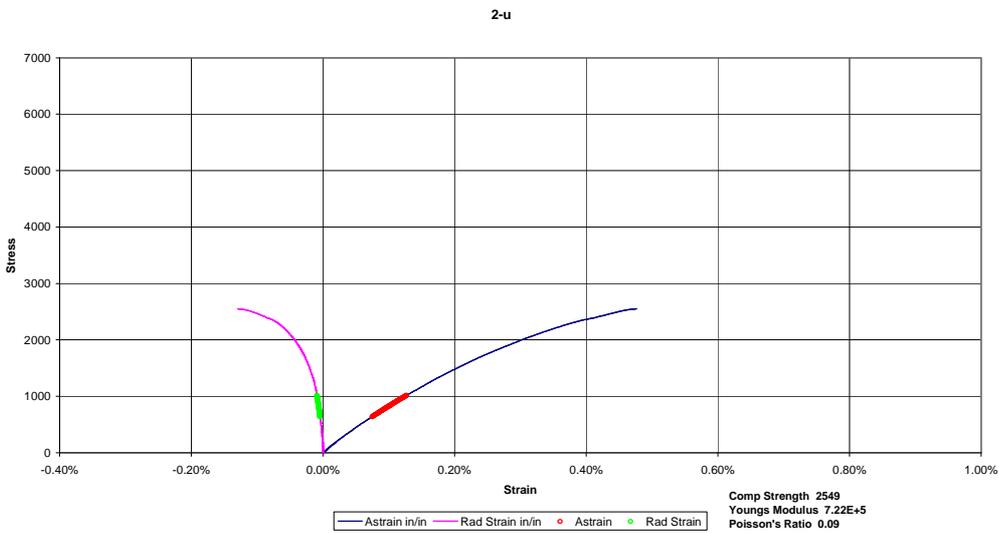
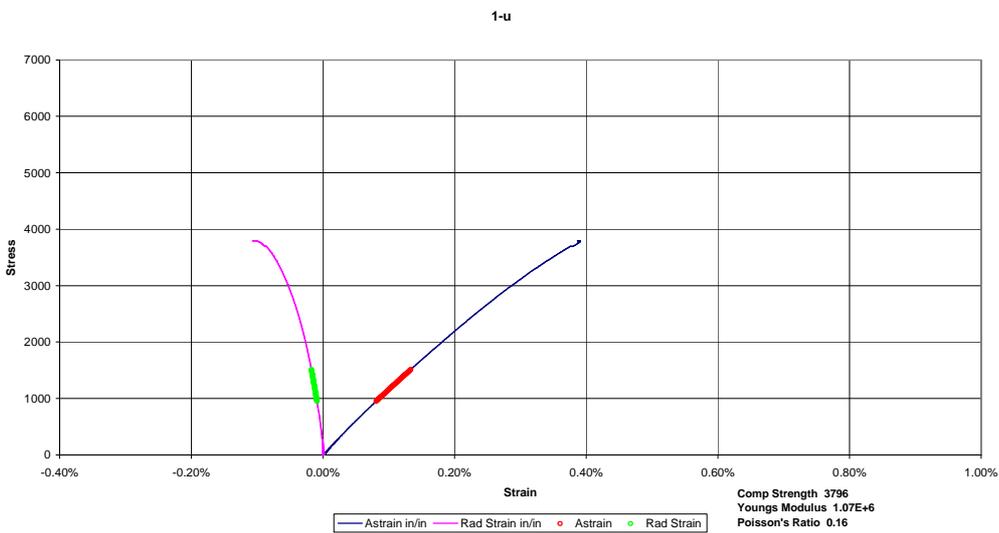
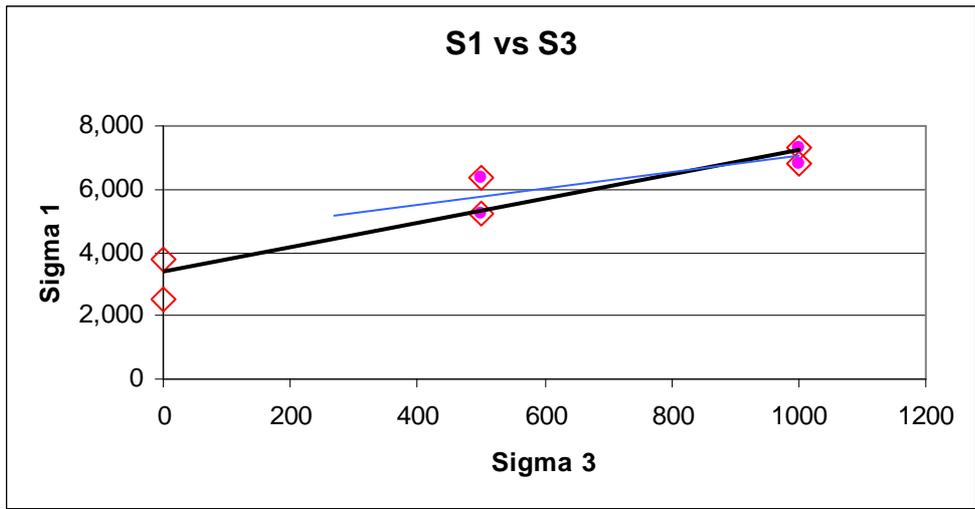
| | | | | | |
|----------|----------|----------|-----|----------|-----|
| E | 1.03E+06 | 6.49E+05 | psi | 8.40E+05 | psi |
| v | 0.102 | 0.079 | | 0.090 | |
| Pconf | 500 | 500 | psi | 500 | psi |
| ----- | | | | | |
| Compress | 6,288 | 5,821 | psi | 6,054 | psi |
| E | 1.02E+06 | 1.27E+06 | psi | 1.14E+06 | psi |
| v | 0.084 | 0.093 | | 0.089 | |
| Pconf | 1,000 | 1,000 | psi | 1,000 | psi |

Friction angle and cohesion

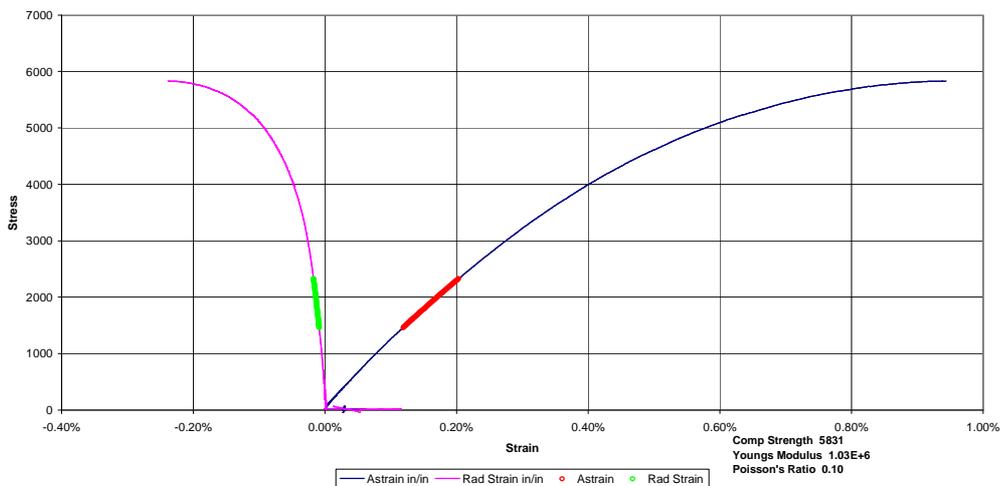
| | | |
|-----------|-------|---------|
| ϕ | 36.18 | degrees |
| So | 861 | psi |

From Confined only

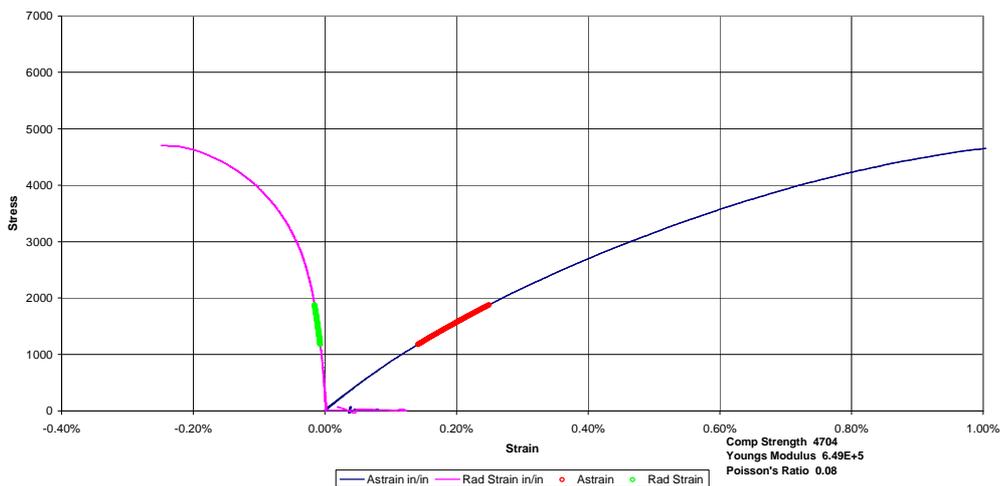
| | | |
|-----------|----------|---------|
| Co | 4480.479 | psi |
| ϕ | 26.13 | degrees |
| So | 1396 | psi |



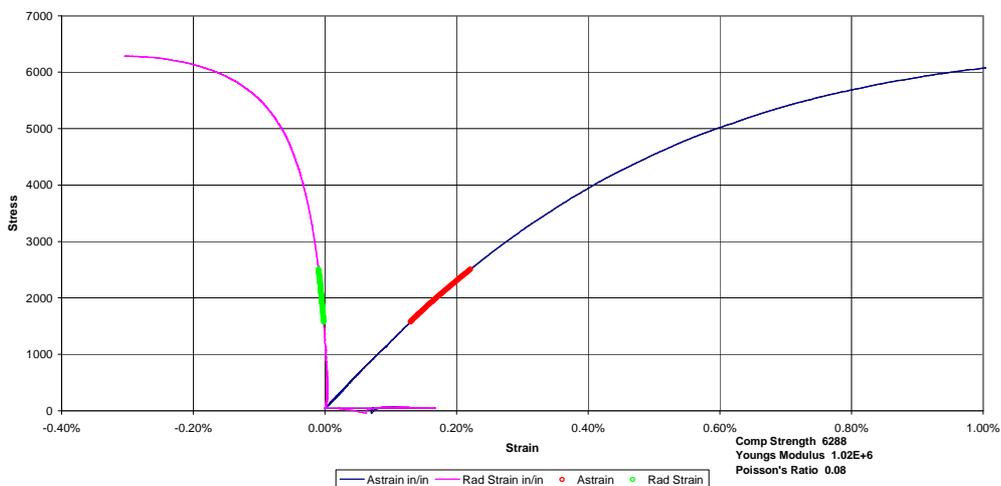
3-5k



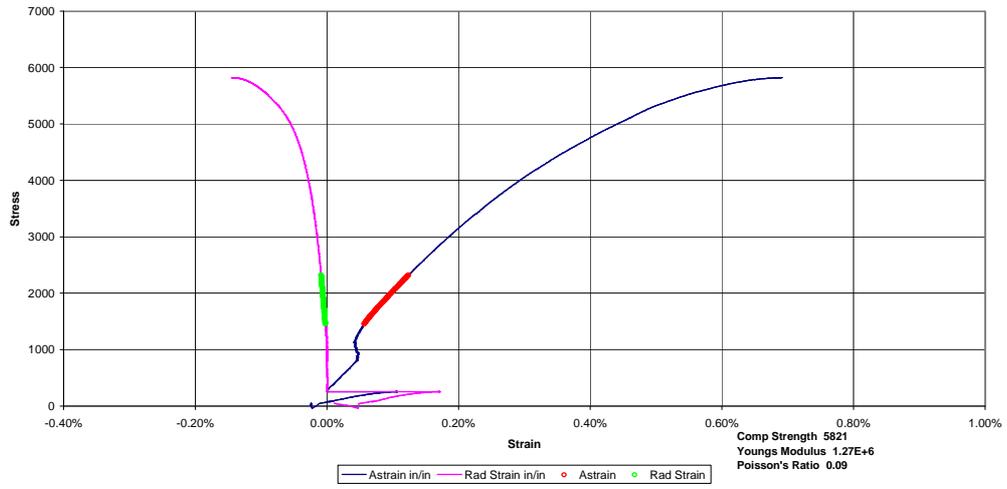
4-5k



5-1k



6-1k



Anexo 2.5 Determinación de las propiedades mecánicas muestra ECWL 1603

| Date Tested | Sample | Confining Pressure Psi | Compressive Strength psi | Young's Modulus | Poisson's Ratio |
|-------------|--------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| 8-14-08 | 1 | 0 | 3,700 | 0.99E+06 | 0.187 |
| 8-14-08 | 2 | 0 | 3,791 | 1.01E+06 | 0.188 |
| 8-25-08 | 3 | 500 | 4,202 | 1.11E+06 | 0.092 |
| 8-25-08 | 4 | 500 | 4,403 | 0.92E+06 | 0.097 |
| 8-25-08 | 5 | 1,000 | 4,658 | 0.92E+06 | 0.095 |
| 8-25-08 | 6 | 1,000 | 4,635 | 0.84E+06 | 0.097 |

| Date Tested | Sample | Tensile Strength psi | Density Lbs/gal |
|-------------|--------|-------------------------|--------------------|
| 8-14-08 | A | 424 | 15.84 |
| 8-14-08 | B | 419 | 15.88 |
| 8-14-08 | C | 416 | 15.93 |
| 8-14-08 | D | 450 | 15.94 |

Average Brazilian Tensile Strength = 427 psi

Density Variation = 0.6 %

Summary

| | #1 | #2 | Average values |
|--|----------|--------------|----------------|
| Unconfined Compressive Strength | | | |
| Co | 3,700 | 3,791 psi | 3,746 psi |
| E | 9.85E+05 | 1.01E+06 psi | 9.97E+05 psi |
| v | 0.187 | 0.188 | 0.187 |

Confined Compressive Strength

| | | | | | |
|----------|----------|----------|-----|----------|-----|
| Compress | 4,202 | 4,403 | psi | 4,303 | psi |
| E | 1.11E+06 | 9.92E+05 | psi | 1.05E+06 | psi |
| v | 0.092 | 0.097 | | 0.095 | |
| Pconf | 500 | 500 | psi | 500 | psi |

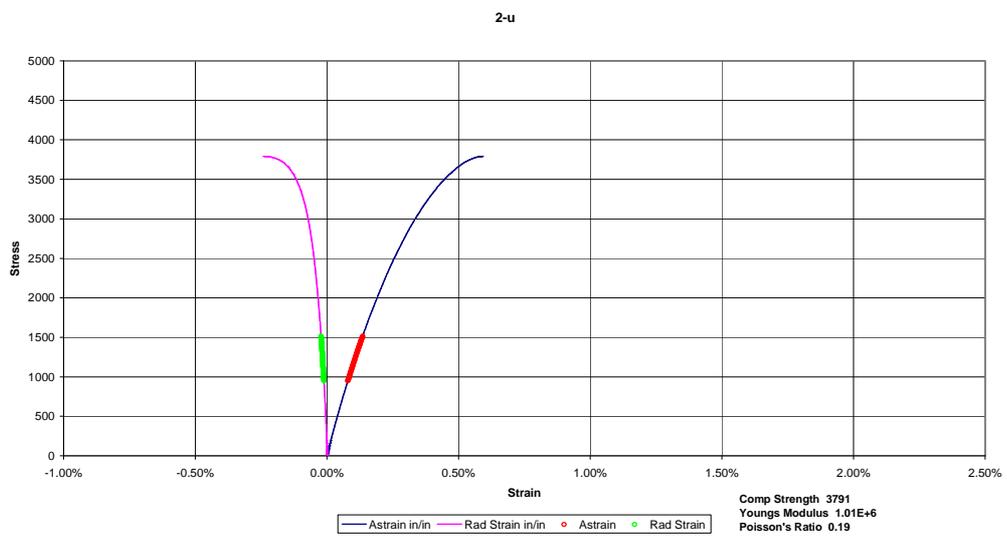
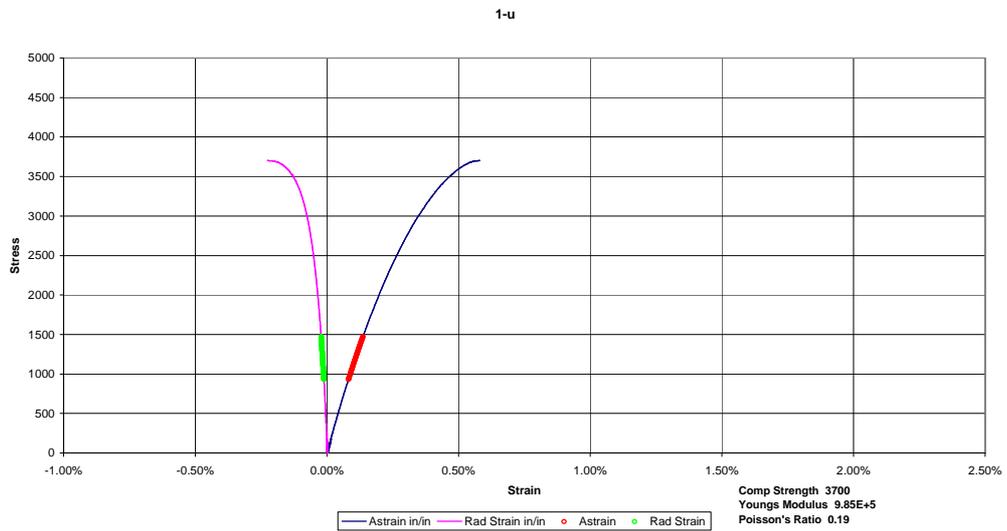
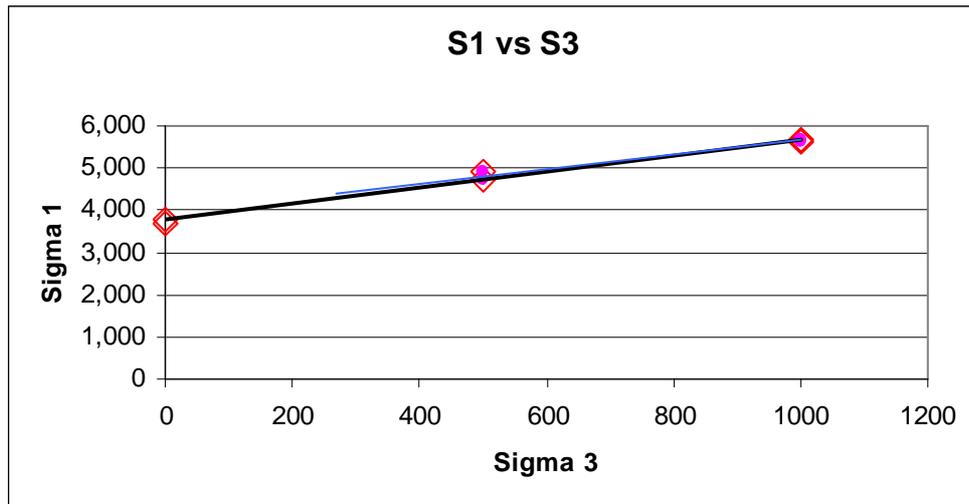
| | | | | | |
|----------|----------|----------|-----|----------|-----|
| Compress | 4,658 | 4,635 | psi | 4,646 | psi |
| E | 9.20E+05 | 8.37E+05 | psi | 8.79E+05 | psi |
| v | 0.095 | 0.097 | | 0.096 | |
| Pconf | 1,000 | 1,000 | psi | 1,000 | psi |

Friction angle and cohesion

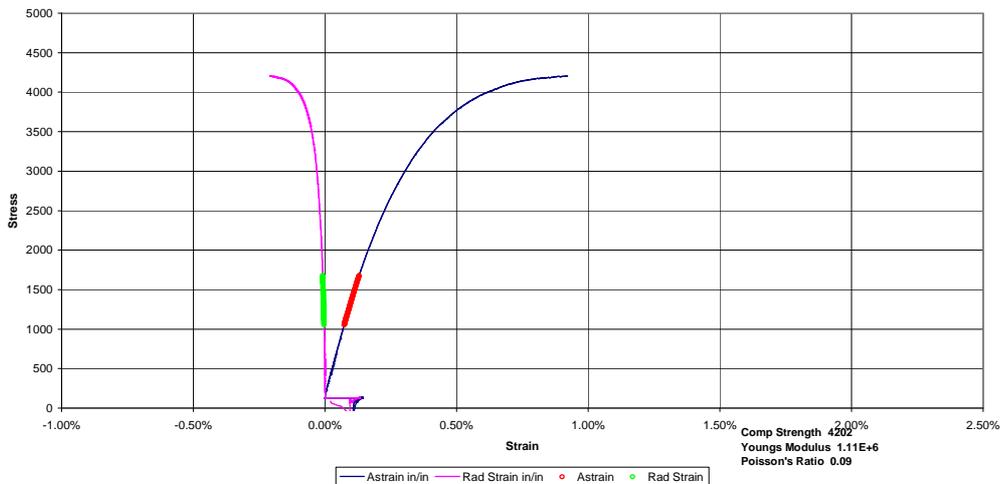
| | | |
|-----------|-------|---------|
| ϕ | 18.09 | degrees |
| So | 1371 | psi |

From Confined only

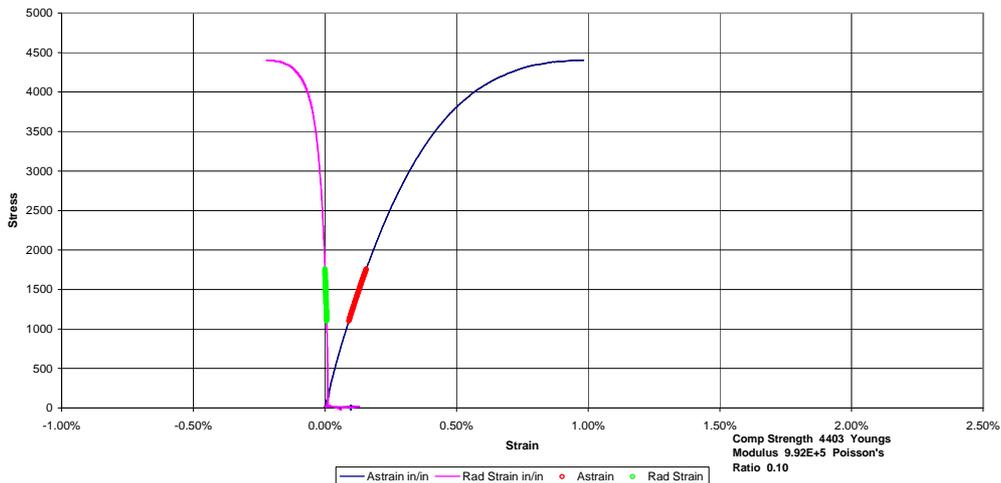
| | | |
|-----------|----------|---------|
| Co | 3958.593 | psi |
| ϕ | 14.83 | degrees |
| So | 1524 | psi |



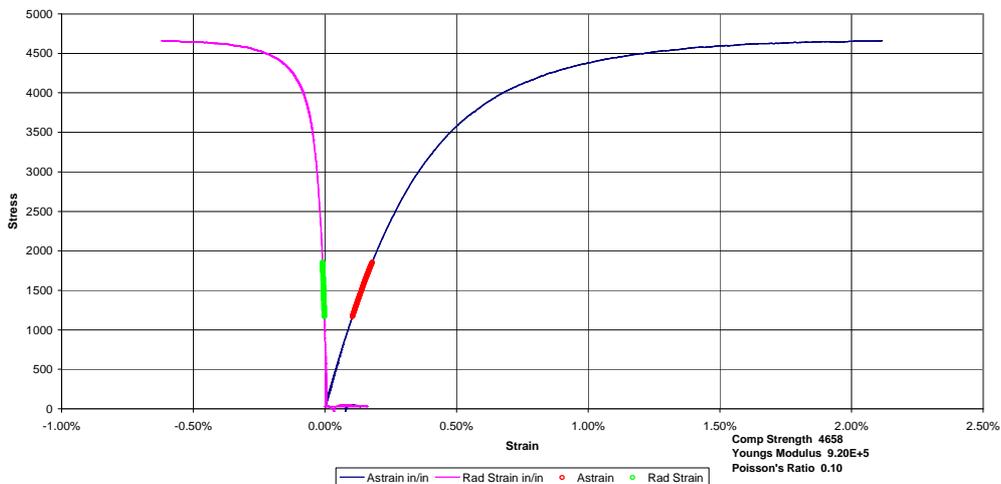
3-5k



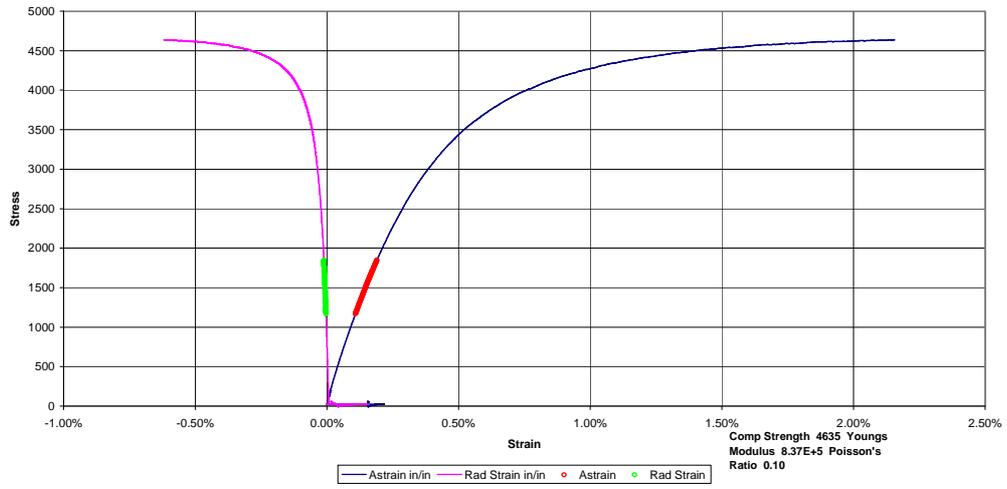
4-5k



5-1k



6-1k



Anexo 2.6 Determinación de las propiedades mecánicas lechada ECLX 1655

| Date Tested | Sample | Confining Pressure Psi | Compressive Strength psi | Young's Modulus | Poisson's Ratio |
|-------------|--------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| 8-20-08 | 1 | 0 | 2,290 | 7.23E+05 | 0.203 |
| 8-20-08 | 2 | 0 | 1,967 | 6.86E+05 | 0.161 |
| 8-25-08 | 3 | 250 | 2,714 | 6.57E+05 | 0.079 |
| 8-25-08 | 4 | 250 | 2,752 | 6.88E+05 | 0.084 |
| 8-25-08 | 5 | 500 | 3,015 | 6.53E+05 | 0.069 |
| 8-25-08 | 6 | 500 | 2,978 | 5.57E+05 | 0.049 |

| Date Tested | Sample | Tensile Strength psi | Density Lbs/gal |
|-------------|--------|-------------------------|--------------------|
| 8-20-08 | A | 224 | 16.15 |
| 8-20-08 | B | 218 | 16.14 |
| 8-20-08 | C | 201 | 16.18 |
| 8-20-08 | D | 178 | 16.18 |

Average Brazilian Tensile Strength = 205 psi

Density Variation = 0.2 %

Summary

| | #1 | #2 | Average |
|--|----------|--------------|--------------|
| Unconfined Compressive Strength | | | values |
| C_o | 2,290 | 1,967 psi | 2,128 psi |
| E | 7.23E+05 | 6.86E+05 psi | 7.05E+05 psi |
| v | 0.203 | 0.161 | 0.182 |

Confined Compressive Strength

| | | | | | |
|----------|----------|----------|-----|----------|-----|
| Compress | 2,714 | 2,752 | psi | 2,733 | psi |
| E | 6.57E+05 | 6.88E+05 | psi | 6.73E+05 | psi |
| v | 0.079 | 0.084 | | 0.081 | |
| Pconf | 250 | 250 | psi | 250 | psi |

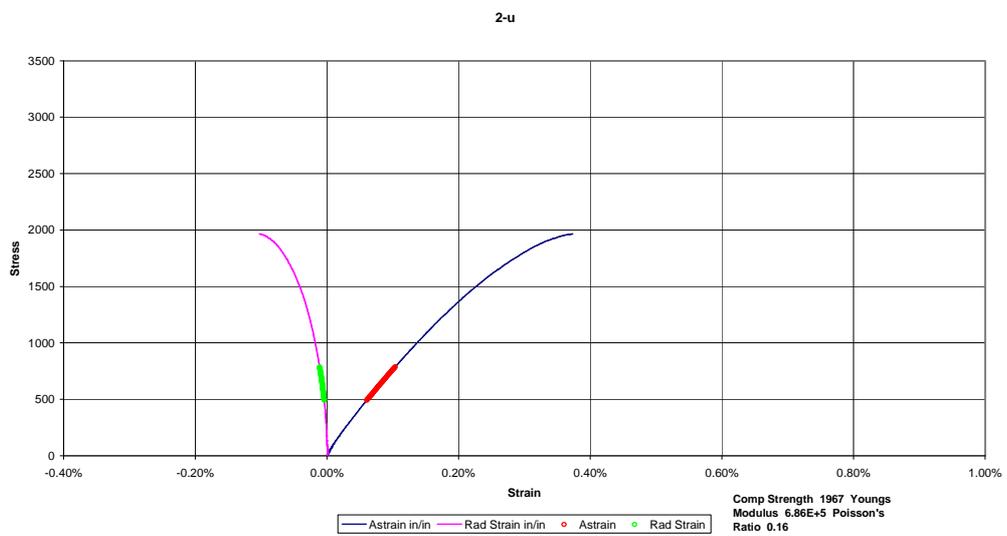
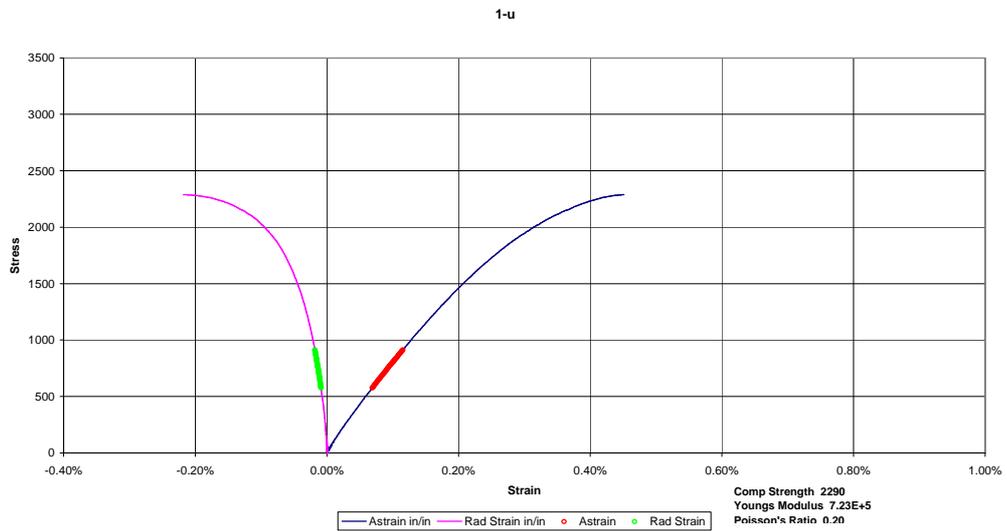
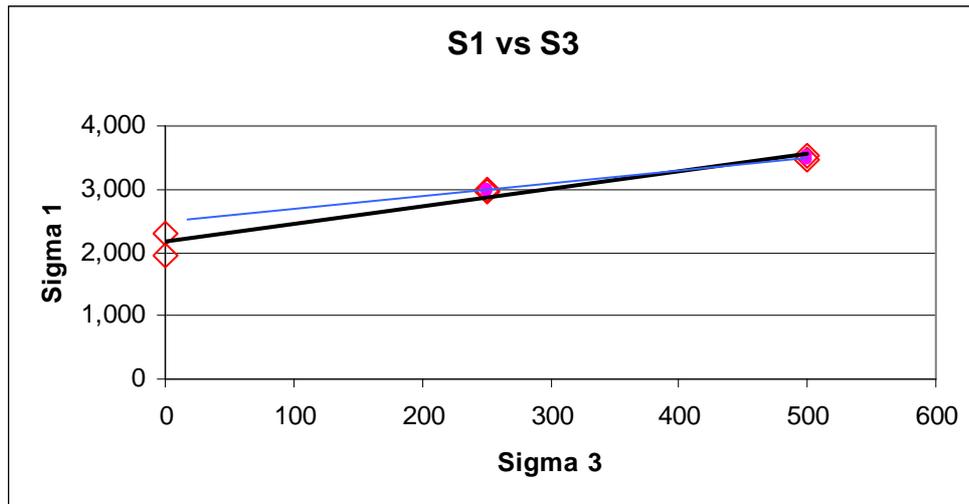
| | | | | | |
|----------|----------|----------|-----|----------|-----|
| Compress | 3,015 | 2,978 | psi | 2,997 | psi |
| E | 6.53E+05 | 5.57E+05 | psi | 6.05E+05 | psi |
| v | 0.069 | 0.049 | | 0.059 | |
| Pconf | 500 | 500 | psi | 500 | psi |

Friction angle and cohesion

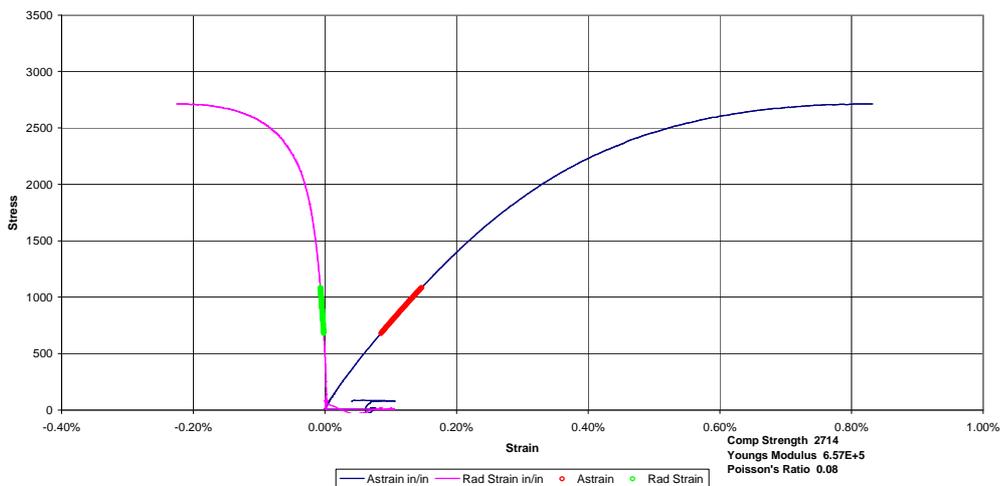
| | | |
|-----------|-------|---------|
| ϕ | 27.70 | degrees |
| So | 660 | psi |

From Confined only

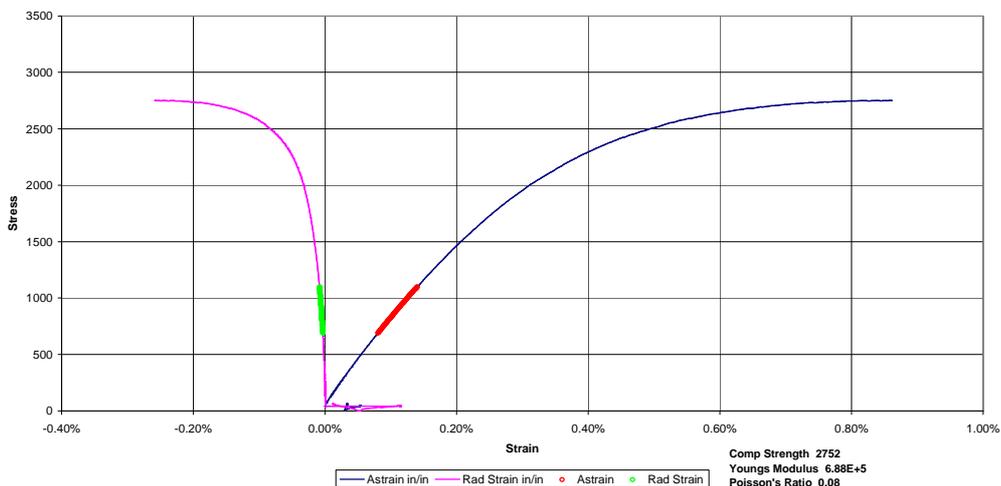
| | | |
|-----------|----------|---------|
| Co | 2470.049 | psi |
| ϕ | 20.17 | degrees |
| So | 862 | psi |



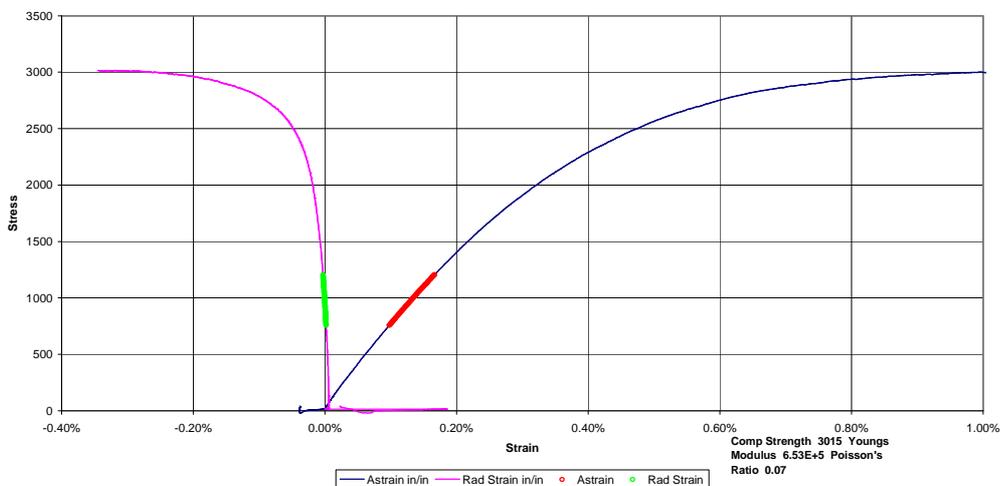
3-.25k



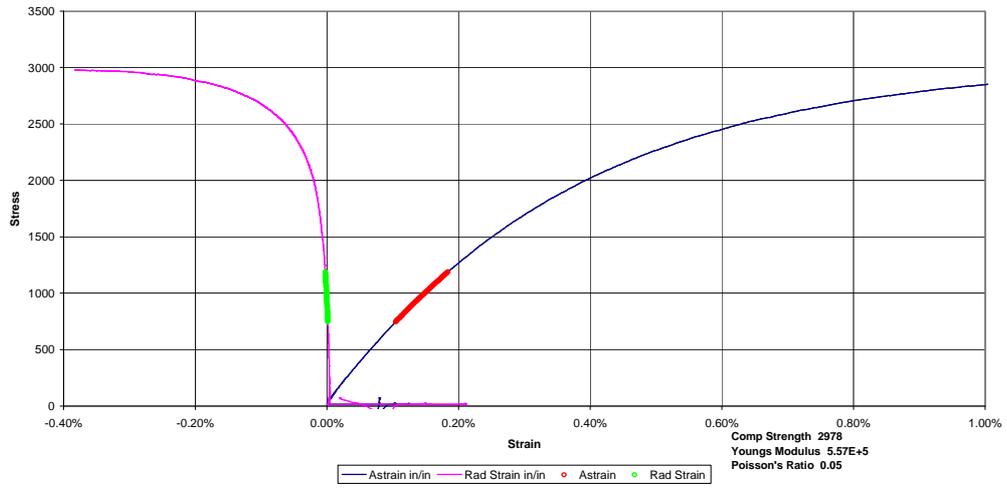
4-.25k



5-.5k



6-.5k



Anexo 2.7 Determinación de las propiedades mecánicas lechada ECWL 1603

| Date Tested | Sample | Confining Pressure Psi | Compressive Strength psi | Young's Modulus | Poisson's Ratio |
|-------------|--------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| 8-14-08 | 1 | 0 | 3,700 | 0.99E+06 | 0.187 |
| 8-14-08 | 2 | 0 | 3,791 | 1.01E+06 | 0.188 |
| 8-25-08 | 3 | 500 | 4,202 | 1.11E+06 | 0.092 |
| 8-25-08 | 4 | 500 | 4,403 | 0.92E+06 | 0.097 |
| 8-25-08 | 5 | 1,000 | 4,658 | 0.92E+06 | 0.095 |
| 8-25-08 | 6 | 1,000 | 4,635 | 0.84E+06 | 0.097 |

| Date Tested | Sample | Tensile Strength psi | Density Lbs/gal |
|-------------|--------|-------------------------|--------------------|
| 8-14-08 | A | 424 | 15.84 |
| 8-14-08 | B | 419 | 15.88 |
| 8-14-08 | C | 416 | 15.93 |
| 8-14-08 | D | 450 | 15.94 |

Average Brazilian Tensile Strength = 427 psi

Density Variation = 0.6 %

Summary

| | #1 | #2 | Average |
|--|----------|--------------|--------------|
| Unconfined Compressive Strength | | | |
| | | | values |
| Co | 3,700 | 3,791 psi | 3,746 psi |
| E | 9.85E+05 | 1.01E+06 psi | 9.97E+05 psi |
| v | 0.187 | 0.188 | 0.187 |
| Confined Compressive Strength | | | |
| | | | |
| Compress | 4,202 | 4,403 psi | 4,303 psi |
| E | 1.11E+06 | 9.92E+05 psi | 1.05E+06 psi |
| v | 0.092 | 0.097 | 0.095 |

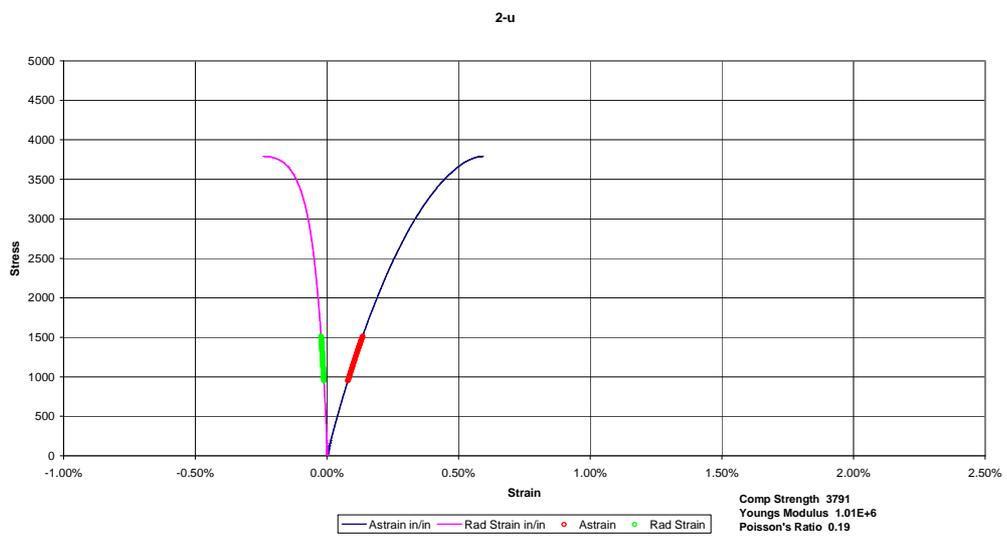
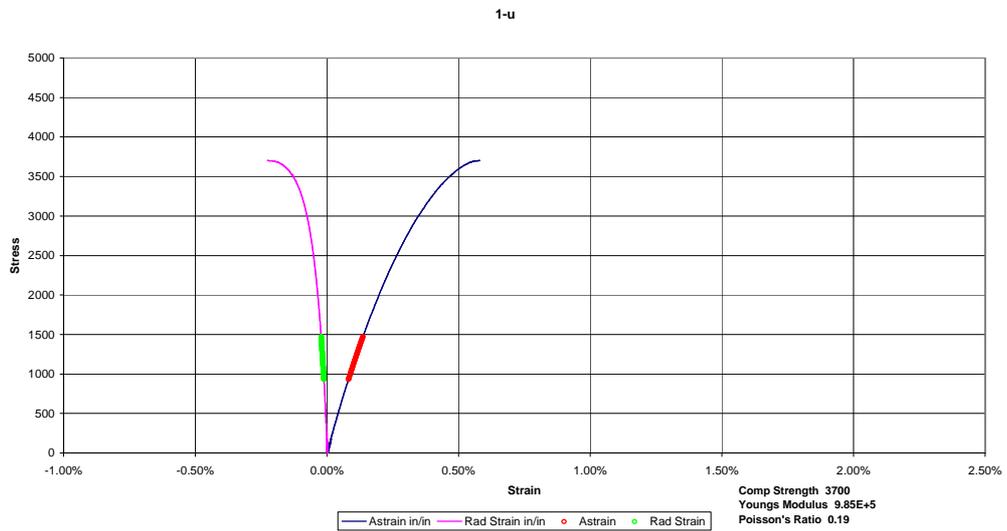
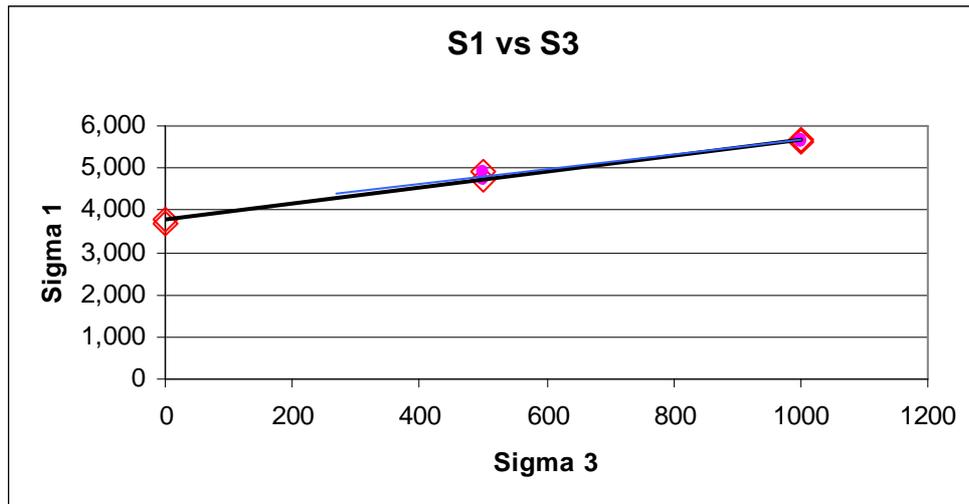
| | | | | | |
|----------|----------|----------|-----|----------|-----|
| Pconf | 500 | 500 | psi | 500 | psi |
| ----- | | | | | |
| Compress | 4,658 | 4,635 | psi | 4,646 | psi |
| E | 9.20E+05 | 8.37E+05 | psi | 8.79E+05 | psi |
| v | 0.095 | 0.097 | | 0.096 | |
| Pconf | 1,000 | 1,000 | psi | 1,000 | psi |

Friction angle and cohesion

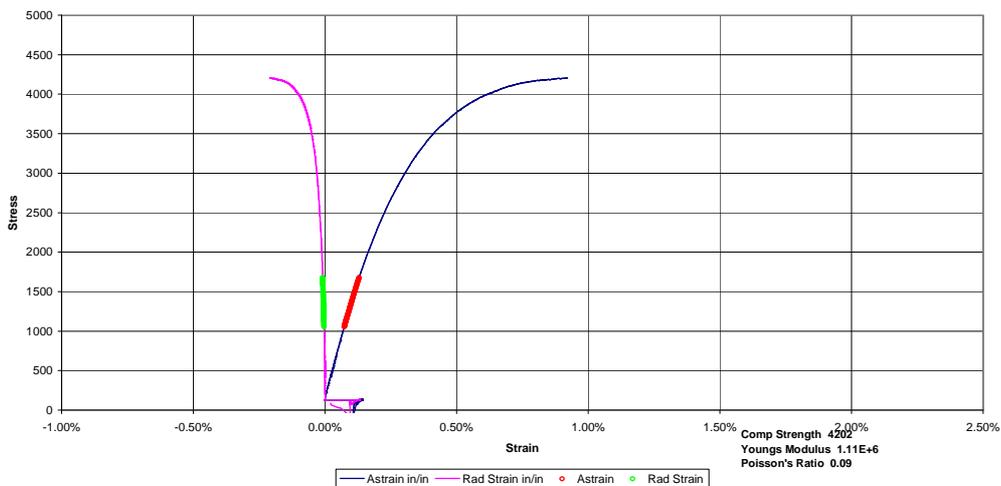
| | | |
|-----------|-------|---------|
| ϕ | 18.09 | degrees |
| So | 1371 | psi |

From Confined only

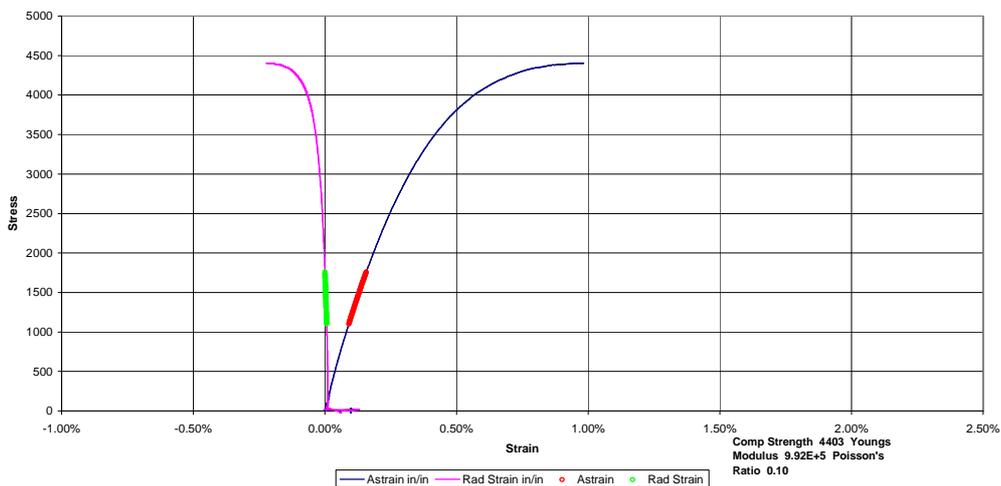
| | | |
|-----------|----------|---------|
| Co | 3958.593 | psi |
| ϕ | 14.83 | degrees |
| So | 1524 | psi |



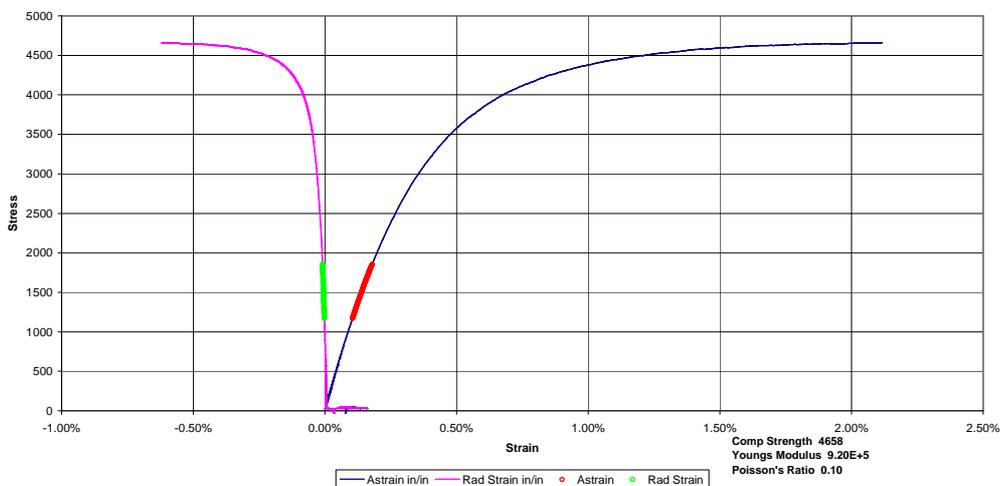
3-5k



4-5k



5-1k



6-1k

