

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN NANO COMPUESTO EN LAS  
LECHADAS DE CEMENTO EN LA EMPRESA SUPERIOR ENERGY SERVICES  
A NIVEL LABORATORIO**

**ANDRÉS FELIPE CARRERA LOZANO  
EDWARD FELIPE CARVAJAL CAMACHO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2018**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN NANO COMPUESTO EN LAS  
LECHADAS DE CEMENTO EN LA EMPRESA SUPERIOR ENERGY SERVICES  
A NIVEL LABORATORIO**

**ANDRÉS FELIPE CARRERA LOZANO  
EDWARD FELIPE CARVAJAL CAMACHO**

**Proyecto integral de grado para optar al título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director  
José David Díaz  
Ingeniero de Petróleos**

**Orientador  
Diego Nicolás Rodríguez Serrano  
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2018**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

Ing. Diego Rodríguez

---

Ing. Elizabeth Torres

---

Ing. Edubiel Salcedo

Bogotá, Febrero del 2018

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro:

**Dr. JAIME POSADA DIAZ.**

Vice-rector de Desarrollo y Recursos Humanos:

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCA-PEÑA.**

Vice-rectora Académica y de Posgrados:

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS.**

Secretario General:

**Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCIA-PEÑA.**

Decano Facultad de Ingeniería:

**Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI.**

Director Programa de Ingeniería Química:

**Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ.**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Dios que me dio fortaleza y esperanza en momentos buenos y malos durante toda mi vida pero especialmente en este largo camino de mi carrera profesional. A mis padres Edward Francisco Carvajal y Claudia Marcela Camacho por siempre estar pendiente de mí; sus grandes esfuerzos y amor me ayudaron a salir adelante. A mi hermana María José Carvajal Camacho por ser mi compañía. A mis primos Cristian Carvajal, Juan Diego Riveros y María

Camila Riveros por aportarme conocimiento desde un punto de vista a nivel de ingeniería y a nivel personal, además de brindarme su ayuda. Agradecer a mis abuelos Fabiola Jaramillo e Isaac Carvajal, también a Aminta Ortiz y Benjamín Camacho quienes creyeron en mí y aportaron mucho en mi crecimiento personal. Quiero agradecer profundamente a Superior Energy Services y todos sus trabajadores, por darnos la confianza para el desarrollo del proyecto, en especial al ingeniero José David Díaz y a la ingeniera Angélica Ortiz los cuales nos proporcionaron conocimiento y colaboración en las zonas administrativas o dentro del laboratorio que nos sirven de experiencia para la vida profesional. A todos mis amigos y mis allegados. Muchas gracias a todos.

***Edward Felipe Carvajal Camacho.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a Dios por darme la fuerza, el ánimo para afrontar cada lucha presentada a lo largo del camino, por la oportunidad que me dio de conocer gente excelente que apoyará el fin investigativo de este proyecto. Agradezco a mi familia por su constante e incondicional apoyo, por sus sacrificios que los valoro gratamente. A la empresa Superior Energy Services por su apoyo técnico-financiero, Al ing. José David Díaz por su apoyo en cada momento y su colaboración. A la Ing. Angélica Ortiz y todo el personal de laboratorio por compartir sus conocimientos técnicos y por invertir su tiempo en el desarrollo de este proyecto. A mi compañero Felipe Carvajal por ser una persona constante y dedicada para que este proyecto se realizara. A todos mis amigos, gracias.

***Andrés Felipe Carrera Lozano.***

## CONTENIDO

|   | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN  | 26   |
| OBJETIVOS   | 27   |
| 1. GENERALIDADES  | 28   |
| 1.1 GENERALIDADES DE LOS NANO COMPUESTOS UTILIZADOS EN CEMENTO DE USO PETRÓLERO | 29   |
| 1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS LECHADAS DE CEMENTO EN EL LABORATORIO                | 32   |
| 1.2.1 Densidad  | 32   |
| 1.2.2 Rendimiento   | 32   |
| 1.2.3 Tiempo de bombeabilidad   | 32   |
| 1.2.4 Reología  | 33   |
| 1.2.5 Fuerza de compresión  | 33   |
| 1.2.6 Pérdida de filtrado   | 33   |
| 1.2.7 Agua libre  | 33   |
| 1.3 ADITIVOS UTILIZADOS EN LA CEMENTACIÓN                                       | 34   |
| 1.3.1 Retardadores  | 34   |
| 1.3.1.1 Acelerantes   | 34   |
| 1.3.2 Extendedores  | 34   |
| 1.3.2.1 Controladores de filtrado   | 34   |
| 1.3.2.2 Dispersantes  | 35   |
| 1.3.2.3 Controladores de agua libre   | 35   |
| 1.3.2.4 Controladores de mitigación de gas                                      | 35   |
| 1.3.2.5 Densificantes   | 35   |
| 1.3.2.6 Antiespumantes  | 35   |
| 2. SELECCIÓN DEL NANO COMPUESTO   | 36   |
| 2.1 NANO COMPUESTO DE ESTUDIO   | 36   |
| 2.1.1 Nano Alúmina  | 36   |
| 2.2 PROPIEDADES QUE APORTA AL CEMENTO   | 37   |
| 2.2.1 Mecánicas   | 37   |
| 2.2.2 Trabajabilidad  | 37   |
| 2.2.3 Reología  | 37   |
| 2.2.4 Nanotubos de carbono (MWCNT)  | 38   |
| 2.3 PROPIEDADES QUE BRINDA AL CEMENTO   | 39   |
| 2.3.1 Mecánicas   | 39   |
| 2.3.2 Trabajabilidad  | 39   |
| 2.3.3 Reología  | 40   |



|   |    |
|---|----|
| 2.3.4 Nano Sílice   | 40 |
| 2.4 PROPIEDADES QUE APORTA AL CEMENTO   | 41 |
| 2.4.1 Mecánicas   | 41 |
| 2.4.2 Trabajabilidad  | 41 |
| 2.4.3 Reología  | 41 |
| 2.4.4 Nano Arcilla  | 42 |
| 2.5 PROPIEDADES QUE APORTA AL CEMENTO   | 43 |
| 2.5.1 Mecánicas   | 43 |
| 2.5.2 Trabajabilidad  | 43 |
| 2.5.3 Reología  | 43 |
| 2.6 COSTOS COMERCIALES DE LOS CUATRO NANO COMPUESTOS                          | 44 |
| <br>  |    |
| 3. MATRIZ DE SELECCIÓN  | 46 |
| 3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN (CO)   | 46 |
| 3.1.1 Reología  | 46 |
| 3.1.1.1 Viscosidad plástica   | 46 |
| 3.1.1.2 Punto cedente (Yp)  | 46 |
| 3.2 METODOLOGÍAS DE SELECCIÓN   | 47 |
| 3.2.1 Matriz de selección por juicio de expertos                              | 47 |
| 3.2.2 Simulación de Monte Carlo   | 50 |
| 3.2.2.1 Distribución Normal   | 51 |
| 3.2.2.2 Crystal Ball  | 51 |
| 3.2.2.3 Procedimiento simulación de Montecarlo                                | 51 |
| 3.3 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA UNA LECHADA DE CEMENTO                        | 56 |
| 3.3.1 Prueba de mezclabilidad   | 57 |
| 3.3.2 Acondicionamiento de la lechada   | 58 |
| 3.3.3 Agua libre  | 59 |
| 3.3.4 Reología  | 60 |
| 3.3.5 Pérdida de filtrado o fluid loss  | 62 |
| 3.3.6 Tiempo de bombeabilidad o thickening time                               | 63 |
| 3.3.7 Resistencia al esfuerzo compresivo. Prueba no destructiva               | 65 |
| 3.3.8 Resistencia al esfuerzo compresivo. Prueba destructiva                  | 66 |
| 3.3.9 Mpro  | 69 |
| <br>  |    |
| 4. FORMULACIÓN Y CONDICIONES PARA EL DESARROLLO EXPERIMENTAL                  | 71 |
| 4.1 CONDICIONES DE POZO   | 71 |
| 4.1.1 Nano compuesto de estudio   | 72 |
| 4.1.2 Condiciones iniciales para la formulación de la lechada                 | 73 |
| <br>  |    |
| 5. CARACTERIZACIÓN DE LAS LECHADAS EVALUADAS                                  | 75 |
| 5.1 LECHADA BASE I (B-I)  | 75 |
| 5.1.1 Reología lechada base I (B-I)   | 75 |
| 5.1.2 Tiempo de bombeabilidad   | 76 |
| 5.1.3 Resistencia a la compresión echada base I (B-I) (Ensayo no destructivo) | 76 |

|  |    |
|--|----|
| 5.2 LECHADA BASE I CON MWCNT AL 0,1 % BWOC (B-I 0,1)                                     | 76 |
| 5.2.1 Reología lechada base I con MWCNT al 0,1 % BWOC                                    | 76 |
| 5.3 LECHADA BASE I CON MWCNT AL 0,25% BWOC (B-I 0,25)                                    | 77 |
| 5.3.1 Reología lechada base I con MWCNT al 0,25% BWOC                                    | 77 |
| 5.4 LECHADA BASE I CON MWCNT AL 0,5% BWOC (B-I 0,5)                                      | 77 |
| 5.4.1 Reología lechada base I con MWCNT al 0,5% BWOC                                     | 77 |
| 5.5 LECHADA BASE II  | 78 |
| 5.5.1 Reología lechada base II   | 78 |
| 5.5.2 Tiempo de bombeabilidad lechada base II  | 79 |
| 5.5.3 Agua libre lechada base II   | 79 |
| 5.5.4 Pérdida de filtrado lechada base II  | 79 |
| 5.5.5 Resistencia a la compresión lechada base II (Ensayo no destructivo)                | 79 |
| 5.6 LECHADA BASE II CON MWCNT 0,1% BWOC (B-II 0,1)                                       | 80 |
| 5.6.1 Reología lechada base II con MWCNT 0,1 BWOC  | 80 |
| 5.6.2 Agua libre base II con MWCNT 0,1% BWOC   | 80 |
| 5.6.3 Pérdida de filtrado lechada base II con MWCNT 0,1% BWOC                            | 81 |
| 5.7 LECHADA BASE II CON MWCNT 0,25% BWOC (B-II 0,25)                                     | 81 |
| 5.7.1 Reología lechada base II con MWCNT 0,25% BWOC                                      | 81 |
| 5.7.2 Agua libre lechada base II con MWCNT 0,25% BWOC                                    | 82 |
| 5.7.3 Pérdida de filtrado lechada base II con MWCNT 0,25% BWOC                           | 82 |
| 5.8 LECHADA BASE II CON MWCNT 0,5% BWOC (B-II 0,5)                                       | 82 |
| 5.8.1 Reología lechada base II con MWCNT 0,5% BWOC                                       | 83 |
| 5.8.2 Agua libre lechada base II con MWCNT 0,5% BWOC                                     | 83 |
| 5.8.3 Pérdida de filtrado lechada base II con MWCNT 0,5% BWOC                            | 83 |
| <br>   |    |
| 6. SELECCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES APROPIADAS DE LAS LECHADAS EVALUADAS                 | 85 |
| 6.1 ANÁLISIS REOLÓGICOS  | 85 |
| 6.2 ANÁLISIS AGUA LIBRE  | 88 |
| 6.3 ANÁLISIS PÉRDIDA DE FILTRADO   | 88 |
| 6.4 SELECCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES   | 89 |
| <br>   |    |
| 7. EVALUACIÓN DE LAS LECHADAS SELECCIONADAS  | 90 |
| 7.1 PROPIEDAD FÍSICA   | 90 |
| 7.1.1 Resultados y análisis de la prueba tiempo de bombeabilidad                         | 90 |
| 7.2 PROPIEDADES MECÁNICAS  | 91 |
| 7.2.1 Resistencia a la compresión método no destructivo                                  | 91 |
| 7.2.2 Resistencia a la compresión método destructivo                                     | 92 |
| 7.2.3 Resultados y Análisis de las propiedades mecánicas de las lechadas B-I y B-II PROs | 93 |
| 7.3 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS LECHADAS EVALUADAS                                  | 95 |
| <br>   |    |
| 8. EVALUACIÓN DE COSTOS UNITARIOS PARA LAS LECHADAS BASE II Y BASE CON 0,25% DE MWCNT    | 96 |
| 8.1 CRITERIOS FINANCIEROS  | 96 |

|  |     |
|--|-----|
| 8.2 ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS             | 97  |
| 8.2.1 Costos lechada base II                 | 97  |
| 8.2.2 Costos lechada base II con 0,25% MWCNT | 98  |
| 8.2.3 Análisis comparativo                   | 98  |
| 9. CONCLUSIONES                              | 99  |
| 10. RECOMENDACIONES                          | 101 |
| BIBLIOGRAFÍA                                 | 102 |
| ANEXOS                                       | 105 |

## LISTA DE TABLAS

|  | pág. |
|--|------|
| <b>Tabla 1.</b> Efecto de la Nano Alúmina en las propiedades sobre el cemento                                | 38   |
| <b>Tabla 2.</b> Propiedades de los materiales de carbono a escala nano                                       | 39   |
| <b>Tabla 3.</b> Efecto de la Nano Tubos de carbono en multipared (MWCNT) en las propiedades sobre el cemento | 40   |
| <b>Tabla 4.</b> Propiedades de la Nano Sílice sobre materiales de cemento                                    | 42   |
| <b>Tabla 5.</b> Propiedades mecánicas de la nano arcilla sobre materiales de Cemento                         | 44   |
| <b>Tabla 6.</b> Precios comerciales de los nanos materiales analizados                                       | 45   |
| <b>Tabla 7.</b> Información datos del pozo   | 72   |
| <b>Tabla 8.</b> Diseño de lechadas   | 74   |
| <b>Tabla 9.</b> Especificaciones Base I  | 75   |
| <b>Tabla 10.</b> Datos reología Base I   | 75   |
| <b>Tabla 11.</b> Resultados resistencia a la compresión  | 76   |
| <b>Tabla 12.</b> Daros reología Base I con 0,1% MWCNT  | 76   |
| <b>Tabla 13.</b> Datos reología Base I con 0,25% MWCNT   | 77   |
| <b>Tabla 14.</b> Datos reología Base I con 0,5% MWCNT  | 78   |
| <b>Tabla 15.</b> Especificaciones Base II  | 78   |
| <b>Tabla 16.</b> Datos reología Base II  | 78   |
| <b>Tabla 17.</b> Resultados agua libre lechada Base II   | 79   |
| <b>Tabla 18.</b> Resultados pérdida de filtrado lechada Base II  | 79   |
| <b>Tabla 19.</b> Resultados resistencia a la compresión lechada Base II                                      | 79   |
| <b>Tabla 20.</b> Especificaciones Base II con 0,1% MWCNT   | 80   |
| <b>Tabla 21.</b> Datos reológicos Base II con 0,1% MWCNT   | 80   |
| <b>Tabla 22.</b> Resultado agua libre lechada Base II con MWCNT 0,1% BWOC                                    | 81   |
| <b>Tabla 23.</b> Datos filtrado Base II 0,1% MWCNT   | 81   |
| <b>Tabla 24.</b> Formulación de la lechada Base I con MWCNT al 0.25% BWOC                                    | 81   |
| <b>Tabla 25.</b> Datos reológicos BASE II con 0,25% MWCNT  | 82   |
| <b>Tabla 26.</b> Resultado agua libre lechada BASE II con MWCNT 0,25%BWOC                                    | 82   |
| <b>Tabla 27.</b> Datos filtrado BASE II 0,25% MWCNT  | 82   |
| <b>Tabla 28.</b> Formulación BASE I con MWCNT al 0.5%BWOC  | 83   |
| <b>Tabla 29.</b> Datos reológicos BASE II con 0,5% MWCNT   | 83   |
| <b>Tabla 30.</b> Resultado agua libre lechada BASE II con MWCNT 0,5%BWOC                                     | 83   |
| <b>Tabla 31.</b> Datos filtrado BASE II 0,5% MWCNT   | 84   |
| <b>Tabla 32.</b> Resumen reológico para cada muestra   | 85   |
| <b>Tabla 33.</b> Pérdida de filtrado para las lechadas Base II   | 88   |
| <b>Tabla 34.</b> Resultados tiempo de bombeabilidad al alcanzar los 70 Bcs                                   | 90   |
| <b>Tabla 35.</b> Resultados resistencia a la compresión método no destructivo                                | 91   |
| <b>Tabla 36.</b> Resultados resistencia a la compresión método destructivo                                   | 92   |

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 37.</b> Resumen resultados de las propiedades mecánicas de las lechadas PROs        | 93 |
| <b>Tabla 38.</b> Costos de producto y materia prima de lechada sin nano-compuesto            | 97 |
| <b>Tabla 39.</b> Costos de obtención y materia prima para la lechada Base II con 0,25% MWCNT | 98 |

## LISTA DE FIGURAS

|  | pág. |
|--|------|
| <b>Figura 1.</b> Modelo físico simplificado del cemento portland hidratado   | 29   |
| <b>Figura 2.</b> Tamaño de partícula y área superficial específica relacionada con los materiales para hormigones      | 30   |
| <b>Figura 3.</b> Estructuración para simulación de Monte Carlo en Excel  | 52   |
| <b>Figura 4.</b> Análisis de sensibilidad Nano Carbono (MWCNT)   | 56   |
| <b>Figura 5.</b> Mezclador de lechadas (Mixer)   | 57   |
| <b>Figura 6.</b> Procedimiento para el uso del mezclador ( <i>Mixer</i> )  | 57   |
| <b>Figura 7.</b> Consistómetro atmosférico   | 58   |
| <b>Figura 8.</b> Procedimiento acondicionamiento de las lechadas   | 58   |
| <b>Figura 9.</b> Probeta de 250 mL   | 59   |
| <b>Figura 10.</b> Procedimiento de la prueba de agua libre   | 59   |
| <b>Figura 11.</b> Viscosímetro rotacional  | 60   |
| <b>Figura 12.</b> Procedimiento de la prueba de reología   | 61   |
| <b>Figura 13.</b> Filtro prensa  | 62   |
| <b>Figura 14.</b> Procedimiento de la prueba Pérdida de Filtrado ( <i>fluid loss test</i> ).                           | 63   |
| <b>Figura 15.</b> Consistómetro presurizado  | 64   |
| <b>Figura 16.</b> Procedimiento de la prueba de tiempo de Bombeabilidad o <i>thickening time</i>                       | 64   |
| <b>Figura 17.</b> UCA (Ultrasonic Cement Analyzer)   | 65   |
| <b>Figura 18.</b> Procedimiento de la prueba de resistencia a la compresión por método no destructivo                  | 66   |
| <b>Figura 19.</b> Prensa hidráulica  | 67   |
| <b>Figura 20.</b> Cámara de curado   | 67   |
| <b>Figura 21.</b> Procedimiento de los moldes en la cámara de curado   | 68   |
| <b>Figura 22.</b> Procedimiento de la prueba de resistencia a la compresión por método destructivo (prensa hidráulica) | 69   |
| <b>Figura 23.</b> MPRO   | 70   |
| <b>Figura 24.</b> Procedimiento de la prueba de evaluación de las propiedades mecánicas (MPRO)                         | 70   |
| <b>Figura 25.</b> Esquema de los diseños de lechadas a evaluar   | 74   |

## LISTA DE CUADROS

|   | <b>pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Cuadro 1.</b> Ejemplos de la nanotecnología y las nano herramientas para la aplicación en la industria petrolera | 31          |
| <b>Cuadro 2.</b> Comparación de criterios para matriz por juicios de expertos                                       | 48          |
| <b>Cuadro 3.</b> Propiedades Mecánicas (PM) para matriz por juicios de expertos                                     | 48          |
| <b>Cuadro 4.</b> Facilidad De Dispersión (FD) para matriz por juicios de expertos                                   | 48          |
| <b>Cuadro 5.</b> Costos por unidad (CT) para matriz por juicios de expertos   | 49          |
| <b>Cuadro 6.</b> Nivel De Investigación (NI)  | 49          |
| <b>Cuadro 7.</b> Resistencia Térmica (RT) para matriz por juicios de expertos                                       | 49          |
| <b>Cuadro 8.</b> Matriz de selección por juicios de expertos  | 50          |

## LISTA DE GRÁFICAS

|   | <b>pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Gráfica 1.</b> Frecuencia y estadísticas del nano-carbono para simulación de Monte Carlo | 55          |
| <b>Gráfica 2.</b> Resultados reológicos a temperatura ambiente                              | 86          |
| <b>Gráfica 3.</b> Resultados reológicos a temperatura circulante (BHCT)                     | 87          |
| <b>Gráfica 4.</b> Comparación entre los ensayos de resistencia a la compresión              | 93          |



## LISTA DE ECUACIONES

|  | <b>pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Ecuación 1.</b> Calculo para rango del criterio valores máximos | 53          |
| <b>Ecuación 2.</b> Cálculo para rango del criterio valores mínimos | 54          |
| <b>Ecuación 3.</b> Suma ponderada de los rangos                    | 54          |
| <b>Ecuación 4.</b> Porcentaje de agua libre                        | 60          |
| <b>Ecuación 5.</b> Viscosidad plástica                             | 61          |
| <b>Ecuación 6.</b> Punto cedente                                   | 62          |
| <b>Ecuación 7.</b> Temperatura circulante de fondo (BHCT)          | 71          |
| <b>Ecuación 8.</b> Temperatura estática de fondo (BHST)            | 72          |

## LISTA DE ANEXOS

|   | pág. |
|---|------|
| <b>Anexo A.</b> Gráfica de frecuencia y estadísticas de la nano-arcilla para simulación de Monte Carlo                                      | 106  |
| <b>Anexo B.</b> Gráfica de frecuencia y estadísticas de la nano-alúmina para simulación de Monte Carlo                                      | 107  |
| <b>Anexo C.</b> Gráfica de frecuencia y estadísticas de la nano-sílice para simulación de Monte Carlo                                       | 108  |
| <b>Anexo D.</b> Cálculos de viscosidad plástica para cada una de las mezclas evaluadas  | 109  |
| <b>Anexo E.</b> Cálculos de punto cedente para cada una de las mezclas evaluadas  | 111  |
| <b>Anexo F.</b> Hoja técnica del producto MWCNT   | 113  |
| <b>Anexo G.</b> Resultado de la prueba tiempo de bombeabilidad para la base I (B-I)   | 115  |
| <b>Anexo H.</b> Resultado de la prueba tiempo de bombeabilidad para la base II (B-II)   | 116  |
| <b>Anexo I.</b> Resultado de la prueba tiempo de bombeabilidad para la base I con 0,25% de MWCNT (B-I 0,25)                                 | 117  |
| <b>Anexo J.</b> Resultado de la prueba tiempo de bombeabilidad para la base II con 0,25% de MWCNT (B-II 0,25)                               | 118  |
| <b>Anexo K.</b> Resultado de la prueba resistencia a la compresion para la base I (B-I)   | 119  |
| <b>Anexo L.</b> resultado de la prueba resistencia a la compresion por método no destructivo para la base I con 0,25% de MWCNT (B-I 0,25)   | 120  |
| <b>Anexo M.</b> Resultado de la prueba resistencia a la compresion por método no destructivo para la base II (B-II)                         | 121  |
| <b>Anexo N.</b> Resultado de la prueba resistencia a la compresion por método no destructivo para la base II con 0,25% de MWCNT (B-II PRO)  | 122  |
| <b>Anexo Ñ.</b> Resultados de la prueba de resistencia a la compresion por método destructivo para la base I (B-I)                          | 123  |
| <b>Anexo O.</b> Resultados de la prueba de resistencia a la compresion por método destructivo para la base I con 0,25% de MWCNT (B-I PRO)   | 124  |
| <b>Anexo P.</b> Resultados de la prueba de resistencia a la compresion por método destructivo para la base II (B-II)                        | 125  |
| <b>Anexo Q.</b> Resultados de la prueba de resistencia a la compresion por método destructivo para la base II con 0,25% de MWCNT (B-II PRO) | 126  |
| <b>Anexo R.</b> Gráfica propiedades mecánicas base I  | 127  |
| <b>Anexo S.</b> Gráfica propiedades mecánicas base II   | 128  |
| <b>Anexo T.</b> Gráfica propiedades mecánicas base I con 0,25% de MWCNT   | 129  |
| <b>Anexo U.</b> Gráfica propiedades mecánicas base II con 0,25% de MWCN   | 130  |



## LISTA DE ABREVIATURAS

|                              |   |
|------------------------------|---|
| °F                           | Grados Fahrenheit   |
| <b>API</b>                   | Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute)                 |
| <b>API fluid loss</b>        | Unidad de medida de la prueba de pérdida de filtrado                            |
| Bbl                          | barril  |
| <b>Bc</b>                    | Unidades Bearden  |
| <b>BHCT</b>                  | Temperatura circulante de Fondo ( <i>Bottom Hole Circulating Temperature</i> )  |
| <b>BHST</b>                  | Temperatura Estática de Fondo ( <i>Bottom Hole Static Temperature</i> )         |
| <b>BHP</b>                   | Presión de Fondo ( <i>Bottom Hole Pressure</i> )                                |
| <b>BWOC</b>                  | Porcentaje en Base al Cemento ( <i>Base Weight on Cement</i> )                  |
| <b>CNT</b>                   | Nanotubos de Carbono ( <i>Carbon NanoTubes</i> )                                |
| cP                           | centipoise  |
| Ft                           | Pies  |
| gal/Sx                       | Galones por saco  |
| gr                           | Gramos  |
| <b>HPHT</b>                  | <i>High Pressure High Temperature</i>   |
| <b>lbf</b>                   | Libra-Fuerza  |
| <b>lbf/100ft<sup>3</sup></b> | Libra-fuerza por cada 100 pies cúbicos  |
| <b>lb/Sx</b>                 | libra por saco  |
| <b>MWCNT</b>                 | Nano tubos de Carbono en multicapa ( <i>multi walled carbón nanotubes</i> )     |
| <b>NA</b>                    | Nano Alúmina  |
| <b>NC</b>                    | Nano Arcilla  |
| <b>NS</b>                    | Nano Sílice   |
| <b>psi</b>                   | Libra por Pulgada Cuadrada  |
| <b>PPG</b>                   | Libras por Galón  |
| <b>RPM</b>                   | Revoluciones por Minuto   |
| <b>SGSA</b>                  | Analizador de la Fuerza de Gel Estático ( <i>Static Gel Strength Analyzer</i> ) |
| <b>TVD</b>                   | Profundidad Vertical Verdadera ( <i>True Vertical Depth</i> )                   |
| <b>UCA</b>                   | Analizador Ultrasónico de Cemento ( <i>Ultrasonic Cement Analyzer</i> )         |
| <b>Vp</b>                    | Viscosidad Plástica   |
| <b>WOC</b>                   | Tiempo de Espera en el Cemento ( <i>Waiting on Cement</i> )                     |
| <b>Yp</b>                    | Punto Cedente   |

## GLOSARIO

**ACTIVIDAD PUZOLANICA:** refiere a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que la puzolana puede combinar y la velocidad con la cual ocurre la reacción.

**ADITIVO:** material añadido a la lechada de cemento para modificar o mejorar algunas propiedades deseadas.

**AGLUTINANTE:** Sustancia líquida útil para disolver o desleír las sustancias que componen los pigmentos.

**ANULAR:** espacio formado entre la tubería y la pared del pozo, o el exterior de otra tubería.

**BOMBEABILIDAD:** la capacidad de la lechada de ser bombeada. La bombeabilidad normalmente se mide mediante el ensayo de tiempo de espesamiento del API

**CEMENTACION PRIMARIA:** Proceso de emplazamiento del cemento alrededor de una sarta de revestimiento o de una sarta de tubería de revestimiento corta (liner).

**FLY ASH:** compuesto natural producido por el proceso de combustión del carbón, es un material similar a la ceniza de volcán.

**FORMACION:** término usado para definir un cuerpo de roca suficientemente característico y continuo para ser mapeado.

**GELIFICACION:** proceso en el cual un fluido “se gelifica” o desarrolla una alta resistencia de gel.

**GRAFENO:** cristal de carbono en el que los átomos están organizados sobre un plano de forma hexagonal.

**LECHADA DE CEMENTO:** mezcla de cemento, agua y aditivos usados para sellar espacios en el anular entre el revestimiento y las paredes del pozo.

**LINER:** son tuberías de revestimiento cortas de la pared interna de una sarta de revestimiento previa.

**MODELO PLASTICO DE BINGHAM:** es un modelo reológico de dos parámetros utilizado en la industria de fluidos de perforación para describir las características del flujo de muchos tipos de lodos.

**MODULO DE BULK:** es la relación entre esfuerzo y deformación, es una constante elástica equivalente al cambio en la presión aplicada dividido por la relación entre el cambio de volumen y el volumen original del sólido.

**MODULO DE YOUNG:** es la relación entre el esfuerzo longitudinal y la deformación longitudinal.

**MOLIENDA:** operación unitaria utilizada en la industria para disminuir el tamaño de partícula de sólidos de gran tamaño.

**MONTMORILLONITA:** tipo de mineral arcilloso que tiende a dilatarse si se expone al agua. Es familiar de los minerales de silicatos en condiciones alcalinas, es un componente de la bentonita utilizado generalmente en los fluidos de perforación.

**NANO COMPUESTO:** material cuya medida es del orden de nanómetros, hasta de 100 nanómetros.

**NUCLEACIÓN:** lugar donde ocurre el proceso de hidratación del cemento, son sitios de contacto en el cual las moléculas de agua interactúan con los compuestos del cemento.

**PUNTO CEDENTE:** es la propiedad de un fluido que se refiere al esfuerzo mínimo requerido para que entre en movimiento.

**RELACIÓN AGUA/CEMENTO:** expresa la relación entre el peso del agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento.

**RELACIÓN DE POISSON:** es la medida de la compresibilidad de un material perpendicular al esfuerzo aplicado, o la relación entre la deformación latitudinal y la deformación longitudinal.

**SONICACIÓN:** proceso en el cual se aplica ondas ultrasonido como energía en la agitación las partículas de una muestra.

**SUSTANCIA HIDROFÍLICA:** sustancia que interactúa con las moléculas del agua.

**SUSTANCIA HIDROFÓBICA:** sustancia que no interactúa con las moléculas del agua.

**TIXOTROPÍA:** propiedad de fluidos esencialmente no newtonianos, que se caracterizan por mostrar un cambio de su viscosidad en el tiempo.

**TRABAJABILIDAD:** facilidad de colocación, consolidación y acabo del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación

**TUBERÍA DE REVESTIMIENTO:** tubería de gran diámetro bajada en hueco abierto y posteriormente cementada en un lugar.

**UNIDADES DE CONSISTENCIA BEARDEN:** unidades usadas para expresar la consistencia de una lechada de cemento cuando es determinado usando un consistómetro presurizado.

**VISCOSIDAD PLÁSTICA:** parámetro del modelo plástico de Bingham, representa la pendiente entre la línea de esfuerzo cortante y la velocidad de corte arriba del umbral de fluencia plástica.

## **RESUMEN**

El presente trabajo se basa en la evaluación de un nano compuesto en lechadas de cemento de la empresa Superior Energy Services a nivel laboratorio, el cual busca obtener un desempeño acorde a las investigaciones realizadas con estos nanomateriales donde destacan mejoramientos en propiedades específicas de las lechadas de cemento en aplicaciones sobre pozos petroleros.

Como primer paso se realiza una selección del nano compuesto de estudio para evaluarlo en las lechadas de cemento, se tienen como candidatos los nanos compuestos más estudiados en los últimos años aplicables en la operación de cementación, estos son: nano Alumina, Nano Sílice, Nano tubos de Carbono y Nano Arcilla. Adicionalmente, se agrega el valor del costo unitario de cada nano compuesto. Se hace un pequeño resumen de cada uno de estos nano compuestos donde se describe esencialmente, su naturaleza, y aportes físico-mecánicos en las lechadas de cemento (reología, trabajabilidad y propiedades mecánicas). La selección se plantea por medio de dos métodos de selección, determinístico (juicio de expertos) y probabilístico (Simulación de Monte Carlo). La selección se basa principalmente de evaluar cuatro criterios; comportamiento reológico, resistencia a la compresión, resistencia a la ruptura y el costo del nano compuesto.

Conforme al resultado arrojado por los dos métodos de selección (el nano compuesto apropiado), se continúa con la caracterización experimental en las lechadas de cemento. La empresa Superior Services contiene un sistema de pruebas que van presididas por las normas API que se basan en la formulación de las lechadas y el tipo de análisis al que debe ser sometido todo diseño para su uso en la operación.

Al haber realizado la debida caracterización a las lechadas de estudio. Se selecciona la concentración óptima del nano compuesto seleccionado en el cual haya mostrado una variación sustancial en las propiedades evaluadas, se procederá a comparar las propiedades físicas y mecánicas de las lechadas seleccionadas con las lechadas bases y concluir genéricamente, el desarrollo experimental.

### **PALABRAS CLAVES**

- Nanopartículas, lechadas de cemento, reología, resistencia a la compresión, bombeabilidad.



## INTRODUCCIÓN

Para la empresa Superior Energy Services es de gran importancia el diseño de lechadas de cemento, puesto que a raíz de éste, dependerán los sistemas de operación de cementación en los pozos. Por tal razón, la búsqueda de aditivos alternativos que ayuden a resaltar características únicas de las lechadas para cada tipo de operación va orientada hacia los nanomateriales ya que han mostrado un potencial viable en las lechadas de cemento.

En este proyecto investigativo se hace la participación de un ingeniero químico, donde sea capaz de aplicar sus conocimientos y habilidades para evaluar la adición de un aditivo en este tipo de lechadas y además, analizar el comportamiento presentado. Todo esto con el fin de optimizar las propiedades de las lechadas de cemento e ir fomentando el campo nanotecnológico en procesos industriales como lo es en el área de perforación de pozos de petróleo. Para este proyecto, el resultado final es lo más importante, pues define la utilidad del nano compuesto en este tipo de áreas por lo que se va a tener presente cualquier variable que afecte o beneficie el análisis del presente estudio.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el desempeño de un nano compuesto en las lechadas de cemento en la empresa Superior Energy Services a nivel laboratorio.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer el nano compuesto apropiado relacionado al mejoramiento del cemento.
- Seleccionar la concentración de nano compuesto en la lechada por medio de un desarrollo experimental de las propiedades reológicas.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la lechada seleccionada de acuerdo a la norma API-10B y 10A.
- Realizar un análisis comparativo de los costos unitarios entre las lechadas con la concentración óptima del nano compuesto y la base.

## 1. GENERALIDADES

La nano ingeniería abarca las técnicas de modificación de la estructura a escala nanométrica para desarrollar una nueva generación de compuestos del cemento con un mejorado en propiedades mecánicas y durabilidad con el fin de potencializar nuevas propiedades como son: baja resistividad eléctrica, alta ductilidad y un auto control al momento de fractura. Todo esto se puede con la incorporación de materiales a un tamaño nano escala (ej, nano partículas o nano tubos) para controlar su comportamiento y añadir nuevas propiedades que actualmente son mejoradas por compuestos similares al material del cemento, algunos agregados, aditivos, etc, y que mejoran la funcionalidad de la superficie la cual puede ser ajustada para que sea la promotora de interacciones.

Para entender mejor la ingeniería en la nano escala del cemento es necesario conocer el porqué de la necesidad de incorporar en su estructura nano materiales. Debido al arduo estudio que se ha realizado a la formación C-S-H (Calcio Hidrato de silicato). Un componente formado luego de la hidratación del cemento el cual es formado principalmente por la reacción generada por las faces silicato y el agua, es el principal agente aglutinante en la pasta del cemento y el responsable de las propiedades como la fuerza y contracción del material. Resolver la estructura de este material es vital para poder entender y predecir su comportamiento.<sup>1</sup>

La estructura del C-S-H ha sido objeto de estudios a través de instrumentación avanzada como la difracción de rayos X, también en la medición de áreas superficiales y la densidad de la estructura, como también los cambios de las isoterms del peso y longitud para caracterizar este material.<sup>2</sup> Su nano estructura es modelada, pues aún no se tiene claro como es el comportamiento a ese tamaño. El modelo que más se acerca a este material es el descrito en la siguiente figura (**Figura 1**). Y que la principal característica es interesarse en la capa de la estructura cuando es añadida agua a la capa interna del C-S-H.<sup>3</sup>

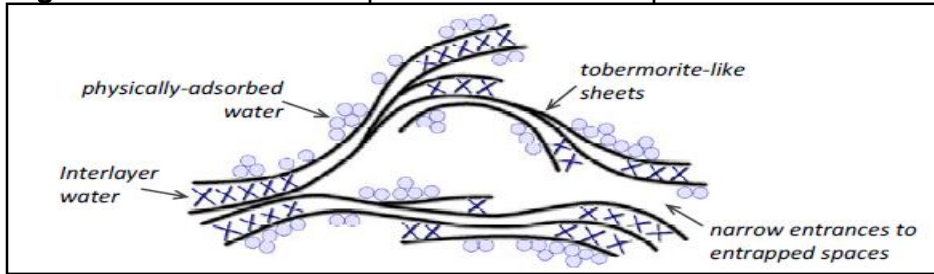
---

<sup>1</sup> RAKI Laila, et al. Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. En: Materials. Enero-Febrero, 2010, P. 2

<sup>2</sup> Ramachandran, V.S.; Feldman, R.F.; Beaudoin, J.J. Concrete Science; Heyden & Son Ltd: London, UK, 1981, pag. 54-89

<sup>3</sup> *Ibíd.*, p.4.

**Figura 1.** Modelo físico simplificado del cemento portland hidratado.



Fuente: SANCHEZ, F. Nanotechnology in concrete- A review. [Imagen]. USA, Mayo 2010, 4 p.

De este modo podemos observar que existen espacios vacíos dentro de la capa interna donde las formaciones de calcio, o los tetraedros de silicatos no están completamente compactados dando espacio a pequeños huecos que de alguna manera afectan substancialmente las propiedades mecánicas de la macro escala del cemento. El papel que hace el C-S-H en las propiedades mecánicas del material es de cierta forma parecer independiente el modulo intrínseco de elasticidad con la relación C/S y el grado de polimerización.<sup>4</sup> Que es debido a que existen dos tipos de C-S-H en la hidratación, de baja y de alta densidad teniendo el último una dureza mayor al de baja densidad.<sup>5</sup>

Investigaciones que se han realizado demuestran la dependencia que tienen las propiedades mecánicas del cemento hacia el C-S-H la aplicación de estudios realizados por la dinámica molecular y técnicas de minimización de la energía libre de gibbs, demuestran que el Modulo de Young incrementa con el incremento de la relación C/S del C-S-H.<sup>6</sup>

## 1.1 GENERALIDADES DE LOS NANO COMPUESTOS UTILIZADOS EN CEMENTO DE USO PETROLERO

Con la idea anterior, la implementación de estos nanoaditivos se ha venido aumentando debido a manejar nuevas tecnologías que mejoren en las operaciones industriales. En la industria petrolera, especialmente en el desarrollo de cementos con alto valor agregado para la perforación, los nano materiales han hecho parte clave para el mejoramiento de fluidos de perforación, herramientas para el fondo del pozo, cementación, registro de pozos, producción, estimulación etc.<sup>7</sup> Por esta razón, varios factores deben controlarse en un cemento para soportar las condiciones de

<sup>4</sup> BEAUDOIN, J.J. Feldman, R.F. Dependence of degree of silica polymerization and intrinsic mechanical properties of C-S-H on C/S ratio. In Proceedings of the 8th International Congress of Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, Brazil, 22–28 September 1986; Volume 3, p. 337–342.

<sup>5</sup> *Ibíd.*, p. 4

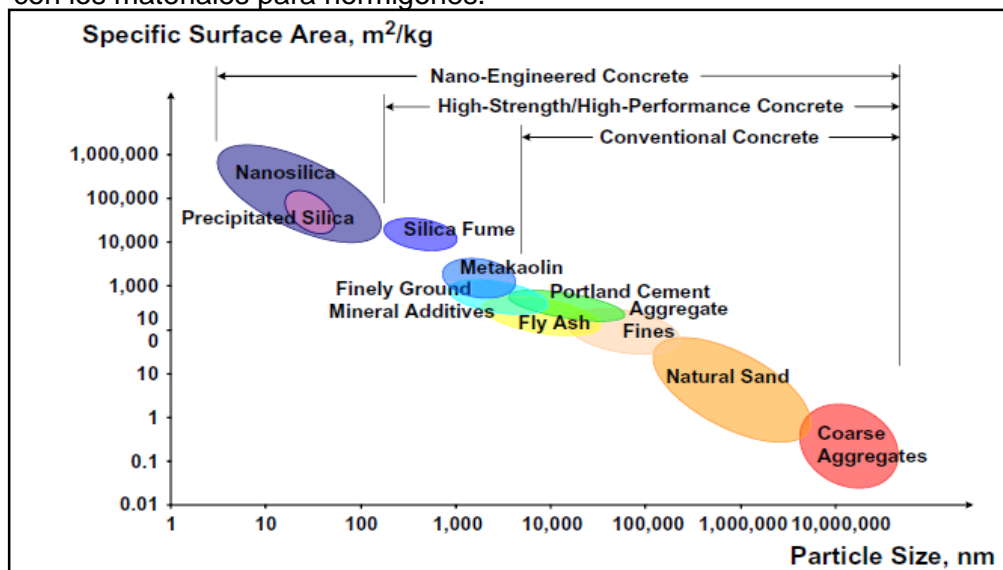
<sup>6</sup> PELLENQ, R.J.M. et al. Stability and elastic properties of tobermorite, a model of cement hydrate at the nanoscale. In Proceedings of the Materials Science and Technology Conference, Advances in Cement-Based Materials, Detroit, Michigan, MI, USA, 16– 20, September 2007; pp. 1–12.

<sup>7</sup> ABDELRAHMAN, I. Applications of Nanotechnology in the Oil & Gas Industry: Latest Trends Worldwide & Future Challenges in Egypt, *En*: SPE International. Abril, 2013. SPE 164716.

fondo y que son analizadas previamente en un laboratorio para corroborar el uso en la operación.

La inclusión de partículas a nano escala en pasta de cemento portland, morteros, o hormigón impacta considerablemente las funciones en el manejo del cemento en los diferentes campos de uso emergiendo nuevas propiedades de las cuales se han observado las siguientes: un temprano desarrollo de resistencia, incremento en la relación de resistencia a la compresión y esfuerzo tensil, una realza en la viscosidad y un incremento general en el desarrollo temprano de resistencia a la compresión, modificación en la reología del material, resistencia a ataques ácidos, etc.<sup>8</sup> Todos estas factores son mejorados a partir de las características físicas que los nano materiales poseen (**Figura 2**) como lo son su densidad, el empaquetado de la partícula, alta área superficial induciendo en procesos como en la nucleación en la reacción de hidratación, reforzamiento microestructural y en el papel que desempeña dentro de la formación C-S-H gel.<sup>9</sup>

**Figura 2.** Tamaño de partícula y área superficial específica relacionada con los materiales para hormigones.



Fuente: SANCHEZ, F. Nanotechnology in concrete- A review. [Imagen]. USA, Mayo 2010, 6 p.

A continuación se mostrará de manera simplificada las nanoherramientas que pueden ser objeto de estudio y que actualmente siguen en desarrollo dentro de la industria petrolera como partículas que logran tareas específicas al ser incluidas en fluidos o materiales para generar un mayor valor agregado en su aplicación. (**Cuadro 1**).

<sup>8</sup> SANTRA, Ashork, SPE, Halliburton. Influence of Nanomaterials in Oilwell Cement Hydration and Mechanical Properties, *En*: SPE International. Junio, 2012, SPE 156937.

<sup>9</sup> HENCHE, C. Análisis de la adición de Nano- Partículas en la microestructura de materiales de base cemento. Master en Ingeniería de estructuras, cementaciones y materiales. Madrid, España.: Universidad Politécnica de Madrid. Facultad de Ingeniería, 2011. 27-29p.

**Cuadro 1.** Ejemplos de la nanotecnología y las nano herramientas para la aplicación en la industria petrolera.

| <b>Nanotechnology</b>                | <b>Nano Tool</b>   | <b>Oilfield Application</b>                                      | <b>Key Challenges</b>  |
|--------------------------------------|--|--|--|
| <b>Nano electronics</b>              | Nano sensors   | Reservoir and flood front imaging                                | Long battery life under reservoir conditions   |
| <b>Nano optics</b>                   | Quantum dots   | Logging  | Transport through reservoir  |
| <b>Nano magnetism</b>                | Ferrofluids  | Reservoir/fracture imaging                                       | Development of MNP. EM source and receivers, data acquisition and signal processing software |
|                                      | Magnetic nanoparticles   | Produced water treatment   | Scale up from lab to field   |
| <b>Nano composites and fibers</b>    | Single Wall carbon tube. Fullerenes, multiwall carbon tube.  | New casing and tubing materials, drill bits, proppants           | Constructing and testing prototype   |
| <b>Surface active nano particles</b> | Functionalized nanoparticles   | EOR  | Transport through reservoir  |
| <b>Nano encapsulation</b>            | Chemical-alden nanoparticles, biodegradable polymeric nanoparticles, phase inversion nanoencapsulation | Acid stimulation, profile control, gas mobility control          | Scale up from lab to field   |
| <b>Nano thin film</b>                | Nanocomposite coatings   | Drill bits, drilling fluids, completion fluids, shale inhibition | Construction and testing prototype   |
| <b>Nano catalyst</b>                 | Nickel nanoparticles   | Catalyst for in-situ thermal upgrading of heavy oil              | Transport through reservoir, scale up  |

**Fuente:** SPE, Nanotechnology for Oilfield Applications: Challenges and Impact. [Imagen], Abu Dhabi, Noviembre 2016. 4 p.

Algunos tipos de estas partículas que han demostrado un sobresaliente aporte al cemento y que es comparado e incluso superior a la acción que brindan los aditivos usados comúnmente son la nano sílice y la nano alúmina. Como es de saber, la aceleración de la reacción de hidratación del cemento es un factor clave debido a que este puede mermar el tiempo de espera del cemento y que normalmente se usan compuestos con mayor frecuencia como lo son el cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) o silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ),<sup>10</sup> Notablemente el campo de la nanomodificación abarca no solo la nano sílice si no, un innumerable de compuestos que a base de

<sup>10</sup> DIAZ, J. Cementación de pozos de petróleo. SUPERIOR ENERGY SERVICES. Junio 2012. 11 p.

reportes científicos y experimentales comprueban su afinidad en la búsqueda de un cemento mejorado.

## 1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS LECHADAS DE CEMENTO EN EL LABORATORIO

Una lechada de cemento se basa principalmente por poseer cemento, agua y aditivos. Se caracteriza por desarrollar propiedades específicas al momento de fraguarse. En la operación de cementación de pozos de petróleo, es importante garantizar la calidad de la lechada, ya que esta, asumirá un rol positivo o negativo al momento de ser aplicado en el pozo. Por esto, previamente en el laboratorio se diseñan las lechadas donde se evalúan y analizan sus propiedades simulando en todo tiempo las condiciones del pozo. Para esto se debe tener en cuenta las normas API 10A y 10B que proveen las recomendaciones mínimas al ejecutar las pruebas que se deben someter la lechada y las especificaciones del cemento y materiales que se le añadan en el proceso de diseño. A partir de esto se construirá una lechada que contenga las características específicas requeridas para un trabajo de cementación.

A continuación se mostrarán las características del diseño.

**1.2.1 Densidad<sup>11</sup>.** Es una propiedad que indica la masa por unidad de volumen de la lechada, usualmente es expresada en la cantidad de libras en un galón (ppg). La densidad depende de la cantidad de cemento y agua. Los rangos en los cuales oscilan los valores de densidad para las lechadas de cemento de uso petrolero son de 11 – 18,5 ppg. Estas densidades se utilizan en referencia a la densidad del agua que es 8.34 ppg y la gravedad específica de los cementos clase G que es 3.18.

**1.2.2 Rendimiento<sup>12</sup>.** Es la propiedad de la lechada de cemento que indica el volumen que ocupa la lechada de cementación (cemento, agua y aditivos) una vez se haya realizado la mezcla, se expresa en pies cúbicos por saco ( $\text{ft}^3/\text{Sx}$ ) y esta propiedad depende del cemento.

**1.2.3 Tiempo de bombeabilidad<sup>13</sup>.** Es la propiedad que define el tiempo en el que una lechada se encuentra en estado líquido (a T y P simuladas del pozo) y puede ser bombeada y ser desplazada a través del anular antes que empiece a fraguarse. Las unidades de consistencia son las unidades Bearden (Bc) que relacionan al torque que el fluido le hace a una paleta; cuando se alcanzan los 70 Bc se considera que hasta ese valor la lechada es bombeable.

---

<sup>11</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES. Curso Básico/ Intermedio De Cementación Para Ingenieros. 2015. p. 74

<sup>12</sup> *Ibíd.*, p. 76.

<sup>13</sup> *Ibíd.*, p. 81.

**1.2.4 Reología**<sup>14,15</sup>. Es el estudio de la materia que fluye y se deforma, es aplicable en el diseño de lechadas de cemento para analizar las propiedades de mezclabilidad y bombeabilidad. En la práctica, la reología depende de dos propiedades del fluido, la viscosidad plástica (PV) y el punto cedente (TY); que es la resistencia que opone el fluido a fluir y el empuje mínimo necesario para que el fluido entre en movimiento, respectivamente.

**1.2.5 Fuerza de compresión**<sup>16</sup>. Corresponde a la resistencia que presenta el cemento cuando es sometido a un tipo de estrés para generar algún tipo de deformación o en cuyo caso, la factura. Esta propiedad de la lechada se cuantifica en unidades de libras sobre pulgadas cuadradas (psi). Según la Ing. Angélica Ortiz (\*) en las pruebas realizadas para la obtención de resistencia a la compresión, el cemento debe ser lo suficientemente resistente como para sostener el revestimiento (se logra a los 50 psi), y para cuando comience el proceso de perforación el cemento ya debe poseer una mayor resistencia a la compresión (la cual se logra a los 500 psi). Este tiempo de espera por parte de la operación se le conoce como el tiempo de espera del cemento (WOC).

**1.2.6 Pérdida de filtrado**<sup>17</sup>. La pérdida de filtrado es un fenómeno que ocurre cuando hay una deshidratación del cemento debido a que sobre la lechada, actúan presiones y temperaturas. La deshidratación que tenga la lechada debe ser controlada, ya que puede afectar de manera negativa las operaciones de cementación y además, cambiar las características de la lechada. La cantidad de fluido que se deshidrata depende del tipo de trabajo que se realiza. En trabajos de cementación primaria mantiene un rango de 25 a 50 API, trabajos con liner, un valor menor a 30 API. Las unidades son los ml de fluido para 30 min de duración de la prueba multiplicado por dos.<sup>18</sup> Según la norma, las unidades de la pérdida de filtrado son ml por cada 30 minutos expuestos a condiciones pero que lo simplifican utilizando unidades API *Fluid loss*<sup>19</sup>.

**1.2.7 Agua libre.**<sup>20</sup> La cantidad de agua libre es el parámetro que describe la tendencia que tiene agua de separarse de la lechada. Según la norma, se realiza en una probeta de 250 ml durante dos horas.

Para todas estas características es de gran importancia llevar el concepto a la hora de realizar el desarrollo experimental, pues para cada dato obtenido el análisis

---

<sup>14</sup> CLARK, C. R. Mud Displacement with Cement Slurries. 1973. p. 28

<sup>15</sup> LEON LOYA, Gilberto. Reología De Los Fluidos De Perforación Y Reparación De Pozos. p. 30

<sup>16</sup> SCHLUMBERGER. Sección 8: Cementación. Drilling School. 2011. p. 17.

<sup>17</sup> *Ibid.*, p. 30

(\*) ORTIZ, Angélica. Laboratorio de cementación de Superior Energy Services. Villavicencio. Colombia. Observación inédita, 2017.

<sup>18</sup> *Ibid.*, p. 30.

<sup>19</sup> API. Recommended Practice for Testing Well Cements, 10B-2, 2011.

<sup>20</sup> *Ibid.*, p. 30.



puede hacerse inmediato e ir sacando conclusiones del diseño de la lechada a evaluar.

### 1.3 ADITIVOS UTILIZADOS EN LA CEMENTACIÓN

Para la empresa Superior Energy Colombia<sup>21</sup> el diseño de las lechadas dependen sustancialmente del tipo de trabajo que se desea realizar, para así desarrollar una lechada útil en la operación de cementación. Por esto, es necesario de compuestos que ayuden a obtener una lechada con las especificaciones requeridas para el tipo de trabajo a realizar. Estos compuestos son denominados “aditivos” y actúan en el proceso de hidratación del cemento obteniendo, macroscópicamente una mejora en las propiedades que se desean. De tal forma que las características de la lechada tales como el incremento de la resistencia a la compresión, el aumento del tiempo de fraguado, el control de la pérdida de fluido, etc, aumenten o disminuyan según el requerimiento del trabajo. Entre los aditivos que mayormente se utilizan en las lechadas de cemento son los siguientes:

**1.3.1 Retardadores<sup>22</sup>.** Son un tipo de aditivos que funcionan desacelerando la hidratación del cemento; prolongando el tiempo de fraguado del cemento y como consecuencia el tiempo de bombeabilidad (thickening time). El tiempo de fraguado es inversamente proporcional a la temperatura, de esta manera el cemento tiende a fraguarse prematuramente. Hay dos tipos de retardadores, uno que trabaja a altas temperaturas y otro a bajas temperaturas.

**1.3.1.1 Acelerantes<sup>23</sup>.** Son utilizados para hidratar el cemento y funcionan como partículas que intervienen en la matriz granular aumentando el contacto entre las moléculas de agua y cemento y que como consecuencia, acortar el tiempo de fraguado del cemento y reducción del WOC (tiempo de espera del cemento).

**1.3.2 Extendedores.** Son compuestos que reducen la densidad de la lechada; debido a su alta área superficial y baja densidad reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen fraguado.

**1.3.2.1 Controladores de filtrado.<sup>24</sup>** Es un aditivo que ayuda en el control de pérdida de filtrado reteniendo la cantidad de agua que se genera cuando la lechada es sometida a las presiones y temperatura del pozo. En general, es el aditivo encargado de: mantener constante una relación sólido – líquido dentro de la lechada, disminuir el riesgo de invasión al pozo y ayudar a que las propiedades reológicas sean constantes.

---

<sup>21</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 90

<sup>22</sup> Ibid., p. 90.

<sup>23</sup> Ibid., p. 90.

<sup>24</sup> SCHLUMBERGER, Op., Cit., p. 7.

**1.3.2.2 Dispersantes.**<sup>25</sup> Son aditivos que reducen la viscosidad de la lechada mejorando de esta manera las propiedades del flujo, permitiendo lograr un flujo turbulento a una presión circulante menor (previniendo pérdidas de circulación).

**1.3.2.3 Controladores de agua libre.**<sup>26</sup> Se emplean cuando existe agua libre en la lechada causada por la inestabilidad de la misma. Funcionan manteniendo la homogeneidad, evitando la decantación de los componentes pesados.

**1.3.2.4 Controladores de mitigación de gas.** Son aditivos encargados de impermeabilizar el cemento evitando el flujo de gas en el momento en que la lechada está pasando de estado líquido a estado sólido (gelificación).

**1.3.2.5 Densificantes.**<sup>27</sup> Son aditivos, generalmente inertes, de alto peso específico que en la lechada de cemento permiten aumentar la densidad del cemento para que, de esta manera incremente la presión hidrostática ejercida por la lechada; se utiliza mayormente en zonas sobre-presurizadas.

**1.3.2.6 Antiespumantes.**<sup>28</sup> Los antiespumantes son aditivos que minimizan la cantidad de aire contenida en la lechada cuando se genera al momento de mezclarla ya que se debe a las altas velocidades a las que se somete. Este aire atrapado en el cemento puede causar el fenómeno cavitación sobre la bomba y causar problemas en la cementación

---

<sup>25</sup> HALLIBURTON ENERGY INSTITUTE. Libro De Trabajo Del Estudiante Cementación I. Sección 01. Estados Unidos de America: 2001. p. 15

<sup>26</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., p. 92.

<sup>27</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., p. 92.

<sup>28</sup> *Ibíd.*, p. 92.

## 2. SELECCIÓN DEL NANOCOMPUESTO

En este trabajo se abarcarán cuatro tipos de nano compuestos conforme a la bibliografía investigada y al desempeño visto en las experimentaciones realizadas en los artículos científicos citados. Se procederá a seleccionar un nano compuesto para el desarrollo del trabajo por medio de dos métodos de selección y así escoger el apropiado.

Los nano compuestos que se tendrán en cuenta para la investigación son: Nano Alúmina, nano Sílice, nano tubos de carbono (MWCNT) y nano Arcilla, seleccionados por su alta participación como aditivos en investigaciones de lechadas de cemento de uso petrolero<sup>29</sup>. Para la selección del nano compuesto, esencialmente se estudiarán las propiedades que mejora la lechada de cemento, entre ellas están: el comportamiento reológico, resistencia a la compresión, resistencia a la ruptura, las propiedades mecánicas (Modulo de Young, Modulo de Bulk, relación de Poisson), trabajabilidad y además, se hará un breve resumen del nano compuesto a fin de atribuir parámetros en la posterior selección del nano material.

Para el proceso de selección del nano compuesto, también se tendrán en cuenta los costos comerciales por unidad de cada producto puesto a que será un parámetro clave en la estructuración de la matriz de selección.

### 2.1 NANO COMPUESTOS DE ESTUDIO

**2.1.1 Nano Alúmina.** Compuesto de formula molecular Oxido de Aluminio  $Al_2O_3$  que es obtenido a partir de diferentes métodos físicos y químicos. El principal método consiste en pulverizar la materia prima (mineral de alúmina) por molienda, luego se añaden metales y/o cerámicos como cobre, silicio, magnesio y hierro en estado polvo y mezclado a proporciones requeridas, el acople de estos materiales se realiza a partir de una molienda reformada (molienda de bolas), posteriormente inyectada a moldes y compactada con una prensa para producir una estructura deseada. Finalmente es sometida a altas presiones y temperaturas por tiempos de ajuste prolongados.<sup>30</sup>

---

<sup>29</sup> ABDELRAHMAN, I. Applications of Nanotechnology in the Oil & Gas Industry: latest Trends Worldwide & Future Challenges in Engypt. En: SPE, ResearchGate, Egypt, 2013.

<sup>30</sup> DINESH, K. A Review on Properties, Behaviour and Processing Methods for Al-Nano  $Al_2O_3$  Composites. En: El Sevier, Procedia Materials Science, India, 2014, 1 p.

## 2.2 PROPIEDADES QUE APORTA AL CEMENTO

**2.2.1 Mecánicas.** Investigaciones realizadas con la Nano alúmina relacionada con el mejoramiento del material especifican que para mejorar su actividad en la matriz del cemento es necesario contener otros tipos de ingredientes que estimulen la acción del nano material, ejemplo de eso OLTULU<sup>31</sup> incorporo a un mortero 5% de humo de sílice con 1,25% de Nano Alúmina, los resultados mejoraron la resistencia a la compresión a 11%, 13,4%, 20,2%, 21,7% y 21,4% a tiempos de 3,7,28,56 y 180 días respectivamente. También realizo esta misma investigación pero aplicando *fly ash* a una concentración de 15% y manteniendo 1,25% de Nano Alúmina en WOC (tabla 2). En los resultados se encontró que incrementaba pero en porcentajes mucho más pequeños que comparando con el uso de humo de sílice. (2,7%, 3,9%, 4,3%, 5,6%, 5,0% después del curado para 3, 7, 28, 56 y 180 días respectivamente)<sup>32</sup>.

**2.2.2 Trabajabilidad.** En su análisis micro estructural en las muestras en las cuales se le adicionaron este nano compuesto, mostró una densificación de la matriz del cemento correspondiendo a la eficiente dispersión que tuvo el material en la matriz del cemento, de tal forma que su bombeabilidad es positiva teniendo en cuenta el comportamiento físico y reológico de las lechadas evaluadas.

**2.2.3 Reología.** En la reología CONTRERAS C, et al.<sup>33</sup> Analizó la inclusión de nano Alúmina en cemento clase H de uso petrolero y encontró que los valores de viscosidad plástica y punto cedente (**Tabla 1**) promedios mostraba una significativa disminución en comparación con el sistema de referencia concluyendo que se debía a una menor fricción entre las partículas mostrada en la muestra con el nano aditivo manifestando también una mayor capacidad de desplazamiento debido a que es necesario aplicar menores esfuerzos de corte para iniciar su movimiento.

---

<sup>31</sup> OLTULU, M. Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume., En: Materials Science and ENgineering, 201, p. 7012-7019.

<sup>32</sup> OLTULU, M. Effect of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study, En: Energy and building, 2013, vol. 58, p. 292-301.

<sup>33</sup> CONTRERAS, C. y RUBEN, D. Estudio del comportamiento mecánico del cemento petrolero clase H aditivado con nanomateriales. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Caracas, Venezuela: Ilustre Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.

**Tabla 1.** Efecto de la Nano Alúmina en las propiedades sobre el cemento.

| % de NA     | Propiedades                           | Muestra Base | Muestra con NA | % de mejora | Referencia                 |
|-------------|---------------------------------------|--------------|----------------|-------------|----------------------------|
| 0.5         | Resistencia a la ruptura (MPa)        | 3.1          | 3.48           | 12.3        | (P. JAISHANKAR. 2017)      |
| 0.75        |                                       |              | 3.72           | 20.0        |                            |
| 1           |                                       |              | 3.89           | 25.5        |                            |
| 0.5         | Resistencia a la compresión (MPa)     | 26.2         | 28.2           | 6.21        | (P. JAISHANKAR. 2017)      |
| 0.75        |                                       |              | 32.3           | 24.13       |                            |
| 1           |                                       |              | 36.8           | 43.57       |                            |
| - (DILUIDO) | Viscosidad plástica (cP)              | 17.25        | 17.25          | 0           | (CONTRERAS C. Et al. 2015) |
| - (DILUIDO) | Yield Point (lb/100 ft <sup>2</sup> ) | 3.75         | 3.75           | 0           | (CONTRERAS C. Et al. 2015) |

Fuente: Recopilación de datos basados en bibliografía encontrada por los autores, 2017.

**2.2.4 Nanotubos de carbono (MWCNT).** Son láminas de grafeno enrolladas sobre sí mismas, descubierta en 1991 por Sumio Iijima cuando estudiaba la síntesis de fullerenos. (Molécula compuesta por carbonos adaptando una figura geométrica esférica, tubular, elipsoide o anillada).<sup>34</sup>

Debido a que las hojas de grafeno pueden tomar distintas formas al ser enrolladas pueden existir diferentes tipos de nanotubos de carbono. (**Figura 5**) (nanofibras, nano grafito, nano carbono negro, etc.) En esta investigación se resaltara mayoritariamente el uso de nanotubos de carbono en multicapa puesto que este material compromete su uso en la industria del cemento significativamente.

Su estudio en la aplicación del cemento depende principalmente de cuatro fundamentales factores, el primero es el tipo de CNT usado y la relación de aspecto (es la relación que existe entre sus dimensiones), el segundo el método de dispersión en la matriz del cemento, el tercero es el rendimiento del cemento puro y cuarto es la funcionalidad química que posea en la capa del nanotubo de carbono.<sup>35</sup>

<sup>34</sup> UNIVERSITAT JAUME I. Alotropos del carbono: Nanotubos de carbono. Disponible en: <https://sites.google.com/a/uji.es/alotropos-del-carbono/nanotubos-de-carbono>.

<sup>35</sup> RAHMAN, M.K. et al. Properties of Oil Well cement Reinforced by Carbon Nanotubes. En: SPE, International Oilfield Nanotechnology Conference, Noordwijk, Netherlands, 12-14 de Junio 2012, SPE 156985

**Tabla 2.** Propiedades de los materiales de carbono a escala nano.

| Properties   | CNTs                        |                           | CNFs                         | NGPs                        | NCB                         |
|--|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|  | MWCNTs                      | SWCNTs                    |                              |                             |                             |
| <b>Elastic Modules/TPa</b>   | 0.3-1                       | 1                         | 0.4-0.6                      | 1 (in plane)                | /                           |
| <b>Strength/GPa</b>  | 10-60                       | 50-500                    | 2.7-7.0                      | 10-20                       | /                           |
| <b>Electrical resistivity/<math>\mu\Omega\cdot\text{cm}</math></b> | 5-50                        |                           | 55                           | 50 (in plane)               | 0.22 $\Omega\cdot\text{cm}$ |
| <b>Dimensions</b>  | Diameter: 2-30nm            | Diameter:0.75-3nm         | Diameter: 50-200nm           | Diameter:1-20 $\mu\text{m}$ | Diameter: 10-400nm          |
|  | Length:0,1-50 $\mu\text{m}$ | Length:7-50 $\mu\text{m}$ | Length: 50-100 $\mu\text{m}$ | Thinckness:~30nm            | /                           |
| <b>Surface área/m<sup>2</sup>/g</b>                                | >400                        |                           | ~200                         | ~2630                       | ~1056                       |
| <b>Aspect ratio</b>  | ~1000                       |                           | 100-500                      | 50-300                      | /                           |

Fuente: KHITAB, A. et al, Advanced Research on Nanotechnology for Civil Engineering Applications, [Imagen], Pakistan, 2016. p. 49.

## 2.3 PROPIEDADES QUE BRINDA AL CEMENTO

**2.3.1 Mecánicas.** Recientemente la empresa prestadora de servicios petroleros BAKER HUGHES SOLUTIONS<sup>36</sup> realizo un estudio con MWCNT a concentraciones de 0.1%, 0.25% y 0.5% por WOC en mezclas de cemento clase G con aditivos que normalmente se impondrían en el material y se comprobó que a pequeñas cantidades de nano carbono con la superficie tratada con un grupo funcional (-COOH) las propiedades mecánicas del cemento obtenían una mejora significativa con respecto a la mezcla base. A partir del instrumento UCA (ultra Sonic cement Analyzer) se realizó el test de resistencia a la compresión y se observó que bajo 290 °F y 4900 Psi el espécimen que contenía 0.1% incrementó un 19 % con respecto a la base mezcla (**Tabla 3**) y que además de esto, desarrollo la resistencia a la compresión en tiempo de 3,5 horas más corto que la mezcla base a 2.000 PSI.

**2.3.2 Trabajabilidad.** Relacionado al efecto que trae en la trabajabilidad de materiales cementosos debe ser tenido en cuenta el método de dispersión pues en el trabajo realizado por Al-RUB<sup>37</sup> se encontró que al adicionar CNTs tratados con el grupo funcional incremento la trabajabilidad de la pasta de cemento comparado con los CNTs no tratados debido al incremento por la humectabilidad causa por el grupo -COOH y -OH. En este estudio se analizó también las formas efectivas de dispersión del nano carbono y la nano sílice dentro de la matriz del cemento, usando molino de bolas de alta velocidad y en una solución acuosa de surfactantes agitada

<sup>36</sup> KHAN, W.A. Et al. MWCNT for enhancing mechanical properties of oil well cement for HPHT Applications, En: SPE, IADC, University of Petroleum & Minerals. Abu Dhabi, Enero 2016

<sup>37</sup> Ibid., p. 1-7.

por ultrasonido (sonicación). Y se determinó que a partir del método de mezclado y dispersado dependen las propiedades mecánicas del cemento.<sup>38</sup>

**2.3.3 Reología.** En el comportamiento reológico KHAN W.<sup>39</sup> incorporó MWCNT disperso en un surfactante en muestras de cementos clase G a bajas concentraciones, el cual mostraba un incremento en la viscosidad plástica (**Tabla 3**) del cemento pero concluyeron que no afectaba considerablemente la bombeabilidad de las lechadas, también mostro un comportamiento tixotrópico causado por la gelificación del material en estado estático corroborando un valor pequeño de punto cedente para retomar nuevamente el fluido en movimiento.

**Tabla 3.** Efecto de la Nano Tubos de Carbono en multipared (MWCNT) en las propiedades sobre el cemento.

| % de NTC           | Propiedades                           | Muestra Base (48h) | Muestra con MWCNT (48h) | % de Aumento          | Referencia                |
|--------------------|---------------------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 0.1<br>0.3         | Resistencia a la ruptura (Mpa)        | 2.61               | 3.47<br>2.97            | 33<br>14              | (JÚNIA, N. P. Et al 2017) |
| 0.1<br>0.25<br>0.5 | Resistencia a la compresión (PSI, %)  | 6214               | 7274<br>6718<br>6679    | 17.1<br>8.1<br>7.5    | (KHAN, W.A. Et al. 2016)  |
| 0.1<br>0.25<br>0.5 | Viscosidad plástica (cP)              | 131.14             | 278<br>277<br>276       | 120<br>112.2<br>104.6 | (KHAN, W.A. Et al. 2016)  |
| 0.1<br>0.25<br>0.5 | Yield Point (lb/100 ft <sup>2</sup> ) | 9.65               | 6<br>8<br>11            | -37.8<br>-17.1<br>14  | (KHAN, W.A. Et al. 2016)  |

Fuente: Recopilación de datos basados en bibliografía realizados por los autores, 2017.

**2.3.4 Nano Sílice.** Compuesto de formula molecular SiO<sub>2</sub> en la naturaleza existe como arena, vidrio, cuarzo, etc. La sílice que se encuentra naturalmente esta en forma cristalina pero cuando es obtenida de forma sintética, se presenta de manera amorfa, normalmente cuando se utiliza en aplicaciones químicas, se extrae sintéticamente de una solución de silicato.

El proceso más común para la síntesis de este compuesto es el de SOL-GEL el cual implica dos procesos simultáneos como la hidrolisis y la condensación. DE<sup>40</sup> et al. Realizó el procedimiento de síntesis por medio de la precipitación donde usa agua acida (pH 5,5 aproximadamente), solución de silicato y ácido sulfúrico. Normalmente

<sup>38</sup> YAKOVLEV, G. Et al. Modification of cement matrix using carbon nanotube dispersions and nanosilica. En: Procedia Engineering, ScienceDirect, Russia, 2017, p 1261-1269.

<sup>39</sup> KHAN, W. Op. cit., p. 1-7.

<sup>40</sup> E.H. De, G.U. De, H.A. De, K.R. De, S.M. De, US Patent 5,859,117, 1997.

las partículas que se obtienen por el método mencionado anteriormente tiene un diámetro de aproximadamente 50nm pues tiene una forma casi esférica.

## 2.4 PROPIEDADES QUE APORTA AL CEMENTO

**2.4.1 Mecánicas.** Como propiedades de la NS JALAL<sup>41</sup> et al, propuso experimentación para analizar las propiedades mecánicas, reológicas, de durabilidad y micro estructurales con la incorporación de micro partículas y nano partículas de SiO<sub>2</sub>, utilizo medidas entre micro-sílice, nano-sílice y una combinación de las dos, con un porcentaje de 10%( micro-sílice), 2%( nano-sílice), y 10% (micro-sílice) 2%( nano-sílice). Con diferentes aglutinantes. . Los resultados arrojados por dicha investigación favorece la mezcla de estos dos tamaños de la nano partícula para potencias las propiedades mecánicas.

**2.4.2 Trabajabilidad.** La trabajabilidad de este material incluye varias pruebas que demostraron que la fluidez de la mezcla cemento-nano compuesto es baja<sup>42</sup>. HOSSEINI<sup>43</sup>, consideró algo similar donde obtuvo a diferentes concentraciones las cuales son 1,5% y 3,0% de NS una disminución de la trabajabilidad de aproximadamente 47% y 70,5% respectivamente. Este parámetro que se menciona en el inciso 4.1.3, es de gran importancia pues influye en el bombeo del fluido a través del revestimiento que se desea cementar según la norma API 10B y 10A.

**2.4.3 Reología.** En el estudio del comportamiento que pueda generar en las lechadas de cemento, CARLOS, M. realizaron una evaluación de nano sílice en lechadas de cemento clase G para la empresa Superior Energy Services y concluyeron que el comportamiento reológico del cemento solo se ve mejorado cuando es evaluado a temperatura circulante, a temperatura ambiente, muestra un comportamiento similar al blanco determinando que el nano material trabaja en un rango de temperatura entre la ambiente y la circulante (170°F)

---

<sup>41</sup> JALAL, M. et al. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> micro and nanoparticles, En: Iran, Septiembre 2011, 389-400.

<sup>42</sup> ZHANG, L. et al. Nano-Scale Behavior and Nano-Modification of Cement and Concrete Materials. En: Advanced Research on Nanotechnology for Civil Engineering Applications, 2016, p.52

<sup>43</sup> HOSSEINI, P. et al. Developing Concrete Recycling Strategies by Utilization of Nano-SiO<sub>2</sub> Particles. En: Waste and Biomass Valorization. April 2011.



**Tabla 4.** Propiedades de la Nano Sílice sobre materiales de cemento.

| % de NS         | Propiedades                            | Muestra Base | Muestra con NS       | % de Aumento             | Referencia              |
|-----------------|--|--------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 3<br>6<br>9     | Resistencia a la ruptura (Mpa, 7d)     | 6.15         | 7.06<br>6.58<br>7.54 | 15.80<br>7<br>22.6       | (HENCHE, C. 2011.)      |
| 1<br>2,5<br>4,5 | Resistencia a la compresión (PSI, 24h) | 2522         | 2742<br>2797<br>3051 | 8.72<br>10.90<br>21.00   | (CARLOS, M. Et al 2016) |
| 1<br>2.5<br>4.5 | Viscosidad plástica (cP)               | 158          | 185<br>198<br>237    | 17.10<br>25.31<br>50.00  | (CARLOS, M. Et al 2016) |
| 1<br>2.5<br>4.5 | Yield Point (lb/100 ft <sup>2</sup> )  | 46           | 41<br>52<br>63       | -10.87<br>13.04<br>37.00 | (CARLOS, M. Et al 2016) |

Fuente: Recopilación de datos basados en bibliografía realizados por los autores, 2017.

**2.4.4 Nano Arcilla.** Es un nano material compuesto por un mineral de arcilla con espesores de capa de un nanómetro, su uso se ha impuesto debido a su capacidad de relleno polimérico dentro de matrices para formar nuevos compuestos, posee un alto rendimiento en procesos de producción de algún material, se utiliza como absorbedor de aceites, sensores o modificadores reológicos de pinturas, plásticos, grasas, cementos, etc.<sup>44</sup>

Entre las nano arcillas más reconocidas en el estudio de investigaciones sobre el cemento está la montmorillonita que es caracterizada por sus propiedades tixotrópicas y ser hidrofílica lo que significa intervención de un medio dispersante para su acoplamiento en el material<sup>45</sup>, también se encuentra la zeolita como un material capaz de hidratarse y deshidratarse de manera reversible.<sup>46</sup>

## 2.5 PROPIEDADES QUE APORTA AL CEMENTO

**2.5.1 Mecánicas.** Los estudios realizados por MURTAZA M.<sup>47</sup> en lechadas de cemento con este nano aditivo ( 1%, 2% y 3%), midieron la resistencia a la compresión por método destructivo y método no destructivo, descubriendo un prematuro desarrollo a la resistencia con un contenido de 1% debido a la rápida

<sup>44</sup> AGUILAR, J. Capítulo 2. Nanocompuestos de matriz polimérica y nanoarcillas, Disponible en: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6033/59/CAP%C3%8DTULO%202.docx>, 2006.

<sup>45</sup> SCHLUMBERGER. Montmorillonita, Disponible en: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/m/montmorillonite.aspx>.

<sup>46</sup> MUNDACA, R. y CANALES, P. Uso de zeolita natural como mejorador de las propiedades físicas y químicas del suelo. Disponible en: <http://zeolitas.blogspot.com.co/2008/05/antecedentes-generales.html>, mayo 2008.

<sup>47</sup> MURTAZA, M. et al, Effect of Nanoclay on Mechanical and Rheological Properties of Oil Well Cement Slurry Under HPHT Environment. En: International petroleum technology conference. Tailandia. Noviembre 2016.

hidratación comparada con la mezcla base; un incremento significativo se mostró a las 18 Horas con una diferencia positiva de casi 1.000 Psi.

En la resistencia a la ruptura, se analizaron la mismas concentraciones de NC en pastas de cemento Portland donde mostró un incremento del 32.1% (tabla 6) a una concentración de 1%; el aumento de la resistencia a la ruptura, disminuía al aumentar la concentración de NC.

**2.5.2 Trabajabilidad.** Para Murtaza et al.<sup>48</sup> Concluyo que con base en la rápida influencia que tiene la nano-arcilla en la matriz del cemento incrementando rápidamente la actividad puzolanica puede tener una eficiente bombeabilidad a la hora de analizar este prueba.

**2.5.3 Reología.** MURTAZA<sup>49</sup> et al, realizó una serie de experimentos para la evaluación de las propiedades reológicas de la nano-arcilla en el cemento a condiciones HPHT, donde se obtuvo una mejora de más del 15% a un porcentaje del 1% de NC comparado a la mezcla base con aditivos; el punto cedente no se vio afectado con esta concentración. En la investigación se demostró que los datos presentes en la **Tabla 5** representan un comportamiento tixotrópico en la lechada causado por la NC.

**Tabla 5.** Propiedades Mecánicas de la Nano Arcilla sobre materiales de cemento.

| Propiedades                       | Muestra Base (24h) | Muestra con NC (24h) | % de Aumento | % de NC | Referencia                |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------|--------------|---------|---------------------------|
| Resistencia a la compresión (PSI) | 5781               | 6690                 | 15.7         | 1       | (MURTAZA, m. Et al. 2016) |
|                                   |                    | 6206                 | 7.4          | 2       |                           |
|                                   |                    | 6093                 | 5.4          | 3       |                           |
| Resistencia a la ruptura (Mpa,)   | 5.42               | 7.16                 | 32.1         | 1       | UDDIN, F. et al. (2015)   |
|                                   |                    | 7.01                 | 29.3         | 2       |                           |
|                                   |                    | 6.76                 | 24.7         | 3       |                           |
| Viscosidad Plástica (cP)          | 131.1              | 205.5                | 56.8         | 1       | (MURTAZA, m. Et al. 2016) |
|                                   |                    | 229                  | 74.5         | 2       |                           |
|                                   |                    | 244.6                | 86.6         | 3       |                           |
| Yield Point (lb/100ft2)           | 9.6                | 9.4                  | -2.1         | 1       | (MURTAZA, m. Et al. 2016) |
|                                   |                    | 12.6                 | 31.3         | 2       |                           |
|                                   |                    | 16.4                 | 70.8         | 3       |                           |

**Fuente:** Recopilación de datos basados en bibliografía realizados por los autores, 2017.

<sup>48</sup>Ibíd., p. 5-7.

<sup>49</sup> Ibíd., p. 1-7.

## 2.6 COSTOS COMERCIALES DE LOS CUATRO NANO COMPUESTOS

A continuación se mostrara una tabla con los precios comerciales de productos escogidos, se colocaron los más relevantes para su uso y aporte en la investigación. Cabe resaltar que los precios varían dependiendo del fabricante, la empresa, el método de dispersión del material, la pureza y relación de aspecto para la mayoría de productos. (**Tabla 6**).

**Tabla 6.** Precios comerciales de los nanos materiales analizados.

| Nano Material | Referencia                                    | Cantidad (kg)      | Precio (US) | Fuente                          |
|---------------|---|--------------------|-------------|---------------------------------|
| NA            | Aluminum Nanopowder purity >99%               | Oxide 1,00         | \$ 46,40    | NanoparTech                     |
|               | Alpha Aluminum Nanoparticle Dispersion        | Oxide Aqueous 1,00 | \$ 85,00    | US Research Nanomaterials, Inc. |
| NC            | Zeolite Nanopowder purity >99%                | 1,00               | \$ 1.620,00 | NANOSHEL                        |
|               | Montmorillonite clay purity >99%              | 1,00               | \$ 607,00   | NANOSHEL                        |
| NS            | Nano Silica poder                             | 1,00               | \$ 15,48    | Adinath Industries              |
|               | Oxide Silica Nanoparticles dispersion (water) | 1,00               | \$ 109,00   | US Research Nanomaterials, Inc. |
| MWCNT         | AQUACYL AQ0302                                | 1,00               | \$ 50,12    | NanoCyl SA                      |
|               | MWCNT BPDFL5-20-COOH                          | 1,00               | \$ 600,00   | NanoLab Inc.                    |
|               | MWCNT en polvo                                | 1,00               | \$ 278,00   | NanoCyl SA                      |
|               |   | 1,00               | \$ 390,00   | US Research Nanomaterials, Inc. |

### 3. MATRIZ DE SELECCIÓN

En el presente capítulo, se hará selección del nano compuesto óptimo para el desarrollo experimental del trabajo. Se hará uso de una matriz de selección ya que facilita la elección del nano compuesto evitando complicaciones y preferencias al obtener el resultado; se realizará teniendo en cuenta los parámetros estudiados en el capítulo anterior y que se explican en el inciso 3.1.

El análisis se manejará utilizando dos tipos de matrices, determinística y probabilística, la primera se tendrá en cuenta el juicio de expertos y la segunda una distribución estadística realizada por medio de una simulación de Monte Carlo en el programa *Crystal Ball*.

#### 3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN (CO)

En este caso son parámetros que, según el peso de importancia que tenga cada uno, serán objeto de análisis para la selección del nano compuesto, estos criterios son:

- **Resistencia a la compresión.** criterio que resalta la capacidad del cemento al obtener una determinada resistencia a cualquier tipo de estrés al que sea sometido.
- **Resistencia a la ruptura.** Criterio que resalta el punto máximo de resistencia del cemento cuando es sometido a un estrés antes de que se llegue a la fractura. También es útil para conocer la elasticidad de la lechada.

##### 3.1.1 Reología.

**3.1.1.1 Viscosidad plástica.** Es un criterio flexible debido a que depende del diseño que se va a requerir. Para el tipo de lechada que se desea diseñar el fluido debe poseer un alto valor de viscosidad plástica.

**3.1.1.2 Punto cedente (Yp).** Este valor es dependiente de la cantidad de sólidos hidratados presentes en la lechada, por lo cual va depender de la viscosidad plástica. Es favorable tener un punto cedente bajo.

Costo por unidad (\$US/Kg): Criterio de gran importancia en el diseño de una lechada. Para este criterio se tiene en cuenta únicamente el costo del nano-material.

## 3.2 METODOLOGÍAS DE SELECCIÓN

Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de modelos de selección; el probabilístico y el determinístico. A continuación se describirán cada modelo conforme a su procedimiento y como consecuencia, se realizará un análisis de los resultados obtenidos.

**3.2.1 Matriz de selección por juicio de expertos.** Consiste en realizar una evaluación mediante criterios de selección, estos criterios varían según el proyecto que se considere realizar, un ejemplo de estos son: Costos de materiales, Propiedades físicas o químicas en el caso de proyectos para la ingeniería química, rendimientos, entre otros. Después los mejores criterios para la matriz se deben comparar entre si otorgándoles valores según el nivel de importancia, considerando como referencia a que estos valores deben de ser estimados por expertos en el tema los cuales cuentan con experiencia, intuición y juicio, por otro lado, también se considera por investigaciones previamente realizadas con credibilidad.

Teniendo en cuenta estos criterios de evaluación para la selección descritos en el inciso 3.1, se debe juzgar cada uno según la importancia que representa para la investigación. luego, sumar estos valores asignados para obtener un total, realizar un factor de ponderación (FP) el cual es la suma de cada criterio individualmente para un tipo de material sobre el total de todos los criterios y de esta forma obtener un porcentaje de favorabilidad de cada material.

Se proponen valores para cada criterio con el fin de dar importancia y llegar al mejor material. Los valores son:

- 10 = Mucho más importante.      1/5 = Menos importante.
- 5 = Más importante.              1/10 = Mucho menos importante.
- 1 = Igual.

Cada opción de criterio debe ser comparada contra todas las demás con los mismos valores anteriormente mencionado.

- 10 = Mucho más importante.      1/5 = Menos importante.
- 5 = Más importante.              1/10 = Mucho menos importante.
- 1 = Igual.

Y por último se debe multiplicar el factor de ponderación (FP) por el peso de la opción (PQ) y sumar para obtener el puntaje final entre cada opción y sus porcentajes previamente determinados.

**Cuadro 2.** Comparación de criterios para matriz por juicios de expertos.

| CRITERIOS                       | Co   | Co1  | Co2 | Co3 | Co4   | Suma | FP     |
|---------------------------------|------|------|-----|-----|-------|------|--------|
| 1. Propiedades mecánicas (PM)   |      | 5    | 5   | 10  | 1     | 21   | 0,2811 |
| 2. Facilidad de dispersión (FD) | 5    |      | 5   | 10  | 1     | 21   | 0,2811 |
| 3. Costos (CT)                  | 5    | 5    |     | 5   | 1/10  | 15,1 | 0,2021 |
| 4. Nivel de investigación (NI)  | 1/10 | 1/10 | 1/5 |     | 1/5   | 0,6  | 0,0080 |
| 5. Resistencia térmica (RT)     | 1    | 1    | 10  | 5   |       | 17   | 0,2276 |
|                                 |      |      |     |     | Total | 74,7 |        |

En el **Cuadro 2** se encuentra la comparación entre los criterios según la importancia que tiene uno sobre otro y se realiza un análisis observando que PROPIEDADES MECÁNICAS y FACILIDAD DE DISPERSIÓN son los criterios con factor de ponderación (FP) más altos y en segundo lugar estaría RESISTENCIA TÉRMICA.

Estos resultados son importantes para que al momento de terminar la matriz de selección para un nano-compuesto en específico, se pueda tener en cuenta los estudios que se han realizado sobre el comportamiento de este componente en el cemento.

Ahora se realiza una tabla de comparación entre todos los nano-compuestos en estudio y se evalúan teniendo en cuenta un criterio por cada cuadro.

**Cuadro 3.** Propiedades Mecánicas (PM) para matriz por juicios de expertos.

| 1. Propiedades mecánicas (PM) |     |      |     |       |      |        |
|-------------------------------|-----|------|-----|-------|------|--------|
| Materiales                    | Co  | Co1  | Co2 | Co3   | Suma | PQ     |
| 1. Nano-Sílice                |     | 1/5  | 5   | 1     | 6,2  | 0,1884 |
| 2. Nano-Carbón                | 5   |      | 10  | 5     | 20   | 0,6079 |
| 3. Nano-Alúmina               | 1/5 | 1/10 |     | 1/5   | 0,5  | 0,0152 |
| 4. Nano-Arcilla               | 1   | 1/5  | 5   |       | 6,2  | 0,1884 |
|                               |     |      |     | Total | 32,9 |        |

En el **Cuadro 3** se tiene la comparación entre los nano-compuestos con la evaluación de las propiedades mecánicas según los resultados de las investigaciones realizadas. El Nano-Carbono es el que tiene mayor valor en el peso de la opción (PQ) y esto se refleja según los porcentajes de mejora en las referencias mencionadas.

**Cuadro 4.** Facilidad De Dispersión (FD) para matriz por juicios de expertos.

| 2. Facilidad de dispersión (FD) |    |     |     |       |      |        |
|---------------------------------|----|-----|-----|-------|------|--------|
| Materiales                      | Co | Co1 | Co2 | Co3   | Suma | PQ     |
| 1. Nano-Sílice                  |    | 1   | 1   | 1     | 3    | 0,2500 |
| 2. Nano-Carbón                  | 1  |     | 1   | 1     | 3    | 0,2500 |
| 3. Nano-Alúmina                 | 1  | 1   |     | 1     | 3    | 0,2500 |
| 4. Nano-Arcilla                 | 1  | 1   | 1   |       | 3    | 0,2500 |
|                                 |    |     |     | Total | 12   |        |

Según los resultados del **Cuadro 4** todos los componentes se comportan de la misma forma para este criterio, pues según las investigaciones la dispersión de cada uno de los nano-compuestos es un poco compleja cada una en su forma.

**Cuadro 5.** Costos por unidad (CT) para matriz por juicios de expertos.

| 3. Costos (CT)  |      |      |      |       |      |        |
|-----------------|------|------|------|-------|------|--------|
| Materiales      | Co   | Co1  | Co2  | Co3   | Suma | PQ     |
| 1. Nano-Silíce  |      | 1/5  | 1/5  | 10    | 10,4 | 0,2436 |
| 2. Nano-Carbón  | 5    |      | 1    | 10    | 16   | 0,3747 |
| 3. Nano-Alúmina | 5    | 1    |      | 10    | 16   | 0,3747 |
| 4. Nano-Arcilla | 1/10 | 1/10 | 1/10 |       | 0,3  | 0,0070 |
|                 |      |      |      | Total | 42,7 |        |

El criterio costos es un factor muy importante para cualquier investigación pues se tiene en cuenta muchos factores que son incluidos directa o indirectamente en este criterio los cuales pueden ser: Valor del producto, cantidad, envío (si es necesario), entre otros. En la **Tabla 3** se evidencia que el nano-compuesto más económico es la Nano-Arcilla pero por lo evaluado anteriormente se ve que no es muy buena en algunas propiedades, por eso se debe tener un equilibrio entre mejora de propiedades y costos para la toma de decisión del nano-compuesto.

**Cuadro 6.** Nivel De Investigación (NI).

| 4. Nivel de investigación (NI) |     |      |     |       |      |        |
|--------------------------------|-----|------|-----|-------|------|--------|
| Materiales                     | Co  | Co1  | Co2 | Co3   | Suma | PQ     |
| 1. Nano-Silíce                 |     | 1    | 5   | 5     | 11   | 0,2910 |
| 2. Nano-Carbón                 | 1   |      | 10  | 10    | 21   | 0,5556 |
| 3. Nano-Alúmina                | 1/5 | 1/10 |     | 1/5   | 0,5  | 0,0132 |
| 4. Nano-Arcilla                | 1/5 | 1/10 | 5   |       | 5,3  | 0,1402 |
|                                |     |      |     | Total | 37,8 |        |

El nivel de investigación (**Cuadro 6**) es un criterio que se tiene en cuenta con el fin de saber la cantidad de información encontrada sobre los nano-compuestos y su experimentación a nivel laboratorio o aplicación industrial. El Nano-Carbono es el material que tiene mayor puntaje pues se encuentra bastante información de experimentación realizada en el cemento.

**Cuadro 7.** Resistencia Térmica (RT) para matriz por juicios de expertos.

| 5. Resistencia térmica (RT) |      |      |     |       |      |        |
|-----------------------------|------|------|-----|-------|------|--------|
| Materiales                  | Co   | Co1  | Co2 | Co3   | Suma | PQ     |
| 1. Nano-Silíce              |      | 1    | 10  | 5     | 16   | 0,4762 |
| 2. Nano-Carbón              | 1    |      | 10  | 5     | 16   | 0,4762 |
| 3. Nano-Alúmina             | 1/10 | 1/10 |     | 1     | 1,2  | 0,0357 |
| 4. Nano-Arcilla             | 1/5  | 1/5  | 1   |       | 0,4  | 0,0119 |
|                             |      |      |     | Total | 33,6 |        |

Los pozos petroleros se encuentran a unas condiciones altas en tanto presión como temperatura, por eso la resistencia térmica es un factor muy importante pues estos materiales mejoran esta propiedad de igual forma como es el caso de Nano-Silíce y el Nano-Carbón como se puede observar en el **Cuadro 7**.

Luego de evaluar teóricamente con base a la investigación previamente realizada se debe obtener un "puntaje final" el cual conlleva a que el material con el mayor valor de apreciación es el resultado de la matriz de selección y será el compuesto que se trabaja por sus mejoras en el cemento.

**Cuadro 8.** Matriz de selección por juicios de expertos.

| Materiales      | (PM)        |   |            | (FD)        |   |            | (CT)          |   |            |
|-----------------|-------------|---|------------|-------------|---|------------|---------------|---|------------|
|                 | F.P         | X | P.Q        | F.P         | X | P.Q        | F.P           | X | P.Q        |
| 1. Nano-Sílice  | 0,2811      | x | 0,1884     | 0,2811      | x | 0,25       | 0,2021        | x | 0,24355972 |
|                 | 0,0530      |   |            | 0,0703      |   |            | 0,0492        |   |            |
| 2. Nano-Carbón  | 0,2811      | x | 0,6079     | 0,2811      | x | 0,25       | 0,2021        | x | 0,37470726 |
|                 | 0,1709      |   |            | 0,0703      |   |            | 0,0757        |   |            |
| 3. Nano-Alúmina | 0,2811      | x | 0,0152     | 0,2811      | x | 0,25       | 0,2021        | x | 0,37470726 |
|                 | 0,0043      |   |            | 0,0703      |   |            | 0,0757        |   |            |
| 4. Nano-Arcilla | 0,2811      | x | 0,1884     | 0,2811      | x | 0,25       | 0,2021        | x | 0,00702576 |
|                 | 0,052977869 |   |            | 0,070281124 |   |            | 0,001420201   |   |            |
|                 |             |   |            |             |   |            |               |   |            |
| Materiales      | (NI)        |   |            | (RT)        |   |            | PUNTAJE FINAL |   |            |
|                 | F.P         | X | P.Q        | F.P         | X | P.Q        |               |   |            |
| 1. Nano-Sílice  | 0,0080      | x | 0,29100529 | 0,2276      | x | 0,47619048 | 0,283199998   |   |            |
|                 | 0,0023      |   |            | 0,1084      |   |            |               |   |            |
| 2. Nano-Carbón  | 0,0080      | x | 0,55555556 | 0,2276      | x | 0,47619048 | 0,429753795   |   |            |
|                 | 0,0045      |   |            | 0,1084      |   |            |               |   |            |
| 3. Nano-Alúmina | 0,0080      | x | 0,01322751 | 0,2276      | x | 0,03571429 | 0,158531565   |   |            |
|                 | 0,0001      |   |            | 0,0081      |   |            |               |   |            |
| 4. Nano-Arcilla | 0,0080      | x | 0,14021164 | 0,2276      | x | 0,01190476 | 0,128514642   |   |            |
|                 | 0,001126198 |   |            | 0,00270925  |   |            |               |   |            |

Según el resultado final mostrado en el **Cuadro 8** con este método se debe escoger el Nano-Carbono pues el puntaje final que dio un mayor valor es el de este material con un 0,4129753795 siendo casi dos veces mayor al segundo material con mejor promedio que es la nano-sílice.

Se puede concluir que factores tan importantes como el Costo del material o el mejoramiento registrado en las investigaciones realizadas para la resistencia mecánica fueron los que tuvieron más valor e hicieron que el nano-carbono tuviera una mayor ventaja sobre los otros tres materiales pero para estar seguros de esta elección se realiza una simulación de Monte Carlo.

**3.2.2 Simulación de Monte Carlo.** La simulación Monte Carlo es una técnica matemática computarizada que permite tener en cuenta el riesgo en análisis cuantitativos y tomas de decisiones.

Para la simulación existen dos formas de análisis las cuales son la forma cuantitativa y la forma cualitativa.

- El análisis cualitativo es generalmente instintivo y se requiere de opiniones de un experto sobre el tema que se trata para tener cierta cercanía a la posible realidad que se pueda presentar en un futuro y concuerde con la simulación.
- Análisis cuantitativo se encarga de tomar valores reales de los criterios o tomar los criterios cualitativos y asignarle un valor para poder ser evaluado.



Mediante el uso de distribuciones de probabilidad, las variables pueden generar diferentes probabilidades de que se produzcan diferentes resultados. Las distribuciones de probabilidad son una forma mucho más realista de describir la incertidumbre en las variables de un análisis de riesgo.

La distribución más utilizada en la simulación de monte Carlo según los datos que se evaluarán es la distribución normal.

**3.2.2.1 Distribución Normal<sup>50</sup>.** Este tipo de distribución describe el comportamiento de diferentes cosas, entre ellos el coeficiente de inteligencia, la altura de las personas. Este tipo de distribución tiene una probabilidad continua y los parámetros para la distribución son la desviación estándar y la media:

La distribución normal cuenta con tres criterios:

- De todos los valores desconocidos se tendrá uno el cual es el más probable (la media de la distribución).
- Todas las variables desconocidas tienen probabilidad igualitaria de estar por encima o bajo la media (simétrica respecto a la media).
- La variable desconocida tiene más probabilidad de estar cerca de la media que lejos. De los valores de la distribución normal, aproximadamente el 68% de ellos se encuentran dentro de una desviación estándar respecto a la media.

**3.2.2.2 Crystal Ball<sup>51</sup>.** Es un programa de análisis de riesgo y de pronóstico orientado a través de gráficos, está destinado a quitar la incertidumbre en la toma de decisiones teniendo un uso muy práctico y sencillo. Con Crystal Ball se ganará confianza, eficiencia y precisión a la hora de tomar decisiones. A través de una técnica denominada simulación Monte Carlo, Crystal Ball pronostica todos los resultados posibles para una situación determinada. Asimismo le muestra los niveles de confianza, de manera tal que podrá conocer la probabilidad de que cualquier evento específico tenga lugar.

**3.2.2.3 Procedimiento simulación de Montecarlo.** Para realizar la simulación de Monte Carlo es necesario tener un programa llamado *Crystal Ball* el cual es una herramienta extensa de Excel, además se hace una investigación bibliográfica previamente del comportamiento de cada material según los 5 criterios anteriormente seleccionados y teniendo en cuenta estos resultados bibliográficos

---

<sup>50</sup> CRYSTAL BALL. Distribución Normal. [Programa simulador]. Texto en español.

<sup>51</sup> CRYSTAL BALL 7.2. Manual de Inicio. Bienvenido a Crystal Ball. Disponible en: <http://www.docentes.fcefa.edu.bo/imorales/wp-content/uploads/sites/9/2013/09/MANUAL-CRYSTAL-BALLModelos-de-Simulaci%C3%B3n-4329.pdf>. 1988-2006. p. 1.

se procede a la estructuración de la hoja de cálculo para pronta simulación de Monte Carlo como se muestra en la **Figura 3**.

**Figura 3.** Estructuración para simulación de Monte Carlo en Excel.

| CRITERIOS                               | Peso de criterio | Nano-Alumina                  | Nano-Carbón  | Nano-Silice  | Nano-Arcilla |
|---|------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|   |                  | Cantidades en porcentajes (%) |              |              |              |
|   |                  | %Optimo: 1                    | %Optimo: 0,1 | %Optimo: 3,5 | %Optimo: 2   |
| Resistencia a la compresión (PSI)       | 20               | 43,57                         | 19,2         | 21           | 7,4          |
| Resistencia a la ruptura (Mpa)          | 20               | 20                            | 6,521711263  | 7,520011236  | 0            |
| Viscosidad plástica (cP)                | 20               | 17                            | 278          | 237          | 229          |
| Punto Cedente (lb/100 ft <sup>2</sup> ) | 20               | 20                            | 0            | 3,141762452  | 3,754789272  |
| Costo del material                      | 20               | 0                             | 0,759493671  | 20           | 2,907341772  |
|   |                  | \$ 85,00                      | \$ 50,12     | \$ 109,00    | \$ 1.020,00  |
| TOTAL                                   | 100              | 19,55563483                   | 20           | 19,24987897  | 0            |
|   |                  | 79,55563483                   | 38,03983981  | 49,91168566  | 24,34504923  |

Dónde:

- Se escriben los criterios de evaluación (resistencia a la compresión, resistencia a la ruptura, viscosidad plástica, Punto cedente y costo del material), estos fueron definidos anteriormente.
- En esta columna estarán los valores sobre el peso que toman cada criterio. Estos valores no son constantes pues estas celdas están sujetas a realizar las iteraciones que encuentra la mejor respuesta de todas las opciones posibles.
- En este sector de la matriz se nombran cada columna por el tipo del nano-compuesto que corresponda, se adiciona el porcentaje optimo utilizado de cada material en los registros bibliográficos.
- Los valores puestos en la fila que corresponde al paso 4, son los datos obtenidos por las experimentaciones de cada nano-compuesto según referencias bibliográficas.
- Para el paso 5 se debe programar la **Ecuación 1** que permite dar el rango del criterio, teniendo en cuenta el porcentaje de mejoramiento de cada nano-compuesto. La ecuación se expresa de la siguiente forma.

**Ecuación 1.** Calculo para rango del criterio valores máximos.

$$P = \frac{(A - \text{Mínimo}(B))}{(C)} * J$$

Dónde:

- P= Ecuación.
- A= Es el valor o porcentaje que según experimentaciones previas, mejora el criterios por acción de cada material.
- B= Es el Rango de valores porcentajes que según experimentaciones previas, mejora el criterios por acción de cada material. (Todos los valores de un solo criterio).
- C= Es la resta entre el valor máximo del rango “B” y el valor mínimo de este mismo.
- J= Es el peso del criterio el cual irá cambiando a medida que se hagan las iteraciones.
- Para los criterios: Mejoramiento en resistencia a la compresión, Mejoramiento en resistencia a la ruptura y punto cedente. Se busca que se considere el mejor valor, por esta razón se debe utilizar el valor mínimo del rango “B”.

Ejecutando la **Ecuación 1** anterior:

$$P = \frac{(43,57 - 7,4)}{(43,57 - 74)} * 20$$

En este caso en la parte del numerador se escoge el valor de la celda del paso 2 a la cual se va a evaluar la variable P que para este caso es 43.57, luego se toma el valor mínimo del rango (estos valores se encuentran en la **Tabla 8** los cuales son: 43.57, 19.2, 21, 7.4). En este caso se toma el valor de 7.4. Como último paso en el divisor se escoge el valor más grande y se le resta el valor más pequeño para luego de realizar esta división multiplicarlo por el peso o valor de cada criterio el cual se encuentra en la **Tabla 9**.

$$P = 20$$

Se debe tener en cuenta que para algunos criterios se necesita el mayor valor de mejora como es el caso de las propiedades mecánicas y se utiliza la ecuación, pero por otro lado se requiere que el costo o la viscosidad plástica sea el valor más bajo. En este caso se utiliza la siguiente **Ecuación 2**.

**Ecuación 2.** Calculo para rango del criterio valores mínimos.

$$P = \frac{(A - \text{Máximo}(B))}{(D)} * J$$

Dónde:

- D= Es la resta entre el valor el valor mínimo del rango “B” y el máximo de este mismo.
- Para los criterios: Viscosidad plástica y costo. Se busca menor valor, por esta razón se debe utilizar el valor máximo del rango “B”.

Por último en la zona de abajo se suman todos los valores por fila de cada celda donde se resuelve la ecuación 69. Esta suma realiza con la siguiente **Ecuación 3**.

**Ecuación 3.** Suma ponderada de los rangos.

$$\sum P_{nanoAlúmina} + P_{nanoCarbono} + P_{nanoSilice} + P_{nanoArcilla}$$

La variable P fue definida previamente en el paso 5.

Por ejemplo, para la nano-alúmina la solución de la **Ecuación 3** se expresa a continuación.

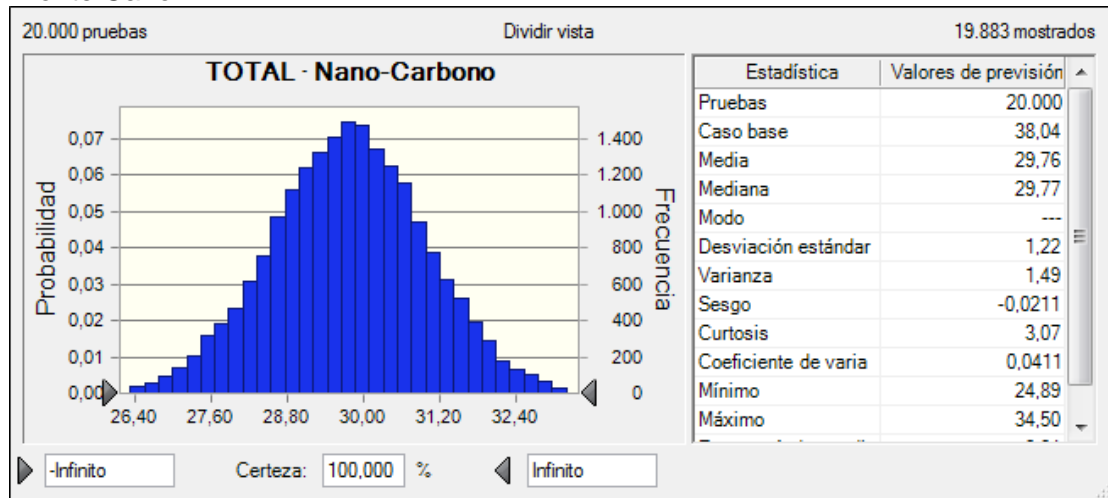
$$\sum 20 + 20 + 17 + 20 + 0 + 19,55563483$$

$$\sum 79,55563483$$

Las pruebas de simulación que se utilizan son de 20.000 iteraciones con el fin de tener una probabilidad mayor para acertar en la selección del nano-compuesto.

- **Solución de la simulación.** Resolviendo la simulación se observa que el material que arroja menor desviación estándar es del nano-carbono con 1.22 como lo muestra la **Gráfica 1** este resultado es bueno pues quiere decir que la variable desconocida que en este caso es el peso de los criterios tiene más probabilidad de estar cerca de la media que lejos. De los valores de la distribución normal, aproximadamente el 68% de ellos se encuentran dentro de una desviación estándar respecto a la media cuentan con un mayor equilibrio entre los criterios.

**Gráfica 1.** Frecuencia y estadísticas del nano-carbono para simulación de Monte Carlo.



Por otro lado, se puede considerar que la nano-arcilla cuenta también con un valor de desviación relativamente baja (3,18) como lo muestra el **Anexo A**. Se consideraría junto con el nano-carbono como dos alternativas altamente potenciales.

Los resultados de desviación estándar y demás para la nano-alúmina y la nano-sílice se encuentran en el **Anexo B** y **Anexo C**; se pueden considerar como valores de desviación altos y por esta razón no se tendrían en cuenta para la elección del material.

- **Análisis de sensibilidad.** Se determina a partir de los valores de desviación y las gráficas que muestran el comportamiento de cada criterio, que el nano compuesto aceptable para el desarrollo de la investigación, es el nano tubo de Carbono (MWCNT) debido a que cuenta con una menor desviación estándar y sus datos están 68% dentro de la desviación en comparación a los datos de los criterios para los demás materiales.

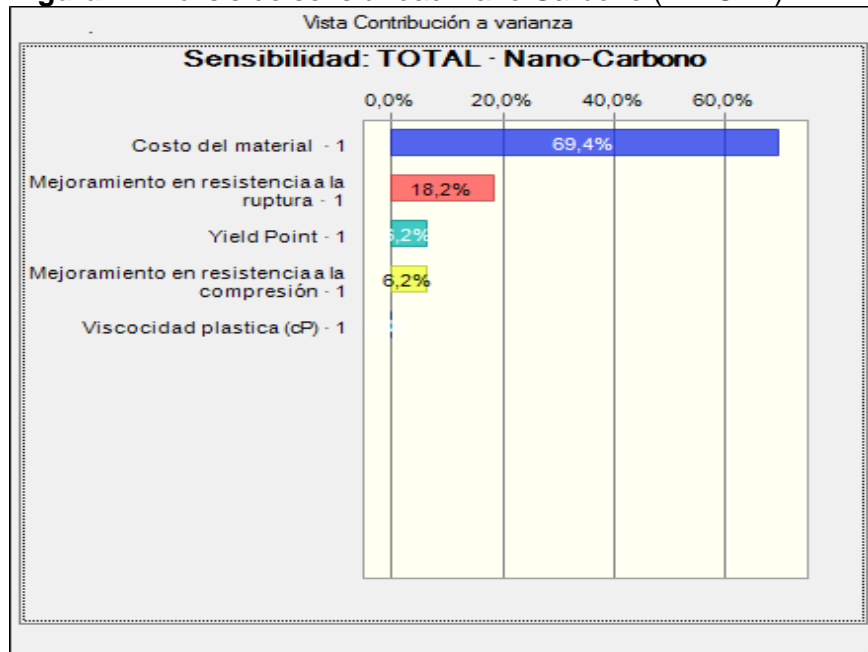
Observando detalladamente en el análisis de sensibilidad para el nano-carbono **Figura 4**, muestra que los pesos que tomaron cada criterio. El mejoramiento de la resistencia a la ruptura y el costo del material son los criterios que más influyen en la selección total del Nano-Carbono, le sigue el mejoramiento de resistencia a la compresión y el punto cedente.

Las posibles razones que pueden justificar el resultado de la simulación es el criterio de costo del material, el cual posee un valor porcentual grande y que además, fue el criterio que mayor peso le dio a la simulación del MWCNT con 69,5 a comparación de los porcentajes del resto de nano compuestos (NA, NC, NS). Como otra posible razón incluye los criterios de las propiedades mecánicas (18,4%) y reológicas

(6,2%) de la lechada de cemento. En la **Figura 3** se observa que la influencia de la concentración justa para cada producto es relevante a la hora de aumentar dichas propiedades y aunque, el MWCNT no cuenta con un valor porcentual alto, la concentración óptima es apreciada a la hora de añadir el MWCNT en la lista de aditivos en el diseño de lechadas de cemento.

En conclusión, el nano-carbono es el material que se utilizará para el desarrollo del proyecto teniendo en cuenta los resultados de la simulación de Monte Carlo y el la matriz de juicio de expertos.

**Figura 4.** Análisis de sensibilidad Nano Carbono (MWCNT).



### 3.3 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA UNA LECHADA DE CEMENTO

Se emplearán las pruebas que, según la empresa Superior Energy Services<sup>52,53</sup> son las que califican la calidad de la lechada diseñada, los tipos de pruebas que se les realiza, equipos y forma de desarrollarlas y que van relacionadas con las descritas por las normas API 10A y 10B-2.

<sup>52</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES Laboratorio. Prácticas Recomendadas Para Ensayos De Lechadas De Cemento Y Calibración De Equipos, Norma API 10A Y 10B-2. 2015. p. 24.

<sup>53</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES, Instructivo para la corrida de pruebas, 2014. p.30.

Las pruebas que se realizarán son las siguientes:

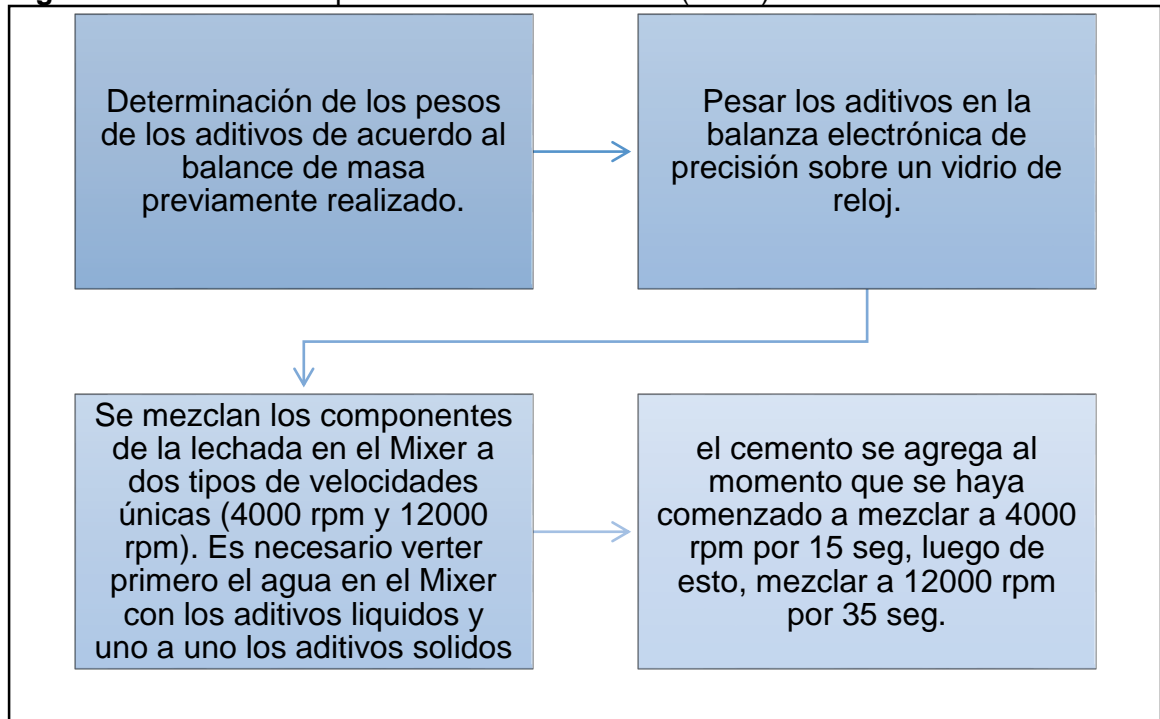
**3.3.1 Prueba de mezclabilidad<sup>54</sup>.** Consiste en determinar si la lechada (cemento, agua y aditivos) es una lechada con la fluidez adecuada para la operación de bombeo. Es una prueba de carácter cualitativo y se valora en un rango de 0 a 5, siendo 0 una lechada con insuficiencia en su fluidez y 5 una óptima fluidez. Se utilizan una Balanza electrónica de precisión y un mezclador (Mixer, **Figura 5**).

**Figura 5.** Mezclador de lechadas. (Mixer).



Fuente: Superior Energy Services Colombia.

**Figura 6.** Procedimiento para el uso del mezclador (Mixer).



<sup>54</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES Laboratorio, Op., Cit., p. 24.

**3.3.2 Acondicionamiento de la lechada.**<sup>55</sup> Acondicionar las lechadas se realiza para posteriormente correr otras pruebas de laboratorio; más exactamente se utiliza cuando las pruebas requieren que las lechadas se encuentren a temperatura circulante (BHCT) esto, con el fin de simular las condiciones de temperatura y movimiento por las que pasa el fluido en el pozo.

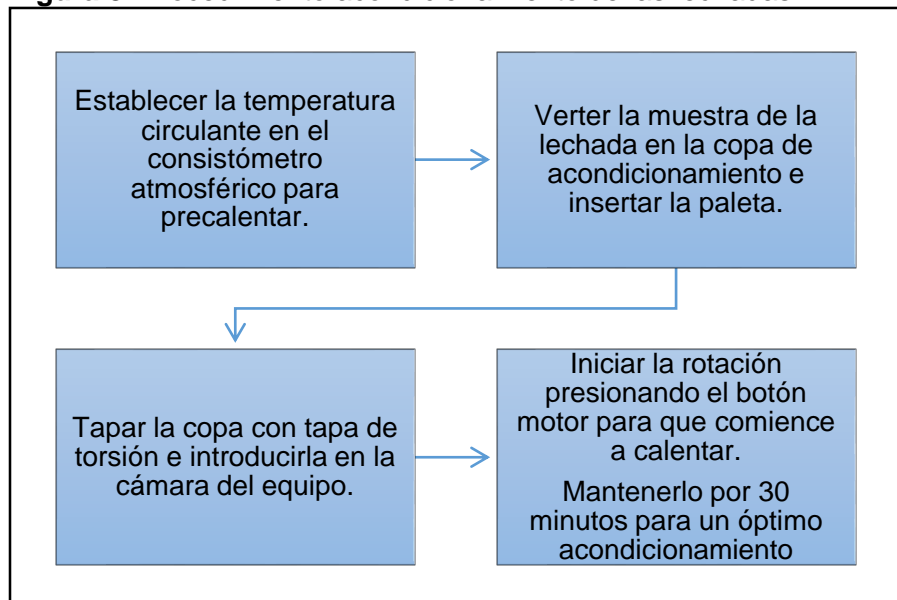
Equipo utilizado: consistómetro atmosférico, copa de acondicionamiento, indicador de torsión y la paleta.

**Figura 7.** Consistómetro atmosférico.



Fuente: Superior Energy Services Colombia.

**Figura 8.** Procedimiento acondicionamiento de las lechadas.



<sup>55</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES Laboratorio, Op., Cit., p. 46.



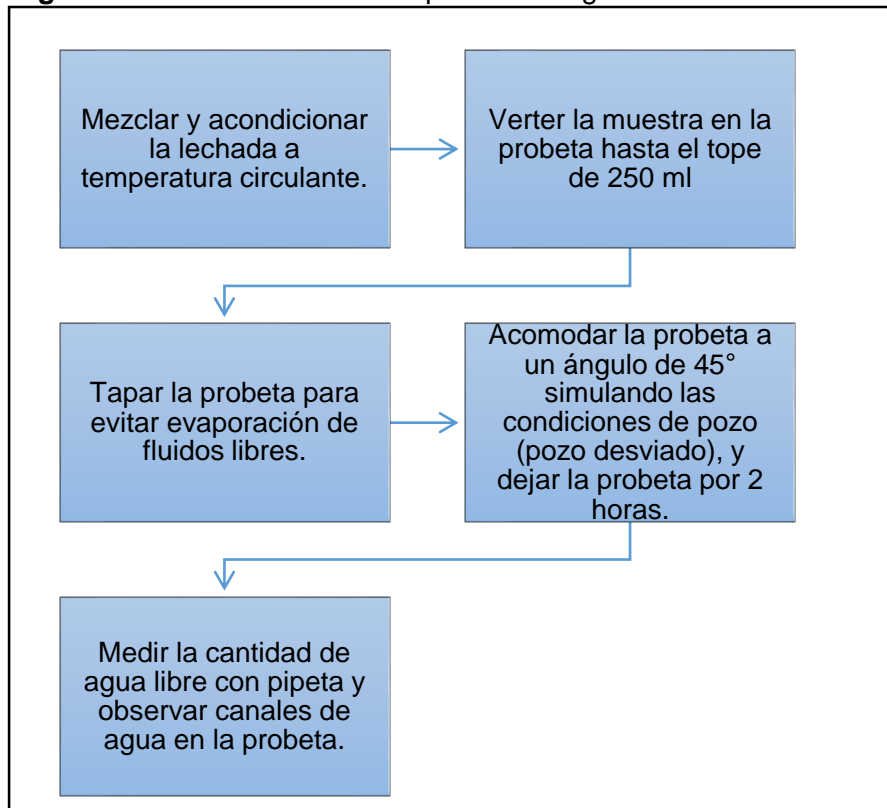
**3.3.3 Agua libre.**<sup>56</sup> Es una medida de la estabilidad estática de una lechada de cemento, en otras palabras es la tendencia del fluido (agua) a separarse de la lechada antes del fraguado.

**Figura 9.** Probeta de 250 mL.



Fuente: Superior Energy Services Colombia.

**Figura 10.** Procedimiento de la prueba de agua libre.



<sup>56</sup> SCHLUMBERGER, Op., Cit., p. 13

El porcentaje de agua libre se calcula por medio de la siguiente **Ecuación 4**.

**Ecuación 4.** Porcentaje de agua libre.

$$\%FF = \frac{V_{ff} * 100}{V_s}$$

**Fuente:** Prácticas recomendadas para ensayos de lechadas de cemento y Calibración de equipos norma 10B-2. Superior Energy Services 2015. p. 49.

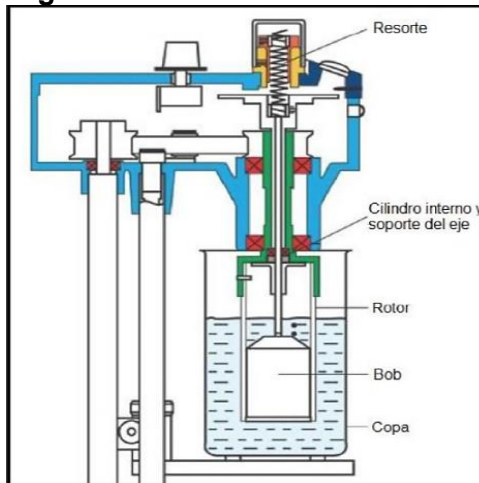
Dónde:

- %FF es el porcentaje de agua libre.
- $V_{ff}$  es el volumen de fluido libre recolectado en ml.
- $V_s$  es el volumen inicial de la lechada .

**3.3.4 Reología.** Prueba que se realiza con el fin de conocer el comportamiento reológico de la lechada a temperatura circulante y ambiente. Para describir este comportamiento reológico se emplean modelos matemáticos como el plástico de Bingham (muy usado en la industria) en la determinación de las propiedades y el modelo de ley de potencias.

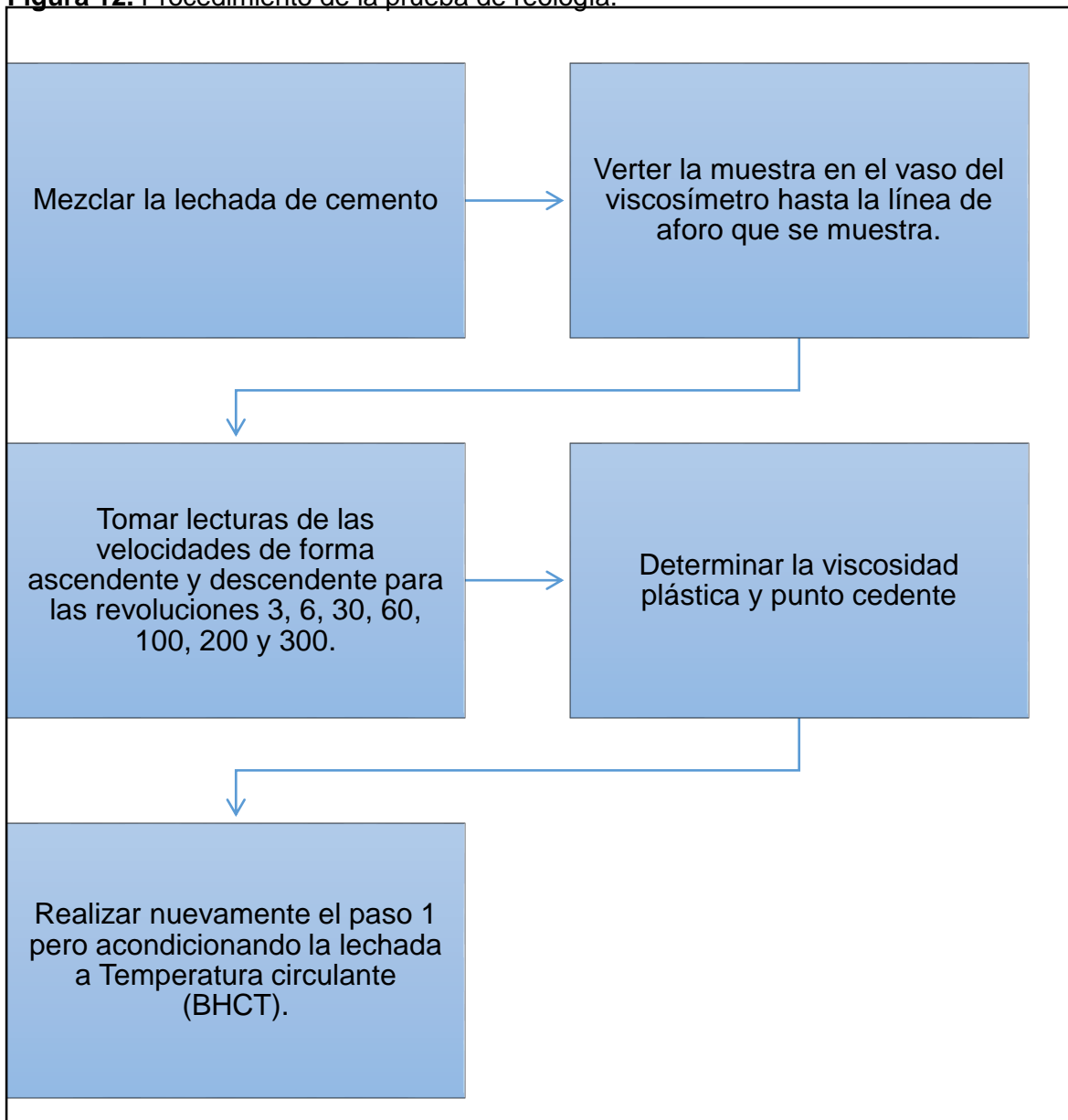
Equipo utilizado: Viscosímetro rotacional, acondicionamiento de la lechada.

**Figura 11.** Viscosímetro rotacional.



**Fuente:** Prácticas recomendadas para ensayos de lechadas de cemento y calibración de equipos API 10A y 10B. Superior Energy Services.

**Figura 12.** Procedimiento de la prueba de reología.



Para el cálculo de la viscosidad plástica y punto cedente a partir de los datos obtenidos en el viscosímetro rotacional existen dos modelos matemáticos mostrados a continuación.

**Ecuación 5.** Viscosidad plástica.

$$\text{Viscosidad plástica } (Vp) = (\theta_{300} - \theta_{100}) * 1.5$$

**Fuente:** NORTON, Iaperyouse. Formulas and calculations for Drilling. Production and Workover. Gulf professional publishing. Segunda edición. 2012. p. 185.

Dónde:

- $\theta_{300}$  y  $\theta_{100}$  son el promedio de las lecturas ascendentes y descendentes a 300 rpm y 100 rpm, respectivamente. Las unidades de viscosidad plástica son centipoise (cP). Los cálculos de la viscosidad plástica se presentan en el **Anexo D**.

**Ecuación 6.** Punto cedente.

$$\text{Punto Cedente}(Yp) = \theta_{300} - Vp$$

**Fuente:** NORTON, lapeyrouse. Formulas and calculations for Drilling. Production and Workover. Gulf professional publishing. Segunda edición 2012. p. 185.

Donde, el punto cedente se expresa en lb/100ft<sup>2</sup>,  $\theta_{300}$  es la lectura promedio realizada a las 300 rpm y  $Vp$  es la viscosidad plástica. Los cálculos de punto cedente se presentan en el **Anexo E**.

**3.3.5 Pérdida de filtrado o fluid loss.**<sup>57</sup> Se utiliza para determinar la cantidad de líquido que se libera de la lechada en los trabajos de cementación cuando entra en contacto con una formación permeable y además una presión relativamente alta (1000 psi). En la práctica, la pérdida de filtrado es determinada a través de un filtro prensa donde simula una presión de 1.000 psi aplicada sobre la lechada de cemento; la cantidad de líquido deshidratado de la lechada es recolectada por 30 minutos en una probeta. El resultado es multiplicado por dos y expresado en unidades API *fluid loss*.

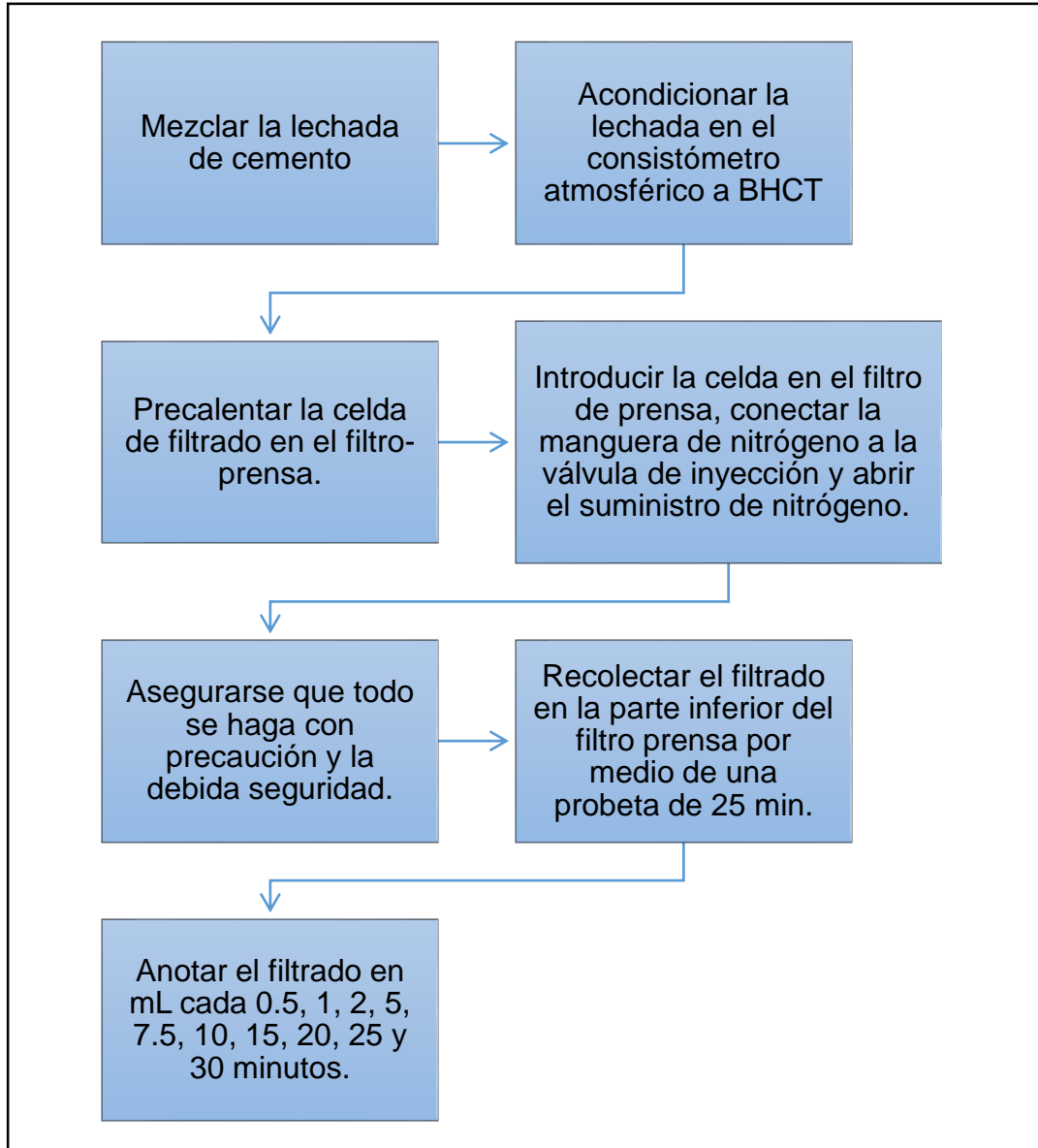
**Figura 13.** Filtro prensa.



**Fuente:** Superior Energy Services Colombia.

<sup>57</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES Laboratorio, Op., Cit., p. 59.

**Figura 14.** Procedimiento de la prueba Pérdida de Filtrado (*fluid loss test*).



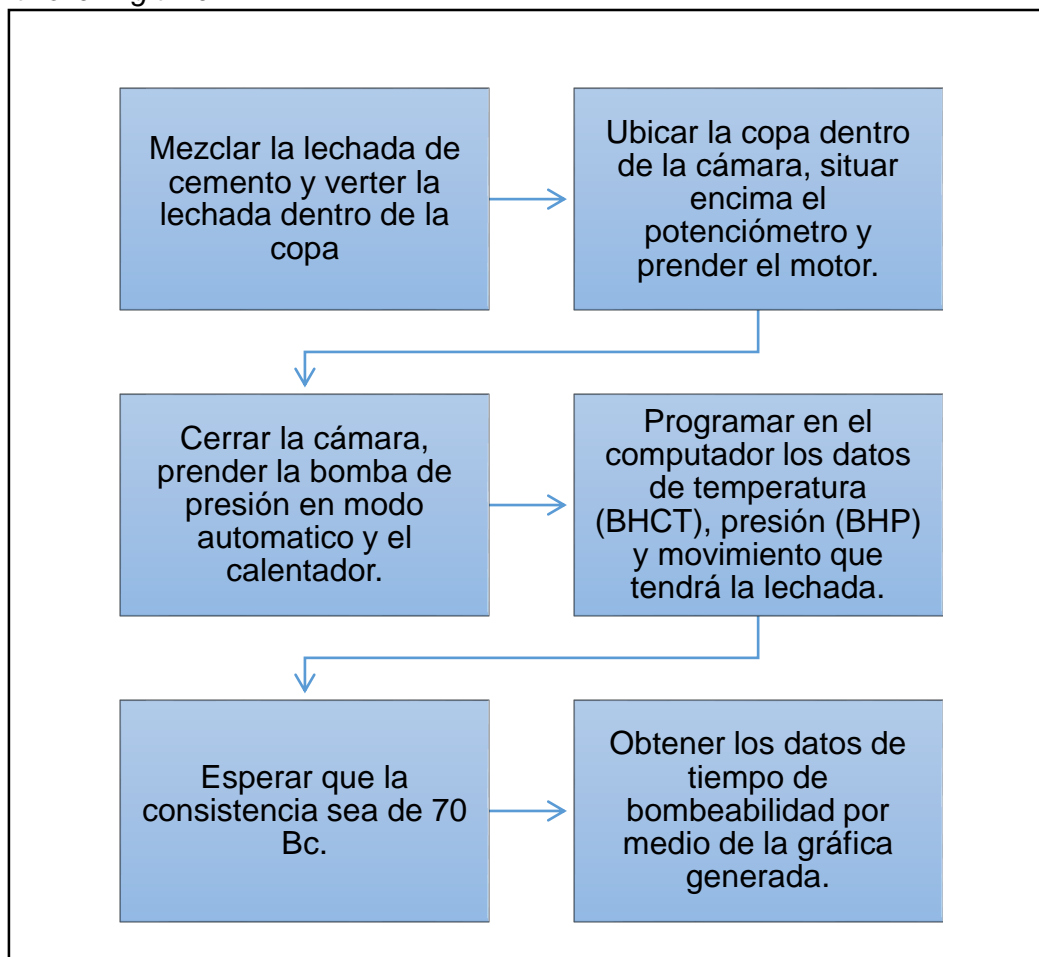
**3.3.6 Tiempo de bombeabilidad o *thickening time*.** También conocido como tiempo de espesamiento, es el lapso de tiempo en que la lechada de cemento alcanzará entre 70 y 100 unidades Bearden (Bc); las. Se dice que una lechada es bombeable cuando alcanza los 70 Bc en determinado tiempo. Equipos utilizados, Consistómetro presurizado, copa del consistómetro.

**Figura 15.** Consistómetro presurizado.



Fuente: Superior Energy Services Colombia.

**Figura 16.** Procedimiento de la prueba de tiempo de Bombeabilidad o *thickening time*.



**3.3.7 Resistencia al esfuerzo compresivo. Prueba no destructiva.**<sup>58 59</sup> Se realiza para determinar la resistencia a la compresión que desarrolla la lechada de cemento mientras está sometida a una presión y temperatura. La prueba es no destructiva porque en no se someterá a tensión la prueba hasta su ruptura.

Se realiza en un equipo denominado UCA (Ultrasonic cement analyzer) por sus siglas en inglés, el cual se basa en el tiempo de transito que una onda pasa a través de la muestra a determinadas tiempo; la prueba puede durar más de 24 horas. En los resultados arroja una gráfica donde se encuentra la presión en psi, la temperatura (°F), y el tiempo de transito de la onda (microseg/pulgada), generalmente.

El procedimiento de programación del equipo va relacionado con las especificaciones descritas en el numeral 4.4 y conforme a la norma API.

**Figura 17.** UCA (Ultrasonic Cement Analyzer).



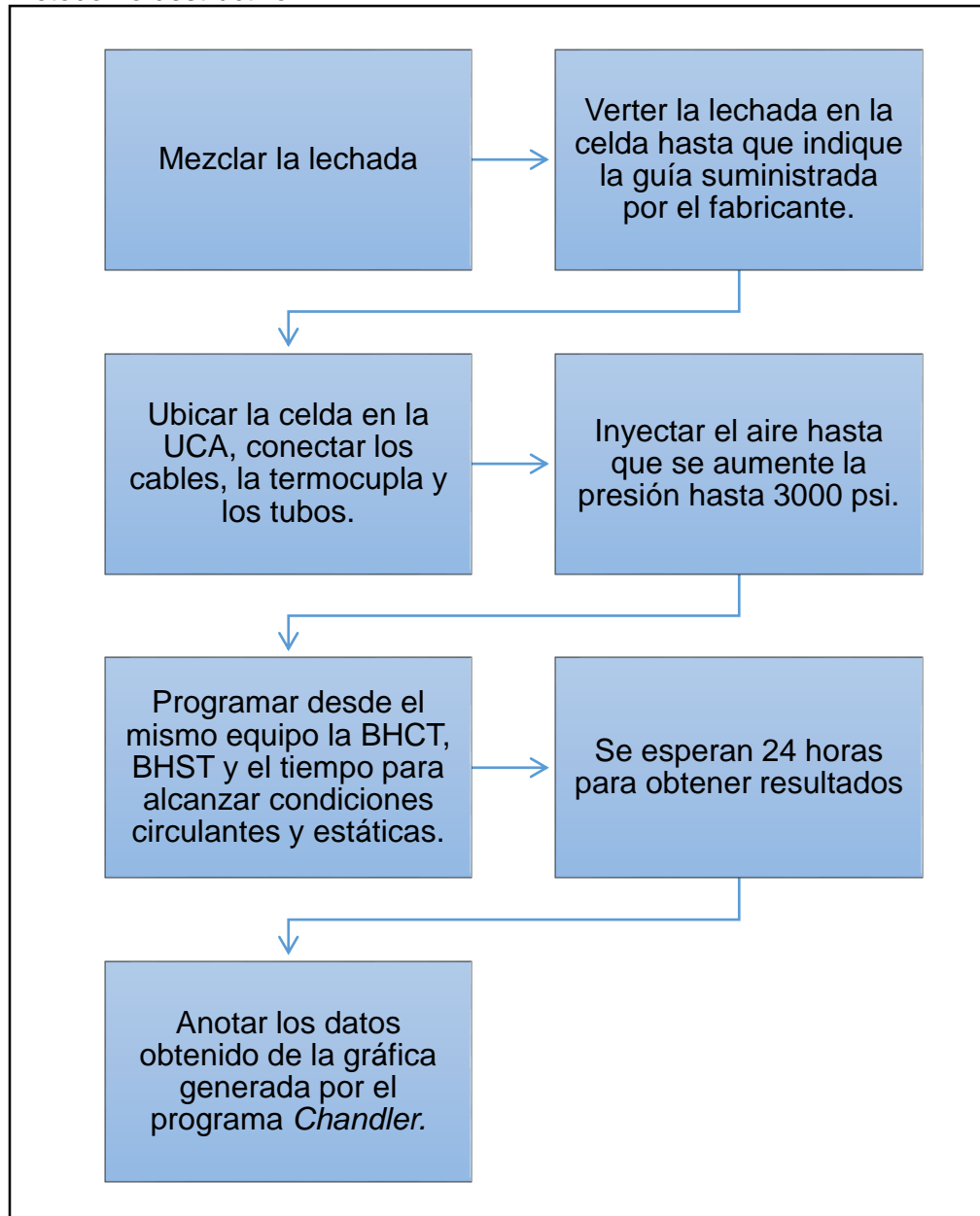
Fuente: Superior Energy Services Colombia.

---

<sup>58</sup>Ibíd., p. 51.

<sup>59</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., p. 87

**Figura 18.** Procedimiento de la prueba de resistencia a la compresión por método no destructivo.



**3.3.8 Resistencia al esfuerzo compresivo. Prueba destructiva.**<sup>60</sup> Esta prueba consiste en determinar la resistencia a la compresión que ha desarrollado el cemento al generar una presión de tal magnitud hasta destruir la muestra. Para llevar a cabo esta prueba se curan muestras de cemento por medio de un equipo llamado cámara de curado (**Figura 20**), el cual simula condiciones de presión y temperatura de fondo, luego por medio de una prensa hidráulica, se aplica la presión

<sup>60</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES laboratorio, Op., Cit., p. 50



necesaria para que la muestra fracture. El tiempo de curado puede ser a preferencia (12, 24, 48, 72, 96 horas).

**Figura 19.** Prensa hidráulica.



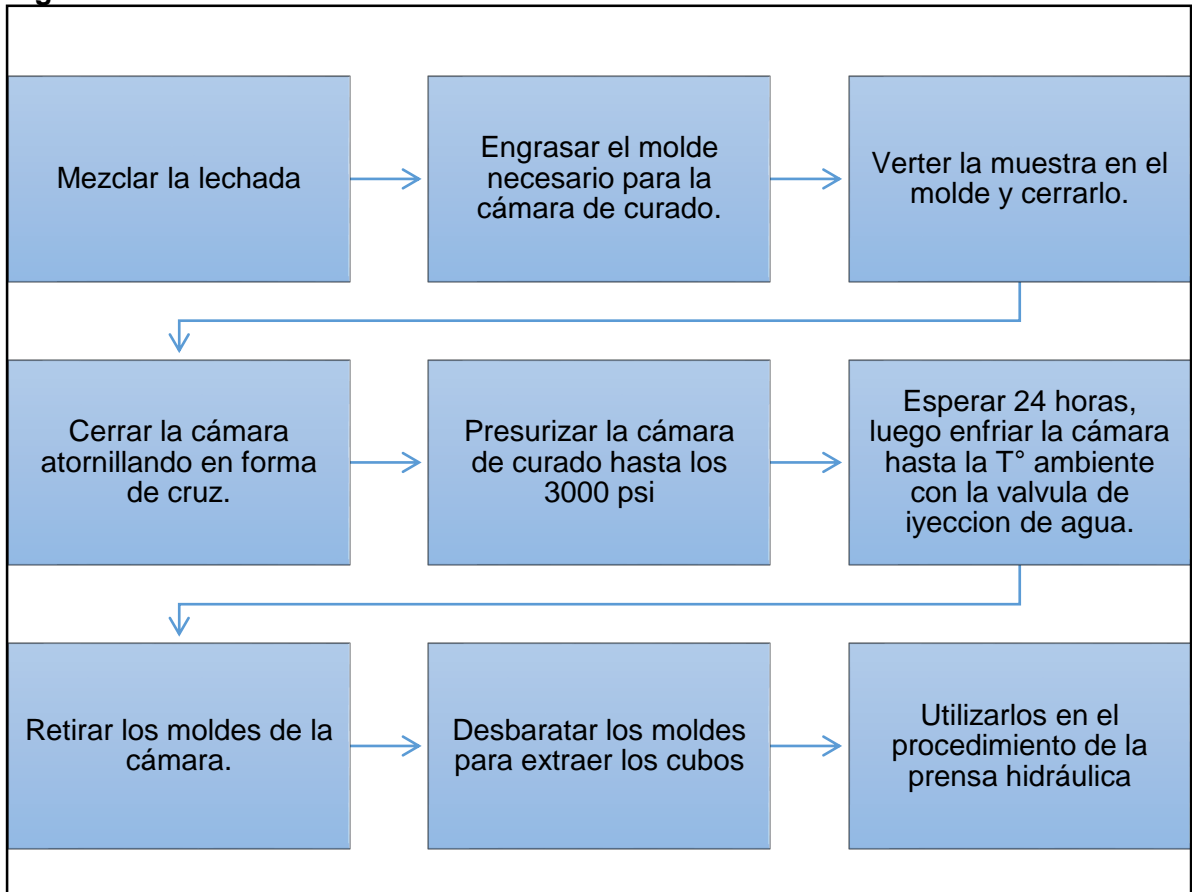
**Fuente:** Superior Energy Services Colombia.

**Figura 20.** Cámara de curado.

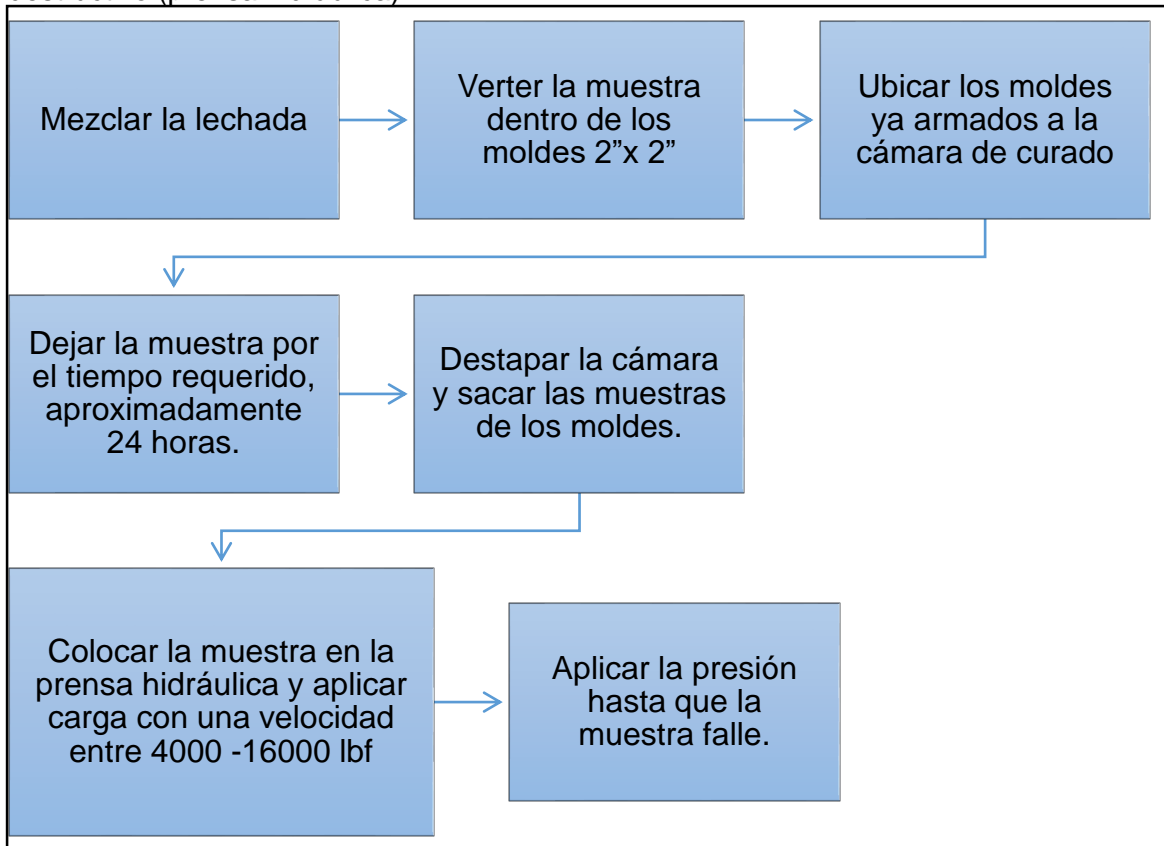


**Fuente:** Superior Energy Services Colombia.

**Figura 21.** Procedimiento de los moldes en la cámara de curado.



**Figura 22.** Procedimiento de la prueba de resistencia a la compresión por método destructivo (prensa hidráulica).



**3.3.9 Mpro.**<sup>61</sup> Analizador de pruebas mecánicas o MPRO (Mechanical Properties Analyzer). Permite medir las propiedades elásticas del cemento mientras es sometido a condiciones de alta temperatura y presión. Estas propiedades describe el comportamiento elástico del cemento evaluando las propiedades tales como: el módulo de Young<sup>62</sup> el cual mide la relación entre la fuerza y la tensión de un material, entre menor sea este valor, el materia más elástico se va a comportar; la relación de Poisson<sup>63</sup>, que es la relación entre la expansión y compresión de un material y el módulo de compresibilidad<sup>64</sup>, el cual mide que tan compresible es un material.

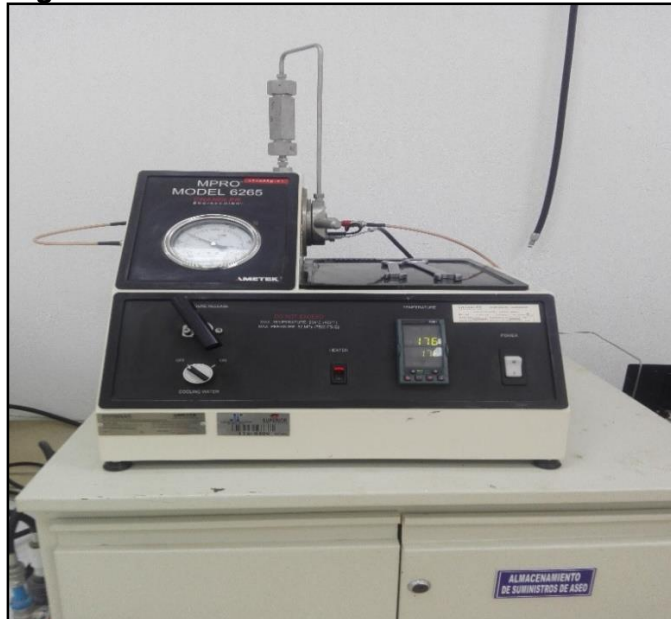
<sup>61</sup> Ibid., p. 56.

<sup>62</sup> CHANDLER ENGINEERING. "Model 6265 MPRO Application" note 1. p. 5

<sup>63</sup> Ibid., p. 5.

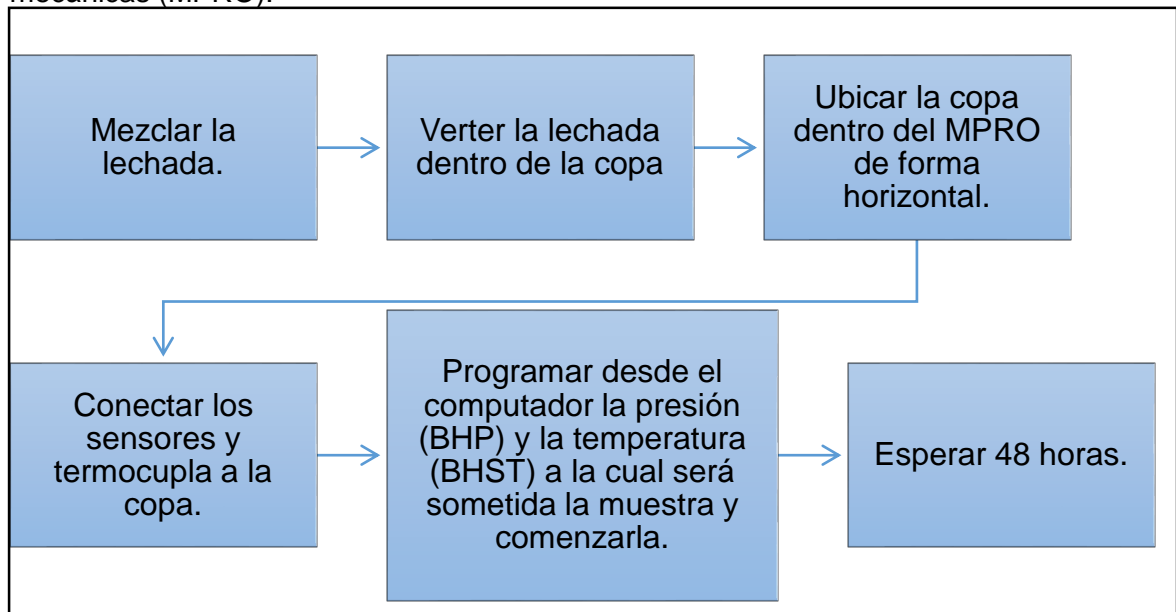
<sup>64</sup> Ibid., p. 5.

**Figura 23.** MPRO.



Fuente: Superior Energy Services Colombia.

**Figura 24.** Procedimiento de la prueba de evaluación de las propiedades mecánicas (MPRO).



## 4. FORMULACIÓN Y CONDICIONES PARA EL DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo experimental, se debe establecer condiciones de un pozo regular para el diseño de las lechadas que serán suministradas por la empresa Superior Energy Services. Se trabajarán todas las pruebas bajo las mismas indicaciones de temperatura, presión y concentración de aditivos para únicamente evaluar el efecto del Nano compuesto (MWCNT) y el efecto de que tendrá sobre las lechadas a evaluar. A continuación se describirá detalladamente cada especificación, condición y formulación para el desarrollo práctico de la investigación.

### 4.1 CONDICIONES DE POZO

Superior Energy Services determina para la aplicación de este estudio, un pozo de 8.000 ft de profundidad con un gradiente de temperatura de 1.2°C por cada 100 ft, se va a tener en cuenta la temperatura circulante de fondo BHCT (*Bottom Hole Circulate Temperature*) que es la temperatura promedio que tiene el pozo medida en cada punto de la formación y que es calculada a través de la **Ecuación 7**; la temperatura estática de fondo BHST (*Bottom Hole Static Temperature*) es la temperatura a la cual se mantendrá el cemento ubicado entre el revestimiento y la formación y se calcula con la ecuación 9 que serán necesarias para la ejecución de las pruebas. Adicional a esto, también se tendrá en cuenta la presión máxima de fondo BHP (*Bottom Hole Pressure*) que es la presión de fondo. El resumen de estas condiciones se encuentra en la **Tabla 7**.

Las especificaciones anteriormente descritas van relacionadas con el proceso de simulación de las condiciones del pozo. Según la norma API, para las pruebas de tiempo de bombeabilidad, resistencia a la compresión (método destructivo y no destructivo) y la evaluación de las propiedades mecánicas se realizará un planteamiento con base al tipo de trabajo que se desea realizar con las lechadas. En este caso, las lechadas van a ser evaluadas para un trabajo de cementación primaria con las siguientes indicaciones: un tiempo de 4 horas (240 min) para alcanzar las condiciones estáticas de fondo (BHST y BHP) descontando únicamente para este diseño, 40 minutos (este tiempo es variable y depende de los requerimientos exigidos por parte del cliente para el trabajo de cementación) para alcanzar las condiciones circulantes del pozo. (BHCT y BHP).<sup>65</sup>

**Ecuación 7.** Temperatura circulante de fondo (BHCT).

$$BHCT = 80^{\circ}F + \left( \frac{(0,006061 * TVD * \Delta T)}{1.0 - (0,000015052 * TVD)} \right)$$

Dónde:

<sup>65</sup> API. Specification for Cement and Materials for Well Cementing. Twenty-Fourth edition, december 2010. p. 6.

- TVD es la profundidad del pozo.
- $\Delta T$  es el gradiente de temperatura.

**Ecuación 8.** Temperatura estática de fondo (BHST).

$$BHST = \frac{\Delta T * TVD}{100} + 80$$

Dónde:

- $\Delta T$  es el gradiente de temperatura.
- TVD es la profundidad de pozo.

Los valores de las temperaturas estática y circulante de fondo se calcularon con las **Ecuaciones 7 y 8** respectivamente. También, con base en los anteriores datos, se estima una presión máxima de fondo por medio de una tabla de presiones que se relaciona con la BHST. En este caso el BHP (*Bottom Hole Pressure*) tiene un valor de 4.900 psi.

**Tabla 7.** Información datos del pozo.

| DATOS DE POZO                  |      | und.     |
|--------------------------------|------|----------|
| GRADIENTE                      | 1,2  | °F/100ft |
| TVD                            | 8000 | ft       |
| BHST                           | 176  | °F       |
| BHCT                           | 133  | °F       |
| Tiempo condiciones circulantes | 40   | min      |
| Tiempo condiciones estáticas   | 200  | min      |
| BHP                            | 4900 | PSI      |

**4.1.1 Nano compuesto de estudio.** El nano compuesto que según el capítulo de selección de nano compuesto es el óptimo para la ejecución de este proyecto, es el nanotubo de carbono. Se va a utilizar el MWCNT (*multi-walled carbon nanotube*) pre-disperso en agua al 3% por medio de un surfactante aniónico. La ficha técnica se encuentra en el **Anexo F**. El dispersante aniónico no es revelado por el fabricante pero por investigaciones, tiene una parte hidrofóbica y otra, hidrofílica con carga negativa.<sup>66</sup>

**4.1.2 Condiciones iniciales para la formulación de la lechada.** En el diseño de las lechadas es necesario realizar un balance de masa para determinar la cantidad

<sup>66</sup> OSCAR, M. et al. Effect of a comercial dispersion of multi walled carbon nanotubes on the hydration of an oil well cementing paste. Civil Engineering Department PEC/COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 2015.

de aditivos que hay que adicionar, el rendimiento y requerimiento de agua; para este proceso, se utiliza un programa desarrollado por la empresa Superior Energy Services llamado CEMLAB. La densidad es un parámetro que depende de los requerimientos por el cliente para el trabajo de cementación y por ende es establecido para obtener la formulación.

Para cada una de las muestras que se van a evaluar se va a utilizar cemento DYCKERHOFF, cemento utilizado para las operaciones de cementación en la empresa Superior Energy Services. En lo general, posee un Ph entre 11 y 13.5, una temperatura de fusión mayor a los 1250°C; y una densidad aparente entre 0,9 y 1,5 g/cm<sup>3</sup>. La formulación para cada lechada diseñada es de 600 ml de lechada, que corresponde a la recomendación descrita en el numeral 5.3.1.4.6 de la norma API 10B-2.<sup>67</sup>

La mayoría de aditivos que se agregan, estarán en estado sólido con unidades en %BWOC (porcentaje con base al peso del cemento) los otros aditivos en estado líquidos se agregaran en el balance en unidades de galones por saco de cemento (gal/Sx). La diferencia de unidades no afectara los resultados ya que no siempre se tendrán los aditivos en un mismo estado

Se realizará un contraste entre una lechada denominada BASE I (agua y cemento) y cada mezcla con la adición de 0,1, 0,25 y 0,5 %BWOC de nanotubo de carbono (MWCNT). Similar para una lechada BASE II (agua, cemento y aditivos). El resumen del diseño de las lechadas se encuentra en la **Tabla 8**.

**Tabla 8.** Diseño de lechadas.

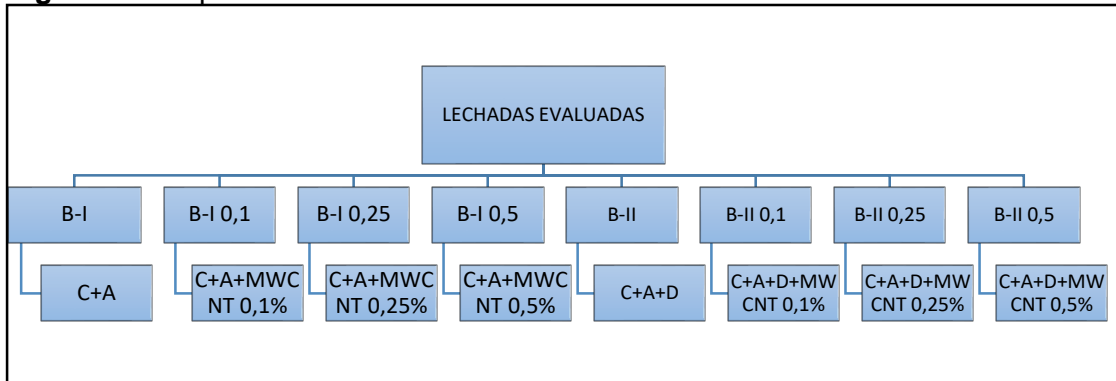
| Lechada          | Extendedor( %BWOC) | Retardador (%BWOC) | Controlador de filtrado 1 (%BWOC) | Controlador de filtrado 2 (%BWOC) | Antiespum ante (gal/Sx) | MWCNT (%BWOC) |
|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------|
| <b>B I</b>       | 0                  | 0                  | 0                                 | 0                                 | 0                       | 0             |
| <b>B I 0,1</b>   | 0                  | 0                  | 0                                 | 0                                 | 0                       | 0,1           |
| <b>B I 0,25</b>  | 0                  | 0                  | 0                                 | 0                                 | 0                       | 0,25          |
| <b>B I 0,5</b>   | 0                  | 0                  | 0                                 | 0                                 | 0                       | 0,5           |
| <b>B II</b>      | 0,01               | 0,06               | 0,5                               | 0,8                               | 0,01                    | 0             |
| <b>B II 0,1</b>  | 0,01               | 0,06               | 0,5                               | 0,8                               | 0,01                    | 0,1           |
| <b>B II 0,25</b> | 0,01               | 0,06               | 0,5                               | 0,8                               | 0,01                    | 0,25          |
| <b>B II 0,5</b>  | 0,01               | 0,06               | 0,5                               | 0,8                               | 0,01                    | 0,5           |

Para cada lechada la única concentración variable es la del aditivo MWCNT y que oscilará entre los valores de 0% y 0,5% de acuerdo a la literatura recopilada. Las concentraciones de los otros aditivos se mantendrán constantes a lo largo de cada prueba. En la **Figura 25** se muestra esquemáticamente el diseño de las lechadas

<sup>67</sup> API 10B-2. Recommended Practice for Testing Well Cements. Second edition, April 2013. p. 18.

que se evaluarán experimentalmente donde C significa cemento, A agua, D los aditivos en conjunto y MWCNT el nano tubo de carbono con las respectivas concentraciones asignadas.

**Figura 25.** Esquema de los diseños de lechadas a evaluar.





## 5. CARACTERIZACIÓN DE LAS LECHADAS EVALUADAS

En esta parte del capítulo se mostrarán los resultados obtenidos para las pruebas reológicas, pruebas de pérdida de filtrado, agua libre y tiempos de bombeabilidad (thickening time) para las muestras BASE I y BASE II, conforme a los procedimientos estipulados por la empresa Superior Energy Services y que sigue normativa API 10A y 10B-2.

Es necesario decir que para las lechadas BASES I no se realizaron pruebas de agua libre ni de pérdida de filtrado debido a que afectaba directamente la integridad de los equipos donde se realizan estas pruebas.

### 5.1 LECHADA BASE I (B-I)

En este primer diseño, la muestra consiste de agua y cemento sin ningún aditivo. A continuación en la **Tabla 9** se muestran la concentraciones y sus especificaciones de la lechada BASE I.

**Tabla 9.** Especificaciones Base I.

| BASE I (B-I)                      |          |
|-----------------------------------|----------|
| Densidad                          | 16 ppg   |
| Rendimiento (ft <sup>3</sup> /Sx) | 1.12     |
| Requerimiento de Agua (gal/Sx)    | 4.82     |
| Cemento                           | 804,4 g  |
| Agua (g)                          | 345,94 g |

**5.1.1 Reología lechada base I (B-I).** Para la obtención de los datos de reología se realizó conforme al procedimiento 4.1.2 descrito anteriormente.

Los datos obtenidos que se muestran en la **Tabla 10** tienen unidades de (S<sup>-1</sup>); se tuvo lectura del viscosímetro rotacional de forma ascendente y descendente a temperatura ambiente y BHCT.

**Tabla 10.** Datos reología Base I.

|      |              | Reología B-I |     |     |     |    |    |    |
|------|--------------|--------------|-----|-----|-----|----|----|----|
| T °F | RPM          | 300          | 200 | 100 | 60  | 30 | 6  | 3  |
| 85   | Lectura UP   | 85           | 73  | 57  | 50  | 42 | 20 | 16 |
|      | Lectura DOWN | 85           | 71  | 59  | 53  | 46 | 23 | 19 |
| 130  | Lectura UP   | 156          | 140 | 115 | 94  | 75 | 32 | 21 |
|      | Lectura DOWN | 156          | 140 | 119 | 109 | 79 | 38 | 29 |

**5.1.2 Tiempo de bombeabilidad.** El tiempo de bombeabilidad fue ejecutado siguiendo el procedimiento 4.3.7. La prueba tardo el tiempo de 2:00:00 (HH:MM:SS) conforme a los resultados mostrados en el **Anexo G**.

**5.1.3 Resistencia a la compresión echada base I (B-I) (Ensayo no destructivo).** Esta prueba se realizó conforme al procedimiento descrito en el ítem 3.3.8 en el equipo UCA. **Tabla 11**.

**Tabla 11.** Resultados resistencia a la compresión.

| HORA  | RESISTENCIA A LA COMPRESION (PSI) |
|-------|-----------------------------------|
| 1:52  | 50                                |
| 2:43  | 500                               |
| 8:00  | 2280                              |
| 12:00 | 2600                              |
| 18:00 | 3000                              |
| 24:00 | 3200                              |

Las mediciones hechas a los 50 psi y 500 psi corresponden a lo dicho por la norma mencionado en el ítem 4.1.5.

## 5.2 LECHADA BASE I CON MWCNT AL 0,1%BWOC (B-I 0,1)

Esta lechada aparte de contener cemento y agua, se le agrega 0,1% de MWCNT por BWOC que corresponde a 0,81 gr en la formulación de la **Tabla 8** obteniendo los siguientes resultados.

**5.2.1 Reología lechada base I con MWCNT al 0,1%BWOC.** Para la obtención de los datos de reología se realizó conforme al procedimiento 4.1.2 descrito anteriormente.

Los datos obtenidos que se muestran en la **Tabla 12** tienen unidades de ( $S^{-1}$ ); se tuvo lectura del viscosímetro rotacional de forma ascendente y descendente a temperatura ambiente y BHCT.

**Tabla 12.** Datos reología BASE I con 0,1% MWCNT.

| T °F | RPM          | Unidades<br>( $S^{-1}$ ) | Reología B-I 0,1 |     |     |     |    |    |    |
|------|--------------|--------------------------|------------------|-----|-----|-----|----|----|----|
|      |              |                          | 300              | 200 | 100 | 60  | 30 | 6  | 3  |
| 85   | Lectura UP   |                          | 70               | 57  | 45  | 37  | 30 | 15 | 13 |
|      | Lectura DOWN |                          | 70               | 60  | 48  | 43  | 37 | 20 | 15 |
| 130  | Lectura UP   |                          | 142              | 133 | 105 | 94  | 76 | 24 | 15 |
|      | Lectura DOWN |                          | 142              | 132 | 114 | 104 | 75 | 32 | 25 |

### 5.3 LECHADA BASE I CON MWCNT AL 0,25% BWOC (B-I 0,25)

Esta lechada aparte de contener cemento y agua, se le agrega 0,25% de MWCNT por BWOC que corresponde a 2,01 gr en la formulación de la **Tabla 8** obteniendo los siguientes resultados.

**5.3.1 Reología lechada base I con MWCNT al 0,25% BWOC.** Para la obtención de los datos de reología se realizó conforme al procedimiento 4.1.2 descrito anteriormente.

Los datos obtenidos que se muestran en la **Tabla 13** tienen unidades de ( $S^{-1}$ ); se tuvo lectura del viscosímetro rotacional de forma ascendente y descendente a temperatura ambiente y BHCT.

**Tabla 13.** Datos reología Base I con 0,25% MWCNT.

|      |              | Unidades     | Reología B-I 0,25 |     |     |     |    |    |    |
|------|--------------|--------------|-------------------|-----|-----|-----|----|----|----|
| T °F | RPM          | ( $S^{-1}$ ) | 300               | 200 | 100 | 60  | 30 | 6  | 3  |
| 85   | Lectura UP   |              | 72                | 62  | 47  | 40  | 33 | 16 | 11 |
|      | Lectura DOWN |              | 72                | 62  | 50  | 44  | 39 | 20 | 15 |
| 130  | Lectura UP   |              | 156               | 144 | 125 | 106 | 75 | 21 | 16 |
|      | Lectura DOWN |              | 156               | 140 | 120 | 109 | 80 | 37 | 29 |

### 5.4 LECHADA BASE I CON MWCNT AL 0,5% BWOC (B-I 0,5)

Esta lechada aparte de contener cemento y agua, se le agrega 0,5%BWOC de MWCNT que corresponde a 4,01 gr en la formulación de la tabla 21 obteniendo los siguientes resultados.

**5.4.1 Reología lechada base I con MWCNT al 0,5% BWOC.** Para la obtención de los datos de reología se realizó conforme al procedimiento 4.1.2 descrito anteriormente.

Los datos obtenidos que se muestran en la **Tabla 14** tienen unidades de ( $S^{-1}$ ); se tuvo lectura del viscosímetro rotacional de forma ascendente y descendente a temperatura ambiente y BHCT.

**Tabla 14.** Datos reología Base I con 0,5% MWCNT.

| Unidades |              |                    | Reología B-I 0,5 |     |     |    |    |    |    |
|----------|--------------|--------------------|------------------|-----|-----|----|----|----|----|
| T °F     | RPM          | (S <sup>-1</sup> ) | 300              | 200 | 100 | 60 | 30 | 6  | 3  |
| 85       | Lectura UP   |                    | 72               | 60  | 47  | 40 | 33 | 16 | 11 |
|          | Lectura DOWN |                    | 72               | 63  | 52  | 46 | 41 | 20 | 15 |
| 130      | Lectura UP   |                    | 136              | 125 | 109 | 92 | 70 | 17 | 10 |
|          | Lectura DOWN |                    | 136              | 120 | 102 | 94 | 80 | 25 | 17 |

## 5.5 LECHADA BASE II

Este diseño consiste en agua, cemento y aditivos; se incluirán cinco tipos de aditivos, un extendedor, dos controladores de filtrado, un retardador y un antiespumante. Las especificaciones se encuentran en la **Tabla 15**. La formulación se realizó como describe el numeral 4.4.1 para todas las lechadas.

**Tabla 15.** Especificaciones Base II.

| BASE II (B-II)                    |          |
|-----------------------------------|----------|
| Densidad                          | 16 ppg   |
| Rendimiento (ft <sup>3</sup> /Sx) | 1,12     |
| Requerimiento de Agua (gal/Sx)    | 4,82     |
| MATERIALES                        |          |
|                                   | PESO (g) |
| Cemento                           | 797,58   |
| Agua                              | 341,2    |
| Extendedor                        | 0,08     |
| Control de Filtrado 1             | 3,99     |
| Control de Filtrado 2             | 6,38     |
| Antiespumante                     | 0,71     |
| Retardador                        | 0,48     |

**5.5.1 Reología lechada base II.** Para la obtención de los datos de reología se realizó conforme al procedimiento 4.1.2 descrito anteriormente.

Los datos obtenidos que se muestran en la **Tabla 16** tienen unidades de (S<sup>-1</sup>); se tuvo lectura del viscosímetro rotacional de forma ascendente y descendente a temperatura ambiente y BHCT.

**Tabla 16.** Datos reología Base II.

| Unidades |              |                    | Reología B-II |     |     |    |    |    |    |
|----------|--------------|--------------------|---------------|-----|-----|----|----|----|----|
| T °F     | RPM          | (S <sup>-1</sup> ) | 300           | 200 | 100 | 60 | 30 | 6  | 3  |
| 85       | Lectura UP   |                    | 256           | 184 | 106 | 69 | 39 | 12 | 8  |
|          | Lectura DOWN |                    | 256           | 178 | 109 | 70 | 39 | 13 | 8  |
| 130      | Lectura UP   |                    | 280           | 214 | 130 | 91 | 56 | 22 | 12 |
|          | Lectura DOWN |                    | 280           | 205 | 123 | 84 | 50 | 18 | 14 |

**5.5.2 Tiempo de bombeabilidad lechada base II.** El tiempo de bombeabilidad fue ejecutado siguiendo el procedimiento 4.3.7. La prueba tardo el tiempo de 04:55:00 (HH:MM:SS) conforme a los resultados mostrados en el **Anexo H**. Se recuerda que cuando se alcanza los 70 Bc de consistencia se considera que la lechada es bombeable.

**5.5.3 Agua libre lechada base II.** Este procedimiento se realizó conforme al ítem 4.3.4 inclinando la probeta de 250 ml 45° simulando un pozo con ese ángulo.

**Tabla 17.** Resultados agua libre lechada Base II.

| Agua Libre | Volumen recolectado                    | 0   | ml     |
|------------|--|-----|--------|
|            | Temperatura circulante de fondo (BHCT) | 133 | °F     |
|            | Angulo $\Theta$                        | 45° | grados |

**5.5.4 Pérdida de filtrado lechada base II.** En este procedimiento se tuvo en cuenta lo mencionado en el ítem 4.3.6 recolectando los valores a distintos tiempos.

Para calcular la pérdida de filtrado, se realiza conforme a lo estipulado en la norma API 10B-2; se multiplica por dos el valor leído a los 30 minutos y se expresa en unidades API. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 18**.

**Tabla 18.** Resultados pérdida de filtrado lechada Base II.

| $\Delta P$ 1000 psi | Tiempo (min) | 0 | 0,5 | 1 | 2   | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | API |
|---------------------|--------------|---|-----|---|-----|---|-----|----|----|----|----|----|-----|
|                     | Volumen (mL) | 0 | 2   | 3 | 3,5 | 4 | 8   | 9  | 11 | 13 | 15 | 16 | 32  |

**5.5.5 Resistencia a la compresión lechada base II (Ensayo no destructivo).** Esta prueba se realizó conforme al procedimiento descrito en el ítem 4.3.8 en el equipo UCA.

Las mediciones hechas a los 50 psi y 500 psi corresponden a lo dicho por la norma mencionado en el ítem 4.1.5.

**Tabla 19.** Resultados resistencia a la compresión lechada Base II.

| HORA  | RESISTENCIA A LA COMPRESION (PSI) |
|-------|-----------------------------------|
| 8:00  | 0                                 |
| 12:00 | 0                                 |
| 14:56 | 50                                |
| 15:52 | 500                               |
| 18:00 | 1396                              |
| 24:00 | 2414                              |

## 5.6 LECHADA BASE II CON MWCNT 0,1% BWOC (B-II 0,1)

Este diseño consiste en agua, cemento y que corresponde al 0,1% en BWOC. En la **Tabla 20** se muestran las concentraciones y especificaciones de la lechada B-I 0,1.

**Tabla 20.** Especificaciones Base II con 0,1% MWCNT.  
BASE II con 0,1%MWCNT (B-II 0,1)

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| Densidad                       | 16 ppg   |
| Rendimiento (ft3/Sx)           | 1,12     |
| Requerimiento de Agua (gal/Sx) | 4,82     |
| <b>MATERIALES</b>              | PESO (g) |
| Cemento                        | 797,58   |
| Agua                           | 340,4    |
| Extendedor                     | 0,08     |
| Control de Filtrado 1          | 3,99     |
| Control de Filtrado 2          | 6,38     |
| Antiespumante                  | 0,71     |
| Retardador                     | 0,48     |
| MWCNT (0,1%)                   | 0,81     |

**5.6.1 Reología lechada base II con MWCNT 0,1% BWOC.** Para la obtención de los datos de reología se realizó conforme al procedimiento 4.3.5 descrito anteriormente.

Los datos obtenidos que se muestran en la **Tabla 21** tienen unidades de ( $S^{-1}$ ); se tuvo lectura del viscosímetro rotacional de forma ascendente y descendente a temperatura ambiente y BHCT.

**Tabla 21.** Datos reológicos Base II con 0,1% MWCNT.

|             |              | Unidades     | Reología B-II 0,1% |     |     |    |    |    |    |
|-------------|--------------|--------------|--------------------|-----|-----|----|----|----|----|
| <b>T °F</b> | RPM          | ( $S^{-1}$ ) | 300                | 200 | 100 | 60 | 30 | 6  | 3  |
| <b>85</b>   | Lectura UP   |              | 255                | 186 | 108 | 71 | 43 | 15 | 10 |
|             | Lectura DOWN |              | 255                | 185 | 105 | 70 | 40 | 11 | 8  |
| <b>130</b>  | Lectura UP   |              | 260                | 191 | 115 | 84 | 52 | 18 | 10 |
|             | Lectura DOWN |              | 260                | 192 | 111 | 75 | 45 | 15 | 9  |

**5.6.2 Agua libre lechada base II con MWCNT 0,1% BWOC.** Este procedimiento se realizó conforme al ítem 4.3.4 inclinando la probeta de 250 ml 45° simulando un pozo con ese ángulo.

**Tabla 22.** Resultado agua libre lechada Base II con MWCNT 0,1% BWOC.

| Agua Libre | Volumen recolectado                    | 0   | ml     |
|------------|--|-----|--------|
|            | Temperatura circulante de fondo (BHCT) | 133 | °F     |
|            | Angulo $\Theta$                        | 45° | grados |

**5.6.3 Pérdida de filtrado lechada base II con MWCNT 0,1% BWOC.** En este procedimiento se tuvo en cuenta lo mencionado en el ítem 4.3.6 recolectando los valores a distintos tiempos.

Para calcular la pérdida de filtrado, se realiza conforme a lo estipulado en la norma API 10B-2; se multiplica por dos el valor leído a los 30 minutos y se expresa en unidades API. Los datos obtenidos se muestran en la **Tabla 23**.

**Tabla 23.** Datos filtrado Base II 0,1% MWCNT.

| $\Delta P$<br>1000<br>psi | Tiempo (min) | 0 | 0,5 | 1   | 2 | 5   | 7,5 | 10 | 15  | 20   | 25   | 30 | API |
|---------------------------|--------------|---|-----|-----|---|-----|-----|----|-----|------|------|----|-----|
|                           | Volumen (mL) | 0 | 2   | 2,5 | 3 | 5,5 | 6,5 | 8  | 9,5 | 10,5 | 12,5 | 14 | 32  |

## 5.7 LECHADA BASE II CON MWCNT 0,25% BWOC (B-II 0,25)

Este diseño consiste en agua, cemento, aditivos y 0,25% en BWOC de MWCNT. En la **Tabla 24** se muestran las concentraciones y especificaciones de la lechada B1 0,25.

**Tabla 24.** Formulación de la lechada Base I con MWCNT al 0.25% BWOC.

| BASE II con 0,25%MWCNT (B-II 0,25) |          |
|------------------------------------|----------|
| Densidad                           | 16 ppg   |
| Rendimiento (ft <sup>3</sup> /Sx)  | 1,12     |
| Requerimiento de Agua (gal/Sx)     | 4,82     |
| <b>MATERIALES</b>                  | PESO (g) |
| Cemento                            | 797,58   |
| Agua                               | 339,21   |
| Extendedor                         | 0,08     |
| Control de Filtrado 1              | 3,99     |
| Control de Filtrado 2              | 6,38     |
| <b>Continuación</b>                |          |
| Antiespumante                      | 0,71     |
| Retardador                         | 0,48     |
| MWCNT (0,1%)                       | 2,01     |

**5.7.1 Reología lechada base II con MWCNT 0,25% BWOC.** Para la obtención de los datos de reología se realizó conforme al procedimiento 4.3.5 descrito anteriormente.

Los datos obtenidos que se muestran en la **Tabla 25** tienen unidades de ( $S^{-1}$ ); se tuvo lectura del viscosímetro rotacional de forma ascendente y descendente a temperatura ambiente y BHCT.

**Tabla 25.** Datos reológicos BASE II con 0,25% MWCNT.

| T °F | RPM          | Unidades     | Reología B-II 0,25% |     |     |     |    |    |    |
|------|--------------|--------------|---------------------|-----|-----|-----|----|----|----|
|      |              | ( $S^{-1}$ ) | 300                 | 200 | 100 | 60  | 30 | 6  | 3  |
| 85   | Lectura UP   |              | 300                 | 240 | 151 | 105 | 71 | 35 | 32 |
|      | Lectura DOWN |              | 300                 | 235 | 135 | 87  | 50 | 15 | 11 |
| 130  | Lectura UP   |              | 300                 | 230 | 147 | 105 | 67 | 29 | 20 |
|      | Lectura DOWN |              | 300                 | 221 | 133 | 90  | 54 | 17 | 13 |

**5.7.2 Agua libre lechada base II con MWCNT 0,25% BWOC.** Este procedimiento se realizó conforme al ítem 4.3.4 inclinando la probeta de 250 ml  $45^\circ$  simulando un pozo con ese ángulo.

**Tabla 26.** Resultado agua libre lechada BASE II con MWCNT 0,25%BWOC.

| Agua Libre | Volumen recolectado                    | 0          | ml     |
|------------|--|------------|--------|
|            | Temperatura circulante de fondo (BHCT) | 133        | °F     |
|            | Angulo $\Theta$                        | $45^\circ$ | grados |

**5.7.3 Pérdida de filtrado lechada base II con MWCNT 0,25% BWOC.** En este procedimiento se tuvo en cuenta lo mencionado en el ítem 4.3.6 recolectando los valores a distintos tiempos.

Para calcular la pérdida de filtrado, se realiza conforme a lo estipulado en la norma API 10B-2; se multiplica por dos el valor leído a los 30 minutos y se expresa en unidades API. Los datos obtenidos se muestran en la **Tabla 27**.

**Tabla 27.** Datos filtrado BASE II 0,25% MWCNT.

| $\Delta P$<br>1000<br>psi | Tiempo (min) | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 20   | 25 | 30 | API |
|---------------------------|--------------|---|-----|---|---|---|-----|----|----|------|----|----|-----|
|                           | Volumen (mL) | 0 | 2,5 | 3 | 4 | 6 | 7,5 | 9  | 11 | 12,5 | 14 | 15 | 30  |

## 5.8 LECHADA BASE II CON MWCNT 0,5% BWOC (B-II 0,5)

Este diseño consiste en agua, cemento y l 0,5% en BWOC de MWCNT. En la **Tabla 28** se muestran las concentraciones y especificaciones de la lechada B I 0,5.



**Tabla 28.** Formulación BASE I con MWCNT al 0.5%BWOC.

| BASE II con 0,5%MWCNT (B-II 0,5)  |                 |
|-----------------------------------|-----------------|
| Densidad                          | 16 ppg          |
| Rendimiento (ft <sup>3</sup> /Sx) | 1,12            |
| Requerimiento de Agua (gal/Sx)    | 4,82            |
| <b>MATERIALES</b>                 | <b>PESO (g)</b> |
| Cemento                           | 797,58          |
| Agua                              | 339,21          |
| Extendedor                        | 0,08            |
| Control de Filtrado 1             | 3,99            |
| Control de Filtrado 2             | 6,38            |
| Antiespumante                     | 0,71            |
| Retardador                        | 0,48            |
| MWCNT (0,1%)                      | 2,01            |

**5.8.1 Reología lechada base II con MWCNT 0,5% BWOC.** Para la obtención de los datos de reología se realizó conforme al procedimiento 4.3.5 descrito anteriormente.

Los datos obtenidos que se muestran en la **Tabla 29** tienen unidades de (S<sup>-1</sup>); se tuvo lectura del viscosímetro rotacional de forma ascendente y descendente a temperatura ambiente y BHCT.

**Tabla 29.** Datos reológicos BASE II con 0,5% MWCNT.

| Unidades   |              | Reología B-II 0,5% |     |     |     |    |    |    |    |
|------------|--------------|--------------------|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| T °F       | RPM          | (S <sup>-1</sup> ) | 300 | 200 | 100 | 60 | 30 | 6  | 3  |
| <b>85</b>  | Lectura UP   |                    | 263 | 200 | 120 | 95 | 70 | 57 | 45 |
|            | Lectura DOWN |                    | 263 | 192 | 110 | 73 | 43 | 15 | 12 |
| <b>130</b> | Lectura UP   |                    | 300 | 230 | 135 | 93 | 64 | 22 | 14 |
|            | Lectura DOWN |                    | 300 | 221 | 132 | 91 | 55 | 18 | 11 |

**5.8.2 Agua libre lechada base II con MWCNT 0,5% BWOC.** Este procedimiento se realizó conforme al ítem 4.3.4 inclinando la probeta de 250 ml 45° simulando un pozo con ese ángulo.

**Tabla 30.** Resultado agua libre lechada BASE II con MWCNT 0,5%BWOC.

|                   |  |          |           |
|-------------------|--|----------|-----------|
| <b>Agua Libre</b> | <b>Volumen recolectado</b>             | <b>0</b> | <b>ml</b> |
|                   | Temperatura circulante de fondo (BHCT) | 133      | °F        |
|                   | Angulo $\Theta$                        | 45°      | grados    |

**5.8.3 Pérdida de filtrado lechada base II con MWCNT 0,5% BWOC.** En este procedimiento se tuvo en cuenta lo mencionado en el ítem 3.3.6 recolectando los valores a distintos tiempos.

**Tabla 31.** Datos filtrado BASE II 0,5% MWCNT.

| $\Delta P$<br>1000<br>psi | Tiempo (min) | 0 | 0,5 | 1   | 2 | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30   | API |
|---------------------------|--------------|---|-----|-----|---|---|-----|----|----|----|----|------|-----|
|                           | Volumen (mL) | 0 | 2   | 2,5 | 5 | 7 | 8,5 | 10 | 11 | 12 | 13 | 15,5 | 31  |

## 6. SELECCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES APROPIADAS DE LAS LECHADAS EVALUADAS

Con respecto a los datos obtenidos en el laboratorio, se realizará un análisis de resultados para seleccionar una lechada óptima por cada base con MWCNT. Conforme a esto, se harán pruebas de análisis de propiedades físicas en las que involucra el tiempo de bombeabilidad y además, un análisis de las propiedades mecánicas.

Para el análisis es importante tener en cuenta que no se realizaron todas las pruebas para las ocho lechadas, debido a que, al ejecutar las pruebas de agua libre y pérdida de filtrado podría afectar su funcionalidad y como consecuencia dañar el equipo. A continuación estarán los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio de Superior Energy Services.

### 6.1 ANÁLISIS REOLÓGICOS

Para el cálculo de las viscosidades plásticas ( $V_p$ ) y punto cedente ( $Y_p$ ) de cada una de las pruebas realizadas; se utilizaron las **Ecuaciones 8 y 9** respectivamente. La **Tabla 32** contiene estos valores ya calculados.

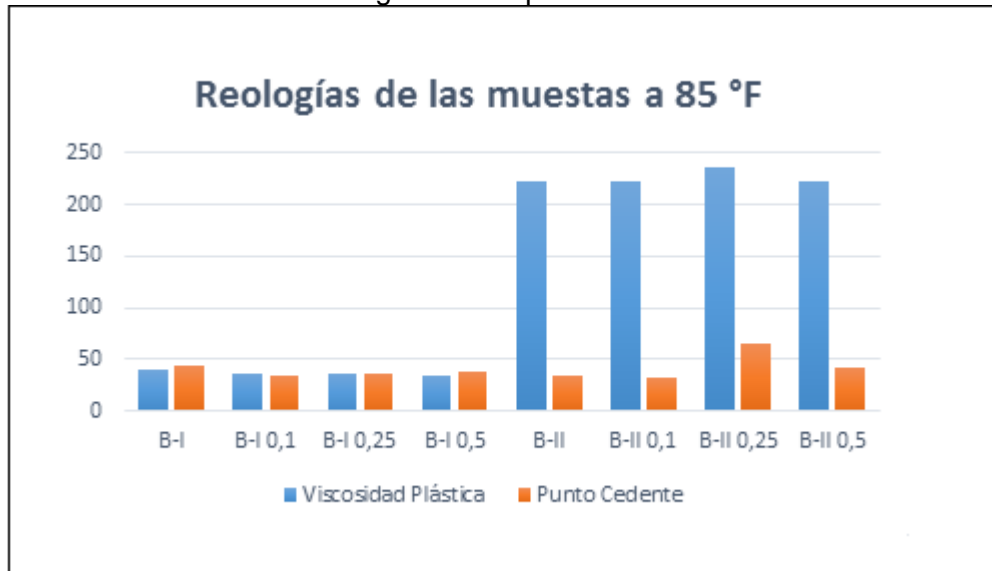
Los cálculos de las dos condiciones de reología se muestran en el **Anexo D** y **Anexo E**.

**Tabla 32.** Resumen reológico para cada muestra.

| T°F | Propiedad         |          | B-I  |      |       |       | B-II  |       |       |       |
|-----|-------------------|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |                   |          | 0,1  | 0,25 | 0,5   |       | 0,1   | 0,25  | 0,5   |       |
| 85  | Viscosidad (cP)   | Plástica | 40,5 | 35,3 | 35,3  | 33,75 | 222,8 | 222,8 | 235,5 | 222   |
|     | Punto (lb2/100ft) | Cedente  | 44,5 | 34,8 | 36,8  | 38,25 | 33,3  | 32,25 | 64,5  | 41    |
| 133 | Viscosidad (cP)   | Plástica | 58,5 | 48,8 | 50,3  | 45,75 | 230,2 | 220,5 | 240   | 249,8 |
|     | Punto (lb2/100ft) | Cedente  | 97,5 | 93,3 | 105,8 | 90,25 | 49,8  | 39,5  | 60    | 50,3  |

Se destaca, que los valores calculados de  $V_p$  y  $Y_p$  entran en los criterios recomendados por la norma API y el requerimiento mínimo exigido por la empresa situado en un intervalo entre 50 y 70 lb2/100ft para punto cedente y para viscosidad plástica esta entre 180 y 240 cP correspondiendo únicamente para la lechada BASE II. Para las lechadas BASES I no se aplica debido a que esta muestra se estableció para evaluar el efecto del MWCNT sobre la lechada.

**Gráfica 2.** Resultados reológicos a temperatura ambiente.

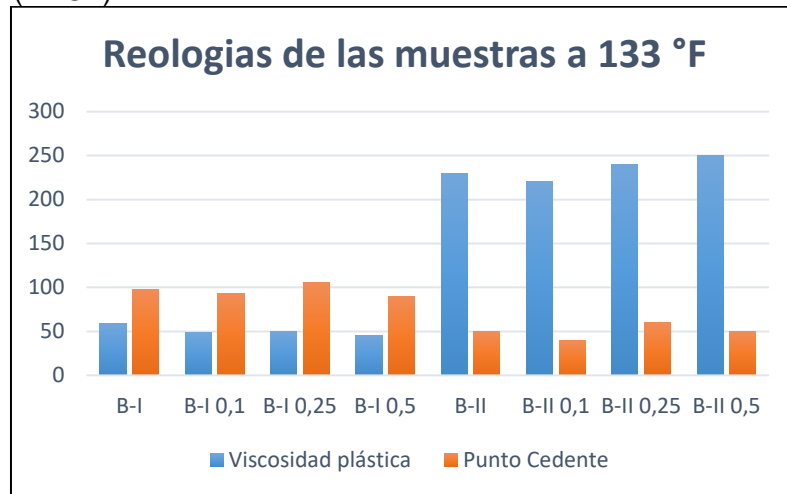


En general, podemos decir que tanto para BASE I como para BASE II la presencia del nanotubo de carbono (MWCNT) afecta la fluidez de la lechada. Teniendo en cuenta lo descrito en el numeral 4.1.4,

En la **Gráfica 2** se puede observar la disminución de la viscosidad plástica frente a la lechada BASE I y de manera análoga, el punto cedente al aumentar la concentración de MWCNT. A temperatura ambiente la inclusión de este nano compuesto disminuye las propiedades reológicas a un porcentaje promedio de 14,8% con respecto a la mezcla BASE I (B-I). Esto pudo ser causado por la baja concentración de MWCNT en la amplia dispersión del surfactante y además, del agua utilizada en el diseño de lechadas; por lo que se dispersaría aún más. Para las lechadas B-I 0,25 y B-I 0,5 ocurre un leve incremento del punto cedente comparada con la B-I 0,1 y que se debe a la ligera presencia del MWCNT que potencializa la formación de geles (tixotropía) en el proceso de hidratación del cemento.

En relación a las pruebas con BASE II, en la **Gráfica 2** se presentó un aumento de 5,7% para la viscosidad plástica y 93,7% para punto cedente; este último incremento se debe al comportamiento tixotrópico generado por la presencia del MWCNT y los controladores de filtrado que aceleran el proceso de hidratación del cemento a la lechada BASE II con 0,25% MWCNT. En las lechadas B-II 0,5 y B-II 0,1 el comportamiento viscoso fue similar a la base, el punto cedente se incrementó por las tixotropías de la lechada haciéndola selectiva para el tipo de trabajo donde se desee aplicar. En general, A temperatura ambiente el proceso de gelificación se presentó de manera rápida luego de realizarse el proceso de mezcla.

**Gráfica 3.** Resultados reológicos a temperatura circulante (BHCT).



En la **Gráfica 3** se evidencia el efecto que tiene el aumento de temperatura para cada una de las lechadas. La viscosidad plástica entre las lechadas BASE I se mantuvo baja a pesar de aumentar la temperatura. Se vio similar al visto con la temperatura ambiente, no se evidenció aumento en esta propiedad a causa de la alta dispersión presentada en esa lechada. En cambio, hubo un aumento en el punto cedente, lo que señala formación súbita de geles y teniendo como consecuencia un comportamiento tixotrópico. La concentración que mayor presentó este efecto fue la B-I 0,25%.

Con respecto al efecto en las lechadas BASE II, la temperatura circulante aumentó la viscosidad comparado a la temperatura ambiente debido a la inversa proporción que tiene con el tiempo de fraguado. La muestra B-II 0,1 fue la única que no mejoró las propiedades reológicas con respecto a la B-II. La B-II 0,5 obtuvo una viscosidad plástica 8,5% mayor; manteniendo el punto cedente similar a la B-II. En cambio, la B-II 0,25 aumento la viscosidad plástica y punto cedente un 4,22% y 20,6%, respectivamente. La causa de este comportamiento por parte de las lechadas B-II 0,1 y B-II 0,25 es originada por la concentración de aditivos y el surfactante presente en la dispersión del nano tubo que aceleran el contacto de las moléculas de agua con los granos de cemento.<sup>68</sup> En las lechadas B-II 0,1 y B-II 0,5 ocurre una discrepancia similar a la presentada en las lechadas B-I 0,1 y B-I 0,5 ocasionado por la temprana formación de geles en el proceso de hidratación.

Analíticamente, el fenómeno tixotrópico presentado en las lechadas mencionadas anteriormente, se debe a la presencia del dispersante que acompaña los MWCNT

<sup>68</sup> OSCAR, M. THE ROLE OF SURFACE AREA AND COMPACTY OF NANOPARTICLES ON THE RHEOLOGY OF CEMENT PASTE. En: ResearchGate. University of Rio de Janeiro. August 2017. p 2-4.

debido a que interviene en los espacios de la matriz granular del cemento y como consecuencia, la modificación del área superficial del MWCNT.<sup>69</sup>

Conforme a lo anterior, las lechadas que representan un comportamiento reológicos uniforme y que además, se lograron observar cambios con respecto a las mezclas bases para continuar el análisis de propiedades mecánicas son la B-I 0,25 y B-II 0,25.

## 6.2 ANÁLISIS AGUA LIBRE

Como se dijo anteriormente, esta prueba se realizó únicamente para las lechadas BASES II. En cada una de los resultados mostrados en las **Tablas 23, 27, 31 y 35** para las lechadas B-II, B-II 0,1, B-II 0,25 y B-II 0,5 respectivamente, se evidencia que no hubo presencia de agua libre en ninguna de las muestras. Este valor es positivo ya que demuestra contención completa de las moléculas de agua dentro de la matriz C-H-S. De tal modo que la inclusión del nanotubo no actúa en la separación del agua con la lechada en un determinado tiempo resultando positivo para incluir en los diseños futuros.

## 6.3 ANÁLISIS PÉRDIDA DE FILTRADO

Esta prueba, para las lechadas BASE I, no se llevó a cabo debido a que afectaba la integridad del equipo. A continuación se muestra la **Tabla 33** en la cual se muestran los valores de pérdida de filtrado en unidades API para las lechadas BASE II.

**Tabla 33.** Pérdida de filtrado para las lechadas Base II.

| Lechada   | Fluid Loss (API <i>fluid loss</i> ) |
|-----------|-------------------------------------|
| B-II      | 32                                  |
| B-II 0,1  | 28                                  |
| B-II 0,25 | 30                                  |
| B-II 0,5  | 31                                  |

Para el cálculo del valor de la pérdida de filtrado se tuvo en cuenta los resultados obtenidos descritos en las **Tablas 24, 28, 32 y 36** para las lechadas B-II, B-II 0,1, B-II 0,25 y B-II 0,5 respectivamente.

Según la norma, cuando habla de pérdida de filtrado<sup>70</sup>, el rango depende de la operación que se desea. Si está en un rango de 60 a 70 API, es usualmente obtenido para trabajos forzados cuando hay perdidas, se dice que para una cementación primaria está en un rango de 25 a 50 PSI (rango relevante en este diseño). En general, las lechadas presentaron un valor dentro del criterio

<sup>69</sup> OSCAR, M. THE ROLE OF SURFACE AREA AND COMPACITY OF NANOPARTICLES ON THE RHEOLOGY OF CEMENT PASTE. *En:* ResearchGate. University of Rio de Janeiro. August 2017. p 23-25

<sup>70</sup> SUPERIOR ENERGY SERVICES Laboratorio, Op., Cit., p. 59.

recomendado para un trabajo de cementación primaria, las variaciones no son consideradas entre cada una de ellas. La lechada con mejor valor de *fluid loss* es la B-II 0,1.

#### **6.4 SELECCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES**

Para la selección de la lechada B-I PRO y B-II PRO (con la concentración óptima de MWCNT) se analizaron principalmente los resultados reológicos puesto a que las demás pruebas no mostraron una variación significativa al añadirle el nano compuesto.

Según la **Tabla 37** y lo analizado en el numeral 6.1 las bases que mejor mostraron una variación en términos de incremento (debido a que las lechadas evaluadas se diseñaron a una densidad de 16 ppg) para la viscosidad plástica y el punto cedente contrastado con las bases I y II, son las que contienen una concentración de MWCNT del 0,25%. Los valores de pérdida de filtrado son aceptables para cualquiera de las concentraciones evaluadas ya que no presentan gran diferencia entre ellas.

## 7. EVALUACIÓN DE LAS LECHADAS SELECCIONADAS

Según el capítulo anterior, las lechadas donde se encontró principalmente una variación significativa en la prueba de reología fueron BASE I con 0,25% de MWCNT y BASE II con 0,25%. Para estas lechadas se determinarán las propiedades físicas y mecánicas que se evalúan para las lechadas en la empresa Superior Energy Services; estas pruebas son: tiempo de bombeabilidad como propiedad física, resistencia a la compresión y comportamiento elástico como propiedades mecánicas.

### 7.1 PROPIEDAD FÍSICA

Se selecciona el tiempo de bombeabilidad o de espesamiento como propiedad física debido a que evalúa el comportamiento del fluido cuando es bombeado a través de un revestimiento. Este comportamiento se rige principalmente por la reología, ya que esta describe a grandes rasgos la viscosidad del fluido y la fuerza mínima necesaria para que entre en movimiento. En la práctica, el tiempo de bombeabilidad se efectúa para corroborar la condición reológica prevista en las pruebas realizadas cuando se somete a condiciones circulantes (BHCT y BHP). A continuación se mostraran los resultados obtenidos y los respectivos análisis de las pruebas que concierne al tiempo de bombeabilidad.

**7.1.1 Resultados y análisis de la prueba tiempo de bombeabilidad.** Para este procedimiento se validaron los datos repitiendo las pruebas una sola vez obteniendo los resultados mostrados en la **Tabla 34**.

**Tabla 34.** Resultados tiempo de bombeabilidad al alcanzar los 70 Bcs.

| LECHADA @ 100Bc     | Tiempo dado (HH:MM) | Tiempo esperado según API (HH:MM) |
|---------------------|---------------------|-----------------------------------|
| BASE I (B-I)        | 02:00               | 1:30 – 2:00                       |
| BASE I (B-I 0,25)   | 02:02               | 1:30 – 2:00                       |
| BASE II (B-II)      | 04:55               | N/A                               |
| BASE II (B-II 0,25) | 04:30               | N/A                               |

Según la norma, API 10 A, el intervalo requerido para que una lechada de cemento (BASE I) este dentro de las recomendaciones para que sea bombeada son de 90 a 120 minutos, el valor registrado en las pruebas debe estar dentro de este criterio cuando sea alcanzado el valor de consistencia de 100 Bc. Para la lechada B-I y B-I 0,25 se observa que la inclusión del nanotubo de carbono no influye en el tiempo de espesamiento de un cemento clase G por lo que cumple con la recomendación API.<sup>71</sup> Los resultados obtenidos por las pruebas se encuentran en los **Anexos G** y **J** respectivamente.

<sup>71</sup> API 10B-2. Op. Cit., p.4.



Para las lechadas BASE II no aplica esta recomendación debido a que para este tipo de lechadas, el valor de tiempo de bombeabilidad va dentro de los requerimientos del trabajo de cementación a realizar y que además, es controlado con la adición del aditivo retardante definido en el numeral 4.2.1. En relación al efecto que tiene la adición de MWCNT en el tiempo de bombeabilidad, se observa que para lechada B-II 0,25, la presencia de este aditivo minimiza aproximadamente 30 minutos el tiempo de bombeo. Esto puede ser causado principalmente por la reactividad que tiene el surfactante sobre el efecto del retardador y como consecuencia también sobre los demás aditivos.

## 7.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

En el análisis de las propiedades mecánicas de las lechadas seleccionadas y las lechadas bases, se evaluarán las resistencias a la compresión por método destructivo y no destructivo, y se comprobarán los resultados entre los dos métodos. Se medirá el módulo de elasticidad, módulo de Bulk para determinar la relación de Poisson que corresponden a propiedades del material fraguado. Los resultados y análisis se muestran a continuación. La norma API no determina un valor fijo de resistencia a la compresión ni de las propiedades mecánicas debido a que este requerimiento es predeterminado por la solicitud del cliente correspondiendo al tipo de trabajo de cementación que se desea realizar.

**7.2.1 Resistencia a la compresión método no destructivo.** Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron con forme al procedimiento descrito en el numeral 4.3.8 obteniendo los resultados mostrados en la **Tabla 35**.

**Tabla 35.** Resultados resistencia a la compresión método no destructivo.

|                |          | Resistencia a la compresión (PSI) |      |      |          |          |
|----------------|----------|-----------------------------------|------|------|----------|----------|
| TIEMPO         |          | 8H                                | 12H  | 24H  | 50 psi   | 500 psi  |
| <b>LECHADA</b> | B-I      | 2254                              | 2688 | 3208 | 1:52:00  | 2:43:00  |
|                | B-I PRO  | 2143                              | 2659 | 3202 | 2:21:00  | 3:15:00  |
|                | B-II     | 0                                 | 0    | 2414 | 14:56:00 | 15:52:00 |
|                | B-II PRO | 0                                 | 0    | 2456 | 13:37:00 | 14:51:00 |

Los datos son sacados de los resultados evaluados por el programa *Chandler 5270 data Acquisition and Control System* y que se encuentran desde el **Anexo K** hasta el **Anexo N** respectivamente.

Los valores tabulados muestran que a las 8 y 12 horas de las lechadas B-II y B-II PRO no desarrollaron resistencia a lo largo del tiempo mencionado, esto se debe a la simulación establecida en el numeral 4.4 manifestando que las condiciones estáticas del pozo (BHST y BHP) no se han alcanzado para ese tiempo; las condiciones estáticas se alcanzaron a 13:20 y 14:34 para B-II PRO y B-II

respectivamente. Adicionalmente la participación de los aditivos, especialmente el retardador, contribuyeron al lento tiempo de fraguado y por ende, al aumento de la resistencia.

Según los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión por método no destructivo la inclusión del MWCNT no influye de manera significativa este valor. Al comparar las bases B-I y B-II 0,25% se puede observar que este aditivo no contribuye al aumento de la resistencia a la compresión, por el contrario, disminuye cuando alcanza las primeras 8 horas, y finalmente se normaliza con respecto a la BASE I cuando se culminan las 24 horas. Este fenómeno puede deberse a la naturaleza del dispersante, como se menciona en el numeral 2.1.2, el método de dispersión y el agente dispersante son claves para que el nano compuesto se posicione en la matriz de la lechada. El agente que actúa como ayudante en la dispersión del nanotubo afecta su área superficial obstruyendo el proceso de nucleación del nano compuesto sobre la matriz granular de la lechada.<sup>72</sup>

En relación al tiempo obtenido para desarrollar los 50 y 500 psi de resistencia a la compresión, la muestra B-I PRO manifestó un aumento en el tiempo de desarrollo sin embargo, la muestra B-II PRO sucedió al contrario, disminuyendo el tiempo de desarrollo 1 hora en promedio.

**7.2.2 Resistencia a la compresión método destructivo.** La prueba se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 4.3.9 para cada una de las muestras evaluadas. Los resultados obtenidos se encuentran resumidos en la **Tabla 36**.

**Tabla 36.** Resultados resistencia a la compresión método destructivo.

|                               |          | LECHADA |         |       |          |
|-------------------------------|----------|---------|---------|-------|----------|
|                               | UNIDADES | B-I     | B-I PRO | B-II  | B-II PRO |
| <b>CUBO 1</b>                 | lbf      | 16354   | 12247   | 11034 | 12314    |
| <b>CUBO 2</b>                 |          | 9535    | 13303   | 11059 | 10763    |
| <b>CUBO 3</b>                 |          | 14126   | 15625   | 10658 | 10523    |
| <b>CUBO 4</b>                 |          | 15325   | 12204   | 11698 | 11625    |
| <b>Resistencia compresión</b> | la psi   | 3158    | 3336    | 2778  | 2826     |

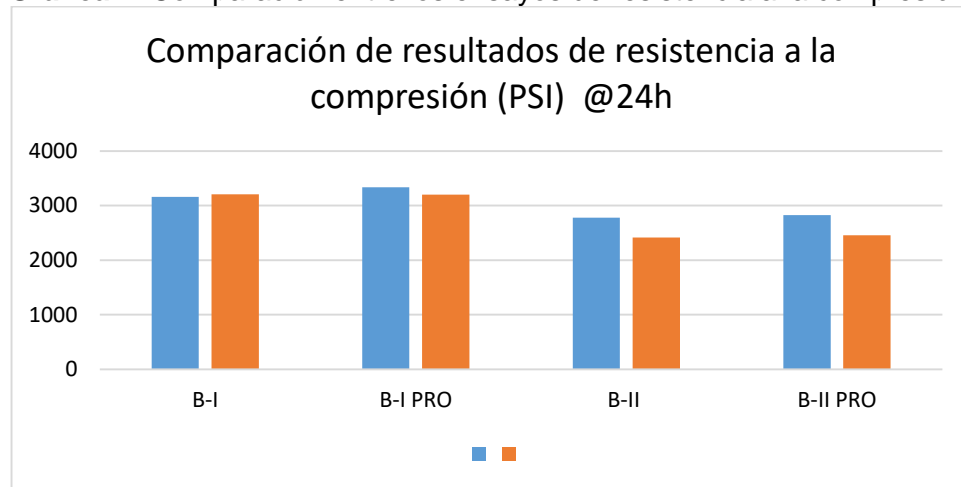
La norma API sugiere realizar la prueba con 4 cubos de la misma lechada para minimizar el error experimental que se presente al momento de ejecutarla. En la **Tabla 36** se puede observar una inconsistencia de un cubo a otro para cada muestra; esto es causado por la presencia de burbujas de aire suspendidas en la lechada al momento de llenar los cubos.

<sup>72</sup> Ibid., p. 26.

Los datos obtenidos resumidos en la **Tabla 36** se encuentran en unidades de fuerza lbf y gráficamente se muestran en el los **Anexos** del **Ñ** al **Q**. Para determinar el valor de resistencia a la compresión es necesario realizar un promedio entre los valores de los cuatro cubos por cada lechada y dividirlos por cuatro ya que el área promedio de cada cubo es de 2x2.

Fundamentalmente, la prueba de resistencia a la compresión por método destructivo consiste en aplicar una fuerza sobre la muestra hasta llevarla al punto de fractura, por tal razón los valores obtenidos son grandes.

**Gráfica 4.** Comparación entre los ensayos de resistencia a la compresión.



Los valores de resistencia a la compresión determinados por medio de esta prueba, varían con respecto al ensayo no destructivo mostrado anteriormente. En la **Gráfica 4** se observa que la desviación de este valor no es significativa y que entra en un rango de más o menos 500 psi para las mezclas B-II y B-II PRO. Esta prueba se hace con el fin de determinar la resistencia a la compresión para un determinado tiempo de curado, limitando así el seguimiento de esta propiedad a lo largo del tiempo tal como lo hace el ensayo no destructivo.

**7.2.3 Resultados y Análisis de las Propiedades Mecánicas de las lechadas B-I y B-II PROs.** El ensayo que se llevó a cabo para evaluar las propiedades mecánicas de las lechadas PROs fue conforme al procedimiento descrito en el numeral 4.3.10 y bajo las condiciones de programación señaladas en el numeral 4.4 relacionado a las condiciones circulantes y estáticas del pozo.

En la **Tabla 37** se resumen los datos obtenidos de las propiedades mecánicas; esencialmente, se analiza el comportamiento elástico del material por medio de los parámetros mecánicos evaluados.

**Tabla 37.** Resumen resultados de las propiedades mecánicas de las lechadas PROs.

| PROPIEDADES MECÁNICAS |                        |      |                       |      |                     |    |
|-----------------------|------------------------|------|-----------------------|------|---------------------|----|
|                       | Módulo de Young (Kpsi) |      | Módulo de Bulk (Kpsi) |      | Relación de Poisson |    |
| <b>TIEMPO (h)</b>     | 24                     | 48   | 24                    | 48   | 24                  | 48 |
| <b>B-I</b>            | 2178                   | 2293 | 2071                  | 2160 | 0,32                |    |
| <b>B-I PRO</b>        | 1522                   | 1595 | 2785                  | 2946 | 0,41                |    |
| <b>B-II</b>           | 712                    | 2017 | 435                   | 1578 | 0,3                 |    |
| <b>B-II PRO</b>       | 2004                   | 2246 | 2081                  | 2298 | 0,34                |    |

Según los resultados tabulados en la **Tabla 37**, el módulo de Young para las lechadas B-I y B-I PRO presentaron entre ellas una diferencia de casi 1000 Kpsi. La lechada B-I PRO presentó un menor modulo que la B-I (44% menos), recordemos que esta propiedad describe el comportamiento elástico de la lechada, cuando el Modulo de Young es pequeño, la elasticidad del material es mayor. Por tal razón, la adición del MWCNT afecta positivamente la elasticidad de la lechada base I, esto implica que en la aplicación en un pozo donde presente cambios abruptos de presión dentro del revestimiento evite la separación del cemento fraguado de la pared del revestimiento y de la formación.

De manera diferente ocurre para las lechadas B-II y B-II PRO, la presencia de los aditivos afectó el comportamiento elástico ocurrido por la adición del nanotubo aumentando el valor del módulo de Young un 11,35% a las 48 horas, obteniendo una mayor rigidez en esa muestra.

En el análisis del módulo de Bulk, la lechada B-I PRO presentó un aumento del 34,5% comparado con la muestra B-I, recordemos que esta propiedad describe el aumento de presión necesario que se aplica al material para causar una variación del volumen con respecto a volumen inicial. Aplicado a la muestra B-I PRO, la presión necesaria para causar una variación en el volumen de la lechada es mayor a la necesaria para la muestra B-I. De igual manera ocurre para las lechadas B-II PRO el aumento del módulo de Bulk. Presentó un incremento aproximado del 46 % con respecto a la B-II. Esto describe el efecto que tiene el nano compuesto sobre el volumen de la muestra, finiquitando que la posición de los nanotubos es mejor posicionada en el volumen de una muestra de cemento fraguado y no de forma axial como lo analiza el módulo de Young para las muestras BASE II PRO y BASE II.

La relación de Poisson es la relación que indica la incompresibilidad de un material cuando se quiere llevar al punto de fractura, cuando se tiene un valor de 0,5 para la relación de Poisson, se dice que el material es incompresible (difícil llevarlo al punto de fractura cuando se aplica una fuerza longitudinal). El valor entre la BASE I y la BASE I PRO incrementa la resistencia a deformarse radialmente, la inclusión del nanotubo mantiene la forma de la muestra de cemento. En cambio, entre la BASE

II y BASE II PRO, el incremento no es significativo y que puede ser causado por la adición de aditivos que intervinieron en la acción del nanotubo.

Los resultados obtenidos en el ensayo están agregados desde el **Anexo S** hasta el **Anexo V**.

### **7.3 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS LECHADAS EVALUADAS**

Conforme a los datos obtenidos por las pruebas de reología, pérdida de filtrado, agua libre, tiempo de bombeabilidad, resistencia a la compresión y evaluación de las propiedades para cada una de las lechadas BASE y a las que se les añadió el MWCNT que se encuentran resumidos en el **Anexo V**, se determina que la adición de este nano compuesto no afecta considerablemente la fluidez de la lechada de 16 ppg en la lechada BASE I ni interviene en la acción de los aditivos presentes en la lechada BASE II. También se observa que no hubo incremento como se esperaba en la resistencia a la compresión que según se había visto en la bibliografía investigada incrementaba un 19% con base a la mezcla blanco<sup>73</sup>, esto posiblemente es causado por la acción que tuvo el surfactante usado por el proveedor del producto como agente dispersante del nanotubo sobre el agua, ya que uno de los factores claves para el buen uso de un nano compuesto es el método de dispersión y el agente dispersante.

Un factor con el que no se espera al evaluar el nano compuesto en este tipo de lechadas de alta densidad, fue el mejoramiento elástico que se presentó en la lechada BASE I PRO y el alto módulo de compresibilidad desarrollado en las lechadas BASE I PRO y BASE II PRO donde se evidencio la presencia del aditivo como influyente para intervenir en la variación de estas propiedades.

---

<sup>73</sup> KHAN, W.A. Et al. Op. Cit., p 10.

## **8. EVALUACIÓN DE COSTOS UNITARIOS PARA LAS LECHADAS BASE II Y BASE CON 0.25% DE MWCNT**

Dentro de los objetivos de este capítulo se resalta el análisis y/o evaluación de costos a nivel de laboratorio, para la producción para una lechada usando nano-carbono como aditivo, con el fin de, establecer una comparación económica respecto a la lechada.

Si se desea maximizar la producción a nivel macro, es importante tener en cuenta los costos operacionales que se abarcan durante el desarrollo, gestión y mantenimiento del mismo.

En este orden de ideas, se puede establecer que, los costos a nivel de desarrollo son todos aquellos que se ven involucrados durante el progreso experimental para la elaboración de lechadas, usando nano-carbono como principal aditivo, por parte de la empresa Superior Energy Service, así mismo, se abarcarían los costos correspondientes a materia prima, tales como, retardadores, controladores de filtrado, antiespumante, goma, adicional a ello, se tendrá en cuenta el precio respectivo del nano-carbón a utilizar.

Así mismo, la tarifa de valor a nivel de gestión, incluirían los precios para realizar mantenimiento de máquinas, traslado de unidades, costos tanto energéticos que pueda conllevar la operación específica, como de personal especializado en éste tipo de procesos (Ingenieros de campo).

Finalmente, los costos de mantenimiento se tendrán en cuenta al momento de generar un remediado de cementación, es decir, en éstos se abarcan todos los costos adicionales en caso de ser necesario realizar correcciones en el diseño de la lechada a trabajar, de igual forma, tendrán cabida los valores de mantenimiento post-producción en caso de existir desgaste, daño u otras averías durante su uso en el campo.

### **8.1 CRITERIOS FINANCIEROS**

Como se mencionó al inicio de este capítulo, el presente proyecto se realiza únicamente a nivel de laboratorio, con el fin de observar el comportamiento de la lechada Base II con 0.25% de nano-carbón en reología, pérdida de filtrado, agua libre, tiempo de bombeabilidad, propiedades mecánicas y resistencia a la compresión por métodos destructivos y no destructivos. Es por esta razón que, los costos a tener en cuenta durante el desarrollo del proyecto son aquellos que abarcan únicamente la materia prima (retardadores, controladores de filtrado, antiespumante, goma, nano-carbón, entre otros), ya que, la empresa Superior Energy Services cuenta con los equipos necesarios para la elaboración de la lechada correspondiente, cuya producción no se llevará a ningún campo de

aplicabilidad específico; lo que quiere decir que las tarifas nivel de gestión no serán relevantes para el desarrollo de este análisis.

Los resultados que se obtendrán durante el desarrollo de este capítulo, son estrictamente cualitativos, ya que, al evaluar de manera experimental un aditivo (nano-carbono) que se encuentra dentro de una lechada de cementación, no se generarán ingresos a partir de la inversión realizada para su respectiva producción.

## 8.2 ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS

La empresa Superior Energy Services, al contar con los equipos necesarios para la elaboración de la lechada de cementación correspondiente, y al ser un proceso netamente experimental, reduce de manera drástica los costos que se han de tener en cuenta durante el desarrollo del proyecto. Como se mencionó en el ítem anterior (Criterios financieros), los valores que se abarcarán dentro del análisis, corresponden únicamente a las materias primas (retardadores, controladores de filtrado, antiespumante, goma, nano-carbón, entre otros).

**8.2.1 Costos lechada base II.** Para la elaboración de la lechada Base II se tendrán en cuenta todas las materias primas ya mencionadas a excepción del nano-carbono. Los costos atribuidos a cada material se muestran en la siguiente **Tabla 38**.

**Tabla 38.** Costos de producto y materia prima de lechada sin nano-compuesto.

| ADITIVOS           | CANTIDAD DE FABRICA | CANTIDAD REQUERIDA PARA UN SACO DE CEMENTO | COSTO DE FABRICA | COSTO DE LA CANTIDAD REQUERIDA PARA UN SACO DE CEMENTO |
|--------------------|---------------------|--|------------------|--|
| Cemento tipo "G"   | 94 lb               | 94 lb                                      | \$ 24.000        | \$ 24.000  |
| Extendedor         | 50 lb               | 0,0094 lb                                  | \$ 16.930        | \$ 160   |
| Control Filtrado 1 | de 1 Sx             | 0,47lb                                     | \$ 15.400        | \$ 7.238   |
| Control Filtrado 2 | de 1 Sx             | 0,564lb                                    | \$ 15.400        | \$ 8.690   |
| Antiespumante      | 1 Gal               | 0,01 Gal                                   | \$ 12.000        | \$ 120   |
| Retardador         | 1 Sx                | 0,0564lb                                   | \$ 14.350        | \$ 810   |
| <b>TOTAL</b>       |                     |  |                  | <b>\$ 41.018</b>                                       |

El valor total del costo por unidad de un saco de cemento sin la adición del nanotubo de carbono (MWCNT) para la lechada Base II es de \$41.018 pesos colombianos, siendo el costo del cemento tipo "G", el que representa una mayor inversión para el desarrollo de este proceso, tomando un valor de \$24.000.

**8.2.2 Costos lechada base II con 0,25% MWCNT.** Para la elaboración de este tipo de lechada se evaluó el costo de las materias primas base que se muestran en la **Tabla 38**, y adicional a ello, se estudió el valor del nano-carbono específico a utilizar; el valor neto de producción se puede observar en la **Tabla 39**.

**Tabla 39.** Costos de obtención y materia prima para la lechada Base II con 0,25 % MWCNT.

| ADITIVOS                   | CANTIDAD DE FABRICA | CANTIDAD REQUERIDA PARA UN SACO DE CEMENTO | COSTO DE FABRICA | COSTO DE LA CANTIDAD REQUERIDA PARA UN SACO DE CEMENTO |
|----------------------------|---------------------|--|------------------|--|
| Cemento tipo "G"           | 94 lb               | 94 lb                                      | \$ 24.000        | \$ 24.000  |
| Extendedor                 | 50 lb               | 0,0094 lb                                  | \$ 16.930        | \$ 160   |
| Control de Filtrado 1      | 1 Sx                | 0,47lb                                     | \$ 15.400        | \$ 7.238   |
| Control de Filtrado 2      | 1 Sx                | 0,564lb                                    | \$ 15.400        | \$ 8.690   |
| Antiespumante              | 1 Gal               | 0,01 Gal                                   | \$ 12.000        | \$ 120   |
| Retardador                 | 1 Sx                | 0,0564lb                                   | \$ 14.350        | \$ 810   |
| AQUACYL Nano-carbono MWCNT | 5 Gal               | 0,02816 Gal                                | 650.000          | \$ 3.700   |
| <b>TOTAL</b>               |                     |  |                  | <b>\$ 44.718</b>                                       |

A partir de esta **Tabla 39** se puede establecer un valor total correspondiente a \$44.718, donde el costo del nano-carbono en cuestión, representa una baja inversión para este proyecto de \$3.700. Teniendo en cuenta que para obtener el producto con el proveedor, el volumen mínimo aceptado es de 5 litros, realizando una inversión inicial mayor pero que será posteriormente utilizada para futuros diseños de lechadas.

**8.2.3 Análisis comparativo.** Al observar los datos arrojados por el estudio realizado a los costos de producción, se puede determinar que el valor correspondiente a la lechada Base II con 0,25% de nano-carbono representa una baja inversión económica comparada con la lechada que no presenta este tipo de aditivo. Es importante resaltar que este producto (MWCNT) es uno de los materiales de menor costo para la generación de productos de alta tecnología, los cuales serán capaces de satisfacer las necesidades específicas del cliente. Por otro lado, se puede establecer que, la cantidad necesaria para la producción no es tan grande, por lo que, se puede una producción más amplia de lechada a partir de la unidad correspondiente a este precio teniendo en cuenta el mejoramiento en las propiedades mecánicas, esto depende del tipo de lechada que se requiera.



## 9. CONCLUSIONES

- En el proceso de selección del nano compuesto se establecieron cuatro parámetros esenciales para definir los criterios de selección; estos parámetros son: comportamiento reológico, trabajabilidad, propiedades mecánicas y el costo comercial unitario de cada producto. El procedimiento de análisis se realizó corroborando los resultados de dos matrices de método de selección las cuales son determinística (juicio de expertos) y probabilística (simulación de Monte Carlo). Con base en lo anterior, el nano compuesto que obtuvo un mejor ajuste para los parámetros en cada método es el nano tubo de carbono (MWCNT).
- En el desarrollo experimental, se llevó a cabo las pruebas de reología; pérdida de filtrado y agua libre para las lechadas BASES II. en las pruebas realizadas con el aditivo, se notó un comportamiento tixotrópico, además el surfactante presente en la dispersión del nanotubo afectó considerablemente la reología de las pruebas. La implementación del aditivo MWCNT modificó el comportamiento reológico de la lechada BASE I con 0,1 y 0,5 %; para la lechada BASE I con 0,25% disminuyendo un promedio del 14% el comportamiento reológico, no presentó una desviación trascendental en los valores de viscosidad plástica y punto cedente. para la lechada BASE II, presentó un aumento genérico en el estudio reológico, aunque particularmente la lechada BASE II con 0,25% MWCNT mostró un comportamiento uniforme en las dos propiedades reológicas. Se escoge la lechada BASE I con 0,25 % y la lechada BASE II con 0,25% de MWCNT debido al comportamiento uniforme en los datos de viscosidad plástica y punto cedente para la posterior evaluación de propiedades físicas y mecánicas.
- Se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión por método destructivo y no destructivo, tiempo de bombeabilidad y evaluación de las propiedades mecánicas de las lechadas. Se determinó que la inclusión de MWCNT al 0,25% mejora la elasticidad de la lechada BASE I un 30,4%, y el módulo de compresibilidad con respecto a la muestra BASE I y BASE II 36,4% y 45,6% respectivamente. Las lechadas con MWCNT no presentaron un incremento sustancial de la resistencia a la compresión como se esperaba obtener. Probablemente provocado por la presencia del surfactante presente en la dispersión del nanotubo dificultado el acoplamiento del área superficial del nanotubo de carbono (MWCNT) en la matriz granular. El tiempo de bombeabilidad no se vio afectado negativamente con la presencia de este aditivo.
- Teniendo en cuenta el análisis comparativo entre los costos unitarios de la Base II y la Base II PRO se concluye que la adición del MWCNT tiene un valor agregado en la producción de un saco de cemento de \$3.700. Aunque el costo de la Base II PRO sea mayor que el costo de la lechada BASE II el beneficio que se obtiene es especialmente aplicado para diseños de lechadas donde se

requiera una mayor elasticidad del material y no en un incremento en la resistencia a la compresión como se esperaba. Por lo cual la lechada que contiene 0,25% de MWCNT es especialmente selectiva para el tipo de pozo que se desea cementar.

- Se concluye que la inversión realizada por la empresa Superior Energy Services para el desarrollo del proyecto es de gran valor debido a que se realizó una investigación para analizar una posible alternativa de aditivo para las lechadas utilizadas en cementación de pozos petroleros, generando conocimiento en el campo de los nano-materiales y teniendo en cuenta que el proyecto puede ser la puerta o el direccionamiento de la aplicación de los nano-compuestos a el mercado del petróleo.

## 10. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas con nano arcilla, nano alúmina y nano hierro para evaluar las propiedades de las lechadas a condiciones simuladas de pozo.
- Definir un protocolo de pruebas para el diseño de lechadas incluyendo variación en las densidades, con la adición del MWCNT a diversas concentraciones y comprobar la compatibilidad con los aditivos usados en la cementación de pozos de petróleo.
- Realizar una investigación similar donde se utilice un producto que contenga otro medio dispersante (compuestos orgánicos o inorgánicos) para nanotubo de carbono sobre agua que compruebe la autenticidad de este sobre las lechadas de cemento.
- Evaluar el proyecto con la adición de nanotubos de carbono (MWCNT) en lechadas para un trabajo de cementación en un pozo particular donde se involucren los costos operativos.

## BIBLIOGRAFÍA

ABDELRAHMAN, I. Applications of Nanotechnology in the Oil & Gas Industry: latest Trends Worldwide & Future Challenges in Egypt. En: SPE, ResearchGate, Egypt, 2013.

AGUILAR, J. Capítulo 2. Nanocompuestos de matriz polimérica y nanoarcillas, Disponible en: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6033/59/CAP%C3%8DTULO%202.docx>, 2006.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended practices for testing well cements (API RP 10B). Estados Unidos de América. 2011

- - - - - . Specifications for cements and Materials for well cementing cements (API RP 10A). Estados Unidos de América. 2011

CONTRERAS, C. y RUBEN, D. Estudio del comportamiento mecánico del cemento petrolero clase H aditivado con nanomateriales. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Caracas, Venezuela: Ilustre Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.

CRYSTAL BALL. Distribución Normal. [Programa simulador]. Texto en español

- - - - - . Manual de Inicio. Bienvenido a Crystal Ball. Disponible en: <http://www.docentes.fcefa.edu.bo/imorales/wp-content/uploads/sites/9/2013/09/MANUAL-CRYSTAL-BALLModelos-de-Simulaci%C3%B3n-4329.pdf>. 2006.

DINESH, K. A Review on Properties, Behaviour and Processing Methods for Al-Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites. Procedia Materials Science, India, 2014.

HALLIBURTON ENERGY INSTITUTE. Libro De Trabajo Del Estudiante Cementación I. Sección 01. Estados Unidos de América: 2001.

HENCHE, C. Análisis de la adición de Nano- Partículas en la microestructura de materiales de base cemento. Master en Ingeniería de estructuras, cementaciones y materiales. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Facultad de Ingeniería, 2011.

HOSSEINI, P. et al. Developing Concrete Recycling Strategies by Utilization of Nano-SiO<sub>2</sub> Particles. Waste and Biomass Valorization. April 2011

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El instituto, 2008. 110 p.

- - - - - . Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 4490. Bogotá: El Instituto, 1998, 12 p.

- - - - - . REFERENCIAS DOCUMENTALES PARA FUENTES DE INFORMACIONES ELECTRÓNICAS. NTC 5613. BOGOTÁ: EL INSTITUTO, 1998. 8 P.

JALAL, M. et al. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> micro and nanoparticles, Septiembre 2011.

KHAN, W.A. Et al. MWCNT for enhancing mechanical properties of oil well cement for HPHT Applications, En: SPE, IADC, University of Petroleum & Minerals. Abu Dhabi, Enero 2016.

LEON LOYA, Gilberto. Reología De Los Fluidos De Perforación Y Reparación De Pozos.

MUNDACA, R. y CANALES, P. Uso de zeolita natural como mejorador de las propiedades físicas y químicas del suelo. Disponible en: <http://zeolitas.blogspot.com.co/2008/05/antecedentes-generales.html>, mayo 2008.

OLTULU, M. Effect of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study, 2013.

OSCAR, M. THE ROLE OF SURFACE AREA AND COMPACITY OF NANOPARTICLES ON THE RHEOLOGY OF CEMENT PASTE. University of Rio de Janeiro. August 2017.

- - - - - . Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume.

RAHMAN, M.K. et al. Properties of Oil Well cement Reinforced by Carbon Nanotubes. International Oilfield Nanotechnology Conference, Noordwijk, Netherlands, 12-14 de Junio 2012.

SCHLUMBERGER. Jet- 14 Manual De Cementación. 2007.

- - - - - . Montmorillonita, Disponible en: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/m/montmorillonite.aspx>.

SUPERIOR ENERGY SERVICES Laboratorio. Prácticas Recomendadas Para Ensayos De Lechadas De Cemento Y Calibración De Equipos, Norma API 10A Y 10B-2. 2015.

UNIVERSITAT JAUME I. Alotropos del carbono: Nanotubos de carbono. Disponible en: <https://sites.google.com/a/uji.es/alotropos-del-carbono/nanotubos-de-carbono>.

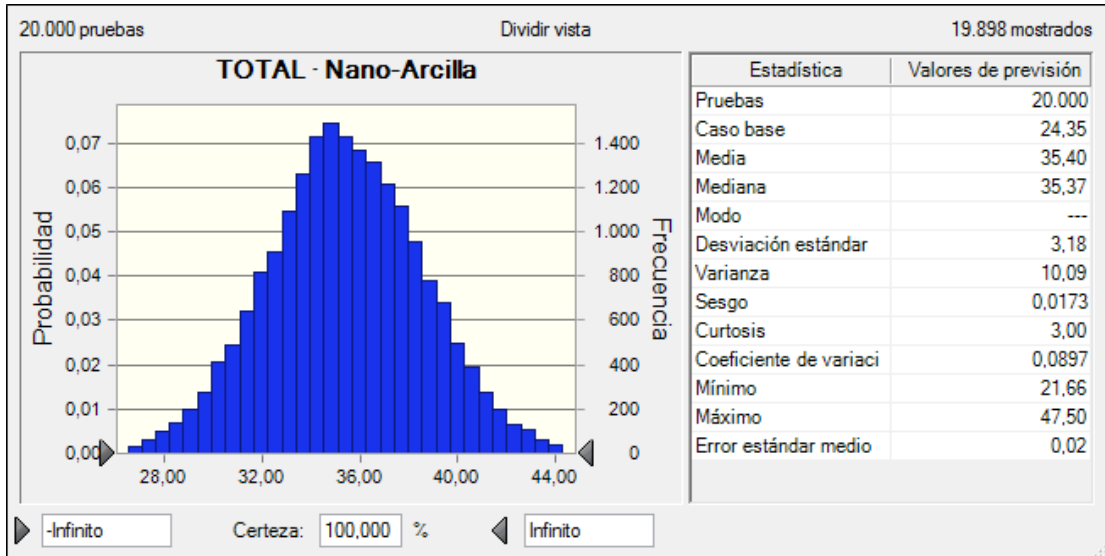
YAKOVLEV, G. Et al. Modification of cement matrix using carbon nanotube dispersions and nanosilica. ScienceDirect, Russia, 2017.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

### GRÁFICA DE FRECUENCIA Y ESTADÍSTICAS DE LA NANO-ARCILLA PARA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.

**Gráfica 1.** Frecuencia y estadísticas de la nano – arcilla para simulación de Monte Carlo.

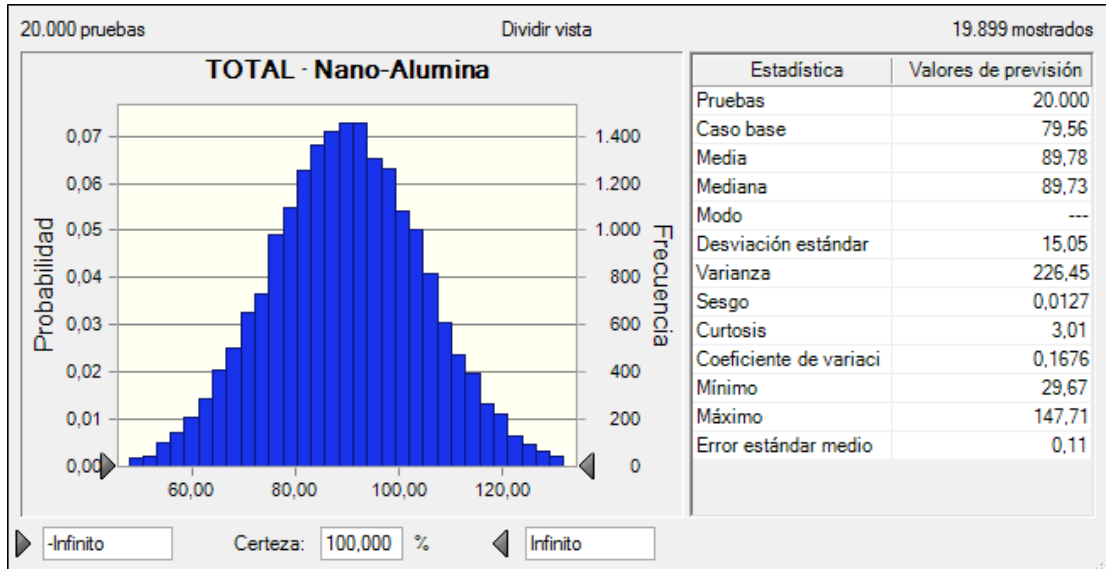




## ANEXO B

### GRÁFICA DE FRECUENCIA Y ESTADÍSTICAS DE LA NANO-ALÚMINA PARA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.

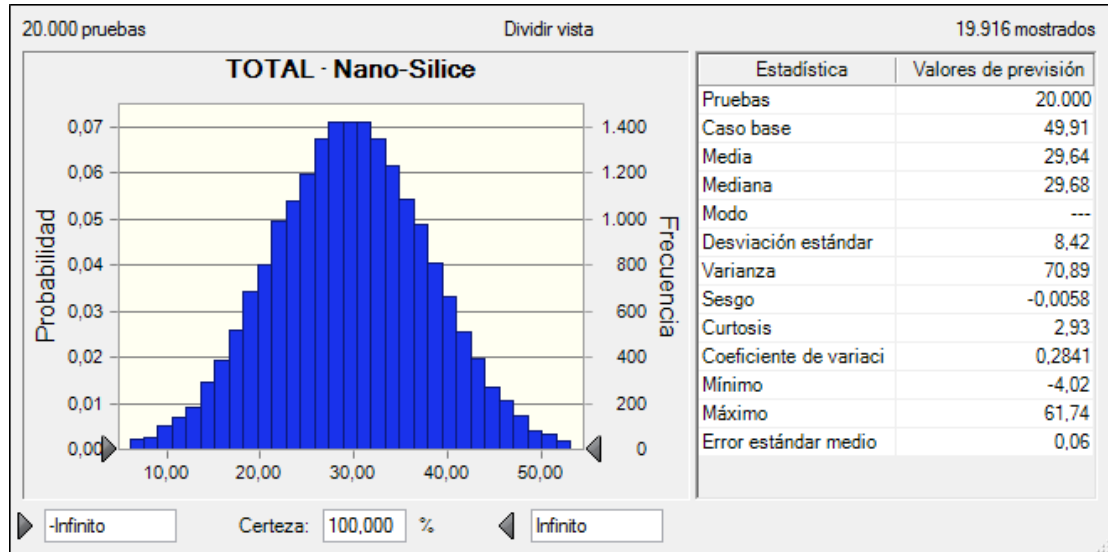
**Gráfica 1.** Frecuencia y estadísticas de la nano – alúmina para simulación de Monte Carlo.



## ANEXO C

### GRÁFICA DE FRECUENCIA Y ESTADÍSTICAS DE LA NANO-SÍLICE PARA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.

**Gráfica 1.** Frecuencia y estadísticas de la nano – sílice para simulación de Monte Carlo.



## ANEXO D

### CÁLCULOS DE VISCOSIDAD PLÁSTICA PARA CADA UNA DE LAS MEZCLAS EVALUADAS.

- A Temperatura de 85°F.

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I} &= (85 - 58) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I} &= 40,5 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,1\%} &= (70 - 46,5) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,1\%} &= 35,25 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,25\%} &= (72 - 48,5) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,25\%} &= 35,25 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,5\%} &= (72 - 48,5) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,5\%} &= 33,75 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE II} &= (256 - 107,5) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE II} &= 222,75 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE II \text{ con } 0,1\%} &= (255 - 106,5) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE II \text{ con } 0,1\%} &= 222,75 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE II \text{ con } 0,25\%} &= (300 - 143) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE II \text{ con } 0,25\%} &= 235,5 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE II \text{ con } 0,5\%} &= (263 - 115) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE II \text{ con } 0,5\%} &= 222 \end{aligned}$$

- A Temperatura de 133°F

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I} &= (156 - 117) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I} &= 58,5 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,1\%} &= (142 - 109,5) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,1\%} &= 48,75 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,25\%} &= (156 - 122,5) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,25\%} &= 50,25 \\ \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{BASE I \text{ con } 0,5\%} &= (136 - 105,5) * 1.5 \end{aligned}$$

$$\text{Viscosidad plástica } (Vp)_{\text{BASE I con 0,5\%}} = 45,75$$

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{\text{BASE II}} &= (280 - 126,5) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{\text{BASE II}} &= 230,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{\text{BASE II con 0,1\%}} &= (260 - 113) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{\text{BASE II con 0,1\%}} &= 220,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{\text{BASE II con 0,25\%}} &= (300 - 140) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{\text{BASE II con 0,25\%}} &= 240 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{\text{BASE II con 0,5\%}} &= (300 - 133,5) * 1.5 \\ \text{Viscosidad plástica } (Vp)_{\text{BASE II con 0,5\%}} &= 259,75 \end{aligned}$$

## ANEXO E

### CÁLCULOS DE PUNTO CEDENTE PARA CADA UNA DE LAS MEZCLAS EVALUADAS.

- A Temperatura de 85°F.

|  |
|--|
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I}} = 85 - 40,5$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I}} = 44,5$                           |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,1\%}} = 70 - 35,25$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,1\%}} = 34,75$     |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,25\%}} = 72 - 35,25$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,25\%}} = 36,75$   |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,5\%}} = 72 - 33,75$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,5\%}} = 38,25$     |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base II}} = 256 - 222,75$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base II}} = 33,25$                     |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base II con 0,1\%}} = 255 - 222,75$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base II con 0,1\%}} = 32,25$ |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base II con 0,25\%}} = 300 - 235,5$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base II con 0,25\%}} = 64,5$ |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base II con 0,5\%}} = 263 - 222$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base II con 0,5\%}} = 41$       |

- A Temperatura de 133°F.

|  |
|--|
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I}} = 156 - 58,5$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I}} = 97,5$                          |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,1\%}} = 142 - 48,75$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,1\%}} = 93,25$    |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,25\%}} = 156 - 50,25$ $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,25\%}} = 105,75$ |
| $\text{Punto Cedente}(Yp)_{\text{Base I con 0,5\%}} = 136 - 45,75$   |

$$\mathbf{Punto\ Cedente(Yp)_{Base\ I\ con\ 0,5\%} = 90,25}$$

$$\mathbf{Punto\ Cedente(Yp)_{Base\ II} = 280 - 230,25}$$

$$\mathbf{Punto\ Cedente(Yp)_{Base\ II} = 49,75}$$

$$\mathbf{Punto\ Cedente(Yp)_{Base\ II\ con\ 0,1\%} = 260 - 220,5}$$

$$\mathbf{Punto\ Cedente(Yp)_{Base\ II\ con\ 0,1\%} = 39,5}$$

$$\mathbf{Punto\ Cedente(Yp)_{Base\ II\ con\ 0,25\%} = 300 - 240}$$

$$\mathbf{Punto\ Cedente(Yp)_{Base\ II\ con\ 0,25\%} = 60}$$

$$\mathbf{Punto\ Cedente(Yp)_{Base\ II\ con\ 0,5\%} = 300 - 24,75}$$

$$\mathbf{Punto\ Cedente(Yp)_{Base\ II\ con\ 0,5\%} = 50,25}$$

## ANEXO F

### HOJA TÉCNICA DEL PRODUCTO MWCNT.

Figura 1. Hoja técnica del producto MWCNT.

The image shows a technical data sheet for AQUACYL™ AQ0302. At the top left is the nanocyl logo with the tagline 'THE CARBON NANOTUBE SPECIALIST'. To the right, it says 'Technical Data Sheet: AQUACYL™ AQ0302 | 25<sup>th</sup> January 2016 | V03'. Below this is the product name 'AQUACYL™' in large blue letters, with 'CNT water dispersions' underneath. The main title is 'AQUACYL™ AQ0302 Carbon nanotubes aqueous dispersions'. The document is organized into sections: 'General Information', 'Description', 'Key Applications', and 'Benefits'. The 'Description' section states that AQUACYL™ is a family of multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) waterborne dispersions and that the AQ0302 dispersion contains an anionic surfactant for stability. The 'Key Applications' section lists three items: Electrostatic Discharge (ESD) and electrical coatings, heating elements, and eco-friendly electrodes for lithium-ion batteries. The 'Benefits' section lists three items: excellent electrical conductivity at low loading, ease of processing, and Joule effect/IR radiation. The ActiInaC logo is visible in the bottom right corner.

**nanocyl**  
THE CARBON NANOTUBE SPECIALIST

Technical Data Sheet: AQUACYL™ AQ0302 | 25<sup>th</sup> January 2016 | V03

**AQUACYL™**  
CNT water dispersions

**AQUACYL™ AQ0302**  
Carbon nanotubes aqueous dispersions

**General Information**

**Description**  
AQUACYL™ is a family of multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) waterborne dispersions.  
AQUACYL™ AQ0302 is the ideal way to incorporate carbon nanotubes in waterborne application systems (coatings, films ...). The dispersion contains an anionic surfactant for superior dispersion and stability.

**Key Applications**

- Electrostatic Discharge (ESD) and electrical coatings and films
- Heating elements (heating wall membranes, heating floors, etc.)
- Eco-friendly electrodes for lithium-ion batteries

**Benefits**

- Excellent electrical conductivity at low loading
- Ease of processing
- Joule effect/IR radiation

Acti  
InaC

**Figura 1. (Continuación).**

**Main Characteristics AQUACYL™ AQ030Z**

AQ0302 is a D.I water dispersion of 3 wt.% of NC7000™ containing an ionic surfactant.

| PROPERTIES                                | UNIT | VALUE   |
|---|------|---------|
| <i>PH</i>                                 | -    | 7-11    |
| <i>BOILING POINT</i>                      | °C   | 100     |
| <i>MELTING POINT</i>                      | °C   | 0       |
| <i>VISCOSITY after stirring (at 25°C)</i> | cP   | 100-200 |

**Surface resistivity**

Figure 2 shows the surface resistivity of dry film produced from a blending of AQUACYL™ AQ0302 with a PP latex dispersion.

Figure 2. **Surface resistivity.** Electrical resistivity measurement in accordance with Nanocyl standard method based on dry film (2-4 µm film from PP latex)

| % weight NC7000 in dry film / 2-4 µm film from PP Latex | Resistivity (Ω/sq) |
|---|--------------------|
| 0,5   | 1,0E+09            |
| 1,0   | 1,0E+07            |
| 1,5   | 1,0E+05            |
| 2,5   | ~5,0E+04           |
| 4,0   | ~1,0E+04           |

**Processing guidelines**

Little sedimentation is possible over time. Slight stirring before use is therefore recommended to prevent sedimentation. AQUACYL™ AQ0302 is slightly thixotropic. Stirring before use will reduce the viscosity.

Typical viscosity after stirring at 25°C: 100 – 200 cP.

AQUACYL™ AQ0302 could be diluted to match your applications requirements. In order to find the appropriate dilution, we strongly recommend performing tests at different percentages in working conditions.

**Commercial/Safety Information**

**Packaging**

AQUACYL™ AQ0302 is available in different packaging:

- Bottles (5/10/25 liters)
- IBC drums (1000 liters)

**Minimum Order of Quantity**

Nanocyl's minimum order of quantity for NC7000™ is 5 liters.

**Storage**

Keep AQUACYL™ AQ0302 only in the original closed container in a dedicated place.

Keep containers in a cool, dry place with adequate ventilation. Keep storage temperature between 5-30°C. Keep away from freezing. It is not recommended to store the products outside during the winter.

**Health and Safety**

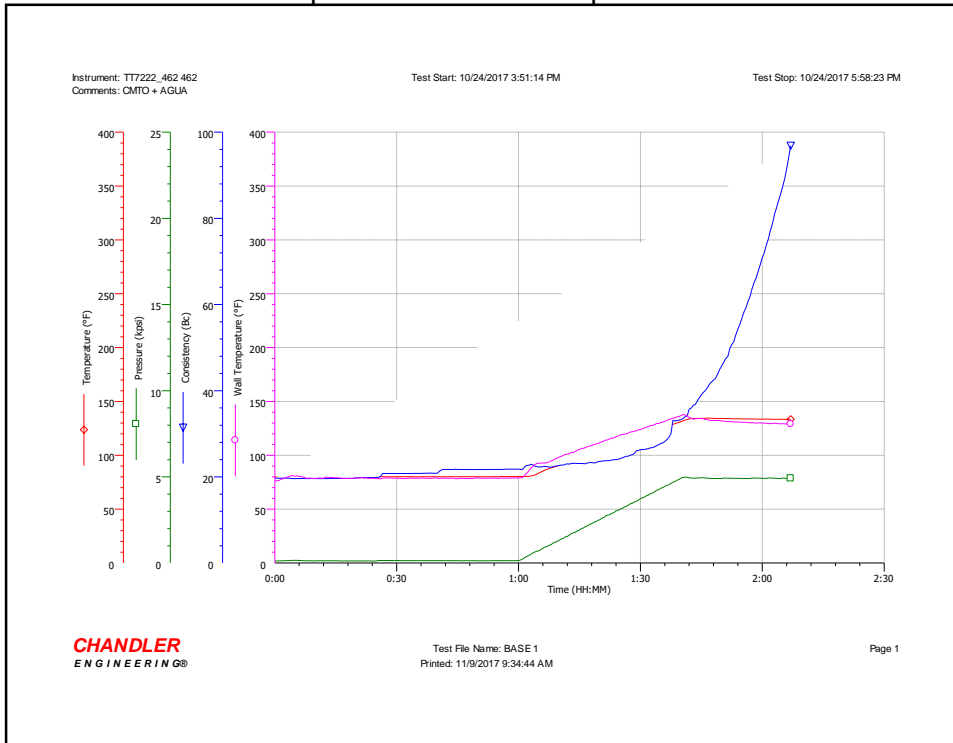
A Material Safety Data Sheets (MSDS) is available to provide both workers and emergency personnel with the proper procedures for handling or working with the AQUACYL™ AQ0302. This MSDS includes information such as physical data (form and color, melting point, etc.), handling and storage recommendations, first aid measures and ecological information. The Safety Data Sheet is provided with any order and should be observed.



## ANEXO G

### RESULTADO DE LA PRUEBA TIEMPO DE BOMBEABILIDAD PARA LA BASE I (B-I).

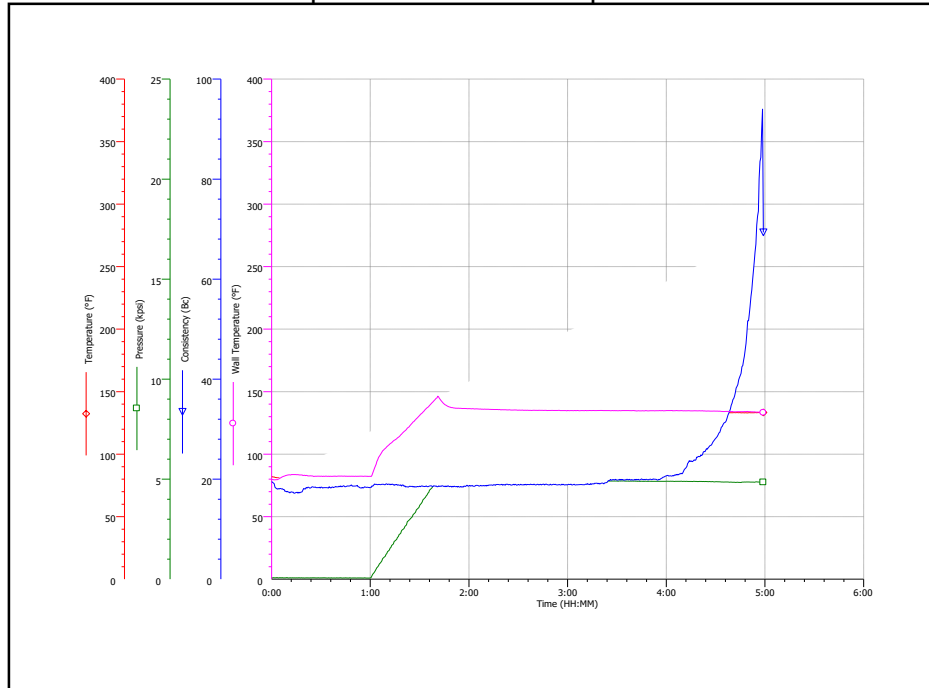
Gráfica 1. Prueba tiempo de bombeabilidad para la base I.



## ANEXO H

### RESULTADO DE LA PRUEBA TIEMPO DE BOMBEABILIDAD PARA LA BASE II (B-II).

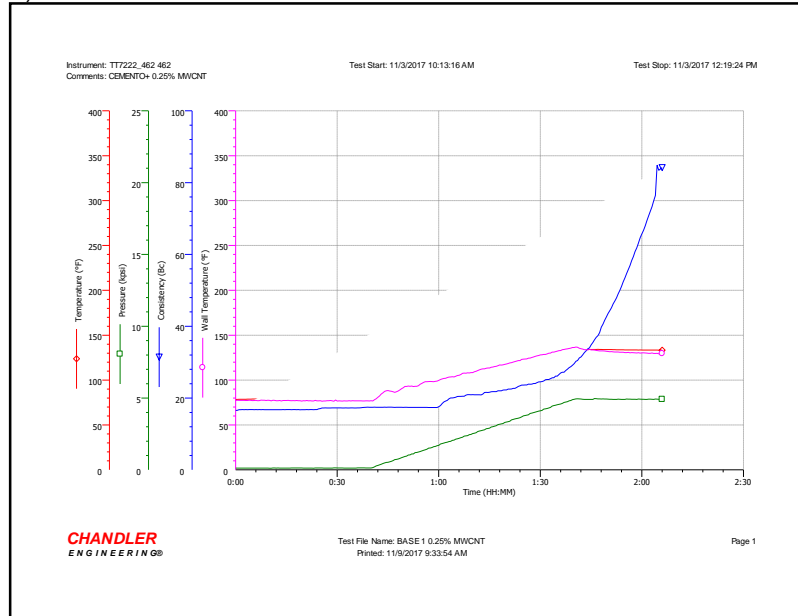
Gráfica 1. Prueba tiempo de bombeabilidad para la base II.



## ANEXO I

### RESULTADO DE LA PRUEBA TIEMPO DE BOMBEABILIDAD PARA LA BASE I CON 0,25% DE MWCNT (B-I 0,25).

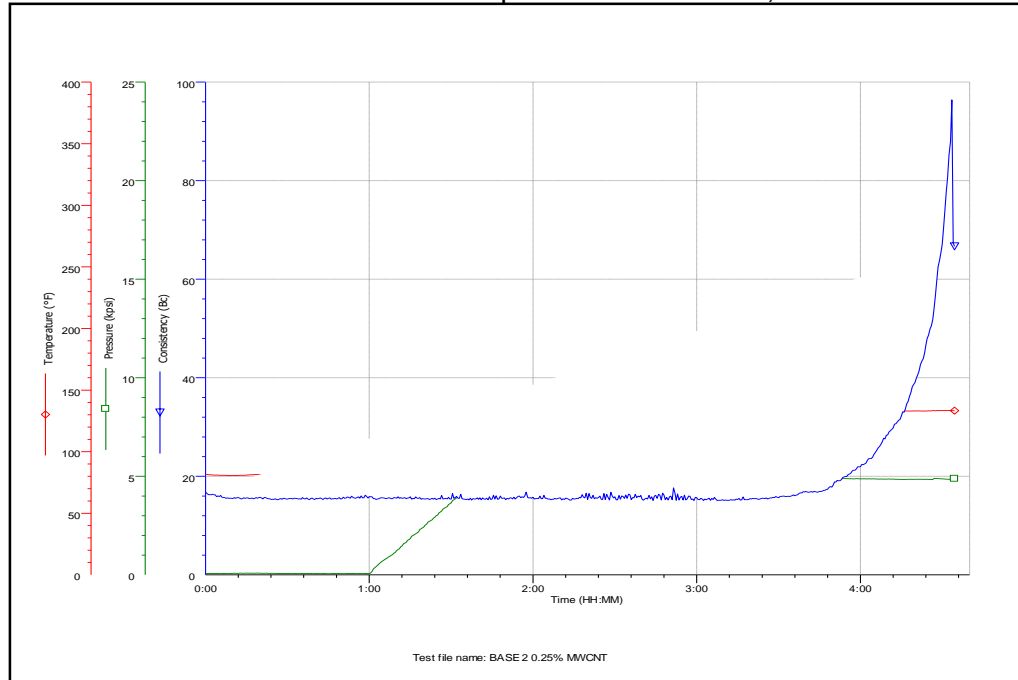
**Gráfica 1.** Tiempo de bombeabilidad para la base I con 0,25% de MWCNT.



## ANEXO J

### RESULTADO DE LA PRUEBA TIEMPO DE BOMBEABILIDAD PARA LA BASE II CON 0,25% DE MWCNT (B-II 0,25).

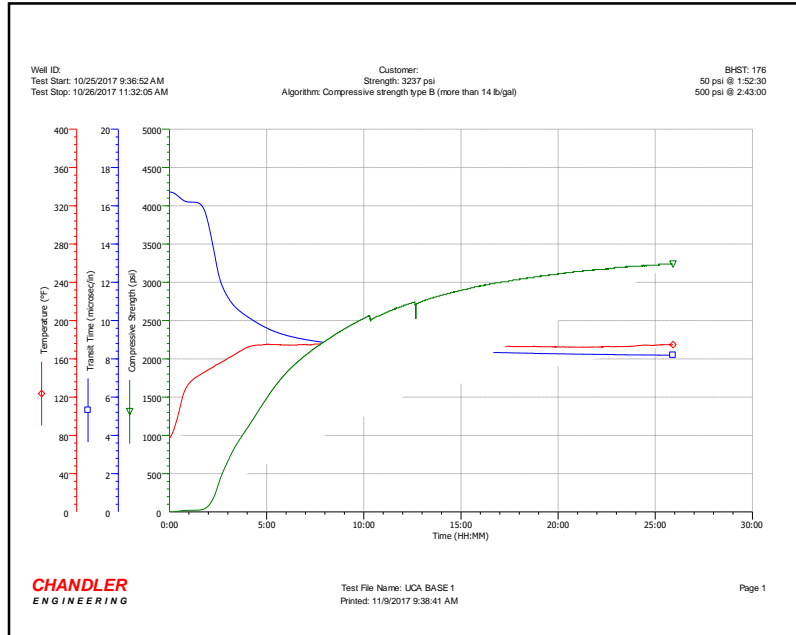
Gráfica 1. Prueba de bombeabilidad para la base II con 0,25% de MWCNT.



# ANEXO K

## RESULTADO DE LA PRUEBA RESISTENCIA A LA COMPRESION PARA LA BASE I (B-I).

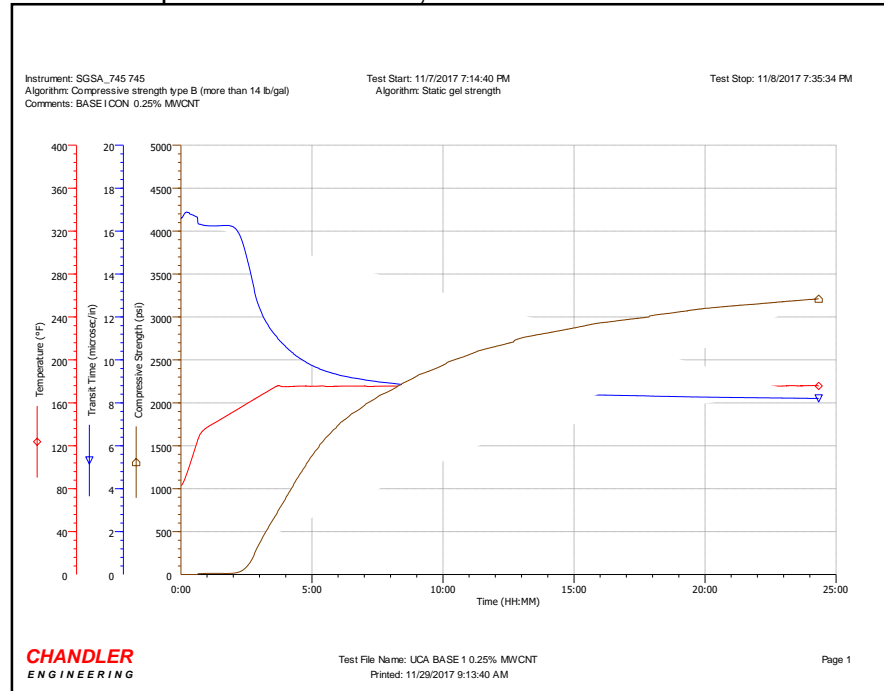
**Gráfica 1.** Prueba de resistencia a la compresión para la base I.



## ANEXO L

### RESULTADO DE LA PRUEBA RESISTENCIA A LA COMPRESION POR MÉTODO NO DESTRUCTIVO PARA LA BASE I CON 0,25% DE MWCNT (B-I 0,25).

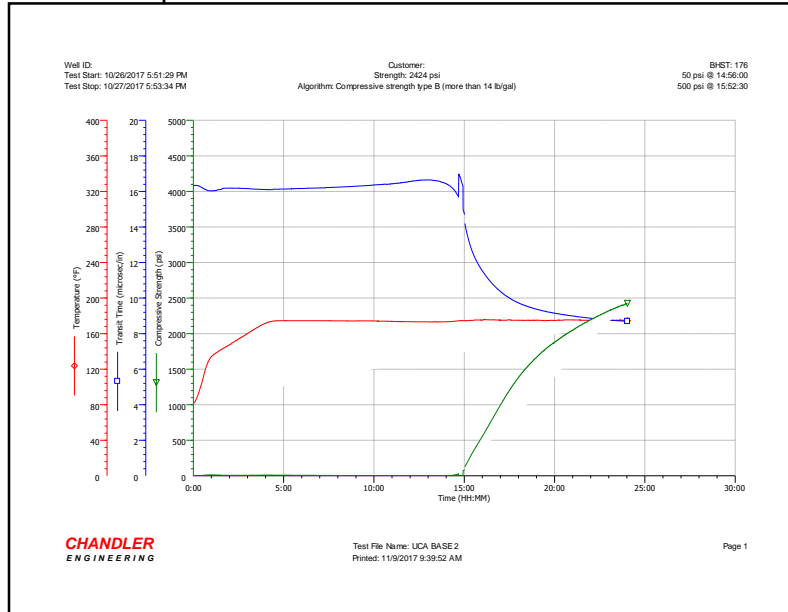
**Gráfica 1.** Prueba resistencia a la compresión por método no destructivo para la base I con 0,25% de MWCNT.



## ANEXO M

### RESULTADO DE LA PRUEBA RESISTENCIA A LA COMPRESION POR MÉTODO NO DESTRUCTIVO PARA LA BASE II (B-II).

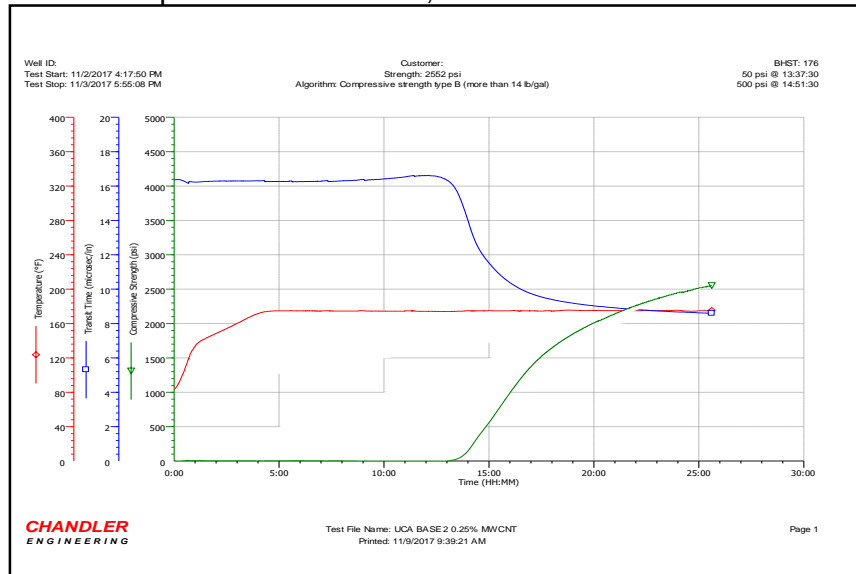
**Gráfica 1.** Prueba resistencia a la compresión por método no destructivo para la base II.



## ANEXO N

### RESULTADO DE LA PRUEBA RESISTENCIA A LA COMPRESION POR MÉTODO NO DESTRUCTIVO PARA LA BASE II CON 0,25% DE MWCNT (B-II PRO).

**Gráfica 1.** Prueba resistencia a la compresión por método no destructivo para la base II con 0,25% de MWCNT.

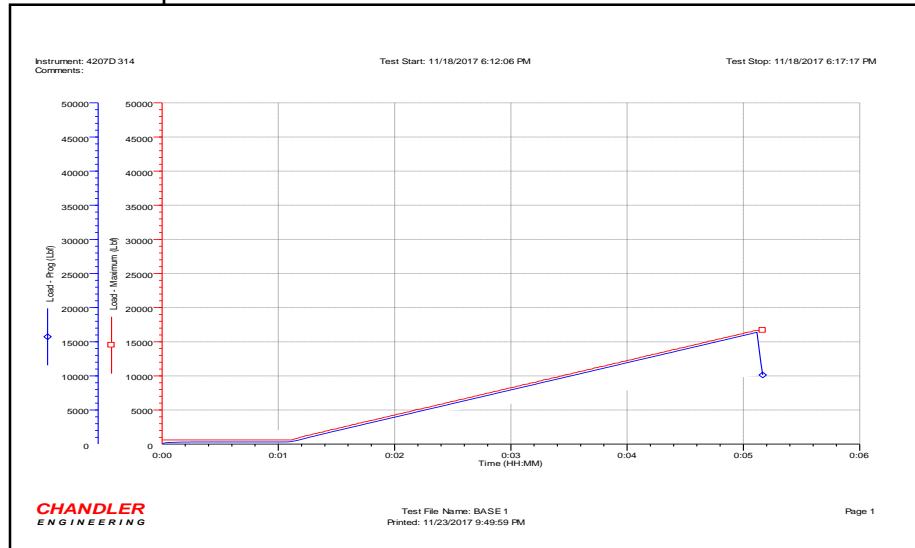




## ANEXO Ñ

### RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESION POR MÉTODO DESTRUCTIVO PARA LA BASE I (B-I).

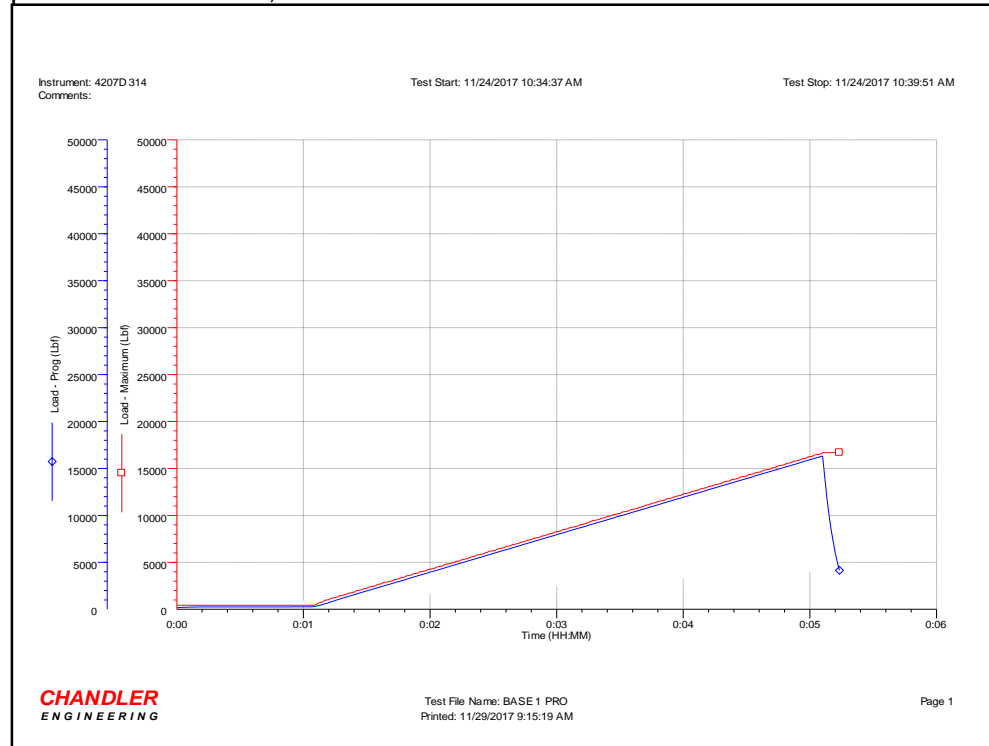
**Gráfica 1.** Prueba de resistencia a la compresión por método destructivo para la base I.



## ANEXO O

### RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESION POR MÉTODO DESTRUCTIVO PARA LA BASE I CON 0,25% DE MWCNT (B-I PRO).

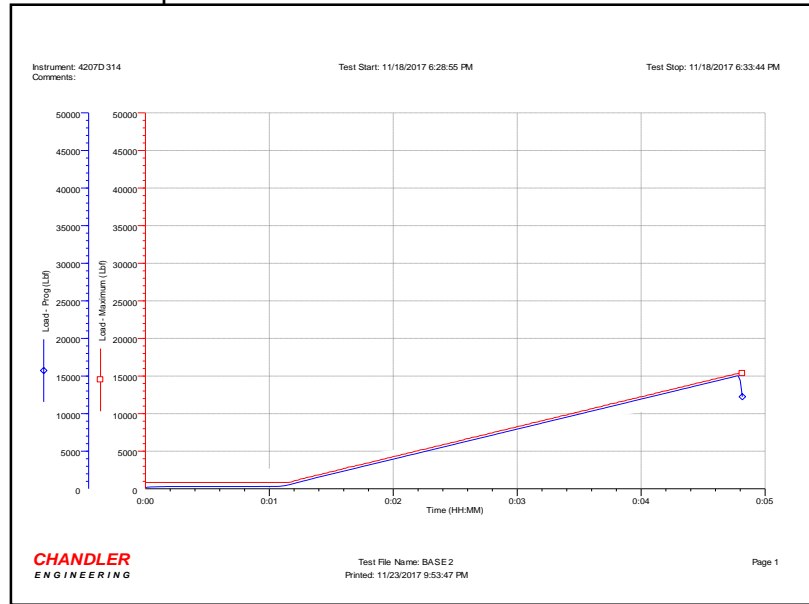
**Gráfica 1.** Prueba de resistencia a la compresión por método destructivo para la base I con 0,25% de MWCNT.



## ANEXO P

### RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESION POR MÉTODO DESTRUCTIVO PARA LA BASE II (B-II).

**Gráfica 1.** Prueba de resistencia a la compresión por método destructivo para la base II.

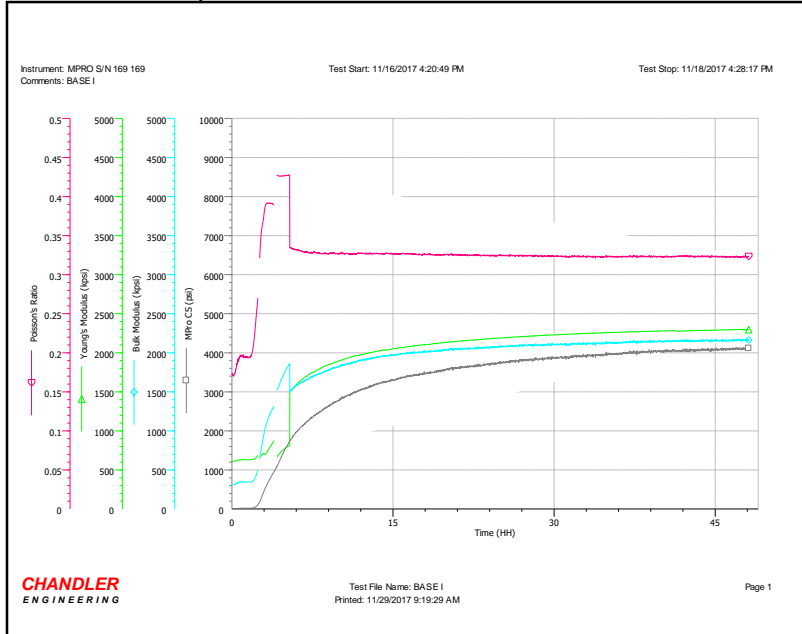




# ANEXO R

## GRÁFICA PROPIEDADES MECÁNICAS BASE I.

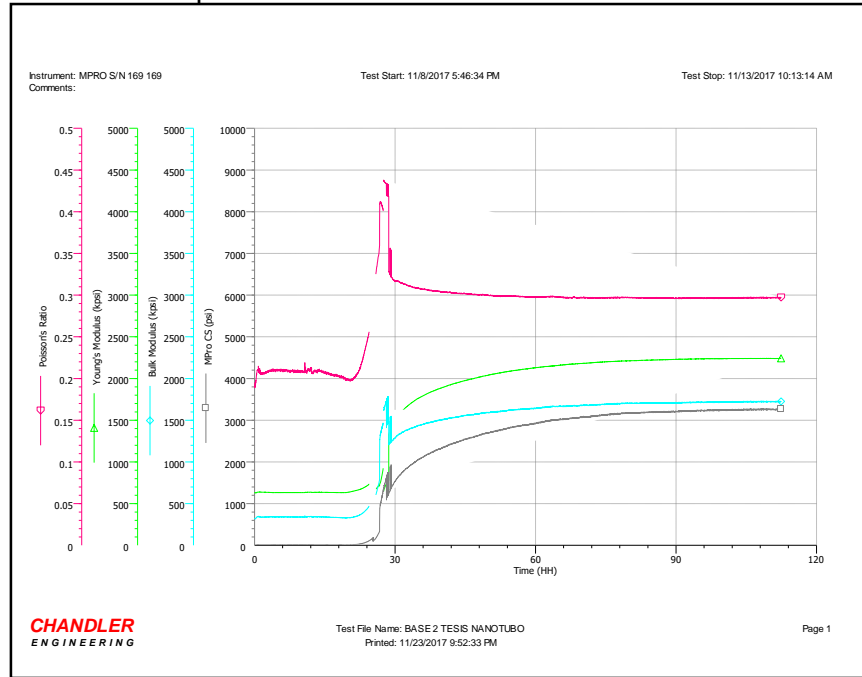
Gráfica 1. Propiedades mecánicas base I.



# ANEXO S

## GRÁFICA PROPIEDADES MECÁNICAS BASE II.

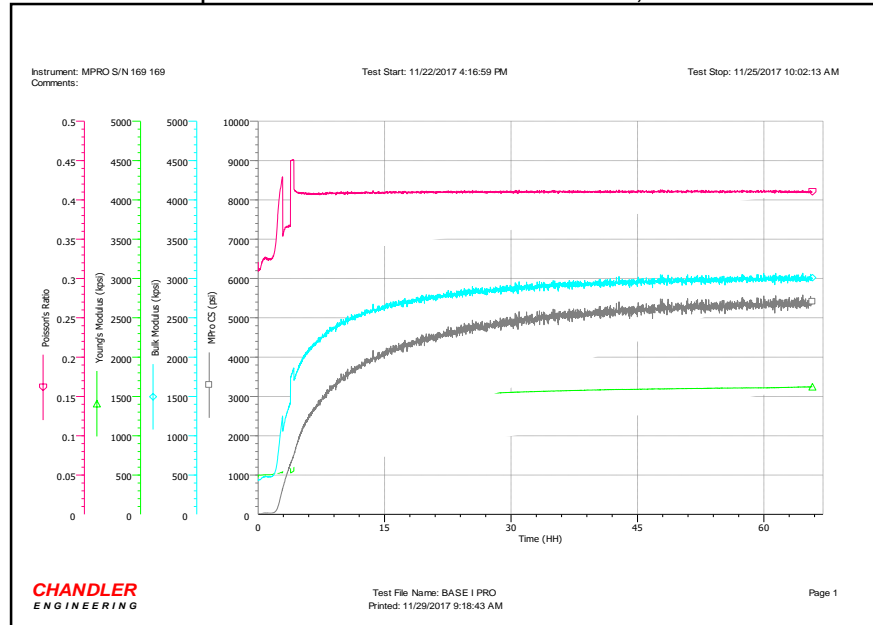
Gráfica 1. Propiedades mecánicas base II.



# ANEXO T

## GRÁFICA PROPIEDADES MECÁNICAS BASE I CON 0,25% DE MWCNT.

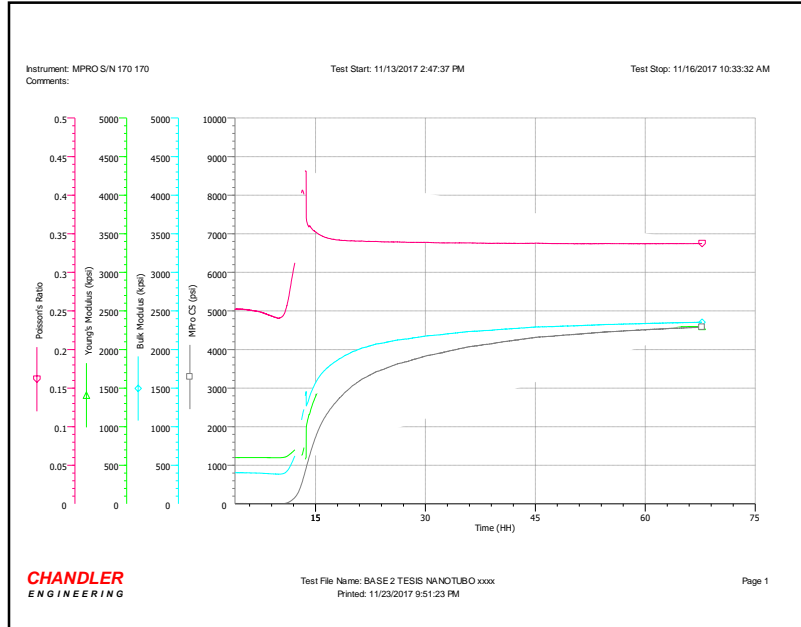
Gráfica 1. Propiedades mecánicas base I con 0,25% de MWCNT.



## ANEXO U

### GRÁFICA PROPIEDADES MECÁNICAS BASE II CON 0,25% DE MWCNT.

**Gráfica 1.** Propiedades mecánicas base II con 0,25% de MWCNT.






## ANEXO V

### RESUMEN DE RESULTADOS PARA TODAS LAS LECHADAS EVALUADAS.

**Tabla 1.** Resumen de resultados para todas las lechadas evaluadas.

|   |                  | LECHADAS EVALUADAS |              |              |              |              |       |              |           |              |
|---|------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------------|-----------|--------------|
|   |                  | Unidades           | B-I          | B-I 0,1      | B-I 0,25     | B-I 0,5      | B-II  | B-II 0,1     | B-II 0,25 | B-II 0,5     |
| <b>Propiedades Reológicas (85°F)</b>    | Vp               | cP                 | 40,5         | 35,3         | 35,3         | 33,75        | 222,8 | 222,8        | 235,5     | 222          |
|   | Yp               | lb/100ft2          | 44,5         | 34,8         | 36,8         | 38,25        | 33,3  | 32,25        | 64,5      | 41           |
| <b>Propiedades Reológicas (133°F)</b>   | Vp               | cP                 | 58,5         | 48,8         | 50,3         | 45,75        | 230,2 | 220,5        | 240       | 249,8        |
|   | Yp               | lb/100ft2          | 97,5         | 93,3         | 105,8        | 90,25        | 49,8  | 39,5         | 60        | 50,3         |
| <b>Agua Libre</b>                       |                  | %                  | no realizado | no realizado | no realizado | no realizado | 0     | 0            | 0         | 0            |
| <b>Pérdida de Filtrado</b>              |                  | API                | no realizado | no realizado | no realizado | no realizado | 32    | 28           | 30        | 31           |
| <b>Tiempo de Bombeabilidad @100 Bc</b>  |                  | Horas              | 2:00         | no realizado | 2:02         | no realizado | 4:55  | no realizado | 4:30      | no realizado |
| <b>Resistencia a la Compresión @24H</b> | destrutivo       | psi                | 3158         | no realizado | 3336         | no realizado | 2778  | no realizado | 2826      | no realizado |
|   | No destructivo   | psi                | 3208         | no realizado | 3202         | no realizado | 2414  | no realizado | 2456      | no realizado |
| <b>Propiedades Mecánicas @ 48 H</b>     | Módulo de Young  | Kpsi               | 2293         | no realizado | 1595         | no realizado | 2017  | no realizado | 2246      | no realizado |
|   | Módulo Bulk      | Kpsi               | 2160         | no realizado | 2946         | no realizado | 1578  | no realizado | 2298      | no realizado |
|   | Relación Poisson |                    | 0,32         | no realizado | 0,41         | no realizado | 0,3   | no realizado | 0,34      | no realizado |

|  |  |              |
|--|--|--------------|
| <br>Fundación<br>Universidad de América | FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA   | Código:      |
|  | PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA   | Versión 0    |
|  | Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres | Julio - 2016 |


### AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES



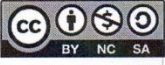
Nosotros Andrés Felipe Carrera Lozano y Edward Felipe Carvajal Camacho en calidad de titulares de la obra **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN NANO COMPUESTO EN LAS LECHADAS DE CEMENTO EN LA EMPRESA SUPERIOR ENERGY SERVICES A NIVEL LABORATORIO**, elaborada en el año 2017, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

|   |  |              |
|---|--|--------------|
|  | FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA   | Código:      |
|   | PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA   | Versión 0    |
|   | Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres | Julio - 2016 |

|   |  |                                     |
|---|--|-------------------------------------|
|  | Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.   |                                     |
|  | Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.  | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma. |                                     |

Licencias completas: [http://co.creativecommons.org/?page\\_id=13](http://co.creativecommons.org/?page_id=13)

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

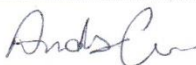
| AUTORIZAMOS   | SI | NO |
|---|----|----|
| La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso    | X  |    |
| La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación | X  |    |

| Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso. | SI | NO |
|--|----|----|
|  |    | X  |

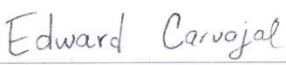
Para constancia se firma el presente documento en la ciudad de Bogotá D.C., a los 9 días del mes de Febrero del año 2018.

#### LOS AUTORES:

##### Autor 1

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>Nombres</b>                        | <b>Apellidos</b>   |
| Andrés Felipe                         | Carrera Lozano   |
| <b>Documento de identificación No</b> | <b>Firma</b>   |
| 1026294091                            |  |

##### Autor 2

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>Nombres</b>                        | <b>Apellidos</b>   |
| Edward Felipe                         | Carvajal Camacho   |
| <b>Documento de identificación No</b> | <b>Firma</b>   |
| 1016075748                            |  |