

EVALUACIÓN TÉCNICO- FINANCIERA DEL USO DE NANOMATERIALES EN
LECHADAS DE CEMENTO PARA REVESTIMIENTO DE PRODUCCIÓN EN
CAMPO CASTILLA, A NIVEL DE LABORATORIO

CARLOS ALFONSO MESA DUARTE
JUAN FELIPE PINZÓN ARTEAGA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, COLOMBIA
2016

EVALUACIÓN TÉCNICO- FINANCIERA DEL USO DE NANOMATERIALES EN
LECHADAS DE CEMENTO PARA REVESTIMIENTO DE PRODUCCIÓN EN
CAMPO CASTILLA, A NIVEL DE LABORATORIO

CARLOS ALFONSO MESA DUARTE
JUAN FELIPE PINZÓN ARTEAGA

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
José David Díaz
Ingeniero de petróleos

Orientador
Alejandro Contreras Garzón
Ingeniero de petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, COLOMBIA
2016

Nota de aceptación:

Ing. Alejandro Contreras Garzón
Presidente de jurados

Ing. Rafael Siado
Jurado 1

Ing. Laydy Mora
Jurado 2

Bogotá D.C. Noviembre de 2016

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Ing. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director (E) Programa Ingeniería de Petróleos

Dr. EDGAR DAVID CEDEÑO LIGARRETO

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 a los autores.

Primero a Dios. A mis padres Alfonso Mesa Mejía y Luz Amparo Duarte Garzón, todo lo que soy es gracias a ellos.

A mi hermano Juan Sebastián Mesa y a Mónica Andrea Carreño, por ser apoyos constantes en todo momento.

A José Eutimio Duarte, mi Abuelito, porque desde el primer día de universidad estuvo ayudándome desde el cielo.

A mi familia y a mis amigos que desde su posición ayudaron a que se cumpliera esta importante meta.

Carlos Alfonso Mesa Duarte

A mis padres Carlos Alirio Pinzón y Clara Inés Arteaga por apoyarme cada día y brindarme un apoyo incondicional.

A mi hermano Carlos Andrés Pinzón por enseñarme a nunca darme por vencido y siempre confiar en mí.

A toda mi familia y amigos por estar pendientes en el desarrollo de este trabajo y ayudarme a cumplir esta meta tan importante en mi vida.

Juan Felipe Pinzón Arteaga

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios, primero que todo, por cuidarme, protegerme y permitirme vivir todo este camino hasta acá. A mis padres Alfonso Mesa Mejía y Luz Amparo Duarte Garzón, por estar todo el tiempo ahí para mí; quienes con sus esfuerzos y sacrificios me han dado todo lo necesario y mucho más. Porque con sus consejos y forma de actuar me han enseñado valores que solo se aprenden en el hogar, por enseñarme que nada es fácil y a luchar por lo que de verdad quiero, por su amor y apoyo. A mi hermano Juan Sebastián Mesa Duarte por ser compañía constante en todo momento, sin importar si fuera bueno o malo. A Mónica Andrea Carreño, novia y mejor amiga en toda la carrera, quien me apoyo en cuanto cosa se me ocurría. A mi abuelito José Eutimio, quien desde el cielo me acompaño y lo seguirá haciendo. A mi tía Esperanza Duarte, por su ayuda incondicional. A mi primo Jorge Alberto Bohórquez Mesa, por su ayuda y consejos a lo largo de este camino a ser ingeniero de petróleos. Por la confianza depositada en mí, porque sin la ayuda de él este, proyecto no hubiera sido posible. Agradezco a toda mi familia.

Agradezco a la empresa Superior Energy Services y todo su personal, por la confianza y contribución durante el proyecto. Al ingeniero José David Díaz, quien con su conocimiento y constante colaboración, permitieron que este proyecto alcanzara las metas propuestas. A la ingeniera Angélica Ortiz por su gran ayuda en el laboratorio, por su disposición a colaborarnos en todo momento. Al ingeniero Alejandro Contreras Garzón, quien con su conocimiento y su disposición fue de gran ayuda para que este proyecto se pudiera culminar. A la orientadora geológica María Eugenia Chamorro y al orientador financiero Pedro Pablo Moreno.

A mi compañero Juan Felipe Pinzón Arteaga, por su entendimiento, comprensión y compromiso en el trabajo. A todos mis amigos por su apoyo a lo largo de este camino. A todos gracias.

Carlos Alfonso Mesa Duarte

AGRADECIMIENTOS

Primero a mis padres Carlos Alirio Pinzón y Clara Inés Arteaga por estar siempre pendientes de mí, su contante amor y cariño me permitieron a seguir adelante. A mi hermano Carlos Andrés Pinzón Arteaga el cual ha llegado a ser un ejemplo a seguir y el cual siempre tendrá un consejo para darme. A toda mi familia, que poco a poco me entendieron y apoyaron para cada día crecer como persona y profesionalmente.

Agradezco a la empresa Superior Energy Services la cual nos brindó todo su apoyo para la culminación de este trabajo. A la ingeniera Angélica Ortiz por su constante ayuda en la elaboración de las pruebas de laboratorio y a las enseñanzas que nos dejó. Al ingeniero José David Díaz por su constante interés y disposición en el desarrollo de este trabajo. Al ingeniero Alejandro Contreras quien con su constante optimismo y ayuda nos permitió llegar a la meta.

A mi compañero Carlos Alfonso Mesa por el compromiso que le entrego a este trabajo y entenderme durante todo el desarrollo del mismo. Por ultimo a mis amigos por acompañarme y ayudarme en este largo camino.

Juan Felipe pinzón Arteaga

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	32
OBJETIVOS	33
1. GENERALIDADES DEL CAMPO CASTILLA	34
1.1 HISTÓRIA	34
1.2 LOCALIZACIÓN	35
1.3 MARCO GEOLÓGICO	35
1.3.1 Columna estratigráfica.	35
1.3.2 Estratigrafía.	38
1.3.3 Geología estructural.	40
1.3.4 Geología del petróleo.	41
1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO	42
1.4.1 Método de producción.	43
1.4.2 Tiempo de producción.	43
1.4.3 Número de pozos.	43
1.4.4 Grafica de producción.	44
1.4.5 Características del yacimiento.	45
2. GENERALIDADES DE LA CEMENTACIÓN DE POZOS PETROLEROS	46
2.1 DEFINICIÓN DE CEMENTACIÓN	46
2.2 TIPOS Y PRACTICAS DE CEMENTACIÓN PETROLERA	47
2.2.1 Cementación primaria.	47
2.2.2 Cementación secundaria o remedial.	52
2.3 ADITIVOS UTILIZADOS EN LA CEMENTACIÓN DE POZOS	60
2.3.1 Acelerantes.	60
2.3.2 Retardadores.	60
2.3.3 Extendedores.	61
2.3.4 Dispersantes.	61

2.3.5 Controladores de filtrado.	62
2.3.6 Controladores de pérdidas de circulación.	62
2.3.7 Controladores de agua libre.	62
2.3.8 Controladores de migración de gas.	63
2.3.9 Densificantes.	63
2.3.10 Antiespumantes.	63
2.4 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CEMENTACIÓN	64
2.4.1 Equipos de cementación de superficie.	64
2.4.2 Equipos de cementación en fondo.	71
3. ANÁLISIS DE LA LECHADA DE CEMENTACIÓN UTILIZADA ACTUALMENTE EN CAMPO CASTILLA	73
3.1 CARACTERÍSTICAS DE UNA LECHADA DE CEMENTACIÓN	73
3.1.1 Densidad.	73
3.1.2 Rendimiento.	74
3.1.3 Tiempo de bombeabilidad.	74
3.1.4 Agua de mezcla.	74
3.1.5 Fluido de mezcla.	75
3.1.6 Reología.	75
3.1.7 Fuerza de compresión.	76
3.1.8 Pérdida de fluido.	77
3.1.9 Fluidez de la lechada.	77
3.1.10 Sedimentación en las lechadas de cemento.	77
3.2 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA UNA LECHADA DE CEMENTO	78
3.2.1 Prueba de mezclabilidad.	79
3.2.2 Densidad.	80
3.2.3 Acondicionamiento de la lechada.	82
3.2.4 Agua libre.	83
3.2.5 Reología.	84
3.2.6 Filtrado o fluid loss.	87
3.2.7 Tiempo de bombeabilidad o thickening time.	89
3.2.8 Resistencia al esfuerzo compresivo. Ensayo no destructivo.	91

3.2.9 Resistencia al esfuerzo compresivo. Ensayo destructivo.	93
3.2.10 Mpro.	95
3.2.11 Prueba de sedimentación.	97
3.3 CARACTERISTICAS DE LA LECHADA DE CEMENTACIÓN UTILIZADA ACTUALMENTE EN EL CAMPO CASTILLA	98
3.3.1 Cálculos para la lechada de cementación de 14.5 ppg sin nanomateriales.	100
3.3.2 Resultados de las pruebas para la lechada de cementación de 14.5 ppg sin nanomateriales.	109
4. MATRIZ DE VARIACIÓN DE ADITIVOS	112
4.1 CONCENTRACIONES DE APLICABILIDAD	112
4.2 ADITIVOS VARIABLES Y FIJOS	113
4.2.1 Aditivos variables.	113
4.2.2 Aditivos fijos.	115
4.3 MATRIZ DE VARIACIÓN DE NANO MATERIALES	116
4.3.1 Diseño de lechadas.	117
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LECHADAS DISEÑADAS A PARTIR DE LA MATRIZ	118
5.1 EVALUACIÓN DE LOS DISEÑOS DE LECHADAS PROBADOS EN EL LABORATORIO	118
5.1.1 Cálculos de las cantidades de cemento, agua y aditivos para los diseños propuestos en la matriz.	118
5.1.2 Tabla resumen con las cantidades de cemento, agua y aditivos.	122
5.1.3 Evaluación de los diseños de lechada derivados de la matriz de variación de nanomateriales.	124
5.1.4 Tabla resumen de los resultados de laboratorio de los diferentes diseños de lechada.	126
5.1.5 Análisis de los resultados de laboratorio de los diferentes diseños de lechada.	127
5.2 MATRIZ COMPARATIVA ENTRE LAS LECHADAS DE CEMENTO CON NANO MATERIALES	135
5.3 FORMULACIÓN DEFINITIVA DE UN DISEÑO DE LECHADA CON NANO MATERIALES (NANOSÍLICE)	137

5.3.1 Diseño final.	138
5.4 COMPARACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DE LECHADA Y EL DISEÑO DE LECHADA UTILIZADO EN CAMPO CASTILLA	138
6 ANÁLISIS FINANCIERO	141
6.1 ANÁLISIS DE COSTO DE OPERACIÓN	143
6.1.1 Costo de fluidos de cementación para un liner de 7” en campo castilla.	143
6.1.2 Costo de pre flujos para la cementación de un liner de 7” en campo castilla.	147
6.1.3 Costo de equipos de superficie para la cementación de un liner de 7” en campo castilla.	147
6.1.4 Costo de equipos de fondo para la cementación de un liner de 7” en campo castilla.	148
6.1.5 Costo de personal para la cementación de un liner de 7” en campo castilla.	149
6.1.6 Costos totales para la cementación de un liner de 7” en campo castilla.	150
6.2 ANALISIS DE INGRESOS	152
6.3 EVALUACIÓN FINANCIERA	154
6.3.1 Flujo de efectivo.	155
6.4 CONCLUSIÓN FINANCIERA	156
7 CONCLUSIONES	157
8 RECOMENDACIONES	159
BIBLIOGRAFÍA	160
ANEXOS	163

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación geográfica del Campo Castilla	36
Figura 2. Columna Estratigráfica de los Llanos Orientales	37
Figura 3. Producción promedio del Campo Castilla	44
Figura 4. Producción Acumulada del Campo Castilla	45
Figura 5. Cemento en el espacio anular	47
Figura 6. Aislamiento zonal proporcionado por la cementación	48
Figura 7. Soporte y protección al revestimiento	49
Figura 8. Soporte al pozo en formaciones no consolidadas	49
Figura 9. Tipos de revestimiento	51
Figura 10. Equipo de cementación de múltiples etapas	52
Figura 11. Cementación utilizada para sellar zona de producción de agua	53
Figura 12. Variación de la presión con respecto al tiempo en una cementación forzada utilizando el método de bombeo intermitente	55
Figura 13. Tapón de desvío	57
Figura 14. Tapón de abandono	58
Figura 15. Tapón para control de pérdida de circulación	59
Figura 16. Silo almacenador de cemento	65
Figura 17. Bulk Truck, transportador de cemento	66
Figura 18. Unidad de cementación	67
Figura 19. Batch mixer de 50 bbls	68
Figura 20. Cabeza cementación de cinco pulgadas	69
Figura 21. Tapones de cementación	70
Figura 22. Centralizadores utilizados en los procesos de cementación	72
Figura 23. Orden del tren de fluidos con jerarquía reológica	76
Figura 24. Mezclador de laboratorio de cementación	79
Figura 25. Balanza presurizada con sus partes	81
Figura 26. Consistómetro atmosférico y su copa de acondicionamiento	82
Figura 27. Probeta de 250 ml	83
Figura 28. Viscosímetro rotacional con sus partes	85
Figura 29. Filtroprensa utilizada para el fluid loss	88
Figura 30. Consistómetro presurizado	90
Figura 31. Copa del consistómetro presurizado con sus partes	90
Figura 32. Equipo SGSA	92
Figura 33. Copa SGSA	93
Figura 34. Moldes de 2" x 2" para las muestras, ensayo destructivo	94
Figura 35. Prensa hidráulica, ensayo destructivo	94
Figura 36. MPRO o analizador de propiedades mecánicas	96
Figura 37. Cámara de curado	97
Figura 38. Molde para la prueba de sedimentación	98
Figura 39. Matriz de variación	116
Figura 40. Área de interés del proyecto	142

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Grafica 1. Lectura reometro vs velocidad (rpm) a temperatura ambiente (°F) de las lechadas con diferentes concentraciones	128
Grafica 2. Lectura reometro a temperatura circulante (130°F) de las lechadas con diferentes concentraciones	128
Grafica 3. Viscosidad plástica a BHCT vs concentración de nanosílice	129
Grafica 4. Punto cedente a BHCT vs concentración de nanosílice	130
Grafica 5. Resistencia a la compresión vs concentración de nanosílice	131
Grafica 6. Tiempo de bombeabilidad vs concentración de nanosílice	132
Grafica 7. Perdida de filtrado vs concentración de nanosílice	133
Grafica 8. Porcentaje de sedimentación vs concentración de nanosílice	134
Grafica 9. Comparación en la fuerza de compresión	139
Grafica 10. Comparación entre los tiempos de bombeabilidad	139
Grafica 11. Comparación entre puntos cedentes	140
Grafica 12. Comparación entre la viscosidad plástica	140

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades petrofísicas del yacimiento	45
Tabla 2. Composición lechada 14.5 ppg	100
Tabla 3. Gravedades específicas componentes lechada 14.5 ppg	102
Tabla 4. Cantidades de cemento, agua y aditivos para diseño de lechada actual	108
Tabla 5. Resultados de densidad, resistencia a la compresión, tiempo de bombeabilidad, pérdida de filtrado y agua libre para el diseño actual	110
Tabla 6. Resultados de la prueba de reología para el diseño actual	110
Tabla 7. Resultados prueba de sedimentación para el diseño actual	111
Tabla 8. Concentraciones de aplicabilidad de los aditivos	112
Tabla 9. Concentraciones de aditivos fijos	115
Tabla 10. Diseño de lechadas	117
Tabla 11. Cantidades de cemento, agua de mezcla y aditivos para los diseños derivados de la matriz de variación de nanomateriales	123
Tabla 12. Cantidades de cemento, agua y aditivos para la lechada con 0.5%BWOC	124
Tabla 13. Resultados de densidad, resistencia a la compresión, Tiempo de bombeabilidad, pérdida de filtrado y agua libre para lechada con 0.5%BWOC	125
Tabla 14. Resultados de la prueba de reología para la lechada con 0.5%BWOC	125
Tabla 15. Resultados prueba de sedimentación para la lechada con 0.5%BWOC	126
Tabla 16. Resumen resultados de reologías para lechadas con nanomateriales	126
Tabla 17. Resumen resultados de resistencia a la compresión, tiempo de bombeabilidad, pérdida de filtrado y sedimentación para lechadas con nanomateriales	127
Tabla 18. Matriz comparativa entre las lechadas de cemento con nanomateriales	136
Tabla 19. Total de puntajes por lechada	137
Tabla 20. Exigencias de Ecopetrol para la lechada de un revestimiento de producción en Campo Castilla	137
Tabla 21. Concentración de cemento, agua y aditivos para la lechada final de 4.5%BWOC	138
Tabla 22. Volumen de lechada de cementación para liner de 7" Campo Castilla	143
Tabla 23. Concentraciones de aditivos para lechadas con 4.5%BWOC de nanomateriales	144
Tabla 24. Costos para un barril de lechada con 4.5%BWOC de nanomateriales	146

Tabla 25. Costos de la lechada de cementación con 4.5%BWOC de nanomateriales para un liner de 7” en Campo Castilla	146
Tabla 26. Costo de pre flujos de la empresa Superior Energy Services Para un liner de 7” en Campo Castilla	147
Tabla 27. Costo equipos de superficie para cementación de un liner de 7” en Campo Castilla	148
Tabla 28. Costo equipos de fondo para cementación de un liner de 7” En Campo Castilla	149
Tabla 29. Costo personal para cementación de un liner de 7” en Campo Castilla	149
Tabla 30. Costo total para la cementación de un liner de 7” en Campo Castilla	150
Tabla 31. Campaña de perforación	151
Tabla 32. Costo de operación por periodo	151
Tabla 33. Costo lechada actualmente utilizada en Campo Castilla	152
Tabla 34. Ingresos totales	153

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Rendimiento del cemento	74
Ecuación 2. Balance de masa y volúmenes en lechadas de cemento	75
Ecuación 3. Cálculo volumen total de fluidos	75
Ecuación 4. Porcentaje de agua libre	84
Ecuación 5. Viscosidad plástica para lechadas de cementación	86
Ecuación 6. Punto cedente para lechadas de cementación	86
Ecuación 7. Determinación de la resistencia a la compresión	95
Ecuación 8. Requerimiento de agua a partir de ecuación de densidad de lechada	100
Ecuación 9. Cantidad de cemento a partir de rendimiento	105
Ecuación 10. Cantidad de agua de mezcla	106
Ecuación 11. Cantidad de aditivos sólidos	106
Ecuación 12. Cantidad de aditivos líquidos	107
Ecuación 13. Temperatura estática de fondo	108
Ecuación 14. Temperatura circulante	109
Ecuación 15. Determinación de la densidad por el método de Arquímedes	110
Ecuación 16. Determinación del porcentaje de sedimentación	111
Ecuación 17. Cantidad de cemento para un volumen establecido	144
Ecuación 18. Cantidad de aditivo con unidades de %BWOC para un barril de lechada	144
Ecuación 19. Cantidad de aditivo con unidades GPS para un barril de lechada	145
Ecuación 20. Precio del servicio en base al costo de operación	152
Ecuación 21. Valor presente neto	154
Ecuación 22. Equivalencia de tasas	154

LISTA DE CÁLCULOS

	pág.
Cálculo 1. Peso de aditivos sólidos para un sk de cemento	101
Cálculo 2. Densidad de los componentes de la lechada de 14.5 ppg	102
Cálculo 3. Masa del controlador de gas a partir de su volumen y densidad	103
Cálculo 4. Volumen de aditivos sólidos para un sk de cemento	103
Cálculo 5. Cálculo del requerimiento de agua para un sk de cemento	104
Cálculo 6. Rendimiento de la lechada	105
Cálculo 7. Fluido de mezcla o fluido total para un sk de cemento	105
Cálculo 8. Cantidad de cemento para lechada actual	106
Cálculo 9. Cantidad de agua de mezcla	106
Cálculo 10. Cantidades de los aditivos sólidos	107
Cálculo 11. Cantidades de los aditivos líquidos	108
Cálculo 12. Temperatura estática de fondo	109
Cálculo 13. Temperatura circulante	109
Cálculo 14. Masa en base al peso del cemento del nanomaterial	118
Cálculo 15. Volumen ocupado por la masa en base al peso del cemento para cada concentración	119
Cálculo 16. $\sum m$ Diseños de lechada con nanomaterial	119
Cálculo 17. $\sum v$ Diseños de lechada con nanomaterial	119
Cálculo 18. Requerimiento de agua para los diseños de lechadas con nanomaterial	120
Cálculo 19. Rendimiento de las lechadas con nanomaterial	120
Cálculo 20. Cantidad de cemento para 600ml de lechada con nanomaterial	120
Cálculo 21. Cantidad de agua para 600ml de lechada con nanomaterial	121
Cálculo 22. Cantidad de retardador para 600ml de lechada con nanomateriales	121
Cálculo 23. Cantidad de controlador de filtrado para 600ml de lechada con nanomateriales	121
Cálculo 24. Cantidad de aditivo especial para 600ml de lechada con nanomateriales	121
Cálculo 25. Cantidad de agente alivianante para 600ml de lechada con nanomateriales	121
Cálculo 26. Cantidad de controlador de gas para 600ml de lechada con nanomateriales	122
Cálculo 27. Cantidad de antiespumante para 600ml de lechada con nanomateriales	122
Cálculo 28. Cantidad de nanomateriales para 600ml de las diferentes lechadas	122
Cálculo 29. Cantidad de cemento para un barril de lechada	144

Cálculo 30. Cantidades de aditivo para un barril de lechada	145
Cálculo 31. Cantidad de aditivo con unidades GPS para un barril de lechada	145
Cálculo 32. Precio del servicio en base al costo de operación	152
Cálculo 33. Precio de la lechada de cementación con 4.5%BWOC	152
Cálculo 34. Precio del servicio en base al costo de operación para la Lechada actualmente utilizada en Campo Castilla	152
Cálculo 35. Precio de la lechada de cementación utilizada actualmente En Campo Castilla	153
Cálculo 36. Interés efectivo anual a interés efectivo mensual	155
Cálculo 37. Valor presente neto para la lechada con 4.5%BWOC de nanomateriales	156

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Ficha técnica del cemento Dyckerhoff	164
Anexo B. Resultados de aditivos para lechada sin nanomateriales con todos los decimales.	166
Anexo C. Reporte de laboratorio lechada sin nanomateriales.	167
Anexo D. Ficha técnica del nanosílice.	169
Anexo E. Resultados de aditivos para lechadas con nanomateriales con todos los decimales.	172
Anexo F. Masa en base al peso del cemento del nanomaterial	173
Anexo G. Volumen ocupado por la masa en base al peso del cemento para cada concentración de nanomaterial.	174
Anexo H. \sum_m Diseños de lechada con nanomaterial.	175
Anexo I. \sum_v Diseños de lechada con nanomaterial.	176
Anexo J. Requerimiento de agua para los diseños de lechadas con nanomaterial.	177
Anexo K. Rendimiento de las lechadas con nanomaterial	178
Anexo L. Cantidad de cemento para 600ml de lechada con nanomaterial	179
Anexo M. Cantidad de agua para 600ml de lechada con nanomaterial.	180
Anexo N. Cantidad de retardador para 600ml de lechada con nanomateriales.	181
Anexo Ñ. Cantidad de controlador de filtrado para 600ml de lechada con nanomateriales.	182
Anexo O. Cantidad de aditivo especial para 600ml de lechada con nanomateriales.	183
Anexo P. Cantidad de agente alivianante para 600ml de lechada con nanomateriales.	184
Anexo Q. Cantidad de controlador de gas para 600ml de lechada con nanomateriales.	185
Anexo R. Cantidad de antiespumante para 600ml de lechada con nanomateriales.	186
Anexo S. Cantidad de nanomateriales para 600ml de las diferentes lechadas.	187
Anexo T. Reporte laboratorio lechadas con nanomateriales.	188
Anexo U. Tablas de resultados de pruebas para lechada con 1.0%BWOC de nanosílice.	208
Anexo V. Tablas de resultados de pruebas para lechada con 1.5%BWOC de nanosílice.	209
Anexo W. Tablas de resultados de pruebas para lechada con 2.0%BWOC de nanosílice.	210
Anexo X. Tablas de resultados de pruebas para lechada con 2.5%BWOC de nanosílice.	211

Anexo Y. Tablas de resultados de pruebas para lechada con 3.0%BWOC de nanosílice.	212
Anexo Z. Tablas de resultados de pruebas para lechada con 3.5%BWOC de nanosílice.	213
Anexo AA. Tablas de resultados de pruebas para lechada con 4.0%BWOC de nanosílice.	214
Anexo AB. Tablas de resultados de pruebas para lechada con 4.5%BWOC de nanosílice.	215
Anexo AC. Tablas de resultados de pruebas para lechada con 5.0%BWOC de nanosílice.	216

LISTA DE ABREVIATURA

Abreviaturas	Significado
°F	Grados Fahrenheit
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
API	Instituto Americano del Petróleo (America Petroleum Institute)
Bbl	Barril
Bc	Unidades Bearden
BHCT	Temperatura Circulante de Fondo (Bottom hole circulating temperature)
BHSP	Temperatura Estática de Fondo (Bottom Hole Static Temperature)
BHP	Presión de Fondo (Bottom hole pressure)
BOPD	Barriles de Petróleo por Día
BWOC	Porcentaje en Base al Cemento (Base weight on Cement)
cp	Centipoise
Ft	Pies
gal/sk	Galones por Saco
ICANH	Instituto Colombiano de Antropología e Historia
gr	Gramos
Km	Kilómetros
lbf/100ft ³	Libra fuerza por cada 100 pies cúbicos
lb/sk	Libra por Saco

M.A	Millones de años
md	Milidarcies
MD	Profundidad Medida (Measured Depth)
MMBO	Millones de Barriles de Petróleo
nm	Nanometros
psi	Libra por Pulgada Cuadrada
ppg	Libras por Galón
RPM	Revoluciones por Minuto
SGSA	Analizador de la Fuerza de Gel Estatico (Static Gel Strength Analyzer)
Sor	Saturación de Aceite Reducible
Swirr	Saturación de Agua Irreducible
TOC	Carbono Orgánico Total
TVD	Profundidad Vertival Verdadera (True Vertical Depth)
UCA	Analizador Ultrasónico de Cemento (Ultrasonic Compressinility Analyser)
μm	Micrometro
Vp	Viscocidad Plastica
WOC	Tiempo de Espera en el Cemento (Waiting on Cement)
Yp	Punto Cedente

GLOSARIO

ACUÍFERO ACTIVO: cuerpo subterráneo poroso y permeable saturado de agua, conectado con una fuente hídrica la cual proporciona presión.

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

ANTICLINAL: pliegue de la corteza terrestre en forma de arco, en el que las capas de la roca son convexas hacia arriba. Presenta los estratos más antiguos en su núcleo.

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

ARCILLOLITAS: roca compacta, sin fisilidad y formada por partículas de tamaño fino (menor que 0.0039 mm).

ARENISCAS: roca sedimentaria de tipo detrítico formada por granos bien redondeados de textura detrítica o plástica. El diámetro de este grano oscila entre 0.0625 mm y 2 mm, compuesta esencialmente por cuarzo y pequeñas cantidades de feldespatos.

BASAMENTO: corteza terrestre situada por debajo de los depósitos sedimentarios y que llega hasta la discontinuidad de Mohorovicic. Por debajo de esta capa no se espera que existan yacimientos de hidrocarburos, puede ser ígnea o metamórfica.

CAMPO: superficie existente sobre una acumulación subterránea de hidrocarburos (yacimiento).

COLUMNA ESTRATIGRAFICA: representación gráfica utilizada en geología para describir la ubicación vertical de unidades de rocas en un área específica.

CONTRATO DE ASOCIACIÓN: contrato mediante el cual el dueño del hidrocarburo, en el caso de Colombia el estado a través de Ecopetrol, realiza una intervención directa en las fases de exploración, explotación, refinación y distribución del hidrocarburo. En este contrato, la compañía asociada asume todo el riesgo económico en la fase de exploración, en la explotación se conforma una operación conjunta y las fases de refinación y distribución de hidrocarburos son compartidas.

CONTRATO DE CONCESIÓN: contrato mediante el cual el dueño del hidrocarburo, entrega un área de terreno a una compañía petrolera, nacional o extranjera, para su exploración y desarrollo. A cambio, el dueño del hidrocarburo recibía un porcentaje de regalías sobre la producción.

CUENCA: área de la corteza en donde se produce una acumulación de sedimentos producidos por la erosión de la superficie. Esta acumulación tiene un espesor considerable y puede llegar a tener una longitud de varios Km.

DENSIDAD ABSOLUTA: densidad de un material sin el fluido alrededor de las partículas, similar a la densidad relativa y puede ser obtenida al multiplicar la densidad relativa de un material por la densidad del agua a 4°C, 1000kg/m³ o 8.345 lbm/gal.

DENSIDAD RELATIVA: proporción de la masa de una sustancia a la masa de un volumen equivalente de una sustancia estándar a una temperatura de referencia.

DIORITA: roca ígnea plutónica la cual suele ser oscura y está compuesta generalmente de dos tercios de plagioclasa sódica y un tercio de minerales oscuros (Hornablenda, biotita, cuarzo y piroxeno).

ESPACIADOR: fluido viscoso que puede ser densificado con agentes sólidos densificantes insolubles y son usados para separar los fluidos de perforación y la lechada de cementación.

ESTRATIGRAFÍA: la estratigrafía es una rama de la geología que trata del estudio e interpretación de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, haciendo énfasis en la identificación y descripción de las secuencias tanto verticales como horizontales.

FALLA: fractura del terreno originada por las fuerzas tectónicas que superan la resistencia de las mismas rocas, generando un desplazamiento observable de las partes separadas. Puede ser normal o inversa.

FALLA INVERSA: hace referencia a la falla en la cual el bloque de falla elevado se desplaza de forma ascendente a lo largo de la superficie de falla, respecto al bloque hundido.

FALLA NORMAL: este término hace referencia a la falla en la cual el bloque elevado se desplaza hacia abajo respecto al bloque hundido, en estos casos la superficie de falla se inclina normalmente de 50 a 90 grados.

FORMACIÓN: término general utilizado para definir una unidad litoestratigráfica cuyos cuerpos de rocas tienen la misma composición, estructura, periodo y lugar de depositación, lo cual lo diferencia de las unidades litoestratigráficas adyacentes.

FUERZA DE COMPRESIÓN: fuerza por unidad de área requerida para causar que una muestra de cemento falle bajo presión.

FUERZA SÓNICA: fuerza de compresión de una muestra de cemento obtenida al medir la velocidad del sonido a través del cemento y calculando la fuerza usando un correlaciones.

FILTRADO: líquido que es forzado a salir de una lechada de cemento durante la prueba de pérdida de filtrado.

FLUIDO LIBRE: líquidos coloridos o incoloros que se separan de una lechada de cemento bajo condiciones estáticas.

GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO: aplicación especializada de la geología que estudia todos los aspectos relacionados con la formación de yacimientos petrolíferos.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL: rama de la geología que se dedica a estudiar la corteza terrestre, sus estructuras y la relación de las rocas que las forman.

INFRAYACENTE: que se ubica por debajo de algo en particular.

KERÓGENO: término que agrupa los productos naturales derivados de la materia orgánica, compuestos por hidrógeno y carbono. Es la materia orgánica en partículas diseminadas en las rocas sedimentarias, que es insoluble en los solventes orgánicos comunes, existen 4 tipos de kerógeno y se clasifican según su origen.

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

LIMOLITAS: roca sedimentaria detrítica de textura clástica con un tamaño de partícula correspondiente al limo (0.0002-0.0020 mm) lo cual lo hace más fino que la arenisca pero más grueso que la arcilla. Compuestas usualmente por óxido de hierro, calcita y feldespatos. Ejemplo de este tipo de rocas es el cuarzo y el feldespato.

LUTITAS: roca sedimentaria detrítica o clástica, las partículas de esta roca son tan pequeñas que no pueden identificarse con facilidad (1/256 mm). Compuestas por partículas del tamaño de la arcilla y del limo es la roca sedimentaria más abundante en la tierra y pueden contener grandes cantidades de material orgánico, lo cual las convierte en potenciales rocas generadoras de hidrocarburos.

MARCO GEOLÓGICO: es un resumen de la geología del lugar de interés, dentro del cual se puede incluir la estratigrafía, la geología estructural y la geología del petróleo.

METAMÓRFICO: rocas formadas a partir de la alteración de las rocas preexistentes, se alteran por factores como la temperatura, la presión y el contenido de compuestos volátiles.

MÉTODO DE PRODUCCIÓN: métodos utilizados para extraer hidrocarburo del subsuelo cuando la energía natural no es suficiente para hacerlo. Existe el bombeo mecánico, el bombeo hidráulico, el gas lift, bombas electrosumergibles y bombeo por cavidades progresivas.

MIGRACIÓN: se denomina migración al desplazamiento del petróleo a través de las rocas porosas. Existe la migración primaria la cual es el movimiento del hidrocarburo desde la roca madre hasta la roca almacén, y la migración secundaria la cual es el desplazamiento del hidrocarburo de la roca almacén a la trampa.

NANOMATERIAL: material cuya medida es del orden de nanómetros, hasta de 100 nanómetros.

PLAENERS: rocas silíceo- arcillosas.

RÉGIMEN LAMINAR: tipo de flujo aerodinámico para fluidos de una sola fase en la cual el fluido se mueve en capas paralelas o laminares.

RÉGIMEN TURBULENTO: régimen de flujo caracterizado por movimientos caóticos o en remolino a medida que el fluido se mueve a través de la tubería.

ROCA GENERADORA: roca rica en contenido de materia orgánica, que bajo condiciones de presión y temperatura específicas generara petróleo o gas. Normalmente son lutitas o calizas con un porcentaje mayor al 0.5% de carbono orgánico total.

ROCA RESERVORIO: roca en donde se aloja el petróleo en el yacimiento. Cuenta con la característica de ser porosa y permeable, por lo que puede ser una arenisca o un carbonato. Los mayores reservorio son los de grano de medio a grueso. Cuando esta roca no tiene acumulación de hidrocarburo sirve como reservorio de agua.

ROCA SELLO: roca relativamente impermeable la cual sirve como sello a los desplazamientos de los fluidos una vez constituyen el yacimiento.

SARTA: secciones de tubería de acero armadas, que son adecuadas a un pozo específico.

SIDETRACK: perforar un segundo pozo lejos de un pozo original.

SIENITA: roca ígnea plutónica la cual contiene grandes cantidades de feldespato alcalino y también dentro de su estructura cuenta con plagioclasa, clinopiroxeno, biotita y anfíbol.

SUPRAYACENTE: que se ubica por arriba de algo en particular.

TIEMPO DE BOMBEABILIDAD: tiempo en que la consistencia de una lechada de cemento ha llegado a ser tan alta que la lechada es considerada no bombeable.

TRAMPA: configuración geológica adecuada para la acumulación y la concentración de petróleo. Existen trampas estructurales, trampas estratigráficas y mixtas.

TRAMPA ESTRUCTURAL: estructura geológica con capacidad de retener hidrocarburos, es causada por la tectónica y puede ser una falla o un pliegue.

TUBERÍA DE REVESTIMIENTO: tubería de gran diámetro bajada en hueco abierto y posteriormente cementada en un lugar. Usada para soportar colapsos, explosiones, aislar zonas de pérdida de circulación, proteger formaciones de agua dulce entre otros.

TUBERÍA DE PRODUCCIÓN: tubería de revestimiento que no se extiende hasta el tope del pozo, pero en su lugar se suspende internamente en la parte inferior de la tubería de revestimiento anterior.

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

RESUMEN

En este trabajo de investigación, se planteó la implementación del nanosilice en la lechada de cementación, para de esta manera mejorar las diferentes propiedades de la lechada de cemento que actualmente utiliza la empresa Superior Energy Services en la cementación del revestimiento de producción en Campo Castilla.

Primero, para conocer qué tipo de lechada se está utilizando actualmente en Castilla fue necesario conocer las generalidades del Campo Castilla, como sus diferentes formaciones, las características de las rocas y la profundidad final del pozo. Posteriormente se describieron las generalidades de la cementación primaria en pozos de petróleo, indicando los diferentes tipos y prácticas de la cementación, los aditivos utilizados en las lechadas de cemento y los diferentes equipos utilizados durante el proceso de cementación. Para analizar la lechada que actualmente se utiliza en Campo Castilla, se describieron las características de una lechada de cementación y las diferentes pruebas que se le pueden realizar a esta, las cuales son: densidad, resistencia a la compresión, tiempo de bombeabilidad, reología, pérdida de filtrado, sedimentación y agua libre. Ya conociendo los procedimientos de estas pruebas, se diseñó la lechada que actualmente se utiliza en Campo Castilla y se le realizó las diferentes pruebas anteriormente mencionadas. Teniendo como diseño base la lechada de Castilla se elaboró un plan de pruebas de variación de nanomateriales, diseñando 10 lechadas restantes se le adicionó una concentración de 0,5% BWOC de nanosilice y se aumentó hasta llegar a una concentración de 5% BWOC, a cada una de estas nuevas lechadas se le realizaron las mismas pruebas de laboratorio que le realizaron a lechada base. Posteriormente a las 10 lechadas con nanosilice se analizaron los diferentes resultados mediante una matriz de selección con el fin de escoger un diseño definitivo y finalmente compararlo con la lechada que se utiliza actualmente en Campo Castilla. Por último se presenta el estudio financiero del proyecto para conocer si puede ser viable o no.

Palabras claves:

- Nanosilice
- Pruebas laboratorio cementación
- Lechada cemento
- Campo Castilla

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria de los hidrocarburos es muy importante debido a que del petróleo y del gas se derivan muchos productos que son necesarios en el desarrollo de las sociedades, adicionalmente, estos recursos son de suma importancia en las economías de los países, en Colombia la comercialización de estos recursos aportó el 4.5% del PIB en 2015. La extracción del petróleo, desde el subsuelo hasta la superficie se hace a través de un hueco profundo llamado “pozo”, realizado mediante un proceso llamado perforación; en el que con la ayuda de un taladro se excava el subsuelo por secciones hasta alcanzar la profundidad planeada. Cada una de las secciones perforadas se asegura con un revestimiento, el cual es un tubo metálico que garantiza la integridad del pozo y proporciona una superficie de trabajo que facilita la perforación de las próximas secciones. Estos revestimientos se aseguran con cemento en un procedimiento llamado cementación, en el que se bombea una lechada desde la superficie hasta el anular (espacio entre el revestimiento y la formación). La cementación es un proceso cuyo éxito depende de varias variables, dentro de las que se encuentran las características que desarrolle la lechada durante el proceso de cementación y posterior a este. Estas características son medidas en laboratorio previo al trabajo y se pueden modificar con aditivos.

La empresa Superior Energy Services ha cementado desde el 2015 más de 51 pozos en Campo Castilla con buenos resultados de acuerdo a las exigencias de Ecopetrol. Sin embargo, a finales de 2015 Ecopetrol decide cambiar la densidad de la lechada de 16 ppg a 14.5 ppg con el objetivo de minimizar las posibilidades de inducir a fracturas del yacimiento como consecuencia de la presión hidrostática ejercida por el cemento. Por esta razón, la empresa Superior Energy cambia su diseño, y el nuevo diseño aunque cumple con las exigencias de Ecopetrol, tiene varias características que pueden ser mejoradas. Para mejorar las características de las lechadas utilizadas actualmente, se propone agregar nanosílice al actual diseño de lechada, teniendo en cuenta que la sílice es un aditivo que ayuda a mejorar las características de las lechadas como la resistencia a la compresión, las propiedades reológicas y la pérdida de filtrado; y que la nanosílice por su mayor área de contacto, puede ayudar aún más. Por lo tanto, el presente trabajo evaluará las diferentes propiedades de las lechadas con nanomateriales, en concentraciones desde el 0.5%BWOC hasta 5%BWOC, aumentando la concentración cada 0.5%BWOC; para al final seleccionar el diseño que técnicamente proporcione mejores características. Adicionalmente, se realiza un análisis financiero con el fin de determinar si el proyecto es o no rentable financieramente para la compañía.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnico – financieramente el uso de nanomateriales en lechadas de cemento para revestimiento de producción en campo castilla, a nivel de laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir las generalidades del Campo Castilla.
2. Describir las generalidades de la cementación primaria en pozos de petróleo.
3. Analizar la lechada de cementación que actualmente es utilizada en el Campo Castilla.
4. Elaborar un plan de prueba de la variación de los nanomateriales usando las normas API 10A y 10B, según las concentraciones de aplicabilidad.
5. Diseñar una lechada de cementación a partir del plan de prueba de los nanomateriales usando las normas API 10A y 10B para el Campo Castilla con su respectivo análisis.
6. Comparar los resultados de las lechadas que incluyen nanomateriales con la lechada utilizada convencionalmente en Campo Castilla por medio de una matriz de resultados.
7. Evaluar la viabilidad financiera del diseño de la lechada de cementación que utilizan nanomateriales mediante el indicador financiero de valor presente neto (VPN)

1. GENERALIDADES DEL CAMPO CASTILLA

El presente capítulo tiene como objetivo describir brevemente los aspectos del Campo Castilla tales como: localización geográfica, historia, marco geológico e historia de producción.

1.1 HISTORIA

La Historia del campo castilla inicia en el año 1944, por medio de campañas de exploración realizadas por la empresa estadounidense Chevron Petroleum Company. Posteriormente y mediante el Contrato de Concesión Cubarral que comprendía un área de 97.450 hectáreas se hace el descubrimiento con el pozo Castilla 1 en el año 1969, el cual alcanzó una profundidad de 7.347 pies y probó producción de crudo de 10°API en la Formación Mirador y 13.7° API en las Formaciones Guadalupe y Une.¹

Aunque el campo fue descubierto en el año de 1969, su explotación se da a partir del año de 1975, debido a las características del crudo encontrado allí y a la dificultad que representaba producir crudo de estas características. En el año de 1975, cuando se comienza a explotar el campo comercialmente, se hace bajo el Contrato el de Asociación Cubarral, en el cual fueron socios Ecopetrol con el 50% y Chevron con el 50% restante.

La explotación en el Campo Castilla por parte de la empresa Chevron Petroleum Company se dio hasta enero del año 2000, año en el que pasó a ser explotado por Ecopetrol S.A.

A comienzos del año 2016, Campo Castilla cuenta con un área total de 97.540 hectáreas, la compañía operadora continúa siendo Ecopetrol y se encuentra activo en producción con 422 pozos y se realizan operaciones de perforación.

¹ EL TIEMPO. "Castilla y Chichimene pasarán a Ecopetrol". [En línea] Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1240507>. Citado marzo 15 de 2016

1.2 LOCALIZACIÓN

El Campo Castilla se encuentra ubicado en el bloque LLA 37, en la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, departamento del meta, en jurisdicción de los municipios de Acacias y Castilla la Nueva, más exactamente en las veredas El Triunfo, La Esmeralda y Montebello, a 30 km de la ciudad de Villavicencio

Para llegar al Campo castilla por vía terrestre, como se evidencia en la **Figura 1**, desde Bogotá, se toma la avenida Boyacá hasta la Vía Bogotá – Villavicencio, pasando por los municipios de Chipaque, Cáqueza, Quetame y Guayabetal por un trayecto de 117 km. En la ciudad de Villavicencio, en el parque de los fundadores, se toma el desvío por la ruta 56 hasta cinco km después del el municipio de Acacias, en donde se toma el desvío al oriente hasta llegar al Municipio de Castilla La Nueva y posteriormente se toma la vía al norte en donde se encuentra el Campo Castilla.

Igualmente para llegar a la ciudad de Villavicencio por ruta aérea se toma un vuelo desde el aeropuerto el Dorado en Bogotá hasta el aeropuerto la vanguardia en Villavicencio, posteriormente se siguen las indicaciones ya dadas.

1.3 MARCO GEOLÓGICO

En este capítulo se describe la estratigrafía, la geología estructural y la geología del petróleo asociadas al Campo Castilla.

1.3.1 Columna estratigráfica. En la **figura 2** se presenta la columna estratigráfica generalizada de la cuenca de los Llanos Orientales, en la cual se observa una secuencia sedimentaria depositada desde el cretácico inferior sobre un basamento de 541 Millones de años (M.A).

Figura 1. Ubicación geográfica del campo castilla.

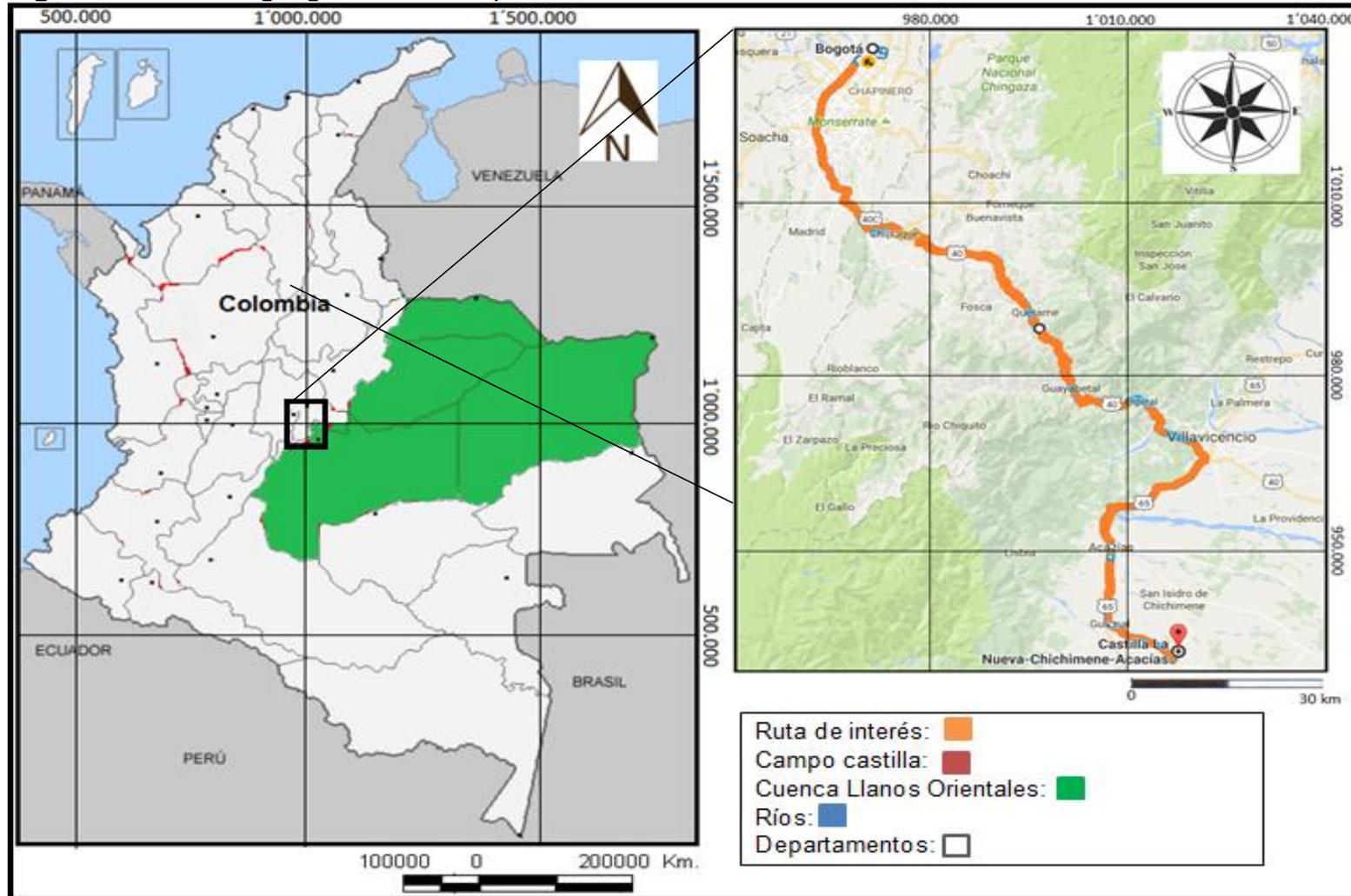
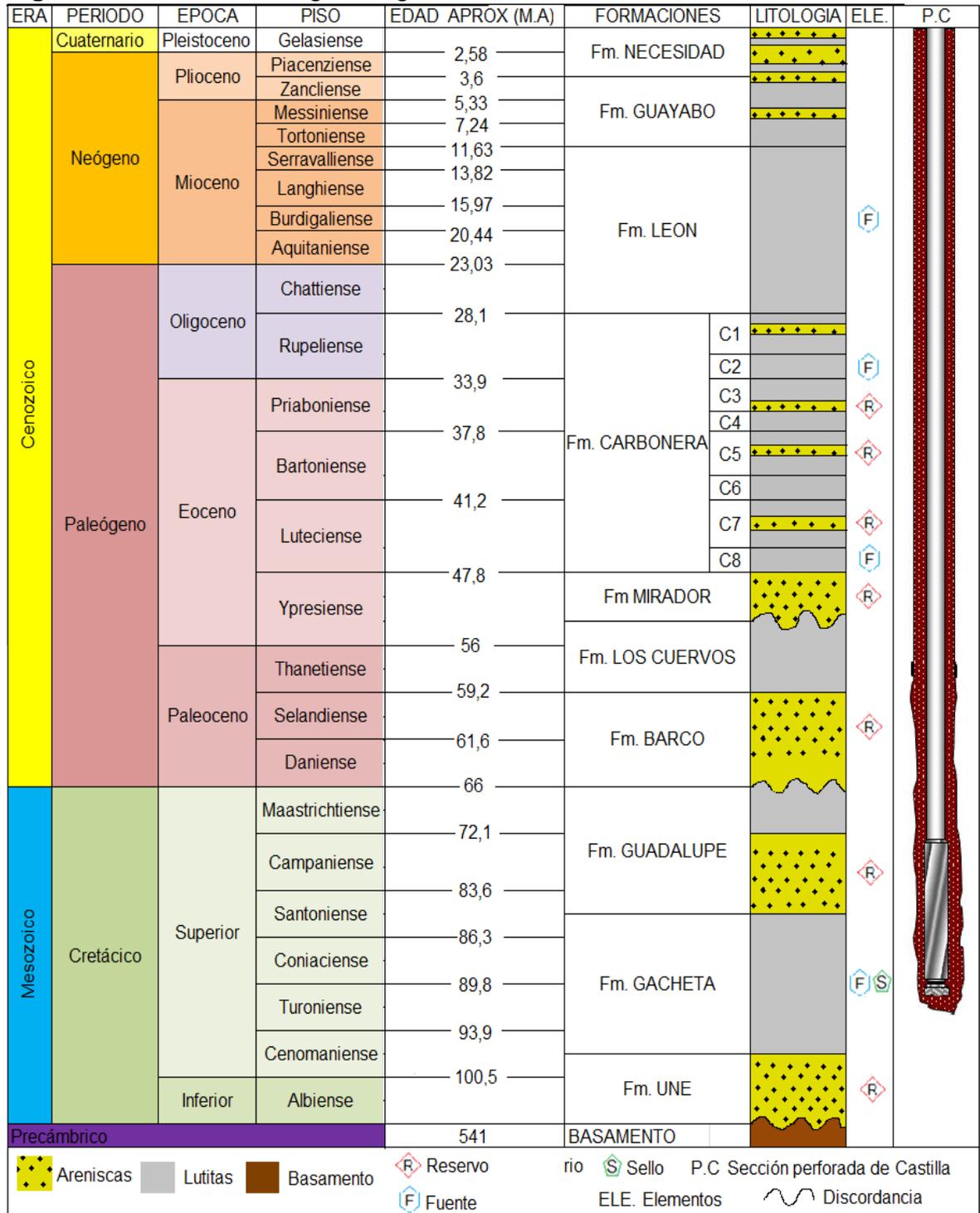


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada de los llanos Orientales.



Fuente: ANH. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Diciembre 2012. Pg 46. [Citado 29 febrero, 2016] Modificada por los autores.

1.3.2 Estratigrafía. A continuación se describen las formaciones geológicas presentes en la Cuenca de los Llanos Orientales desde la más antigua a la más reciente, las cuales fueron alcanzadas por los pozos del Campo Castilla hasta la formación Gachetá en el cretácico superior.

- **Basamento.** En el Meta existe reporte de un basamento ígneo - metamórfico, que data del periodo precámbrico, cuya composición es diorítica –sienítica las cuales podrían ser prolongación del Macizo de Quetame, bajo la secuencia sedimentaria”.² El Basamento infrayace discordantemente la Formación Une.
- **Formación Une.** Según CAMPBELL y BÜRGL la edad de esta formación es cretácico y coincide en un límite Albiano superior y Cenomaniano inferior, descrita por Hubach en 1931, consta de “bancos gruesos de arenisca, operacionalmente en el área del Meta se denomina K2, separados por bancos más o menos delgados de esquisto endurecido y como guía se tiene en la parte alta del conjunto un débil nivel de antracita que se explota en el Rio Une en la región de Ubaque y en la región de Choachí. Este conjunto de areniscas de la formación Une se destaca en el terreno”³, y tiene un espesor que oscila entre 1.312 y 1.640 pies, su ambiente de depositación es de carácter marino. La Formación Une infrayace concordantemente a la Formación Gacheta y suprayace discordantemente al basamento.⁴
- **Formación Gachetá.** Según Hubach⁵ la Formación Gachetá corresponde al periodo del cretáceo superior cenomaniense, normalmente es referida operacionalmente como K1 inferior, está formada por lutitas negras y limolitas con intercalaciones de areniscas de poco espesor, tiene entre 2.624 y 2.952 pies de espesor, su ambiente de depositación es marino y suprayace concordantemente la Formación Une e infrayace concordantemente a la Formación Guadalupe. Normalmente referida operacionalmente como K1 inferior.

² ANH. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Diciembre 2012. Pg 41.

³ JULIVERT M, Amérique Latine Colombie, volumen 5, Paris 1968, p. 385.

⁴ Ibid., p. 503.

⁵ Ibid., P. 177

- **Formación Guadalupe.** Según Julivert 1831⁶ formación de edad Cretácico Campaniano, conocido operacionalmente como K1 superior, se divide de base a techo en Arenisca Tierna con granos muy gruesos a gruesos con un espesor entre 164 a 492 pies, Arenisca de Labor con un tamaño de grano constante y espesor de 246 pies y por ultimo un nivel de Plaeners (rocas silíceo-arcillosas) con un espesor de 492 pies, su ambiente de depositación es de carácter marino. Esta infrayace a la Formación Barco discordantemente y suprayace la Formación Gacheta concordantemente.
- **Formación Barco.** Según De Porta⁷ se le asigna una edad del Paleoceno inferior, principalmente formada por areniscas arcillosas de grano fino, lutitas y arcillitas intercaladas las cuales son limosas y carbonáceas con presencia de arcillas, el espesor de la formación varía entre 492 y 912 pies, su ambiente de depositación es deltáico, suprayace discordantemente a la Formación Guadalupe e infrayace concordantemente a la Formación Los Cuervos.
- **Formación Los Cuervos.** Según De Porta⁸ la edad de la Formación Los Cuervos es Paleoceno superior – Eoceno inferior, conformado por limolitas carbonáceas, arcillolitas intercaladas, areniscas de grano fino y carbones. Con un espesor que varía de 475 a 1.607 pies, su ambiente de depositación es deltáico. Suprayace concordantemente la Formación Barco e infrayace discordantemente a la Formación Mirador.
- **Formación Mirador.** Notestein⁹ le asigna una edad del Eoceno medio inferior, predominan las areniscas de grano fino a grueso compuestas por cuarzo y algunas capas de limolita, el espesor de la Formación Mirador varía entre los 524 y 1.312 pies, su ambiente de depositación es continental, suprayace discordante la Formación Los Cuervos y infrayace concordante a la Formación Carbonera.
- **Formación Carbonera.** Según De Porta la Formación Carbonera es de una edad Eoceno medio-Oligoceno inferior, su nombre “deriva de la quebrada Carbonera, afluente del Rio Zulia, en el flanco oriental del Anticlinal la Petrólea,

⁶ JULIVERT, Op., Cit., p. 229

⁷ J. DE PORTA, Amérique Latine Colombie, volumen 5, Paris 1974, p. 85.

⁸Ibid., p. 333.

⁹ Ibid., p. 367.

en Colombia”¹⁰. Está compuesta por arcillolitas grises con areniscas y lechos de lignito en la parte inferior y superior, la Formación Carbonera se divide en 8 unidades operacionales las cuales van del C1 al C8, donde C1, C3, C5 y C7 son predominantemente arenosos; C2, C4, C6 y C8 son arcillosos y lutíticos. Su espesor máximo supera los 2.360 pies, descansa concordantemente sobre la Formación Mirador e infrayace concordantemente a la Formación León y su ambiente de depositación es continental fluvial.

- **Formación León.** Según De Porta¹¹ se le da una edad del Oligoceno superior – Mioceno inferior, está formada principalmente por limolitas de color gris a gris verdoso y pequeñas intercalaciones de limolitas carbonosas su espesor máximo supera los 2.500 pies, su ambiente de depositación es continental. Infrayace concordantemente a la Formación Guayabo y suprayace concordantemente a la Formación Carbonera.
- **Formación Guayabo.** Según De Porta¹² la edad de la Formación es del Mioceno se compone por intercalaciones de arcillolitas de color gris y areniscas de grano fino a muy gruesas, con un espesor de más de 13.000 pies, su ambiente de depositación es fluvial. Suprayace concordantemente a la Formación León e infrayace concordantemente a la formación necesidad.
- **Formación Necesidad.** Según De Porta¹³ su edad está dentro del Plioceno y Pleistoceno. Formada por areniscas de grano grueso y arcillolitas de color rojo y azulado con un espesor de aproximadamente de 13.000 pies su ambiente de depositación es fluvial, la Formación Necesidad suprayace concordantemente a la Formación Guayabo.

1.3.3 Geología estructural. La estructura del Campo Castilla corresponde a un anticlinal asimétrico, elongado y con orientación N60E, de aproximadamente 10.000 metros de largo y 4.000 metros de ancho. El Campo Castilla igualmente, contiene fallas normales e inversas, las fallas normales presentan interrupciones de 30 a 120 pies y las fallas inversas, interrupciones entre 30 y 50 pies. Como el contacto agua-petróleo no muestra cambios sugiere que las fallas no son de carácter sellante.

¹⁰ De Porta, Op., Cit., p. 112

¹¹ DE PORTA, Op., Cit., p. 324.

¹² Ibid., p. 259.

¹³ Ibid., p. 380.

1.3.4 Geología del petróleo. A continuación se describen los principales parámetros involucrados en el sistema petrolífero del Campo Castilla.

- **Roca Generadora.** La roca generadora principal de la cuenca de los llanos orientales y por tanto del Campo Castilla son las lititas marino continentales de la Formación Gachetá ubicadas debajo del flanco este de la Cordillera Oriental, la cual se describe como “Mezcla de lutitas marino continentales de la Formación Gachetá con kerógenos de tipo II y III, un carbón orgánico total (TOC) con rangos desde 1-3% y 150-300 pies de espesor efectivo son la fuente principal.”¹⁴
- **Roca Reservorio.** Las areniscas de las formaciones Mirador y Carbonera (C3, C5 y C7) son reservorios principales en la Cuenca de los llanos orientales y en consecuencia del Campo Castilla. El espesor de la formación mirador en el Campo Castilla es de aproximadamente 600 ft, su porosidad es de 27% y su permeabilidad es 1.180 md. La formación Carbonera, tiene un espesor aproximado de 1000 ft, una porosidad de 20% y una permeabilidad de 1.180 md. Las gravedades API varían de 12° a 42°.¹⁵ También en la secuencia de cretácico superior se encuentran algunos intervalos de areniscas que son buenos reservorios.
- **Roca sello.** A nivel de cuenca y a nivel de campo, la unidad C8 de la Formación Carbonera ha sido considerada como el sello, sin embargo debido a la extensión de la misma el mejor sello es la unidad C2. En la Formación Carbonera las unidades pares (C2, C4, C6, C8) son reconocidas como sellos locales así también como la Formación Gachetá y la Formación Guadalupe.¹⁶
- **Migración.** “Dos pulsos de migración en Campo se han documentado para Campo Castilla. El primero durante el Eoceno-Oligoceno superior. El segundo pulso de migración comenzó en el tiempo del mioceno y continua hasta el presente.”¹⁷
- **Trampa.** La trampa del Campo Castilla es de tipo estructural, debido a que Campo Castilla estructuralmente es un anticlinal asimétrico. Sin embargo, las

¹⁴ BARRERO, Darío. PARDO, Andrés. VARGAS, Carlos. MARTINEZ, Juan. ANH, Colombian Sedimentary Basins, Bogotá. 2007. p. 71.

¹⁵ Ibid., p. 71.

¹⁶ Ibid., p. 71.

¹⁷ Ibid., p. 71.

fallas normales e inversas juegan un papel importante como potenciales entrampamientos de hidrocarburos, ejemplo de esto es Campo Rubiales, el cual es una falla normal. ¹⁸

1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO

Durante 22 años la multinacional Chevron operó el Campo Castilla bajo el contrato de asociación Cubarral, durante el transcurso de este tiempo se extrajeron aproximadamente 59 millones de barriles del Campo. Posteriormente el 31 de julio del 2000 cuando el contrato de asociación finalizó, Ecopetrol tomó control del Campo Castilla el cual estaba aportando en promedio unos 19.000 BOPD¹⁹.

Para el año 2004 Ecopetrol perforó 12 nuevos pozos para el Campo Castilla la Nueva con una expectativa de producción de 82.000 BOPD²⁰. Desde que Ecopetrol asumió el control hasta el año 2010 Campo Castilla aumenta su producción en más de un 500% aproximadamente, alcanzando una producción record de 100.043 BOPD, consolidándolo como el Campo con mayor aporte a la producción de la petrolera colombiana.²¹

En el 2015 el Campo Castilla alcanza un nuevo record de producción, produciendo 125.699 BOPD, siendo el campo de mayor producción de Ecopetrol a nivel nacional, aportando el 21% de la producción directa de Ecopetrol y aproximadamente un 12% de la producción de todo el país.²² En febrero del 2016 Campo Castilla vuelve a alcanzar un nuevo record de producción, esta vez de 129.538 BOPD

A septiembre de 2016, Campo Castilla mantiene la producción alcanzada en febrero del mismo año, y desde el mes de junio comenzó a perforar nuevamente con 4 taladros, después de una caída del precio del petróleo que obligo a parar estos procesos.

¹⁸ Ibid., p. 71.

¹⁹ EL TIEMPO. Castilla y Chichimene pasarán a Ecopetrol. [Citado marzo 15,2016] Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1240507>

²⁰ EL TIEMPO. Ecopetrol perforará 12 pozos en el Campo de Castilla la Nueva, en el meta. [Citado marzo 15, 2016] Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1519991>

²¹ DINERO. Campo Castilla alcanzó producción récord de 100.403 barriles diarios. [Citado marzo 15, 2016] Disponible en: <http://www.dinero.com/negocios/articulo/campo-castilla-alcanzo-produccion-record-100043-barriles-diarios/97641>

²² ECOPEPETROL. Campo de producción Castilla alcanzó nuevo récord de producción. [Citado marzo 15, 2016] Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines%202015/Boletines%202015/campo-produccion-Castilla-alcanzo-nuevo-record-produccion>

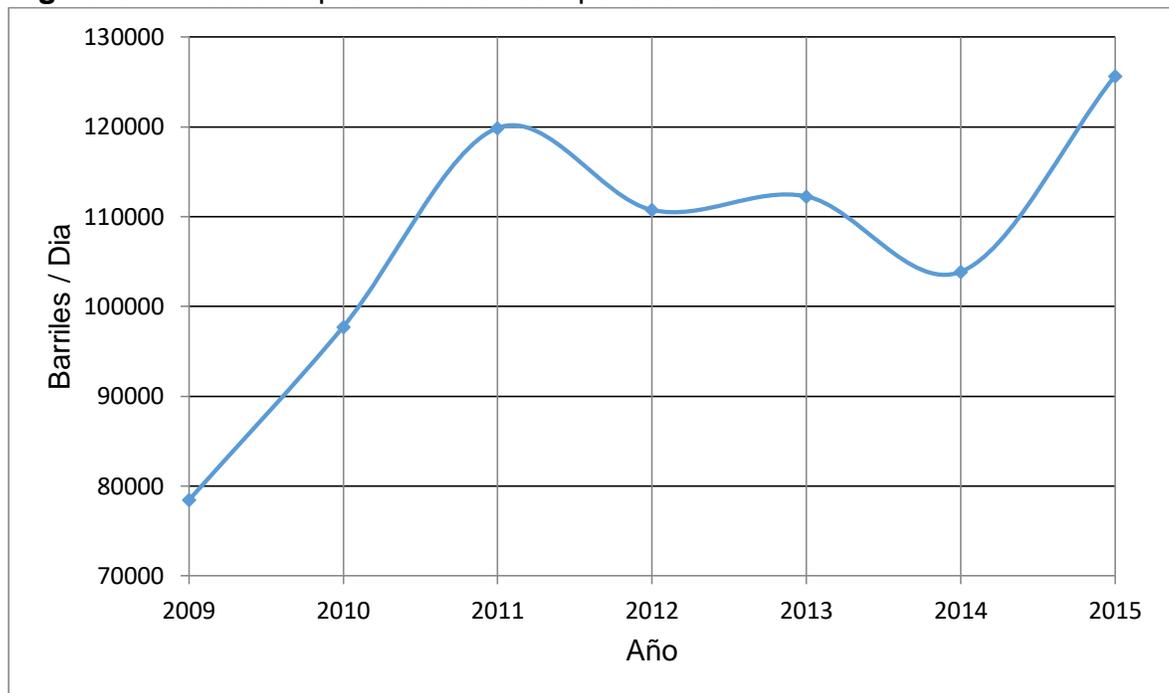
1.4.1 Método de producción. El Campo Castilla cuenta con un acuífero activo, pero el yacimiento no posee la suficiente energía para levantar los fluidos hasta superficie, por esta razón, todos los pozos del Campo Castilla producen por medio de levantamiento artificial, el 93% de los pozos de Castilla utilizan el Bombeo Electrosumergible y el resto usan un sistema de Bombeo Mecánico. Una ventaja del yacimiento es que posee una alta temperatura, la cual permite que los fluidos reduzcan su viscosidad y tengan una mejor movilidad.

1.4.2 Tiempo de producción. El Campo Castilla fue descubierto en el año 1969 y empezó su producción en el año 1976, hasta el momento el Campo Castilla ha continuado su producción por todos estos años, dando un tiempo de vida de producción de 40 años.

1.4.3 Número de pozos. El campo castilla actualmente cuenta con 182 pozos en Castila Note y 240 en el área restante, para un total de 422 pozos. De los cuales 407 son pozos productores, 11 son inyectoros y 4 son abandonados.

1.4.4 Grafica de producción. En la **Figura 3** se muestra la producción promedio del Campo Castilla por día desde el año 2009 hasta el año 2015, en el 2011 se alcanza el primer pico de producción con aproximadamente 120.000 BOPD. Posteriormente se ve un leve descenso en la producción hasta mediados de 2014, a principios de 2015 se alcanza la producción record de 125.699 BOPD.

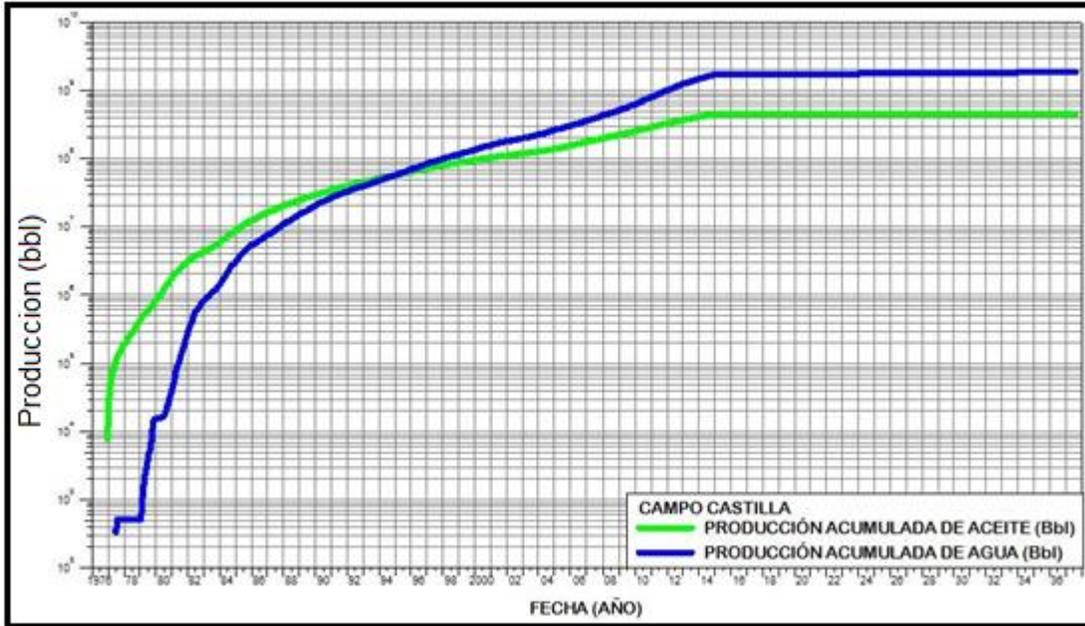
Figura 3. Producción promedio del Campo Castilla



Fuente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETROLEO, ACP. Informe estadístico petrolero (IEP). [Citada marzo 15, 2016] Disponible en: <https://www.acp.com.co/index.php/es/publicaciones-e-informes/informe-estadistico-petrolero-iep>; Modificada por los autores.

Para el 31 de Diciembre del año 2014 el campo tenía una producción acumulada de 447 MMBO. La grafica de producción acumulada se ilustra en la **Figura 4**.

Figura 4. Producción acumulada del Campo Castilla.



Fuente: Ecopetrol S.A, Bogotá D.C 2016

1.4.5 Características del yacimiento. En el Campo Castilla la Formación Une o Unidad K2 es la principal formación productora. En el **Cuadro 1** se muestran las propiedades petrofísicas del Campo Castilla en sus dos formaciones productoras.

Tabla 1. Propiedades petrofísicas del yacimiento.

Propiedad	Formación Une (K2)		Formación Gachetá (K1)	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango
Porosidad	19,50%	13,8% - 23,4%	18%	10,8% - 28%
Permeabilidad	1,384 md	465 md - 2,423 md	93 md	1 md - 1.667 md
Saturacion de agua irreducible (Swirr)	10%	Valor obtenido de pruebas de presion capilar	10%	Se asume la misma de K2, no hay nucleos
Saturacion de aceite reducible (Sor)	35%	Valor obtenido de pruebas de presion capilar	35%	Se asume la misma de K2, no hay nucleos
Tipo de crudo	Aceite negro		Aceite negro	
Gravedad API	20		13.7	

Fuente: Ecopetrol S.A, Bogotá D.C 2016

2. GENERALIDADES DE LA CEMENTACIÓN DE POZOS PETROLEROS

Dentro del capítulo de generalidades de la cementación, se definen cementación de pozos petroleros así como su importancia para la industria; se diferencian los tipos y prácticas de cementación, se establecen los diferentes aditivos utilizados en las lechadas de cemento y los equipos que son utilizados durante el proceso de cementación, tanto en superficie como en fondo.

2.1 DEFINICIÓN DE CEMENTACIÓN

Según Halliburton²³ después de realizarse el proceso de perforación de una sección, se baja una tubería de revestimiento (Casing), la cual tiene por objetivo proteger el pozo de residuos o de un colapso y proporciona una superficie de trabajo más cómoda para la perforación de las otras secciones. Cuando se baja esta tubería, que es de menor diámetro que el de la broca, queda un espacio entre la formación y la tubería denominado espacio anular el cual se completa de cemento mediante el proceso de cementación de pozos petroleros tal como se muestra en la **Figura 5**.

La cementación según la empresa Superior Energy Services²⁴, la empresa Schlumberger²⁵ y La sociedad de ingenieros de petróleos (SPE)²⁶, es el proceso que comprende el diseño de las lechadas, los ensayos o pruebas en el laboratorio de los diseños de lechada, la mezcla en campo, el bombeo de la lechada de cemento y la evaluación de la cementación. La lechada de cementación consiste en la mezcla de cemento seco y aditivos con agua, la cual se coloca en el espacio anular entre la formación y el casing.

Para que una cementación se considere exitosa, debe cumplir con objetivos como el aislamiento total de zonas (adherencia hidráulica), soportar las cargas axiales (Adherencia al esfuerzo axial), proteger el revestimiento, aislamiento de zonas superficiales evitando la contaminación por fluidos no deseados y evitar problemas de pérdida de circulación.

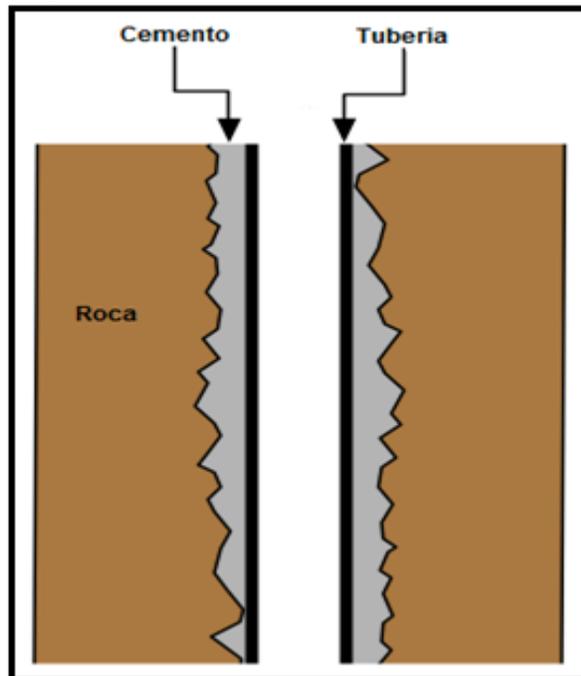
²³ HALLIBURTON ENERGY INSTITUTE. Libro De Trabajo Del Estudiante Cementación I. Sección 01. Estados Unidos de America: 2001. p. 6

²⁴ SUPERIOR ENERGY SERVICES. Curso Básico/ Intermedio De Cementación Para Ingenieros. 2015. p. 9

²⁵ SCHLUMBERGER. Revisión De Cementación. 2004. p. 6

²⁶ SMITH.K Dwight. Cementing. Society of petroleum engineers, 1987. p. 40

Figura 5. Cemento en el espacio anular.



Fuente: LEANCREW, Foamed cement and the BP oil spill. [Citado mayo 20, 2016]. Disponible en: <http://leancrew.com/all-this/2010/10/foamed-cement-and-the-bp-oil-spill>. Modificada por los autores.

2.2 TIPOS Y PRACTICAS DE CEMENTACIÓN PETROLERA

La cementación de pozos petroleros se clasifica de acuerdo con el objetivo que se pretenda alcanzar, de esta manera se tiene:

2.2.1 Cementación primaria. Se realiza cuando se bombea cemento al espacio anular de cualquiera de los diferentes revestimientos del pozo (como el conductor, el superficial, el intermedio o el de producción) y la formación. Para que se realice una buena cementación primaria es necesario una buena limpieza del lodo con los lavadores que se bombean con un régimen turbulento y remoción con los espaciadores, que se bombean con un régimen laminar.

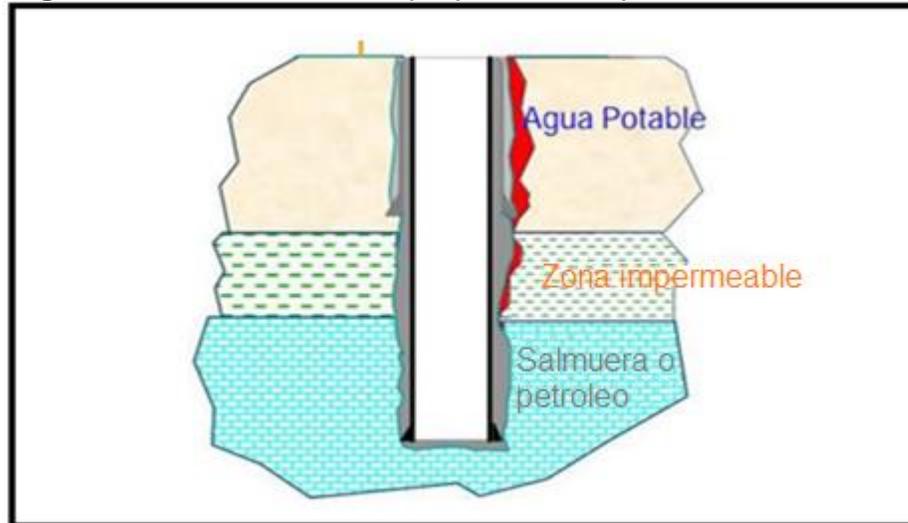
Dentro de los objetivos de la cementación primaria se destacan:^{27,28}

²⁷ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 13-14

²⁸ SCHLUMBERGER. Jet- 14 Manual De Cementación. 2007. p. 7

- a) AISLAMIENTO DE ZONAS: El aislamiento de zonas consiste en sellar unas zonas con respecto a otras, evitando de esta manera alguna migración de fluido (gas o líquido) de zonas de alta presión a zonas de bajas presiones por el anular.

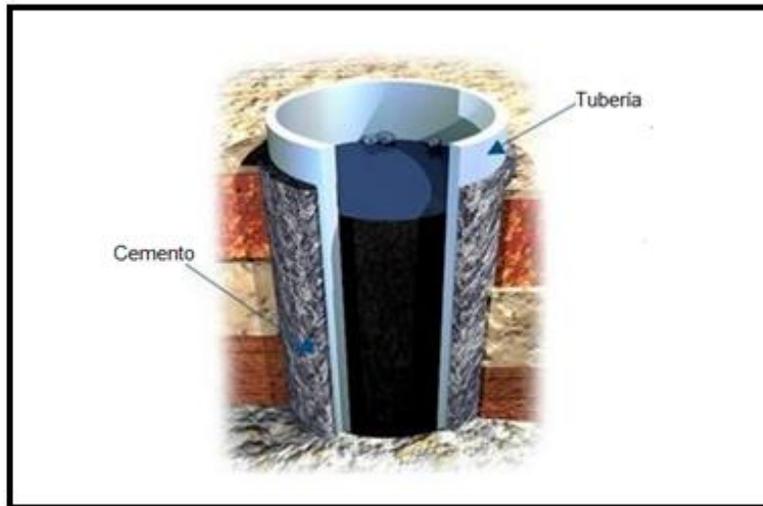
Figura 6. Aislamiento zonal proporcionado por la cementación.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015. Pág. 12.

- b) SOPORTE AL REVESTIMIENTO: Ejerce un soporte axial al revestimiento, asegurando de esta manera que este se mantenga en el pozo de una manera adecuada (minimizando la probabilidad de un colapso del pozo).
- c) PROTECCION AL REVESTIMIENTO: Proporciona protección a las tuberías de formaciones con arcillas hidratables y fluidos corrosivos que son los que contienen H_2S y CO_2 .

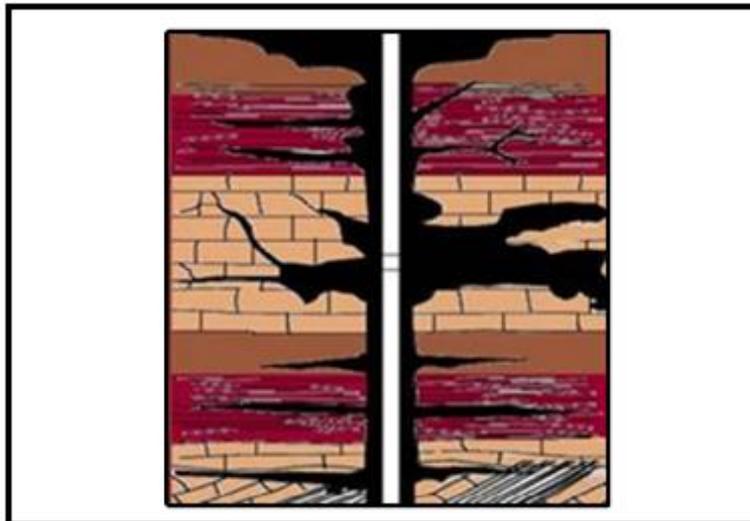
Figura 7. Soporte y protección al revestimiento.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación.
Superior Energy Services. 2015. Pág. 12.

- d) **SOPORTE AL POZO:** Es el soporte que el cemento proporciona al revestimiento en formaciones no consolidadas.

Figura 8. Soporte al pozo en formaciones no consolidadas.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación.
Superior Energy Services. 2015. Pág. 13.

e) **PROTEGER EL CASING:** Durante los trabajos de cañoneo en el completamiento del pozo el cemento ejerce una protección al casing.

Dentro de los pasos que se deben seguir para una cementación primaria exitosa se destacan:

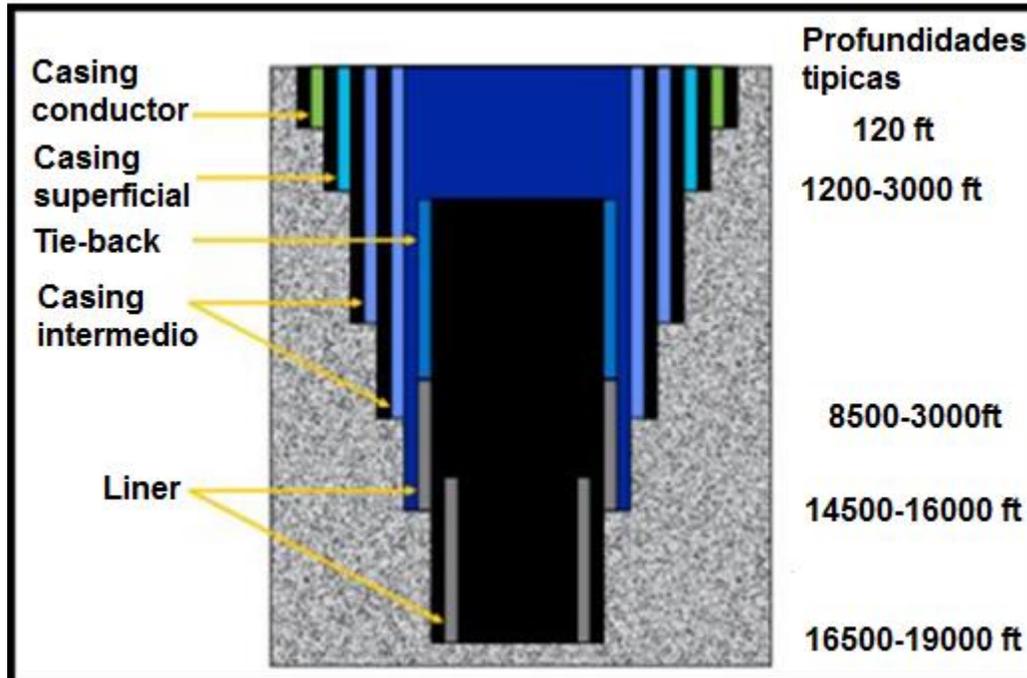
- a) Simulación de la operación de cementación para determinar velocidades máximas y mínimas de fluido y ECD`s.
- b) Calcular volúmenes de fluidos.
- c) Asegurar una buena limpieza del lodo para la buena adhesión del cemento tanto a la formación como al revestimiento.
- d) Confirmar que los tapones (de fondo y de tope) estén en la cabeza de cementación.
- e) Circular hasta obtener las condiciones de lodo requeridas en la tubería, para garantizar que no se presenten obstrucciones.
- f) Se bombean espaciadores, se suelta el tapón de fondo, se bombea lechada, se suelta el tapón de tope y se realiza el desplazamiento.
- g) Monitorear los retornos para descartar alguna fractura y monitorear el proceso de cementación.

La cementación primaria se puede dividir en dos grandes sub grupos²⁹ los cuales son la cementación primaria con procedimientos en una sola etapa y la cementación primaria con procedimientos de múltiples etapas.

Dentro de la cementación primaria con procedimientos en una sola etapa se destacan las cementaciones de: tubo conductor, tubería de revestimiento de superficie, tubería de revestimiento intermedia, tubería de producción, liner y conexiones de liners a superficie.

²⁹ Ibíd., Pág. 17-20

Figura 9. Tipos de revestimientos



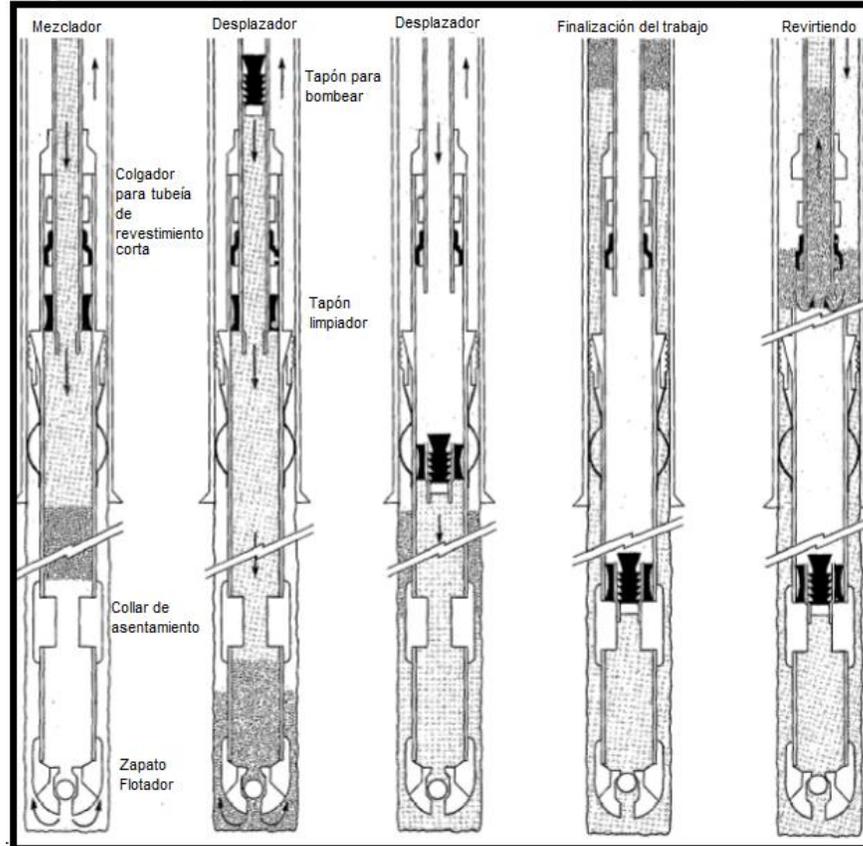
Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015. Pág. 17.

La cementación primaria con procedimientos de múltiples etapas, es una práctica de cementación en que se utiliza la herramienta “cople de cementación múltiple” (CCM)³⁰, la cual es una herramienta con camisas deslizables que ayuda a disminuir la presión hidrostática ejercida por la columna del cemento. En la actualidad no se utiliza mucho este sistema debido a las nuevas tecnologías de cements muy livianos como la de schlumberger (LiteCRETE). La cementación en múltiples etapas se puede realizar por motivos como: que la presión hidrostática ejercida por el volumen total de la lechada supere la presión de fractura de la formación, necesidad de aislar dos zonas con presiones muy diferentes dentro de la misma sección del pozo o ahorrar cantidad de cemento en pozos que no se requiera cementar el total de la longitud del casing.

Para realizar la cementación de múltiples etapas hay 3 técnicas que son las más utilizadas: La cementación regular en dos etapas, la cementación continua en dos etapas y la cementación en 3 etapas.

³⁰ PEMEX. Guía Práctica Para Diseñar Y Efectuar Cementaciones Primarias. En: Perforación Y Mantenimiento De Pozos. 2008. p. 7.

Figura 10. Equipo de cementación de múltiples etapas.



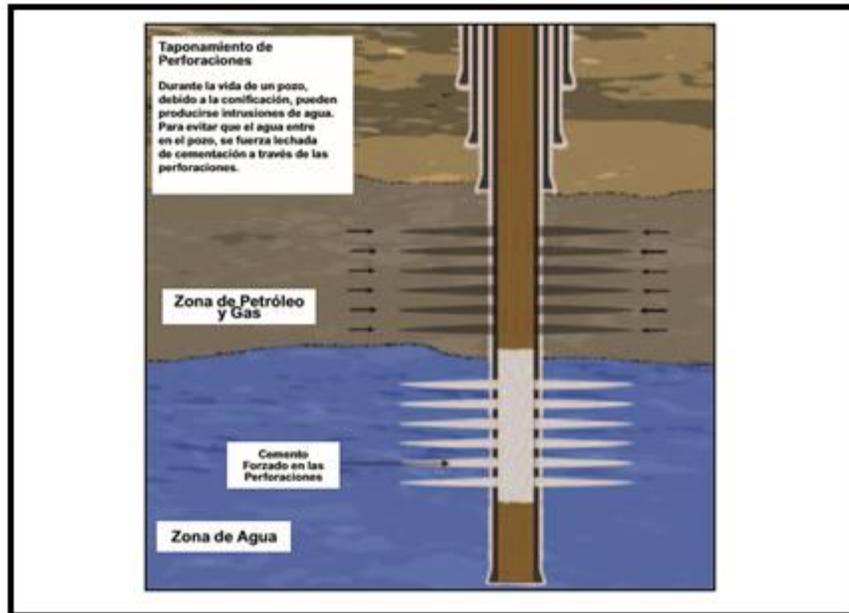
Fuente: Generalidades de la cementación primaria, schlumberger 2007; pág. 30. Modificada por los autores.

2.2.2 Cementación secundaria o remedial. La cementación secundaria; que también recibe el nombre de Squeeze; consiste en el proceso durante el cual con presión hidráulica, se obliga a la lechada de cemento a que fluya a través de agujeros con el fin de reparar un trabajo de cementación primaria deficiente o con el fin de corregir condiciones que sean potencialmente riesgosas para las operaciones de perforación o producción. Los trabajos de cementación primaria deficientes pueden ser causados por varios motivos entre los que se encuentra la mala remoción del lodo de perforación antes de la cementación primaria, la mala práctica del proceso de cementación o el fallo de los equipos de cementación al momento de realizar el trabajo.

Dentro de los objetivos de la cementación secundaria se tienen: ^{31,32,33}

- a) Corregir una cementación primaria la cual presenta canalización o llenados insuficientes.
- b) Sellar o reducir el tamaño de las zonas de producción de gas o de agua para reducir relaciones gas/petróleo y agua/petróleo.
- c) Sellar zonas de pérdidas de circulación del fluido.
- d) Reparar filtraciones a través del revestimiento, causadas por la corrosión, la perforación u otros procesos.
- e) Prevenir la migración vertical del fluido de reservorio hacia zonas productoras.
- f) Prevenir el escape de fluidos de las zonas no productoras o agotadas.

Figura 11. Cementación utilizada para sellar zona de producción de agua.



Fuente: Jet- 14 manual de cementación.Schlumberger.2007.
Pág 34

a) TIPOS DE CEMENTACIÓN SECUNDARIA:

La cementación secundaria tiene dos divisiones que son la cementación forzada y los taponos de cemento.

³¹ SCHLUMBERGER. Sección 8: Cementación. Drilling School. 2011. p. 24.

³² SCHLUMBERGER, Op., pág. 17-20

³³ HALLIBURTON ENERGY INSTITUTE, Op., Cit., Pág. 4

1. CEMENTACIÓN FORZADA³⁴

Dentro de la cementación forzada; esta se puede clasificar en 3 grandes grupos en los que se encuentran: la técnica de colocación, el método de bombeo y el método de aplicación.

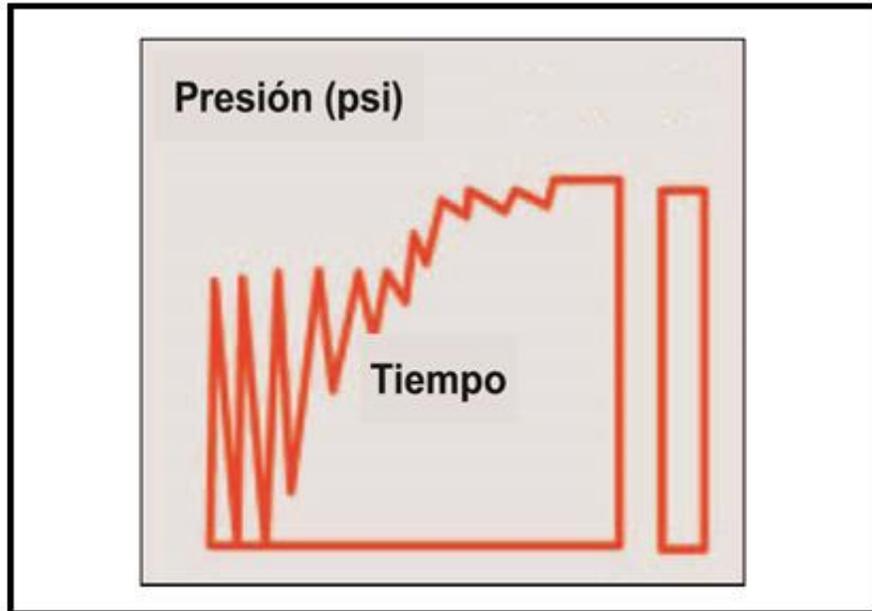
- Técnica de colocación: Esta técnica indica si el cemento se distribuye con una presión de inyección alta o baja. Cuando se realiza una colocación con baja presión se quiere decir que la inyección de la lechada de cemento se realiza con una presión menor a la presión de fractura, es la técnica más utilizada debido a que con ésta se rellenan cavidades de la perforación o canales interconectados. Durante este trabajo es de suma importancia que la lechada de cemento tenga una buena cantidad de aditivo de pérdida de fluido, debido a que como consecuencia de la pérdida de fluido se podría dar la deshidratación del cemento.

Cuando se realiza una cementación forzada con la técnica de colocación con alta presión se indica que el bombeo de la lechada de cemento se realiza con una presión mayor a la presión de fractura de la formación, generando así una serie de fracturas que posteriormente serán completadas con cemento, a medida que el cemento va complementando la fractura se tiene que ir incrementando la presión de inyección. Este tipo de cementación forzada se da usualmente cuando hay micro anillos o perforaciones obstruidas.

- El método de bombeo: Dentro de la cementación forzada de acuerdo al método de bombeo (Para forzar la lechada) también se encuentran 2 subdivisiones las cuales son: bombeo continuo y el bombeo intermitente. El bombeo continuo, usualmente utilizado en la reparación de los daños de tubería de revestimiento, se realiza cuando el bombeo de la lechada de cementación se da de manera lenta y continua hasta que se obtiene la presión de inyección final, la cual debe ser la deseada y tiene que mantenerse estable. Por otro lado la inyección con el método de bombeo intermitente (también conocida como inyección forzada con estáticos) consiste en inyectar la lechada de manera periódica con caudales entre los 0,25 bbl/min y 0,5 bbl/min durante intervalos de 10- 15 minutos (dependiendo de las características de la formación) hasta alcanzar la presión final deseada (esto con el objetivo de permitirle a la lechada una buena hidratación y permitir que se cree un enjarre).

³⁴ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 28-31

Figura 12. Variación de la presión con respecto al tiempo en una cementación forzada utilizando el método de bombeo intermitente.



Fuente: Jet- 14 manual de cementación.Schlumberger.2007.
Pág 34. Modificada por los autores

- Método de aplicación: el objetivo es ubicar la lechada en la zona que se desee hacer la cementación remedial y aplicarle la presión necesaria para que esto suceda. Las técnicas que se utilizan en la aplicación difieren entre sí porque una requiere de herramientas de aislamiento (empacadores de cementación forzada) y la otra no. Dentro de los dos tipos de técnicas existen subdivisiones; las más utilizadas son³⁵ :
 - a) Cementación forzada con empacador con tubo de fondo: Esta técnica es utilizada usualmente cuando existe incertidumbre sobre la integridad de la tubería, cuando la lechada se va a ubicar en un intervalo largo o en un liner ranurado. Esta técnica demanda el uso de un empacador recuperable. El tubo de fondo es utilizado para garantizar una buena ubicación final de la lechada.
 - b) Cementación forzada a través de la cabeza del revestimiento (“Bradenhead Squeeze”) o cementación forzada pobre: En esta técnica no se utiliza ninguna herramienta de aislamiento, por lo cual no es recomendable su aplicación en tuberías viejas.

³⁵ SCHLUMBERGER, Op., Cit., Pág. 18-22

- c) Cementación forzada con empacador sin tubo de fondo: También recibe el nombre de cementación forzada suicida y consiste en bombear lechada de manera continua. Se utiliza un empacador recuperable, se utiliza esta técnica cuando se requiere una cementación forzada para tramos relativamente cortos y no es recomendable utilizar esta técnica en canales detrás del revestimiento.
- d) Herramientas de cementación forzada: Es la técnica que mediante el uso de herramientas recuperables (como el empacador DLT, el empacador hurricane o la herramienta de cementación forzada corta) o perforables evita que la presión que con la que se está trabajando afecte al cabezal de pozo o a la tubería.

2. TAPONES DE CEMENTO

Los tapones de cemento es un procedimiento que consiste en ubicar una columna de cemento ya sea en hueco abierto o hueco revestido para de esta manera prevenir el movimiento de los fluidos. Estas operaciones se utilizan para:

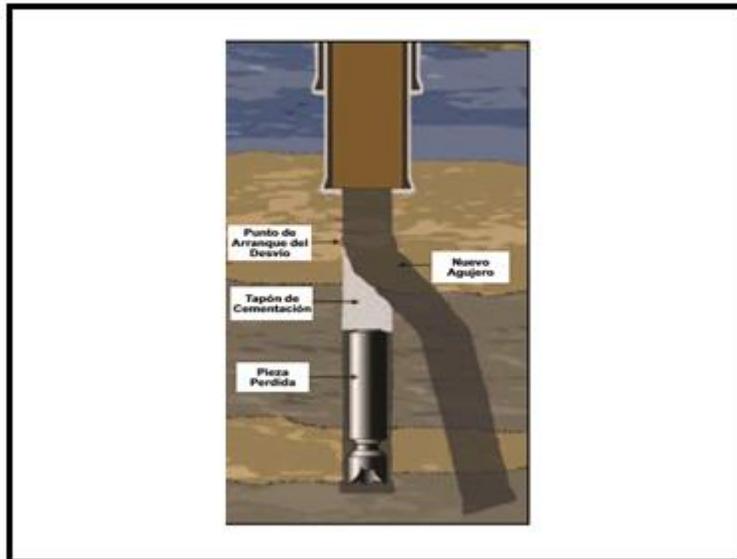
- Generar un sello hidráulico para evitar que se dé un flujo vertical.
- Abandonar zonas depletadas o productoras agotadas.
- Para la perforación direccional en un sidetrack.
- Abandono de un pozo seco.

Dentro de los tipos de tapones de cemento se tienen³⁶

³⁶ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 28-31

- a) Tapones de desvío: Estos tipos de tapones son ubicados en casos en los cuales se necesita hacer un sidetrack. Para que cumpla con el objetivo de darle soporte a la herramienta direccional, este cemento tiene que desarrollar una buena resistencia a la compresión.

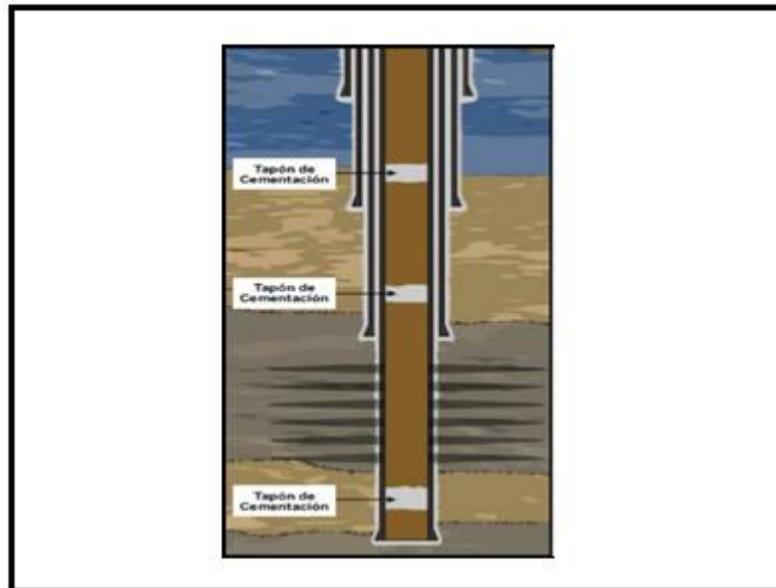
Figura 13. Tapón de desvío



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015. Pág. 17.

- b) Tapones de abandono: Existe 3 casos en los que se utilizan los tapones de abandono; el primero es cuando se perfora un pozo y esté surge seco o no es comercialmente rentable y se tapa con un tapón de cemento. El segundo caso es cuando un pozo depletado se cierra completamente; en este caso se utilizan hasta 3 tapones de cemento. También se utilizan este tipo de tapones cuando es necesario aislar zonas productoras de agua. Lo anterior es para Colombia y puede ser evidenciado en la resolución número 18 1495 del 2 de septiembre del 2009 expedida por el ministerio de minas y energía.

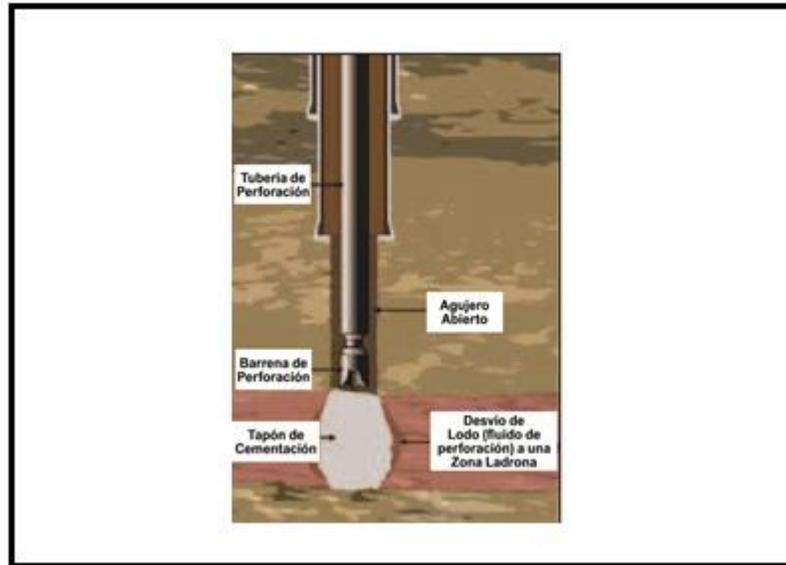
Figura 14. Tapón de abandono.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015. Pág. 17.

- c) Tapones para control de pérdida de circulación: Este tipo de tapones se ubican cuando en la perforación se está experimentando una pérdida del fluido de perforación; por esta razón se bombea una lechada a la zona ladrona y se espera que la colocación del cemento controle la perdida de fluido o que endurezca esta zona y no se produzca más perdidas.

Figura 15. Tapón para control de pérdida de circulación.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015. Pág. 1

2.3 ADITIVOS UTILIZADOS EN LA CEMENTACIÓN DE POZOS

Según la empresa Superior Energy de Colombia³⁷ y la empresa Halliburton³⁸ la cementación de cada pozo petrolero es diferente y por ende para cada lechada de cementación tiene que existir un diseño, el cual se adapte a las condiciones de trabajo. Cada una de las características que son necesarias que la lechada de cemento desarrolle, se asocia con un determinado aditivo, de tal manera que el objetivo de los aditivos se reduce a adaptar los diferentes cementos a unas condiciones de trabajo específicas. Los aditivos están presentes en estado sólido/polvo (Secos- granulares) en cuyo caso las cantidades son expresadas en porcentaje por peso del cemento (% BWOC) o líquidos que las cantidades se expresan en volumen por peso de cemento (gal/sk).

Dentro de los aditivos que se utilizan en el diseño de una lechada de cemento se encuentran:

2.3.1 Acelerantes.³⁹ Los acelerantes del cemento son utilizados para hidratar el cemento, estas partículas rompen la sustancia que se forma alrededor del grano de cemento para que el agua penetre el cemento de manera rápida y eficiente, esto permite acortar el tiempo de fragüe del cemento y como consecuencia reducir el WOC (espera en el cemento). También ayudan a que se desarrolle una buena resistencia a la compresión temprana y son utilizados generalmente en la cementación de pozos poco profundos. Los acelerantes suelen ser compatibles con cualquier tipo de cemento y aditivos y es económico en comparación con otros aditivos.

Los acelerantes más comunes son:

- Cloruro de calcio (CaCl_2)
- Silicato de sodio (Na_2SiO_3)
- Cloruro de sodio (NaCl)
- Agua de mar

2.3.2 Retardadores.⁴⁰ Los retardadores del cemento son aditivos utilizados para desacelerar la hidratación del cemento; alargando de esta manera 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 2 tipos de retardadores

³⁷ *Ibíd.*, Pág. 90

³⁸ HALLIBURTON ENERGY INSTITUTE, Op., Cit., Pág. 12

³⁹ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 90

⁴⁰ *Ibíd.*, Pág. 90

los cuales son: de alta temperatura y de baja temperatura; dependiendo de los rangos de temperatura a los que funcionen.

Los retardadores más comunes son:

- Lignosulfonato de calcio
- Ácidos hidroxicarboxílicos
- Polímeros sintéticos
- Compuestos de celulosa

2.3.3 Extendedores.⁴¹ Los extendedores son utilizados para reducir la densidad de la lechada o para reducir la cantidad de cemento por unidad de volumen fraguado. Con el uso de los extendedores se reduce la presión hidrostática en columnas de gran longitud de cemento para evitar fracturas y de igual manera se aumenta el rendimiento de la lechada.

Los extendedores más comunes son:

- Bentonita
- Silicato de sodio (Na_2SiO_3)
- Diatomeas
- Gilsonita

2.3.4 Dispersantes.⁴² Los dispersantes son aditivos que reducen la viscosidad operante 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).

Los dispersantes más comunes son:

- Polímeros
- Polimelamina sulfonado.
- Reductores de fricción
- Ácidos inorgánicos

⁴¹ SCHLUMBERGER, Op., Cit., Pág. 10.

⁴² HALLIBURTON ENERGY INSTITUTE, Op., Cit., Pág. 15

2.3.5 Controladores de filtrado.⁴³ El controlador de filtrado dentro de una lechada de cemento es el aditivo que ayuda a que no exista una pérdida del agua debido al contacto con una formación permeable, previniendo así una deshidratación prematura del cemento. 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.

Los controladores de filtrado más comunes son:

- Polímeros orgánicos
- Celulosa
- Látex

2.3.6 Controladores de pérdidas de circulación.⁴⁴ Los aditivos que funcionan como controladores de pérdidas de circulación son los encargados de controlar o prevenir pérdidas de circulación en los trabajos de cementación. Las pérdidas de circulación difieren de las de filtrado porque en este caso se hace referencia a la pérdida total de la lechada de cemento. Esto se puede deber a factores como: bajo gradiente de fractura, formaciones naturalmente calculadas, formaciones no consolidadas y formaciones cavernosas.

Los controladores de pérdidas de circulación más comunes son:

- Materiales granulados
- Mica
- Lechadas tixotrópicas
- Materiales fibrosos

2.3.7 Controladores de agua libre.⁴⁵ Cuando existe agua libre en la lechada es un indicio de la no estabilidad de la misma. Para prevenir esto se utilizan los controladores de agua libre los cuales además de proporcionarle una estabilidad a la lechada, le mantiene la homogeneidad evitando la decantación de los componentes pesados.

Estos aditivos usualmente son mezclas de polímeros sintéticos.

⁴³ SCHLUMBERGER, Op., Cit., Pág. 7

⁴⁴ HALLIBURTON. Materiales Básicos De Cementación. 2004. p. 15

⁴⁵ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 92

2.3.8 Controladores de migración de gas.⁴⁶ Los controladores de migración de gas son los aditivos encargados de impermeabilizar el cemento para evitar el flujo de gas en el momento en que la lechada está pasando de estado líquido a estado sólido (periodo de gelación). Cuando los controladores de migración de gas no son lo suficientemente eficientes como para evitar el flujo de gas es cuando se crean micro anillos o canalización del cemento y es necesaria una operación de cementación secundaria.

Los controladores de migración de gas más comunes son:

- Dispersión de micro sílice.
- Polivinil alcohol
- Látex

2.3.9 Densificantes.⁴⁷ Los densificantes son materiales inertes, de alto peso específico que en la lechada de cemento permiten aumentar la densidad del cemento para de esta manera incrementar la presión hidrostática ejercida por la lechada, es de gran utilidad en zonas sobre- presurizadas.

Los densificantes más comunes son:

- Barita
- Hematita
- Limenita
- Arena clasificada

2.3.10 Antiespumantes.⁴⁸ Los antiespumantes son los aditivos que le proporcionan a la lechada una reducción del aire atrapado que está presente debido a las grandes velocidades que se presentan cuando se mezcla la lechada. Este aire atrapado al momento del bombeo puede causar cavitación de la bomba y causar de esta manera problemas en los trabajos de cementación. Los antiespumantes más comunes son:

- Éteres de poliglicoles
- Siliconas y diésel

⁴⁶ HALLIBURTON, Op., Cit., Pág. 15

⁴⁷ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 92

⁴⁸ Ibíd., Pág. 92

2.4 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CEMENTACIÓN

Los equipos utilizados en los trabajos de cementación se pueden dividir en dos grandes grupos dependiendo de en donde sean utilizados; ya sea en superficie o en fondo. No es necesaria la utilización de todos, dependiendo de las condiciones del pozo y de las características del trabajo se pueden utilizar los que sean necesarios.

2.4.1 Equipos de cementación de superficie. Los equipos de cementación utilizados en superficie, son todos aquellos que están presentes en el trabajo de cementación pero que en ningún momento van a estar en subsuelo; se tienen los equipos de material a granel, la unidad de bombeo, los equipos de mezclas, las cabezas de cementación, los tanques de fluidos y los taponés.

a) equipos de material a granel⁴⁹

Los equipos de material a granel son los equipos que previos a un trabajo de cementación se encargan de almacenar el cemento a granel, mantenerlo seco y llevarlo a los lugares que sean necesarios hasta llegar a donde se va a mezclar; dentro de los equipos de material a granel se tienen: El silo, transportadores de cemento, compresores de aire, mangueras de caucho y el tanque de descarga. El silo es el equipo en el cual se puede almacenar tanto cemento como otros aditivos a granel secos, dentro de él también se pueden realizar mezclas o blend pero solo de material seco; existen silos de cemento presurizados y también los hay de gravedad.

⁴⁹ SCHLUMBERGER JET- 14, Op., Cit., Pág. 15

Figura 16. Silo almacenador de cemento.



Fuente: Superior Energy Services Colombia. Fotografiada por el autor.

Los transportadores de cemento son los equipos que permiten el transporte de cemento seco de una locación a otra, también son utilizados para transferir el cemento al sistema de mezclado; están los camiones trasportadores de cemento neto (para cementos sin mezcla) y los bulk trucks (para cementos con mezcla). Las mangueras de caucho son las que se encargan de permitir el paso de material de un lugar a otro, estas suelen ser de 4 pulgadas y soportan presiones altas. Los compresores de aire son los encargados de suministrar el aire para realizar los procesos de trasiego (transferencia del cemento de un lugar a otro); estos usualmente trabajan con presiones de 30 – 40 psi y capacidades de 300- 400 ft³. Por ultimo están los tanques de descarga, los cuales controlan los flujos de cemento del lugar de almacenaje al sistema de mezcla.

Figura 17. Bulk Truck, transportador de cemento.



Fuente: Superior Energy Services Colombia. Fotografiada por el autor.

b) unidad de bombeo de cemento⁵⁰

La unidad de bombeo de cemento también llamada unidad de cementación es el equipo que se encarga de suministrar potencia y presión a los fluidos por medio de la bomba triplex con la que cuenta, también puede servir como sistema de mezclado en lechadas al vuelo (sin necesidad de una unidad de mezclado). Las unidades de bombeo cuentan con un sistema el cual establece en tiempo real parámetros operativos tales como: volumen de agua de mezcla, densidad y volumen de lechada y presión de bombeo. Esta última usualmente es medida con un medidor de tipo bourdon.

⁵⁰ Ibíd., Pág. 15

Figura 18. Unidad de cementación.



Fuente: JEREH, Equipo de cementación de un motor y una bomba. [Citado septiembre 15, 2016]. Disponible en: <http://es.jereh-pe.com/products/equipodecementaciondesolomotorysolabomba.htm>

c) equipos de mezcla⁵¹

Los equipos de mezcla son los encargados de mezclar el agua, el cemento y los aditivos de tal manera que la lechada quede con unas características establecidas previamente (densidad, rendimiento, requerimiento de agua, etc.) para asegurar de esta manera que se bombee al pozo con los parámetros deseados. La mezcla se realiza normalmente por dos métodos, la mezcla al vuelo y el mezclado por baches. La mezcla al vuelo se da en la unidad de cementación y se realiza cuando se necesita una baja energía de mezcla, este tipo de mezclado cuenta con equipos que dosifican de muy buena manera los componentes y las características finales de la lechada serán las que se habían previsto. El mezclado por baches se realiza en equipos llamados Batch Mixers los cuales cuentan con bombas, líneas y paletas y su almacenaje tienen una capacidad entre 15 y 150 bbls. Hay dos formas de realizar la mezcla por baches; la primera es llenar los tanques con una lechada mezclada al vuelo previamente y agregar cemento hasta obtener la densidad deseada y la segunda y más utilizada en campo es llenar el Batch Mixer con fluido de mezcla (agua) y agregar cemento hasta alcanzar la densidad deseada; el suministro de cemento se hace a una tasa controlada y la densidad se mide periódicamente.

⁵¹ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 66

Figura 19. Batch mixer de 50 bbls.



Fuente: Superior Energy Services Colombia. Fotografiada por el autor.

d) cabezas de cementación⁵²

Las cabezas de cementación son las herramientas utilizadas para direccionar la lechada al momento del bombeo. La utilización de esta herramienta facilita la expulsión de los tapones al momento de ser requerido. Hay varios tipos de cabezas de cementación como el tipo “Swage” que tiene que ser removida cuando se requiera enviar el tapón, el tipo “Single- plug container” que tiene solo un tapón en espera, el “Double- plug container” que tiene dos tapones en espera y la cabeza rotaria de cementación que tiene dos tapones en espera y además permite la rotación del casing al momento del bombeo, permitiendo de esta manera realizar una cementación más uniforme en el anular.

⁵² *Ibíd.*, Pág. 68

Figura 20. Cabeza cementación de cinco pulgadas.



Fuente: Superior Energy Services Colombia. Fotografiada por el autor.

e) tanques de fluidos⁵³

Son los equipos en los cuales se almacenan y se preparan los fluidos como los fluidos de mezcla para la lechada, la lechada de cola, la lechada inicial, lavadores y espaciadores. En general todos los fluidos que son utilizados en las operaciones de cementación.

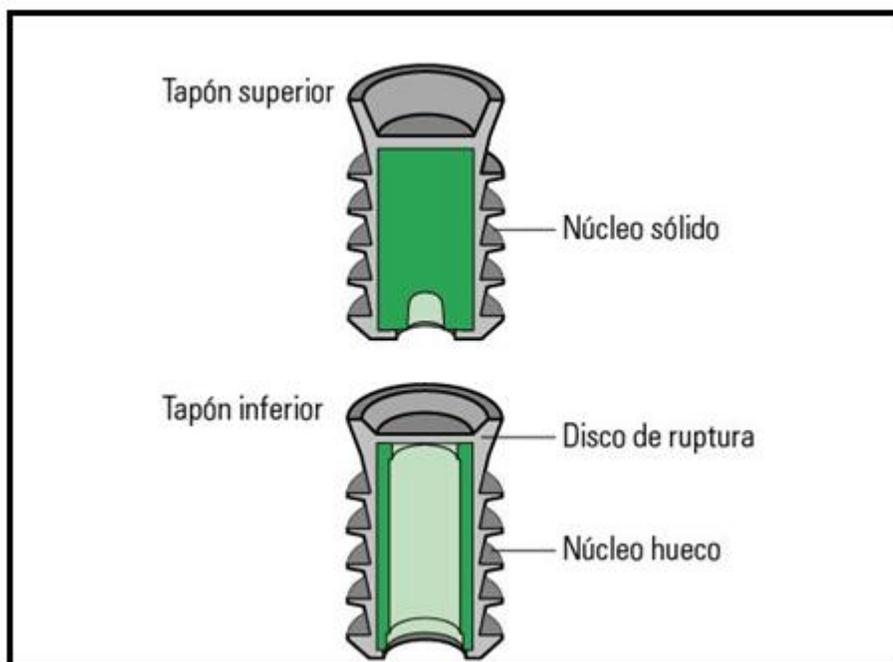
En las operaciones costa afuera estos equipos son los mismos que los tanques de perforación y las unidades se proveen del agua del mar para realizar las lechadas, se debe tener en cuenta que las características de la lechada cambian dependiendo de las características del agua de mezcla.

⁵³ SCHLUMBERGER JET- 14, Op., Cit., Pág. 17

f) tapones⁵⁴

Es un tapón de caucho utilizado para separar la lechada de otros fluidos. En las operaciones de cementación se utilizan usualmente dos tipos de tapones como son el inferior y el superior. El inferior se lanza delante de la lechada de cemento y evita que la lechada se contamine por el lodo o por fluidos como los lavadores o los espaciadores; este tapón cuenta con un diafragma que se rompe con la presión hidrostática de la columna a unos 300 o 400 psi, cuando el tapón alcanza el collar de asentamiento. El tapón superior a diferencia del inferior es sólido y se encarga de empujar la lechada para permitir una cementación uniforme, igualmente para evitar que la lechada se contamine con fluidos de desplazamiento.

Figura 21. Tapones de cementación.



Fuente: Oil field glossary. Schlumberger. [Citado Mayo 20, 2016]. Disponible en digital en: http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/cementing_plug.aspx. Modificada por los autores.

⁵⁴ SCHLUMBERGER. Oilfield Glossary, Definición de tapón de cementación. [Electronic(1)]. [Consultado el 04/20/2016]. Disponible en: 'http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/cementing_plug.aspx'

2.4.2 Equipos de cementación en fondo.⁵⁵ Estos equipos también son llamados equipos auxiliares para cementación; y son equipos como la zapata guía, los collares de flotación, entre otros.

a) zapata de revestimiento⁵⁶

La zapata de revestimiento o zapata guía es el equipo que tiene como función hacer correr el fondo del revestimiento, gracias a su punta redonda; estos equipos suelen tener una válvula de bola que se denomina zapata flotadora.

b) cuello flotador⁵⁷

El cuello flotador se coloca usualmente dos o tres juntas arriba de la zapata y cumple con dos funciones principales las cuales son:

1. Previene contraflujos del cemento: el cuello flotador tiene una válvula de bola la cual hace que el cemento que ya está ubicado en el anular no se devuelva al interior de la tubería de revestimiento.
2. Soporte para los tapones de cementación: sirve como soporte de los tapones de cementación; asegurando de esta manera que el cemento selle las últimas juntas de las tuberías.

c) centralizadores⁵⁸

Los centralizadores tienen como función principal mantener la tubería de revestimiento lo más centrada posible en el hueco; para asegurar que el espesor del cemento sea uniforme en toda la longitud a cementar, y en consecuencia mejorar la eficiencia de desplazamiento, reducir riesgo de diferencial de atrapamiento y reducir el arrastre en pozos direccionales.

Según las normas API los centralizadores se tienen que utilizar en secciones críticas; así el primer centralizador se coloca entre la zapata y el cuello flotador, el segundo en la unión de segundo y tercer tubo, a partir de este punto se coloca un centralizador cada dos tubos hasta 40 ft por debajo del tope del cemento.

⁵⁵ HALLIBURTON10, Op., Cit., Pág. 1

⁵⁶ SCHLUMBERGER, Op., Cit., Pág. 7

⁵⁷ *Ibíd.*, Pág. 9

⁵⁸ *Ibíd.*, Pág. 10

Figura 22. Centralizadores utilizados en los procesos de cementación.



Fuente: TECHNODRILL, Centralizadores flexibles “centraflex”. [Citado septiembre 15, 2016]. Disponible en: <http://www.technodrill.com.co/productos/centralizadores2.php>. Modificada por los autores.

d) raspadores⁵⁹

Los raspadores son cepillos de acero que se colocan en el revestimiento y la función principal es la de limpiar el revoque que se forme en la pared del pozo, el lodo gelificado y los escombros en la cara del pozo; esto con el objetivo de realizar una buena cementación.

⁵⁹ *Ibíd.*, Pág. 10

3. ANÁLISIS DE LA LECHADA DE CEMENTACIÓN UTILIZADA ACTUALMENTE EN CAMPO CASTILLA

En el siguiente capítulo, se analizan las características que proporciona el diseño actual de la lechada de cementación utilizada en la sección de revestimiento de producción, en Campo Castilla. Para hacer esto, primero se definirán las características con las que cuenta cualquier lechada de cementación y las pruebas para realizar los diseños de lechadas; para posteriormente poder analizar las características que proporciona el diseño actual de la lechada.

3.1 CARACTERÍSTICAS DE UNA LECHADA DE CEMENTACIÓN

Las características de la lechada de cementación son las propiedades que la mezcla de cemento, agua y aditivos desarrolla. Propiedades que dependiendo de sus valores van a ser de beneficio para la operación de cementación o por el contrario pueden ser propiedades que lleguen a generar problemas. Estas características son las que se miden y varían en el laboratorio en donde se simulan las condiciones a las que se van a emplear y son regidas por normas, dentro de las que se incluyen las normas API RP 10B⁶⁰ “Procedimiento recomendado para la prueba de cementos para pozos (Recommended practices for testing well cements)” y la API RP 10A “especificación para cementos y materiales en la cementación de pozos” (Specifications for cements and materials for well cementing”); dependiendo del diseño que se desee, se varían los aditivos o la cantidad de agua- cemento, para que la lechada obtenga las características requeridas.

Dentro de las características más importantes están:

3.1.1 Densidad.⁶¹ La densidad es la 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 del agua. La mayoría de las densidades que se utilizan para la cementación de pozos de petróleo varía en un rango de 11- 18.5 ppg, estas densidades se utilizan teniendo como referencia la densidad del agua que es 8.34 ppg y la gravedad específica de los cementos clase G que es 3.18.

Para realizar una buena operación de cementación, se debe tener en cuenta que la presión hidrostática de la lechada de cemento no debe superar la presión de fractura

⁶⁰ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practices for testing well cements (API RP 10B). Junio 1 del 2011.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Specifications for cements and materials for well cementing cements (API RP 10A). Junio 1 Del 2011.

⁶¹ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 74

que tiene la formación; para determinar esta presión se debe tener en cuenta el tope del cemento y la densidad del mismo. Existen aditivos para ajustar la densidad; dentro de los que se encuentran la bentonita, las diatomeas y la gilsonita que actúan como reductores de densidad y la barita, la ilmenita y la hematita que funcionan para aumentar la densidad.

3.1.2 Rendimiento.⁶² El rendimiento es la propiedad de la lechada de cemento que indica el volumen que ocupa la lechada de cementación (cemento, agua de mezcla y los aditivos) una vez se haya realizado la mezcla, se expresa en pies cúbicos por saco (Pie^3/saco) y esta propiedad depende de la clase del cemento. El rendimiento se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 1. Rendimiento del cemento.

$$\frac{\text{Pie}^3}{\text{saco}} = \frac{V \text{ por saco } \left(\frac{\text{gal}}{\text{saco}} \right)}{7,48 \left(\frac{\text{gal}}{\text{Pie}^3} \right)}$$

Fuente: Prácticas recomendadas para ensayos de lechadas de cemento y calibración de equipos norma API 10A y 10B. Superior Energy Services 2015. Pag.41

En donde el volumen por saco son los galones de lechada que se generan con un solo saco de cemento y el 7,48 es la constante para pasar de galones a pies cúbicos.

3.1.3 Tiempo de bombeabilidad.^{63,64} El tiempo de espesamiento de las lechadas de cementación es la propiedad que define el tiempo en el que una lechada se encuentra en estado líquido (bajo presión y temperatura simuladas del pozo) y puede ser bombeada y desplazada por el anular antes de que se comience a fraguar. Este tiempo depende de los aditivos que se utilicen en la lechada, como por ejemplo retardadores o aceleradores. Las unidades de consistencia son las unidades Bearden (Bc) y cuando se alcanzan las 100 Bc se termina la prueba, sin embargo, hasta 70 Bc se considera que la lechada es bombeable.

3.1.4 Agua de mezcla.⁶⁵ Este término hace referencia a la cantidad de agua que se requiere para que combinada con un saco de cemento genere una lechada con una densidad deseada; hace referencia solamente a el agua, sin tener en cuenta aditivos líquidos. Usualmente es expresada en galones por saco (gal/saco) y el agua puede ser tanto dulce como salada, según la aplicación.

⁶² SCHLUMBERGER JET- 14, Op., Cit., Pág. 28

⁶³ *Ibid.*, Pág. 28

⁶⁴ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 81

⁶⁵ SCHLUMBERGER, Op., Cit., Pág. 17

Para determinar la cantidad de agua de mezcla se debe tener en cuenta que un saco pesa 94 libras y la gravedad específica de los diferentes aditivos a utilizar; para posteriormente realizar un balance de masa y volumen. La cantidad de agua se obtiene resolviendo la **Ecuación 2** en donde X es el volumen de agua requerida en galones.

Ecuación 2. Balance de masas y volúmenes en lechada de cemento.

$$\rho_{lechada} = \frac{W_{cemento} (lb) + \sum W_{aditivos} (lb) + X (gal) \times 8.34 \left(\frac{lb}{gal}\right)}{V_{cemento} (gal) + \sum V_{aditivos} (gal) + X (gal)}$$

Fuente: Prácticas recomendadas para ensayos de lechadas de cemento y calibración de equipos norma API 10A y 10B. Superior Energy Services 2015. Pag.41

3.1.5 Fluido de mezcla.⁶⁶ El fluido de mezcla hace referencia a la cantidad de fluido total con la que se va a mezclar un saco de cemento de cualquier clase; se tiene en cuenta el agua de mezcla y los diferentes aditivos líquidos que se utilicen. Se expresa en galones por saco (gal/saco) y se expresa en la **Ecuación 3**.

Ecuación 3. Cálculo volumen total de fluidos.

$$V_{fluido} (gal) = V_{agua} (gal) + V_{aditivos\ líquidos} (gal) + V_{aditivos\ sólidos\ al\ agua} (gal)$$

Fuente: Prácticas recomendadas para ensayos de lechadas de cemento y calibración de equipos norma API 10A y 10B. Superior Energy Services 2015. Pag.41

3.1.6 Reología.^{67,68} La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los fluidos; este término se puede aplicar en las lechadas de cemento para: evaluar la mezcla y la bombeabilidad de las lechadas, determinar las tasas de desplazamiento apropiadas para la efectiva remoción del lodo y para la colocación de la lechada y para estimar las presiones de fricción. Las propiedades del flujo que se pueden hallar con la reología son la viscosidad plástica y el punto cedente. La viscosidad plástica (PV) es la pendiente de la línea de esfuerzo de corte por encima del punto de cedencia y es expresada en centipoise (cp) y el punto cedente (ty) es el término que indica la resistencia del fluido a fluir; se expresa en libras de fuerza por 100 pies cuadrados. La viscosidad plástica aumenta con la cantidad de sólidos que contenga la lechada y el punto cedente disminuye cuando aumente la dispersión entre partículas hidratadas del cemento.

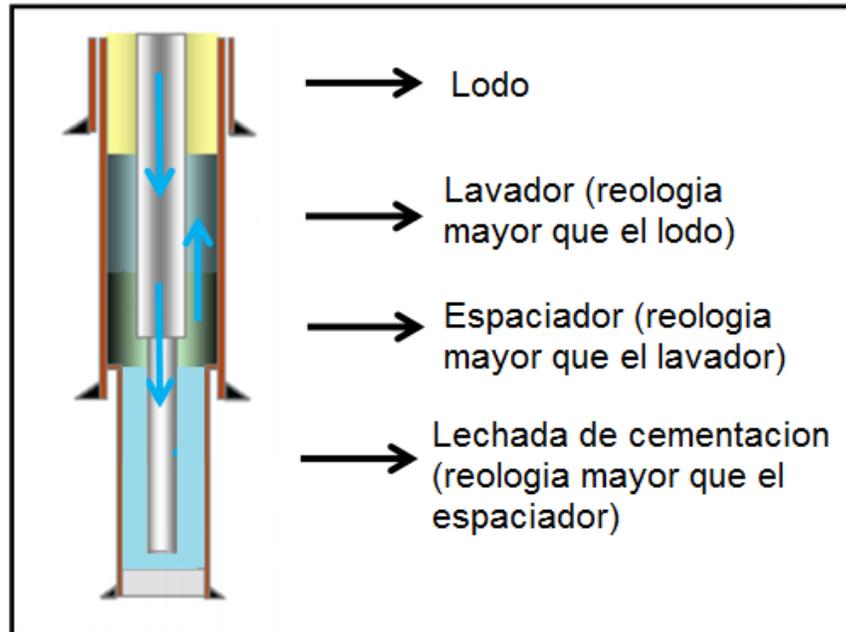
⁶⁶ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 83

⁶⁷ CLARK, C. R. Mud Displacement with Cement Slurries. 1973. p. 28

⁶⁸ LEON LOYA, Gilberto. Reología De Los Fluidos De Perforación Y Reparación De Pozos. p. 30

Al comienzo de la operación en el pozo se encuentra únicamente el fluido de perforación (lodo); el cual tiene que ser removido para una buena calidad en la cementación. Esta remoción, se realiza con el lavador químico, el cual como su nombre lo indica, se encarga de lavar el lodo de las paredes de la formación y del revestimiento. Posterior a esto, se bombea otro fluido (espaciador mecánico) con el objetivo de desplazar la mezcla de lavador con lodo del espacio anular que será cementado; para finalizar con el bombeo de la lechada de cemento. Este “tren” de fluidos se bombea con la premisa de una “jerarquía reológica” el cual indica que cada fluido bombeado deberá tener una mayor reología que el fluido que está desplazando. De esta manera la reología del lavador será mayor a la del lodo, la del espaciador mayor a la del lavador y la de la lechada de cemento mayor a la del espaciador.

Figura 23. Orden del tren de fluidos con jerarquía reológica.



Fuente: Lavado y filtrado de pozos petroleros, Universidad Veracruzana, pag. 5. Modificada por los autores.

3.1.7 Fuerza de compresión.⁶⁹ Indica el grado de consistencia del cemento, esta propiedad de la lechada se cuantifica en unidades de libras sobre pulgadas cuadradas (psi) dependiendo de la presión que ésta soporte. El cemento debe ser lo suficientemente resistente como para sostener el revestimiento (lo cual se logra cuando el cemento adquiere una resistencia a la compresión superior a los 50 psi),

⁶⁹ SCHLUMBERGER, Op., Cit., Pág. 17

soportar los movimientos generados por la broca y la sarta durante la perforación y aguantar el choque que producen los cañoneos en la zona.

El tiempo que se demora la lechada para alcanzar fuerzas de compresión necesarias para seguir con las operaciones de perforación (mayor a los 500 psi) se le conoce como “tiempo de espera en el cemento” (WOC). Este tiempo es dependiente de las condiciones de presión, temperatura, proporción de agua en la mezcla y de los aditivos que se puedan llegar a utilizar; de este modo un acelerador puede hacer que este tiempo sea menor y un retardador hace que este tiempo sea mayor.

3.1.8 Pérdida de fluido.⁷⁰ Durante el proceso de asentamiento del cemento se produce una deshidratación del mismo debido a las presiones que actúan sobre el mismo y por reacciones químicas que ocurren. Esta deshidratación debe ser controlada, dado que si se pierde mucho fluido, las características del cemento cambian y esto puede llegar a significar fallos en las operaciones de cementación. La cantidad aceptable de pérdida de fluido es dependiente de los trabajos que se realizan en un trabajo forzado las pérdidas usualmente están en el rango de 60 a 70 API, en una cementación primaria es aceptable que el rango de pérdida de fluido se encuentre en el orden de 25 a 50 API, los trabajos con liner la pérdida debe ser menor a 30 API y en un hueco horizontal la pérdida de fluido no debe superar los 50 API. Estas unidades son los ml de fluido para 30 mins de duración de la prueba multiplicados por dos.

3.1.9 Fluidéz de la lechada. La fluidéz es la habilidad de la lechada para ser mezclada, esta propiedad puede variarse con los dispersantes. La fluidéz de la lechada depende de las características y las cantidades de los aditivos utilizados en la mezcla, así como del cemento y el agua. Esta propiedad es netamente cualitativa y se determina al momento de realizar la mezcla. Si la mezcla tiene vórtice (hueco formado en el fluido dentro del mixer) se menciona que tiene una fluidéz con la cual se puede trabajar operacionalmente, de lo contrario se determina que este fluido no es adecuado para una operación de cementación.

3.1.10 Sedimentación en las lechadas de cemento. La sedimentación indica el grado de decantación de los sólidos presentes en las lechadas de cemento. Esta propiedad es importante debido a que muestra que tan uniforme será el peso de una columna de cemento a lo largo del anular, la cual de no ser uniforme, puede repercutir en problemas operacionales o daños en las formaciones.

⁷⁰ SCHLUMBERGER JET- 14, Op., Cit., Pág. 30

Según la empresa Schlumberger⁷¹, otras propiedades que se pueden medir a una lechada de cementación son el agua libre y la permeabilidad. El agua libre es la propiedad de la lechada que mide la tendencia del agua a separarse de la lechada; se mide en probeta de ml/250 ml durante dos horas, y para un liner esta prueba tiene que ser cero (que no exista agua separada del cemento). La permeabilidad del cemento fraguado debe ser menor a 0.1 milidarcy, sin embargo esta puede ser aumentada por disturbios durante el asentamiento.

Cada una de estas características son muy importantes para el proceso de cementación, ya que un mal desarrollo de alguna de estas propiedades tendrá como consecuencia problemas operacionales que en la mayoría de los casos se traduce en gastos económicos no previstos. Por este motivo, se deben hacer las pruebas de laboratorio para cada una de estas características y se debe dejar una constancia de esto en los reportes pre y post operacionales.

3.2 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA UNA LECHADA DE CEMENTO

Para realizar un diseño de lechada se debe tener en cuenta las condiciones del pozo que se quiere cementar; para utilizar los aditivos necesarios con las concentraciones adecuadas y de esta manera que la lechada adquiera las características deseadas y no se desperdicie cemento o aditivos. En el diseño, usualmente los aditivos solidos se dan en forma de concentraciones en porcentaje con respecto al peso del cemento (%BWOC) y los líquidos en concentraciones en forma de galones por saco (GPS); sin embargo no se considera regla general. Cuando se tiene un diseño de una lechada de cementación se corren una serie de pruebas la cuales indicarán las propiedades con la que la lechada cuenta. Estas pruebas son de suma importancia, ya que se simulan las condiciones de operación a la cual una lechada se bombea y como resultado obtener las propiedades que la lechada va a desarrollar a estas condiciones.

Según las empresas Schlumberger⁷², Superior Energy Services^{73,74,75} y la empresa de petróleos mexicanos⁷⁶; dentro de las pruebas de laboratorio que se le realizan a una lechada se destacan:

⁷¹ Ibíd., Pág. 30

⁷² SCHLUMBERGER, Op., Cit., Pág. 9

⁷³ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 79

⁷⁴ 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

⁷⁵ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Instructivo para la corrida de pruebas, 2014. P.30

⁷⁶ TEJEDA ARIAS, Jabal. Ingeniería De Cementaciones, Subdirección De Perforación Y Mantenimiento a Pozos, Empresa Petróleos Mexicanos. 2000.

3.2.1 Prueba de mezclabilidad.⁷⁷ La prueba de mezclabilidad consiste en determinar si la lechada (producto de la mezcla de los aditivos, el agua de mezcla y el cemento) es una lechada con la fluidez adecuada para la operación de bombeo. Esta característica es cualitativa y se valora en un rango de 0 a 5; en donde cero indica que la lechada no cuenta con la fluidez para trabajar operacionalmente y 5 indica que la lechada es muy fluida.

Equipos utilizados: Balanza electrónica de precisión, Mezclador (Mixer).

Figura 24. Mezclador de laboratorio de cementación.



Fuente: Superior Energy Services Colombia.
Fotografiada por el autor.

Procedimiento:

1. Determinación de los pesos de los aditivos, según la composición del diseño. A partir de datos de %BWOC y de GPS se calculan los valores de cada aditivo en gramos.
2. En la balanza electrónica de precisión se pesan cada uno de estos aditivos según los pesos en gramos que se obtuvieron en el paso 1. Los aditivos sólidos se pueden pesar en vidrios de reloj y los líquidos en jeringas. La balanza a utilizar debe tener un margen de error de más o menos 0.01 gr para valores menores a 100 gr y de máximo 0.1 para superiores a 100 gr.
3. Se mezclan los componentes de la lechada en un mezclador (**Figura 24**), el cual

⁷⁷ SUPERIOR ENERGY SERVICES laboratorio, Op., Cit., Pág. 24

es un instrumento similar a una licuadora que cuenta con dos velocidades fijas (4000 RPM y 12000 RPM) y la opción de velocidades controladas manualmente. La lechada debe mezclarse de la siguiente manera: primero el agua de mezcla con todos los aditivos líquidos, posteriormente los aditivos uno a uno, iniciando del más disperso hasta el más concentrado; y por último se le agrega el cemento o el blend de cemento a la mezcla; todo esto a una velocidad de 4000 RPM y se recomienda por no más de 15 segundos. Posterior a esto se varía la velocidad a 12000 RPM por 35 segundos. Estas velocidades pueden variar debido a que las aspas del mezclador a una velocidad de 12000 RPM rompen algunos aditivos: cuando esto sucede se realiza la mezcla en 15 segundos a 4000RPM y posteriormente se dejan en 4000 RPM por cinco minutos y medio. Todo este procedimiento se da de acuerdo a la norma API RP 10B.

4. Cuando en el mezclador se encuentre la lechada en forma uniforme, determinar la presencia o no del vórtice para de esta manera saber si la lechada es o no es fluida. El vórtice es un “hueco” formado debido a que la lechada se mueve de forma solenoidal (rota en torno a un eje).

3.2.2 Densidad.⁷⁸La densidad de la lechada es definida antes del diseño; por lo cual, después de la mezcla, si el balance de materiales estuvo correctamente calculado la lechada tendrá el peso que se tenía previsto. Sin embargo, es mejor rectificarlo porque esta variable es determinante en el equilibrio de las presiones en el subsuelo y en la fuerza final a la formación que desarrollara el cemento. Esta prueba se realiza mediante el uso de una balanza presurizada, la cual cuenta con un brazo graduado que indica el peso de la lechada aplicando el balance de contrapeso. Antes de realizar la medición es necesario verificar la calibración de la balanza, lo cual se realiza pesando el agua y esperando una lectura de 8.33 ppg. Estas balanzas cuentan con una precisión de 0.1 ppg.

Equipo utilizado: Balanza presurizada con estuche de plástico.

⁷⁸ SCHLUMBERGER, Op., Cit., Pág. 9

Figura 25. Balanza presurizada con sus partes



Fuente: Prácticas recomendadas para ensayos de lechadas de cemento y calibración de equipos norma API 10A y 10B. Superior Energy Services 2015. Pag.47

Procedimiento:

1. Después de mezclada la muestra (Lechada a la cual se va a medir el peso), se vierte dentro de la cámara de la balanza.
2. Atornillar la tapa de la balanza, con el fin de dar sello a la cámara en donde se encuentra la muestra.
3. Con una bomba de mano se inyecta más lechada a la cámara por una válvula sin retorno que se ubica en la tapa; con el fin de someter la muestra a presión y eliminar posibles burbujas de aire. Con el fin de obtener el peso real de la muestra.
4. Lavar y se seca la cámara externamente y se coloca la balanza en el punto de apoyo del estuche.
5. Mover a la izquierda o a la derecha la pesa deslizante hasta que el indicador quede en equilibrio y se pueda leer el valor de la densidad.

Algunas lechadas de aplicaciones especiales como por ejemplo las aligeradas con esferas de vidrio no pueden ser sometidas a una balanza presurizada; en estos casos se utiliza la balanza de lodos.

3.2.3 Acondicionamiento de la lechada.⁷⁹ El acondicionamiento de las lechadas es una práctica que 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. Esto es necesario para simular las condiciones de temperatura y de movimiento que sufre el fluido en el pozo.

Equipo utilizado: Consistómetro atmosférico con su copa de acondicionamiento, el indicador de torsión y la paleta.

Figura 26. Consistómetro atmosférico y su copa de acondicionamiento.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015. Pág. 79.

Procedimiento:

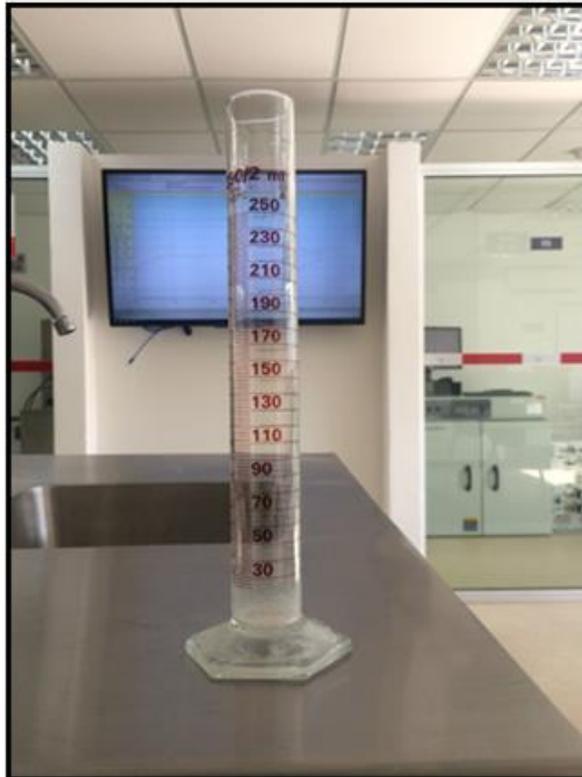
1. Calcular la temperatura circulante y precalentar el consistómetro atmosférico a esta temperatura.
2. Verter la muestra en la copa de acondicionamiento y se inserta la paleta.
3. Tapar la copa con el indicador de torsión.
4. Introducir la copa ya armada al consistómetro atmosférico y se acciona el motor para de esta manera simular el movimiento que la lechada tendrá en el subsuelo.
5. Mantener durante aproximadamente 30 minutos para que la muestra pueda alcanzar el equilibrio.
6. Continuar con las pruebas que requiera la muestra a la temperatura circulante.

⁷⁹ SUPERIOR ENERGY SERVICES laboratorio, Op., Cit., Pág. 46.

3.2.4 Agua libre.⁸⁰ El agua libre es una medida de la estabilidad estática de una lechada de cemento, o en otras palabras es la tendencia del fluido (Agua) a separarse de la lechada antes del fraguado.

Equipo utilizado: Probeta de 250 ml.

Figura 27. Probeta de 250 ml



Fuente: Superior Energy Services Colombia.
Fotografiada por el autor.

Procedimiento:

1. Mezclar y se acondiciona la lechada a una temperatura circulante.
2. Verter la muestra de lechada en una probeta hasta el tope de los 250 ml.
3. Tapar la probeta, con el fin de evitar la evaporación de los fluidos libres.
4. La probeta es acomodada de tal manera que simule las condiciones del pozo (pozo desviado máximo un ángulo de 45 grados y pozo vertical con un ángulo

⁸⁰ Ibíd., Pág. 80

- de 90 grados).
5. Dejar la probeta estática por 2 horas a temperatura ambiente.
 6. Medir el fluido libre con una pipeta.

Para un liner el porcentaje de agua libre debe ser cero. El porcentaje de agua libre se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Porcentaje de agua libre

$$\%FF = \frac{V_{ff} \times \rho}{ms} \times 100$$

Fuente: Prácticas recomendadas para ensayos de lechadas de cemento y calibración de equipos norma API 10A y 10B. Superior Energy Services 2015. Pag.49

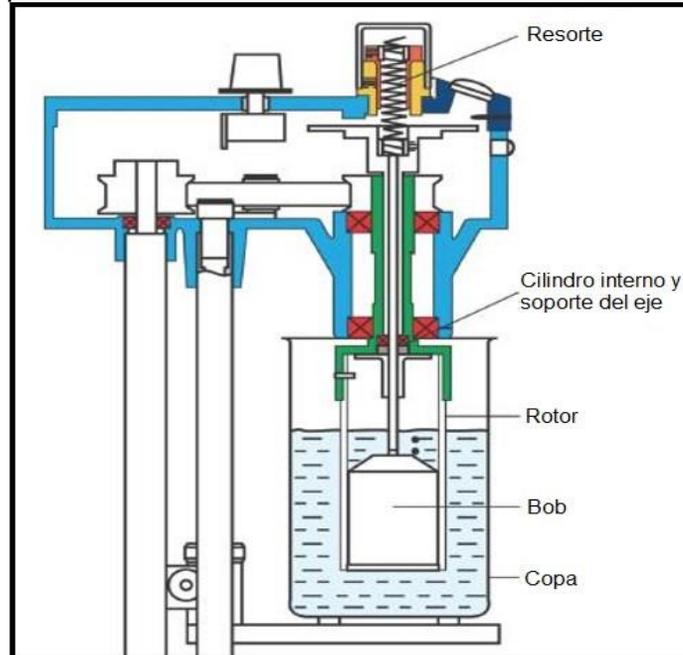
En donde %FF es el contenido de fluido libre en porcentaje; V_{ff} es el volumen de fluido libre colectado en ml; ρ es la gravedad específica de la lechada y ms es la masa inicial de la lechada en gramos.

3.2.5 Reología.⁸¹ Prueba que se le realiza a la lechada con el fin de caracterizar su comportamiento reológico a condiciones de presión atmosférica y temperatura circulante; asimismo se suele correr esta prueba a temperatura ambiente con el fin de determinar el comportamiento a condiciones de mezcla. Para describir este comportamiento reológico se emplean modelos como el plástico de Bingham (altamente aceptado en la industria), el matemático para la determinación de las propiedades y el modelo de ley de potencias.

Equipo utilizado: Viscosímetro rotacional, el cual cuenta con un rotor, un BOB estacionario y una copa de la lechada. Adicionalmente es utilizado el consistómetro atmosférico para acondicionar la lechada a temperatura circulante.

⁸¹ SCHLUMBERGER, Op., Cit., Pág. 13

Figura 28. Viscosímetro Rotacional con sus partes.



Fuente: Prácticas recomendadas para ensayos de lechadas de cemento y calibración de equipos norma API 10A y 10B. Superior Energy Services 2015. Pag.70. modificada por los autores.

El viscosímetro como se observa en la **Figura 28** es un equipo que cuenta con un BOB cilíndrico que está conectado a un resorte de torsión el cual restringe su movimiento; el BOB está situado concéntricamente dentro del rotor; el espacio entre el BOB y el rotor debe ser conocido con el fin de tener más certeza en los resultados; este espacio es llenado con el fluido que se esté midiendo la reología. El rotor gira a diferentes velocidades (1,2,3,6,10,20,30,60,100,200,300 y 600 RPM) generando que el resorte sufra una deflexión (debido a la resistencia del fluido) la cual es la que se lee. Las lecturas que son obtenidas se utilizan para determinar las propiedades reológicas; las cuales son importantes para el cálculo de caudal crítico y del régimen de desplazamiento.

Procedimiento:

1. Mezclar la lechada de cemento.
2. Armar el viscosímetro. Ubicar primero el BOB y posterior a esto situar el rotor; asegurándose que el BOB quede concéntrico a el rotor.
3. Verter la muestra de lechada de cemento dentro de la copa del viscosímetro, hasta la línea de aforo con la que cuenta la copa.

4. Tomar lecturas a todas las velocidades, primero de manera ascendente de las velocidades y luego en forma descendente para posterior a esto calcular un promedio.
5. Determinar la viscosidad plástica y el punto cedente a partir de los datos obtenidos, estos datos se determinan de acuerdo al modelo reológico que se adopte.
6. Precalentar y se acondiciona la muestra a la temperatura circulante dentro del consistómetro atmosférico.
7. Armar el viscosímetro nuevamente.
8. Verter la muestra de lechada de cemento acondicionada dentro de la copa del viscosímetro, hasta la línea de aforo con la que cuenta la copa.
9. Tomar lecturas a todas las velocidades y calcular el promedio de las lecturas.
10. Determinar la viscosidad plástica y el punto cedente a partir de los datos obtenidos, estos datos se determinan de acuerdo al modelo reológico que se adopte.

Existe un modelo matemático para hallar la viscosidad plástica y el punto cedente en las lechadas de cemento, este método consiste en resolver las **Ecuaciones 5 y 6**, las cuales son dependientes de los datos leídos en los viscosímetros rotacionales.

Ecuación 5. Viscosidad plástica para lechadas de cementación.

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

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

En donde la viscosidad plástica es expresada en centipoises (cp), θ_{300} es la lectura del viscosímetro rotacional a 300 rpm y θ_{100} es la lectura del viscosímetro rotacional a 100 rpm.

Ecuación 6. Punto cedente para lechadas de cementación.

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

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

En donde el punto cedente es expresado en lbf/100ft², θ_{300} es la lectura del viscosímetro rotacional a 300 rpm y Vp es la viscosidad plástica calculada previamente.

La viscosidad plástica es una medida de la fricción mecánica causada por el fluido. Dicha fricción mecánica es causada por la concentración de sólidos presentes en la lechada de cemento. De esta manera, si aumentan los sólidos, aumentará la fricción y como consecuencia también la viscosidad plástica. El punto cedente, es la medida de atracción de las moléculas en las lechadas de cemento.

3.2.6 Filtrado o fluid loss.^{82,83} La prueba se realiza para determinar la velocidad a la cual la lechada se deshidrata durante los trabajos de cementación cuando esté en contacto con una formación permeable y sobre ésta actúe un delta de presión relativamente alta (1000 psi), la deshidratación es la pérdida de líquidos de la lechada, los cuales por la presión son separados de esta y fluyen hacia la formación. La velocidad es importante, ya que una deshidratación prematura de la lechada traerá como consecuencia problemas operacionales como el fraguado prematuro o fracturas inducidas en consecuencia del aumento de la densidad de la lechada por la pérdida de los líquidos.

Para la realización de esta prueba se utiliza una filtroprensa, la cual consiste en una celda que aguanta altas presiones y posee una longitud de 10", una capacidad para 500 ml de muestra y un filtro de 3.5 pulgadas de área. Con el fin de simular la formación permeable, en el lado inferior de la celda se ubica una malla de 45 μm respaldada por una de 250 μm , por la cual fluirá el líquido separado de la lechada como consecuencia de la presión; para suministrar la presión se utiliza nitrógeno el cual se conecta por la parte superior de la celda. Debajo de la filtroprensa se ubica una probeta para medir el volumen de líquido separado de la lechada. Este volumen se mide a los 0.5, 1, 2, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos.

Equipos utilizados: Consistómetro atmosférico, Filtroprensa y probeta.

⁸² SUPERIOR ENERGY SERVICES laboratorio, Op., Cit., Pág. 59.

⁸³ American Petroleum Institute, Op., Cit., Pág. 48.

Figura 29. Filtroprensa utilizada para el fluid loss.



Fuente: Procedimientos API de las pruebas de laboratorio de cementación. Ingeniería y tecnología de servicios 2012. Pag.10.

Procedimiento:

1. Mezclar y acondicionar la lechada a temperatura circulante.
2. Armar la filtroprensa. Al extremo inferior de la celda se ubica la malla, de tal manera que el lado de 45 μm queda en contacto con la lechada. Posterior a esto a los dos extremos se instala la válvula (tapa).
3. Precalentar la filtroprensa a la temperatura circulante.
4. Asegurarse de que el nitrógeno proporcione la presión necesaria para la prueba (1000 psi).
5. Cerrar la válvula inferior de la filtroprensa y se vierte la lechada dentro de la filtroprensa.
6. Se sitúa una probeta debajo del montaje de la filtroprensa.

7. Conectar la línea de nitrógeno a la parte superior de la celda y se suministra una presión de más o menos 1000 psi.
8. abrir la válvula inferior y al mismo tiempo se comienza a cronometrar el tiempo transcurrido desde la abertura.
9. Medir el volumen a los 0.5, 1, 2, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos.
10. Si el nitrógeno escapa por la válvula inferior, se considera que la lechada se deshidrata antes de tiempo y la prueba se da por terminada. En este caso se registra el tiempo y el volumen de agua.
11. Si el nitrógeno no fluye, detener la prueba a los 30 minutos y registrar los ml recolectados.
12. Estos ml se multiplican por 2 y se obtienen el fluid loss en unidades de API.
13. Desmontar la prueba, teniendo cuidado con las líneas de alta presión.
14. Limpiar la filtroprensa, sacando el cake y midiéndolo.

Esta prueba es importante para determinar las concentraciones de los controladores de filtrado y también para comparar la eficiencia de los diferentes controladores que existen en el mercado.

3.2.7 Tiempo de bombeabilidad o thickening time.^{84,85} El tiempo de bombeabilidad también conocido como periodo de espesamiento, es el lapso de tiempo en que la lechada de cemento alcanzará entre 70 y 100 unidades Bearden (Bc); las unidades Bearden se relacionan al torque que el fluido le hace a una paleta, torque que se mide con un potenciómetro de voltaje. La prueba se puede terminar en 70-100 Bc debido a que se considera que por encima de las 70 Bc una lechada no es bombeable. Esta prueba se realiza bajo condiciones de pozo, por lo cual se debe hacer en un consistómetro presurizado el cual proporciona a la lechada condiciones y cambios de presión, de temperatura y de movimiento.

El consistómetro presurizado consiste en una cámara con un motor en el fondo y llena de aceite (el aceite es importante porque es el que proporciona las temperaturas y las presiones que se deseen simular). Dentro de esta cámara se ubica la copa, la cual en su parte interior tiene una paleta y la lechada. La paleta va conectada a un resorte y cuando el motor gira, hace que la lechada intente arrastrar la paleta y de esta manera mover el resorte; el potenciómetro mide la deformación del resorte y con la ayuda de una serie de algoritmos calcula como resultado la medida de espesamiento de la lechada en unidades Bc.

Equipos utilizados: Consistómetro presurizado, Copa del consistómetro.

⁸⁴ *Ibíd.*, Pág. 35

⁸⁵ SUPERIOR ENERGY SERVICES laboratorio, Op., Cit., Pág. 33.

Figura 30. Consistómetro presurizado.



Fuente: Procedimiento API de las pruebas del laboratorio de cementación. Superior Energy Services 2015. Pag.8.

Figura 31. Copa del consistómetro presurizado con sus partes.



Fuente: Prácticas recomendadas para ensayos de lechadas de cemento y calibración de equipos norma API 10A y 10B. Superior Energy Services 2015. Pag.82.

Procedimiento

1. Mezclar la lechada la cual se le realizará la prueba de tiempo de bombeabilidad.
2. Armar la copa del consistómetro presurizado con todas sus partes.
3. Verter la lechada dentro de la copa.
4. Ubicar la copa dentro de la cámara, situar encima el potenciómetro y prender el motor.
5. Cerrar la cámara, prender la bomba de presión en modo automatico y el calentador.
6. Desde el computador cuadrar los lapsos de temperatura, presión y movimiento que tendrá la lechada. La presión máxima será la de fondo y la temperatura máxima será la circulante.
7. Esperar a que la consistencia sea 100 Bc, sin embargo la prueba se puede dar por terminada a los 70 Bc.
8. Detener el equipo desde el computador mando.
9. Desmontar el equipo y lavar cada una de sus partes, teniendo mucho cuidado con las paletas, las cuales son propensas a cementarse.

El tiempo de bombeabilidad del diseño debe ser mayor que el tiempo que va a durar el trabajo en campo; usualmente el tiempo del diseño tendrá que ser 1 o 2 horas mayor al tiempo que se tenga presupuestado para el trabajo. Esto para evitar problemas de cementación de equipos, líneas o revestimiento en dado caso que por problemas no se pueda ejecutar el trabajo en los tiempos previstos.

3.2.8 Resistencia al esfuerzo compresivo. Ensayo no destructivo.^{86,87,88} Esta prueba se realiza para determinar la resistencia a la compresión que desarrolla la lechada de cemento mientras está sometida a una presión y a una temperatura. Se le denomina ensayo no destructivo porque en ningún momento se va a poner la muestra del cemento directamente sobre un esfuerzo de presión.

Esta prueba se realiza en un equipo denominado analizador ultrasónico de cemento (UCA por sus siglas en ingles) el cual mide el cambio de las señales ultrasónicas que pasan a través de la muestra de cemento en tiempo real (tiempo de transito). Debido a que las ondas sónicas se propagan más lentamente en sustancias liquidas, el tiempo de transito cuando la lechada se encuentra liquida va a ser mayor, pero cuando la sustancia se encuentre solida el tiempo de transito disminuirá. Después por medio de algoritmos, la UCA pasa estos tiempos de tránsito a unidades de psi (unidades en las cuales se mide la resistencia a la compresión).

⁸⁶ *Ibíd.*, Pág. 51

⁸⁷ American Petroleum Institute, Op., Cit., Pág. 34

⁸⁸ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 87

En reemplazo de la UCA se puede utilizar el analizador de la fuerza del gel estático (SGSA), el cual mide las mismas propiedades de la UCA y otras más.

Equipos Utilizados: UCA o SGSA

Figura 32. Equipo SGSA.



Fuente: Chandler Engineering. Model 5265 Static Gel Strength Analyzer 2015. Pag 1. Modificada por los autores.

Figura 33. Copa del SGSA.



Fuente: Curso básico/ intermedio de cementación para ingenieros. Superior Energy Services 2015. Pag.87. Modificada por los autores.

Procedimiento:

1. Mezclar la lechada.
2. Armar la celda y cubrirla con abundante grasa.
3. Verter la lechada en la celda y tajarla.
4. Ubicar la celda en SGSA, conectar los cables, la termocupla y los tubos.
5. Arrancar la bomba de agua, la temperatura se sube hasta la estática y se aumenta la presión hasta 3000 psi.
6. En el computador mando, se establece la temperatura y la presión.
7. Se esperan 24 horas y se apaga desde el computador mando.
8. Desmontar el equipo y limpiarlo para asegurar que no se cimente.

3.2.9 Resistencia al esfuerzo compresivo. Ensayo destructivo.^{89,90} La prueba de resistencia a la compresión con ensayo destructivo, consiste en determinar la resistencia a la compresión que el cemento ha desarrollado, como su nombre lo indica, se realiza “destruyendo” la muestra. Para realizar esta prueba se curan las muestras de cemento simulando temperatura y presión, posteriormente con la ayuda de una prensa hidráulica determinar el momento y la presión en que la muestra falla. Usualmente esta prueba se le realiza a muestras con tiempos de curado de 12, 24, 48, 72 y 96 horas, sin embargo se puede realizar la prueba a los tiempos de curado que se deseen.

⁸⁹ *Ibíd.*, Pág. 86

⁹⁰ SUPERIOR ENERGY SERVICES laboratorio, Op., Cit., Pág. 50

Equipos utilizados: Cámara de curado, Moldes de 2" x 2" para las muestras y la prensa hidráulica.

Figura 34. Moldes de 2" x 2" para las muestras, ensayo destructivo.



Fuente: Curso básico/ intermedio de cementación para ingenieros. Superior Energy Services 2015. Pag.86.

Figura 35. Prensa hidráulica, ensayo destructivo.



Fuente: Chandler Engineering. Model 4207D Compressive Strength Tester 2015. Pag 1. Modificada por los autores.

Procedimiento

1. Mezclar la lechada que se le realizara la prueba de resistencia a la compresión, ensayo destructivo.
2. Verter la muestra dentro de los moldes 2" x 2".
3. Ubicar los moldes ya armados a la cámara de curado y tapar la cámara cerrando todos los tornillos en cruz.
4. Llenar la cámara de curado de agua, aplicarle la presión de fondo y la temperatura estática.
5. Dejar la muestra por el tiempo que se requiera (12, 24, 48, 72 o 96 horas).
6. Drenar la cámara de curado.
7. Destapar la cámara y sacar las muestras de los moldes.
8. Colocar la muestra en la prensa hidráulica y aplicar carga con una velocidad de 16000 lbf por minuto para las muestras que se espera que tenga una resistencia mayor a los 500 psi y una velocidad de 4000 lbf para las muestras que se espera que tengan una resistencia menor a los 500 psi.
9. Aplicar la presión hasta que la muestra falle.

La resistencia se determina mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 7. Determinación de la resistencia a la compresión.

$$Resistencia (Psi) = \frac{Fuerza (Lbf)}{\text{Área (in}^2\text{)}}$$

Fuente: Curso básico/ intermedio de cementación para ingenieros. Superior Energy Services 2015. Pag.86.

3.2.10 Mpro. El analizador de propiedades mecánicas o MPRO (Mechanical properties analyser) permite medir las propiedades elásticas del cemento mientras es sometido a condiciones de alta temperatura y presión. Para conocer las propiedades elásticas del cemento el MPRO mide constantemente diferentes propiedades mecánicas del cemento, las cuales son: el coeficiente de poisson,⁹¹ el cual es la relación que existe entre la expansión y compresión de un material, cuando un material es sometido a una fuerza de compresión este tiende a expandirse en las otras dos direcciones a la cual se está haciendo la fuerza ;el módulo de Young,⁹² el cual mide la relación entre la fuerza y la tensión de un material, entre menor el módulo de Young más elástico tiende a ser el material y el módulo de compresibilidad⁹³ el cual mide que tan compresible es un material. El MPRO

⁹¹ CHANDLER ENGINEERING. "Model 6265 MPRO Application" note 1. Pg 5

⁹² Ibid., pág 5

⁹³ Ibid., pág

transmite constantemente sonido a través de la muestra, y determina la velocidad de dichas ondas con respecto al tiempo para posteriormente calcular las propiedades mecánicas anteriormente descritas, esta prueba tiene una duración de 48 horas.

Equipo utilizado: MPRO o analizador de propiedades mecánicas.

Figura 36. MPRO o analizador de propiedades mecánicas.



Fuente. Model 6265 MPRO Application note 1. Chandler Engineering. Pág. 1.

Procedimiento

1. Mezclar la lechada a la cual se le realizara la prueba de MPRO.
2. Armar la copa del MPRO.
3. Verter la lechada dentro de la copa.
4. Ubicar la copa dentro del MPRO horizontalmente.
5. Conectar los sensores del MPRO a la copa.
6. Desde el computador digitar la presión y la temperatura a la cual será sometida la muestra y empezar la prueba; la presión máxima será la del fondo y la temperatura será la estática.
7. Esperar 48 horas.
8. Parar la prueba y desmontar la celda.

3.2.11 Prueba de sedimentación.^{94,95} La prueba de sedimentación mide la habilidad de la lechada para mantener su estabilidad a condiciones de pozo durante el tiempo de fragüe. La sedimentación en una operación de cementación es de suma importancia, ya que una sedimentación al momento del fragüe sube la densidad de la lechada y puede causar que la presión hidrostática de la columna de cemento produzca problemas operacionales como las fracturas en la formación. El molde para la prueba de sedimentación tiene una longitud de aproximadamente 7.9” y un diámetro interno de 1” y es de un material inerte al cemento.

Equipos utilizados: Cámara de curado y el molde para la prueba de sedimentación.

Figura 37. Cámara de curado.



Fuente: Curso básico/ intermedio de cementación para ingenieros. Superior Energy Services 2015. Pag.86

⁹⁴ SUPERIOR ENERGY SERVICES laboratorio, Op., Cit., Pág. 79

⁹⁵ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op., Cit., Pág. 81

Figura 38. Molde para la prueba de sedimentación.



Fuente: Curso básico/ intermedio de cementación para ingenieros. Superior Energy Services 2015. Pag.79.

Procedimiento

1. Mezclar la lechada a la cual se le realizará la prueba de sedimentación.
2. Engrasar el molde con abundante grasa y armarlo.
3. Acondicionar la lechada a la temperatura circulante.
4. Verter la muestra en el molde y cerrarlo.
5. Cerrar la cámara de curado atornillando en forma de cruz.
6. Presurizar la cámara de curado hasta 3000 psi.
7. Esperar 24 horas y enfriar la cámara hasta la temperatura ambiente.
8. Retirar los moldes de la cámara y extraer la columna de cemento.
9. Romper la columna de cemento en varios segmentos.
10. Medir la densidad de cada segmento por el método de Arquímedes.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE LA LECHADA DE CEMENTACIÓN UTILIZADA ACTUALMENTE EN EL CAMPO CASTILLA

Actualmente la empresa ingeniería y tecnología de servicios (ITS), línea de cementación de Superior Energy Services, cuenta con dos lechadas para la cementación de los revestimientos de producción en Campo Castilla. La primera es una lechada de 16 libras por galón (ppg) de densidad, la cual se utilizaba hasta el año 2015; pero debido a que el yacimiento ya está depletado, en las operaciones de cementación con el peso de esta lechada se podría inducir alguna fractura. Por lo anterior en estos momentos se utiliza una lechada de 14.5 ppg de peso, la cual por sus características composicionales proporciona las mismas propiedades de lechada que una de 16 ppg, minimizando de esta manera el riesgo de inducir alguna

fractura. Debido a que en la actualidad Superior Energy utiliza la lechada de 14.5 ppg para la cementación del revestimiento de producción en Campo Castilla; las pruebas de este proyecto de investigación son realizadas a esta lechada.

Las lechadas de cemento se realizan con cemento clase G DYCKERHOFF el cual entre otras propiedades tiene el 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 gr/cm³. Todas estas propiedades se pueden ver en el **Anexo A** (Ficha técnica del cemento).

En la actualidad Campo Castilla se encuentra depletado y algunas de sus zonas son propensas a sufrir fracturas inducidas por presiones externas que se le apliquen. Una de las presiones externas que se le puede aplicar a un yacimiento es la hidrostática debida al peso de la lechada y a la longitud a cementar (ft); en el año 2015 se evidenciaron presiones anormales en las unidades de cementación al momento de la operación, razón por la cual la empresa Superior y Ecopetrol acordaron cambiar el diseño de la lechada por una más liviana, minimizando de esta manera la presión hidrostática y mitigando las probabilidades de fracturas inducidas. La lechada de 14.5 ppg, se ha utilizado en las últimas operaciones que la empresa ha realizado en Campo Castilla para la cementación de un liner de 7 pulgadas, obteniendo muy buenos resultados en cuanto a registros de adherencia del cemento “cement bond log” (CBL) hace referencia. El CBL⁹⁶ (paper de spe cement evaluation) es un registro que aparece en la industria en los años 60’s, el cual mide la calidad de la cementación indirectamente con la acústica generada por el casing y bien interpretada arroja el grado de adherencia del cemento.

La lechada de cementación de 14.5 ppg cuenta con los aditivos y las concentraciones mostrados en la **Tabla 2**.

⁹⁶ PILKINGTON, Paul. E. Society of petroleum engineers. “Cement Evaluation - Past, Present, and Future”. Febrero 1992. SPE- 20314- PA Pág. 2.

Tabla 2. Composición lechada 14.5 ppg

Producto	Concentración
Antiespumante	0.01 GPS
Controlador de gas	0.5 GPS
Retardador	0.2% BWOC
Controlador de filtrado	1% BWOC
Aditivo especial	5% BWOC
Agente alivianante	12% BWOC

Fuente: Superior Energy Services Colombia, julio 2016.

3.3.1 Cálculos para la lechada de cementación de 14.5 ppg sin nanomateriales.

Dentro de esta sección se muestran los cálculos realizados para la determinación de la cantidad de cemento, aditivos y agua que son necesarios para realizar una muestra del diseño con el que la empresa cuenta actualmente; esta muestra será de 600 ml, cantidad suficiente para la realización de todas las pruebas que se le realizan a una lechada.

Para el cálculo del requerimiento de agua, se realiza el despeje del volumen de agua de la ecuación de densidad para las lechadas de cementación. En este cálculo se tendrán en cuenta todos los aditivos a excepción del antiespumante debido a que su concentración es de 0.01 GPS y no afecta en gran medida a la densidad de la lechada.

Ecuación 8. Requerimiento de agua a partir de ecuación de densidad de lechada.

$$\rho = \frac{m}{v}; m = \rho * v$$
$$\rho_{lechada} = \frac{m_c + m_{con\ g} + m_{con\ f} + m_r + m_{age\ a} + m_{adi\ e} + m_{agua}}{v_c + v_{con\ g} + v_{con\ f} + v_r + v_{age\ a} + v_{adi\ e} + v_{agua}}$$

Reemplazando m_{agua} ;

$$\rho_{lechada} = \frac{m_c + m_{con\ g} + m_{con\ f} + m_r + m_{age\ a} + m_{adi\ e} + \rho_{Agua} * v_{agua}}{v_c + v_{con\ g} + v_{con\ f} + v_r + v_{age\ a} + v_{adi\ e} + v_{agua}}$$

Si $\sum v = v_c + v_{con\ g} + v_{con\ f} + v_r + v_{age\ a} + v_{adi\ e}$

Ecuación 8. Continuación.

$$y \sum m = m_c + m_{con g} + m_{con f} + m_r + m_{age a} + m_{adi e}, entonces$$

$$\rho_{lechada} * (\sum v + v_{agua}) = \sum m + \rho_{Agua} * v_{agua}$$

$$\rho_{lechada} * v_{agua} + \rho_{lechada} * \sum v = \sum m + \rho_{Agua} * v_{agua}$$

$$(\rho_{lechada} - \rho_{agua}) * v_{agua} = \sum m - (\rho_{lechada} * \sum v)$$

$$v_{agua} = \frac{\sum m - (\rho_{lechada} * \sum v)}{(\rho_{lechada} - \rho_{agua})}$$

Donde;

v_{agua} Requerimiento de agua para una lechada, tomando en cuenta un saco (sk) de cemento.

$\sum m$ Sumatoria de la masa de: cemento, controladores, retardador, aditivo alivianante y aditivo especial.

$\sum v$ Sumatoria del volumen ocupado por: cemento, controladores, retardador, aditivo alivianante y aditivo especial.

$\rho_{lechada}$ Densidad de la lechada.

ρ_{agua} Densidad del agua.

Para el cálculo de las masas se tiene en cuenta que las unidades de la concentración de los aditivos sólidos son de porcentaje con respecto al peso del cemento (%BWOC) y que un saco de cemento pesa 94 libras. De esta manera mediante el **Cálculo 1** se obtienen las masas de cada aditivo sólido.

Cálculo 1. Peso de aditivos sólidos para un sk de cemento.

$$m_{controlador\ filtrado} = 94 \frac{lb}{sk} * 1\% = 0.94 \frac{lb}{sk}$$

$$m_{retardador} = 94 \frac{lb}{sk} * 0.2\% = 0.188 \frac{lb}{sk}$$

$$m_{aditivo\ especial} = 94 \frac{lb}{sk} * 5\% = 4.7 \frac{lb}{sk}$$

$$m_{agente\ alivianante} = 94 \frac{lb}{sk} * 12\% = 11.28 \frac{lb}{sk}$$

Los volúmenes de cada aditivo se calculan con la masa y la densidad; la cual se obtiene a partir de los datos de gravedad específica de cada producto. Este dato varía dependiendo del lote de fabricación, por lo cual se trabajó con el mismo lote de cada producto en todas las pruebas. Las gravedades específicas de los aditivos y del cemento son suministradas por el fabricante; la del agua se calcula con el agua de mezcla. Las gravedades específicas para los componentes de la lechada de 14.5 ppg se pueden evidenciar en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Gravedades específicas componentes lechada 14.5 ppg.

Aditivos	Gravedad específica
Agua	0,998
Cemento	3,18
Controlador gas	0,996
Controlador filtrado	1,8
Retardador	1,25
Aditivo especial (Microcemento)	2,73
Agente alivianante	0,98

En base a las gravedades específicas se calculan las densidades de los diferentes componentes de la lechada de 14.5 ppg. Para realizar este cálculo se tiene en cuenta que la densidad del agua a temperatura ambiente (60°F) es 8.33 ppg.

Calculo 2. Densidades de los componentes de la lechada de 14.5 ppg.

$$\begin{aligned} \rho_{agua} &= 0.998 * 8.33 \text{ ppg} = 8.31 \text{ ppg} \\ \rho_{cemento} &= 3.18 * 8.33 \text{ ppg} = 26.49 \text{ ppg} \\ \rho_{controlador \text{ gas}} &= 0.996 * 8.33 \text{ ppg} = 8.30 \text{ ppg} \\ \rho_{controlador \text{ filtrado}} &= 1.8 * 8.33 \text{ ppg} = 14.99 \text{ ppg} \\ \rho_{retardante} &= 1.25 * 8.33 \text{ ppg} = 10.41 \text{ ppg} \\ \rho_{agente \text{ alivianante}} &= 0.98 * 8.33 \text{ ppg} = 8.16 \text{ ppg} \\ \rho_{aditivo \text{ especial}} &= 2.73 * 8.33 \text{ ppg} = 22.74 \text{ ppg} \end{aligned}$$

Donde;

ρ_{agua} Es la densidad del agua de mezcla.

$\rho_{cemento}$ Es la densidad del cemento clase G DYCKERHOFF.

$\rho_{controlador \text{ gas}}$ Es la densidad del controlador de gas.

$\rho_{controlador\ filtrado}$ Es la densidad del controlador de filtrado.

$\rho_{retardador}$ Es la densidad del retardador.

$\rho_{agente\ alivianante}$ Es la densidad del agente alivianante.

$\rho_{aditivo\ especial}$ Es la densidad del aditivo especial.

8.33 es la densidad del agua a temperatura ambiente (60°F).

La masa del aditivo líquido (controlador de gas) se realiza mediante el despeje de la ecuación de densidad como se ve en el **Cálculo 3**. Se calcula de esta manera por las unidades de concentración de galones por saco (GPS) que este aditivo tiene.

Cálculo 3. Masa del controlador de gas a partir de su volumen y densidad.

$$m_{con\ g} = \rho_{con\ g} * v_{con\ g} = 8.30\ ppg * 0.5\ \frac{gal}{sk} = 4.15\ \frac{lb}{sk}$$

El cálculo de los volúmenes se realiza teniendo en cuenta los datos de densidad y masa de cada aditivo. En **Cálculo 4** se desarrolla el cálculo de volumen para los aditivos sólidos teniendo en cuenta un saco de cemento. Este cálculo no es necesario para el controlador de gas, debido a que la concentración de este aditivo está en galones por saco, unidad de volumen.

Cálculo 4. Volumen de aditivos sólidos para un sk de cemento.

$$v = \frac{m}{\rho}$$

$$v_{cemento} = \frac{94\ \frac{lb}{sk}}{26.49\ ppg} = 3.55\ \frac{gal}{sk}$$

$$v_{controlador\ filtrado} = \frac{0.94\ \frac{lb}{sk}}{14.99\ ppg} = 0.06227\ \frac{gal}{sk}$$

$$v_{retardador} = \frac{0.188\ \frac{lb}{sk}}{10.41\ ppg} = 0.018\ \frac{gal}{sk}$$

$$v_{agente\ alivianante} = \frac{11.28\ \frac{lb}{sk}}{8.16\ ppg} = 1.38\ \frac{gal}{sk}$$

Cálculo 4. Continuación

$$v_{\text{aditivo especial}} = \frac{4.7 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{22.74 \text{ ppg}} = 0.2067 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

Con los datos de masa y volumen de cada aditivo y del cemento, se calcula el requerimiento de agua con la **Ecuación 8** (ecuación de requerimiento de agua a partir de la densidad de la lechada).

Cálculo 5. Cálculo del requerimiento de agua para un sk de cemento.

$$v_{\text{agua}} = \frac{\sum m - (\rho_{\text{lechada}} * \sum v)}{(\rho_{\text{lechada}} - \rho_{\text{agua}})}$$

$$\sum m = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} + 4.15 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} + 0.94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} + 0.188 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} + 4.7 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} + 11.28 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$\sum m = 115.258 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$\sum v = 0.5 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 3.55 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.06227 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.018 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 1.38 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.2067 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$\sum v = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$v_{\text{agua}} = \frac{115.258 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} - \left(14.5 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} * 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}\right)}{\left(14.5 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} - 8.31 \frac{\text{lb}}{\text{gal}}\right)}$$

$$v_{\text{agua}} = 5.24 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

Con el valor del requerimiento de agua que se calculó, y con la **Ecuación 1** se obtiene el rendimiento de la lechada, dato importante para los cálculos de: los aditivos, el agua y el cemento; para la muestra de 600 ml.

Cálculo 6. Rendimiento de la lechada.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Volumen total por saco } \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}}$$
$$\text{Rendimiento} = \frac{\sum v + v_{\text{agua}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}}$$
$$\text{Rendimiento} = \frac{5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 5.24 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.46 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

La constante de $7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}$ es la equivalencia de cuantos galones hay en un pie cúbico, para expresar el rendimiento en pies cúbicos por saco.

El fluido de mezcla hace referencia a la sumatoria de todos los volúmenes líquidos utilizados en la mezcla de la lechada, para un solo saco. Mediante la **Ecuación 3** se puede calcular este valor.

Cálculo 7. Fluido de mezcla o fluido total para un sk de cemento.

$$\text{Fluido}_{\text{total}} = \text{Requerimiento de agua (gal)} + \text{aditivos líquidos (gal)}.$$
$$\text{Fluido}_{\text{total}} = 5.24 \text{ gal} + 0.5 \text{ gal} = 5.74 \text{ gal}$$

Con los datos de rendimiento de la lechada de cemento, se pueden calcular la cantidad de cemento que requiere la lechada, la cantidad de los diferentes aditivos y el agua. La cantidad de cemento puede ser determinada mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 9. Cantidad de cemento a partir del rendimiento.

$$\text{masa}_{\text{cemento}} = \frac{9.611}{\text{rendimiento}} \times 94 = \frac{903.434}{\text{rendimiento}}$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practices for testing well cements (API RP 10B). Junio 1 del 2011. Pág. 19

Donde;

Masa del cemento expresada en gramos.

9,611	constante dependiente de la cantidad de volumen del vaso de mezcla. Depende del equipo utilizado.
94	libras que tiene un sk de cemento.

Cálculo 8. Cantidad de cemento para lechada actual.

$$masa_{cemento} = \frac{903.434}{1.46 \frac{ft^3}{sk}} = 617.34 \text{ gr}$$

La cantidad de agua depende del rendimiento de la lechada, del requerimiento de agua y de la densidad del agua utilizada. Viene dada por la siguiente ecuación.

Ecuación 10. Cantidad de agua de mezcla.

$$cantidad_{agua} = \frac{9.611}{rendimiento} * \text{Requerimiento de agua} * \rho_{agua}$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practices for testing well cements (API RP 10B). Junio 1 del 2011. Pág. 20.

Donde;

Rendimiento	rendimiento de lechada expresado en $\frac{ft^3}{sk}$
9.611	constante dependiente de la cantidad de volumen del vaso de mezcla. Depende del equipo utilizado.
Requerimiento	expresado en $\frac{gal}{sk}$
ρ_{agua}	Densidad del agua de mezcla expresada en ppg.

Cálculo 9. Cantidad de agua de mezcla.

$$Cantidad_{agua} = \frac{9.611}{1.46 \frac{ft^3}{sk}} * 5.24 \frac{gal}{sk} * 8.31 ppg = 285.47 \text{ gr}$$

Por último se calculan las cantidades de aditivos, según API hay dos maneras de calcular las cantidades de aditivos y esto depende del estado en que se encuentren los mismos. La **Ecuación 11**, se utiliza para la determinación de las cantidades para los aditivos sólidos y la **Ecuación 12**, es utilizada para determinar las cantidades de los aditivos en estado líquido.

Ecuación 11. Cantidad de aditivos sólidos

$$aditivos_{sólidos} = \frac{0.09611}{rendimiento} * 94 * C_{ad.sol} = \frac{9.03434}{rendimiento} * C_{ad.sol}$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practices for testing well cements (API RP 10B). Junio 1 del 2011. Pág. 20.

Donde;

Rendimiento expresado en $\frac{ft^3}{sk}$
0.09611 constante dependiente de la cantidad de volumen del vaso de mezcla dividida en 100 para %BWOC. Depende del equipo utilizado.
94 libras que tiene un sk de cemento.
 $C_{ad.sol}$ Concentración aditivo solido expresada en %BWOC.

Ecuación 12. Cantidad de aditivos líquidos.

$$aditivos_{liquidos} = \frac{9.611}{rendimiento} * C_{ad.liq} * \rho_{liq}$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practices for testing well cements (API RP 10B). Junio 1 del 2011. Pág. 20.

Donde;

Rendimiento expresado en $\frac{ft^3}{sk}$
9.611 constante dependiente de la cantidad de volumen del vaso de mezcla dividida en 100 para %BWOC. Depende del equipo utilizado.
 ρ_{liq} Densidad de aditivo líquido, expresada en ppg.
 $C_{ad.liq}$ Concentración aditivo líquido, expresada en GPS ($\frac{gal}{sk}$).

Cálculo 10. Cantidades de los aditivos sólidos.

$$cantidad_{controlador\ filtrado} = \frac{9.03434}{1.46 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.17\ gr$$

$$cantidad_{retardador} = \frac{9.03434}{1.46 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.23\ gr$$

$$cantidad_{aditivo\ especial} = \frac{9.03434}{1.46 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.87\ gr$$

$$cantidad_{agente\ alivianante} = \frac{9.03434}{1.46 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 74.08\ gr$$

Cálculo 11. Cantidades de los aditivos líquidos.

$$Cantidad_{\text{controlador gas}} = \frac{9.611}{1.46 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5 \text{ GPS} * 8.30 \text{ ppg} = 27.24 \text{ gr}$$

$$Cantidad_{\text{antiespumante}} = \frac{9.611}{1.46 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01 \text{ GPS} * 8.31 \text{ ppg} = 0.546 \text{ gr}$$

Para efectos prácticos se tomaron unos pocos decimales en los cálculos, en el **Anexo B** se evidencian los resultados derivados de los cálculos referentes a todos los componentes de las lechadas, con todos los decimales.

Dentro de la **Tabla 4** se puede evidenciar la cantidad de cemento, agua y aditivos para 600 ml de una muestra de lechada con el actual diseño de 14ppg de la empresa Superior para un liner de 7" de Campo Castilla.

Tabla 4. Cantidades de cemento, agua y aditivos para diseño de lechada actual.

Lechada 1	
Producto	Peso (g)
Cemento	617.34
Agua	285.47
Antiespumante	0.546
Controlador de gas	27,24
Controlador de filtrado	6.17
Retardador	1.23
Aditivo especial	30,87
Agente alivianante	74.08

Determinación de la temperatura estática de fondo (BHST): tomando como referencia la profundidad de un pozo de castilla con una profundidad medida (MD) de 8564 ft y una profundidad vertical verdadera (TVD) de 7669 ft. Se calcula la temperatura de fondo con un gradiente de temperatura de 1.2F/ 100 ft, el cual es el determinado para Campo Castilla, de la siguiente forma:

Ecuación 13. Temperatura estática de fondo.

$$T_{fondo} = T_{amb} + (\nabla_{tem} \times TVD)$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practices for testing well cements (API RP 10B). Junio 1 del 2011. Pág. 41.

El **Cálculo 12** se obtiene reemplazando los datos dentro de la ecuación.

Cálculo 12. Temperatura estática de fondo.

$$T_{fondo} = 80 F + \left(1.2 \frac{F}{100 ft} \times 7669 ft \right)$$

$$T_{fondo} = 172 F$$

Determinación de la temperatura circulante de fondo (BHCT): tomando como referencia la profundidad de un pozo de castilla con una profundidad medida (MD) de 8564 ft y una profundidad vertical verdadera (TVD) de 7669 ft, se calcula la temperatura circulante de fondo.

Ecuación 14. Temperatura circulante

$$T_{circulante} = 80 F + \left(\frac{(0.006061 \times TVD \times \nabla tem) - 10.0915}{1.0 - (0.000015052 \times TVD)} \right)$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practices for testing well cements (API RP 10B). Junio 1 del 2011. Pág. 41.

El **Cálculo 13** se obtiene reemplazando los datos dentro de la ecuación.

Cálculo 13. Temperatura circulante.

$$T_{circulante} = 80 F + \left(\frac{\left(0.006061 \times 7669 \times 1.2 \frac{F}{100 ft} \right) - 10.0915}{1.0 - (0.000015052 \times 7669)} \right)$$

$$T_{circulante} = 130 F$$

3.3.2 Resultados de las pruebas para la lechada de cementación de 14.5 ppg sin nanomateriales. Realizando las pruebas de densidad, resistencia a la compresión, tiempo de bombeabilidad, perdida de filtrado y agua libre según el procedimiento establecido en la sección 3,2 a la lechada sin nanomateriales, se obtuvo como resultado la **Tabla 5**.

Tabla 5. Resultados de densidad, resistencia a la compresión, tiempo de bombeabilidad, pérdida de filtrado y agua libre para el diseño actual.

Lechada con diseño actual.	
Densidad	14,5 ppg
Resistencia a la compresión @ 24 h	2522 psi
Tiempo de bombeabilidad (70Bc)	6:56:30
Perdida de filtrado	24 API
Agua libre	0%

Para los tiempos de bombeabilidad se corrió dos veces la prueba, para determinar la repetitividad y de esta manera validar los datos obtenidos. Como el pozo de castilla tiene ángulo de desviación, la prueba de agua libre se realizó con la probeta a 45 grados.

Siguiendo el procedimiento establecido en la sección 3.2.5, se realizó la prueba de reología. Los resultados obtenidos se evidencian en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Resultados de la prueba de reología para el diseño actual.

Reologías lechada sin nanomateriales										
T°	Lectura	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Ascende	191	138	74	47	25	8	5	Vp	176,25
	Descend	191	136	73	46	24	6	4	Yp	14,75
130°F	Ascende	203	153	102	73	45	14	8	Vp	157,5
	Descend	203	148	94	68	40	9	6	Yp	45,5

Para la prueba de sedimentación se siguió el procedimiento 3.2.11 y se obtuvo como resultados la siguiente tabla. En donde la densidad se determinó mediante la **Ecuación 15** y el porcentaje mediante la **Ecuación 16**.

Ecuación 15. Determinación de la densidad por el método de Arquímedes.

$$Densidad = \left(\frac{Peso\ Seco}{Peso\ en\ Agua} \right) * \rho_{agua}$$

Donde;

Densidad es la densidad que se desea saber.

Peso seco es el peso de la muestra en seco.

Peso en agua es el peso de la muestra sumergida en agua.

Densidad del agua es 8.33 ppg

Ecuación 16. Determinación del porcentaje de sedimentación.

$$\text{Porcentaje sedimentación} = 100 - \left(\frac{\rho_{\text{determinada}} * 100}{\rho_{\text{lechada}}} \right)$$

Donde;

$\rho_{\text{determinada}}$ Es la densidad determinada a partir de la **Ecuación 15**.

ρ_{lechada} Es la densidad del diseño de lechada (14.5ppg)

Tabla 7. Resultados prueba de sedimentación para el diseño actual.

Sedimentación lechada sin nanosílice				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	31,19	31,82	32,44	35
Peso En Agua	18,25	17,99	17,86	19
Densidad	14,24	14,73	15,13	15,34
Porcentaje	1,82	1,61	4,35	5,83

En el **Anexo C** se evidencia el reporte de laboratorio para esta lechada de cementación.

4. MATRIZ DE VARIACIÓN DE ADITIVOS

En el siguiente capítulo se establecen las concentraciones de aplicabilidad de cada aditivo, los aditivos variables y fijos y la matriz de variación de nanomateriales. Se trabajó en base a las normas API y en trabajos realizados previamente por la compañía en el revestimiento de producción de Campo Castilla.

4.1 CONCENTRACIONES DE APLICABILIDAD

A continuación se tendrá en cuenta los aditivos que se agregaron a la lechada de cementación y las concentraciones de aplicabilidad en las cuales no producirá como consecuencias problemas operacionales o de desempeño de la lechada.

En la **tabla 8** se muestra las concentraciones que utiliza como referencia la empresa Superior Energy Services para la cementación de un revestimiento de producción.

Tabla 8. Concentraciones de aplicabilidad de los aditivos.

Aditivo	Rango establecido	Notas
Controlador de gas	0 - 3 gal/sk	Efectivo hasta temperaturas de 375°F
Controlador de filtrado	0.5 - 1.2 % BWOC	Efectivo hasta temperaturas de 212°F
Retardador	0.1 - 1.5% BWOC	Efectivo hasta temperaturas de 250°F
Agente alivianante	0.1 - *% BWOC	*La adición de este aditivo depende de las necesidades del cliente
Aditivo especial	0.1 - 10 % BWOC	Efectivo hasta temperaturas de 245 °F
Antiespumante	0.01 - 0.1 usado en muy pocas dosis gal/sk	Generalmente

4.2 ADITIVOS VARIABLES Y FIJOS

En esta sección se analizan los aditivos variables y fijos que se tuvieron en cuenta para la realización de las lechadas con nanomateriales, el concepto de variables y fijos es con base a la concentración de cada aditivo y no al peso.

4.2.1 Aditivos variables. Los aditivos variables hacen referencia a los aditivos cuyas concentraciones fueron cambiadas para modificar las propiedades de la lechada. En este trabajo de investigación el único aditivo variable es el nanosílice, el cual por recomendación del fabricante varía desde 0.5%BWOC hasta 5%BWOC.

NANOSÍLICE.

La sílice^{97,98} es el elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno; es un compuesto de silicio y oxígeno que se encuentra en casi todas las rocas; también es el componente principal de la arena, arenisca, cuarcita, granito, etc.

Este material, se puede presentar en dos formas principalmente, las cuales son: 1) en forma de sílice cristalina y 2) en forma de sílice amorfa. Dentro del primer grupo se pueden encontrar en forma de cuarzo, cristobalita, tridimita y trípoli; mientras que las amorfas se presentan principalmente en forma de tierra de diatomeas. La explotación de este material se da en canteras y ríos, mediante las rocas de éste material que allí se encuentran.

Por su parte un nanomaterial es un material cuya medida es del orden de nanómetros, lo cual indica que es una milésima parte de una micra (la cual es una milésima parte de un milímetro). Se considera nanomaterial a las partículas de hasta 100 nanómetros (nm); puede haber nano partículas de cualquier material.

El nanosílice o sílice coloidal es un nanomaterial en estado líquido o coloidal (debido a que sus partículas son tan pequeñas, que son volátiles y una manera de mantenerlas en superficie es en forma de coloide). Las características más importantes con las que cuenta el nanosílice son: alta absorción, características físicas estables, alta fuerza mecánica y puede funcionar en un amplio rango de temperaturas. Dentro de las industrias en las que se utiliza este nanomaterial se

⁹⁷ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA MME. “Glosario técnico minero”. Bogotá, Colombia, coordinación de INGEOMINAS. 2003

⁹⁸ EMPRESA AS ARENA SILICEA. Empresa explotadora y comercializadora de arena sílice. www.arenasilicea.com, Bogotá, Colombia. Enero. 2015

destacan⁹⁹ la industria de las pinturas (para aumentar la fuerza de la pintura, mantiene los colores de las pinturas durante un tiempo más largo y mejora el acabado), la industria de los adhesivos (para aumentar la viscosidad de los productos), en la industria textil (disminuir el envejecimiento de la prenda), en la agricultura (como agente de tratamiento de las semillas agrícolas), entre otras industrias.

En las lechadas de cementación ¹⁰⁰ el sílice ayuda a la hidratación rompiendo el compuesto gelatinoso que se forma alrededor de las partículas de cemento cuando se juntan con el agua, lo cual trae como efectos una buena resistencia a la compresión temprana, puede ser usado como acelerante, ayuda a la migración de gas, mejora el régimen turbulento sin necesidad de sólidos en suspensión y ayuda a mejorar la adherencia del cemento.

Ésta hidratación tiene una relación directa con el área de contacto de la sílice sobre el cemento. El sílice usualmente es encontrado en esferas, una esfera de micro sílice que mide 0.5 micras y tiene 25 m²/g de superficie va a ser más efectiva que una esfera de sílice y una esfera de nano sílice que mide 0.05 micras y tiene una superficie de 500m²/g va a ser mucho más efectiva que una de micro sílice. En el proceso de cementación esto se traduce en menos volumen y es de vital importancia en las operaciones de offshore porque el volumen de majeo y de almacenamiento se reducirá.

El nanosílice utilizado en este trabajo de investigación es el MasterRoc MS 685 de la empresa BASF, la cual¹⁰¹ “consiste en una mezcla líquida basada en una suspensión de nanosílice amorfa” y dentro de las propiedades que desarrolla en un cemento esta: mejora cohesión, reduce la presión de bombeo, reduce la porosidad y permeabilidad; y reduce la segregación de la mezcla, entre otras propiedades las cuales se pueden evidenciar en el **Anexo D** (ficha técnica y ficha de datos de seguridad del nanosílice).

⁹⁹ B.H Patel & P.N Patel. Synthesis and application of Nano – Sized SiO₂ to textiles. University of Baroda, Gujarat, India.

¹⁰⁰ ASHOK Santra. Influence of Nanomaterials in Oilwell Cement Hydration and Mechanical Properties. The Netherlands. 2012. SPE 156937.

¹⁰¹ BASF ficha técnica MasterRoc MS 685 suspensión de nanosílice precipitada, 2014

4.2.2 Aditivos fijos. Los aditivos fijos son aquellos cuyas concentraciones no varían a lo largo de las pruebas. Debido a que el objetivo es evaluar la implementación del nanosílice en las lechadas de cemento; la concentración de los otros aditivos va a ser constante a lo largo de las pruebas y estas concentraciones son las que tiene el actual diseño de lechada para el liner. De esta manera las concentraciones que se tienen se pueden evidenciar en la **Tabla 9**.

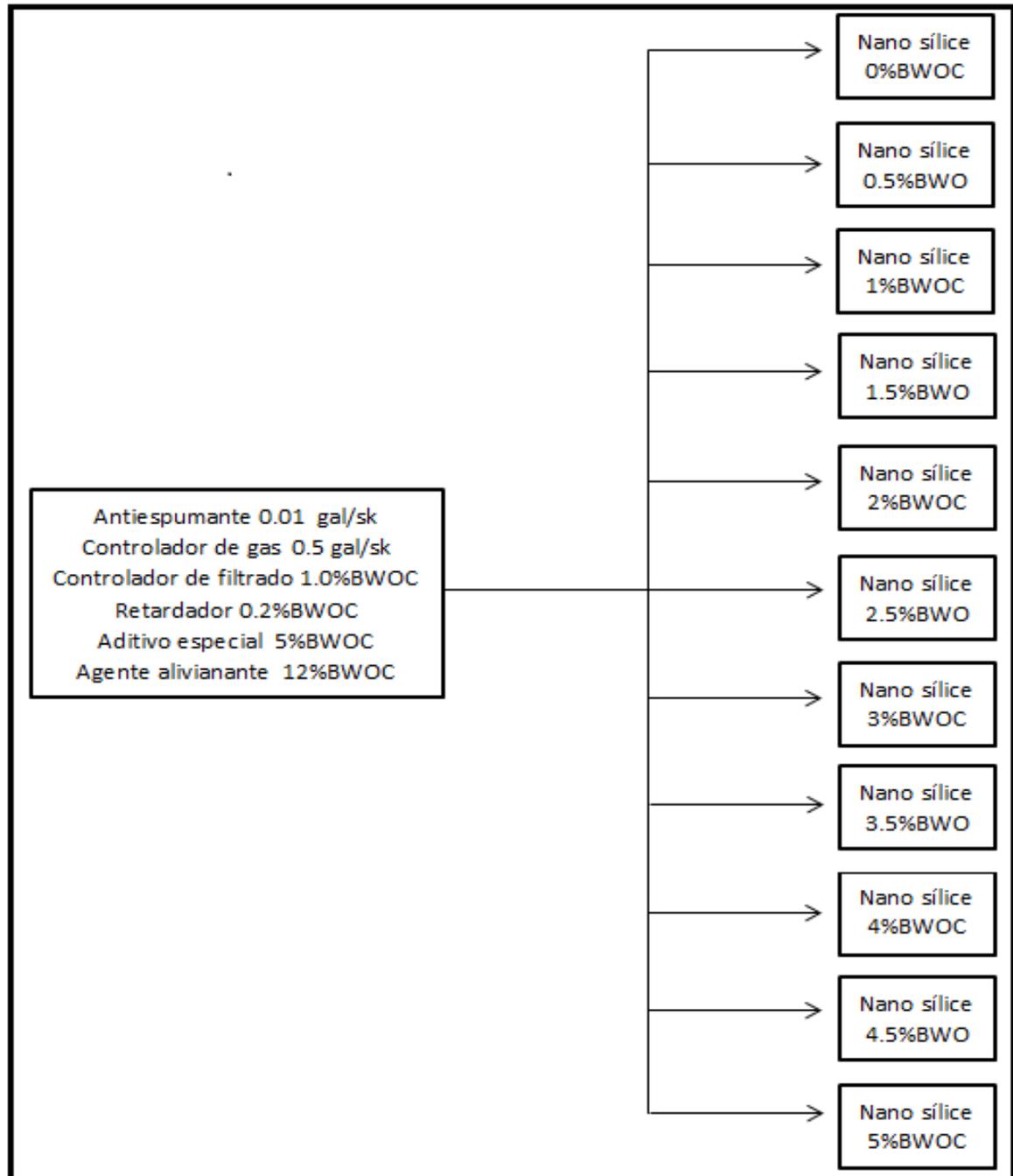
Tabla 9. Concentraciones de aditivos fijos.

Producto	Concentración
Antiespumante	0.01 gal / sk
Controlador de gas	0.5 gal / sk
Controlador de filtrado	1.0 % BWOC
Retardador	0.2 % BWOC
Aditivo especial	5 % BWOC
Agente alivianante	12 % BWOC

4.3 MATRIZ DE VARIACIÓN DE NANO MATERIALES

La matriz de variación se diseñó en base al aditivo variable, el nanosílice.

Figura 39. Matriz de variación.



4.3.1 Diseño de lechadas. Con base a la matriz anterior se creó una tabla en la cual se muestra la concentración de cada aditivo para cada diseño de lechada.

Tabla 10. Diseño de lechadas.

Diseño	Antiespumante (gal/sk)	Latex (gal/sk)	Controlador de filtrado (%BWOC)	Retardador (%BWOC)	Aditivo especial (%BWOC)	Agente alivianante (%BWOC)	Nanosilice (%BWOC)
1	0,01	0,5	1	0,2	5	12	0
2	0,01	0,5	1	0,2	5	12	0,5
3	0,01	0,5	1	0,2	5	12	1
4	0,01	0,5	1	0,2	5	12	1,5
5	0,01	0,5	1	0,2	5	12	2
6	0,01	0,5	1	0,2	5	12	2,5
7	0,01	0,5	1	0,2	5	12	3
8	0,01	0,5	1	0,2	5	12	3,5
9	0,01	0,5	1	0,2	5	12	4
10	0,01	0,5	1	0,2	5	12	4,5
11	0,01	0,5	1	0,2	5	12	5

El nano sílice, único aditivo variable tiene un rango entre 0 % BWOC hasta un 5% BWOC de concentración, en donde en cada lechada aumenta 0,5 % BWOC. Para los otros aditivos, los aditivos fijos, se mantuvo la misma concentración para todas las lechadas realizadas.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LECHADAS DISEÑADAS A PARTIR DE LA MATRIZ

En el presente capítulo se analizan las lechadas derivadas de la matriz de variación de los nanomateriales y se comparan entre sí, para seleccionar el diseño que se adapte mejor a las necesidades con las que actualmente cuenta la empresa Superior en las operaciones de cementación del revestimiento de producción en Campo Castilla. Al final del capítulo se realiza una comparación de la lechada utilizada actualmente con la lechada propuesta con nanomateriales, para determinar las ventajas o desventajas que este nuevo diseño proporciona.

5.1 EVALUACIÓN DE LOS DISEÑOS DE LECHADAS PROBADOS EN EL LABORATORIO

Basados en la matriz de variación de los nanomateriales descrita en el numeral 4.3 se realizaron los diseños de lechada, y posteriormente en el laboratorio se midieron las características que cada lechada proporciona. Los cálculos para los diseños propuestos, las cantidades de cemento, agua y aditivos a utilizar y los resultados de las pruebas de laboratorio se detallan en este numeral.

5.1.1 Cálculos de las cantidades de cemento, agua y aditivos para los diseños propuestos en la matriz. Los cálculos para los diferentes diseños de las lechadas se realizan por aditivo. Para una mejor visualización, no se escribirán en este numeral todos los decimales dentro de los cálculos. Los resultados de los cálculos con todos los decimales se aprecian en el **Anexo E**.

- Masa en base al peso del cemento.

Para el cálculo de la masa en base al peso del cemento, se toman las masas de los aditivos presentes en la lechada sin nanomateriales y se le suma la masa en base al peso del cemento del nanomaterial utilizado, la cual se determina multiplicando la masa en un saco de cemento por el porcentaje de peso en el cemento del aditivo, como se muestra en el **Cálculo 14**. El nanomaterial fue variado desde 0 %BWOC hasta 5 %BWOC, con escala de 0.5 %BWOC. El cálculo de las masas para todas las concentraciones se puede apreciar en el **Anexo F**.

Cálculo 14. Masa en base al peso del cemento del nanomaterial.

$$m_{\text{nanomaterial } 0.5\%BWOC} = 94 \frac{lb}{sk} * 0.5\% = 0.47 \frac{lb}{sk}$$

- Volumen ocupado por la masa con base al peso del cemento.

Para el cálculo del volumen ocupado por la masa con base al peso del cemento, a los volúmenes de los aditivos presentes en la lechada sin nanomateriales se le suma el volumen de la masa en base al peso del cemento del nanomaterial utilizado. Este cálculo se realiza dividiendo la masa calculada anteriormente en la densidad del nanomaterial que es de 10.829 ppg, tal como se aprecia en el **cálculo 15**. El cálculo del volumen para todas las concentraciones se puede apreciar en el **Anexo G**.

Cálculo 15. Volumen ocupado por la masa con base al peso del cemento para cada concentración de nanomaterial.

$$v_{nanomaterial\ 0.5\%BWO C} = \frac{0.47 \frac{lb}{sk}}{10.829\ ppg} = 0.0434 \frac{gal}{sk}$$

- Σm de los diseños de lechada con nanomaterial.

Para realizar Σm de los diseños con nanomateriales se suma la masa con base al peso del cemento del nanomaterial a la sumatoria que ya se tenía para la lechada sin nanomateriales, como se detalla en el **Cálculo 16**. El cálculo de Σm para todas las concentraciones se puede apreciar en el **Anexo H**.

Cálculo 16. Σm Diseños de lechada con nanomaterial.

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 0.5\%BWO C} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 0.47 \frac{lb}{sk} = 115.728 \frac{lb}{sk}$$

- Σv de los diseños de lechada con nanomaterial.

Para realizar Σv de los diseños con nanomateriales se suma el volumen de la masa en base al peso del cemento del nanomaterial a la sumatoria que ya se tenía para la lechada sin nanomateriales, como se muestra en el **Cálculo 17**. El cálculo de Σv para todas las concentraciones se puede apreciar en el **Anexo I**.

Cálculo 17. Σv Diseños de lechada con nanomaterial.

$$\Sigma v_{nanomaterial\ 0.5\%BWO C} = 5.717 \frac{gal}{sk} + 0.0434 \frac{gal}{sk} = 5.761 \frac{gal}{sk}$$

- Requerimiento de agua para los diseños de lechada con nanomaterial.

Para calcular el requerimiento de agua para los diseños con nanomateriales se utiliza la **Ecuación 8**, tal como se ve en **Cálculo 18**. El cálculo de requerimiento de agua para todas las concentraciones se puede apreciar en el **Anexo J**.

Cálculo 18. Requerimiento de agua para los diseños de lechadas con nanomaterial.

$$v_{agua\ nanom\ 0.5\%BWO C} = \frac{115.728 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 5.761 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 5.20 \frac{gal}{sk}$$

- Rendimiento de las lechadas con nanomaterial.

Para calcular el rendimiento de cada lechada se calcula el volumen total de la lechada, sumando el volumen de los aditivos y el cemento (Σv) con el volumen de agua en cada lechada (requerimiento de agua) y dividiendo este valor en 7.48, resolviendo la **Ecuación 1**. El **Cálculo 19** muestra el rendimiento de la lechada de 0.5%BWO C de nanomateriales, los cálculos de requerimiento de agua para todas las otras concentraciones se pueden apreciar en el **Anexo K**.

Cálculo 19. Rendimiento de las lechadas con nanomaterial

$$Rendimiento_{0.5\%BWO C} = \frac{5.761 \frac{gal}{sk} + 5.20 \frac{gal}{sk}}{7.48 \frac{gal}{ft^3}} = 1.47 \frac{ft^3}{sk}$$

- Cantidad de cemento para 600ml de lechada con nanomaterial.

Con la **Ecuación 9** (Cantidad de cemento a partir del rendimiento) y con el valor de rendimiento para las diferentes lechadas, se calcula la cantidad de cemento para cada lechada, como se muestra en el **Cálculo 20**. El cálculo de cantidad de cemento para todos los diseños se puede apreciar en el **Anexo L**.

Cálculo 20. Cantidad de cemento para 600ml de lechada con nanomaterial.

$$masa_{cemento\ 0.5\%BWO C\ nanom} = \frac{903.434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} = 616.34\ gr$$

- Cantidad de agua para 600ml de lechada con nanomaterial.

Con la **Ecuación 10** y con el valor de rendimiento para las diferentes lechadas, se calcula la cantidad de agua de mezcla para cada lechada, como se muestra en el **Cálculo 21**. El cálculo de cantidad de agua para 600 ml de lechada de todos los diseños se puede apreciar en el **Anexo M**.

Cálculo 21. Cantidad de agua para 600ml de lechada con nanomaterial.

$$masa_{agua\ 0.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 5.20 \frac{gal}{sk} * 8.31 ppg = 283.61\ gr$$

- Cantidad de aditivos sólidos para 600ml de lechada con nanomateriales.

Para calcular la cantidad de aditivos solidos (retardador, controlador de filtrado, aditivo especial y agente alivianante) se utiliza la **Ecuación 11**, como se aprecia en el **Cálculo del 22 al 25**. El cálculo de cantidad de aditivos sólidos de todos los diseños se pueden apreciar en los **Anexos del N al P**.

Cálculo 22. Cantidad de retardador para 600ml de lechada con nanomateriales.

$$masa_{retardador\ 0.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWO = 1.23\ gr$$

Cálculo 23. Cantidad de controlador de filtrado para 600ml de lechada con nanomateriales.

$$masa_{cont\ f\ 0.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWO = 6.16\ gr$$

Cálculo 24. Cantidad de aditivo especial para 600ml de lechada con nanomateriales.

$$masa_{ad.esp\ 0.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWO = 30.82\ gr$$

Cálculo 25. Cantidad de agente alivianante para 600ml de lechada con nanomateriales.

$$masa_{age.ali\ 0.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWO = 73.96\ gr$$

- Cantidad de aditivos líquidos para 600ml de lechada con nanomateriales.

Para calcular la cantidad de aditivos líquidos (controlador de gas y antiespumante) se utiliza la **Ecuación 12**, como se puede observar en los **Cálculo 26 y 27**. El cálculo de cantidad de aditivos líquidos de todos los diseños se pueden apreciar en los **Anexos del Q al R**.

Cálculo 26. Cantidad de controlador de gas para 600ml de lechada con nanomateriales.

$$masa_{Con.g\ 0.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 27.20\ gr$$

Cálculo 27. Cantidad de antiespumante para 600ml de lechada con nanomateriales.

$$masa_{anties\ 0.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.55\ gr$$

- Cantidad de nanomateriales para 600ml de las diferentes lechadas.

Para calcular la cantidad de nanomateriales se utiliza la **Ecuación 11**. Se calcula de esta manera, porque aunque el nanosílice es un aditivo líquido, las unidades con las que se trabaja este aditivo por recomendación de fabricante, son unidades para aditivos sólidos (%BWOC). La cantidad de nanomaterial se puede apreciar en el **Cálculo 28**. El cálculo de cantidad de nanomateriales para todos los diseños se pueden apreciar en el **Anexo S**.

Cálculo 28. Cantidad de nanomateriales para 600ml de las diferentes lechadas.

$$masa_{nanomaterial\ 0.5\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\%BWOC = 3.08\ gr$$

5.1.2 Tabla resumen con las cantidades de cemento, agua y aditivos. En la **Tabla 11** se encuentra el resumen con las cantidades de cemento, agua y aditivos para todos los diseños derivados de la matriz de variación de nanomateriales. Las concentraciones de los aditivos fijos son 0.01 GPS de antiespumante, 0.5 GPS de controlador de gas, 1%BWOC de controlador de filtrado, 0.2%BWOC de retardador, 5%BWOC de aditivo especial y 12%BWOC de agente alivianante.

Tabla 11. Cantidades de cemento, agua de mezcla y aditivos para los diseños derivados de la matriz de variación de nanomateriales.

Nano material (%BWO C)	Cement (gr)	Agua (gr)	Retardado (gr)	Controlado de filtrado (gr)	Aditivo especial (gr)	Agente alivianant (gr)	Controlador de gas (gr)	Antiesp (gr)	Nanosílic (gr)
0.5	616.34	283.61	1.23	6.16	30.82	73.96	27.20	0.55	3.08
1	615.35	281.75	1.23	6.15	30.77	73.84	27.16	0.54	6.15
1.5	614.36	279.90	1.23	6.14	30.72	73.72	27.11	0.54	9.22
2	613.38	278.06	1.23	6.13	30.67	73.61	27.07	0.54	12.27
2.5	612.40	276.22	1.22	6.12	30.62	73.49	27.03	0.54	15.31
3	611.42	274.38	1.22	6.11	30.57	73.37	26.98	0.54	18.34
3.5	610.45	272.56	1.22	6.10	30.52	73.25	26.94	0.54	21.37
4	609.43	270.73	1.22	6.09	30.47	73.14	26.90	0.54	24.38
4.5	608.51	268.92	1.22	6.09	30.43	73.02	26.85	0.54	27.38
5	607.54	267.11	1.22	6.08	30.38	72.90	26.81	0.54	30.38

5.1.3 Evaluación de los diseños de lechada derivados de la matriz de variación de nanomateriales. En esta sección se muestran los resultados obtenidos al evaluar los diferentes diseños derivados de la matriz de variación de nanomateriales en las pruebas de laboratorio.

- **Lechada con 0.5%BWOC de nanomateriales.**

Mezclando el cemento, el agua y los aditivos con sus respectivas cantidades evidenciadas en la **Tabla 12**, se obtiene la muestra de lechada para la concentración de 0.5%BWOC de nanomateriales, la cual se evalúa en las diferentes pruebas de laboratorio.

Tabla 12. Cantidades de cemento, agua y aditivos para la lechada con 0.5%BWOC.

Lechada con 0.5%BWOC	
Producto	Peso (g)
Cemento	616.34
Agua	283.61
Antiespumante	0.55
Controlador de gas	27,20
Controlador de filtrado	6,16
Retardador	1,23
Aditivo especial	30,82
Agente alivianante	73,96
Nanosílice	3,08

Realizando las pruebas de densidad, resistencia a la compresión, tiempo de bombeabilidad, pérdida de filtrado y agua libre según el procedimiento establecido en la sección 3,2 a la lechada con 0.5%BWOC de nanomateriales, se obtuvo como resultado la **Tabla 13**.

Tabla 13. Resultados de densidad, resistencia a la compresión, tiempo de bombeabilidad, pérdida de filtrado y agua libre para la lechada con 0.5%BWOC.

Propiedades Lechada con 0.5% BWOC	
Densidad	14,5 ppg
Resistencia a la compresión a 24 h	2624 psi
Tiempo de bombeabilidad (70Bc)	6:39:30
Pérdida de filtrado	22,8 API
Agua libre	0%

Para los tiempos de bombeabilidad se realizó dos veces la prueba, para determinar la repetitividad y de esta manera validar los datos obtenidos. Como el pozo de castilla tiene ángulo de desviación, la prueba de agua libre se realizó con la probeta a 45 grados.

Siguiendo el procedimiento establecido en la sección 3.2.5, se realizó la prueba de reología. Los resultados obtenidos se evidencian en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Resultados de la prueba de reología para la lechada con 0.5%BWOC.

Reologías lechada con 0.5% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura 1	203	139	75	48	25	7	5	Vp	189,75
	Lectura2	203	143	78	49	26	7	5	Yp	13,25
130°F	Lectura 1	210	165	124	90	56	17	10	Vp	133,5
	Lectura2	210	165	118	84	53	14	7	Yp	76,5

Para la prueba de sedimentación se siguió el procedimiento 3.2.11 y se obtuvo como resultados la siguiente tabla. En donde la densidad se determinó mediante la **Ecuación 15** y el porcentaje mediante la **Ecuación 16**.

Tabla 15. Resultados prueba de sedimentación para la lechada con 0.5%BWOC.

Sedimentación lechada con 0.5% BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	28,82	29,5	30,89	32,67
Peso En Agua	19,41	18,1	18,71	18,13
Densidad	12,37	13,58	13,75	15,01
Porcentaje	14,70	6,37	5,15	3,52

En donde el segmento 1 corresponde al tope de la muestra curada y el segmento 4 corresponde al fondo.

En el **Anexo T** se evidencia el reporte de laboratorio para todas las lechadas de cementación con nanosílice y en los **Anexos del U al AC**, se pueden evidenciar los cuadros referentes a los resultados de las pruebas para cada lechada.

5.1.4 Tabla resumen de los resultados de laboratorio de los diferentes diseños de lechada. Dentro de la **Tabla 16** y la **Tabla 17**, se compilan los datos de los resultados derivados de las pruebas de laboratorio para los diferentes diseños de lechadas derivados de la matriz de variación de nanomateriales.

Tabla 16. Resumen resultados de reologías para lechadas con nanomateriales.

Nanomateriales (% BWOC)	Reologías @ BHCT								
	RPM								Vp
	300	200	100	60	30	6	3		
0	203	151	98	71	43	12	7	158	46
0,5	210	165	121	87	55	16	9	134	77
1	225	180	102	72	44	15	9	185	41
1,5	230	175	111	78	48	18	11	179	51
2	240	193	112	79	50	19	12	192	48
2,5	250	196	118	90	61	19	10	198	52
3	300	228	145	111	75	30	16	233	68
3,5	300	246	157	118	83	43	35	215	85
4	300	233	151	114	80	43	31	224	77
4,5	300	217	142	106	78	43	34	237	63
5	300	230	150	115	88	49	38	226	74

Tabla 17. Resumen resultados de resistencia a la compresión, tiempo de bombeabilidad, pérdida de filtrado y sedimentación para lechadas con nanomateriales.

Nanomateriales (% BWOC)	Resistencia a la compresión (Psi)	Tiempo de bombeabilidad (h:m:s)	Pérdida de filtrado (API)	Sedimentación (%)
0	2522	6:56:30	24	5,83
0,5	2624	6:39:30	22,8	14,7
1	2742	6:07:00	24	8,63
1,5	2755	5:38:30	23,2	8,86
2	2581	5:50:00	22,8	3,13
2,5	2797	5:33:30	22,2	7,98
3	2856	5:24:30	22,6	4,04
3,5	2902	5:13:30	23,6	2,79
4	2963	5:27:00	22,8	9,07
4,5	3051	5:28:30	23,6	5,16
5	2908	5:06:00	23,6	5,49

5.1.5 Análisis de los resultados de laboratorio de los diferentes diseños de lechada. En esta sección se analizan las propiedades desarrolladas por las lechadas de cementación derivadas de la matriz de variación de los nanomateriales, también se compara el comportamiento de cada propiedad en función de la concentración de nanomaterial que la lechada tenga.

- **Densidad**

La densidad de todas las lechadas de cementación fue 14.5 ppg. Esta prueba rectifica que el balance de masa, el procedimiento de pesado y la mezcla se realizaron de buena manera.

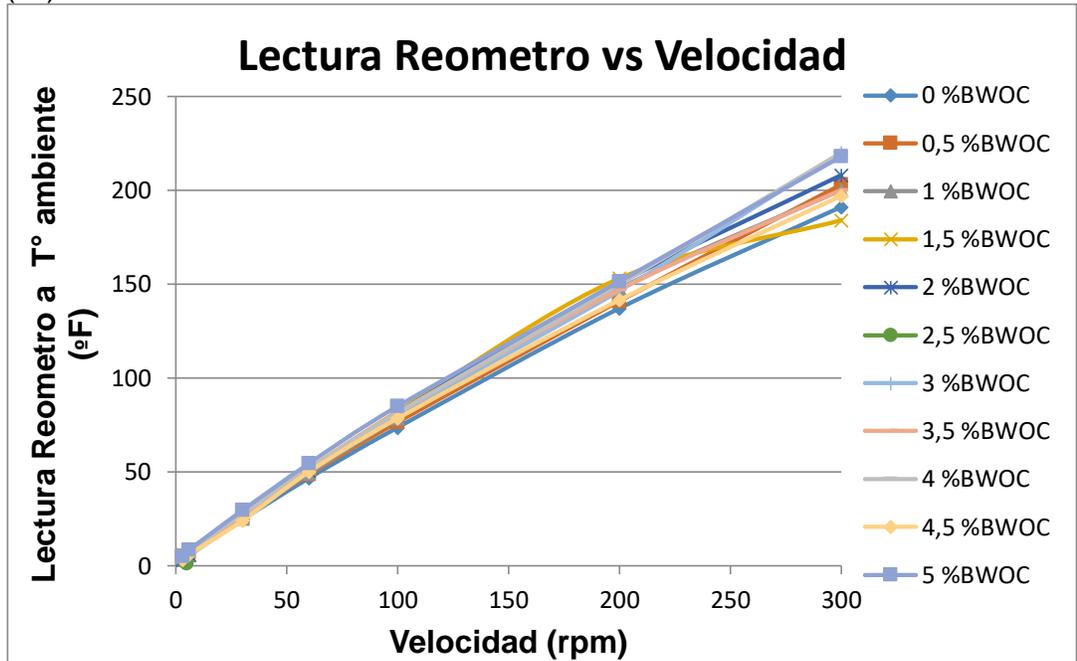
También, con esta prueba se garantiza que la formación no va a sufrir fracturas inducidas como consecuencia de la presión hidrostática ejercida por la lechada de cementación.

- **Reología**

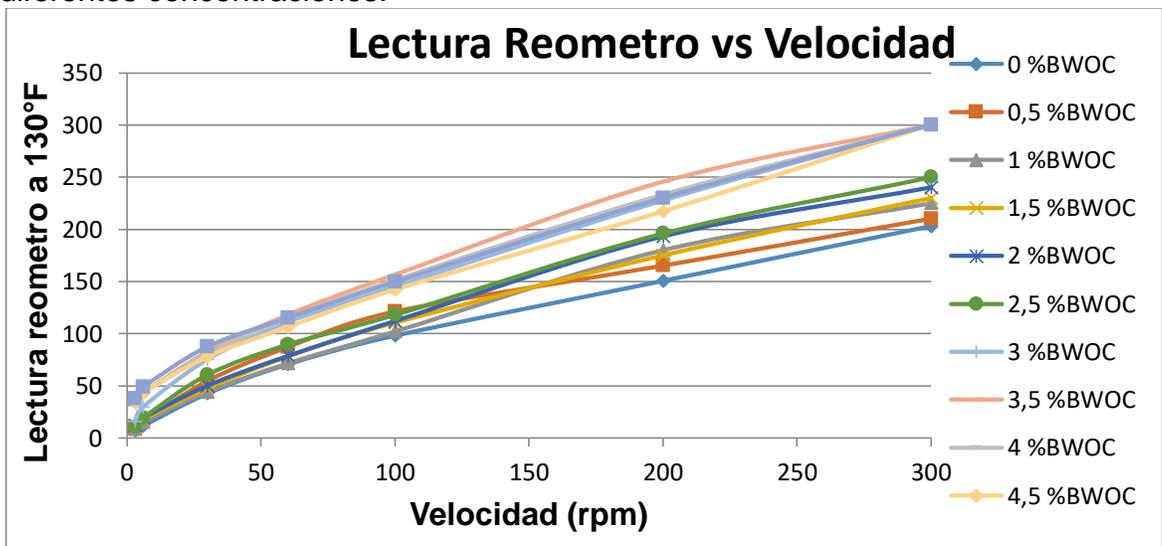
Como se puede observar en las **Grafica 1** y **Grafica 2**, originadas a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de reologías, se puede contemplar que el aditivo añadido (nanosílice), es un aditivo que solo mejora las propiedades reológicas a temperatura circulante, a temperatura ambiente el comportamiento de todas las concentraciones incluida la lechada que no tiene nanosílice es similar. En

consecuencia, se determina que el nanosílice trabaja en un rango de temperatura para mejorar la reología, y esté rango es superior a la temperatura ambiente e inferior a la temperatura circulante (130°F).

Grafica 1. Lectura reometro vs velocidad (rpm) a temperatura ambiente (°F) de las lechadas con diferentes concentraciones.

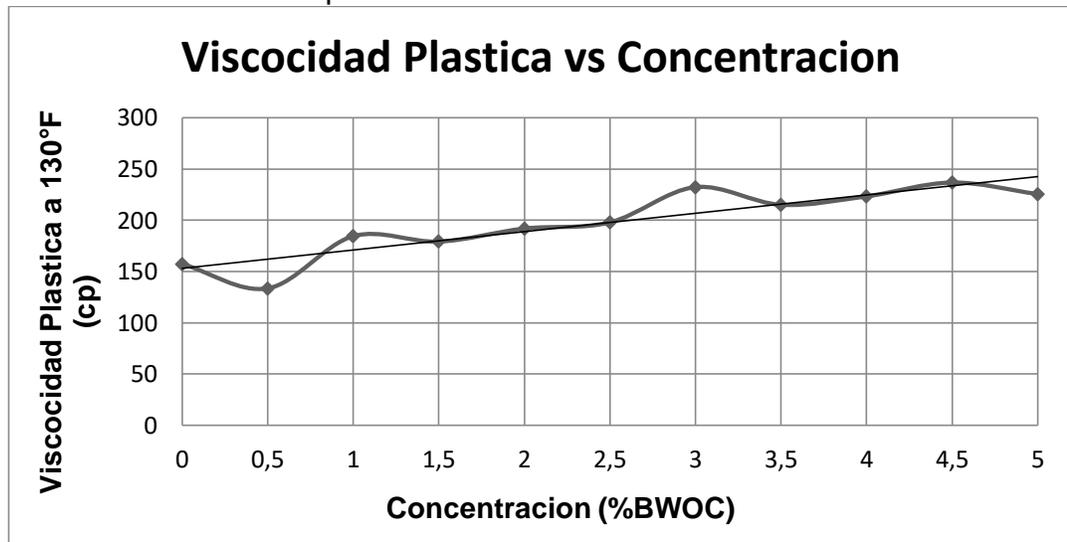


Grafica 2. Lectura reometro a temperatura circulante (130°F) de las lechadas con diferentes concentraciones.



En cuanto al comportamiento de la viscosidad plástica, que es la medida de la fricción creada por el fluido e indica la concentración de sólidos presentes en la lechada. Se puede establecer que la relación de ésta con la concentración de nanosílice es de forma directa. A medida que aumenta la concentración de nanosílice, también la viscosidad plástica tiende a aumentar. Tal como se aprecia en la **Grafica 3**.

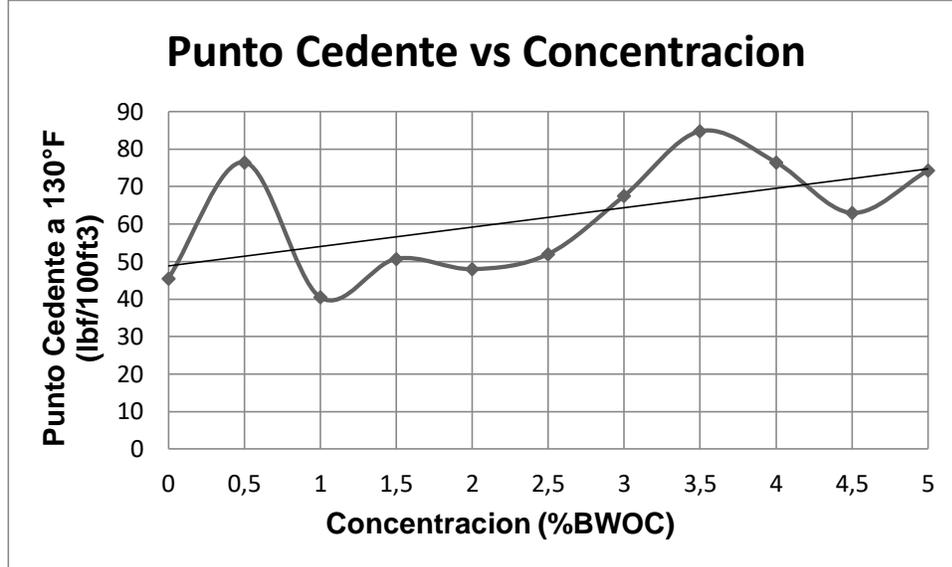
Grafica 3. Viscosidad plástica a BHCT vs concentración de Nanosílice.



Para el punto cedente, que es la medida de atracción de las moléculas en las lechadas de cemento e indica la resistencia del fluido a fluir, se puede establecer, como conclusión de la línea de tendencia, que existe una relación directa de este parámetro con la concentración de nanosílice. Sin embargo, hay una gran dispersión de los datos los cuales pueden ser consecuencia de una mala manipulación en el laboratorio.

Cabe anotar que todas las medidas de puntos cedentes a temperatura circulante, a excepción del derivado de la lechada con 1%BWOC, son superiores al de la lechada sin nanosílice. Esto puede ser evidenciado en la **Grafica 4**.

Grafica 4. Punto cedente a BHCT vs concentración de nanosílice.



- **Resistencia a la compresión**

Dentro de los resultados obtenidos para la prueba de resistencia la compresión, se puede establecer que entre la concentración de los nanomateriales y la resistencia a la compresión que la lechada de cemento desarrollo a las 24 horas, existe una correlación de forma directa.

Esto se debe a que la sílice ayuda a la hidratación del cemento rompiendo el compuesto gelatinoso que se forma alrededor de las partículas de cemento cuando se juntan con el agua, lo cual se traduce en una buena resistencia a la compresión temprana. El rompimiento del compuesto gelatinoso se da por el contacto de éste con la sílice, por lo que se deduce que debido al área de contacto que una esfera de nanosílice tiene ($500\text{m}^2/\text{g}$) con respecto a la que una esfera de sílice tiene ($25\text{m}^2/\text{g}$)¹⁰², la esfera de nanosílice será mucho más eficiente al momento de romper el compuesto gelatinoso formado en el cemento, y de esta manera la resistencia a la compresión temprana será mayor.

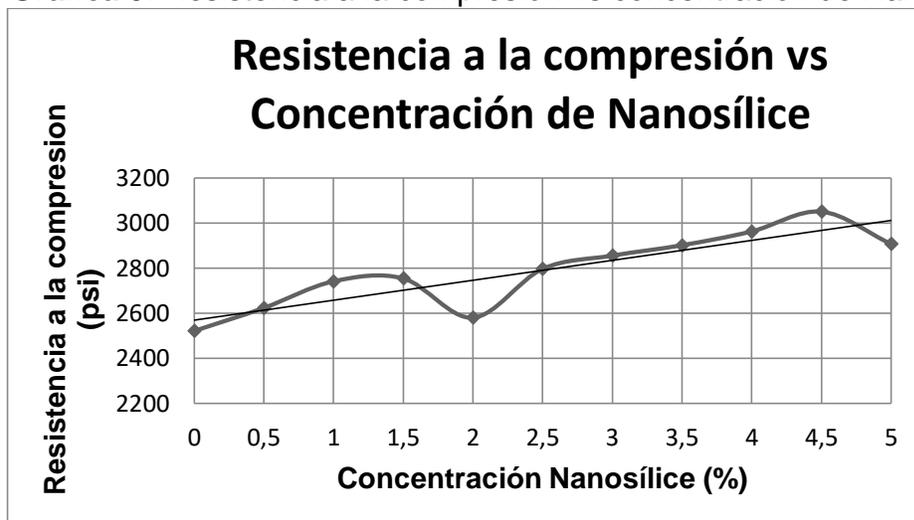
La resistencia a la compresión a 24 horas de la lechada sin nanomateriales comparada con la lechada que tiene 2.5%BWOC de nanomateriales aumenta 275 psi (de 2522 psi a 2797 psi), aumentando un 11% la resistencia en comparación a la compresión original. Realizando este mismo cálculo para la lechada con 4.5%BWOC de nanomateriales (Lechada con mayor desarrollo de resistencia a la compresión) se determina que el aumento es de 597 psi, un 21% adicional de la original. En cuanto al tiempo de desarrollo de la resistencia a la compresión para las

¹⁰². XUEYU PANG, Peter J. Boul and CUELLO JIMENEZ, Walmy. Nanosilicas as Accelerators in oilwell Cementing at Low Temperatures. IADC/SPE. 2014. Pág. 8 SPE 168037.

mismas lechadas, se puede establecer que la lechada de 4,5 %BWOC de nanomateriales comenzó a desarrollar resistencia a la compresión a las 14 horas aproximadamente, la lechada de 2,5%BWOC a las 17 horas y media aproximadamente; y la lechada sin nanomateriales a las 16 horas, este tiempo de comienzo del desarrollo de la resistencia a la compresión está relacionado con los resultados obtenidos en las pruebas de tiempo de bombeabilidad. Estos cambios con respecto a la original se deben a la adición de la nanosílice, ya que los demás aditivos permanecen en concentraciones constantes.

En la **Grafica 5** se puede ver el comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la concentración de nanosílice.

Grafica 5. Resistencia a la compresión vs concentración de Nanosílice,



En base a la **Grafica 5** se puede establecer una relación de forma directa entre la concentración de nanosílice y la resistencia a la compresión. Los datos derivados de las pruebas para los valores de 2% y 5% se consideran despreciables, debido a que se salen de la tendencia.

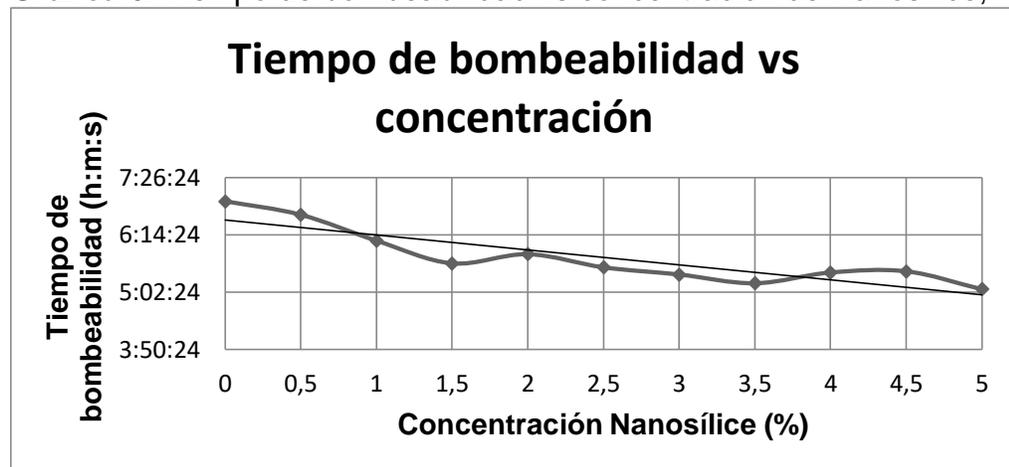
- **Tiempo de bombeabilidad**

De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de bombeabilidad para las lechadas con diferentes concentraciones de nanomaterial, se puede establecer que entre la concentración de los nanomateriales y el tiempo de bombeabilidad hay una correlación de forma indirecta. Esto al igual que la resistencia a la compresión está relacionado con la hidratación del cemento, la cual es acelerada por la adición de sílice en el diseño. De esta manera el sílice actúa como un acelerante, pero la ventaja que tiene este material actuando como acelerante, es que los efectos en tiempos posteriores al fragüe no afecta en la permeabilidad del cemento.

El tiempo de bombeabilidad de la lechada sin nanomateriales fue de 6h 56m 30s hasta alcanzar los 70 Bc; para lograr esta consistencia la lechada con 2.5%BWOC se demoró 5h 33m 30s y la de 5%BWOC lo hizo en 5h 06m 00s. El tiempo de bombeabilidad de la lechada de 5%BWOC, aun estando en los parámetros exigidos por Ecopetrol, es muy corto; ya que el tiempo teórico necesario es de 5h 00m 00s, obteniendo de esta manera un tiempo de seguridad de solo 6m con este diseño propuesto. La disminución del tiempo original en comparación con el de 2.5%BWOC es de 1h 22m (20%) y con respecto a la lechada con 5%BWOC es de 1h 50m 30s (26%).

En la **Grafica 6** se puede ver el comportamiento del tiempo de bombeabilidad en función de la concentración de nanosílice.

Grafica 6. Tiempo de bombeabilidad vs concentración de Nanosílice,

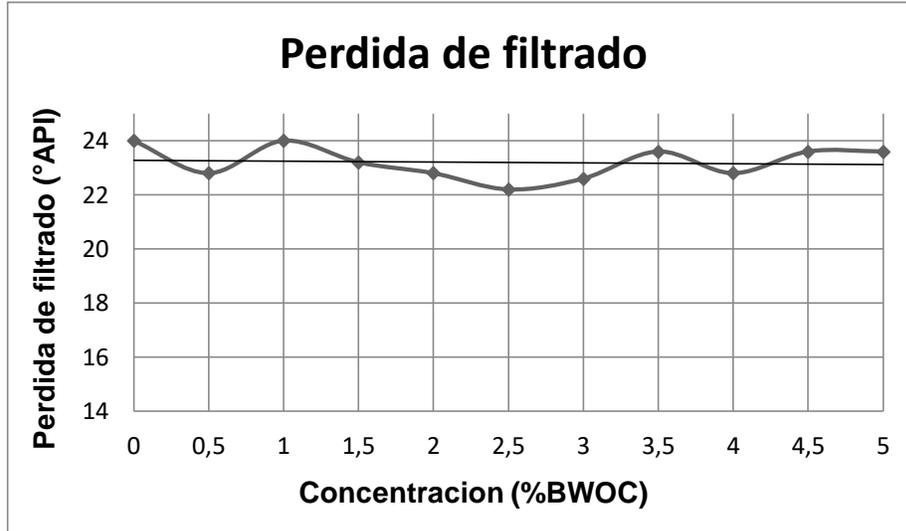


En base a la **Grafica 6** se puede establecer una relación de forma indirecta entre la concentración de nanosílice y el tiempo de bombeabilidad. Estas pruebas se realizaron dos veces y se promediaron, esto con el fin de obtener una repetitividad en los datos.

- **Perdida del filtrado**

El comportamiento de la prueba de perdida de filtrado es constante en relación a la concentración de nanosílice como se puede observar en la **Grafica 7**.

Grafica 7. Perdida del filtrado vs concentración de nanosílice.

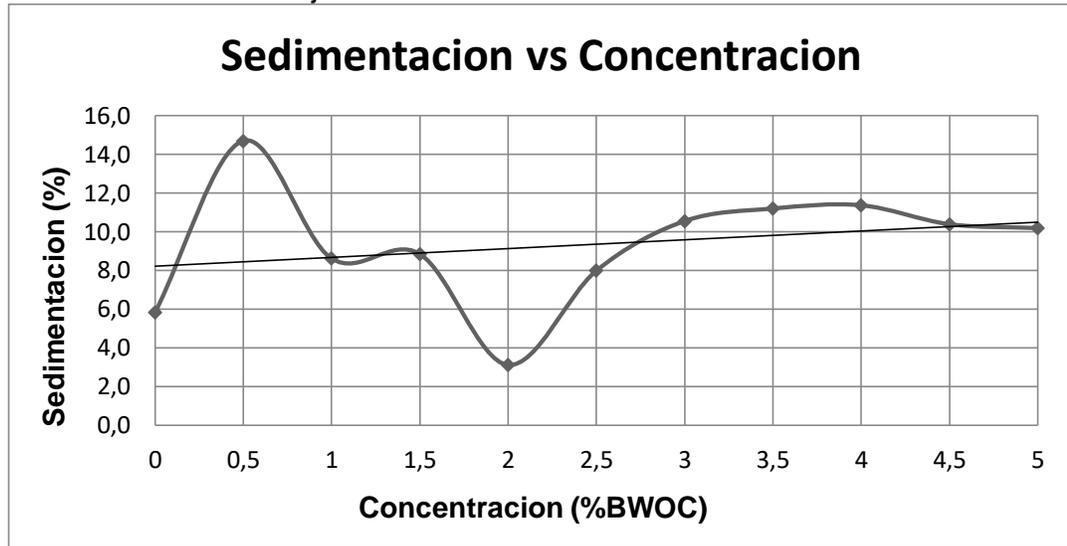


De esta manera se determina que el aditivo utilizado no influye en la pérdida del filtrado.

- **Sedimentación**

Según la prueba de sedimentación, se puede establecer que la concentración de nanosílice no tiene relación con la sedimentación que la lechada pueda presentar. En la **Grafica 8**. Se puede observar el comportamiento del porcentaje de sedimentación en relación a la concentración de los nanomateriales.

Grafica 8. Porcentaje de sedimentación vs concentración de Nanosílice.



Nota: Los porcentajes que se colocan en la **Tabla 17** y que se grafican en la **Grafico 8** son los máximos porcentajes obtenidos en una sección de la muestra curada, no la sedimentación de cada lechada.

- **Agua libre**

El valor determinado a partir de las pruebas de agua libre para todas las lechadas con diferentes concentraciones de nanosílice fue cero; valor estipulado por la empresa Ecopetrol para los trabajos de cementación en un liner de 7" en Campo Castilla.

5.2 MATRIZ COMPARATIVA ENTRE LAS LECHADAS DE CEMENTO CON NANO MATERIALES

Para desarrollar este capítulo, se establece utilizar una matriz de Pugh para la comparación de las lechadas. Esta matriz se utiliza para la toma de decisiones sobre el desarrollo de un nuevo producto, debido a que se basa en un estudio comparativo de las diferentes propiedades y de esta manera al final determinar la opción que tenga mejores características.

En en la fila superior de la matriz se colocan los criterios que se van a evaluar, en este caso sería el agua libre, la reología, la pérdida de filtrado, la sedimentación, el tiempo de bombeabilidad y la resistencia a la compresión. En la primera columna se colocan las diferentes alternativas que son evaluadas; en este caso serían las lechadas con diferentes concentraciones.

Se asume como base, las propiedades desarrolladas por la lechada que no tiene nanosílice, y a partir de esta se evalúan los diferentes criterios con las siguientes puntuaciones:

- 1 Si el criterio de la lechada evaluada es mayor a la base.
- 0 Si el criterio de la lechada evaluada es igual a la base.
- 1 Si el criterio de la lechada evaluada es menor a la base.

En la **Tabla 18**. Se puede determinar el desarrollo de la matriz. Para la prueba de tiempo de bombeabilidad se tiene como parámetro el aceptado por Ecopetrol, en el cual, la única lechada que no cumple con esta exigencia es la lechada con 5%BWOC de nanosílice.

Tabla 18. Matriz comparativa entre las lechadas de cemento con nano materiales.

%BWOC	AGUA LIBRE	REOLOGÍA	PÉRDIDA DE FILTRADO	SEDIMENTACIÓN	TIEMPO DE BOMBEABILIDAD	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
0,5%	0	1	0	-1	0	1
1,0%	0	1	0	-1	0	1
1,5%	0	1	0	-1	0	1
2,0%	0	1	0	1	0	1
2,5%	0	1	0	-1	0	1
3,0%	0	1	0	1	0	1
3,5%	0	1	0	1	0	1
4,0%	0	1	0	-1	0	1
4,5%	0	1	0	1	0	1
5,0%	0	1	0	1	-1	1

5.3 FORMULACIÓN DEFINITIVA DE UN DISEÑO DE LECHADA CON NANO MATERIALES (NANOSÍLICE)

Sumando todos los valores de las lechadas en la matriz comparativa para cada lechada, se determina la mejor opción, la cual será la que tenga mayor puntuación. Como se evidencia en la **Tabla 19**. Hay 4 opciones las cuales tienen el mayor puntaje.

Tabla 19. Total de puntajes por lechada.

FACTORES	TOTAL
LECHADA 0,5%BWOC	1
LECHADA 1,0%BWOC	1
LECHADA 1,5%BWOC	1
LECHADA 2,0%BWOC	3
LECHADA 2,5%BWOC	1
LECHADA 3,0%BWOC	3
LECHADA 3,5%BWOC	3
LECHADA 4,0%BWOC	1
LECHADA 4,5%BWOC	3
LECHADA 5,0%BWOC	2

Teniendo en cuenta la matriz comparativa, las cuatro lechadas que mejoraron más propiedades son las de 2, 3, 3.5 y 4.5%BWOC. Para determinar un solo diseño, lo segundo que se hace es determinar las exigencias de Ecopetrol para una lechada de la sección del revestimiento de producción de Campo Castilla, las cuales se pueden ver en la **Tabla 20**.

Tabla 20. Exigencias de Ecopetrol para la lechada de un revestimiento de producción en Campo Castilla.

PARÁMETROS	LECHADA
DENSIDAD (ppg)	14,5 – 16
TIEMPO DE BOMBEABILIDAD (70 Bc) Hr:Min	05:00 – 07:00
REOLOGIA (visc. Plastica y punto cedente)	MAYOR QUE ESPACIADOR.
AGUA LIBRE (%)	0%
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 24 HRS (psi)	2000
FILTRADO (API)	MENOR DE 50

Debido a que las cuatro lechadas cumplen de buena manera con las propiedades exigidas por Ecopetrol, se determina que estas cuatro lechadas cumplen con el propósito de esta investigación. Sin embargo, para seleccionar un solo diseño, se observa que la lechada de 4.5% BWOC de nanosilice es la mejor opción debido a que este diseño tuvo el valor de resistencia a la compresión más alto (3051 psi) y mejores propiedades reológicas en comparación a los otros tres diseños.

5.3.1 Diseño final. Como diseño final se eligió la lechada de 4,5% BWOC, basados en los resultados de la matriz comparativa, en los parámetros que exige Ecopetrol y teniendo en cuenta que este diseño mejora más la resistencia a la compresión, en comparación a los otros diseños. En la **Tabla 21** se muestra la concentración final de cemento, agua y aditivos de esta lechada

Tabla 21. Concentración de cemento agua y aditivos para la lechada final de 4,5%BWOC.

Producto	Concentración
Antiespumante	0.01 gal / sk
Controlador de gas	0.5 gal / sk
Controlador de filtrado	1.0 % BWOC
Retardador	0.2 % BWOC
Aditivo especial	5 % BWOC
Agente alivianante	12 % BWOC
Nanosilice	4,5 % BWOC

5.4 COMPARACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DE LECHADA Y EL DISEÑO DE LECHADA UTILIZADO EN CAMPO CASTILLA

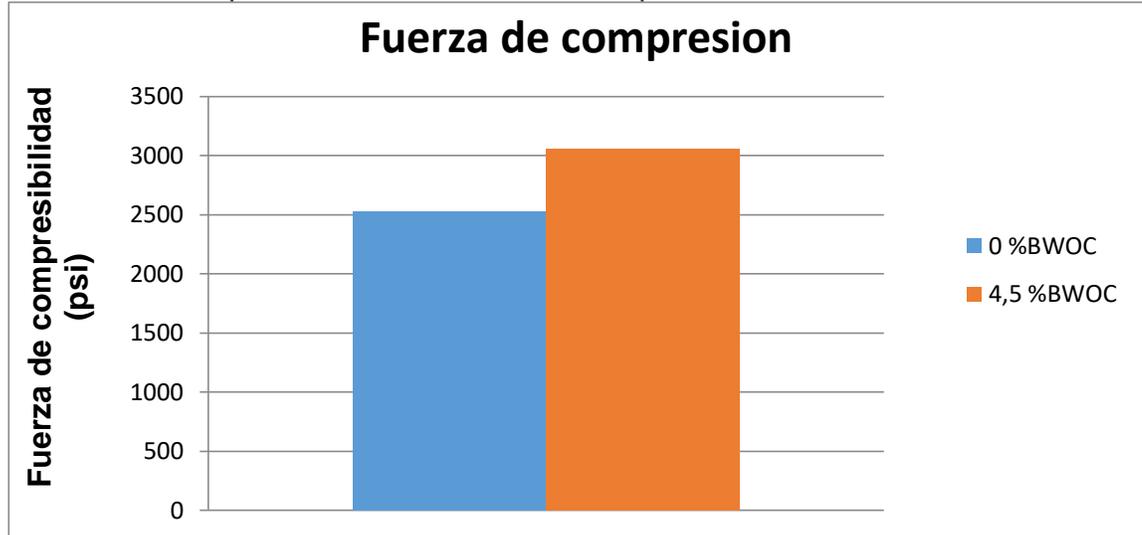
A continuación se hace una comparación entre la lechada de 4,5%BWOC y la lechada utilizada actualmente en Campo Castilla, comparando las propiedades de Fuerza de compresión, tiempo de bombeabilidad y reología (punto cedente y viscosidad plástica).

- **Fuerza de compresión**

Comparando los resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión para estas lechadas, se evidencia un aumento del 21% entre la lechada de 4,5%BWOC y la lechada utilizada actualmente en Campo Castilla, las cuales cuentan con una fuerza de compresión de 3.051 psi y 2.522 psi respectivamente.

En la **Grafica 9** se evidencia gráficamente esta comparación.

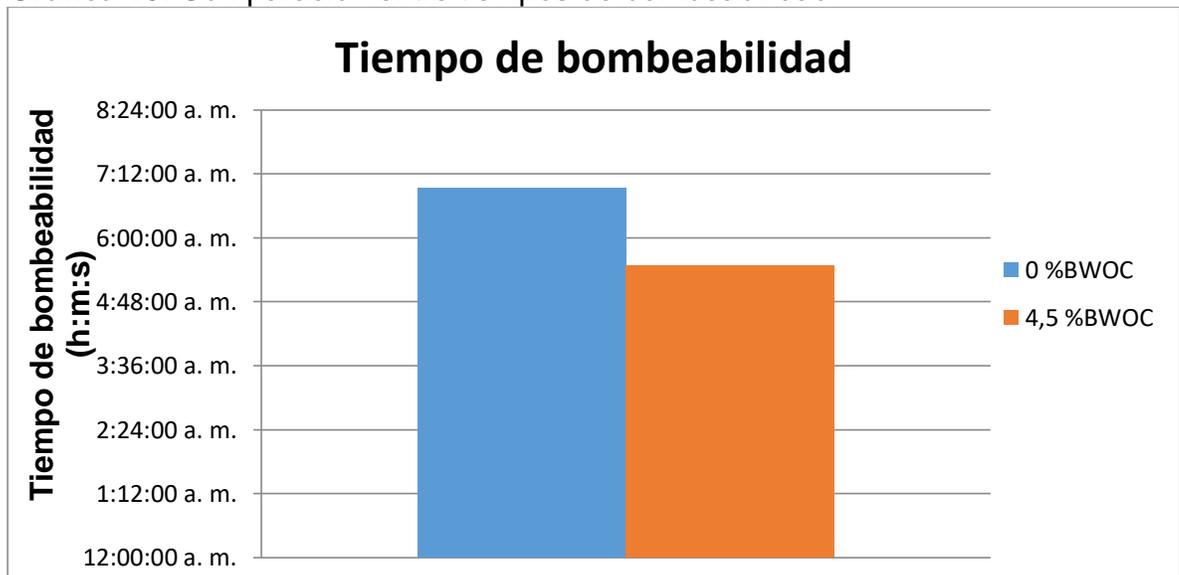
Grafica 9. Comparación en la fuerza de compresión



- **Tiempo de bombeabilidad**

Se evidencia una disminución del 27% en el tiempo de bombeabilidad de la lechada de 4,5%BWOC y la lechada utilizada actualmente en Campo castilla, con tiempos respectivamente de 5:28:30 y 6:56:30 horas minutos y segundos. Tiempos que están dentro de los parámetros exigidos por Ecopetrol; la lechada con 4,5%BWOC de nanomateriales cuenta con un tiempo de seguridad de 28 minutos y 30 segundos aproximadamente, mientras que la lechada sin nanomateriales tiene un tiempo de seguridad de una hora y 56 minutos. En la **Grafica 10** se evidencia gráficamente esta comparación.

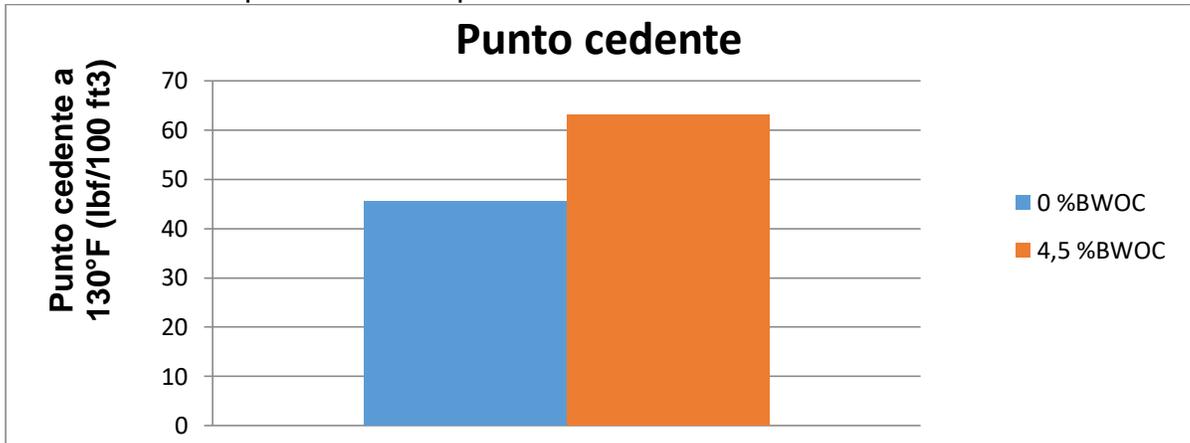
Grafica 10. Comparación entre tiempos de bombeabilidad



- **Punto cedente**

Se evidencia un aumento del 38% entre la lechada de 4,5%BWOC y la lechada utilizada actualmente en Campo Castilla, con valores de 63 lbf/100ft³ y 45,5 lbf/100ft³ respectivamente. En la **Grafica 11** se evidencia gráficamente esta comparación.

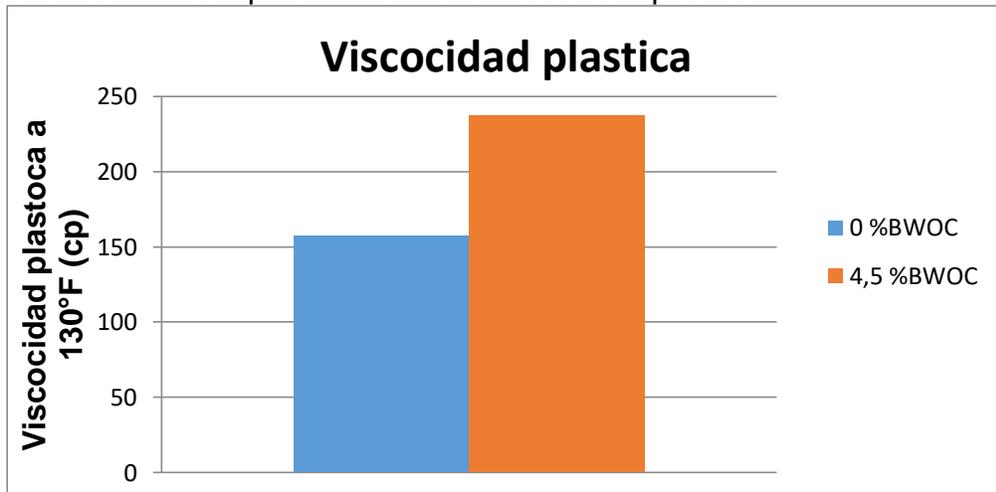
Grafica 11. Comparacion entre puntos cedentes



- **Viscosidad plástica**

Se evidencia un aumento del 50% entre la lechada de 4,5%BWOC y la lechada utilizada actualmente en Campo Castilla, con valores de 237 cp y 157,5 cp respectivamente. En la **Grafica 12** se evidencia gráficamente esta comparación.

Grafica 12. Comparación entre la viscosidad plástica



6. ANÁLISIS FINANCIERO

El presente capítulo tiene como objetivo realizar la evaluación financiera de la implementación de los nanomateriales a las lechadas de cementación que la empresa Superior Energy Services utiliza en el revestimiento de producción para el Campo Castilla.

Ingeniería y tecnología de servicios (ITS) línea de cementación de la empresa Superior Energy Services, se ha caracterizado por ser una empresa líder en la cementación de pozos petroleros en Colombia desde el año 2010. Desde su creación como empresa, ha cementado pozos en campos como: Campo Chichimene, Campo Chuirá, Campo Rubiales, Campo Quifa y Campo Castilla, campo en el que actualmente se tienen contratos.

Las características con las que cuenta el diseño de lechada de cementación son aceptables de acuerdo a lo que exige Ecopetrol. Sin embargo, teniendo en cuenta que el revestimiento de producción (liner 7") es la sección más importante de los pozos de Campo Castilla ya que allí se encuentra la zona de interés; Superior Energy Services busca mejorar las características de las lechadas para la cementación de esta zona, garantizando de esta manera la colgada adecuada del liner y la estabilidad del pozo sin necesidad de cementaciones secundarias. Por esta razón se propone la "evaluación técnico- financiera del uso de nanomateriales en lechadas de cemento para revestimiento de producción en campo castilla, a nivel de laboratorio", proyecto con el que se busca mejorar la resistencia a la compresión, la reología, el agua libre y la pérdida de filtrado, del diseño que actualmente utiliza la compañía.

Para realizar esta evaluación técnico- financiera, lo primero que se realiza son pruebas de laboratorio a las diferentes lechadas de cementación. Las pruebas que se le corren a estas lechadas son: densidad, reología, resistencia a la compresión, tiempo de bombeabilidad, pérdida de filtrado, agua libre y sedimentación.

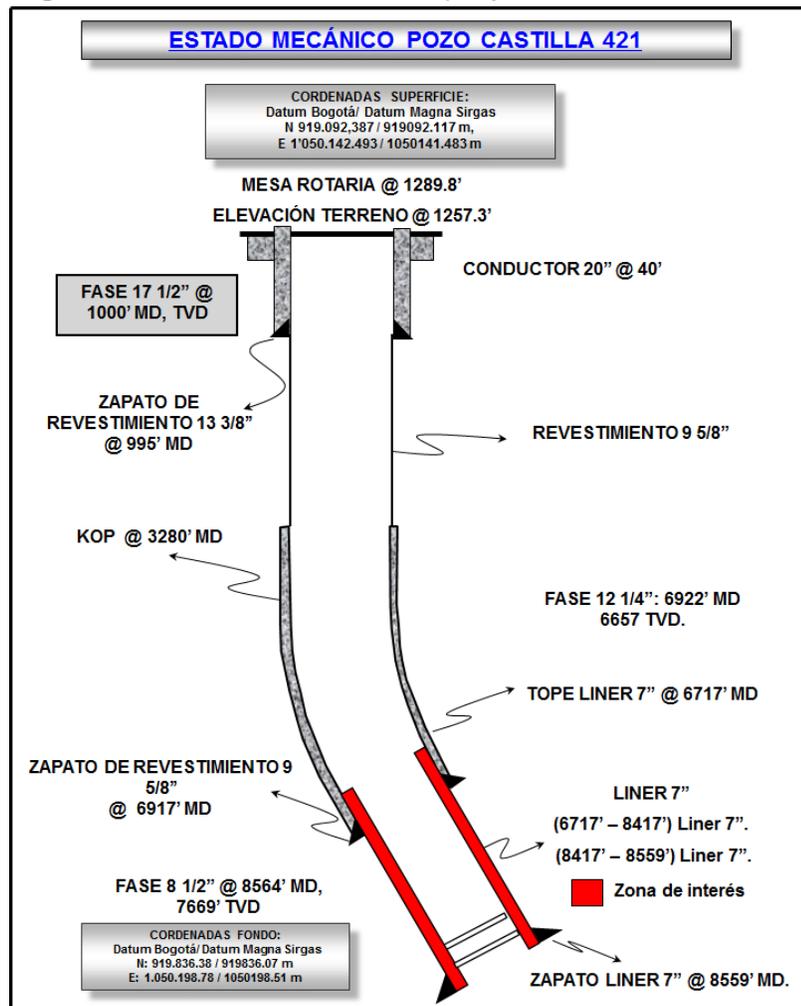
Se comienza desarrollando las diferentes pruebas a la lechada que actualmente se utiliza en las operaciones de cementación para un revestimiento de Campo Castilla, para determinar las características actuales que se desean mejorar. Posterior a esto se evalúa una a una las lechadas con diferentes concentraciones de nanomateriales, comenzando con 0.5 hasta 5 %BWOC (porcentaje de aditivo en base al peso del cemento), variando el aditivo cada 0.5%BWOC.

Tras realizar las pruebas de laboratorio y obtener los resultados correspondientes a las lechadas con diferentes concentraciones, en una matriz de resultados se evalúan los diferentes diseños para de esta manera identificar la opción que técnicamente proporcione las mejores características para la cementación del liner de 7" en Campo Castilla y a partir de la elección realizar la evaluación financiera.

Para la evaluación financiera del proyecto se va a tomar como base de cálculos la lechada con 4.5%BWOC de nanomaterial, debido a que es el diseño que proporciona las mejores propiedades técnicas, según la matriz de resultados. En este capítulo, se va a tener en cuenta como unidad monetaria de valor constante el dólar americano, se utilizara tasa de interés de oportunidad de 10% efectivo anual, el horizonte de tiempo será de 7 meses con periodos mensuales; en estos 7 meses se espera cementar 10 pozos correspondientes a dos taladros. El indicador financiero que se va a utilizar es el Valor presente neto (VPN). Teniendo en cuenta que el enfoque para la evaluación es desde el punto de vista de una compañía de servicios, se va a requerir un análisis de costos de operación y un análisis de ingresos.

Para efectos de facilitar la comprensión del alcance de proyecto, a continuación en la **Figura 40** se presenta el estado mecánico del pozo en donde se resalta el área de interés.

Figura 40. Área de interés del proyecto.



6.1 ANÁLISIS DE COSTO DE OPERACIÓN

Teniendo en cuenta que la sección a cementar es la representada en la **Figura 52**, y que los volúmenes para esta operación están descritos en la **Tabla 22**, se puede establecer que los volúmenes utilizados para cementar un revestimiento de producción en Campo Castilla en promedio son 115,1 barriles (bbl) equivalentes a 646,287 pies cúbicos (ft³), unidad de medida de venta que utiliza la compañía.

Tabla 22. Volumen de lechada de cementación para liner de 7" Campo Castilla.

Parámetro	Capacidad (bbl/ft3)	Longitud (ft)	volumen (bbl)
Volumen Anular OH 8,9" - Liner 7"	0,029347193	1446	42,4
Volumen Bolsillo OH 8,9"	0,076947737	101	7,8
Exceso 70%	-	-	35,1
Traslape Csg 9 5/8" - Liner 7"	0,02561	239	6,1
Cto por encima del Colgador Csg 9 5/8"	0,07321	300	22,0
Shoe track Liner 7"	0,03826	44	1,7
Volumen total lechada principal	-	-	115,1

Fuente: Superior Energy Services Colombia, septiembre 2016.

6.1.1 Costo de fluidos de cementación para un liner de 7" en campo castilla.

Para determinar los costos de la lechada de cementación con 4.5%BWOC de nanomateriales para un barril de lechada, lo primero que se realiza es conocer la cantidad de cemento que se va a utilizar para generar un barril. Para estos cálculos se tiene en cuenta que un barril son 5.615 ft³ y que las concentraciones de aditivos para la lechada son los indicados en la **Tabla 23**.

Tabla 23. Concentraciones de aditivos para lechada con 4.5%BWOC de nanomateriales.

Concentraciones aditivos para lechada 4.5% BWOC	
Producto	Concentración
Cemento	100 %BWOC
Antiespumante	0.01 GPS
Agua	No aplica
Controlador de gas	0.5 GPS
Controlador de filtrado	1%BWOC
Retardador	0.2%BWOC
Aditivo especial	5%BWOC
Agente alivianante	12%BWOC
Nanomaterial	4.5%BWOC

Para determinar la cantidad de sacos de cemento que son necesarios para un barril de lechada, se utiliza la **ecuación 17**.

Ecuación 17. Cantidad de cemento para un volumen establecido.

$$Cantidad\ de\ cemento = \frac{Volumen\ total\ de\ lechada\ de\ cemento}{Rendimiento\ lechada\ con\ 4.5\%BWOC}$$

Donde;

Volumen total de lechada de cemento se da en ft³ y el rendimiento lechada 4.5%BWOC se da en ft³/sk.

Calculo 29. Cantidad de cemento para un barril de lechada.

$$Cantidad\ de\ cemento = \frac{5.615 \frac{ft^3}{bbl}}{1.484673515 \left(\frac{ft^3}{sk}\right)} = 3.78 \frac{sk}{bbl}$$

Una vez calculada la cantidad de cemento para un barril, se pueden calcular las cantidades de aditivos con unidades de %BWOC para un barril de lechada con la siguiente ecuación.

Ecuación 18. Cantidad de aditivo con unidades %BWOC para un barril de lechada.

$$Cantidad\ de\ aditivo = concentraci3n_{adi} * Cantidad\ de\ cemento * 94 \frac{lb}{sk}$$

Donde; concentración_{adi} es la concentración de cada aditivo en concentraciones en relación al peso del cemento; la cantidad de cemento esta expresada en sk/bbl y el 94 lb/sk es el peso de un saco de cemento clase G dyckerhoff (cemento utilizado en las pruebas). Las cantidades de aditivos con unidades de %BWOC para un barril de lechada son desarrolladas en **Cálculo 30**.

Cálculo 30. Cantidades de aditivo para un barril de lechada.

$$\begin{aligned}
 \text{Cantidad}_{\text{retardador}} &= 0.2\%BWOC * 3.78 \frac{\text{sk}}{\text{bbl}} * 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} = 0.71064 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \\
 \text{Cantidad}_{\text{cont filtrado}} &= 1\%BWOC * 3.78 \frac{\text{sk}}{\text{bbl}} * 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} = 3.553 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \\
 \text{Cantidad}_{\text{adi especial}} &= 5\%BWOC * 3.78 \frac{\text{sk}}{\text{bbl}} * 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} = 17.77 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \\
 \text{Cantidad}_{\text{age alivianante}} &= 12\%BWOC * 3.78 \frac{\text{sk}}{\text{bbl}} * 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} = 42.64 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \\
 \text{Cantidad}_{\text{nanomateriales}} &= 4.5\%BWOC * 3.78 \frac{\text{sk}}{\text{bbl}} * 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} = 15.9894 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}}
 \end{aligned}$$

Se pueden calcular las cantidades de aditivos con unidades de GPS para un barril de lechada mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 19. Cantidad de aditivo con unidades GPS para un barril de lechada.

$$\text{Cantidad de aditivo} = \text{concentración}_{\text{adi}} * \text{Cantidad de cemento}$$

Las cantidades de aditivos con unidades de GPS para un barril de lechada son desarrolladas en **Cálculo 31**.

Cálculo 31. Cantidad de aditivo con unidades GPS para un barril de lechada.

$$\begin{aligned}
 \text{Cantidad}_{\text{antiespumante}} &= 0.01 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} * 3.78 \frac{\text{sk}}{\text{bbl}} = 0.0378 \frac{\text{gal}}{\text{bbl}} \\
 \text{Cantidad}_{\text{controlador de gas}} &= 0.5 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} * 3.78 \frac{\text{sk}}{\text{bbl}} = 1.89 \frac{\text{gal}}{\text{bbl}}
 \end{aligned}$$

En la **Tabla 24** se establecen los costos unitarios de cada producto y el costo de cada aditivo para realizar un barril de lechada con 4.5%BWOC de nanomateriales. Todos estos valores son los establecidos por la empresa Superior Energy Services.

Tabla 24. Costos para un barril de lechada con 4.5%BWOC de nanomateriales.

ADITIVOS	CONCENTRACIÓN	CANTIDAD PARA 1 BBL	UNIDAD	COSTO POR UNIDAD (USD)	PRECIO POR BARRIL (USD)
CEMENTO	100%BWOC	3,7800	SK	20,18	76,30
CONTROLADOR GAS	0,5 GPS	1,8900	GAL	16,04	30,32
CONTROLADOR FILTRADO	1%BWOC	3,5530	LB	7,89	28,03
RETARDADOR ESPECIAL	0,2%BWOC	0,7106	LB	1,93	1,37
	5%BWOC	17,7700	LB	0,72	12,78
ALIVIANANTE	12%BWOC	42,6400	LB	1,22	51,94
ANTIESPUMANTE	0,01 GPS	0,0378	GAL	9,88	0,37
NANOMATERIAL	4,5%BWOC	15,9894	LB	2,20	35,24
COSTO TOTAL					236,34

Fuente: Superior Energy Services Colombia, Septiembre 2016.

En donde el costo total de un barril de lechada de cemento con 4.5%BWOC de nanomateriales es 236.34 USD.

Para determinar los costos de la lechada de cementación con 4.5%BWOC de nanomateriales derivados de la operación de cementación de un revestimiento de producción de Campo Castilla, se tiene en cuenta que la cantidad de barriles necesarios para esta operación son 115,1 bbl según cálculos previos (**Tabla 22**).

Los costos totales de la lechada para la cementación del liner de 7" de un pozo de Campo Castilla vienen descritos en la **Tabla 25**.

Tabla 25. Costos de la lechada de cementación con 4.5%BWOC de nanomateriales para un liner de 7" en Campo Castilla.

COSTO POR BARRIL (USD)	NUMERO DE BARRILES POR POZO	USD
236,34	115,1	27.202,73

En donde el costo total de lechada de cemento con 4.5%BWOC de nanomateriales para cementar el revestimiento de producción de Campo Castilla es 27.202.73 USD.

6.1.2 Costo de pre flujos para la cementación de un liner de 7” en campo castilla. En la cementación de los revestimientos de producción para Campo Castilla se bombean fluidos previos a la lechada de cementación, estos fluidos se llaman pre flujos. Los pre flujos que la empresa utiliza son el lavador químico y el espaciador mecánico, los cuales se bombean en dos baches con el siguiente orden: Primero se bombean 60 bbl de lavador químico, luego 25 de espaciador mecánico, después 30 bbl de lavador químico y se termina con 25 bbl de espaciador mecánico. Los costos totales de acuerdo a la empresa Superior Energy Services para estos pre flujos se pueden evidenciar en la **Tabla 26**.

Tabla 26. Costo de pre flujos de la empresa Superior Energy Services para un liner de 7” en Campo Castilla.

PRE FLUJO	CANTIDAD PRIMER BACHE (BBL)	CANTIDAD SEGUNDO BACHE (BBL)	CANTIDAD TOTAL (BBL)	PRECIO POR BARRIL (USD)	USD
LAVADOR QUIMICO	60	30	90	62	5580
ESPACIADOR MECANICO	25	25	50	88	4400
				TOTAL	9.980

Fuente: Superior Energy Services, septiembre 2016.

El costo total de los pre flujos para una cementación de un revestimiento de producción en Campo Castilla es de 9.980 USD.

6.1.3 Costo de equipos de superficie para la cementación de un liner de 7” en campo castilla. Para la cementación de un revestimiento de producción en Campo Castilla por parte de la empresa Superior Energy Services, son necesarios varios equipos en superficie como lo son: La unidad de cementación, el batch mixer, la cabeza de cementación, entre otros. El costo de operación de cada equipo viene expresado en dólares por trabajo.

También dentro de los costos de equipos de superficie se tiene en cuenta los costos de movilización de los equipos, que es el costo de transportar cada equipo desde la base en la ciudad de Villavicencio hasta el Campo Castilla. Todos estos costos se evidencian en la **Tabla 27**.

Tabla 27. Costo equipos de superficie para cementación de un liner de 7” en Campo Castilla.

EQUIPOS DE SUPERFICIE	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO POR UNIDAD (USD)	USD
SET DE CEMENTACIÓN	1	TRABAJO	2.000	2.000
BATCH MIXER	1	TRABAJO	2.200	2.200
MOVILIZACIÓN DE EQUIPOS	1	TRABAJO	4.725	4.725
DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPOS	1	TRABAJO	4.725	4.725
TOTAL				13.650

Fuente: Superior Energy Services Colombia, septiembre 2016.

El costo total de los equipos de superficie para una cementación de un revestimiento de producción en Campo Castilla es de 13.650 USD.

6.1.4 Costo de equipos de fondo para la cementación de un liner de 7” en campo castilla. Los equipos de fondo para la cementación de pozos, entre otras funciones ayudan a correr la tubería en el pozo, evitan el contraflujo de cemento y aseguran una capa de cemento uniforme detrás del revestimiento. Todos los costos relacionados a los equipos de subsuelo se evidencian en la **Tabla 28.**

Tabla 28. Costo equipos de fondo para cementación de un liner de 7" en Campo Castilla.

EQUIPOS DE SUBSUELO	CANTIDAD	COSTO POR UNIDAD (USD)	USD
TOP PLUG	1	400	2.000
BOTTOM PLUG	1	450	2.200
CENTRALIZADOR	1	160	4.725
ZAPATO CONVENCIONAL DE 7"	1	1.120	4.725
STOP RING	1	4.725	4.725
		TOTAL	16.955

Fuente: Superior Energy Services Colombia, septiembre 2016.

El costo total de los equipos de subsuelo para una cementación de un revestimiento de producción en Campo Castilla es de 16.955 USD.

6.1.5 Costo de personal para la cementación de un liner de 7" en campo castilla. Para la cementación de pozos se requiere de personal capacitado para realizar estas operaciones, en la **Tabla 29** se relaciona el personal necesario y el costo que este personal demanda a la compañía.

Tabla 29. Costo personal para cementación de un liner de 7" en Campo Castilla.

PERSONAL	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO POR UNIDAD (USD)	USD
INGENIERO DE CAMPO	3	Día	150	450
SUPERVISOR	3	Día	110	330
OPERADOR	3	Día	80	240
AYUDANTES	6	Día	65	390
			TOTAL	1.410

Fuente: Superior Energy Services Colombia, septiembre 2016.

El costo total relacionado al personal para la operación de cementación de un liner de 7" en Campo Castilla es de 1.410 USD, con base en 3 días de trabajo que es el promedio de duración para una operación como esta.

6.1.6 Costos totales para la cementación de un liner de 7” en campo castilla.
 En la **Tabla 30** se evidencia el costo total para la operación de cementación del liner de 7” para Campo Castilla, el cual es la suma de todos los costos relacionados previamente.

Tabla 30. Costo total para la cementación de un liner de 7” en Campo Castilla.

DESCRIPCIÓN	COSTO
LECHADA DE CEMENTO CON 4,5%BWOC	27.202,73
PRE FLUJOS	9.980,00
EQUIPOS DE SUPERFICIE	13.650,00
EQUIPOS DE FONDO	16.955,00
PERSONAL	1.410,00
COSTO TOTAL	69.197,73

El costo total derivado de la cementación de un liner de 7” en Campo Castilla es de 69.197.73 USD.

Teniendo en cuenta que la campaña de perforación en este momento para Campo Castilla es de 7 meses y que en este tiempo se espera cementar los 10 pozos tal como se ve en la **Tabla 31**.

Tabla 31. Campaña de perforación.

PERIODO (meses)	NUMERO DE POZOS
1	1
2	2
3	1
4	2
5	1
6	2
7	1

Fuente: Superior Energy Services Colombia, septiembre 2016.

La **Tabla 32** muestra el costo por periodo.

Tabla 32. Costo de operación por periodo.

PERIODO (meses)	COSTO POR POZO (USD)	NUMERO DE POZOS	USD
1	69.197,73	1	69.197,73
2	69.197,73	2	138.395,46
3	69.197,73	1	69.197,73
4	69.197,73	2	138.395,46
5	69.197,73	1	69.197,73
6	69.197,73	2	138.395,46
7	69.197,73	1	69.197,73

6.2 ANALISIS DE INGRESOS

Los ingresos son obtenidos a través del precio del servicio, producto de la cementación del revestimiento de producción de Campo Castilla por parte de la empresa Superior Energy Services. Este precio del servicio es determinado dependiendo de la sección a cementar, de los aditivos utilizados, de la localización del campo y otras variables. Para la lechada con nanomateriales, la empresa Superior Energy Services calcula el precio de venta en base al costo de operación más un incremento del 20%.

Ecuación 20. Precio del servicio en base al costo de operación.

$$\text{Precio del servicio} = \text{Costo de operación} + (0.2 * \text{costo de operación})$$

Cálculo 32. Precio del servicio en base al costo de operación.

$$\text{Precio del servicio} = 69.197,73 \text{ USD} + (0.2 * 69.197,73 \text{ USD}) = 83.037,27 \text{ USD}$$

El precio del servicio de cementación para un revestimiento de producción es de 83.037,27 USD. Sin embargo, la compañía no vende el servicio completo de cementación; la compañía vende el pie cubico de lechada. De esta manera el precio del pie cubico de lechada se calcula con el **Cálculo 33**.

Cálculo 33. Precio de la lechada de cementación con 4.5%BWOC (USD/ft³)

$$\text{Precio de ft}^3 \text{ de lechada} = \frac{83.037,27 \text{ USD}}{646.287 \text{ ft}^3} = 128,48 \text{ USD/ft}^3$$

El costo total de la lechada utilizada actualmente en Campo Castilla se establece en la **Tabla 33**, en la cual al costo de la lechada con nanomateriales se le resta el costo de los nanomateriales

Tabla 33. Costo lechada actualmente utilizada en Campo Castilla.

Costo lechada con nanomateriales (USD)	Costo de nanomateriales para un barril (USD)	Numero de barriles por pozo	Costo lechada utilizada actualmente en Campo Castilla (USD)
69.197,73	35,34	115,10	65.130,10

Cálculo 34. Precio del servicio en base al costo de operación para la lechada actualmente utilizada en Campo Castilla.

$$\text{Precio del servicio} = 65.130,10 \text{ USD} + (0.2 * 65.130,10 \text{ USD}) = 78.169,93 \text{ USD}$$

Cálculo 35. Precio de la lechada de cementación utilizada actualmente en Campo Castilla (USD/ft³)

$$\text{Precio de ft}^3 \text{ de lechada} = \frac{78.169,93 \text{ USD}}{646.287 \text{ ft}^3} = 120,95 \text{ USD/ft}^3$$

La diferencia de precio por ft³ de la lechada actualmente utilizada en Campo Castilla con la lechada de 4,5% BWOC de nanomateriales es de 7,53 USD.

Teniendo en cuenta que la licitación en este momento para Campo Castilla es de 7 meses y que en este tiempo se espera cementar los 10 pozos, la **Tabla 34** muestra los ingresos totales por periodo. Debido a que la compañía vende la lechada por pie cúbico, en la tabla se encuentra el costo de cada pie cúbico de lechada, el número de pies cúbicos en la sección del revestimiento de producción calculada previamente y el número de pozos por periodo; para finalizar con el ingreso total correspondiente a la campaña de perforación.

Tabla 34. Ingresos totales.

PERIODO (meses)	PRECIO DE VENTA POR FT ³ (USD)	NUMERO DE FT ³ SECCIÓN LINER 7"	NUMERO DE POZOS	USD
1	128,48	646,287	1	83.034,95
2	128,48	646,287	2	166.069,90
3	128,48	646,287	1	83.034,95
4	128,48	646,287	2	166.069,90
5	128,48	646,287	1	83.034,95
6	128,48	646,287	2	166.069,90
7	128,48	646,287	1	83.034,95

Fuente: Superior Energy Services Colombia, septiembre 2016.

6.3 EVALUACIÓN FINANCIERA

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los capítulos anteriores y mediante el uso del indicador financiero del Valor Presente Neto (VPN), a continuación se determina si el proyecto realizado es viable o no desde un punto de vista financiero. Según Arturo Infante Villareal el VPN se define como “el equivalente en pesos actuales, de todos los ingresos y egresos, presentes y futuros, que constituyen el proyecto”¹⁰³ y su fórmula se evidencia en la **Ecuación 21**. Los resultados de este indicador se interpretan midiendo a dólares de hoy cuánto vale el proyecto.

Ecuación 21. Valor Presente Neto.

$$VPN_{(i)} = \sum F_n(1 + i)^{-n}$$

Fuente: BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. 8° Edición. Bogotá D.C. Fondo educativo panamericano. p. 197.

Dónde;

F_n = Flujo neto

i = Tasa interna de oportunidad

n = Tiempo

Cuando el VPN > 0 los ingresos son mayores que los egresos y el proyecto es aconsejable económicamente, cuando el VPN = 0 los ingresos son iguales a los egresos y es indiferente, cuando el VPN < 0 los ingresos son menores que los egresos y el proyecto no es conveniente.

Para este proyecto la evaluación será en periodos mensuales, por tanto se requiere cambiar la tasa interna de oportunidad de 10% efectivo anual a efectivo mensual, por medio de la **Ecuación 22**.

Ecuación 22. Equivalencia de tasas

$$(1 + i_1)^{m1} = (1 + i_2)^{m2}$$

Fuente: BACA, Guillermo. Ingeniería Económica. 8° Edición. Bogotá D.C. Fondo educativo panamericano. p. 24.

Dónde;

i_1 = Tasa conocida

i_2 = Nueva tasa

$m1$ = Periodos iniciales que hay en un año

$m2$ = Periodos de la nueva tasa

¹⁰³ VILLARREAL, Arturo. Evaluación Económica de Proyectos de Inversión. Tercera Edición. Biblioteca Banco Popular Textos Universitarios. p. 61.

Reemplazando la tasa del 10% efectivo anual y los periodos en la ecuación anterior, se obtiene el **Cálculo 36**.

Cálculo 36. Interés efectivo anual a Interés efectivo mensual.

$$(1 + i_1)^{m1} = (1 + i_2)^{m2}$$

$$(1 + 0,1)^1 = (1 + i_2)^{12}$$

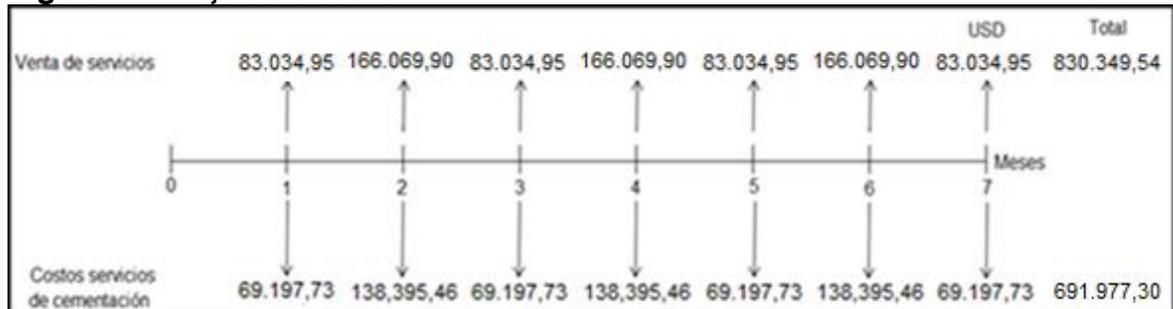
$$i_2 = 0.0079 * 100$$

$$i_2 = 0.79 \% \text{ Efectivo Mensual}$$

Se obtiene una tasa de interés de oportunidad del 0,79% efectivo mensual.

6.3.1 Flujo de efectivo. El flujo de efectivo es representado por medio de una gráfica, en la cual la línea horizontal representa el tiempo, en donde se señalan los momentos terminales de cada periodo, las líneas hacia arriba representan los ingresos y las líneas hacia abajo representan los egresos. En la **Figura 41**. Se presenta el flujo de efectivo de los ingresos y egresos del proyecto, con un horizonte de tiempo de siete meses, periodos mensuales, para posteriormente analizarlos con el VPN y determinar la viabilidad del proyecto.

Figura 41. Flujo de efectivo.



A continuación se reemplaza los valores del flujo de efectivo de cada periodo en la fórmula de VPN, utilizando un la tasa interna de oportunidad del 0,79% efectivo mensual.

Cálculo 37. Valor presente neto para la lechada con 4.5%BWOC de nanomateriales

$$\begin{aligned} VPN(0,0079) = & 0 + 83.034,95(1 + 0,0079)^{-1} - 69.197,73(1 + 0,0079)^{-1} \\ & + 166.069,9(1 + 0,0079)^{-2} - 138.395,46(1 + 0,0079)^{-2} + 83.034,95(1 + 0,0079)^{-3} \\ & - 69.197,73(1 + 0,0079)^{-3} + 166.069,9(1 + 0,0079)^{-4} - 138.395,46(1 + 0,0079)^{-4} \\ & + 83.034,95(1 + 0,0079)^{-5} - 69.197,73(1 + 0,0079)^{-5} + 166.069,9(1 + 0,0079)^{-6} \\ & - 138.395,46(1 + 0,0079)^{-6} + 83.034,95(1 + 0,0079)^{-7} - 69.197,73(1 + 0,0079)^{-7} \end{aligned}$$

$$VPN(0,0079) = \text{US } 134.099,60$$

6.4 CONCLUSIÓN FINANCIERA

Desde el punto de vista financiero, el proyecto del uso de nanomateriales en lechadas de cementación es atractivo para la empresa Superior Energy Services, debido a que genera una ganancia extraordinaria a dólares de hoy de USD 134.099,60 adicional a la tasa de interés de oportunidad (TIO).

7. CONCLUSIONES

- Campo Castilla se encuentra ubicado en el bloque LLA 37 en la cuenca de los llanos orientales. A mediados del año 2016, Campo Castilla contaba con 97.540 hectáreas en las cuales hay 422 pozos productores, 182 están perforados en Castilla norte y 240 en el resto del área. Las Formaciones une y gachetá son las productoras en este Campo.
- En el diseño de lechadas se varían los aditivos con el fin de variar las propiedades de la lechada. Dentro de los aditivos más utilizados están: los acelerantes, retardadores, extendedores, dispersantes, controladores de filtrado y antiespumantes.
- Las características que se le pueden medir a una lechada de cementación son: la densidad, el tiempo de bombeabilidad, la reología, la fuerza a la compresión, la pérdida de fluido, la fluidez y la sedimentación. Estas características se pueden medir por medio de pruebas de laboratorio, las cuales simulan las condiciones de pozo. Estas pruebas son: Densidad, agua libre, tiempo de bombeabilidad, reología, fuerza a la compresión, pérdida de fluido y sedimentación.
- El diseño de lechada proporciona las propiedades exigidas por Ecopetrol, sin embargo estas propiedades pueden ser mejores. La densidad de este diseño es de 14.5ppg, desarrolla una resistencia a la compresión de 2522 psi a las 24 horas, alcanza los 70 Bc en 6horas 56minutos y 30segundos, la pérdida de filtrado a los 30 minutos es de 24 API, tiene un porcentaje de agua libre de 0%, un porcentaje de sedimentación de 5.83% y la el comportamiento reológico muestra una Vp de 157.5 y un YP de 45.5 a temperatura circulante.
- El aditivo evaluado (nanosílice) no influye en la densidad de la lechada ni en el agua libre; la densidad para los diferentes diseños de lechada es constante en 14.5ppg y el agua libre para todos los diseños es de 0%.
- El aditivo probado (nanosílice) no afecta la pérdida de filtrado. Los resultados de esta prueba de fluid loss varían en un rango desde 22.2 API hasta 24 API en las 11 pruebas, lo cual muestra que la variación es mínima. Lo anterior se debe a que la malla utilizada en las pruebas son de 45 μm , respaldada por una de 250 μm , medidas superiores al diámetro del nanosílice.
- La concentración de nanosílice muestra una relación directa con el desarrollo de la resistencia a la compresión. Como se evidencia en los resultados de las pruebas, a medida que sube la concentración sube la resistencia. Con 0%BWOC de nanosílice la lechada desarrollaba 2522 psi de resistencia a la

compresión a las 24 horas; con 4,5%BWOC desarrolló 3051 psi en las mismas 24 horas (aumentando un 21% en comparación al diseño actual).

- En cuanto al tiempo de bombeabilidad, se puede establecer que el aditivo evaluado actúa como un acelerante. A medida que la concentración de nanosílice aumenta, disminuye el tiempo de bombeabilidad. El diseño actual establece un tiempo de 6horas 56minutos y 30segundos hasta alcanzar los 70 Bc; el diseño con 4.5%BWOC alcanza esta misma consistencia en 5horas 28minutos y 30segundos (Disminuyendo un 21% en comparación a la original).
- El nanosílice no afecta la sedimentación de la lechada. En las pruebas se determina un cambio de sedimentación en las lechadas, pero no existe relación entre estos dos parámetros.
- La viscosidad plástica y punto cedente a temperatura ambiente muestra una relación directa con la concentración de nanosílice, para la lechada sin nanosílice la viscosidad plástica es 176.2 cp y el punto cedente es 14.75 lbf/100ft²; para la lechada con 5%BWOC de nanomateriales estos valores fueron 199.5 cp y 18.5 lbf/100ft² (Aumentando 13.2% la viscosidad plástica y 25% el punto cedente en comparación con la lechada actual).
- Mediante la adición de nanosílice a las lechadas, se evidencia que la viscosidad plástica y punto cedente a temperatura ambiente muestra una relación directa con la concentración de nanosílice, para la lechada sin nanosílice la viscosidad plástica es 157.5 cp y el punto cedente es 45.5 lbf/100ft²; para la lechada con 5%BWOC de nanomateriales estos valores fueron 225.75 cp y 74.25 lbf/100ft² (Aumentando 43% la viscosidad plástica y 63% el punto cedente en comparación con la lechada actual).
- El nanosílice es un aditivo que mejora la reología, sin embargo este aumento no es únicamente relacionado a la concentración del mismo; también se relaciona de manera directa con la temperatura a la cual se encuentra la lechada.
- Mediante la implementación de nanosílice y con la ayuda de una matriz de resultados, se determinó que el mejor diseño técnicamente es el de 4.5%BWOC, el cual mejora las propiedades como la resistencia a la compresión y las propiedades reológicas desarrolladas por el diseño actual para la sección del revestimiento de producción en Campo Castilla.
- Desde el punto de vista financiero, para la empresa Superior Energy Services Colombia, la opción de una lechada con nanosílice es viable, ya que tiene un VPN positivo, logrando de esta manera una ganancia extraordinaria de 23.301,07 USD adicional a la tasa de interés de oportunidad (TIO).

8. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas con nanocarbón y evaluar las propiedades de las lechadas a condiciones simuladas de pozo.
- Determinar a partir de las pruebas de laboratorio elaboradas en este trabajo, un diseño nuevo en el cual el nanosílice puede reemplazar otros aditivos.
- Evaluar el proyecto de la adición de nanosílice en lechadas para un proyecto de cementación costa afuera, ya que por su tamaño, el costo de almacenamiento es menor.
- Realizar el análisis de registros de calidad de cementación, en los pozos del Campo Castilla donde la sección del revestimiento de producción haya sido cementada con el diseño de 4.5%BWOC.
- Evaluar las propiedades anti- migratorias de los diseños de lechada derivados de la matriz de variación de nanomateriales presente en este trabajo.
- No utilizar acelerantes en las lechadas con nanosílice MasteRoc MS 685, debido a que presentan incompatibilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Información Geológica y Geofísica. [En línea]. Disponible en internet: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-yModelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Campos.pdf>. Citado marzo 17 de 2016.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practices for testing well cements (API RP 10B). Estados Unidos de América. 2011
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Specifications for cements and materials for well cementing cements (API RP 10A). Estados Unidos de América. 2011
- ANH. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Diciembre 2012.
- ASHOK Santra. Influence of Nanomaterials in Oilwell Cement Hydration and Mechanical Properties. The Netherlands. 2012. SPE 156937.
- B.H Patel & P.N Patel. Synthesis and application of Nano – Sized SiO₂ to textiles. University of Baroda, Gujarat, India.
- BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. 8° Edición. Bogotá D.C. Fondo educativo panamericano
- BARRERO, Darío. PARDO, Andrés. VARGAS, Carlos. MARTINEZ, Juan. ANH, Colombian Sedimentary Basins, Bogotá. 2007.
- BASF ficha técnica MasterRoc MS 685 suspensión de nanosílice precipitada, 2014
- CHANDLER ENGINEERING. “Model 6265 MPRO Application” note 1.
- CLARK, C. R. Mud Displacement with Cement Slurries. 1973.
- DINERO. “Campo Castilla alcanzó producción récord de 100.403 barriles diarios”. [En línea] Disponible en: <http://www.dinero.com/negocios/articulo/campo-castilla-alcanzo-produccion-record-100043-barriles-diarior/97641> Citado marzo 15, 2016
- ECOPETROL. “Campo de producción Castilla alcanzó nuevo récord de producción”. [En línea] Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines%202015/Boletines%202015/campo-produccion-Castilla-alcanzo-nuevo-record-produccion> Citado marzo 15, 2016

EL TIEMPO. "Ecopetrol perforará 12 pozos en el Campo de Castilla la Nueva, en el meta". [En línea] Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1519991> Citado marzo 15, 2016

_____. "Castilla y Chichimene pasarán a Ecopetrol". [En línea] Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1240507> Citado marzo 15 de 2016

EMPRESA AS ARENA SILICEA. Empresa explotadora y comercializadora de arena sílice. www.arenasilicea.com, Bogotá, Colombia. Enero. 2015

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

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Normas colombianas para presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Bogotá, D.C: ICONTEC 2008. NTC 1486.

_____. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. Bogotá, D.C: ICONTEC 2008. NTC 5613.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. Bogotá, D.C: ICONTEC 1998. NTC 4490.

J. DE PORTA, Amériqúe Latine Colombie, volumen 5, Paris 1974.

JULIVERT M, Amériqúe Latine Colombie, volumen 5, Paris 1968.

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

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA MME. "Glosario técnico minero". Bogotá, Colombia, coordinación de INGEOMINAS. 2003

PEMEX. Guía Práctica Para Diseñar Y Efectuar Cementaciones Primarias. En: Perforación Y Mantenimiento De Pozos. 2008.

PILKINGTON, Paul. E. Society of petroleum engineers. "Cement Evaluation - Past, Present, and Future". Febrero 1992. SPE- 20314- PA

SCHLUMBERGER. Jet- 14 Manual De Cementación. 2007.

_____. Oilfield Glossary, Definición de tapón de cementación. [Electronic(1)]. Disponible en: 'http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/cementing_plug.aspx'. Citado el 20 de abril de 2016

_____. Revisión De Cementación. 2004.

----- Sección 8: Cementación. Drilling School. 2011.

SMITH.K Dwight. Cementing. Society of petroleum engineers, 1987.

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

----- Instructivo para la corrida de pruebas, 2014.

-----Curso Básico/ Intermedio De Cementación Para Ingenieros. 2015.

TEJEDA ARIAS, Jabal. Ingeniería De Cementaciones, Subdirección De Perforación Y Mantenimiento a Pozos, Empresa Petróleos Mexicanos. 2000.

VILLARREAL, Arturo. Evaluación Económica de Proyectos de Inversión. Tercera Edición. Biblioteca Banco Popular Textos Universitarios.

XUEYU PANG, Peter J. Boul and CUELLO JIMENEZ, Walmy. Nanosilicas as Accelerators in oilwell Cementing at Low Temperatures. IADC/SPE. 2014. SPE 168037.

ANEXOS

**ANEXO A.
FICHA TÉCNICA DEL CEMENTO DYCKERHOFF**

HOJA DE SEGURIDAD

CEMENTO CLASE G DYCKERHOFF

NOMBRE COMERCIAL: Cemento Clase G Dyckerhoff

SUSTANCIA:

Cemento Portland

Nº CAS: 65997-15-1

Sílice cristalina, cuarzo

Nº CAS: 14808-60-7

CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS

Estado físico: Sólido

Color: Gris

Olor: Inodoro

pH: 12.4

Gravedad específica a 20 C (Agua=1): 3.18

Densidad a 20 C (lb/galón): No determinada

Densidad a granel a 20 C (lb/ft³): 94

Punto/Intervalo de ebullición (C): No determinada

Intervalo/punto de congelación (C): No determinada

Presión de vapor a 20 C (mmHg): No determinada

Densidad del vapor (Aire=1): No determinada

Porcentaje de compuestos volátiles: 0

Velocidad de evaporación (acetato de butilo = 1): No determinada

Solubilidad en agua (g/100ml): 0.5

Solubilidad en disolventes (g/100ml): No determinada

Compuestos orgánicos volátiles (lb/galón): No determinada

Viscosidad dinámica a 20 C (centipoise): No determinada

Viscosidad cinemática a 20 C (centistokes): No determinada

Constante de reparto: n-octanol/agua: No determinada

Peso molecular (g/mol): No determinado

ESTABILIDAD E IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS (TOXICOLOGÍA)

Principales vías de exposición Contacto con ojos o piel, inhalación

En caso de inhalación: El respirar polvo de sílice puede causar irritación de la nariz, garganta, y pasajes respiratorios. Es posible que respirar polvo de sílice no causa una lesión o enfermedad que se note, aún cuando esté ocurriendo daño permanente a los pulmones.

En caso de contacto con la piel: Produce irritación grave de la piel. Puede producir quemaduras en la piel.

En caso de contacto con los ojos: Puede causar una irritación grave.

En caso de ingestión: Ninguna conocida.

Efectos crónicos/carcinógenos: La inhalación excesiva del polvo de sílice que se puede respirar, puede causar una enfermedad del pulmón que es progresiva, incapacitante y a veces fatal, llamada silicosis. Los síntomas incluyen tos, respiración entrecortada, resuello, malestar no específico al pecho, y función pulmonar reducida. Esta enfermedad es agravada por fumar. Las personas con silicosis están predispuestas a desarrollar tuberculosis.

MANIPULEO Y ALMACENAMIENTO

Almacenamiento: Almacene en un lugar seco y fresco. Emplee buenos hábitos de limpieza en las áreas de almacenamiento y de trabajo para impedir la acumulación de polvo. Cierre el recipiente cuando no está en uso. No vuelva a usar el recipiente vacío. El producto tiene una vida de almacenamiento de 24 meses.

Manipulación: Este producto contiene cuarzo, cristobalita, y/o tridimita los cuales pueden ser transportados por el aire sin una nube visible. Evite respirar el polvo. Evite crear condiciones de polvo. Úselo solamente con ventilación adecuada para mantener la exposición por debajo de los límites recomendados de exposición. Use un respirador certificado por NIOSH, European Standard En 149 o equivalente, cuando utilice este producto. El material es resbaloso cuando está húmedo.

MEDIDAS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL.

En caso de incendio: No se queman.

Equipo protector especial para bomberos

PROTECCIÓN PERSONAL

Para la protección respiratoria: Use un respirador certificado por NIOSH, European Standard En 149 o equivalente, cuando utilice este producto.

Para la protección para las manos: usar guantes de trabajo normales.

Para la protección de la piel: Vista ropa adecuada para el medio de trabajo. La ropa polvorienta deberá ser lavada antes de volver a usarla. Use medidas de precaución para evitar crear polvo al quitarse o lavar la ropa.

Para la protección para ojos: Use lentes o visor de seguridad para protegerse de la exposición.

PRIMEROS AUXILIOS

En caso de inhalación: saque a la persona del área hacia el aire libre. Procure atención médica si se desarrolla irritación respiratoria o si la respiración se dificulta.

En caso de contacto con la piel: Lave con agua y jabón. Si la irritación persiste procure atención médica.

En caso de contacto con los ojos: lave de inmediato con un chorro de agua abundante durante al menos 15 minutos y procure atención médica si la irritación persiste.

En caso de ingestión: en condiciones normales no se necesitan procedimientos de primeros auxilios.

TABLA Y DISPOSICIÓN FINAL

Use ventilación industrial aprobada y escape local como se requiera para mantener las exposiciones por debajo de los límites de exposición

Método de desecho Entierre en un relleno sanitario autorizado según las reglamentaciones estatales

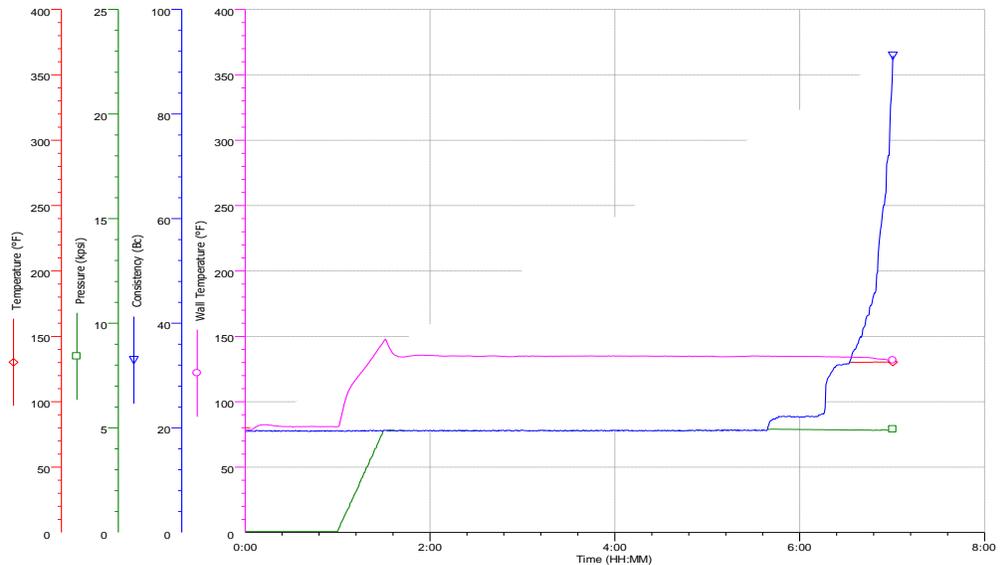
**ANEXO B.
RESULTADOS DE ADITIVOS PARA LECHADA SIN NANOMATERIALES CON
TODOS LOS DECIMALES.**

lechada	0
Sum M	115,25634
Sum V	5,71778949
V agua	5,22873285
Rendimiento	1,46343882
fluido total	5,72873285
cemento	617,336366
agua	285,473634
contro f	6,17336366
retardador	1,23467273
especial	30,8668183
alivianante	74,0803639
contro g	27,2438419
nanomate	0
Antiespum	0,54597097

ANEXO C. REPORTE DE LABORATORIO LECHADA SIN NANOMATERIALES.

		REPORTE DISEÑO DE LECHADA							
# Report:	1	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7				
WELL DATA		TEST DATA: Parameters			TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis nanomateriales	T.V.D.:	7669	[ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration		Lote
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172	[°F]			[]	Unit	
I.T.S. Eng.:	Juan Felipe Pinzon	BHCT:	130	[°F]	Cemento	NA	100%	% BWOC	NA
Well:	Ca 421	Gradient T:	1,2	[°F/100ft]	Agua	NA	NA	NA	NA
Location:	Castilla	Water Req.:	5,20	[GPS]	Antiespumante	NA	0,01%	GPS	NA
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,47	[ft./sk]	Controlador Gas	NA	0,50%	GPS	NA
Cement data:	NA	Density:	14,5	[PPG]	Controlador filtrado	NA	1%	% BWOC	NA
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation			Retardador	NA	0,20%	% BWOC	NA
Mud Weight [PPG]	NA				Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Aditivo especial	NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Agente alivianante	NA	12%	% BWOC	NA
Field:	Castilla								
RESULTS									
THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH			
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]:	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method		
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]	
Initial Bc	0	0	100	NA	NA	12	NA	NA	
(@ 30 Bc)	NA	NA	500	NA	NA	24	2522	NA	
(@ 50 Bc)	NA	NA	FREE FLUID			36	NA	NA	
(@ 70 Bc)	6	56	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]		T [°F] Run Test		
(@ 100 Bc)	NA	NA	45	60	0,0		172		
T [°F] Run Test	130						P [PSI] Run Test		
							3000		
RHEOLOGIES (BHST)									
	[rpm]	3	6	30	60	100	200	300	
L1	8	14	45	73	102	153	203	203	
L2	6	9	40	68	94	148	203	203	
Lp	7	11,5	42,5	71	98	151	203	203	T [°F] Run Test
FLUID MODELS									
Bingham					GEL STRENGTH				
Vp [cp]:	158	N'	0,662871249	10 [sec]	[Lb./100 ft ²]:				
Pc [Lb./100 ft ²]:	49	K'	0,03463469	10 [min]	NA				
FLUID LOSS									
		24			[ml/30 min]	[@] 1000 [PSI]			

PLOTS
THICKENING TIME

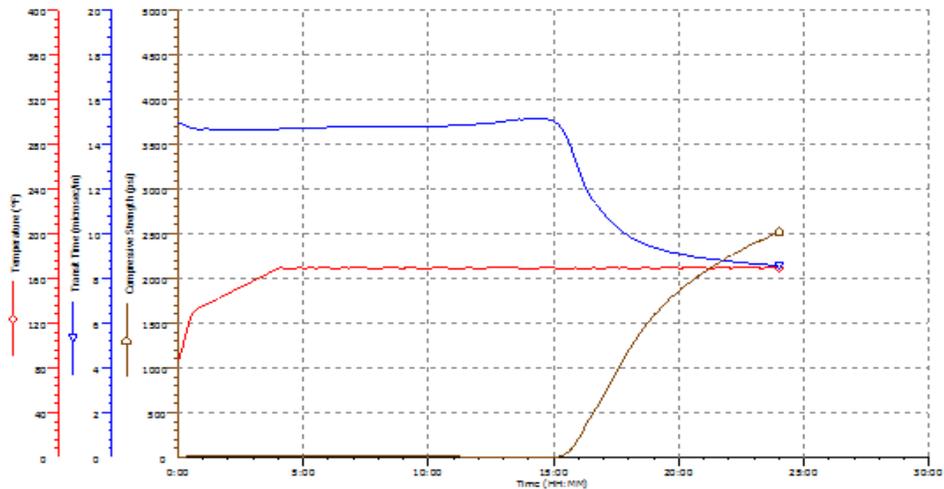


CA LINER 7 14.5PPG BLANCO 0.2 R-01

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: SGSA_745 745
Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lbs/sq)
Comments: BLANCO 1.0% R-01

Algorithm: Static strength



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: SGSA CALINER7 14.5 PPG 0.1 R01 BLANCO
Printed: 10/5/2016 7:57:01 AM

Page 1

ANEXO D. FICHA TÉCNICA DEL NANOSÍLICE.



We create chemistry

MasterRoc® MS 685

Antes: MEYCO² MS 685

Suspensión de nanosilice precipitada

Descripción de Producto

MasterRoc MS 685 es una mezcla líquida basada en una suspensión de nanosilice amorfa. Estas partículas ultrafinas empiezan a reaccionar tan pronto como se incorporan en la mezcla. La textura del slurry es similar a la de la pasta de cemento y crea un mineral microscópico estable.

MasterRoc MS 685 ES Muy efectivo en combinación con cenizas volantes. Esta mezcla proporciona una mejor cohesión, menor porosidad e incrementa la compacidad de la mezcla. La base del material es una suspensión de nanosilice amorfa.

Campo de aplicación

- Concreto bombeado
- Concreto expuesto frecuentemente a la humedad
- Concreto arquitectónico
- Concreto de altas prestaciones
- Concreto proyectado.
- Morteros de inyección
- Concreto autocompactante

Características y beneficios

El precipitado de sílice amorfa empieza a reaccionar con carácter puzolánico tan pronto como es incorporado en la mezcla de cemento. En consecuencia, proporciona textura a la pasta. Debido a la mejora de textura, mejora la reología de la mezcla de concreto (o mortero) y evita la migración del agua (efecto retenedor de agua).

- Mejora la cohesión
- Reduce la presión de bombeo
- Reduce la tendencia de segregación de la mezcla
- Reduce la porosidad y la permeabilidad
- Mejora la calidad del concreto
- Corrige el defecto de finos en la curva granu-

lométrica

- Mejora el acabado superficial. Excelente rendimiento con cenizas volantes

Presentación

MasterRoc MS 685 se suministra en tambores de 208 l (55 gal) y en tanques de 1040 l (275 gal).

Datos técnicos*

Propiedades

Aspecto físico	Líquido blanco
pH, 20°C	10 ± 1
Gravedad específica, 20°C	1.134 ± 0.03
Viscosidad, 20°C Brookfield, Sp 00/100 rpm	<30 cps
Cloruros	< 0.1%

*Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse a nuestro Departamento Técnico.

Procedimiento de aplicación

MasterRoc MS 685 se incorpora en la mezcla con el agua de amasado o al final de la adición de ésta, después de un premezclado. No debe añadirse a la mezcla seca.

- No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta a su representante local BASF.
- Se recomienda la realización de ensayos previos a la utilización del producto.
- No añadir más agua sobre el mortero que

MASTER®
»BUILDERS
SOLUTIONS



We create chemistry

- pierda su consistencia ni reamasar.
- Consulte la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.

Las herramientas o equipos sucios de **MasterRoc MS 685** pueden limpiarse con agua preferiblemente caliente.

Dosificación

MasterRoc MS 685 se usa a dosificación entre el 0.5 - 5% sobre peso de cemento. La dosificación varía de acuerdo con la cantidad de finos en la mezcla y en función de la reología requerida por la aplicación. Deben realizarse ensayos previos para determinar la oportuna dosificación.

Almacenamiento

Mantener el producto por encima de los 5° C y protegido de la incidencia directa del sol en sus envases originales correctamente cerrados. El producto se almacena hasta 6 meses si se almacena correctamente.

Precauciones de seguridad

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al final del trabajo. No fumar, comer ni beber durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse según la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final. No es un producto de mercancía peligrosa por carretera.

"Para mayor información, consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) o a su representante local **BASF** o llame a las líneas de emergencia locales de Cisproquim y/o **BASF** que se encuentran al final del catálogo".

MASTER®
»BUILDERS
SOLUTIONS



We create chemistry

NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Química Colombiana S.A. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reintegrar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición: 26/08/2016

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición.

BASF Química Colombiana S.A.

Calle 99 # 69C – 82
Bogotá, D.C. Colombia
Tel: +57 1 634 20 99

BASF Venezolana S.A.

Circunvalación del Sol, Centro
Profesional Santa Paula, PB, Espacio
Express, Local 4, Caracas - Venezuela
Teléfono: +58 212 935 8308 - Celular:
+58 424 676 4002

BASF Ecuatoriana S.A.

Avenida Naciones Unidas E-230
entre Núñez de Vela e Iñaquito,
edificio Metropolitan, 8vo piso,
oficinas 808, 809 y 810.
Tel : + 593 2397 9500

Visite nuestra página web:

- Colombia: www.master-builders-solutions.basf.com.co
- Venezuela: www.master-builders-solutions.basf.com.ve
- Ecuador: www.master-builders-solutions.basf.com.ec

MASTER®
»BUILDERS
SOLUTIONS

**ANEXO E.
RESULTADOS DE ADITIVOS PARA LECHADAS CON NANOMATERIALES
CON TODOS LOS DECIMALES.**

lechada	0,5	1	1,5	2	2,5
Sum M	115,72634	116,19634	116,66634	117,13634	117,60634
Sum V	5,76119147	5,80459344	5,847995419	5,89139739	5,93479937
V agua	5,20297927	5,17722569	5,151472108	5,12571853	5,09996494
Rendimiento	1,46579823	1,46815764	1,470517049	1,47287646	1,47523587
fluido total	5,70297927	5,67722569	5,651472108	5,62571853	5,59996494
cemento	616,342675	615,352178	614,3648594	613,380704	612,399697
agua	283,610316	281,752987	279,9016178	278,05618	276,216646
contro f	6,16342675	6,15352178	6,143648594	6,13380704	6,12399697
retardador	1,23268535	1,23070436	1,228729719	1,22676141	1,22479939
especial	30,8171337	30,7676089	30,71824297	30,6690352	30,6199848
alivianante	73,961121	73,8422613	73,72378313	73,6056845	73,4879636
contro g	27,1999891	27,1562772	27,11270554	27,0692735	27,0259804
nanomate	3,08171337	6,15352178	9,215472891	12,2676141	15,3099924
Antiespum	0,54509215	0,54421616	0,543342974	0,54247259	0,54160499
lechada	3	3,5	4	4,5	5
Sum M	118,07634	118,54634	119,01634	119,48634	119,95634
Sum V	5,97820135	6,02160332	6,0650053	6,10840728	6,15180925
V agua	5,07421136	5,04845778	5,022704198	4,99695062	4,97119703
Rendimiento	1,47759528	1,47995469	1,482314104	1,48467352	1,48703293
fluido total	5,57421136	5,54845778	5,522704198	5,49695062	5,47119703
cemento	611,421822	610,447066	609,4754125	608,506847	607,541356
agua	274,382986	272,555172	270,7331779	268,916974	267,106534
contro f	6,11421822	6,10447066	6,094754125	6,08506847	6,07541356
retardador	1,22284364	1,22089413	1,218950825	1,21701369	1,21508271
especial	30,5710911	30,5223533	30,47377063	30,4253424	30,3770678
alivianante	73,3706187	73,2536479	73,1370495	73,0208217	72,9049627
contro g	26,9828256	26,9398083	26,89692801	26,854184	26,8115756
nanomate	18,3426547	21,3656473	24,3790165	27,3828081	30,3770678
Antiespum	0,54074016	0,53987809	0,539018758	0,53816216	0,53730828

ANEXO F.
MASA EN BASE AL PESO DEL CEMENTO DEL NANOMATERIAL

$$m_{\text{nanomaterial } 1\%BWO C} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} * 1\% = 0.94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$m_{\text{nanomaterial } 1.5\%BWO C} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} * 1.5\% = 1.41 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$m_{\text{nanomaterial } 2\%BWO C} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} * 2\% = 1.88 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$m_{\text{nanomaterial } 2.5\%BWO C} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} * 2.5\% = 2.35 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$m_{\text{nanomaterial } 3\%BWO C} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} * 3\% = 2.82 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$m_{\text{nanomaterial } 3.5\%BWO C} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} * 3.5\% = 3.29 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$m_{\text{nanomaterial } 4\%BWO C} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} * 4\% = 3.76 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$m_{\text{nanomaterial } 4.5\%BWO C} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} * 4.5\% = 4.23 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

$$m_{\text{nanomaterial } 5\%BWO C} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}} * 5\% = 4.7 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}$$

ANEXO G.
VOLUMEN OCUPADO POR LA MASA EN BASE AL PESO DEL CEMENTO
PARA CADA CONCENTRACIÓN DE NANOMATERIAL.

$$v_{\text{nanomaterial } 1\%BWO C} = \frac{0.94 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{10.829 \text{ ppg}} = 0.0868 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$v_{\text{nanomaterial } 1.5\%BWO C} = \frac{1.41 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{10.829 \text{ ppg}} = 0.130 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$v_{\text{nanomaterial } 2\%BWO C} = \frac{1.88 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{10.829 \text{ ppg}} = 0.174 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$v_{\text{nanomaterial } 2.5\%BWO C} = \frac{2.35 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{10.829 \text{ ppg}} = 0.217 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$v_{\text{nanomaterial } 3\%BWO C} = \frac{2.82 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{10.829 \text{ ppg}} = 0.260 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$v_{\text{nanomaterial } 3.5\%BWO C} = \frac{3.29 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{10.829 \text{ ppg}} = 0.304 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$v_{\text{nanomaterial } 4\%BWO C} = \frac{3.76 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{10.829 \text{ ppg}} = 0.347 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$v_{\text{nanomaterial } 4.5\%BWO C} = \frac{4.23 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{10.829 \text{ ppg}} = 0.391 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$v_{\text{nanomaterial } 5\%BWO C} = \frac{4.7 \frac{\text{lb}}{\text{sk}}}{10.829 \text{ ppg}} = 0.434 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

ANEXO H.
 Σm DISEÑOS DE LECHADA CON NANOMATERIAL.

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 1\%BWOC} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 0.94 \frac{lb}{sk} = 116.198 \frac{lb}{sk}$$

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 1.5\%BWOC} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 1.41 \frac{lb}{sk} = 116.668 \frac{lb}{sk}$$

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 2\%BWOC} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 1.88 \frac{lb}{sk} = 117.138 \frac{lb}{sk}$$

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 2.5\%BWOC} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 2.35 \frac{lb}{sk} = 117.608 \frac{lb}{sk}$$

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 3\%BWOC} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 2.82 \frac{lb}{sk} = 118.078 \frac{lb}{sk}$$

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 3.5\%BWOC} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 3.29 \frac{lb}{sk} = 118.548 \frac{lb}{sk}$$

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 4\%BWOC} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 3.76 \frac{lb}{sk} = 119.018 \frac{lb}{sk}$$

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 4.5\%BWOC} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 4.23 \frac{lb}{sk} = 119.488 \frac{lb}{sk}$$

$$\Sigma m_{nanomaterial\ 5\%BWOC} = 115.258 \frac{lb}{sk} + 4.7 \frac{lb}{sk} = 119.958 \frac{lb}{sk}$$

ANEXO I.
 Σv DISEÑOS DE LECHADA CON NANOMATERIAL.

$$\Sigma v_{\text{nanomaterial } 1\%BWO C} = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.0868 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} = 5.805 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$\Sigma v_{\text{nanomaterial } 1.5\%BWO C} = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.130 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} = 5.848 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$\Sigma v_{\text{nanomaterial } 2\%BWO C} = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.174 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} = 5.891 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$\Sigma v_{\text{nanomaterial } 2.5\%BWO C} = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.217 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} = 5.935 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$\Sigma v_{\text{nanomaterial } 3\%BWO C} = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.260 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} = 5.978 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$\Sigma v_{\text{nanomaterial } 3.5\%BWO C} = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.304 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} = 6.022 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$\Sigma v_{\text{nanomaterial } 4\%BWO C} = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.347 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} = 6.065 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$\Sigma v_{\text{nanomaterial } 4.5\%BWO C} = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.391 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} = 6.108 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

$$\Sigma v_{\text{nanomaterial } 5\%BWO C} = 5.717 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 0.434 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} = 6.152 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}$$

ANEXO J.
REQUERIMIENTO DE AGUA PARA LOS DISEÑOS DE LECHADAS CON NANOMATERIAL.

$$v_{agua\ nanom\ 1\%BWO} = \frac{116.198 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 5.805 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 5.18 \frac{gal}{sk}$$

$$v_{agua\ nanom\ 1.5\%BWO} = \frac{116.668 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 5.848 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 5.15 \frac{gal}{sk}$$

$$v_{agua\ nanom\ 2\%BWO} = \frac{117.138 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 5.891 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 5.13 \frac{gal}{sk}$$

$$v_{agua\ nanom\ 2.5\%BWO} = \frac{117.608 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 5.935 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 5.10 \frac{gal}{sk}$$

$$v_{agua\ nanom\ 3\%BWO} = \frac{118.078 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 5.978 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 5.07 \frac{gal}{sk}$$

$$v_{agua\ nanom\ 3.5\%BWO} = \frac{118.548 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 6.022 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 5.05 \frac{gal}{sk}$$

$$v_{agua\ nanom\ 4\%BWO} = \frac{119.018 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 6.065 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 5.02 \frac{gal}{sk}$$

$$v_{agua\ nanom\ 4.5\%BWO} = \frac{119.488 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 6.108 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 5.00 \frac{gal}{sk}$$

$$v_{agua\ nanom\ 5\%BWO} = \frac{119.958 \frac{lb}{sk} - \left(14.5 \frac{lb}{gal} * 6.152 \frac{gal}{sk}\right)}{\left(14.5 \frac{lb}{gal} - 8.31 \frac{lb}{gal}\right)} = 4.97 \frac{gal}{sk}$$

**ANEXO K.
RENDIMIENTO DE LAS LECHADAS CON NANOMATERIAL**

$$\text{Rendimiento } 1\%BWO C = \frac{5.805 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 5.18 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.47 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

$$\text{Rendimiento } 1.5\%BWO C = \frac{5.848 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 5.15 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.47 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

$$\text{Rendimiento } 2\%BWO C = \frac{5.891 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 5.13 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.47 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

$$\text{Rendimiento } 2.5\%BWO C = \frac{5.935 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 5.10 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.48 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

$$\text{Rendimiento } 3\%BWO C = \frac{5.978 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 5.07 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.48 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

$$\text{Rendimiento } 3.5\%BWO C = \frac{6.022 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 5.05 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.48 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

$$\text{Rendimiento } 4\%BWO C = \frac{6.065 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 5.02 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.48 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

$$\text{Rendimiento } 4.5\%BWO C = \frac{6.108 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 5.00 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.48 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

$$\text{Rendimiento } 5\%BWO C = \frac{6.152 \frac{\text{gal}}{\text{sk}} + 4.97 \frac{\text{gal}}{\text{sk}}}{7.48 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3}} = 1.49 \frac{\text{ft}^3}{\text{sk}}$$

ANEXO L.
CANTIDAD DE CEMENTO PARA 600ML DE LECHADA CON NANOMATERIAL

$$masa_{\text{ cemento 1\%BWOC nanom}} = \frac{903.434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} = 615.35 \text{ gr}$$

$$masa_{\text{ cemento 1.5\%BWOC nanom}} = \frac{903.434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} = 614.36 \text{ gr}$$

$$masa_{\text{ cemento 2\%BWOC nanom}} = \frac{903.434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} = 613.38 \text{ gr}$$

$$masa_{\text{ cemento 2.5\%BWOC nanom}} = \frac{903.434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} = 612.4 \text{ gr}$$

$$masa_{\text{ cemento 3\%BWOC nanom}} = \frac{903.434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} = 611.42 \text{ gr}$$

$$masa_{\text{ cemento 3.5\%BWOC nanom}} = \frac{903.434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} = 610.45 \text{ gr}$$

$$masa_{\text{ cemento 4\%BWOC nanom}} = \frac{903.434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} = 609.48 \text{ gr}$$

$$masa_{\text{ cemento 4.5\%BWOC nanom}} = \frac{903.434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} = 608.51 \text{ gr}$$

$$masa_{\text{ cemento 5\%BWOC nanom}} = \frac{903.434}{1.49 \frac{ft^3}{sk}} = 607.54 \text{ gr}$$

ANEXO M.
CANTIDAD DE AGUA PARA 600ML DE LECHADA CON NANOMATERIAL.

$$masa_{agua\ 1\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 5.18 \frac{gal}{sk} * 8.31ppg = 281.75\ gr$$

$$masa_{agua\ 1.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 5.15 \frac{gal}{sk} * 8.31ppg = 279.90\ gr$$

$$masa_{agua\ 2\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 5.13 \frac{gal}{sk} * 8.31ppg = 278.06\ gr$$

$$masa_{agua\ 2.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5.10 \frac{gal}{sk} * 8.31ppg = 276.22\ gr$$

$$masa_{agua\ 3\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5.07 \frac{gal}{sk} * 8.31ppg = 274.38\ gr$$

$$masa_{agua\ 3.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5.05 \frac{gal}{sk} * 8.31ppg = 272.56\ gr$$

$$masa_{agua\ 4\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5.02 \frac{gal}{sk} * 8.31ppg = 270.73\ gr$$

$$masa_{agua\ 4.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5.00 \frac{gal}{sk} * 8.31ppg = 268.92\ gr$$

$$masa_{agua\ 5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.49 \frac{ft^3}{sk}} * 4.97 \frac{gal}{sk} * 8.31ppg = 267.11\ gr$$

**ANEXO N.
CANTIDAD DE RETARDADOR PARA 600ML DE LECHADA CON
NANOMATERIALES.**

$$masa_{retardador\ 1\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.23\ gr$$

$$masa_{retardador\ 1.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.23\ gr$$

$$masa_{retardador\ 2\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.23\ gr$$

$$masa_{retardador\ 2.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.22\ gr$$

$$masa_{retardador\ 3\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.22\ gr$$

$$masa_{retardador\ 3.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.22\ gr$$

$$masa_{retardador\ 4\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.22\ gr$$

$$masa_{retardador\ 4.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.22\ gr$$

$$masa_{retardador\ 5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.49 \frac{ft^3}{sk}} * 0.2\%BWOC = 1.22\ gr$$

ANEXO Ñ.
CANTIDAD DE CONTROLADOR DE FILTRADO PARA 600ML DE LECHADA
CON NANOMATERIALES.

$$masa_{cont f 1\%BWOC nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.15 gr$$

$$masa_{cont f 1.5\%BWOC nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.14 gr$$

$$masa_{cont f 2\%BWOC nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.13 gr$$

$$masa_{cont f 2.5\%BWOC nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.12 gr$$

$$masa_{cont f 3\%BWOC nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.11 gr$$

$$masa_{cont f 3.5\%BWOC nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.10 gr$$

$$masa_{cont f 4\%BWOC nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.09 gr$$

$$masa_{cont f 4.5\%BWOC nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.09 gr$$

$$masa_{cont f 5\%BWOC nanom} = \frac{9.03434}{1.49 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.08 gr$$

**ANEXO O.
CANTIDAD DE ADITIVO ESPECIAL PARA 600ML DE LECHADA CON
NANOMATERIALES.**

$$masa_{ad.esp\ 1\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.77\ gr$$

$$masa_{ad.esp\ 1.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.72\ gr$$

$$masa_{ad.esp\ 2\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.67\ gr$$

$$masa_{ad.esp\ 2.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.62\ gr$$

$$masa_{ad.esp\ 3\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.57\ gr$$

$$masa_{ad.esp\ 3.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.52\ gr$$

$$masa_{ad.esp\ 4\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.47\ gr$$

$$masa_{ad.esp\ 4.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.43\ gr$$

$$masa_{ad.esp\ 5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.49 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.38\ gr$$

**ANEXO P.
CANTIDAD DE AGENTE ALIVIANANTE PARA 600ML DE LECHADA CON
NANOMATERIALES.**

$$masa_{age.ali\ 1\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 73.84\ gr$$

$$masa_{age.ali\ 1.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 73.72\ gr$$

$$masa_{age.ali\ 2\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 73.61\ gr$$

$$masa_{age.ali\ 2.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 73.49\ gr$$

$$masa_{age.ali\ 3\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 73.37\ gr$$

$$masa_{age.ali\ 3.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 73.25\ gr$$

$$masa_{age.ali\ 4\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 73.14\ gr$$

$$masa_{age.ali\ 4.5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 73.02\ gr$$

$$masa_{age.ali\ 5\%BWOC\ nanom} = \frac{9.03434}{1.49 \frac{ft^3}{sk}} * 12\%BWOC = 72.90\ gr$$

ANEXO Q.
CANTIDAD DE CONTROLADOR DE GAS PARA 600ML DE LECHADA CON NANOMATERIALES.

$$masa_{Con.g\ 1\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 27.16\ gr$$

$$masa_{Con.g\ 1.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 27.11\ gr$$

$$masa_{Con.g\ 2\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 27.07\ gr$$

$$masa_{Con.g\ 2.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 27.03\ gr$$

$$masa_{Con.g\ 3\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 26.98\ gr$$

$$masa_{Con.g\ 3.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 26.94\ gr$$

$$masa_{Con.g\ 4\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 26.90\ gr$$

$$masa_{Con.g\ 4.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 26.85\ gr$$

$$masa_{Con.g\ 5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.49 \frac{ft^3}{sk}} * 0.5\ GPS * 8.30ppg = 26.81\ gr$$

**ANEXO R.
CANTIDAD DE ANTIESPUMANTE PARA 600ML DE LECHADA CON
NANOMATERIALES.**

$$masa_{anties\ 1\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.54\ gr$$

$$masa_{anties\ 1.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.54\ gr$$

$$masa_{anties\ 2\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.54\ gr$$

$$masa_{anties\ 2.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.54\ gr$$

$$masa_{anties\ 3\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.54\ gr$$

$$masa_{anties\ 3.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.54\ gr$$

$$masa_{anties\ 4\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.54\ gr$$

$$masa_{anties\ 4.5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.48 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.54\ gr$$

$$masa_{anties\ 5\%BWO\ nanom} = \frac{9.611}{1.49 \frac{ft^3}{sk}} * 0.01\ GPS * 8.31ppg = 0.54\ gr$$

**ANEXO S.
CANTIDAD DE NANOMATERIALES PARA 600ML DE LAS DIFERENTES
LECHADAS.**

$$masa_{nanomaterial\ 1\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 1\%BWOC = 6.15\ gr$$

$$masa_{nanomaterial\ 1.5\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 1.5\%BWOC = 9.22\ gr$$

$$masa_{nanomaterial\ 2\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 2\%BWOC = 12.27\ gr$$

$$masa_{nanomaterial\ 2.5\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 2.5\%BWOC = 15.31\ gr$$

$$masa_{nanomaterial\ 3\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 3\%BWOC = 18.34\ gr$$

$$masa_{nanomaterial\ 3.5\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 3.5\%BWOC = 21.37\ gr$$

$$masa_{nanomaterial\ 4\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 4\%BWOC = 24.38\ gr$$

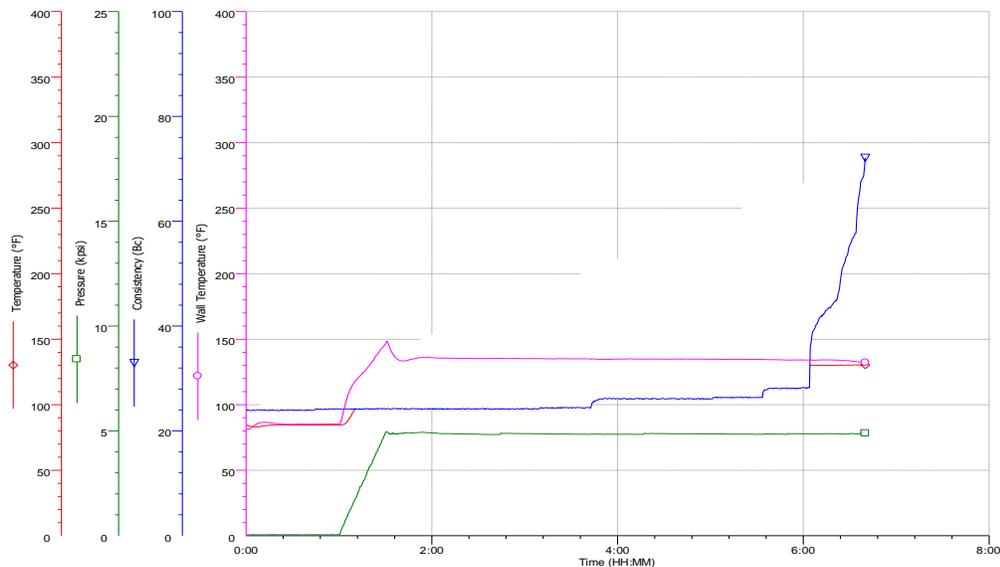
$$masa_{nanomaterial\ 4.5\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 4.5\%BWOC = 27.38\ gr$$

$$masa_{nanomaterial\ 5\%BWOC} = \frac{9.03434}{1.47 \frac{ft^3}{sk}} * 5\%BWOC = 30.38\ gr$$

ANEXO T. REPORTE LABORATORIO LECHADAS CON NANOMATERIALES.

		REPORTE DISEÑO DE LECHADA							
# Report:	2	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7				
WELL DATA		TEST DATA: Parameters			TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis nanomateriales	T.V.D.:	7669	[ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration		Lote
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172	[°F]			[]	Unit	
I.T.S. Eng.:	Juan Felipe Pinzon	BHCT:	130	[°F]	Cemento	NA	100%	% BWOC	NA
Well:	Ca 421	Gradient T:	1,2	[°F/100ft]	Agua	NA	NA	NA	NA
Location:	Castilla	Water Req.:	5,20	[GPS]	Antiespumante	NA	0,01%	GPS	NA
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,47	[ft./sk]	Controlador Gas	NA	0,50%	GPS	NA
Cement data:	NA	Density:	14,5	[PPG]	Controlador filtrado	NA	1%	% BWOC	NA
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation			Retardador	NA	0,20%	% BWOC	NA
Mud Weight [PPG]	NA				Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Aditivo especial	NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Agente alivianante	NA	12%	% BWOC	NA
Field:	Castilla				Nanosilice	NA	0,50%	% BWOC	NA
RESULTS									
THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH			
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]:	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method		
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]	
Initial Bc	0	0	100	NA	NA	12	NA		
@ 30 Bc	NA	NA	500	NA	NA		24	2624	
@ 50 Bc	NA	NA	FREE FLUID			36		NA	
@ 70 Bc	6	39	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]		T [°F] Run Test		
@ 100 Bc	NA	NA	45	60	0,0	172			
T [°F] Run Test	130					P [PSI] Run Test			3000
RHEOLOGIES (BHST)									
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300		
L1	10	17	56	90	124	165	210		
L2	7	14	53	84	118	165	210		
Lp	9	15,5	54,5	87	121	165	210		
T [°F] Run Test									
FLUID MODELS					GEL STRENGTH				
					[Lb./100 ft ²]:				
Bingham		Power Law							
Vp [cp]:	134	N'	0,501830346	10 [sec]	NA				
Pc [Lb./100 ft ²]:	82	K'	0,097814019	10 [min]	NA				
FLUID LOSS		24			[ml/30 min]		[@ 1000 [PSI]		

PLOTS
THICKENING TIME

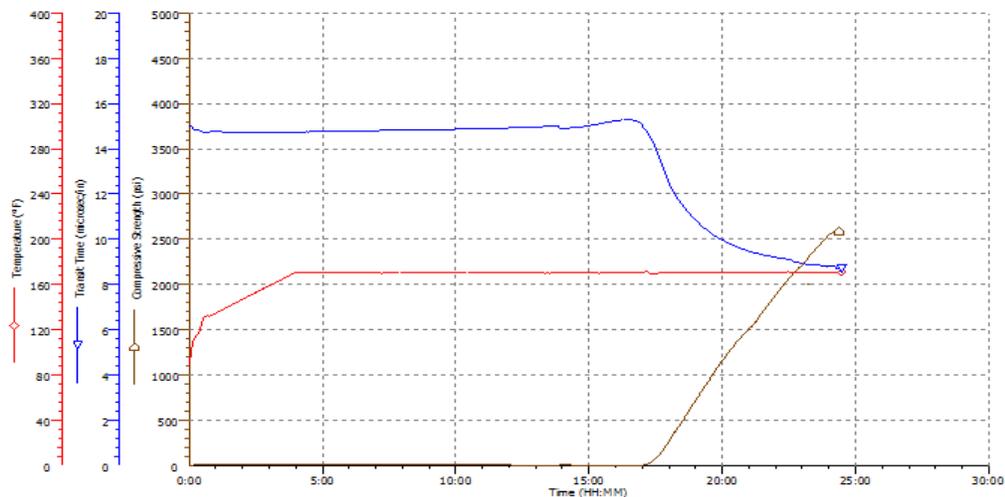


CA LINER 7 14.5PPG 0.2 R-01 0.5 NANOM

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: S GSA5265_700 700
 Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)
 Comments: NANOMATERIAL 0.5%

Algorithm: Static gel strength



CHANDLER
ENGINEERING

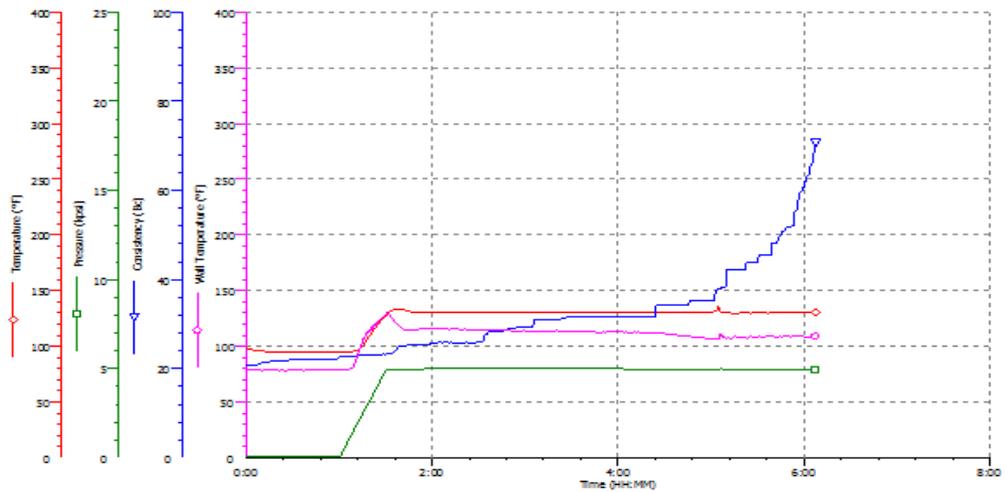
Test File Name: S GSA CA LINER 7 14.5 PPG 0.2 R-01 0.5 NANOM
 Printed: 10/3/2016 7:57:20 AM

Page 1

# Report:	3	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7			
WELL DATA		TEST DATA: Parameters		TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis nanomateriales	T.V.D.:	7669 [ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration	Lote	
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172 [°F]	Cemento	NA	100%	% BWOC NA	
I.T.S. Eng.:	Juan Felipe Pinzon	BHCT:	130 [°F]	Agua	NA	NA	NA NA	
Well:	Ca 421	Gradient T:	1,2 [°F/100ft]	Antiespumante	NA	0,01%	GPS NA	
Location:	Castilla	Water Req.:	5,18 [GPS]	Controlador Gas	NA	0,50%	GPS NA	
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,47 [ft./sk]	Controlador filtrado	NA	1%	% BWOC NA	
Cement data:	NA	Density:	14,5 [PPG]	Retardador	NA	0,20%	% BWOC NA	
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation		Aditivo especial	NA	5%	% BWOC NA	
Mud Weight [PPG]	NA	Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Agente alivianante	NA	12%	% BWOC NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Nanoslice	NA	1%	% BWOC NA
Field:	Castilla							
RESULTS								
THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH		
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]:	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method	
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]
Initial Bc	0	0	100	NA	NA	12	NA NA	
@ 30 Bc	N.A	N.A	500	NA	NA	24	2742 NA	
@ 50 Bc	N.A	N.A	FREE FLUID			36	NA NA	
@ 70 Bc	6	7	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]	T [°F] Run Test 172		
@ 100 Bc	N.A	N.A	45	60	0,0	P [PSI] Run Test 3000		
T [°F] Run Test	130							
RHEOLOGIES (BHST)								
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300	
L1	10	17	56	90	124	165	210	
L2	7	14	53	84	118	165	210	
Lp	9	15,5	54,5	87	121	165	210	
T [°F] Run Test								
FLUID MODELS				GEL STRENGTH				
Bingham		Power Law		[Lbf/100 ft ²]:				
Vp [cp]:	134	N'	0,501830346	10 [sec]	NA			
Pc [Lbf/100 ft ²]:	82	K'	0,097814019	10 [min]	NA			
FLUID LOSS		24		[ml/30 min]		[@] 1000 [PSI]		

PLOTS
THICKENING TIME

Instrument: TTT222_452_482
Comments: NANOMATERIALS AL 1%



CHANDLER
ENGINEERING

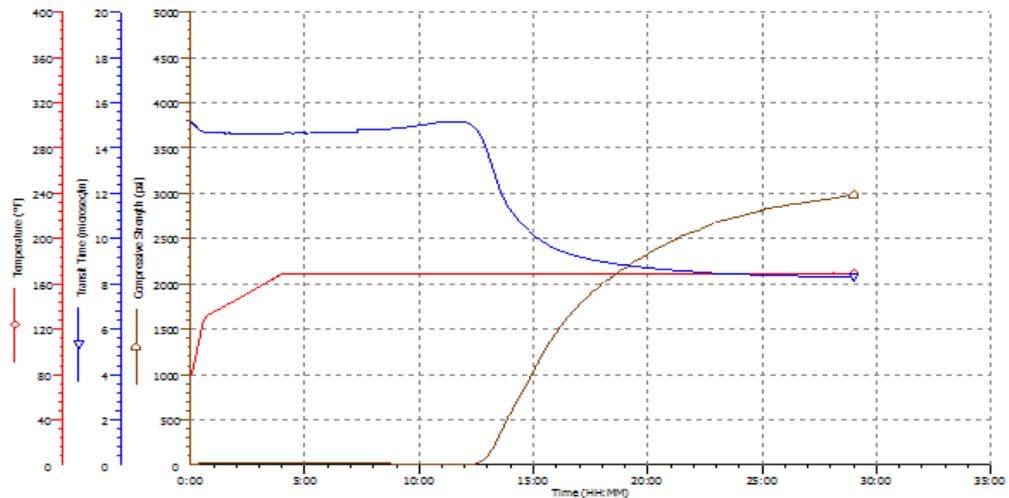
Test File Name: CALNER 7 14.5 PFG 0.2 R01 1.0 NANOM
Printed: 10/3/2016 7:18:35 AM

Page 1

COMPRESSIVESTRENGTH

Instrument: SCSA_746 745
Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 bips)
Comments: 1.0% NANOMATERIALS

Algorithm: Static gel strength



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: SCSA CALNER 7 14.5 PFG 1.0% NANOM
Printed: 10/3/2016 7:54:25 AM

Page 1

# Report:	4	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7
-----------	---	-------	---------	--------------------	---------

WELL DATA		TEST DATA: Parameters			TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis Nanomateriales	T.V.D.:	7669	[ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration		Lote
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172	[°F]			[]	Unit	
I.T.S. Eng.:	Carlos Alfonso Mesa	BHCT:	130	[°F]	Cemento	NA	100,00%	% BWOW	NA
Well:	CA 421	Gradient T:	1,2	[°F/100ft]	Agua	NA	NA	% BWOW	NA
Location:	Castilla	Water Req.:	5,15	[GPS]	Antiespumante	NA	0,0001	GPS	NA
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,47	[ft./sk]	Controlador Gas	NA	0,5	GPS	NA
Cement data:	NA	Density:	14,5	[PPG]	Controlador Filtado	NA	1,00%	% BWOW	NA
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation			Retardador	NA	0,2%	% BWOW	NA
Mud Weight [PPG]	NA	Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Aditivo especial	NA	5%	%BWOC	NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Agente alivianante	NA	12,00%	%BWOC	NA
Field:	Castilla				Nanoslice	NA	1,5	%BWOC	NA

RESULTS

THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH		
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method	
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]
Initial Bc	21	0	100			12	NA	NA
@ 30 Bc	NA	NA	500			24	NA	2755
@ 50 Bc	NA	NA	FREE FLUID			36	NA	NA
@ 70 Bc	5	38	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]	T [°F] Run Test		
@ 100 Bc	NA	NA	45	60	0,0	P [PSI] Run Test		
T [°F] Run Test	130					3000		

RHEOLOGIES (BHST)							
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300
L1	15	25	57	91	124	180	230
L2	7	10	38	65	97	170	230
Lp	11	17,5	47,5	78	111	175	230

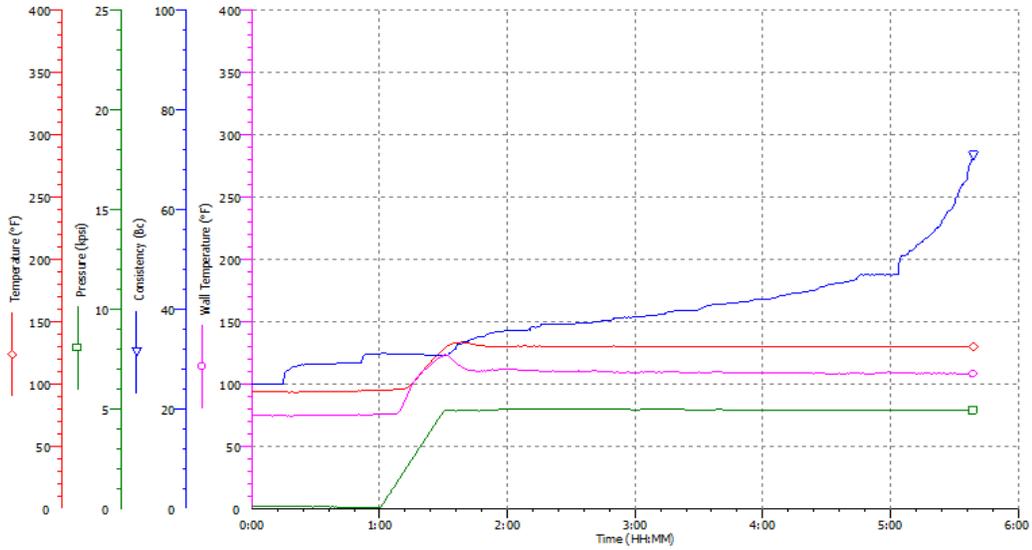
FLUID MODELS				GEL STRENGTH		BHCT
Bingham		Power Law		[Lb./100 ft ²]:		130
Vp [cp]:	179	N'	0,667263415	10 [sec]	NA	
Pc [Lb./100 ft ²]:	54	K'	0,038180997	10 [min]	NA	

FLUID LOSS	23,2	[ml/30 min]	@ 1000 [PSI]
------------	------	-------------	--------------

PLOTS

THICKENING TIME

Instrument: TT7222_462 482
 Comments: 1.5 NANOMATERIALES



CHANDLER
 ENGINEERING®

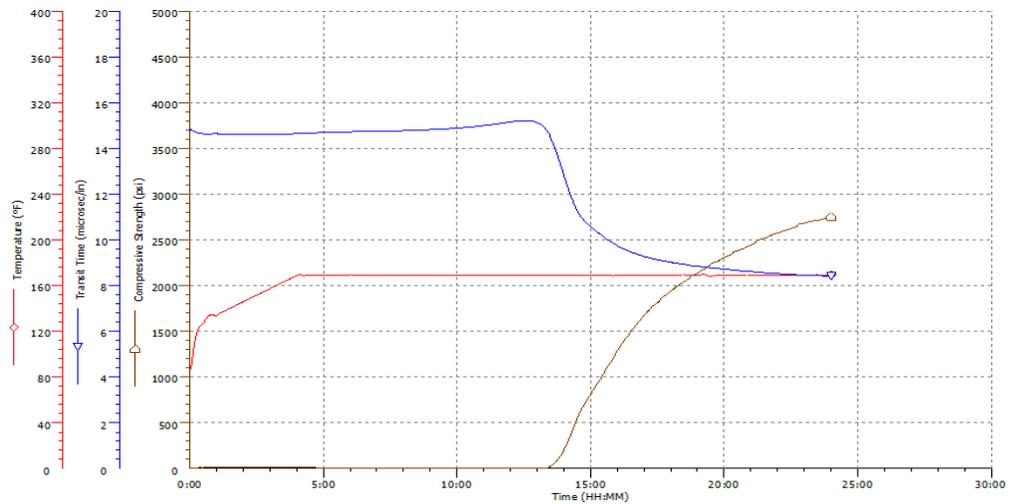
Test File Name: CA LINER 7 14.5 PPG 0.2 R-01 1.5 NANOM
 Printed: 10/3/2016 7:20:02 AM

Page 1

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: SGSA5265_700 700
 Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)
 Comments: 1.5% NANOMATERIALES

Algorithm: Static gel strength



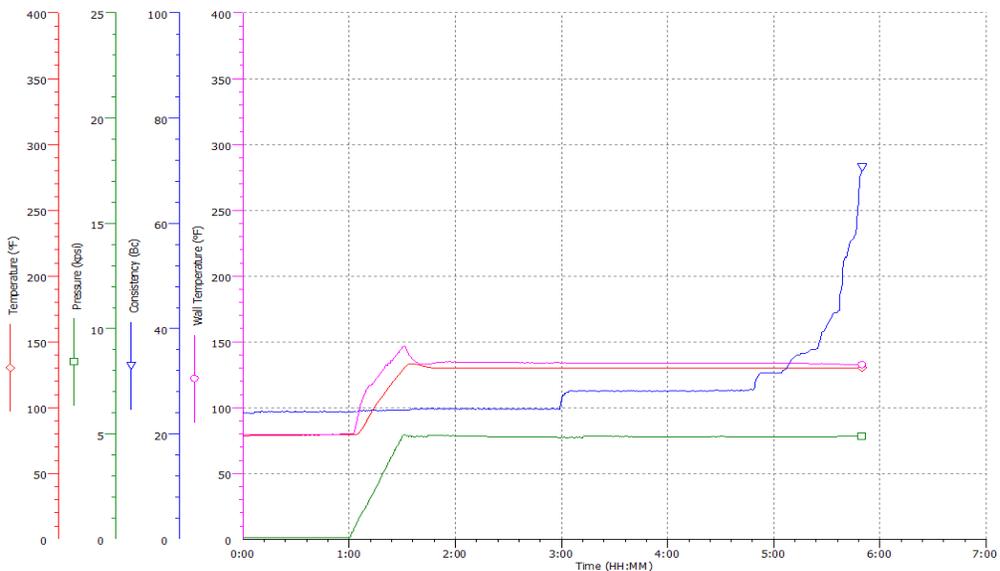
CHANDLER
 ENGINEERING

Test File Name: SGSA CA LINER 7 14.5 PPG 0.1 R-01 1.5% NANOM
 Printed: 10/3/2016 7:55:01 AM

Page 1

# Report:	5	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7			
WELL DATA		TEST DATA: Parameters		TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis Nanomateriales	T.V.D.:	7669 [ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration	Lote	
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172 [°F]	Cemento	NA	100,00%	% BWOW NA	
I.T.S. Eng.:	Carlos Alfonso Mesa	BHCT:	130 [°F]	Agua	NA	NA	% BWOW NA	
Well:	CA 421	Gradient T:	1,2 [°F/100ft]	Antiespumante	NA	0,0001	GPS NA	
Location:	Castilla	Water Req.:	5,15 [GPS]	Controlador Gas	NA	0,5	GPS NA	
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,47 [ft./sk]	Controlador Filtado	NA	1,00%	% BWOW NA	
Cement data:	NA	Density:	14,5 [PPG]	Retardador	NA	0,2%	% BWOW NA	
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation		Aditivo especial	NA	5%	%BWOC NA	
Mud Weight [PPG]	NA	Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Agente alivianante	NA	12,00%	%BWOC NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Nanoslice	NA	2	%BWOC NA
Field:	Castilla							
RESULTS								
THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH		
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]:	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	Method		
	[Hr.]	[min]				Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]	
Initial Bc	23	0	100					12
(@ 30 Bc)	NA	NA	500			24	NA	2581
(@ 50 Bc)	NA	NA	FREE FLUID			36	NA	NA
(@ 70 Bc)	5	50	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]	T [°F] Run Test		BHST
(@ 100 Bc)	NA	NA	45	60	0,0	P [PSI] Run Test		3000
T [°F] Run Test	130							
RHEOLOGIES (BHST)								
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300	
L1	14	25	60	87	122	210	240	
L2	9	13	40	70	102	176	240	
Lp	12	19	50	79	112	193	240	T [°F] Run Test
FLUID MODELS				GEL STRENGTH				BHCT
Bingham		Power Law		[Lb./100 ft ²]:				130
Vp [cp]:	192	N'	0,693729772	10 [sec]	NA			
Pc [Lb./100 ft ²]:	51	K'	0,033779144	10 [min]	NA			
FLUID LOSS	22,8		[ml/30 min]		[@ 1000 [PSI]			

PLOTS
THICKENING TIME

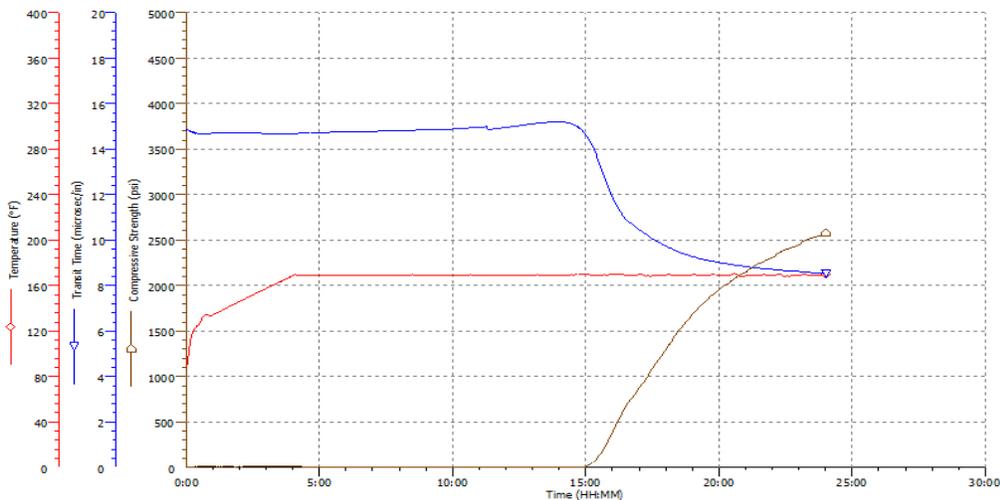


CA LINER 7 14.5PPG 0.2 R-01 2.0 NANOM

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: SGSA5265_700 700
Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 b/gal)
Comments: 2.0% NANOMATERIALS

Algorithm: Static gel strength



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: SGSA CA LINER 7 14.5 PPG 0.1 R-01 2.0% NANOM
Printed: 10/3/2016 7:55:20 AM

Page 1

# Report:	6	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7
-----------	---	-------	---------	--------------------	---------

WELL DATA		TEST DATA: Parameters			TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis nanomateriales	T.V.D.:	7669	[ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration		Lote
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172	[°F]			[]	Unit	
I.T.S. Eng.:	Juan Felipe Pinzon	BHCT:	130	[°F]	Cemento	NA	100%	% BWOC	NA
Well:	Ca 421	Gradient T:	1,2	[°F/100ft]	Agua	NA	NA	NA	NA
Location:	Castilla	Water Req.:	5,10	[GPS]	Antiespumante	NA	0,01%	GPS	NA
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,48	[ft./sk]	Controlador Gas	NA	0,50%	GPS	NA
Cement data:	NA	Density:	14,5	[PPG]	Controlador filtrado	NA	1%	% BWOC	NA
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation			Retardador	NA	0,20%	% BWOC	NA
Mud Weight [PPG]	NA	Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Aditivo especial	NA	5%	% BWOC	NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Agente alivianante	NA	12%	% BWOC	NA
Field:	Castilla				Nanoslice	NA	2,5%	% BWOC	NA

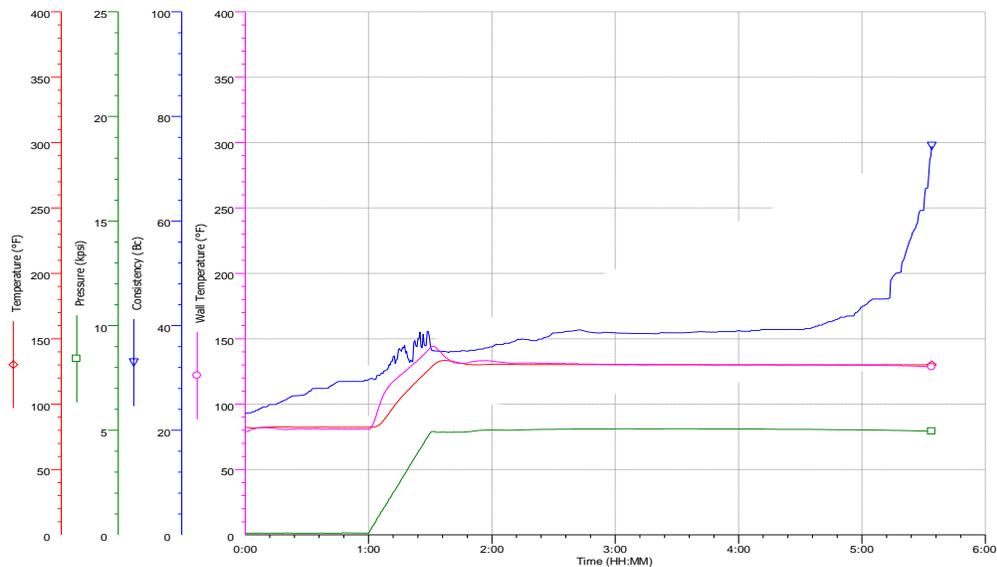
RESULTS									
THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH			
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method		
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]	
Initial Bc	0	0	100	NA	NA	12	NA	NA	
@ 30 Bc	NA	NA	500	NA	NA	24	2797	NA	
@ 50 Bc	NA	NA	FREE FLUID			36	NA	NA	
@ 70 Bc	5	33	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]	T [°F] Run Test		172	
@ 100 Bc	NA	NA	45	60	0,0	P [PSI] Run Test		3000	
T [°F] Run Test	130								

RHEOLOGIES (BHST)							
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300
L1	10	21	68	97	126	203	250
L2	10	17	53	82	110	189	250
Lp	10	19	60,5	90	118	196	250

FLUID MODELS				GEL STRENGTH	
Bingham		Power Law		[Lb _f /100 ft ²]:	
Vp [cp]:	198	N'	0,683386033	10 [sec]	NA
Pc [Lb _f /100 ft ²]:	55	K'	0,037531213	10 [min]	NA

FLUID LOSS	22,2	[ml/30 min]	[@ 1000 [PSI]
------------	------	-------------	---------------

PLOTS
THICKENING TIME

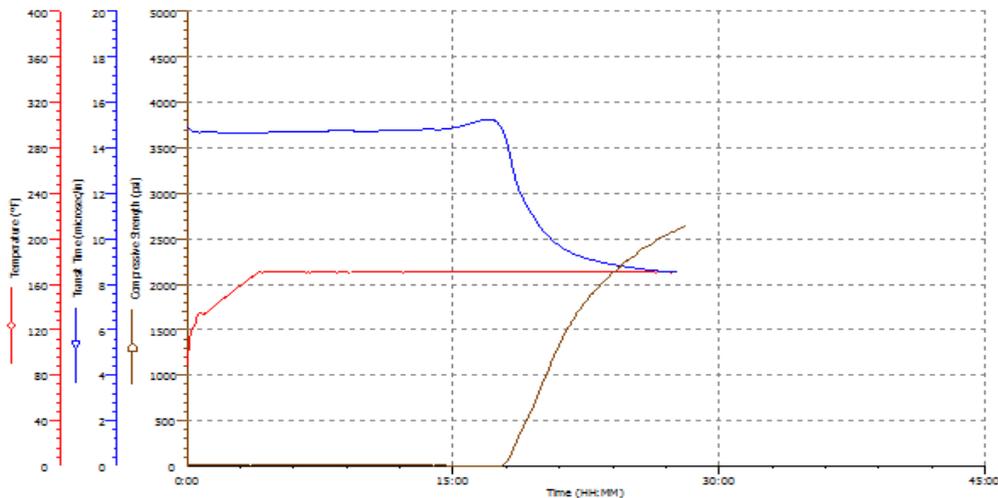


CA LINER 7 14.5PPG 0.2 R-01 2.5 NANOM

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: SGBAS265_700 700
Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 bps)

Algorithm: Staticgelstrength



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: SGBA CA LINER 7 14.5 PPG 0.2 R-01
Printed: 10/3/2016 7:57:37 AM

Page 1

# Report:	5	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7
-----------	---	-------	---------	--------------------	---------

WELL DATA		TEST DATA: Parameters			TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis Nanomateriales	T.V.D.:	7669	[ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration		Lote
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172	[°F]			[]	Unit	
I.T.S. Eng.:	Carlos Alfonso Mesa	BHCT:	130	[°F]	Cemento	NA	100,00%	% BWOW	NA
Well:	CA 421	Gradient T:	1,2	[°F/100ft]	Agua	NA	NA	% BWOW	NA
Location:	Castilla	Water Req.:	5,15	[GPS]	Antiespumante	NA	0,0001	GPS	NA
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,47	[ft./sk]	Controlador Gas	NA	0,5	GPS	NA
Cement data:	NA	Density:	14,5	[PPG]	Controlador Filtado	NA	1,00%	% BWOW	NA
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation			Retardador	NA	0,2%	% BWOW	NA
Mud Weight [PPG]	NA				Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Aditivo especial	NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Agente alivianante	NA	12,00%	%BWOC	NA
Field:	Castilla				Nanoslice	NA	3	%BWOC	NA

RESULTS

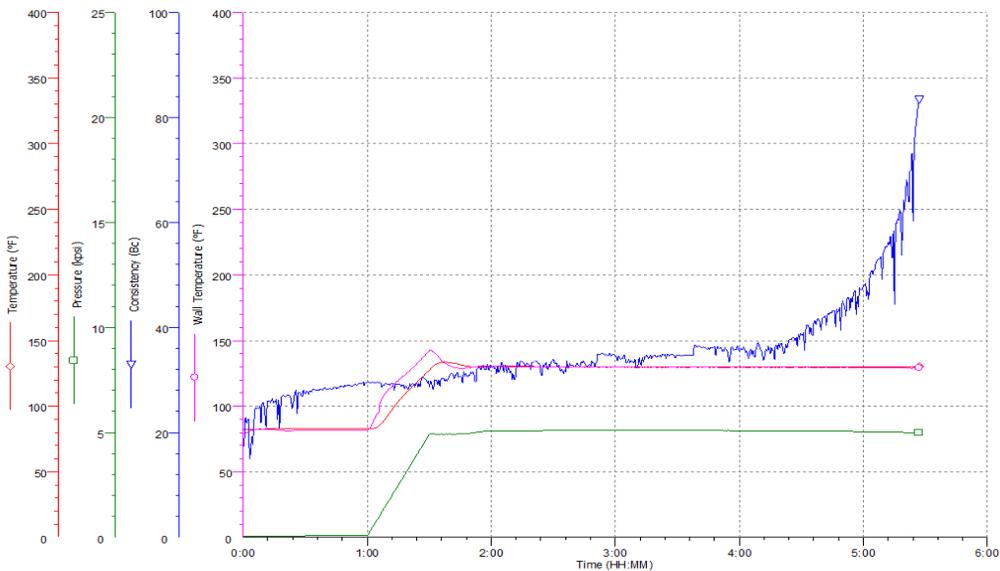
THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH		
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]:	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method	
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]
Initial Bc	22	0	100			12	NA	NA
(@ 30 Bc)	NA	NA	500			24	NA	2856
(@ 50 Bc)	NA	NA	FREE FLUID			36	NA	NA
(@ 70 Bc)	5	24	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]	T [°F] Run Test		
(@ 100 Bc)	NA	NA	45	60	0,0	BHST		
T [°F] Run Test	130					P [PSI] Run Test		
						3000		

RHEOLOGIES (BHST)							
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300
L1	15	31	83	116	150	230	300
L2	16	28	67	106	140	225	300
Lp	16	29,5	75	111	145	228	300

FLUID MODELS				GEL STRENGTH		BHCT
Bingham		Power Law		[Lb./100 ft ²]:		130
Vp [cp]:	233	N'	0,661788276	10 [sec]	NA	
Pc [Lb./100 ft ²]:	72	K'	0,05153113	10 [min]	NA	

FLUID LOSS	22,8	[ml/30 min]	[@ 1000 [PSI]
------------	------	-------------	---------------

PLOTS
THICKENING TIME

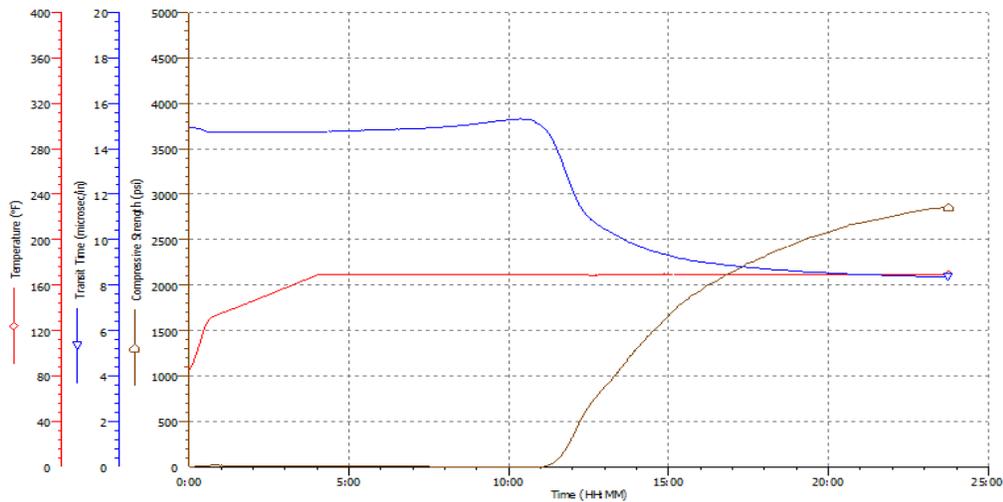


CA LINER 7 14.5PPG 0.2 R-01 3.0 NANOM

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: SGSA_745 745
Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)
Comments: 3.0% NANOMATERIALS

Algorithm: Static gel strength



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: SGSA CA LINER 7 14.5 PPG 0.1 R-01 3.0% NANOM
Printed: 10/3/2016 7:55:39 AM

Page 1

# Report:	8	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7
-----------	---	-------	---------	--------------------	---------

WELL DATA		TEST DATA: Parameters			TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis nanomateriales	T.V.D.:	7669	[ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration		Lote
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172	[°F]			[]	Unit	
I.T.S. Eng.:	Juan Felipe Pinzon	BHCT:	130	[°F]	Cemento	NA	100%	% BWOC	NA
Well:	Ca 421	Gradient T:	1,2	[°F/100ft]	Agua	NA	NA	NA	NA
Location:	Castilla	Water Req.:	5,05	[GPS]	Antiespumante	NA	0,01%	GPS	NA
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,48	[ft./sk]	Controlador Gas	NA	0,50%	GPS	NA
Cement data:	NA	Density:	14,5	[PPG]	Controlador filtrado	NA	1%	% BWOC	NA
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation			Retardador	NA	0,20%	% BWOC	NA
Mud Weight [PPG]	NA	Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Aditivo especial	NA	5%	% BWOC	NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Agente alivianante	NA	12%	% BWOC	NA
Field:	Castilla				Nanoslice	NA	3,5%	% BWOC	NA

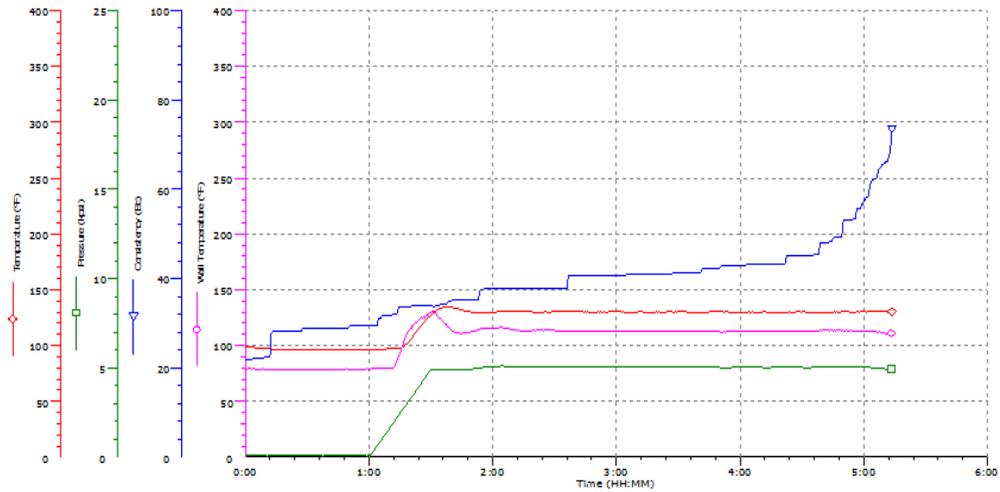
RESULTS									
THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH			
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method		
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]	
Initial Bc	80	0	100	NA	NA	12	NA	NA	
@ 30 Bc	NA	NA	500	NA	NA	24	2902	NA	
@ 50 Bc	NA	NA	FREE FLUID			36	NA	NA	
@ 70 Bc	5	13	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]	T [°F] Run Test		172	
@ 100 Bc	NA	NA	45	60	0,0	P [PSI] Run Test		3000	
T [°F] Run Test	130								

RHEOLOGIES (BHST)								
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300	
L1	40	50	90	125	160	247	300	
L2	30	36	75	111	153	244	300	
Lp	35	43	82,5	118	157	246	300	
T [°F] Run Test								
FLUID MODELS				GEL STRENGTH				130
Bingham		Power Law		[Lb _f /100 ft ²]:				
Vp [cp]:	215	N'	0,592316754	10 [sec]	NA			
Pc [Lb _f /100 ft ²]:	90	K'	0,079474497	10 [min]	NA			

FLUID LOSS	23,6	[ml/30 min]	[@ 1000 [PSI]
------------	------	-------------	---------------

PLOTS
THICKENING TIME

Instrument: TT722_462.462
Comments: 3.5% NANOMATERIALES



CHANDLER
ENGINEERING

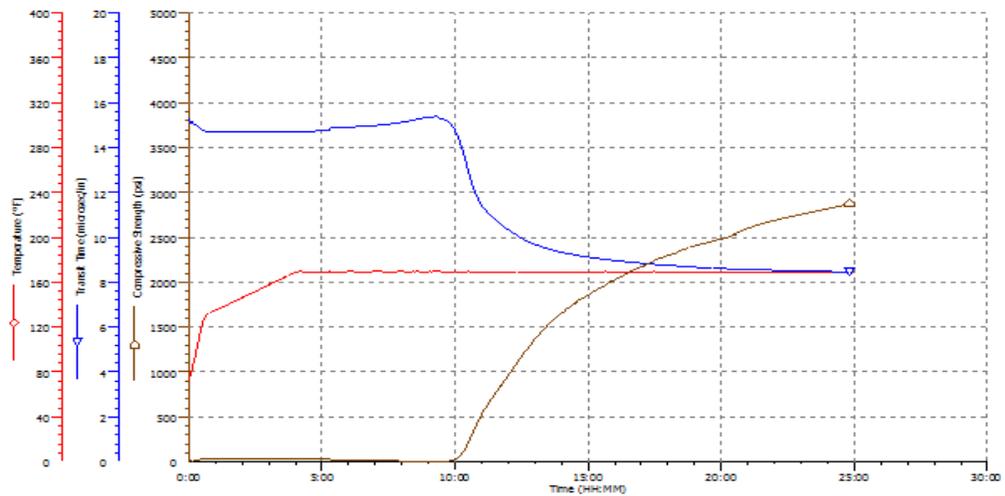
Test File Name: CA LINER 7 14.5 PPG 0.2 R-01 3.5 NANOM
Printed: 10/3/2016 7:44:11 AM

Page 1

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: SGBA_746.746
Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 bigas)

Algorithm: Static gel strength



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: SGBA CA LINER 7 14.5 PPG 0.2 R-01
Printed: 10/3/2016 7:59:13 AM

Page 1

# Report:	7	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7
-----------	---	-------	---------	--------------------	---------

WELL DATA		TEST DATA: Parameters			TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis Nanomateriales	T.V.D.:	7669	[ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration		Lote
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172	[°F]			[]	Unit	
I.T.S. Eng.:	Carlos Alfonso Mesa	BHCT:	130	[°F]	Cemento	NA	100,00%	% BWOW	NA
Well:	CA 421	Gradient T:	1,2	[°F/100ft]	Agua	NA	NA	% BWOW	NA
Location:	Castilla	Water Req.:	5,15	[GPS]	Antiespumante	NA	0,0001	GPS	NA
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,47	[ft./sk]	Controlador Gas	NA	0,5	GPS	NA
Cement data:	NA	Density:	14,5	[PPG]	Controlador Filtado	NA	1,00%	% BWOW	NA
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation			Retardador	NA	0,2%	% BWOW	NA
Mud Weight [PPG]	NA				Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Aditivo especial	NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Agente alivianante	NA	12,00%	%BWOC	NA
Field:	Castilla				Nanoslice	NA	4	%BWOC	NA

RESULTS

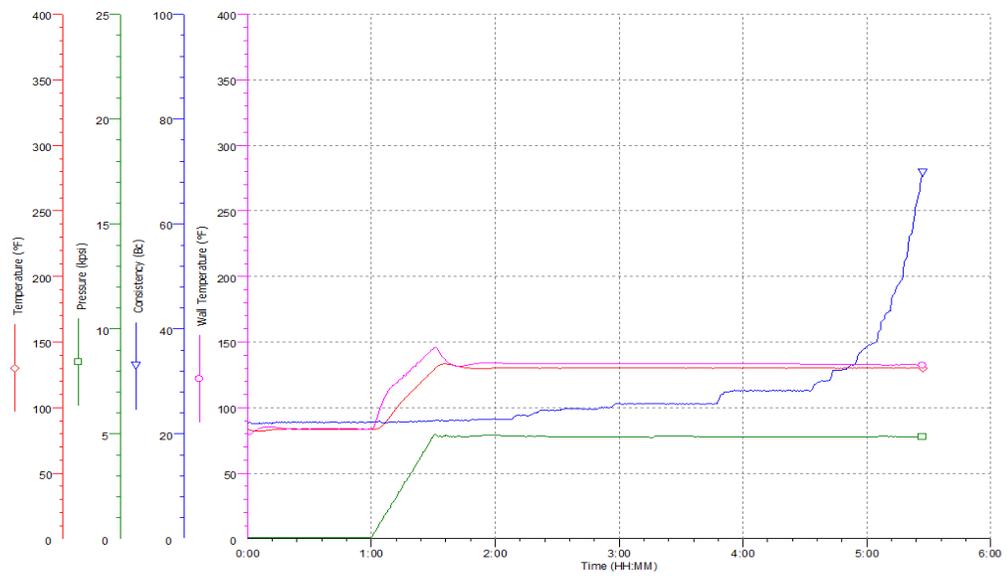
THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH		
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]:	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method	
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]
Initial Bc	22	0	100			12	NA	NA
(@ 30 Bc)	NA	NA	500			24	NA	2963
(@ 50 Bc)	NA	NA	FREE FLUID			36	NA	NA
(@ 70 Bc)	5	27	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]	T [°F] Run Test		
(@ 100 Bc)	NA	NA	45	60	0,0	BHST		
T [°F] Run Test	130					P [PSI] Run Test		
						3000		

RHEOLOGIES (BHST)							
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300
L1	32	45	85	120	154	235	300
L2	30	40	75	108	148	231	300
Lp	31	42,5	80	114	151	233	300

FLUID MODELS				GEL STRENGTH		BHCT
Bingham		Power Law		[Lb./100 ft ²]:		130
Vp [cp]:	224	N'	0,62488163	10 [sec]	NA	
Pc [Lb./100 ft ²]:	82	K'	0,064867684	10 [min]	NA	

FLUID LOSS	22,8	[ml/30 min]	[@ 1000 [PSI]
------------	------	-------------	---------------

PLOTS
THICKENING TIME

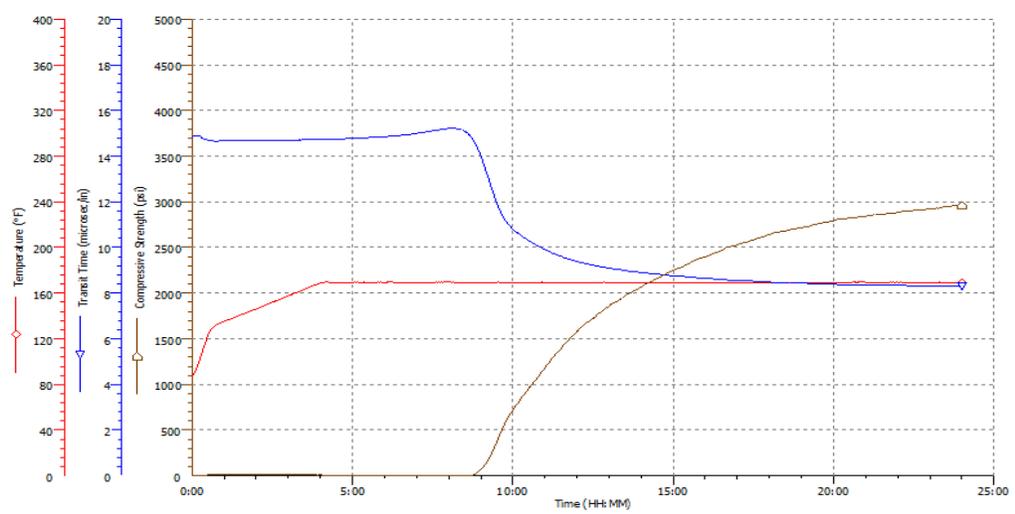


CA LINER 7 14.5PPG 0.2 R-01 4.0 NANOM

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: SGSA_745 745
 Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)
 Comments: 4.0% NANOMATERIALES

Algorithm: Static gel strength



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: SGSA, CA LINER 7 14.5 PPG 0.1 R-01 4.0% NANOM
 Printed: 10/3/2016 7:56:05 AM

Page 1

# Report:	8	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7
-----------	---	-------	---------	--------------------	---------

WELL DATA		TEST DATA: Parameters			TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis Nanomateriales	T.V.D.:	7669	[ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration		Lote
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172	[°F]			[]	Unit	
I.T.S. Eng.:	Carlos Alfonso Mesa	BHCT:	130	[°F]	Cemento	NA	100,00%	% BWOW	NA
Well:	CA 421	Gradient T:	1,2	[°F/100ft]	Agua	NA	NA	% BWOW	NA
Location:	Castilla	Water Req.:	5,00	[GPS]	Antiespumante	NA	0,0001	GPS	NA
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,48	[ft./sk]	Controlador Gas	NA	0,5	GPS	NA
Cement data:	NA	Density:	14,5	[PPG]	Controlador Filtado	NA	1,00%	% BWOW	NA
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation			Retardador	NA	0,2%	% BWOW	NA
Mud Weight [PPG]	NA				Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Aditivo especial	NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Agente alivianante	NA	12,00%	%BWOC	NA
Field:	Castilla				Nanoslice	NA	4,5	%BWOC	NA

RESULTS

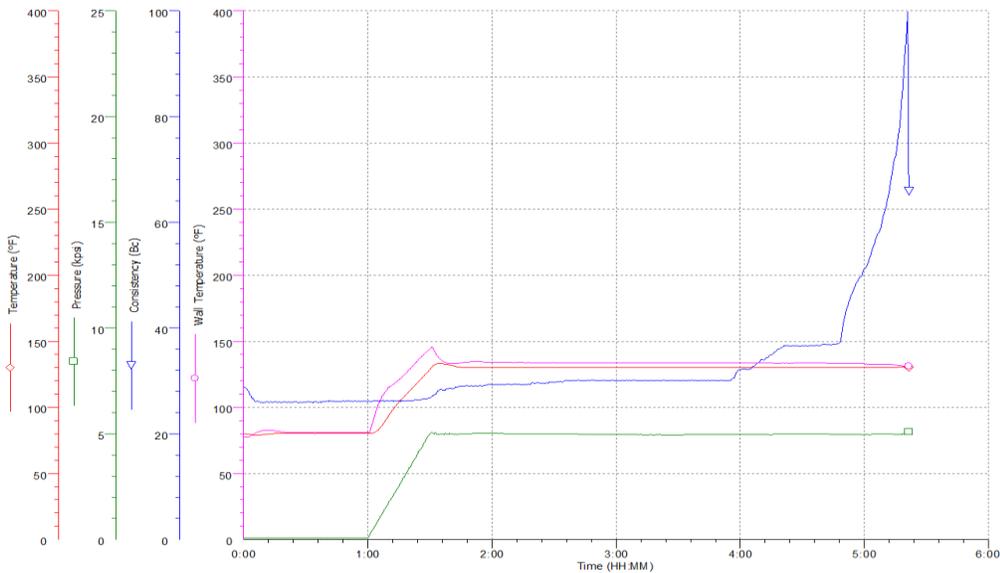
THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH		
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]:	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method	
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]
Initial Bc	22	0	100			12	NA	NA
(@ 30 Bc)	NA	NA	500			24	NA	3051
(@ 50 Bc)	NA	NA	FREE FLUID			36	NA	NA
(@ 70 Bc)	5	28	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]	T [°F] Run Test		
(@ 100 Bc)	NA	NA	45	60	0,0	P [PSI] Run Test		
T [°F] Run Test	130					3000		

RHEOLOGIES (BHST)							
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300
L1	37	50	85	111	146	217	300
L2	30	35	70	101	138	217	300
Lp	34	42,5	77,5	106	142	217	300

FLUID MODELS				GEL STRENGTH		BHCT
Bingham		Power Law		[Lb./100 ft ²]:		130
Vp [cp]:	237	N'	0,68081836	10 [sec]	NA	
Pc [Lb./100 ft ²]:	67	K'	0,045764444	10 [min]	NA	

FLUID LOSS	22,8	[ml/30 min]	[@ 1000 [PSI]
------------	------	-------------	---------------

PLOTS
THICKENING TIME

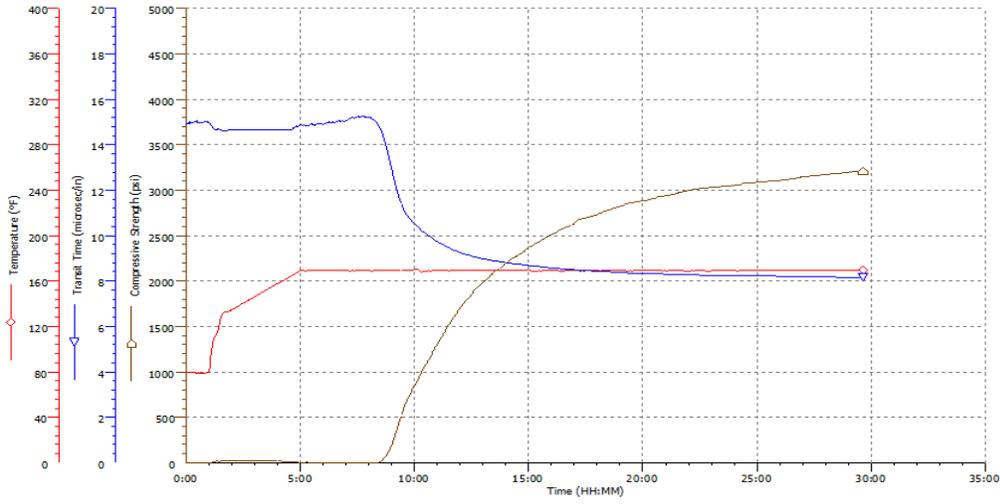


CA LINER 7 14.5PPG 0.2 R-01 4.5NANOM

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: SGSA5265_700 700
 Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)
 Comments: 4.5% NANOMATERIAL 0.1 R-01

Algorithm: Static gel strength



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: SGSA CA LINER 7 14.5 PPG 0.1 R-01 4.5% NANOM
 Printed: 10/3/2016 7:58:21 AM

Page 1

# Report:	8	Date:	15/8/16	Slurry (Job) Type:	Liner 7
-----------	---	-------	---------	--------------------	---------

WELL DATA		TEST DATA: Parameters			TEST DATA: Additives				
Customer:	Tesis Nanomateriales	T.V.D.:	7669	[ft.]	Additives Function	ITS Name	Concentration		Lote
Company:	Superior Energy Services	BHST:	172	[°F]			[]	Unit	
I.T.S. Eng.:	Carlos Alfonso Mesa	BHCT:	130	[°F]	Cemento	NA	100,00%	% BWOW	NA
Well:	CA 421	Gradient T:	1,2	[°F/100ft]	Agua	NA	NA	% BWOW	NA
Location:	Castilla	Water Req.:	4,97	[GPS]	Antiespumante	NA	0,0001	GPS	NA
Rig:	NA	Slurry Yield:	1,49	[ft./sk]	Controlador Gas	NA	0,5	GPS	NA
Cement data:	NA	Density:	14,5	[PPG]	Controlador Filtado	NA	1,00%	% BWOW	NA
Mix Water:	NA	TEST DATA: Simulation			Retardador	NA	0,2%	% BWOW	NA
Mud Weight [PPG]	NA	Time to Obtain Conditions	Shut Down	Premix Time	Aditivo especial	NA	5%	%BWOC	NA
Job:	Liner 7	30	0 [min]	60	Agente alivianante	NA	12,00%	%BWOC	NA
Field:	Castilla				Nanoslice	NA	5	%BWOC	NA

RESULTS

THICKENING TIME			STATIC GEL DEVELOPMENT			COMPRESSIVE STRENGTH		
CONSISTENCY	TIME		Static Gel Strength [Lbf/100 ft ²]:	Time [Hr:min]	Max. Gel Value	TIME [hr.]	Method	
	[Hr.]	[min]					Destructive [PSI]	No Destructive [PSI]
Initial Bc	23	0	100			12	NA	NA
(@ 30 Bc)	NA	NA	500			24	NA	2908
(@ 50 Bc)	NA	NA	FREE FLUID			36	NA	NA
(@ 70 Bc)	5	6	Inclination [Grades]	T [°F] Run Test	V [ml]	T [°F] Run Test		
(@ 100 Bc)	NA	NA	45	60	0,0	BHST		
T [°F] Run Test	130					P [PSI] Run Test		
						3000		

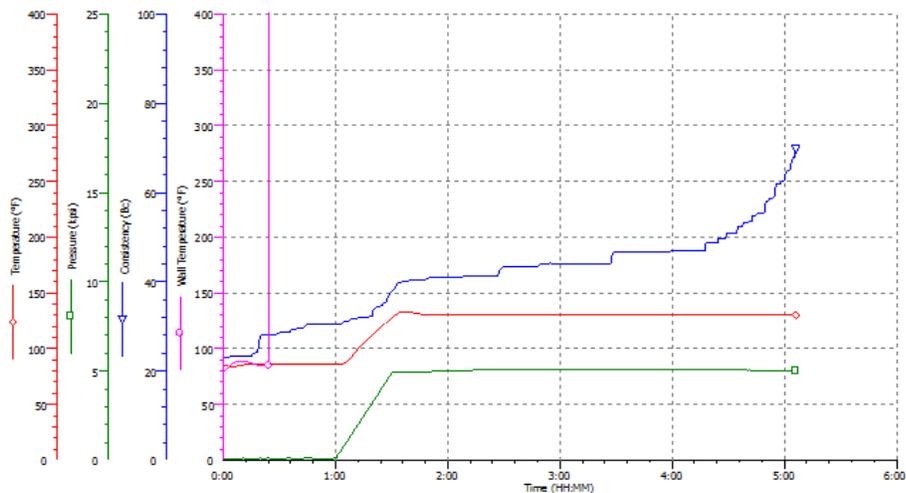
RHEOLOGIES (BHST)							
[rpm]	3	6	30	60	100	200	300
L1	41	57	95	125	155	235	300
L2	34	40	80	105	144	225	300
Lp	38	48,5	87,5	115	150	230	300

FLUID MODELS				GEL STRENGTH		BHCT
Bingham		Power Law		[Lb./100 ft ²]:		130
Vp [cp]:	226	N'	0,633968952	10 [sec]	NA	
Pc [Lb./100 ft ²]:	79	K'	0,061293737	10 [min]	NA	

FLUID LOSS	23,6	[ml/30 min]	[@ 1000 [PSI]
------------	------	-------------	---------------

PLOTS
THICKENING TIME

Instrument: TTT222_462.462
Comments: NANOWATERIAL 5.0%



CHANDLER
ENGINEERING

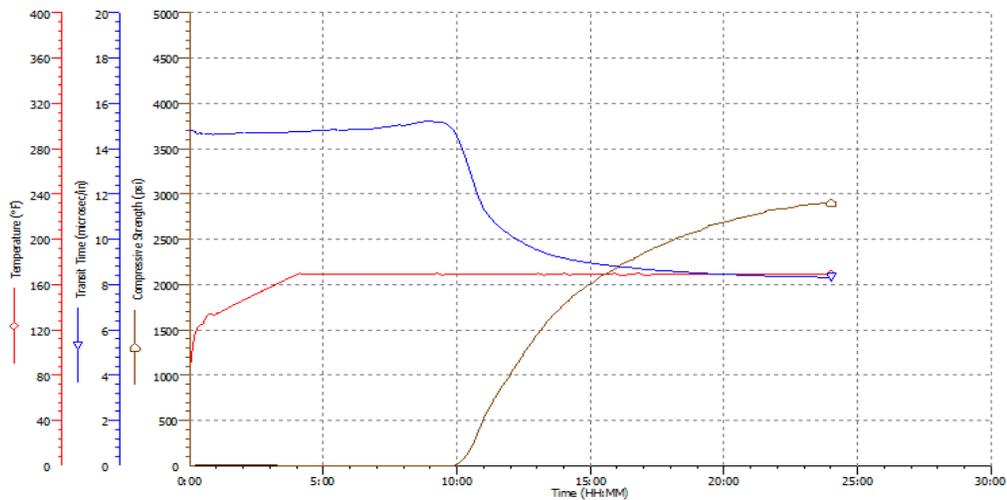
Test File Name: CA LINER 7 14.5 PPG 0.2 R-01 5.0 NANOM
Printed: 10/3/2016 7:49:24 AM

Page 1

COMPRESSIVE STRENGTH

Instrument: SGSA5285_700.700
Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)
Comments: 0.1% R-01 5.0% NANOWATERIAL

Algorithm: Static gel strength



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: SGSA CA LINER 7 14.5 PPG 0.1 R-01 5.0% NANOM
Printed: 10/3/2016 7:58:38 AM

Page 1

ANEXO U.
TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS PARA LECHADA CON 1.0%BWOC DE NANOSÍLICE.

Lechada con 1.0% BWOC		Propiedades Lechada con 1.0% BWOC	
Producto	Peso (g)	Densidad	14,5 ppg
Cemento	615,35	Resistencia a la compresión a 24 h	2742 psi
Antiespumante	0,54		
Agua	281,75		
Controlador de gas	27,16		
Controlador de filtrado	6,15		
Retardador	1,23	Tiempo de bombeabilidad 70(Bc)	6:07:00
Aditivo especial	30,77	Perdida de filtrado	24 API
Agente alivianante	73,84	Agua libre	0%
Nanosílice	6,15		

Reologías lechada con 1.0% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura 1	200	154	81	51	26	6	3	Vp	182,25
	Lectura2	200	141	76	47	24	5	3	Yp	17,75
130°F	Lectura 1	225	200	114	84	54	21	12	Vp	184,5
	Lectura2	225	160	90	59	34	9	5	Yp	40,5

Sedimentación lechada con 1.0% BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	27,85	27,9	27,71	29,15
Peso En Agua	17,51	17,08	16,6	17,12
Densidad	13,25	13,61	13,91	14,18
Porcentaje	8,63	6,16	4,10	2,18

**ANEXO V.
TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS PARA LECHADA CON 1.5%BWOC
DE NANOSÍLICE.**

Lechada con 1.5% BWOC		Propiedades lechada con 1.5% BWOC	
Producto	Peso (g)	Densidad	14,5 ppg
Cemento	614,36	Resistencia a la compresión a 24 h	2755 psi
Agua	279,9	Tiempo de bombeabilidad	5:38:30
Antiespumante	0,54	Perdida de filtrado	23,2 API
Controlador de gas	27,11	Agua libre	0%
Controlador de filtrado	6,14		
Retardador	1,23		
Aditivo especial	30,72		
Agente alivianante	73,72		
Nanosílice	9,22		

Reologías lechada con 1.5% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura 1	184	154	82	51	28	8	6	Vp	153
	Lectura2	184	152	82	52	28	8	6	Yp	31
130°F	Lectura 1	230	180	124	91	57	25	15	Vp	179,25
	Lectura2	230	170	97	65	38	10	7	Yp	50,75

Sedimentación lechada con 1.5% BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	29,43	28,94	29,6	30,72
Peso En Agua	18,55	17,25	17,31	17,88
Densidad	13,22	13,98	14,24	14,31
Porcentaje	8,68	3,62	1,76	1,30

ANEXO W.
TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS PARA LECHADA CON 2.0%BWOC
DE NANOSÍLICE.

Lechada con 2.0% BWOC	
Producto	Peso (g)
Cemento	613,38
Agua	278,06
Antiespumante	0,54
Controlador de gas	27,07
Controlador de filtrado	6,13
Retardador	1,23
Aditivo especial	30,67
Agente alivianante	73,61
Nanosílice	12,27

Propiedades lechada con 2.0% BWOC	
Densidad	14,5 ppg
Resistencia a la compresión a 24 h	2581 psi
Tiempo de bombeabilidad (70Bc)	5:50:00
Perdida de filtrado	22,8 API
Agua libre	0%

Reologías lechada con 2.0% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura 1	208	154	83	51	27	6	3	Vp	189,75
	Lectura2	208	147	80	50	26	6	3	Yp	18,25
134	Lectura 1	240	210	122	87	60	25	14	Vp	192
	Lectura2	240	176	102	70	40	13	9	Yp	48

Sedimentación lechada con 2.0% BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	30,51	30,91	31,77	32,24
Peso En Agua	17,7	17,59	17,81	17,96
Densidad	14,36	14,64	14,86	14,95
Porcentaje	0,97	0,95	2,48	3,13

ANEXO X.
TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS PARA LECHADA CON 2.5%BWOC DE NANOSÍLICE.

Lechada con 2.5% BWOC	
Producto	Peso (g)
Cemento	612,4
Agua	276,22
Antiespumante	0,54
Controlador de gas	27,03
Controlador de filtrado	6,12
Retardador	1,22
Aditivo especial	30,62
Agente alivianante	73,49
Nanosílice	15,31

Propiedades Lechada con 2.5% BWOC	
Densidad	14,5 ppg
Resistencia a la compresión a 24 h	2797 psi
Tiempo de bombeabilidad (70Bc)	5:33:00
Perdida de filtrado	22,2 API
Agua libre	0%

Reologías Lechada con 2.5% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura 1	220	156	86	55	31	8	5	Vp	225,75
	Lectura2	250	154	83	53	30	7	5	Yp	9,25
134	Lectura 1	250	203	126	97	68	21	10	Vp	198
	Lectura2	250	189	110	82	53	17	10	Yp	52

Sedimentación Lechada con 2.5% BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	30	28,61	27,65	28,54
Peso En Agua	18,73	17,24	16,98	17,35
Densidad	13,34	13,82	13,56	13,70
Porcentaje	7,98	4,66	6,45	5,50

**ANEXO Y.
TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS PARA LECHADA CON 3.0%BWOC
DE NANOSÍLICE.**

Lechada con 3.0% BWOC	
Producto	Peso (g)
Cemento	611,42
Agua	274,38
Antiespumante	0,54
Controlador de gas	26,98
Controlador de filtrado	6,11
Retardador	1,22
Aditivo especial	30,57
Agente alivianante	73,37
Nanosílice	18,34

Propiedades lechada con 3.0% BWOC	
Densidad	14,5 ppg
Resistencia a la compresión a 24 h	2856 psi
Tiempo de bombeabilidad (70Bc)	5:24:30
Perdida de filtrado	22,6
Agua libre	0%

Reologías lechada con 3.0% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura1	220	149	82	51	27	8	5	Vp	209,25
	Lectura2	220	144	79	49	26	6	4	Yp	10,75
130°F	Lectura1	300	230	150	116	83	31	15	Vp	232,5
	Lectura2	300	225	140	106	67	28	16	Yp	67,5

Sedimentación lechada con 3.0% BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	29,45	31,37	30,45	30,84
Peso En Agua	17,63	17,65	17,09	17,38
Densidad	13,91	14,81	14,84	14,78
Porcentaje	10,55	10,48	11,14	11,20

ANEXO Z.
TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS PARA LECHADA CON 3.5%BWOC DE NANOSÍLICE.

Lechada con 3.5% BWOC		Propiedades lechada con 3.5% BWOC	
Producto	Peso (g)	Densidad	14,5 ppg
Cemento	610,45	Resistencia a la compresión a 24 h	2902 psi
Agua	272,56	Tiempo de bombeabilidad (70Bc)	5:13:30
Antiespumante	0,54	Perdida de filtrado	23,6 API
Controlador de gas	26,94	Agua libre	0%
Controlador de filtrado	6,10		
Retardador	1,22		
Aditivo especial	30,52		
Agente alivianante	73,25		
Nanosílice	21,37		

Reologías lechada con 3.5% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura 1	200	152	83	53	27	6	3	Vp	177,75
	Lectura2	200	142	80	50	26	6	3	Yp	22,25
130°F	Lectura 1	300	247	160	125	90	50	40	Vp	215,25
	Lectura2	300	244	153	111	75	36	30	Yp	84,75

Sedimentación lechada con 3.5% BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	30,83	30	32,64	33,56
Peso En Agua	18,11	17,73	19,07	19,39
Densidad	14,18	14,09	14,26	14,42
Porcentaje	10,64	10,48	11,14	11,20

ANEXO AA.
TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS PARA LECHADA CON 4.0%BWOC
DE NANOSÍLICE.

Lechada con 4.0% BWOC	
Producto	Peso (g)
Cemento	609,43
Agua	270,73
Antiespumante	0,54
Controlador de gas	26,90
Controlador de filtrado	6,09
Retardador	1,22
Aditivo especial	30,47
Agente alivianante	73,14
Nanosílice	24,38

Propiedades lechada con 4.0% BWOC	
Densidad	14,5 ppg
Resistencia a la compresión a 24 h	2963 psi
Tiempo de bombeabilidad (70Bc)	5:27:00
Perdida de filtrado	22,8 API
Agua libre	0%

Reologías lechada con 4.0% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura 1	220	149	81	51	27	8	5	Vp	207,75
	Lectura2	220	151	82	52	28	8	5	Yp	12,25
130°F	Lectura 1	300	235	154	120	85	45	32	Vp	223,5
	Lectura2	300	231	148	108	75	40	30	Yp	76,5

Sedimentación lechada con 4.0% BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	28,49	29,55	30,37	32,7
Peso En Agua	18	18,2	18,1	18,92
Densidad	13,18	13,52	13,98	14,40
Porcentaje	11,37	11,21	10,79	10,95

ANEXO AB.
TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS PARA LECHADA CON 4.5%BWOC
DE NANOSÍLICE.

lechada con 4.5% BWOC	
Producto	Peso (g)
Cemento	608,51
Agua	268,92
Antiespumante	0,54
Controlador de gas	26,85
Controlador de filtrado	6,09
Retardador	1,22
Aditivo especial	30,43
Agente alivianante	73,02
Nanosilice	27,38

Propiedades lechada con 4.5% BWOC	
Densidad	14,5 ppg
Resistencia a la compresión a 24 h	3051 psi
Tiempo de bombeabilidad (70Bc)	5:28:30
Perdida de filtrado	23,6 API
Agua libre	0%

Reologías lechada con 4.5% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura 1	197	141	79	51	22	6	3	Vp	177,75
	Lectura2	197	142	78	49	26	6	3	Yp	19,25
130°F	Lectura 1	300	217	146	111	85	50	37	Vp	237
	Lectura2	300	217	138	101	70	35	30	Yp	63

Sedimentación lechada 4.5%BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	28,33	29,98	30,37	29,98
Peso En Agua	17,16	17,55	17,67	16,9
Densidad	13,75	14,23	14,32	14,78
Porcentaje	10,4	10,3	10,3	9,5

ANEXO AC.
TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS PARA LECHADA CON 5.0%BWOC
DE NANOSÍLICE.

Lechada con 5.0% BWOC	
Producto	Peso (g)
Cemento	607,54
Agua	267,11
Antiespumante	0,54
Controlador de gas	26,81
Controlador de filtrado	6,08
Retardador	1,22
Aditivo especial	30,38
Agente alivianante	72,90
Nanosílice	30,38

Propiedades lechada con 5.0% BWOC	
Densidad	14,5 ppg
Resistencia a la compresión a 24 h	2908 psi
Tiempo de bombeabilidad (70Bc)	5:06:00
Perdida de filtrado	23,6 API
Agua libre	0%

Reologías lechada con 5.0% BWOC										
T°	Rpm	300	200	100	60	30	6	3		
amb	Lectura 1	218	151	86	55	29	9	5	Vp	199,5
	Lectura2	218	152	84	54	30	8	5	Yp	18,5
130°F	Lectura 1	300	235	155	125	95	57	41	Vp	225,75
	Lectura2	300	225	144	105	80	40	34	Yp	74,25

Sedimentación lechada con 5.0% BWOC				
Sección	1	2	3	4
Peso Seco	27,59	26,01	26,98	27
Peso En Agua	16,77	15,55	15,9	15,5
Densidad	13,70	13,93	14,13	14,51
Porcentaje	10,19	9,30	9,37	8,90

	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 Carlos Alfonso Mesa Duarte y Juan Felipe Pinzón Arteaga en calidad de titulares de la obra "Evaluación técnico- financiera del uso de nanomateriales en lechadas de cemento para revestimiento de producción en Campo Castilla, a nivel de laboratorio", elaborada en el año 2016 , 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.

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

- 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:


 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.


 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

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.

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C., a los 3 días del mes de Noviembre del año 2016.

LOS AUTORES:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Carlos Alfonso	Mesa Duarte
Documento de identificación No	Firma
1.030.627.361	<i>Carlos Alfonso Mesa Duarte</i>

Autor 2

Nombres	Apellidos
Juan Felipe	Pinzón Arteaga
Documento de identificación No	Firma
1.019.081.995	<i>Juan Felipe Pinzón Arteaga</i>