# Análisis de Sistemas de Lechada de Cemento con Densidad Baja para reducir pérdidas por Circulación de Fluidos

**Anderson Yesid Sanabria Villamizar**

**Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos**

**Director**
**Emiliano Ariza León**
**PhD. en Ingeniería Química**

**Codirector**
**Helmuth Esteban Portilla Rodríguez**
**Ingeniero de Petróleos**

**Universidad Industrial de Santander**
**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas**
**Escuela de Ingeniería de Petróleos**
**Bucaramanga**
**2021**

## Dedicatoria

*Esta tesis está dedicada a:*

*A mi padre celestial, quien me ha permitido estudiar la carrera de mis sueños, me ha llenado de sabiduría, ciencia y entendimiento en todo el proceso.*

*A mis Madres Amparo, Lucy, Ercilia, Fermina y Ninfa quienes me mostraron lo que es ser aguerrido en la vida, quienes me motivan a ser mejor persona, porque en su ejemplo son inspiración para muchos. A mis hermanos, Ingrid, Karen y Edwin por ser mis compañeros de vida y confidentes, cómplices en mis caminos. A mis sobrinos que llenan mis días de paz y diversión, son mi mundo de sonrisas.*

*A la mujer más bella que conocí en el universo, a quien conoce mis valentías y mis temores, al complemento perfecto (cóncavo y convexo). Mi compañera de bachiller y ahora esposa Leidy Johana Moyano Silva*

*A todos los que creyeron en mí, a quienes bendicen y oran por mi vida, a mis compañeros de universidad, hermanos del camino con los cuales lloramos, reímos, perdimos y ganamos.*

*Finalmente, a usted que está leyendo esta dedicatoria.*

*Con cariño.*

***Anderson Yesid Sanabria Villamizar***

## Agradecimientos

*Agradezco primordialmente al Admirable Consejero, Dios Poderoso, Padre Eterno, Príncipe de Paz. Por brindarme la luz en momentos de oscuridad, reposo en momentos de tormenta, y sabiduría en momentos de necedad.*

*A cada uno de los Profesores que han hecho parte de mi proceso, unos en aulas, otros en las calles, los dos escenarios propicios del aprendizaje. Desde la primaria hasta la universidad, cada uno ha dejado una semilla que día a día va gestando su fruto. Un día quiero ser como ustedes.*

*Gracias a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, a nuestra Alma Máter la mejor Universidad del mundo la Industrial de Santander. Gracias por prestarnos sus maravillosos espacios como, bienestar universitario, comedores y aquel hermoso coliseo donde día a día entrenaba con ganas.*

*De igual forma agradezco al Grupo de Investigación Estabilidad de Pozos, por abrirme sus puertas y acercarme más a la industria, a los directores de la tesis Emiliano Ariza León y Helmuth Esteban Portilla Rodríguez por su apoyo incondicional y por haber sido mi guía en esta última e importante etapa y a Ecopetrol S.A. por permitirme desarrollar este proyecto.*

# Tabla de contenido

**Introducción** ..... **17**

**1. Objetivos** ..... **18**

1.1. Objetivo general ..... 18
1.2. Objetivos específicos ..... 18

**2. Fundamentos de presiones** ..... **19**

2.1. Conceptos básicos ..... 19
2.1.1. Presión hidrostática ..... 19
2.1.2. Gradiente de presión hidrostática ..... 19
2.1.3. Gradiente de sobrecarga ..... 20
2.1.4. Gradiente de presión de formación o de poro ..... 21
2.1.4.1. Presión anormal. ..... 21
2.1.4.2. Presión normal. ..... 22
2.1.4.3. Presión subnormal. ..... 22
2.1.5. Estado mecánico del pozo ..... 23
2.1.5.1. Tvd (true vertical depth – profundidad vertical verdadera). ..... 25
2.1.5.2. Diámetro de la barrena. ..... 26
2.1.5.3. Diámetro de la tubería de revestimiento. ..... 26
2.1.5.4. Profundidad de asentamiento. ..... 26
2.2. Yacimientos de presiones subnormales ..... 26
2.2.1. Factores del yacimiento ..... 27
2.2.1.1. Tipo de roca presente en el yacimiento. ..... 27
2.2.1.2. Tipo de fluidos contenidos en el yacimiento. ..... 28
2.2.1.3. Tamaño de la garganta de poro. ..... 28
2.2.1.4. Mojabilidad del sistema. ..... 28
2.2.1.5. Temperatura del yacimiento ..... 29
2.2.1.6. Presión de formación y presión de fractura ..... 29
2.3. Caso de estudio de yacimientos de baja presión en colombia ..... 29
2.3.1. Campo castilla de ecopetrol s.a ..... 29
2.3.2. Origen del campo castilla ..... 30
2.3.3. Localización geográfica ..... 30
2.3.4. Marco geológico ..... 31

2.3.4.1 geología estructural. 32
2.3.4.2. Roca generadora. 33
2.3.4.3. Roca reservorio. 33
2.3.4.4. Migración. 34
2.3.4.5. Roca sello. 34
2.3.4.6. Trampa. 35
2.3.5. Historia de producción del campo castilla 35
2.3.5.1. Método de producción. 35
2.3.5.2. Características del yacimiento. 35
2.3.6. Problemas operacionales en el campo castilla 37

**3. Diseño de lechadas livianas. 39**

3.1. Generalidades de la cementación 39
3.1.1. Normatividad del cemento 39
3.1.1.1 norma api spec 10ª. 39
3.1.1.2. Astm1 c109/c109m, standard test method for compressive 39
3.1.1.3. Astm c114, standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. 39
3.1.1.4. La especificación api 13a “specification for drilling fluid materials”. 40
3.1.2. Cemento portland 40
3.2. Lechada de cementación 41
3.2.1. Importancia de una buena cementación 41
3.2.2. Problemas operacionales en la etapa de cementación 42
3.2.2.1. Pérdida de circulación. 43
3.3. Propiedades físicas del cemento 43
3.3.1. Resistencia a la compresión 44
3.3.2. Tamaño de grano 44
3.3.3. Requerimiento de agua 44
3.3.4. Reología 44
3.3.4.1. Viscosidad plástica (unidades cp). 45
3.3.4.2. Punto cedente (unidad lb/100 pies2). 45
3.3.4.3. Viscosidad aparente (unidad cp). 45
3.3.5. Fricción durante el bombeo 45
3.3.6. Densidad de la lechada 45
3.3.7. Tiempo de bombeabilidad 46

3.3.8. Perdida de agua. (agua libre).....47
3.3.9. Resistencia a la corrosión.....47
3.4. Diagrama de flujo de procesos .....48
3.5. Principales compuestos del cemento.....48
3.5.1. Aditivos.....49
3.5.1.1. Aceleradores. .....49
3.5.1.2. Retardadores. .....49
3.5.1.3. Densificantes.....50
3.5.1.4. Dispersantes. .....50
3.5.1.5. Agentes de control de circulación.....50
3.5.1.6. Extendedores.....50
3.5.1.7. Inhibidores de retrogresión. .....50
3.5.2. Contaminantes.....50
3.6. Relación entre las propiedades y los compuestos de la lechada .....51
3.7. Aditivos para disminuir el peso de la lechada .....52
3.7.1. Tierras diatomáceas .....52
3.7.2. Gilsonita.....53
3.7.3. Perlita expandida.....54
3.7.4. Nitrógeno .....56
3.7.5. Microesferas de alta resistencia o burbujas de vidrio .....56
3.7.6. Oxido de magnesio .....57
3.7.7. Vermiculita exfoliada.....58
3.7.8. Metalsilicato de sodio anhidro .....58
3.8. Nanomateriales.....60
3.8.1. Nanotubos de carbono.....60
3.8.2. Nanopartículas de alúmina.....62
3.8.2.1. Origen de la nanoalúmina alfa y gamma.....62
3.8.2.2. Ventajas de la nanoalúmina. .....63
3.8.3. Nanosílice .....64
3.9. Formulaciones de lechadas livianas.....65
3.9.1. Cementos modificados.....65
3.9.2. Cementos salados con alto gel .....66
3.9.3. Cemento magnésico.....66
3.9.4. Cemento látex .....67

3.9.5. Cementos plásticos....68
3.9.6. Cementos expansivos....70
3.9.6.1. Tipo k....70
3.9.6.2. Tipo s....70
3.9.6.3. Tipo m....70
3.9.7. Cementos portland puzolánicos....70
3.10. Resumen de los aditivos....71

**4. Herramientas para el estudio de la lechada liviana....73**

4.1. Técnica de estudio probabilístico six sigma....73
4.1.1. Metodología....74
4.1.1.1. Definir....74
4.1.1.2. Medir....74
4.1.1.3. Analizar....74
4.1.1.4. Mejorar....75
4.1.1.5. Controlar....75
4.2. Software estudiantil integrado para cementación primaria (cemsei)....75
4.2.1. Procedimiento de simulación....78
4.2.1.1. Ingreso de valores del estado mecánico....78
4.2.1.2. Definir propiedades de los fluidos....79
4.2.1.3. Definir parámetros operacionales....79
4.2.1.4. Diseño de laboratorio....80
4.2.1.5. Análisis reológico....81

**5. Caso de formulación para el campo castilla....82**

5.1. Fase definir....82
5.1.1. Lugar de ejecución....83
5.1.2. Información general de la cementación....84
5.1.3. Costo de los aditivos....87
5.1.4. Costos de la cementación de pozos....89
5.1.5. Costos por pérdida de circulación....90
5.1.6. Oportunidad de mejora....90
5.1.7. Condiciones óptimas del proceso....92
5.1.8. Enfoque al cliente....92
5.1.9. Dosificaciones teóricas de lechadas de cemento livianas....93

5.2. Fase medir ..... 94
5.2.1. Toma de datos para evaluar instrumento de medición (cemsei) ..... 94
5.2.2. Análisis y validación del sistema de medición ..... 99
5.2.3. Medición de dosificaciones ..... 100
5.2.3.1. Procedimiento de la medición de las lcl ..... 101
5.2.3.2. Resultados de la medición ..... 102
5.3. Fase analizar ..... 106
5.3.1. Causas de variación ..... 106
5.3.2. Planeación del diseño de experimentos doe ..... 107
5.3.2.1. Causas importantes enfocadas a la y=f(x's). ..... 110
5.3.2.2. Pruebas de normalidad. ..... 110
5.3.3. Diseño de experimento para y2 ..... 113
5.4. Mejorar ..... 118
5.5. Controlar ..... 121
5.5.1. Plan de control ..... 121
5.5.2. Plan de monitoreo ..... 123
5.5.2.1. Niveles de transformación 6σ. ..... 123
5.5.2.2. Diagrama de actividades de control. ..... 125
**6. Conclusiones ..... 126**
**7. Recomendaciones ..... 128**
**Referencias bibliográficas ..... 129**

## Lista de tablas

***Tabla 1.*** *Presión de formación según el gradiente* ..... *21*

***Tabla 2.*** *Estado mecánico de un pozo* ..... *25*

***Tabla 3.*** *Sistema petrolífero campo castilla* ..... *33*

***Tabla 4.*** *Propiedades petrofísicas del yacimiento y de los fluidos en el campo castilla* ..... *36*

***Tabla 5*** *Clasificación de las pérdidas de circulación* ..... *43*

***Tabla 6.*** *Programa de bombeo* ..... *46*

***Tabla 7.*** *Óxidos presentes en el cemento* ..... *49*

***Tabla 8.*** *Contaminantes de la lechada de cemento* ..... *51*

***Tabla 9.*** *Propiedades de una lechada liviana* ..... *51*

***Tabla 10.*** *Composición típica de la tierra diatomea* ..... *53*

***Tabla 11.*** *Composición típica de la perlita* ..... *55*

***Tabla 12.*** *Composición media del metalsilicato de sodio anhidro* ..... *59*

***Tabla 13.*** *Dosificación de lechadas de cemento con Nanotubos de Carbono* ..... *61*

***Tabla 14.*** *Solución empleada para sintetizar nanotubos de carbono dopados con nitrógeno y oxígeno* ..... *61*

***Tabla 15.*** *Propiedades físicas de la Alúmina Alfa ($\alpha$-Al2O3) y Gamma ($\gamma$-Al2O3)* ..... *63*

***Tabla 16.*** *Diseño de cemento látex* ..... *68*

***Tabla 17.*** *Información técnica del cemento látex* ..... *68*

***Tabla 18.*** *Datos técnicos del plástico PET* ..... *69*

***Tabla 19.*** *Propiedades de entrada de cada aditivo para diseño de lechadas livianas* ..... *71*

***Tabla 20.*** *Parámetros de entrada CEMSEI* ..... *84*

***Tabla 21.*** *Caudales de bombeo* ..... *86*

***Tabla 22.*** *Costos y proveedores de los aditivos seleccionados* ..... *87*

***Tabla 23.*** *Costos promedios de los programas de cementación* ..... *89*

***Tabla 24.*** *Variables y atributos del producto en cada operación* ..... *91*

***Tabla 25.*** *Características específicas de una lechada liviana* ..... *91*

***Tabla 26.*** *Características específicas de una lechada liviana* ..... *92*

***Tabla 27.*** *Compuestos de las lechadas de cemento livianas (LCL)* ..... *93*

***Tabla 28.*** *Valores de estudio del instrumento de medición* ..... *95*

***Tabla 29.*** *Valores de estudio del instrumento de medición* ..... *97*

***Tabla 30.*** *ANOVA de dos factores con interacción* ..... *99*

***Tabla 31.*** *R&R del sistema de medición, Componentes de la varianza* ..... *99*

***Tabla 32.*** *Datos de salida Software CEMSEI* ..... *102*

***Tabla 33.*** *Costo del diseño de simulación* ..... *103*

***Tabla 34.*** *Planeación de variables* ..... *107*

***Tabla 35.*** *Planeación del DOE* ..... *108*

***Tabla 36.*** *Pruebas de normalidad por variables* ..... *111*

***Tabla 37.*** *Resumen del diseño factorial* ..... *114*

***Tabla 38.*** *Resumen del modelo de regresión.* ..... *114*

***Tabla 39.*** *Análisis de varianza.* ..... *115*

***Tabla 40.*** *Parámetros, solución y predicción de respuesta múltiple* ..... *117*

***Tabla 41.*** *Soluciones según el análisis de variables en Minitab* ..... *119*

***Tabla 42.*** *Soluciones según el análisis de lechadas CEMSEI* ..... *119*

## Lista de figuras

***Figura 1*** *Gradiente de presión con una zona de presión anormal* ..... *22*

***Figura 2*** *Gradiente de presión con una zona de presión subnormal*..... *23*

***Figura 3*** *Estado mecánico de un pozo* ..... *24*

***Figura 4*** *Mapa de localización campo castilla*..... *31*

***Figura 5*** *Columna estratigráfica de la cuenca de los Llanos Orientales*..... *32*

***Figura 6*** *Mapa de distribución de perdidas de circulación K2–T2.*..... *38*

***Figura 7*** *Proceso de la creación del cemento*..... *48*

***Figura 8*** *Página principal de CEMSEI*..... *76*

***Figura 9*** *Diseño de laboratorio CEMSEI* ..... *77*

***Figura 10*** *Estado mecánico CEMSEI* ..... *78*

***Figura 11*** *Propiedades de los fluidos CEMSEI* ..... *79*

***Figura 12*** *Parámetros operacionales CEMSEI* ..... *79*

***Figura 13*** *Procedimiento de diseño de laboratorio CEMSEI*..... *81*

***Figura 14*** *Esquema del estado mecánico*..... *86*

***Figura 15*** *Variación de datos en CEMSEI para el análisis Gage R&R*..... *96*

***Figura 16*** *Pasos de la creación del diseño Gage R&R*..... *96*

***Figura 17*** *Estudio del sistema de medición (Cruzado)*..... *98*

***Figura 18*** *Informe R&R del sistema de medición (ANOVA)* ..... *100*

***Figura 19*** *Pasos análisis de laboratorio CEMSEI*..... *101*

***Figura 20*** *Diagrama de Ishikawa (Causa -Efecto) Minitab 2019* ..... *106*

***Figura 21*** *Diseño factorial 2^3 (dos niveles, tres factores)*..... *114*

***Figura 22*** *Graficas resultantes del diseño de experimentos.*..... *116*

***Figura 23*** *Grafica de cubos (medias ajustadas) de Densidad Lechada. ..... 117*

***Figura 24*** *Niveles de implementación seis sigmas..... 123*

***Figura 25*** *Diagrama de actividades de control ..... 125*

## Lista de apéndices

**Apéndice A.** Análisis de repetibilidad y reproducibilidad (Gage R&R).

**Apéndice B.** Lechada de cemento liviana 1.

**Apéndice C.** Lechada de cemento liviana 2.

**Apéndice D.** Lechada de cemento liviana 3.

**Apéndice E.** Lechada de cemento liviana 4.

**Apéndice F.** Lechada de cemento liviana 5.

**Apéndice G.** Lechada de cemento liviana 6.

**Apéndice H.** Lechada de cemento liviana 7.

**Apéndice I.** Lechada de cemento liviana 8.

**Apéndice J.** Lechada de cemento liviana 9.

**Apéndice K.** Lechada de cemento liviana 10.

**Apéndice L.** Cemento látex.

**Apéndice M.** Cemento magnésico.

**Apéndice N.** Cemento modificado.

**Apéndice O.** Cemento plástico.

**Apéndice P.** Cemento salado con alto gel.

**Apéndice Q.** Cemento expansivo tipo K.

**Apéndice R.** Cemento expansivo tipo M.

**Apéndice S.** Cemento expansivo tipo S.

**Apéndice T.** Prueba de normalidad - costo de lechada.

**Apéndice U.** Prueba de normalidad - densidad de lechada.

**Apéndice V.** Prueba de normalidad - pérdida de circulación.

**Apéndice W.** Prueba de normalidad -peso mezcla en seco.

**Apéndice X.** Prueba de normalidad - requerimiento de H2O.

**Apéndice Y.** Diseño de experimentos.

**Apéndice Z.** Resumen de los datos de estudio.

**“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”**

# RESUMEN

**Título:** Análisis de Sistemas de Lechada de Cemento con Densidad Baja para Reducir Pérdidas por Circulación de Fluidos [*]

**Autor:** Anderson Yesid Sanabria Villamizar[**]

**Palabras Clave:** Gradiente de Fractura, Pérdida de Circulación, Lechada de Cemento Liviana, Aditivo, CEMSEI, SIX SIGMA.

**Descripción:**

La industria petrolera ha permanecido en la búsqueda de mejoras y optimizaciones para la mitigación de problemas operacionales y tiempos no productivos durante las operaciones de cementación, que, de alguna manera, se asocian a problemas de inestabilidad de pozos y geomecánica en general.

El presente proyecto da a conocer a los lectores las diferentes dosificaciones y aditivos de lechadas livianas que actualmente se están utilizando para evitar fracturas inducidas y disminuir perdidas por circulación de fluido. Para el diseño y formulación de las lechadas de cemento livianas se utilizó el Software Estudiantil Integrado para cementación primaria (CEMSEI), en el cual se simulan las condiciones de una zona de presión subnormal y se diseñan 18 lechadas de cemento de las cuales 10 son el producto de la mezcla de los aditivos livianos y 8 son destacadas de la literatura.

Finalmente se documentan diferentes dosificaciones de lechadas para llevar a cabo una cementación de pozos exitosa en formaciones depletadas, además, se implementa la metodología Six Sigma para llevar a cabo la conclusión del proyecto y sustentar la propuesta cuantitativamente, este ofrece un procedimiento organizado con base estadística que culmina con una posible solución para realizar una cementación primaria en un Campo Castilla de Ecopetrol S.A.

[*] Trabajo de Grado

[**] Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Emiliano Ariza León. PhD. en Ingeniería Química. Codirector: Helmuth Esteban Portilla Rodríguez. Ingeniero de Petróleos.

# ABSTRACT

**Title:** Analysis of Low-Density Cement Grout Systems to Reduce Losses Due to Fluid Circulation[*]

**Author:** Anderson Yesid Sanabria Villamizar[**]

**Key Words:** Fracture Gradient, Circulation Loss, Light Cement Grout, Additive, CEMSEI, SIX SIGMA.

**Description:**

The oil industry has remained in the search for improvements and optimizations for the mitigation of operational problems and unproductive times during cementation operations, which are somehow associated with problems of well instability and geomechanics in general.

This project introduces readers to the different dosages and additives of light grouts that are currently being used to prevent induced fractures and decrease fluid circulation losses. For the design and formulation of light cement grouts, the Integrated Student Software for Primary Cementation (CEMSEI) is used, in which the conditions of a subnormal pressure zone are simulated, and 18 cement grouts are designed of which 10 are the product of the mixture of light additives and 8 are theoretically found.

Finally, different alternatives are documented to carry out a successful well cementation, in addition, the Six Sigma methodology is implemented to carry out the conclusion of the project, and to support the proposal quantitatively, it offers an organized procedure with a statistical basis that culminates with a possible solution to perform a primary cementation in Castilla field de Ecopetrol S.A.

[*] Degree Work

[**] Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum. Director: Emiliano Ariza León. PhD. in Chemical Engineering. Co-director: Helmuth Esteban Portilla Rodríguez. Petroleum Engineer.

# Introducción

Durante los últimos años ha incrementado el uso de los cementos livianos para evitar problemas en formaciones con gradiente de fractura subnormal y prevenir la migración de fluidos que pueden originar un relleno insuficiente del espacio anular o llegar a contaminar zonas aledañas al pozo.

Un desafío constante en la Industria del petróleo es controlar la presión del pozo durante su desarrollo, para alcanzar la estabilidad de dicha presión es clave realizar eficazmente las operaciones de perforación y cementación. La operación de cementación se basa en dos procesos principales, la cementación primaria y la cementación con fines de remediación, al inicio de la cementación se debe conocer las propiedades de la formación para utilizar la mezcla de cemento adecuada, lo que lleva al análisis de diferentes formulaciones de lechadas de cemento conforme a las características geomecánicas de la formación.

La densidad de la lechada de cemento a usar en una determinada formación se encuentra estrechamente relacionada con los requerimientos de la formación, el cemento debe adaptarse a las diferentes condiciones de presión y temperatura, sin sufrir daños fisicoquímicos, por lo cual se aplican aditivos a la lechada, estos mejoran la eficiencia y ofrecen mayor seguridad en la etapa de cementación del pozo y durante la producción,

La presente investigación se centra en el estudio de la formulación del cemento y el análisis de las diferentes lechadas de cemento livianas, estableciendo los diseños de sistemas de lechadas, que se destinen a formaciones inestables con requerimientos especiales en la cementación, brindando un desarrollo seguro y económicamente rentable.

# 1. Objetivos

## 1.1. Objetivo general

Analizar los sistemas de lechadas de cemento livianas para evitar fracturas inducidas en formaciones inestables y reducir pérdidas por circulación de fluidos.

## 1.2. Objetivos específicos

- Revisar los estudios previos sobre las distintas propiedades de las lechadas livianas.
- Estudiar las propiedades petrofísicas, estructurales y geomecánicas del yacimiento en el que se requiere lechadas de cemento livianas para la cementación de pozos.
- Identificar los materiales para el diseño de lechadas de cemento livianas.
- Analizar las dosificaciones de lechadas de cemento livianas, con la ayuda del Software Estudiantil Integrado para Cementación primaria (CEMSEI), y estudiar las lechadas aplicando la metodología Lean Six Sigma.
- Proponer una lechada de cemento liviana para un campo colombiano.

# 2. Fundamentos de presiones

## 2.1. Conceptos básicos

Desde los primeros hallazgos de la explotación de yacimientos petroleros se ha buscado comprender, medir y controlar las presiones presentes en las formaciones, las cuales afectan directamente la integridad del pozo, para llevar a cabo el objetivo, es necesario conocer la terminología relacionada con las presiones en los sistemas petrolíferos, y avanzar en la comprensión y descubrimientos de métodos de control y monitoreo adecuado de las presiones en el pozo.

### 2.1.1. Presión hidrostática

Es la fuerza por unidad de área producida por una columna de fluido. En unidades de campos petroleros esta fuerza se calcula utilizando la Ecuación (1). La presión está en función de la densidad del fluido y la profundidad de dicha columna de fluido, además existen otros factores que afectan la presión, como lo es el contenido de sólidos y la presencia de gas disuelto en el fluido. (Zaldivar Cabrera , 2017, p. 4)

$$P = 0.052 * (Mw) * (D) \quad (1)$$

Donde:

P: Presión hidrostática, en [$psi$]

Mw: Peso del fluido, en [$ppg$]

D: Profundidad de la columna de fluido, en [$ft$]

### 2.1.2. Gradiente de presión hidrostática

Es la variación de la presión por unidad de profundidad. También puede referirse al cambio de la presión de poro con la profundidad, la cual puede medirse mediante pruebas de formación y

describe el comportamiento de la Ecuación (2) la cual muestra la relación de la presión con respecto a la profundidad. (Zaldivar Cabrera , 2017, p. 4)

$$Gp = \frac{P}{D} \tag{2}$$

Donde:

Gp: Gradiente de presión, en $[\frac{psi}{ft}]$

P: Presión, en $[psi]$

D: Profundidad, en $[ft]$

### 2.1.3. Gradiente de sobrecarga

Se puede definir como la presión total ejercida por el peso de las formaciones (incluyendo la roca y el fluido contenido dentro de los poros) en un punto de interés. La presión de sobrecarga se encuentra principalmente en función de las densidades promedio, tanto de los fluidos en la formación como de la matriz, y de la porosidad (Zaldivar Cabrera , 2017, p. 4). La presión de sobrecarga y el gradiente están dados por:

$$\sigma_{ov} = 0.052 * \rho_b * D \tag{3}$$

Donde:

$\sigma_{ov}$: Presión de sobrecarga, en $[psi]$

$\rho_b$: Densidad de la formación, en $[\frac{gr}{cm3}]$

$D$: Profundidad, en $[m]$

$$\sigma_{ovg} = 0.433 * [(1-\theta) * \rho_{ma} + (\theta * \rho_f)] \tag{4}$$

$\sigma_{ovg}$: Gradiente de sobrecarga, en $[\frac{psi}{ft}]$

$\theta$: Porosidad expresada como una fracción.

$\rho_{ma}$: Densidad de la matriz, en $[\frac{gr}{cm3}]$

$\rho_{f}$: Densidad del fluido de la formación, en $\left[\frac{gr}{cm3}\right]$

### 2.1.4. Gradiente de presión de formación o de poro

Es el cambio de la presión de la formación o de poro con la profundidad (la cual puede medirse mediante pruebas de formación y permite determinar la densidad del fluido de formación y contactos del fluido).

La presión de poro es la presión a la cual se encuentran sometidos los fluidos ubicados en el espacio poroso de la formación. Esta presión se clasifica de acuerdo con el valor de gradiente de presión en; presión de poro normal, anormal (anormal alta o anormal baja) y subnormal.

Generalmente el gradiente de presión normal se encuentra en un rango que va desde 0.433 psi/ft hasta 0.465 psi/ft, como se puede observar en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Presión de formación según el gradiente*

| |
|---|
| Gradiente Presión Anormal > 0.465 $[\frac{\boldsymbol{psi}}{\boldsymbol{ft}}]$ |
| 0.433 $[\frac{\boldsymbol{psi}}{\boldsymbol{ft}}]$ > Gradiente de Presión Normal < 0.465 $[\frac{\boldsymbol{psi}}{\boldsymbol{ft}}]$ |
| Gradiente Presión Subnormal < 0.433 $[\frac{\boldsymbol{psi}}{\boldsymbol{ft}}]$ |

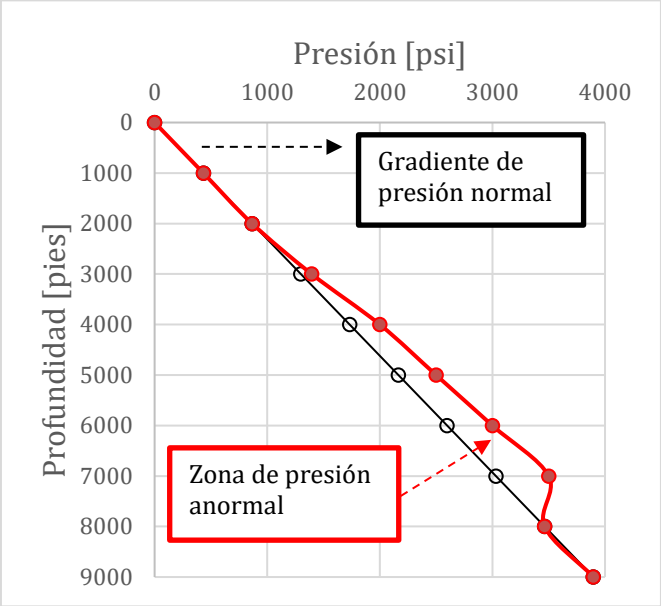
**Nota**: Información tomada de Zaldivar Cabrera, D. (2017). Aplicación De Cementos Especiales En Lechadas Ligeras Para Evitar Pérdida De Circulación Durante La Cementación.

***2.1.4.1. Presión anormal.*** Se puede definir como cualquier presión de los fluidos de la formación que se encuentre por encima de la presión hidrostática normal; es decir con un gradiente superior a 0.465 psi/ft. En la Figura 1 se puede analizar la zona donde se presentan presiones

anormales, es esencial tener esta zona identificada, para controlar y prevenir posibles problemas en las operaciones de perforación y cementación de pozos. (Zaldivar Cabrera , 2017, p. 9)

**Figura 1**

*Gradiente de presión con una zona de presión anormal*




Nota. Gráfico de presión vs profundidad, describe gráficamente la ventana de presión anormal en la formación. Adaptado de Zaldivar Cabrera, D. Aplicación De Cementos Especiales En Lechadas Ligeras Para Evitar Pérdida De Circulación Durante La Cementación.

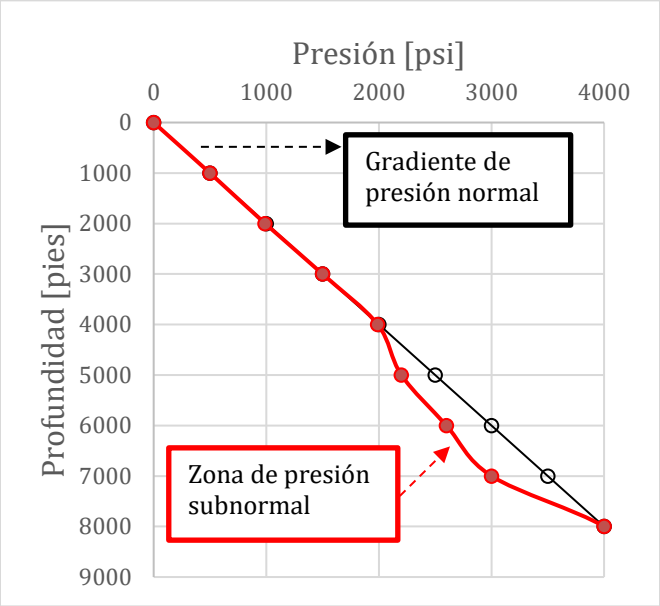
***2.1.4.2. Presión normal.*** Es la presión hidrostática generada por la columna de fluido de formación y que se extiende desde la superficie hasta la zona de estudio, esto tomando en cuenta que los fluidos presentes en la formación no se encuentran atrapados en los poros de la roca, sino totalmente conectados (fluido continuo) desde el área de interés hasta la superficie. (Zaldivar Cabrera , 2017); como si fuera un gradiente de agua salada.

***2.1.4.3. Presión subnormal.*** Se define como la presión de poro que es menor a la presión hidrostática normal, puede ser originada por causas naturalmente relacionadas con el historial estratigráfico, tectónico o geoquímico del área (Zaldivar Cabrera , 2017), también se presenta en

yacimientos que ya están depletados. En la Figura 2 se puede observar la relación entre profundidad y presión de la formación, la cual describe una zona de presiones subnormales.

**Figura 2**

*Gradiente de presión con una zona de presión subnormal*




Nota. Ventana de presión subnormal. Esta zona de presión subnormal es el principal problema que se presenta durante las operaciones en el pozo, por lo que tener una buena caracterización de la formación es fundamental para el diseño de los lodos de perforación empleados en las operaciones de perforación y en las lechadas en el proceso de cementación. Adaptado de Zaldivar Cabrera, D. Aplicación De Cementos Especiales En Lechadas Ligeras Para Evitar Pérdida De Circulación Durante La Cementación.

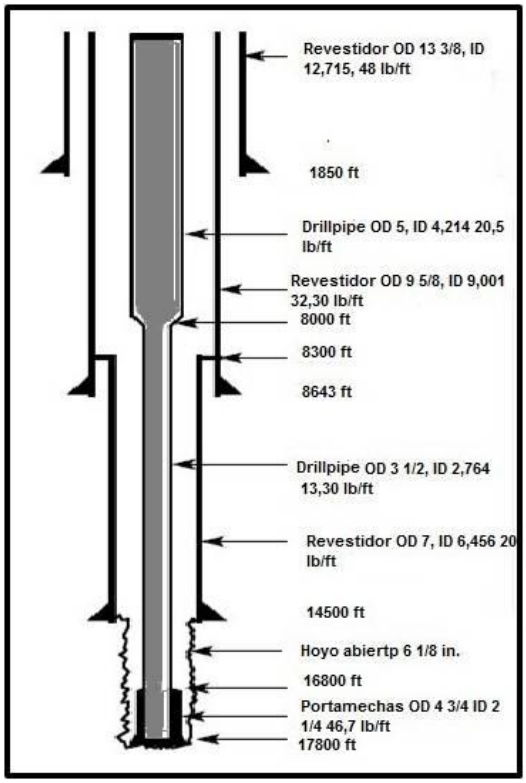
### 2.1.5. Estado mecánico del pozo

El estado mecánico es definido como la estructura geométrica del pozo en cada una de las diferentes etapas de perforación como se puede observar en la Figura 3; el estado mecánico es realizado una vez concluido el análisis de los datos obtenidos en la geología de superficie y sísmica, así como en los pozos de correlación (registro por medio del cual se determinan las unidades estratigráficas o estructurales con el fin de realizar mapeos del subsuelo y secciones). (Galeana Castillejos, 2019)

Para diseñar un pozo petrolero es indispensable abarcar múltiples áreas, en cada una de estas se necesita resaltar el trabajo de diseño del estado mecánico para conocer las características que pueden presentarse en el pozo, es decir, tomando como base la información recabada por medio del estado mecánico es posible conocer las incertidumbres que se presenten y proceder a su inmediato arreglo y/o solución, así como los datos (diámetro interno, longitud, profundidad de asentamiento, profundidad vertical verdadera, profundidad medida, etc.) de las tuberías de revestimiento, producción, liner, entre otras cosas. (León Quintana & Bohada Correa, 2009)

**Figura 3**

*Estado mecánico de un pozo*




Nota. La representación gráfica del estado mecánico permite analizar el espaciamiento y los componentes que soportan las fuerzas y geo-presiones para guardar la integridad del pozo. Tomado de Galeana Castillejos, C. (2019). Estado Mecánico De Un Pozo. Obtenido de EPMEX - Especialistas Petroleros Mexicanos A.C.

Aunque el estado mecánico de cada pozo es una identificación única. En la Tabla 2 se observa un ejemplo de la base de datos de un estado mecánico de un pozo completado con bombeo mecánico.

**Tabla 2.**

*Estado mecánico de un pozo*

| CASINGS | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SURFACE CASING | | | | | | | | |
| **Component Name** | **Top MD (ft)** | **Btm MD (ft)** | **Jts** | **OD (in)** | **Weight (ppf)** | **Grade** | **Nominal ID (in)** | **Drift ID (in)** |
| PUP JOINT | 16.0 | 22.9 | 1 | 9.625 | 36.00 | K-55 | 8.921 | 8.765 |
| CASING JOINT(S) | 22.9 | 350.7 | 8 | 9.625 | 36.00 | K-55 | 8.921 | 8.765 |
| FLOAT SHOE | 350.7 | 352.2 | 1 | 9.625 | 36.00 | K-55 | 8.921 | 8.765 |
| PRODUCTION CASING | | | | | | | | |
| **Component Name** | **Top MD (ft)** | **Btm MD (ft)** | **Jts** | **OD (in)** | **Weight (ppf)** | **Grade** | **Nominal ID (in)** | **Drift ID (in)** |
| PUP JOINT | 19.7 | 28.5 | 1 | 7.000 | 23.00 | N-80 | 6.366 | 6.151 |
| CASING JOINT(S) | 28.5 | 3226.4 | 82 | 7.000 | 23.00 | N-80 | 6.366 | 6.151 |
| CASING JOINT(S) | 3226.4 | 3348.4 | 3 | 7.000 | 26.00 | N-80 | 6.276 | 6.151 |
| FLAG JOINT | 3348.4 | 3368.5 | 1 | 7.000 | 26.00 | N-80 | 6.276 | 6.151 |
| CASING JOINT(S) | 3368.5 | 4869.4 | 37 | 7.000 | 26.00 | N-80 | 6.276 | 6.151 |
| FLOAT COLLAR | 4869.4 | 4870.4 | 1 | 7.000 | 26.00 | N-80 | 6.276 | 6.151 |
| CASING JOINT(S) | 4870.4 | 4910.9 | 1 | 7.000 | 26.00 | N-80 | 6.276 | 6.151 |
| FLOAT SHOE | 4910.9 | 4912.4 | 1 | 7.000 | 26.00 | N-80 | 6.276 | 6.151 |

**Nota**: Tomado y editado de HALLIBURTON LATIN AMERICA SALLC.

Entre los datos que generalmente define el estado mecánico es posible encontrar los siguientes;

***2.1.5.1. TVD (True Vertical Depth – Profundidad Vertical Verdadera).*** Es la distancia de manera vertical que se tiene entre un punto determinado del pozo (generalmente la profundidad hasta el fondo o actual) y el punto en superficie o boca del pozo. Además de esta medición, en el área de perforación se utiliza la profundidad medida, que es la longitud del pozo o bien, el tramo de tubería que puede ser introducida dentro del mismo. (Galeana Castillejos, 2019)

***2.1.5.2. Diámetro de la barrena.*** Cada barrena cuenta con un diámetro específico, este establecerá el diámetro del agujero que se requiere perforar. (Ramírez Mantilla, 2015). Debido a que durante la etapa de perforación son requeridos diferentes diámetros de barrena, estos serán seleccionados de acuerdo con los diámetros que sean requeridos en las sartas de revestimiento.

***2.1.5.3. Diámetro de la tubería de revestimiento.*** Una tubería de revestimiento se encarga de separar la zona productora de las otras diferentes zonas, durante el diseño de la tubería son elaboradas para tolerar fuerzas como lo son: explosión, compresión y fallas por tracción. La tubería de revestimiento cuenta con diámetros de 4 ½'' hasta 36'', esto dependerá de las características que presente el pozo. (Ramírez Mantilla, 2015)

***2.1.5.4. Profundidad de asentamiento.*** Se ratifica que para definir el estado mecánico de un pozo es fundamental y entender la prognosis geológica y los problemas que se presentaron en los pozos de correlación litológica y estructural. (Ramírez Mantilla, 2015). Para realizar la determinación de la profundidad de asentamiento de la tubería de revestimiento, es necesario describir el gradiente de fractura y la presión de poro.

## 2.2. Yacimientos de presiones subnormales

Las presiones subnormales se presentan cuando la presión de la formación es menor que la presión hidrostática del agua para una profundidad vertical dada. Corresponde a yacimientos naturalmente fracturados o formaciones depletadas. Estas formaciones se pueden controlar con una densidad menor que la de agua dulce, equivalente a un gradiente menor de 0.433psi/pie; Una posible explicación de la existencia de tales presiones en las formaciones es considerar que los fluidos han escapado por fallas o fracturas inducidas en el yacimiento. (Petróleos Mexicanos PEP-UPMP)

Por eso es necesario no sobrepasar el gradiente de fractura. La máxima presión permisible a la fractura es un límite en lo referente a control de pozos, si esta se rebasa cuando ocurre un brote puede existir un reventón subterráneo, generando problemas en la integridad del pozo.

Los yacimientos de presiones subnormales, también conocidos como yacimientos depletados, se caracterizan por poseer gradientes de presión menores que 0.433psi/pie, en Colombia se pueden encontrar este tipo de formaciones en campos como Castilla, ubicado en el departamento de Meta y operado actualmente por Ecopetrol S. A.

### 2.2.1. Factores del yacimiento

Al momento de analizar la formación geológica, lo primero que se debe hacer es identificar y recopilar todos los datos disponibles del yacimiento. En campos productores, muchos de los datos requeridos están disponibles y, los que no, se obtienen mediante pruebas sencillas, o se trabaja sin ellos si es posible; sin embargo, en campos que se encuentran en exploración, la información disponible del yacimiento es muy poca o nula, por ello, es necesario adquirir la información necesaria mediante registros eléctricos y pruebas de laboratorio en núcleos de roca. Según el trabajo de (Guerrero García & López R, 2019) la información requerida del sistema roca-fluidos es la siguiente.

***2.2.1.1. Tipo de roca presente en el yacimiento.*** Este factor es de suma importancia, ya que, en la mayoría de los yacimientos, se encuentra un contenido de arcillas que, dependiendo del tipo, pueden hincharse o desmoronarse (montmorillonitas, illitas, atapulguita, etc), generando obstrucción en el paso de los fluidos hacia el pozo. En estos casos, se deben emplear aditivos inhibidores o encapsulantes (como almidones, Poliacrilamida Parcialmente Hidrolizada, Copolímero de ácido acrílico, Poliacrilato de Sodio, Cloruro de Potasio, Poliglicoles, Poliamidas,

etc) para impedir o retrasar la hidratación e hinchazón de las arcillas. (Guerrero García & López R, 2019)

***2.2.1.2. Tipo de fluidos contenidos en el yacimiento.*** En algunos casos, los componentes del crudo y del agua de formación, no son compatibles con los componentes disueltos en el fluido de perforación, esto hace que se precipiten algunas partículas sólidas que pueden ocasionar taponamientos en el medio poroso. Por ello, es necesario conocer previamente los componentes del crudo (parafínico o asfalténico) y los componentes del agua de formación (como carbonatos, sulfatos, cloruros, etc), para seleccionar aditivos que no generen precipitados al contacto con los fluidos del yacimiento. (Guerrero García & López R, 2019)

***2.2.1.3. Tamaño de la garganta de poro.*** Este parámetro es de gran importancia durante la formulación del fluido, ya que, permite determinar el tamaño de partícula que deben tener los aditivos sólidos adicionados al fluido de perforación; por regla general, se tiene que las partículas de aditivos deben tener un diámetro 1/3 mayor al diámetro de la garganta de poro. Estos valores pueden ser obtenidos experimentalmente, empleando análisis SEM o mediante la inyección de mercurio en muestras de roca representativas. En el caso que no se puedan realizar estas pruebas, es posible emplear correlaciones matemáticas que permitan aproximar los valores del radio de garganta de poro. (Guerrero García & López R, 2019)

***2.2.1.4. Mojabilidad del sistema.*** Es importante determinar el tipo de aditivos que generan un cambio en la mojabilidad de la zona cercana al pozo, ya que, en el caso que el sistema sea predominantemente mojado al agua, al filtrarse materiales tensoactivos (como surfactantes), o al presentarse un cambio abrupto en el pH del sistema, se puede generar un cambio en la mojabilidad y la roca puede volverse humectada al petróleo, lo que reduciría el flujo de hidrocarburos hacia el pozo. (Guerrero García & López R, 2019)

***2.2.1.5. Temperatura del yacimiento.*** Algunos de los aditivos que se agregan al fluido de perforación (como los polímeros), tienden a degradarse a elevadas temperaturas, por ello, es necesario conocer la temperatura a la que van a estar sometidos los fluidos de perforación en el yacimiento, para poder determinar cuáles aditivos son los más adecuados. Cuando los polímeros se sobrecalientan, pueden descomponerse y producir vapores que contienen diversos productos químicos y tóxicos, haciendo que el material pierda sus propiedades iniciales y, afectando el rendimiento del fluido de perforación. (Guerrero García & López R, 2019)

***2.2.1.6. Presión de formación y presión de fractura.*** Una de las funciones más importantes del fluido de perforación, es controlar las presiones de las formaciones que se van atravesando, para ello, es necesario conocer la ventana operativa del fluido, cuyos límites corresponden a la Presión de Poro o Presión de Formación (límite inferior) y a la Presión de Fractura (límite superior). Conociendo la Presión Hidrostática que debe ejercer el fluido dentro del pozo, se determina la densidad que este debe tener en cada intervalo a perforar. Para lograr la densidad requerida, se adicionan al fluido base, aditivos especiales como densificantes. (Guerrero García & López R, 2019)

## 2.3. Caso de estudio de yacimientos de baja presión en Colombia

### 2.3.1. Campo Castilla de Ecopetrol S.A

El presente análisis se aplica al Campo Castilla operado por Ecopetrol S.A. el cual presenta problemas en las operaciones de perforación y cementación, causados por formaciones inestables que poseen presiones subnormales. Se busca predecir el comportamiento de las lechadas de cemento en formaciones de presiones subnormales y reducir las pérdidas por circulación de fluido.

El Campo Castilla es uno de los principales campos productores en Colombia, puesto que tiene una de las mayores producciones de barriles de crudo por día en el país, razón por la cual Ecopetrol

S.A. ve la necesidad de realizar proyectos de investigación que mejoren la rentabilidad del campo disminuyendo los costos tanto de perforación como de producción.

### 2.3.2. Origen del campo Castilla

En el año 1945 se iniciaron los trabajos en la región del Meta para la búsqueda y exploración de yacimientos petrolíferos. Pero fue para el año 1969 cuando la compañía Chevron Petroleum Company descubrió el campo bajo el contrato de concesión Cubarral. (ECOPETROL S.A., 2004)

Chevron se encargó de la operación del campo durante 25 años desde 1975 hasta el año 2000, gracias al primer contrato de asociación firmado en el país. Una vez terminado este periodo, Ecopetrol otorgó a Chevron la operación del campo por 6 meses más, mientras se realizaba el debido empalme entre las compañías. Luego, el 1 de agosto de 2000, Ecopetrol asumió la administración del Campo Castilla en su totalidad, proponiéndose a mejorar las operaciones de recobro y producción reduciendo el impacto ambiental. (Carreño Lopez & Mácias Díaz, 2017)

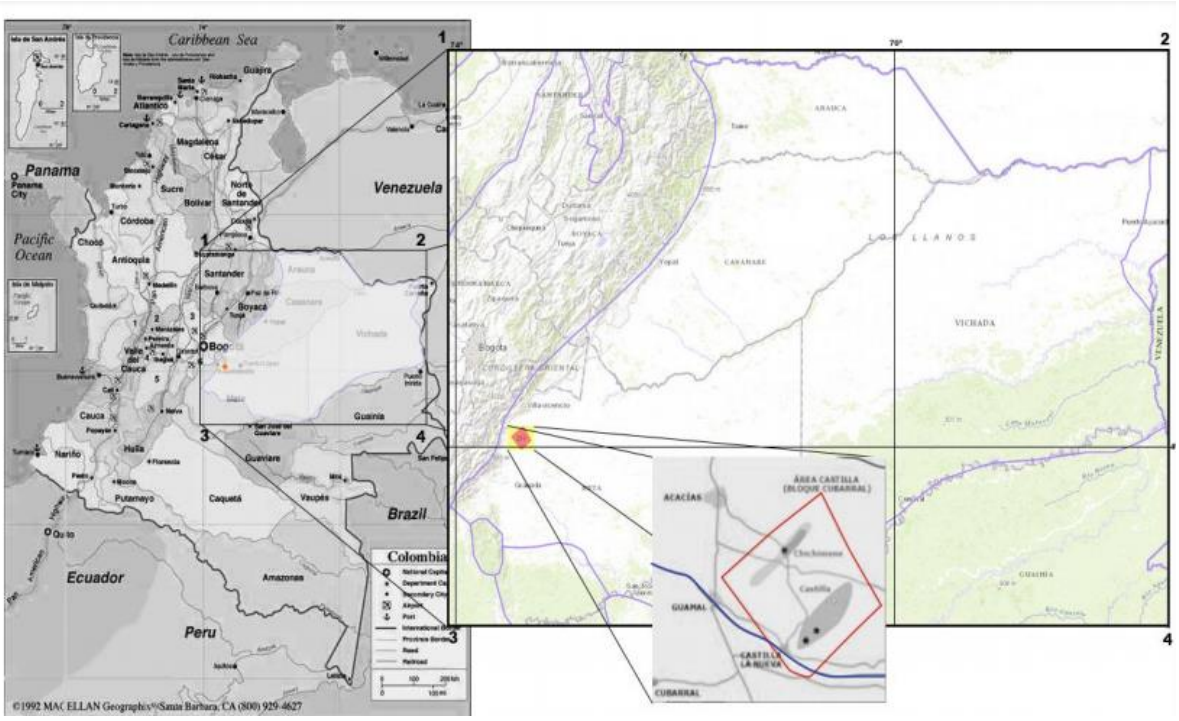
### 2.3.3. Localización geográfica

El Campo Castilla se encuentra ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales, a 54 km al sur de la ciudad de Villavicencio en el departamento del Meta. Está bajo la jurisdicción de los municipios Castilla La Nueva y Acacías.

Para llegar al campo se debe recorrer la vía que conduce de Bogotá a Villavicencio (90 km), Villavicencio a Acacías (30 km) y Acacías a Castilla La Nueva (36 km). Además, estos municipios se encuentran ubicados en la zona adyacente al piedemonte de la Cordillera Oriental, en la región de la Orinoquia, geológicamente hablando. (Arias Martínez, 2012) El mapa de localización del Campo Castilla se presenta en la Figura 4.

**Figura 4**

*Mapa de localización campo Castilla*




Nota: Ubicación geográfica del Campo Castilla. Tomado de Carreño Lopez, F., & Mácias Díaz, J. S. (2017). Aplicación De La Metodología Tripod Beta Modificada Para El Diagnóstico De Las Causas Raiz De Los Problemas Operacionales Presentados En La Perforación De Los Pozos K, L Y M En El Campo Castilla. Bogotá D.C.: Fundación Universidad De América.

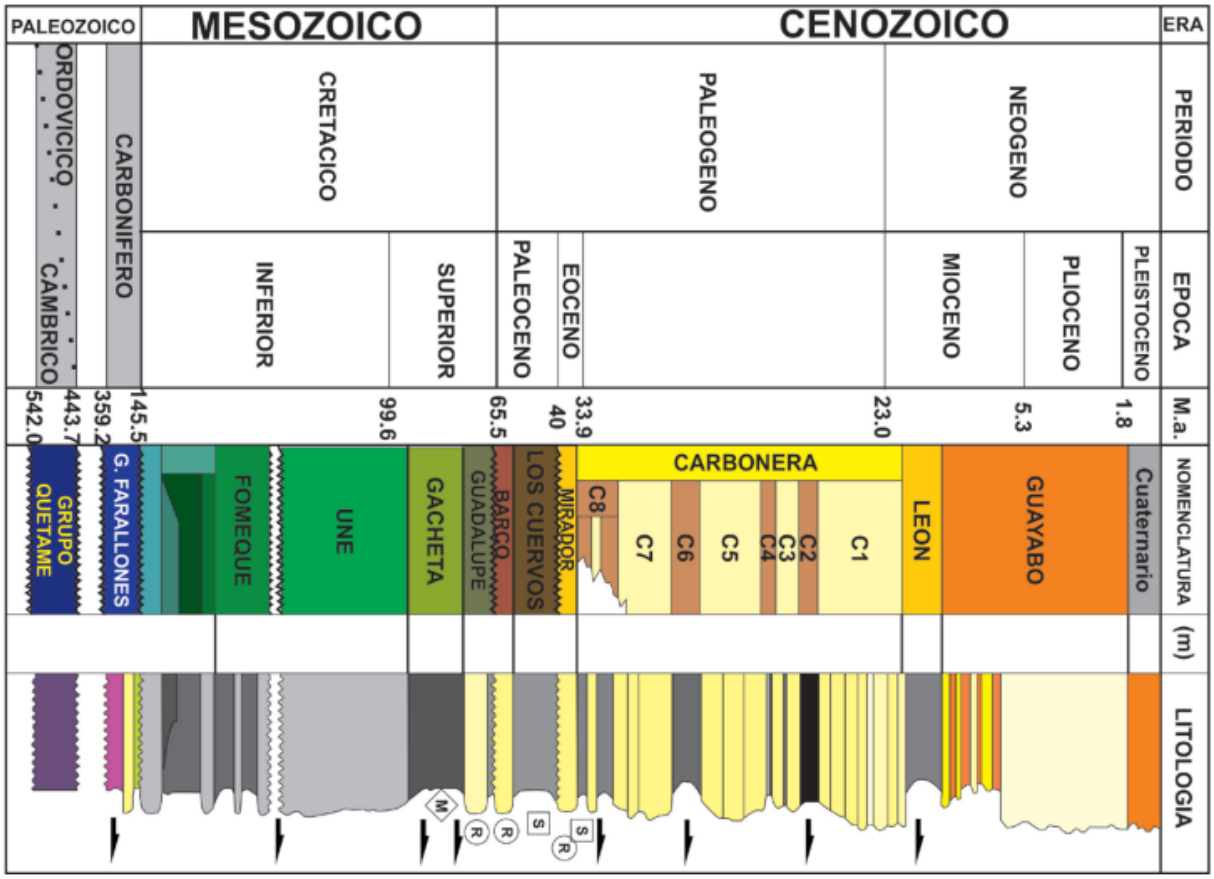
### 2.3.4. Marco geológico

La estructura es un anticlinal asimétrico elongado con una orientación N60E, de aproximadamente 10 km de largo por 4 de ancho. Fallado en el flanco oriental. Contiene fallas internas normales e inversas. Al parecer estas fallas no son sellantes, ya que el contacto agua-petróleo no muestra cambios significativos a lado y lado de estas. La trampa es estructural. (ANH, 2014) En esta sección se encuentran las generalidades geológicas que caracterizan al Campo Castilla.

***2.3.4.1 Geología estructural.*** La cuenca de los Llanos Orientales se define como una geoforma estructural, compuesta como lo muestra la Figura 5, se encuentra ubicada entre las cordilleras o serranías levantadas y las depresiones laterales. La estructura del Campo Castilla, corresponde a un anticlinal asimétrico cuya orientación es de N 60° E36, con una extensión de 10 km de largo aproximadamente, por 4 km de ancho, contiene fallas internas normales con saltos que varían de 30 a 120 pies y limita en su flanco oriental con una falla inversa que presenta saltos que oscilan entre 30 a 50 pies. (Morales, 2010). En la Tabla 3 se presenta una breve descripción del Sistema Petrolífero del Campo Castilla.

**Figura 5**

*Columna estratigráfica de la cuenca de los Llanos Orientales*




Nota: Las formaciones que componen la cuenca de los llanos orientales empleando la nomenclatura usada por Notestein (1944; en Torrado, 2000) en la antigua concesión Barco. Tomado de Amorocho, P. R., &

Badillo, J. (2012). Influencia De La Composición Mineral De Rocas Arcillosas En La Estabilidad De Pozos Petroleros. Boletín de Geología Vol. 34.

**Tabla 3.**

*Sistema petrolífero campo Castilla*

| ELEMENTO | UNIDADES LITOLOGICAS | CARACTERISTICAS |
|---|---|---|
| Roca Generadora | Fm. Gachetá | TOC: 1.0 - 3.0%<br>(Bueno a muy bueno)<br>Kerógeno<br>Tipo ll y lll<br>Espesor Efectivo<br>50 - 100m |
| Roca Reservorio | Fm. Carbonera<br>Fm. Mirador<br>Fm. Guadalupe<br>Fm. Une | Areniscas<br>Porosidad: 10 - 30% |
| Roca Sello | Fm. León*<br>Fm. Carbonera (Unidades pares)<br>Fm. Guadalupe<br>Fm. Gachetá | Sello Regional*<br><br>Las demás unidades como sellos locales e internos |

Nota: Tomado y adaptado de Mojica, Jairo. Cuencas Catatumbo, Cesar – Ranchería, Cordillera Oriental, Llanos Orientales, Valle Medio y Superior del Magdalena. ANH. ANH. [en línea] diciembre 2009 [citado agosto 02 de 2018].

***2.3.4.2. Roca generadora.*** La principal roca generadora de la Cuenca de los Llanos Orientales corresponde a las lutitas marino-continentales de la Formación Gachetá, localizadas por debajo del flanco oriental de la Cordillera Oriental. Se encuentra con rangos de TOC (Total Organic Carbon) entre 1 y 3 %, constituida por un kerógeno tipo II (en el Piedemonte), proveniente de algas lacustres, con la capacidad de generar hidrocarburos líquidos; y tipo III (antepaís), de material leñoso y celulósico de plantas terrestres con generación de gas principalmente. (ANH, 2016)

***2.3.4.3. Roca reservorio.*** En el campo Castilla, las principales rocas almacenadoras pertenecen a la Formación Mirador y Carbonera (C3, C5, C7), del Paleógeno. De igual manera, algunos

intervalos arenosos de las Formaciones Guadalupe (K1) y Une (K2) de la secuencia Cretácica son buenas rocas almacén. Debido a la magnitud de los problemas operacionales, también se tiene en cuenta la formación Mirador (T2). Los valores de porosidad registrados para la formación Guadalupe están entre 10,8 y 28% y para la formación Une se aproxima a 19,5% con unas permeabilidades promedio de 1.180 mD y 1.660 mD respectivamente. (ANH, 2007) Los intervalos arenosos están compuestos por;

Unidad K1: Arena delgada con alto contenido arcilloso. Está constituida por intercalaciones de areniscas, arcillolitas y limolitas. Grado de inestabilidad moderado a alto. Resistencia Tensil promedio: 800 Psi.

Unidad K2: Arena limpia bastante homogénea. Está constituida por conglomerados de arenas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas. Grado de inestabilidad bajo. Resistencia Tensil promedio: 1500 a 2500 Psi.

***2.3.4.4. Migración.*** Para esta cuenca, se han registrado dos pulsos de migración: el primero durante el Eoceno tardío – Oligoceno (migración primaria) en el cual el petróleo migró desde la roca generadora hacia las rocas porosas localizadas en la parte superior e inferior de esta misma, para permitir su acumulación; la segunda migración fue producto de la orientación de las capas geológicas que conforman el yacimiento, dicha migración comenzó en el Mioceno y continúa en la actualidad. Debido a que la ruta de migración es considerablemente larga para la zona oriental y central de esta cuenca, se tiene una mayor producción hacia el occidente. (RACC, 2009)

***2.3.4.5. Roca sello.*** Esta cueca se encuentra conformada por un sello regional, generado por la Formación León. por otro lado, las Unidades pares (C2, C4, C6, C8) de la Formación Carbonera, son reconocidas como sellos locales; a su vez, las lutitas cretácicas que conforman las Formaciones Gachetá y Guadalupe actúan como sellos intraformacionales. (ANH, 2007)

***2.3.4.6. Trampa.*** La Cuenca de los Llanos orientales está conformada por un entrampamiento de tipo estructural que se ubica en la parte occidental del Piedemonte Llanero; las trampas estructuras presentan básicamente cinco estilos: pliegues por propagación de falla, pliegues en zonas triangulares, anticlinales por fallas invertidas, pliegues por fallas de desgarre y antitéticas. (Servicio Geológico Colombiano, 2018) Adicionalmente, se ha encontrado evidencia de procesos de movilización entre fallas tectónicas.

### 2.3.5. Historia de producción del campo Castilla

Antes de que el campo pasara a propiedad de Ecopetrol en el año 2000, el Campo Castilla producía entre 10000 y 20000 barriles de petróleo al día, y alcanzó una producción máxima de 22479 barriles bajo la operación de Chevron. (ECOPETROL S.A., 2004). Una vez que Ecopetrol asumió el campo, se ha presentado un crecimiento considerable en la cantidad de barriles producidos por día. En la siguiente parte del documento se presenta el mecanismo de producción del campo, la producción acumulada y las características del yacimiento.

***2.3.5.1. Método de producción.*** El mecanismo de producción del campo se basa en un empuje de agua fuerte que otorga como ventaja para la producción mantenimiento de la presión del yacimiento. La profundidad promedio de la formación productora se encuentra a 10500 pies, y es la Unidad K2 en mayor medida. (ECOPETROL S.A. , 2014)

***2.3.5.2. Características del yacimiento.*** El Campo Castilla es un yacimiento de aceite negro subsaturado, de tipo asfalténico, con una gravedad API entre 9-15°.46 A lo largo de la vida productiva del campo, se ha podido obtener información significativa a cerca de las propiedades petrofísicas de la roca yacimiento y de los fluidos, mediante registros eléctricos y pruebas de laboratorio en núcleos de roca. Estas propiedades se muestran en la Tabla 4.

Después de realizar un estudio detallado de los reportes diarios de perforación se identificó como principal problema operacional las pérdidas de circulación; las cuales se presentan en la unidad K2, debido a las fracturas naturales que caracterizan esta formación en el campo, caso que no se presenta en la unidad K1. No obstante, durante el estudio de los reportes se observó que las pérdidas de fluido se presentaron también en la formación Mirador, unidad T2, con una magnitud significativa, por lo cual se consideraron ambas formaciones para el análisis de este problema operacional. (Lozano Salazar, Rivas Hoyos, Loza, Suárez, & Calderón, 2011)

**Tabla 4.**

*Propiedades petrofísicas del yacimiento y de los fluidos en el Campo Castilla*

| Campo Castilla | Unidad | | Unidad T2 |
|---|---|---|---|
| | K1 | K2 | |
| Profundidad del Yacimiento (ft) TVDSS | 7000 | | 6800 |
| Espesor Neto Promedio (ft) | 500 | | 60 |
| Mecanismo de Producción | Acuifero | | Acuifero |
| Existencia de Capa de Gas | No | | No |
| Temperatura del Yacimiento (ºF) | 198 | | 185 |
| Porosidad (%) | 10.8 - 28 | | 25 - 30 |
| Permeabilidad (mD) | 200 - 4000 | | 200 - 3600 |
| Presión de Poro (psi) | 3.0 - 9.0 | 5.0 - 7.0 | 3.9 - 6.5 |
| Presión de Fractura (psi) | 14.0 - 16.5 | 13.7 - 15 | 13.8 - 15.2 |
| Garganta Poral (micra) | 25 - 45 | 85 - 105 | … |
| Saturación Inicial de Agua (%) | 15 | | 20 |
| Gravedad API (ºAPI) | 12.5 | | 9 |
| Viscosidad del Aceite (cP) @ Temp. Yto | 134 | | 450 |
| Factor Volumetrico del Crudo (RB/STB) | 1.04 | | 1.03 |
| Presión Inicial del Yacimiento (Psia) @ Datum 5600 TVDSS | 2830 | | 3100 |

Nota: Tomado Guerrero García, J. A., & López R, J. D. (2019). Matriz Para La Selección De Un Fluido De Perforación Base Agua, Con El Fin De Prevenir El Daño De Formación En El Campo Castilla, Colombia. Bogotá D.C.: Fundación Universidad De América.

El Campo Castilla es un yacimiento de petróleo subsaturado, cuya porosidad promedio es de 19 % y su permeabilidad promedio es de 1500 mD en K2, aunque puede llegar hasta 2000 mD en promedio en la Unidad T2. El crudo producido en Castilla es de 12.5˚ API y tiene una viscosidad a temperatura de yacimiento de 134 cp, con lo cual se puede catalogar como crudo pesado. (Guerrero García & López R, 2019)

### 2.3.6. Problemas operacionales en el campo castilla

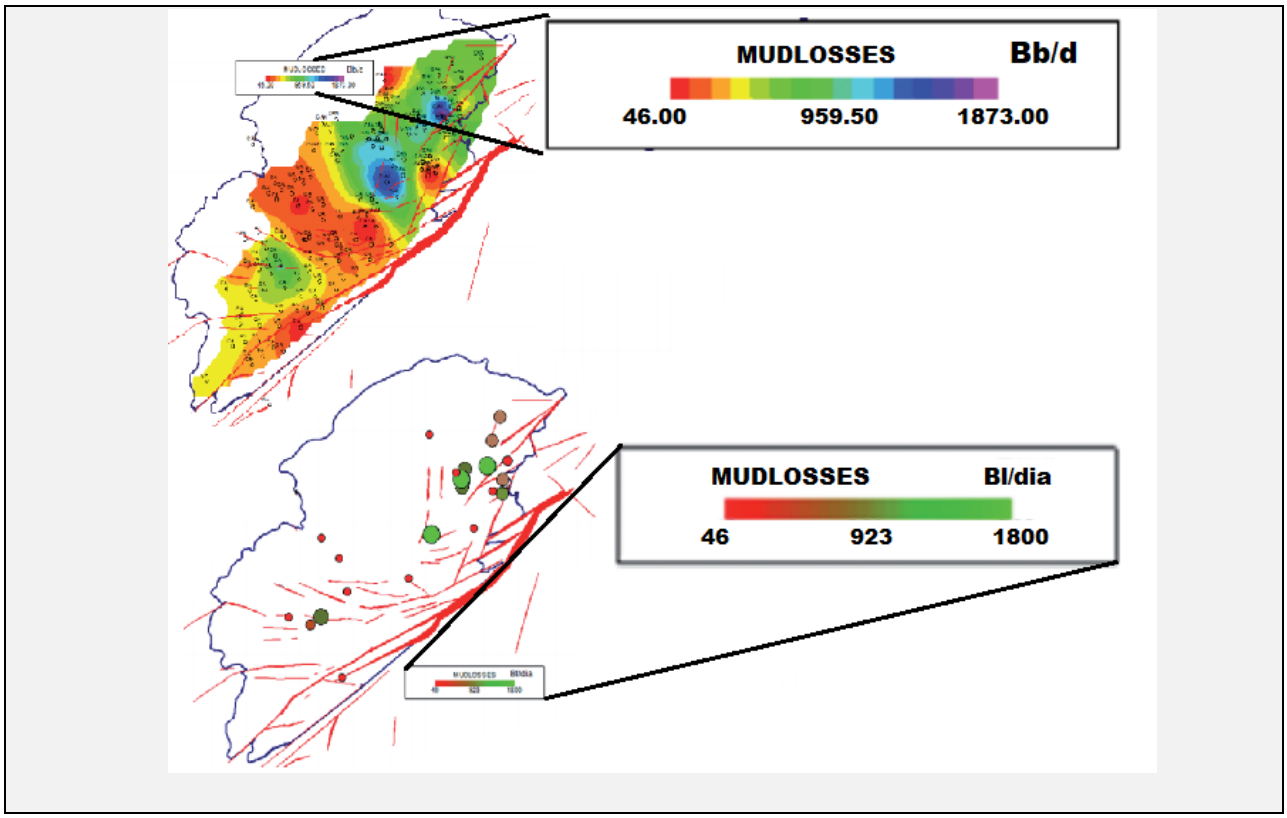
Se caracterizan por ser buenos candidatos los pozos con yacimientos depletados (bajas presiones), las áreas con predisposición a las pegas diferenciales, pérdidas de circulación, daños a la formación, los intervalos de alta dureza (bajas ROP), áreas con disponibilidad limitada de agua, formaciones naturalmente fracturadas, formaciones con alta permeabilidad y formaciones altamente variables (zonas heterogéneas). (Lozano Salazar, Rivas Hoyos, Loza, Suárez, & Calderón, 2011)

Durante la perforación de pozos se pueden presentar múltiples problemas operacionales que causan además de un incremento de los tiempos no productivos, incremento de costos y otros problemas asociados. En el Campo Castilla de Ecopetrol S.A. se ha identificado que uno de los problemas más recurrentes son los eventos de pérdida de circulación (Chacón Carrero & Munévar, 2018).

Para un estudio más detallado de las pérdidas de circulación en cada unidad, se generaron mapas de distribución de pérdidas a lo largo de todo el campo con el fin de identificar las zonas mayormente afectadas y mapas de burbujas para conocer la magnitud del problema operacional presentado en cada uno de los pozos durante la perforación convencional. En la Figura 6 muestran los mapas de distribución y de burbuja para las pérdidas presentadas en las dos formaciones (Guadalupe y Mirador) en barriles de lodo por día [Bbls/día]

**Figura 6**

*Mapa de distribución de pérdidas de circulación K2–T2.*




Nota: Se puede observar pérdidas de circulación significativas en la zona norte (alrededor de los 1800 Bbls/día) y en la parte central del sur (alrededor de los 1000 Bbls/día). Tomado y adaptado de Lozano Salazar, V., Rivas Hoyos, D., Loza, J., Suárez, D., & Calderón, Z. (2011). Metodología Para La Selección De Pozos Candidatos A Perforar En Condiciones De Bajobalance. Aplicación Al Campo Castilla De Ecopetrol S.A. *Revista Fuentes: El Reventón Energético Vol. 9 Nº2*, 63-71.

Se pueden observar más claramente los pozos donde ocurrieron las pérdidas de circulación las cuales, como se aprecia en el mapa, pueden asociarse a las fallas presentes en el campo.

Al igual que en la unidad T2, la formación Guadalupe presenta pérdidas de circulación en la mismas zonas norte y sur, pero en un rango significativamente mayor, llegando a tener pérdidas de hasta 3800 Bbls/ día en el sur y alrededor de 2000 Bbls/día en el norte, pueden asociarse al sistema de fallas presente en el campo, además de las fracturas naturales propias de estas formaciones. (Lozano Salazar, Rivas Hoyos, Loza, Suárez, & Calderón, 2011)

# 3. Diseño de lechadas livianas.

Son lechadas de cemento de bajo peso, puede llegar a presentar densidades de 8.33ppg a 12.0ppg y una resistencia a la compresión de aproximadamente 1000psi a 1500psi, esenciales para minimizar la carga hidrostática y mejorar factores que estabilizan la formación durante la coalición de la lechada, esto permite detener las pérdidas por circulación y evita que se generen fracturas inducidas por sobrecarga, brindando seguridad en la integridad del pozo.

## 3.1. Generalidades de la cementación

### 3.1.1. Normatividad del cemento

Las dosificaciones de cementos se crean bajo las siguientes normas generales del Instituto Americano del petróleo y la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales

***3.1.1.1 Norma API SPEC 10ª.*** Especificación para cementos y materiales para cementación de pozos, 1 de marzo de 2019. Es el documento con la norma de la industria que especifica los requisitos de los cementos para pozos y los métodos de ensayo y especificación del API. (Schlumberger, 2019)

***3.1.1.2. ASTM1 C109/C109M, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.*** Es el método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de los morteros de cemento. Este método de prueba cubre la determinación de la resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico, usando 2 pulg. o probetas de cubo de [50 mm]. Advertencia, las mezclas cementosas hidráulicas frescas son cáusticas y pueden causar quemaduras químicas en la piel y los tejidos tras una exposición prolongada. (Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales, 2020)

***3.1.1.3. ASTM C114, Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.*** Estos métodos de prueba cubren los análisis químicos de cementos hidráulicos. Los métodos de

ensayo químicos específicos se agrupan como métodos de ensayo de referencia y métodos de ensayo alternativos.

Los métodos de prueba de referencia son métodos de prueba químicos clásicos aceptados desde hace mucho tiempo que proporcionan un esquema básico razonablemente bien integrado de análisis para cementos. (Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales, 2020)

***3.1.1.4. La Especificación API 13A "Specification for Drilling Fluid Materials".*** Incluye los requisitos para el producto y puede ser aplicable a cualquier requisito específico del mismo, entre estos requisitos esta la evaluación de la arcilla base, calibración de la barita y bentonita de prueba, los requisitos de documentación para el uso de materiales en las pruebas de verificación y finalmente los requisitos de envío. (Americam Petroleum Istitute, 2010)

### 3.1.2. Cemento Portland

Los cementos Portland son fabricados dependiendo de su aplicación, y deben de reunir ciertos estándares químicos y físicos. En Estados Unidos de América existen varias agencias para el estudio y estructuración en especificaciones del cemento Portland. De éstas, las que mejor conocen de la industria petrolera son la de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials, ASTM, por sus siglas en inglés) y el Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute, API, por sus siglas en inglés). La ASTM provee a la industria de cinco tipos de cemento Portland: Tipo I, II, III, IV y V. Los cementos fabricados para su uso en pozos petroleros están sujetos a un amplio rango de presión y temperatura. (Zaldivar Cabrera , 2017)

Son el resultado de mezclar Clinker + Yeso (Sulfato de calcio), en una proporción de (95 -97 %) /(5 -3 %). El Clinker es un compuesto químico que forma en un horno rotatorio, cuando mezclamos caliza con arcillas, la relación de masa depende de la calidad y tipo de los materiales,

además, tiene un proceso de fusión a 1400 – 1600 ºC. Las Calizas Pueden ser de diferentes tipos como; el carbonato de calcio ($CO_3Ca$), abunda en la naturaleza, las formas más puras son la calcita y el aragonito. La segunda materia prima importante son las arcillas, son productos de meteorización de silicatos de los metales alcalinos y alcalinotérreos, en especial los de feldespato y micas. Pueden ser del grupo del caolín y/o montmorillonita. (López G, 2019)

## 3.2. Lechada de cementación

Un cemento hidráulico, fragua y desarrolla resistencias a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. En la industria petrolera, el cemento usado comúnmente es el cemento Portland que es el más importante en cuanto a términos de calidad, desarrollo de resistencia a la compresión, tensión y a los sulfatos; por lo cual es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos petroleros (Rojas & Quercia, 2004). Las variables del proceso pueden ser controladas a partir del diseño adecuado de la lechada, lo cual incluye el tipo, cantidad de cemento, agua y aditivos en la mezcla.

### 3.2.1. Importancia de una buena cementación

La principal importancia de una buena cementación radica en proporcionar un completo aislamiento de las formaciones, proteger el medio ambiente, aumentar la seguridad de las operaciones de perforación y ayuda a optimizar la producción. Sin un cemento de alta calidad que llene el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación, los acuíferos de agua dulce que se encuentran por debajo o encima del yacimiento podrían verse contaminados por fluidos provenientes de otras formaciones. Por otro lado, si la tubería no queda del todo protegida por cemento puede verse expuesta a la corrosión que causan los fluidos de la formación. Los fluidos

de perforación cuyas densidades superan el gradiente de fractura de la formación pueden inducir al fracturamiento de la misma, dando como resultado la creación de microfracturas capaces de producir pérdidas de circulación en la etapa de cementación. Durante las operaciones de perforación y cementación se pueden producir pérdidas de circulación, y por lo tanto se puede perder el control del pozo, lo que significa que los fluidos no retornan a la superficie, lo anterior si las formaciones débiles no están protegidas de la densidad del lodo o de lechadas que superen el gradiente de fractura de la formación. En estos casos, tanto el lodo de perforación como la lechada de cemento se pierden en las fracturas y no vuelven al sistema de circulación de fluidos. La producción podría verse afectada si los hidrocarburos fluyen hacia cualquier parte que no sea el pozo mismo. (Zaldivar Cabrera , 2017)

### 3.2.2. Problemas operacionales en la etapa de cementación

Durante las operaciones de cementación se busca tener una presión hidrostática ligeramente mayor a la presión de la formación. Esto se complica cuando las formaciones están depletadas o hay zonas litológicas porosas que poseen gradientes de fracturas bajos. Las formaciones con estos problemas se ven afectadas por el peso de la lechada de cemento, pero la densidad se puede controlar para tener el control de la presión hidrostática, por medio de aditivos que modifican las propiedades fisicomecánicas del cemento, evitando problemas operacionales como; fracturas inducidas en la formación, perdidas por circulación, relleno insuficiente del anular y pérdida de control de las presiones. (Zaldivar Cabrera , 2017)

La pérdida de circulación de fluido constituye un peligro conocido durante las operaciones de perforación y cementación efectuadas en yacimientos de alta permeabilidad, en zonas agotadas, y en formaciones débiles, naturalmente fracturadas o cavernosas.

***3.2.2.1. Pérdida de Circulación.*** Existen muchos factores que originan las pérdidas de circulación en un pozo, cada uno de estos factores está relacionado con el tipo de formación que se está perforando, las condiciones del pozo y la presión que ejerce la columna de fluido, tanto en la perforación como en la cementación.

En general una pérdida de circulación puede ser clasificada como filtración cuando las pérdidas son inferiores a 10 bbl/h. también hay perdidas de retorno parciales implican pérdidas de más de 10 bbl/h, pero algo de fluido retorna a la superficie. El grado en que se pierde circulación en el pozo se puede clasificar según la cantidad volumétrica de la pérdida en cuatro; pérdidas por filtración, parcial, severa y total, como se muestra en la Tabla 5. (Baggini, 2014)

**Tabla 5**

*Clasificación de las pérdidas de circulación*

| Tipo de pérdida | Severidad de la pérdida |
|---|---|
| Filtración | Menos de 1.6 m3/h (10 bbl/h) |
| Parcial | Entre 1.6 y 16 m3/h (10 y 100 bbl/h) |
| Severa | Más de m3/h (100 bbl/h) |
| Total | No retorna fluido alguno a la superficie |

Nota: Información tomada de BAGGINI, Santiago, Sellado de fracturas: Avances en el control de pérdidas de circulación. En Oilfield Review otoño. Nº 3 (2014).

La pérdida debido al tipo de formación es el principal problema que se llega a presentar durante las operaciones llevadas a cabo en el pozo, por lo que tener una buena caracterización de las formaciones tanto en porosidad, como en permeabilidad y así como las fuerzas de presión ejercidas sobre dicha formación ayudarán en el diseño de los lodos empleados en las operaciones de perforación y en las lechadas en el proceso de cementación. (Haithan Jarouj, 2004)

## 3.3. Propiedades físicas del cemento

Son propiedades específicas que permiten analizar y clasificar los cementos, entre las principales propiedades se encuentran;

### 3.3.1. Resistencia a la compresión

Es la capacidad que tiene un material para soportar esfuerzos compresivos sin deformarse o quebrarse. Esta propiedad se identifica cuando el cemento ya ha fraguado, depende de la temperatura, la presión y la composición del cemento. (Gómez Flórez & Tarquino Nieto, 2018, pág. 42)

### 3.3.2. Tamaño de grano

La importancia de la fineza de los granos de cemento radica en el impacto que tiene sobre el requerimiento de agua para la preparación de la lechada. Esta característica es una de las principales que se toma en cuenta para la clasificación del cemento. Representa el área expuesta al contacto con el agua. En unidades de área sobre peso. (Vistrain Martínez, 2005, pág. 26)

### 3.3.3. Requerimiento de agua

Es el agua necesaria para una mezcla adecuada de una lechada compuesta solamente de cemento y agua. Representa la cantidad de agua con la que la lechada presenta unidades de consistencia ante la agitación en el Consistometro atmosférico a temperatura ambiente, se expresa en por ciento por peso de cemento. (Vistrain Martínez, 2005, pág. 26).

### 3.3.4. Reología

En el contexto petrolero, la reología se encuentra relacionada con los esfuerzos cortantes que se pueden generar durante el desplazamiento de los fluidos de perforación dentro del sistema de circulación, permitiéndole adquirir una capacidad para llevar los recortes hacia la superficie y generar fuerzas estáticas de gel, para suspender los sólidos cuando el fluido no está circulando. (Guerrero García & López R, 2019)

***3.3.4.1. Viscosidad plástica (Unidades cP).*** La viscosidad plástica (PV) se define como la resistencia de un fluido a fluir, causada por la fricción mecánica entre las partículas sólidas que se encuentran presentes en el fluido de perforación. Una PV baja, es indicativo de que el lodo es capaz de perforar rápidamente debido a su baja viscosidad, mientras que una PV alta es generada por un exceso de solidos coloidales presentes de los fluidos. Esta viscosidad depende de la forma, tamaño y concentración de partículas sólidas presentes en los fluidos. (Guerrero García & López R, 2019)

***3.3.4.2. Punto cedente (Unidad lb/100 pies2).*** Es una medida de la resistencia al flujo causada por la atracción de las cargas eléctricas presentes en las partículas dispersas del lodo, bajo condiciones dinámicas o de flujo. El Punto Cedente, se encuentra directamente relacionado con la capacidad que tiene el fluido de garantizar la correcta limpieza del pozo. (Guerrero García & López R, 2019)

***3.3.4.3. Viscosidad aparente (Unidad cP).*** Es una medida relativa de la resistencia que tiene un fluido a fluir bajo unas condiciones específicas. (Guerrero García & López R, 2019)

### 3.3.5. Fricción durante el bombeo

La fricción es la fuerza de rozamiento que se da por el contacto de dos cuerpos o sustancias. Esta propiedad se maneja con el uso de dispersantes, los cuales reducen el Yeild Point (YP) y causan turbulencia a bajas ratas de bombeo. (Gómez Flórez & Tarquino Nieto, 2018, pág. 42).

### 3.3.6. Densidad de la lechada

Es uno de los parámetros más importantes durante las operaciones de perforación, ya que, permite dar un control primario del pozo, garantizando la estabilidad de este y evitando el flujo no deseado de fluidos del yacimiento hacia el pozo, por lo tanto, es recomendable mantener la presión

hidrostática generada por los fluidos de perforación, ligeramente mayor a la presión de poro de la formación. (Guerrero García & López R, 2019)

La densidad puede ser alteradas para reunir requerimientos operacionales específicos (una formación que tenga un bajo gradiente de fractura podría no soportar la presión hidrostática de una lechada de cemento cuya densidad esta alrededor de las 15 lb/gal). La densidad puede ser alterada a través de cambiar la cantidad de agua de mezcla o usando aditivos para la lechada. La densidad de muchas lechadas de cemento varía entre 11 a 18,5 lb/gal (ppg).

### 3.3.7. Tiempo de bombeabilidad

El tiempo de bombeabilidad de una lechada de cemento es el tiempo durante el cual la lechada de cemento puede ser bombeada y desplazada dentro del espacio anular. La lechada debe tener suficiente tiempo de bombeabilidad para permitir ser mezclada, bombeada dentro de la tubería y desplazada a través del fluido de la perforación hasta que este se ubique el lugar requerido. (Rojas & Quercia, 2004)

El tiempo de bombeabilidad de los fluidos se detalla en la Tabla 6, la cual representa el programa de bombeo de la operación de cementación del revestimiento intermedio. Los tiempos de bombeo de los fluidos solicitados y obtenidos, cumplen con el tiempo de seguridad adecuado, que garantiza que la lechada de cemento llegará hasta la profundidad deseada en estado de bombeabilidad, eso quiere decir que no cambiará de estado antes de lo diseñado. (Alvarez Herrera & Marquez Diaz, 2016)

**Tabla 6.**

*Programa de bombeo*

| | Etapa | Volumen (Bbl) | Descripción del fluido | Caudal (Bbl/min) | Tiempo etapa (hh:mm) | Tiempo Total (hh:mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | Premezcla | 104 | Premezcla Lechada Principal | 0 | 1:00 | 1:00 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Soltar 1 Bottom Plug | | | | 0:05 | 1:05 |
| 2 | Lavador Químico | 40 | Lavador Químico de 8.4 lpg | 5 | 0:08 | 1:13 |
| 3 | Espaciador Mecánico | 40 | Espaciador Mecánico de 13 lpg | 5 | 0:08 | 1:21 |
| 4 | Espaciador Reactivo | 40 | Espaciador Reactivo de 10.2 lpg | 5 | 0:08 | 1:29 |
| 5 | Espaciador Mecánico | 10 | Espaciador Mecánico de 13 lpg | 5 | 0:02 | 1:31 |
| 6 | Soltar 2 Bottom Plug | | | | 0:05 | 1:36 |
| 7 | Lechada de Relleno | 126 | Lechada de Relleno 13.6 lpg | 5 | 0:25 | 2:01 |
| 8 | Lechada Principal | 104 | Lechada Principal 15.8 lpg | 5 | 0:21 | 2:22 |
| 9 | Soltar Top Plug | | | | 0:05 | 2:27 |
| 10 | Desplazamiento | 10 | Agua Fresca | 8 | 0:01 | 2:28 |
| 11 | Desplazamiento | 400 | Lodo (Bombas Taladro) | 12 | 0:33 | 3:01 |
| 12 | Desplazamiento | 80 | Lodo (Bombas Taladro) | 8 | 0:10 | 3:11 |
| 13 | Desplazamiento | 50 | Lodo (Bombas Taladro) | 63 | 0:08 | 3:19 |
| 14 | Desplazamiento | 22 | Agua Fresca | 2 | 0:11 | 3:30 |
| | | | Tiempo Total del trabajo (hh:mm) | | | 3:30 |
| | | | Tiempo de Bombeabilidad de Lechada Principal (hh:mm) | | | 5:04 |
| | | | Tiempo de Bombeabilidad de Lechada de Relleno (hh:mm) | | | 3:38 |
| | | | Tiempo de Seguridad de Lechada Principal (hh:mm) | | | 1:33 |
| | | | Tiempo de Seguridad de Lechada de Relleno (hh:mm) | | | 1:43 |

Nota: Información tomada de Reporte Final del Servicio de Cementación para Ecopetrol S.A. Empresa Prestadora de Servicios. 2015.

### 3.3.8. Perdida de agua. (Agua libre)

Es la cantidad de agua perdida de la mezcla que puede ser tolerada, depende de la cementación y de la formulación de la lechada. La cantidad de fluido perdido de una lechada en particular debe ser determinada a través de una prueba de laboratorio, bajo condiciones estándar de 1000 psi de presión en la prueba de filtrado, con una malla de 325 mesh. (Vistrain Martínez, 2005)

### 3.3.9. Resistencia a la corrosión

Las aguas de formación contienen determinados elementos corrosivos, los cuales pueden causar deterioro del cemento. Dos compuestos que son comúnmente hallados en las aguas de formación son el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio. Estos compuestos reaccionan con la cal y $C_3S$ para formar cristales de sulfoaluminato de calcio, estos cristales se expanden y causan grietas en la estructura del cemento. Un bajo contenido de $C_3A$ en el cemento incrementa la resistencia al

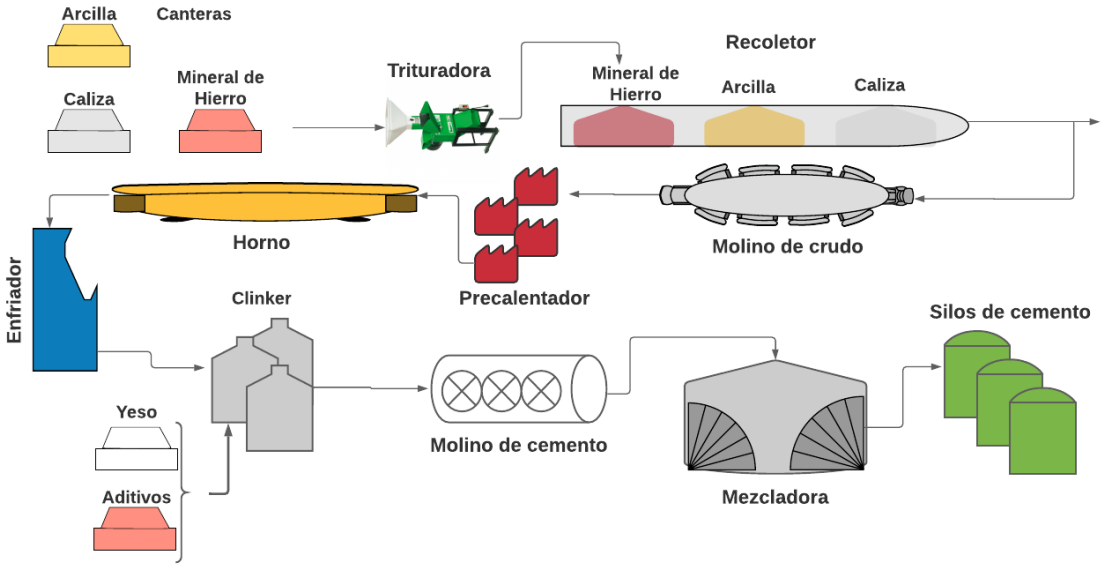
sulfato. Para tener alta resistencia a los sulfatos en el cemento el contenido de $C_3A$ debe estar entre 0 – 3%. (Rojas & Quercia, 2004)

### 3.4. Diagrama de flujo de procesos

El proceso de creación del cemento es clave para analizar los costos de la lechada, ya que del proceso depende la calidad del producto, las condiciones de presión, temperatura y concentración permiten controlar las características de cada lechada. en la Figura 7 se observa un proceso convencional para la creación del cemento.

**Figura 7**

*Proceso de la creación del cemento*




Nota. Representa el proceso de creación del cemento a nivel industrial. Tomado y editado de Feliciano Bernui. Proceso Industrial Del Cemento Ppt. Docente Universitario En Universidad Nacional De Trujillo.

### 3.5. Principales compuestos del cemento

En forma general, los constituyentes fundamentales del cemento son silicatos y aluminatos, estos compuestos se hidratan rápidamente en presencia de agua, dando como resultados una mezcla con propiedades particulares, como es la alta resistencia a la compresión. (Vistrain

Martínez, 2005); Los óxidos que se encuentran con mayor frecuencia en el cemento son descritos en la a continuación.

**Tabla 7.**

*Óxidos presentes en el cemento*

| Óxido | Porcentaje |
|---|---|
| Dióxido De Silicio ($SiO_2$) | 22.43 |
| Óxido De Calcio (Cao) | 64.77 |
| Óxido De Hierro ($Fe_2O_3$) | 4.10 |
| Óxido De Aluminio ($Al_2O_3$) | 4.76 |
| Óxido De Magnesio (Mgo) | 1.14 |
| Trióxido De Azufre ($SO_3$) | 1.67 |
| Óxido De Potasio ($K_2O$) | 0.08 |

Nota: Tomado de Pruebas de Laboratorio de cementaciones. Universidad Nacional Autónoma de México 2005.

### 3.5.1. Aditivos

Es esencial el uso de aditivos para mejorar la eficiencia de una lechada de cemento para soportar las condiciones de temperatura y presión del pozo. (Vistrain Martínez, 2005)

***3.5.1.1. Aceleradores.*** Son aditivos que ayudan a aumentar la velocidad de reacción de la etapa de hidratación del cemento. Estos son usados para acortar o acelerar su fraguado. Entre los aditivos aceleradores más usados se encuentran ciertas sales inorgánicas basadas en calcio y en cloro, como por ejemplo el CaCl2, NaCl, carbonatos, silicatos, aluminatos, nitratos, nitritos, sulfatos, diosulfatos y bases alcalinas de sodio, potasio y el hidróxido de amonio. (Rojas & Quercia, 2004)

***3.5.1.2. Retardadores.*** Son aditivos usados para aumentar el tiempo de fraguado de las lechadas de cementación. Estos no disminuyen la resistencia a la compresión final del cemento, pero si disminuyen la velocidad en que se logra alcanzar esta. Los retardadores son usados a altas temperaturas para alargar el tiempo de trabajo y bombeo de las lechadas. Los retardadores más

comunes y usados son los lignosulfunatos y los azucares naturales (refinosa y sacarosa). (Rojas & Quercia, 2004)

***3.5.1.3. Densificantes.*** Son usados para formular lechadas con pesos mayores a 17,5 lb/gal (2097 Kg/m3) las cuales serían difícil de bombear sin este tipo de aditivos.

***3.5.1.4. Dispersantes.*** Una buena lechada de cemento tiene una alta concentración de sólidos que puede llegar al 70% La reología de la suspensión está íntimamente relacionada con la reología del líquido base, por cuanto es necesario controlar estos los factores que interviene en ésta. Para lograr una buena interacción entre las partículas de la suspensión y el fluido, así como llegar a distribuir los sólidos en la lechada es necesario el uso de dispersantes. (Rojas & Quercia, 2004)

***3.5.1.5. Agentes de control de circulación.*** Un gran número de materiales se mezclan con la lechada con el fin de controlar e incluso prevenir la pérdida de circulación. Estos materiales se pueden clasificar en: fibrosos, granulares, lamelares y semisólidos. (Rojas & Quercia, 2004)

***3.5.1.6. Extendedores.*** Son comúnmente usados para reducir la densidad de la lechada, minimizando la presión hidrostática durante la cementación, lo que ayuda a prevenir las pérdidas de circulación. (Rojas & Quercia, 2004)

***3.5.1.7. Inhibidores de retrogresión***. Agentes espesantes son usados en el Cemento Pórtland para incrementar la densidad de la lechada e inhibir la retrogresión. Estos materiales, en general, son partículas químicamente inertes las cuales tienen una alta gravedad específica. (Rojas & Quercia, 2004)

### 3.5.2. Contaminantes

Así como se añaden compuestos a las lechadas de cemento para mejorar las propiedades fisicomecánicas, la lechada de cemento al entrar en contacto con el lodo de perforación puede ser contaminada, cuando se bombea hacia el fondo del pozo. Los productos químicos del lodo pueden

reaccionar con el cemento para dar efectos secundarios no deseados. Algunos de estos se muestran a continuación. (Vistrain Martínez, 2005)

**Tabla 8.**

*Contaminantes de la lechada de cemento*

| ***Contaminantes*** | |
|---|---|
| *Baritina* | Incrementa la densidad y reduce la resistencia a la compresión. |
| *Componentes de calcio* | Reduce la resistencia a la compresión. |
| *Soda caustica* | Actúa como acelerador de fragüé. |
| *Diesel* | Reduce la densidad. |

Nota: Tomado del Módulo 1: Cementos Petroleros Características Y Análisis.

### 3.6. Relación entre las propiedades y los compuestos de la lechada

Las propiedades de las lechadas dependen de su composición, en la Tabla 9 se describe la relación de cada propiedad con la densidad de la mezcla, y el tipo de aditivo que se puede usar en una lechada de bajo peso.

**Tabla 9.**

*Propiedades de una lechada liviana*

| Propiedad | Aditivos | Efecto sobre las propiedades de la lechada de cemento |
|---|---|---|
| **Densidad** | Perlita Expandida, Microesferas, Oxido De Magnesio, Vermiculita Exfoliada | Reducen el peso de la lechada. |
| **Distribución de tamaño de grano** | Silicatos, Agua de mar. | Mejora el contacto superficial de los granos con el medio continuo. Lo que permite mantener una densidad homogénea en todo el tramo a cementar. |
| **Resistencia a la corrosión** | Siliconas. | Evita el desgaste del cemento solidificado, mejorando la eficiencia del cemento. |
| **Resistencia a la compresión** | Silicatos, Bases alcalinas de sodio, Nitratos. | Desarrolla buena resistencia a la compresión de manera temprana. |

| | | |
|---|---|---|
| | Lignosulfatos. | Reduce la viscosidad. |
| **Tiempo de bombeabilidad** | Azucares naturales. | Reducen la velocidad en que se logra alcanzar la resistencia del cemento. |
| **Fricción durante el bombeo** | Polinaftaleno sulfonato, Polimelaminas sulfonatos. | Reduce la viscosidad y logra una buena interacción entre las partículas del fluido y el medio. |
| **Reología** | Sulfato de calcio hidratado. | Fluyen bajo el efecto de cizalla y desarrollan una estructura de gel que se convierte autosuficiente cuando se encuentra en reposo. |
| **Perdida de agua. (Agua libre)** | Bentonita, carbonatos, sulfatos, Resinas termoplasticas. | Minimizan la perdida de agua desde la lechada hacia la formación. |

Nota: Elaborado por el autor con base en información de la literatura.

## 3.7. Aditivos para disminuir el peso de la lechada

Los aditivos son componentes indispensables de la lechada para alcanzar características específicas, a continuación, se encuentran los aditivos que se aplican a la lechada para cementar formaciones de presiones subnormales sin fracturar la formación por el peso de la columna hidrostática y soportar las grandes compresiones del subsuelo.

### 3.7.1. Tierras diatomáceas

La diatomita o tierra diatomáceas es una roca sedimentaria silícea, formada por microfósiles de diatomeas, que son algas acuáticas unicelulares que secretan un esqueleto silíceo llamado frústula, son de color blanco por lo que también se conocen como tierra blanca, este tipo de polvo es inocuo y al estar formado por algas fosilizadas lo convierte en un producto ecológico, natural y no es perjudicial para el medio ambiente. (Fabila Martínez, 2013)

Además, son unas minúsculas partículas huecas y con carga eléctrica negativa presenta una densidad en seco menor que 1,67 ppg y absorción de aceite del 68%. Se caracteriza por tener un

alto requerimiento de agua y al mezclarse se puede obtener densidades menores a 11.0 ppg. Puede contener pequeñas cantidades de componentes inorgánicos como alúmina, hierro, tierras y metales alcalinos, así como otros constituyentes menores.

La tierra diatomea calcinada, tal y como indica su nombre, ha estado expuesta a elevadas temperaturas. El proceso de calentamiento (calcinación) convierte la sílice amorfa que rodeaba las algas en sílice cristalina, la cual se utiliza industrialmente para filtros de agua y absorción de líquidos industriales pesados como aceites o hidrocarburos. (Fabila Martínez, 2013)

La composición química de la Tierra de Diatomeas se observa en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

*Composición típica de la tierra diatomea*

| COMPOSICIÓN | | | |
|---|---|---|---|
| **Elemento** | **Porcentaje** | **Elemento** | **Porcentaje** |
| Potasio | 0.067 | Zinc | 0.004 |
| Calcio | 0.12 | Níquel | 0.0005 |
| Magnesio | 0.019 | $Al_2O_3$ | 8.75 |
| Fosforo | 0.02 | $SiO_2$ | 90.07 |
| Azufre | 0.042 | $K_2O$ | 0.08 |
| Cobre | 0.0019 | $CaO$ | 0.168 |
| Hierro | 0.5 | $MgO$ | 0.032 |
| Sodio | 0.067 | $P_2O_5$ | 0.05 |

Nota: Tomado de Fabila Martínez, L. Efecto De La Diatomita En Las Propiedades Del Suelo Para Reducir El Impacto Ambiental Causado Por El Uso De Fertilizantes Químicos. Toluca, México.

### 3.7.2. Gilsonita

Son partículas provenientes del mineral asfaltita, de gravedad especifica de 1.07 y requerimiento de agua de 2 gal/ft3 lo que hace posible la preparación de mezclas livianas de alta resistencia a la compresión. En algunos casos se ha utilizado hasta 50 lbs de gilsonita por saco de

cemento Pórtland (94 lbs), para obtener mezclas de hasta 1,6 lb/gal; sin embargo, el uso de bentonita siempre será necesario para reducir problemas durante el mezclado. Las partículas de Gilsonita son sólidos angulares, de amplio rango de tamaño (hasta 0.6 cm) y son usadas también para prevenir la perdida de circulación, debido a que su punto de fusión se encuentra por encima de 260 ºF, el uso de dicho producto está limitado a pozos donde la temperatura es menor que 260ºF. (Modulo 1: Cementos Petroleros Características Y Análisis)

Se ha demostrado científicamente que la Gilsonita, gracias a sus propiedades químicas y características físicas únicas, mejora la estabilidad del pozo, tapona microfracturas y también une y sella todo tipo de formaciones, es multifuncional y reduce los costos al permitirle usar menos aditivos. La Gilsonita forma un enlace físico y químico con formaciones permeables, y crea así un sello eficaz que previene el paso de fluido de perforación. Con su manera única de actuar como un agente de taponamiento maleable y sólido a la vez, controla la pérdida de fluido y la filtración, previene la pérdida de circulación y protege superficies de lutitas reactivas, incluso a temperaturas elevadas en el fondo del pozo. (American Gilsonite Company, 2019)

### 3.7.3. Perlita expandida

Es un material volcánico que es minada, triturada, tamizada y expandida con calor se forma un producto celular de extremado bajo peso. Es un material volcánico que es minada, triturada, tamizada y expandida con calor se forma un producto celular de extremado bajo peso. La composición se puede observar en la Tabla 11. Este mineral aparece en la naturaleza, y tiene la propiedad de expandirse muchísimo cuando se la calienta lo suficiente. (Sánchez, Palacios, & Puertas, 2011).

Cuando alcanza temperaturas de 850–900 °C, la perlita se ablanda (dado que es un vidrio). El agua atrapada en la estructura del material escapa y se vaporiza, y esto causa la expansión del

material hasta 7–16 veces su volumen original. El material expandido es de un color blanco brillante, debido a la reflectividad de las burbujas atrapadas. (Vega Andrade, 2017)

- La perlita no expandida ("cruda") tiene una densidad cercana a 9,18 ppg.
- La perlita expandida tiene típicamente una densidad de 0,25–1,25 ppg.
- Las propiedades más comunes son la alta resistencia al fuego, baja transmisión de sonido (aislante acústico), dado a que es producto de un material crudo su estructura está conformada por celdas de aire que lo convierten en un excelente aislante térmico y acústico. (Vega Andrade, 2017)

Los usos más comunes de la perlita son:

- Perlita cruda uso de perlita cruda en fundiciones de hierro, como escoria aglutinante basado en un proceso químico físico.
- Filterperlite tiene una amplia aplicación en la industria de efluentes: azúcar, jugos de fruta, aceite y otros fluidos como auxiliar filtrante.
- Perlita en horticultura usada para modificar los suelos reduciendo su firmeza y facilitando el drenaje de agua y la retención de humedad, también para propagación de plantas de semilla y almacenamiento de bulbos y plantas.
- Perlita para construcción losa de cielo raso acústicas aislamiento de tuberías tablas de techo aislante, carga aislante en pisos y cavidades de pared.
- Otros usos, producción de cementos y concretos, manufactura de electrodos, minería, operaciones metalúrgicas. (Vega Andrade, 2017)

**Tabla 11.**

*Composición típica de la perlita*

| **COMPOSICIÓN** |
| --- |
| 70-75% dióxido de silicio: SiO2 |

| |
|---|
| 12-15% óxido de aluminio: Al2O3 |
| 3-4% óxido de sodio: Na2O |
| 3-5% óxido de potasio: K2O |
| 0.5-2% óxido de hierro: Fe2O3 |
| 0.2-0.7% óxido de magnesio: MgO |
| 0.5-1.5% óxido de calcio: CaO |
| 3-5% pérdida en el horno (agua químicamente combinada) |

Nota: Tomado de Efecto de la perlita expandida en la resistencia mecánica del hormigón; Vega Andrade, E. A. (2017).

### 3.7.4. Nitrógeno

Proporciona suficiente expansión del cemento, generando una baja densidad y una buena resistencia a la compresión. Los cementos espumados, son formados a través de la inyección de nitrógeno a la lechada, formando microburbujas en su matriz, lo cual disminuye la densidad de la mezcla. Sin embargo, en los cementos convencionales la generación de espuma es un factor desfavorable, debido a que genera problemas durante las operaciones de cementación. En los cementos espumados la densidad es inversamente proporcional a la resistencia de este. (Gómez Flórez & Tarquino Nieto, 2018, pág. 67)

### 3.7.5. Microesferas de alta resistencia o burbujas de vidrio

El uso de mezclas extendidas con microesferas es una técnica que se está desarrollando en los últimos años. Las microesferas son pequeñas esferas llenas de gas con una gravedad especifica que varía entre 0.4 y 0.7; lo cual permite la preparación de mezclas de muy bajas densidades (8.5 ppg) y alta resistencia a la compresión en relación con otras mezclas livianas. La resistencia a la compresión de las mezclas livianas con microesferas es por lo general 50 – 60 % mayor que las que obtiene con Bentonita o Metalsilicato de Sodio como aditivos alivianadores. (Modulo 1: Cementos Petroleros Características Y Análisis, pág. 10)

Con el desarrollo de las microesferas de vidrio que son capaces de aguantar presiones de hasta 10,000 psi el uso de las microesferas se extiende incluso a pozos muy profundos. El tamaño promedio de las microesferas es similar a las partículas del cemento y pueden variar desde 20 – 200 μm con espesor de paredes desde 0.5 – 2 μm. La mayoría de las microesferas de cerámica aguantan presiones de 5000 psi; sin embargo, existen microesferas de vidrio que pueden soportar hasta 10,000 psi, mucho más costosa que las de cerámica por lo que su uso es muchas veces limitado. La composición de las microesferas de cerámica está basada en la puzolana derivada de cenizas volcánicas y aluminosilicatos. Es importante asegurar que las microesferas deben ser premezcladas en seco con el cemento y nunca en agua debido a que su gravedad especifica es menor que el agua. Variaciones en la relación de microesferas y cemento darán como resultado densidades erráticas durante el mezclado. Las microesferas son compatibles con todos los tipos de cemento. (Modulo 1: Cementos Petroleros Características Y Análisis, pág. 10)

Pueden ser añadidas al sistema de cementación para producir lechadas con densidades tan bajas como 8.0 lb/gal. (Sánchez, Palacios, & Puertas, 2011)

### 3.7.6. Oxido de magnesio

Cemento magnésico, diseñado especialmente cuando se busca un cemento liviano, de fragüe rápido y que desarrolle propiedades mecánicas favorables. Durante el proceso de fraguado químico, las etapas que controlan la creación del cemento son la disolución e hidrólisis de los óxidos metálicos, motivo por el cual no todos los óxidos de metales catiónicos son válidos para obtener este tipo de cementos. En algunos casos, se hace necesario un pretratamiento inicial para reducir su reactividad, como sucede con el MgO de elevada pureza, al que se debe realizar una calcinación previa a 1300 ºC para obtener una adecuada velocidad de disolución y reducción de la

densidad en el mezclado a aproximadamente 11ppg que permitan la correcta formación del cemento liviano. (Formosa Mitjans, et al., 2008)

### 3.7.7. Vermiculita exfoliada

La vermiculita es un mineral formado por silicatos de hierro o magnesio, del grupo de las micas. Al elevar rápidamente la temperatura de la vermiculita se genera una expansión conocida como exfoliación, resultando un producto utilizado como agregado de baja densidad entre 0.54 a 1.08 ppg, para generar lechadas con densidades hasta de 9,5 ppg, con propiedades aislantes térmicas y acústicas, además de ser químicamente inerte. (Bubnov, Boyko, & Khorev, 2015)

### 3.7.8. Metalsilicato de sodio anhidro

Este extendedor es muy eficiente y económico. Es compatible con la mayoría de los aditivos químicos maneja un porcentaje variable de agua en función del porcentaje que se utilice. Se dosifica del 1 al 3% por peso de cemento. (Vistrain Martínez, 2005, pág. 42) Su composición porcentual se puede observar en la Tabla 12.

El Metalsilicato de sodio se puede obtener por vía húmeda y seca; el proceso para la fabricación por vía húmeda del silicato de sodio calcinando tierra de infusorios, que aun calientes se inmergen en agua fría, para obtener una masa porosa soluble en soda caustica. Este método consiste en lo siguiente en un recipiente, provisto de agitador, se pone una lejía de soda cuya densidad oscila entre 10 y 11 ppg y se le agrega harina fósil. calcinada en una proporción de 2,8 - 3 partes de ella por una de soda. Se inyecta luego vapor de agua hasta obtener en el recipiente tres atmosferas de presión; A las dos o tres horas, se tiene una solución casi completa, la solución de silicato de sodio tiene una densidad de aproximadamente 9,7 ppg es decir menor que la de la solución de soda cáustica debido a la condensación del vapor de agua que se inyecta al autoclave. Por otra parte, no

es conveniente obtener soluciones de mayor concentración, por cuanto son más difíciles de decantar y porqué en esas condiciones se precipita un silicato insoluble probablemente muy ácido. (Perazzo, 1919)

**Tabla 12.**

*Composición media del Metalsilicato de Sodio Anhidro*

| COMPOSICIÓN MEDIA | |
|---|---|
| **Compuesto** | **Porcentaje** |
| Sílice | 86.44 |
| Carbonato de Calcio | 1.31 |
| Oxido Férrico | 1.48 |
| Arcilla | 1.64 |
| Materia Orgánica | 0.77 |
| Carbón en Polvo | 0.71 |
| Sulfato de Sodio | 0.90 |
| Agua | 6.75 |

Nota: Tomado de La fabricación del silicato de sodio: su obtención con productos nacionales. Universidad Nacional De Buenos Aires; Perazzo, A. A. (1919).

La obtención de Metalsilicato de Sodio por vía seca presenta desventaja sobre el método por vía húmeda, debido a que necesita mayor número de operaciones por cuanto se obtiene un sólido, que toca reducirlo en trozos o pulverizarlo, disolverlo y llevar la solución a sequedad. En estas condiciones el silicato es completamente soluble en agua, mientras que el silicato de los hornos de fusión solo es soluble en parte.

Los métodos por vía seca presentan una ventaja de que las materias primas son más abundantes y de mucho menos costo, compensando con creces la diferencia de mano de obra, no disponen de soda cáustica y en cambio tienen abundancia de sulfato de sodio, ya sea obtenido naturalmente o como subproducto en las fábricas de ácido nítrico y clorhídrico. El óxido de sodio necesario para la fabricación de silicatos puede obtenerse a partir del carbonato de sodio, sulfato de sodio, nitrato de sodio, reduciendo los metafosfatos con sílice en presencia de aluminio y por último del hidrato

de sodio. Los hornos para fundir para fundir la mezcla de sílice, soda y carbón para obtener el vidrio soluble son los mismos que se utilizan para la fabricación de vidrios y cristales: es decir, que pueden ser hornos discontinuos y hornos continuos. (Perazzo, 1919)

## 3.8. Nanomateriales

En análisis de los compuestos de una lechada de cemento a escala nano, permite comprender y ajustar la composición, de tal manera que impacte positivamente el desarrollo de las propiedades mecánicas de la lechada.

Hablar de una escala nano (1nm = 1x10-9 m) implica hablar de la escala de los átomos (el radio de van de Waals del hidrógeno es de 0.12 nm). Lo que permite estudiar y manipular la materia desde su concepción atómica a estas escalas. El amplio intervalo de aplicaciones potenciales ha llevado a muchos países al análisis de nanoestructuras, las cuales son consideradas la parte medular de la nueva era tecnológica. (Martínez Alanis, 2015)

### 3.8.1. Nanotubos de carbono

Teniendo en mente la forma en la que se combinan barras de acero para reforzar el concreto se busca una nanoestructura que pueda hacer un trabajo similar en principio (refuerzo mecánico), basados en la funcionalidad de las micro fibras de acero que refuerzan al concreto en forma similar a como lo hacen las barras de acero, con la salvedad de que su acción se distribuye en una multiplicidad de puntos dentro del concreto, suponiendo que los nanotubos interactúan en alguna medida con la matriz, y como el módulo de elasticidad de los nanotubos de carbono es mayor que el del acero, se seleccionan nanotubos de carbono, ya que los nanotubos de carbono dopados con nitrógeno presentan sitios de dopaje donde las estructuras dopantes son, entre ellos, grupos cetónicos y grupos -OH y éstos son grupos presentes durante la hidratación del cemento gris, se

decidió seleccionar nanotubos de carbono dopados con nitrógeno, nanotubos de carbono dopados con oxígeno y una mezcla de ambos en proporción 1:1. La relación de uso en una mezcla se observa en la Tabla 13 y 14. Se utilizaron condiciones de frontera para estructuras periódicas y en el espacio interno los nanotubos se ubicaron a una distancia mínima de ~40 Å para evitar interacciones laterales. (Martínez Alanis, 2015, pág. 35)

**Tabla 13.**

*Dosificación de lechadas de cemento con Nanotubos de Carbono*

| **DOSIFICACIÓN** | |
|---|---|
| Cemento gris tipo Portland | 14.5 kg. |
| Agua de mezclado | 8.42 lts con pH= 7.5 |
| Agua de mezclado | 37 lts con pH=1 |
| Nanotubos de Carbono dopados con Nitrógeno | 6.72 gr |
| Nanotubos de Carbono dopados con Oxígeno | 6.72 gr |

Nota: Tomado de Martínez Alanís, M. (2015). Concreto Reforzado Con Nanotubos De Carbono Dopados Con Oxígeno Y Dopados Con Nitrógeno. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.

Para la síntesis de nanotubos de carbono dopado se utilizaron los siguientes materiales: Tolueno (C7H8), Bencilamina (C7H9N), Etanol (C2H6O), Ferroceno (C10H10Fe). Se considera que se provee una fuente de carbono con el tolueno y el Ferroceno, además de que el Ferroceno contiene Fe que hace las veces de punto de nucleación para la formación de los nanotubos, la Bencilamina y el etanol proveen de átomos dopantes (N en el caso de la Bencilamina y O en el caso del etanol). La cantidad de material utilizado por cada 500 ml de solución preparada para la síntesis de nanotubos de carbono dopados con nitrógeno y oxígeno es la siguiente: (Martínez Alanis, 2015, pág. 44)

**Tabla 14.**

*Solución empleada para sintetizar nanotubos de carbono dopados con nitrógeno y oxígeno*

| **NANOTUBOS DE CARBONO** |
|---|

| Dopados con Nitrógeno | | |
|---|---|---|
| **Reactivo** | Cantidad (gr) | Porcentaje (%) |
| Bencilamina | 460 | 94 |
| Ferroceno | 29.4 | 6 |
| **Dopados con Oxígeno** | | |
| **Reactivo** | Cantidad | Porcentaje (%) |
| Tolueno | 391.5 | 92.5 |
| Ferroceno | 27.75 | 5 |
| Etanol | 9.86 | 2.5 |
| **Vol. Solución 500 ml** | | |

Nota: Adaptado de Martínez Alanis, M. (2015). Concreto Reforzado Con Nanotubos De Carbono Dopados Con Oxígeno Y Dopados Con Nitrógeno. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.

### 3.8.2. Nanopartículas de alúmina

Estos materiales, por su tamaño y constitución, exhiben propiedades fisicoquímicas excepcionales en comparación a sus análogos de mayor dimensión, el cemento Portland mezclado con nanopartículas de alúmina en sus fases alfa (α-Al2O3) y gamma (γ-Al2O3), sintetizadas a partir de una muestra mineral subproducto industrial. Las lechadas de cemento fueron agregadas con diferentes concentraciones de nanoalúmina (0,5% - 1% en peso). Se realizaron ensayos, obteniéndose una variación importante en su área superficial y volumen de poro. Asimismo, los sistemas con α-Al2O3 mostraron menor proporción de geles amorfos con predominante presencia de portlandita a diferencia de los materiales γ-Al2O3 donde se destaca la presencia de cristales bien definidos de etringuita (estructuras tipo aguja), además del cambio notorio de la morfología del gel, lo cual tiene un efecto importante en las propiedades mecánicas de los sistemas. (Balza, y otros, 2016)

***3.8.2.1. Origen de la nanoalúmina alfa y gamma.*** La obtención de las nanopartículas de alúmina alfa y gamma se realizó a partir del mineral gibbsita. Se realizó la síntesis en tres etapas, las cuales son; (1) digestión ácida de la gibbsita, lo que dio a lugar a un licor madre rico en nitrato

de aluminio, (2) Sol-gel del licor madre con adiciones de ácido cítrico hasta la obtención de un subproducto sólido el cual pasa a la siguiente etapa (3) calcinación controlada del material a 850 °C y 1100 °C para la obtención de γ-Al2O3 y α-Al2O3 respectivamente. (Balza, y otros, 2016).

La Tabla 15 resume las propiedades físicas del cemento Portland clase H y las propiedades de las nanopartículas de alúmina, respectivamente.

**Tabla 15.**

*Propiedades físicas de la Alúmina Alfa (α-Al2O3) y Gamma (γ-Al2O3)*

| Propiedades | α-Al2O3 | γ-Al2O3 |
|---|---|---|
| Tamaño Promedio (Nm) | 11 | 7 |
| Gravedad Específica | 3.85 | 3.27 |
| Pureza (%) | 80 | 80 |

Nota: Tomado de Balza, A., et all (2016). Estudio Microestructural Del Cemento Portland Aditivado Con Nanomateriales. Los Teques: PDVSA Intevep, S.A.

***3.8.2.2. Ventajas de la nanoalúmina.*** El hidróxido de calcio o portlandita es consumido en lugar de ser generado, lo cual es importante para la durabilidad del cemento.

Los productos de reacción disminuyen sus espacios capilares y por lo tanto es posible disminuir la permeabilidad, la porosidad y aumentar la resistencia mecánica del cemento.

Las nanopartículas actúan como centros de nucleación de cristalización del cemento hidratado debido a su alta superficie específica. Esto contribuye a controlar la cinética de hidratación, ya que tienden a acelerar este proceso y favorecer la formación de geles en la matriz de los sistemas cementantes, disminuyendo además los tiempos de fraguado. (Balza, y otros, 2016)

Las nanopartículas favorecen la disminución del tamaño y cantidad de cristales de portlandita y etringita, mientras se forma una mayor cantidad de gel nanométrico. Asimismo, las nanopartículas de alúmina actúan como un aditivo superfino, que se fija al resto de los agregados, a la denominada "Zona Interfacial de Transición y a algunas zonas capilares de la matriz, esto trae como consecuencia, un incremento directo en las propiedades mecánicas de los sistemas, tales

como: módulo elástico y esfuerzo a la compresión, al igual que una directa reducción en la permeabilidad de estos. (Balza, y otros, 2016)

### *3.8.3. Nanosílice*

Las partículas de nanosílice, han sido ampliamente utilizadas para promover la reacción puzolánica e incrementar la cantidad de silicato de calcio hidratado (gel) ya que además de incrementar el contenido de gel C-S-H, también contribuyen a evitar la formación de poros en la morfología del cemento, se sintetizadas por el método sol-gel son mantenidas en la fase sol para preservar la dispersión de partículas, y se mezclaron en diferentes cantidades con cemento Portland 30R (CPC30). Se estudió el efecto del contenido de NS en la morfología y propiedades mecánicas de las lechadas cementantes. Se estableció un contenido óptimo de NS para lechadas formuladas de acuerdo con estándares ASTM.

Las propiedades del cemento son afectadas por el grado de mezcla y la distribución del tamaño de las partículas de los componentes. Durante la reacción de hidratación, se genera Portlandita (hidróxido de calcio) como subproducto, que no tiene propiedades cementantes y que es propenso a la lixiviación y al ataque de sulfatos. Adición de materiales puzolánicos de diferentes formas, como cenizas volantes, escorias de altos hornos, humo de sílice, aumentan las propiedades del cemento, ya que la sílice reacciona con portlandita formando silicato de calcio adicional hidratado y reduciendo el tamaño de los poros. Estudios recientes han demostrado que la sílice en tamaños nanométricos, conocida como nanosílice, mejora la reacción puzolánica y el efecto de relleno de poros en los hormigones. Se han estudiado varias formas de generar nanosílice, como sol-gel, vaporización, precipitación, métodos biológicos, etc. (Saucedo Salazar, y otros, 2015)

Estas partículas son cristalinas, con esféricas morfología y diámetros que varían entre 2 y 10 nm. El tamaño medio calculado es de 6 nm. Como se puede observar, estas partículas están bien

dispersas en medios acuosos formando un hidrosol. Se identificaron enlaces silanol (Si-OH) y siloxano (Si-OSi) en su composición química, además de agentes tensioactivos. (Saucedo Salazar, y otros, 2015)

## 3.9. Formulaciones de lechadas livianas

Estas lechadas son importantes en la cementación de zonas depletadas con problemas por perdida por circulación de fluido, actualmente se están diseñando las siguientes lechadas para mitigar estos problemas.

### 3.9.1. Cementos modificados

Es una mezcla compuesta de cemento portland, con una relación agua/cemento entre 10 y 2,5 y lodo de arcilla. La arcilla aumenta el contenido de finos y mejora la penetrabilidad de la suspensión en el terreno, economizando cemento y mejorando la estabilidad y viscosidad de la suspensión como consecuencia de la capacidad de la arcilla para formar geles. La bentonita es capaz de reducir la sedimentación de las partículas de mayor tamaño que componen la mezcla, y además reduce su coste aumentando el volumen de la lechada. Las lechadas de cemento y bentonita son útiles en la inyección de depósitos de gravas y arenas gruesas. Para estabilizar totalmente un cemento de inyección se precisa entre un 2 y un 5% de bentonita sódica; no debe superarse estas proporciones para no obtener productos esponjosos con baja resistencia a compresión y fraguado lento. La relación cemento/agua, en peso, varía de 1 a 2 para un 2% de bentonita, en cuyo caso la sedimentación es nula si $c/a \leq 1{,}4$. Este rango varía de 1 a 1,7 para un 4% de bentonita, en cuyo caso la decantación es nula. (Yepes Piqueras, 2020)

Hay que tener presente que la adición de bentonita baja la resistencia e incrementa la plasticidad de la mezcla. Por otra parte, si el terreno es muy permeable, se puede añadir a la lechada silicato

de sodio en 1 a 2% con relación al peso del cemento para acelerar el fraguado. Sin embargo, la dosificación debe determinarse en laboratorio. (Yepes Piqueras, 2020)

El límite líquido y el índice de plasticidad de la arcilla deben ser inferiores a la de la bentonita (es decir, la arcilla no debe ser montmorillonita). Esta arcilla no afecta tanto a la viscosidad como la bentonita, por lo que se puede añadir a la mezcla en una mayor proporción. Además de la arcilla, se puede agregar arena, serrín, polivinilo, celofán o poliéster para mejorar sus propiedades. Las lechadas de arcilla-cemento son las más adecuadas para la impermeabilización, además de utilizarse en rocas fisuradas, incluso siendo muy porosas o presentando grandes cavidades. (Yepes Piqueras, 2020)

### 3.9.2. Cementos salados con alto gel

Consiste en cemento pórtland, de 12 a 16% de bentonita, 3,0 a 7,0% de sales inorgánicas (cloruro de sodio, preferiblemente), y 0,1 a 1,5 % de agente dispersante (lignosulfonato de calcio). La sal actúa tanto como acelerador y dispersante, y el lignosulfonato provee retardación y dispersión. Al hacer disolver la sal mezclándola con agua es más efectivo. Porque las propiedades del dispersante tanto de sal y retardador, las lechadas de cementos salados con alto gel son muy bombeables fácilmente sin embargo la relación de agua recomendada es generalmente baja que está usualmente asociada con lo anteriormente mencionado de cantidades de bentonita 12 a 16%. (López G, 2019)

### 3.9.3. Cemento magnésico

Diseñado especialmente cuando se busca un cemento liviano y de fragüe rápido. Es posible obtener cementos de fosfato de magnesio y potasio ($KMgPO_4 \cdot 6H_2O$; K-estruvita), mediante la reacción en medio acuoso del óxido de magnesio y el dihidrogenofosfato de potasio, siendo ésta

una reacción exotérmica muy rápida que permite el fraguado del material en pocos minutos. Estos cementos, formulados a partir de óxidos de magnesio de elevada pureza y coste elevado, se encuentran descritos en la bibliografía para su utilización en el encapsulamiento de residuos especiales y como morteros de cemento para la reparación de hormigón. Sin embargo, cabe la posibilidad de poder formular este mismo tipo de cementos con óxidos de magnesio de bajo contenido, cuyo precio es del orden de 10 a 15 veces más barato que el óxido de magnesio de elevada pureza. Se analiza la utilización de óxidos de magnesio de bajo contenido (≈70% MgO), obtenidos en el proceso de calcinación de la magnesita natural, para la formulación de cementos de K-estruvita. (Formosa Mitjans, Aranda, Chimenos Ribera, Rosell Amigó, & Fernández Renna, 2008)

### 3.9.4. Cemento látex

Son una mezcla de cemento API clase A, G o H con un látex. Estos látex son identificados químicamente como acetato de polivinilo o emulsiones de butadieno-estireno. El látex liquido se adiciona a razón de 1,0 galón por cada saco de cemento aproximadamente. La cantidad en una mezcla de cemento se observa en la Tabla 16. Tienen la característica de expandirse evitando el flujo a través de la lechada y la creación de canales o fisuras que debilitan la resistencia a la compresión del cemento fraguado. (Vistrain Martínez, 2005, pág. 32)

Esta diseñado como un adhesivo integral para puentes de adherencia (lechadas cementicias). Esta emulsión sintética sirve para la fabricación de lechadas de cemento, consiguiéndose, mejor adherencia de la lechada sobre cualquier soporte, además, es un cemento más plástico y trabajable, con mejores resistencias químicas. Algunas propiedades se observan en la Tabla 17. La base química es el estireno-butadieno con apariencia de color blanco lechoso, presenta densidad de aproximadamente 8,5 ppg. (SikaLatex® BUILDING TRUST, 2018)

**Tabla 16.**

*Diseño de cemento látex*

| Componente | Cantidad |
|---|---|
| Cemento portland | 42.6 kg |
| Arena | 136 kg |
| Látex | 7.6 L |
| Agua | 11.4 L |

Nota**:** Tomado de EUCLID GROUP EUCOMEX. (s.f.). Adhesivos & Puentes de Adherencia. Aditivo adherente. México.

**Tabla 17.**

*Información técnica del cemento látex*

| Propiedad | Valor |
|---|---|
| Resistencia a la compresión | 3 días: 3200 psi |
| Densidad | 8.5 ppg |
| Contenido de solidos | 0.48% |
| Ph | 10 a 11 |

Nota: Tomado de EUCLID GROUP EUCOMEX. (s.f.). Adhesivos & Puentes de Adherencia. Aditivo adherente. México.

### 3.9.5. Cementos plásticos

Los cementos plásticos o resinosos se usan para el taponamiento selectivo en agujeros descubiertos, el taponamiento de los disparos y la cementación de pozos de abandono. Son mezclas de agua, resinas liquidas y un catalizador mezclado con un cemento API clase A, B, G o H, tienen la propiedad de que, al aplicarle presión a la lechada, la resina penetra en la zona de interés formando un sello dentro de la formación. Su utilización en los pozos es en volúmenes relativamente pequeños. (Vistrain Martínez, 2005, pág. 32)

También se conocen cementos con propiedades plásticas a base de PET (Tereftalato de Polietileno) que alcanzan resistencia a la compresión de 250 psi a los 7 días. La elección de la dosificación de los agregados y el cemento no sólo corresponden a valores de resistencia y durabilidad, sino que también debe tomarse en cuenta el factor económico. Al mantener constante

la cantidad de cemento y variar la cantidad de arena para agregar el PET, hace que varíe la resistencia a compresión. Al agregar PET a una mezcla de concreto se pierde un poco de resistencia, aunque con la obtenida se podría utilizar como mezcla para elementos que no requieran de estética o para bloques u otros elementos que no soporten importantes cargas. (Herrera Muriel & Piñeros Moreno, 2018)

La densidad de la mezcla de PET – Cemento es menor que los concretos o morteros, ya 53 que el PET es menos pesado que la arena y la piedra, lo que hace que la mezcla sea más liviana, lo cual la hace interesante en estructuras sometidas a bajas cargas.

Con respecto a la absorción se puede concluir que la mezcla de PET – Cemento absorbe mayor cantidad de agua que las mezclas con las que fue comparada, esto se debe a que al poseer menor cantidad de finos existen más espacios vacíos dentro de la mezcla que son colmados de agua al momento de sumergirla en el líquido. (Herrera Muriel & Piñeros Moreno, 2018)

**Tabla 18.**

*Datos técnicos del plástico PET*

| Propiedad | Unidad | Valor |
|---|---|---|
| Densidad | g/cm3 | 1.34 – 1.39 |
| Resistencia a la tensión | Mpa | 59 - 72 |
| Resistencia a la compresión | Mpa | 76 - 128 |
| Resistencia al impacto | J/mm | 0.01-0.04 |
| Dureza | | Rockwell M94 -M101 |
| Dilatación térmica | 10-4/ºC | 15.2 -24 |
| Resistencia al calor | ºC | 80 - 20 |
| Resistencia dieléctrica | V/mm | 13780 - 15750 |
| Absorción de agua (24h) | % | 0.02 |
| Calidad de mecanizado | | Excelente |
| Calidad óptica | | Transparente a Opaco |
| Temperatura de fusión | ºC | 244 - 254 |

Nota: Tomado de Herrera Muriel, R. D., & Piñeros Moreno, M. E. (2018). Proyecto De Factibilidad Económica Para La Fabricación De Bloques Con Agregados De Plástico Reciclado (PET), Aplicados En La Construcción De Vivienda. Bogotá D. C. Universidad Católica De Colombia.

### 3.9.6. Cementos expansivos

Son aquellos que al adicionarles sulfato de calcio y otras sustancias, aumenta ligeramente de volumen al fraguar. En la industria petrolera se han evaluado varios componentes que se expanden ligeramente cuando se aplican a los cementos. Los cementos moderadamente expansivos se prepararon por mezcla de un 90 a un 84 % de cemento portland, un 6 % de yeso y un 4 a un 10 %. de cemento aluminoso. Actualmente se manejan tres tipos comerciales de cementos expansivos; (Garcia Madrid & Horstmann Largacha, 1986)

***3.9.6.1. Tipo K.*** Contiene como componente al sulfato aluminato de calcio que se mezcla con un cemento Pórtland. Cuando se prepara la lechada, la reacción creada por la hidratación provoca una expansión de 0.05 a 0.20% aproximadamente. (Garcia Madrid & Horstmann Largacha, 1986)

***3.9.6.2. Tipo S.*** Clasificado por la Portland Cement Association, consiste en un cemento con alto contenido de aluminato tricálcico, similar al cemento API clase A, con aproximadamente 10 a 15% de yeso.

***3.9.6.3. Tipo M.*** Se obtiene con la adición de pequeñas cantidades de cemento refractario al cemento Pórtland, para producir fuerzas expansivas. Se mezcla cemento Portland, Cemento Aluminoso (CaO.Al2O3 y 12 CaO.7H2O) y Sulfato Cálcico. (Garcia Madrid & Horstmann Largacha, 1986). Este tipo de cemento es un polvo de color gris. Su densidad, peso aparente, en estado suelto es de 1150 a 1400 Kg. por $m^3$ y el peso específico real es de 3100 a 3200 Kg. por $m^3$.

### 3.9.7. Cementos portland puzolánicos

Las puzolanas artificiales son obtenidas principalmente por la calcinación de materiales naturales como las arcillas, lutitas y ciertas rocas silíceas. El producto de la combustión en el horno es una ceniza ligera muy usada en la industria petrolera como una puzolana. Del uso de cementos

puzolánicos resultan lechadas de cemento ligeras. comparadas con Iechadas de consistencia similar hechas con cemento portland. (Vistrain Martínez, 2005, pág. 34)

### 3.10. Resumen de los aditivos

Al momento de diseñar lechadas livianas utilizando el software CEMSEI es necesario conocer parámetros de entrada, los cuales servirán como límites para que las lechadas sistemáticas estén correlacionadas con las lechadas teóricas. En la Tabla 19, se presentan las propiedades de los aditivos que cumplen las condiciones de datos de entrada del software.

Debido a que la entrada de requerimiento de agua del software está en % peso, es necesario utilizar la Ecuación (5) para realizar el procedimiento y convertir el requerimiento de gal/saco a %p, con el fin de tener las unidades similares.

$$Requerimiento\ de\ H_2O\ [Gal\ /\ Saco] \rightarrow [\%\ peso]$$

$$\frac{Gal\ H_2O}{saco} \rightarrow \frac{Gal\ H_2O * \rho_{H_2O}}{94lb} * 100 \tag{5}$$

$$= \frac{8{,}33 * [Gal\ H_2O]}{94} * 100 = \mathbf{8{,}8617} * [\boldsymbol{Gal\ H_2O}][\%\ \boldsymbol{p}]$$

**Tabla 19.**

*Propiedades de entrada de cada aditivo para diseño de lechadas livianas*

| ***Aditivo*** | ***Densidad (ppg)*** | ***Concentración en peso %*** | ***Requerimiento de agua (gal/saco)*** | ***Requerimiento de agua (% peso)*** |
|---|---|---|---|---|
| Tierras Diatomáceas | 11 | 10 a 40 | 25 | 222 |
| Gilsonita | 12 | 1 a 49 | 13 | 115 |
| Perlita Expandida | 9 a 10 | 5 a 22 | 10 | 89 |
| Nitrógeno | 6 a 10 | 1 a 70 | 6 | 53 |
| Microesferas de alta resistencia | 8 | 1 a 110 | 11 | 97 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Oxido de Magnesio | 11 | …… | …… | …… |
| Vermiculita Exfoliada | 9.5 | 40 | 25 | 222 |
| Metalsilicato de Sodio Anhidro | 9.7 | 1 a 5 | …… | …… |
| Nanotubos de Carbono | 10.5 | 0.1 | 35 | 310 |
| Nanopartículas de alúmina | 11 | 0.5 a 1 | 35 | 310 |
| Bentonita Sódica | 9 | 3 | 3.73 | 33 |
| Poliéster | 11.5 | ….. | ….. | …… |
| Aserrín | 2.5 | 0.1 a 1.0 | ….. | …… |
| Bentonita | 8 | 12 a 16 | 4 | 35 |
| Cloruro de Sodio | 18 | 3.0 a 7.0 | 0.8 | 7 |
| Lignosulfato de Calcio | 16 | 0.1 a 1.5 | 0.4 | 4 |
| Óxido de Magnesio | 29 | 45 | 5 a 35 | …… |
| Dihidrogenofosfato de Potasio | 10.1 | 0.2 | 4 | 35 |
| K-estruvita | 14.2 | ….. | ….. | …… |
| Acetato de polivinilo | 9.9 | 0.1 a 0.5 | ….. | …… |
| Emulsión de estireno-butadieno | 8.5 | …… | 1.27 | 11 |
| Tereftalato de Polietileno | 11 | 0.3 | 5 | 44 |
| Resina Liquida | 9.1 | 3.5 | ….. | …… |
| Catalizador | 8.5 | 1.0 a 10.0 | 4.8 | 43 |
| sulfato aluminato de calcio | 19.4 | ….. | 7 | 62 |
| aluminato tricálcico | 25.3 | 12 | 7 | 62 |
| yeso | 19.4 | 5.0 a 26.0 | 15 | 133 |
| Cemento aluminoso | 9.6 | 6.2 | 7 | …… |
| Sulfato cálcico | 19.4 | ….. | 3.5 | 31 |

Nota: Tomado de diferentes catálogos de vendedores de aditivos químicos.

# 4. Herramientas para el estudio de la lechada liviana

## 4.1. Técnica de estudio probabilístico SIX SIGMA.

En los años 20, el ingeniero estadounidense Walter Andrew Shewhart, pionero y experto en el control de calidad estadístico, determinó que un proceso puede ser evaluado y corregido analizando su varianza estadística. Pero en los años 80 un equipo de ingenieros de Motorola, dirigido por Bob Galvin y Bill Smith, mejoraron el proceso y plantearon la metodología de mejora continua Six Sigma. (Wallace Oliveira, 2017)

Sigma es una letra del alfabeto griego usada como una medida de la varianza estadística. Cuando se aplica en el mundo de la gestión empresarial, se refiere a la frecuencia con la que un determinado proceso de la compañía se aleja de la perfección y consume más recursos que el mínimo necesario para satisfacer al cliente. (Wallace Oliveira, 2017)

A nivel de proceso, Six Sigma es creada para reducir la variabilidad, encontrar y eliminar las causas de los errores, defectos y retrasos en los procesos, así como disminuir los costos directos. (Gutiérrez & De la Vara, 2009, pág. 396).

La meta 6σ, es lograr procesos con alta calidad sometiéndolos a un programa riguroso de mejora, con el propósito de eliminar defectos y retrasos de productos, procesos y transacciones, su primera intervención se dio en General Electric donde se hallaron defectos no mayores a 3,4 ppm para el año 2000, quien inicio con proceso 3 sigma generando beneficios de 6.6 billones de dólares. (Escalante, 2007)

En resumen, la metodología 6σ busca hacer las siguientes mejoras:

- Eliminación de desperdicios
- Reducción de costes innecesarios
- Menor consumo de recursos

- Optimización y mejora continua del proceso

### 4.1.1. Metodología

En lo que respecta el lean manufacturing un proceso de mejora continua supone un ciclo que para este caso se denomina DMAIC, por las siglas en ingles de definir, medir, analizar, mejorar y controlar, etapas del proceso que en orden respectivo permiten un esquema lógico de análisis de procesos, a continuación, se presentan sus conceptos tomados de (Garza, Gonzales, Rodríguez, & Caridad, 2016, pág. 22)

***4.1.1.1. Definir.*** Se identifican los aspectos claves de la organización, se definen los stakeholders, se concreta una definición de calidad respecto al producto terminado, se identifica con claridad la cadena de suministros y en ella se enfoca la línea de producción donde se determinan los procesos claves de transformación que permitan visibilizar los posibles proyectos de mejora.

***4.1.1.2. Medir.*** Se identifican las causas claves del problema global, se establecen las variables medibles y controlables del proceso, se genera un muestreo de datos, y se define un esquema de información preliminar que permita conocer el estado actual del proceso, para así comparar los resultados obtenidos al final del estudio.

A partir del uso de diagramas EPS, análisis de capacidad de proceso, diagrama de Pareto, y gráficos de control se logra este objetivo.

***4.1.1.3. Analizar.*** Se comprueba estadísticamente la exactitud y precisión de los datos, se analiza los resultados actuales e históricos. Todos los análisis se realizan con ayuda del programa Minitab. Se desarrolla y comprueba hipótesis sobre posibles relaciones causa-efecto utilizando las herramientas estadísticas pertinentes. De esta forma el equipo confirma los determinantes del

proceso, es decir las variables clave de entrada o “pocos vitales” que afectan a las variables de respuesta del proceso.

Apoyados de diagramas causa – efecto, matriz de relación, correlación y regresión, análisis de varianza, muestreos.

***4.1.1.4. Mejorar.*** Determinar la relación causa-efecto (relación matemática entre las variables de entrada y la variable de respuesta que interese) para predecir, mejorar y optimizar el funcionamiento del proceso. Por último, se determina el rango operacional de los parámetros o variables de entrada del proceso. Se genera posibles soluciones al problema detectado e implementa las más convenientes a través de técnicas analíticas y pruebas piloto.

***4.1.1.5. Controlar***. Diseñar y documentar los controles necesarios para asegurar que lo conseguido mediante el proyecto Seis Sigma se mantenga una vez que se hayan implantado los cambios. Cuando se han logrado los objetivos y la misión se da por finalizada, el equipo informa a la dirección y se disuelve.

Se establece un plan de controles que garanticen que la mejora alcanzará el nivel deseado, a través de planes de control, gráficos de control y capacidad de proceso.

## 4.2. Software estudiantil integrado para cementación primaria (CEMSEI)

Para llevar a cabo el análisis estadístico con variables cuantificables se utilizó un Software Estudiantil Integrado para Cementación primaria (CEMSEI), desarrollado mediante un proyecto de grado y sustentado en el año 2013 por los Ingenieros de petróleos Ortiz Meneses y Meza Revelo, en la Universidad Industrial de Santander. A continuación, se presenta un listado de las suposiciones que se deben tener en cuenta en la aplicación del software, en la Figura 8 se puede observar la plantilla de inicio. (Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013)

- Los fluidos se consideran incompresibles

- Las paredes de las tuberías y del agujero se consideran rígidas
- Cuando el sistema está en caída libre los fluidos bombeados son adheridos directamente a la interfase fluido-vacío.
- La tubería por cementar está lo suficientemente centralizada como para que el stand-off no tenga un efecto considerable sobre la distribución de velocidad de flujo.
- Se consideran diámetros promedios concéntricos constantes a lo largo de cada sección.
- Cuando hay flujo en transición el factor de fricción se calcula con las ecuaciones dadas para flujo no turbulento.
- El pozo es vertical.
- Se puede preparar y bombear lechada a razón de una tonelada de mezcla en seco por minuto por cada unidad cementadora disponible, y se necesitan 4 minutos para soltar cada tapón.

**Figura 8**

*Página principal de CEMSEI*

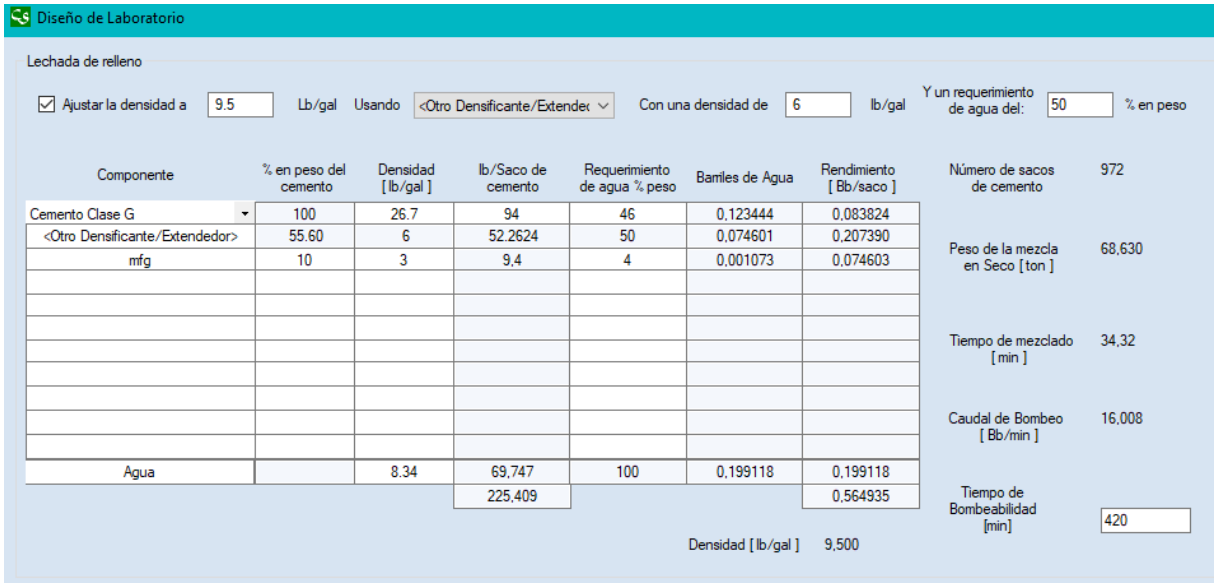
Nota. La ventana de inicio cuenta con cuatro plantillas principales, encargadas de pedir la información requerida para llevar a cabo la simulación. Tomado de CEMSEI; Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013.

Para lograr un correcto cálculo de la densidad y del rendimiento de las lechadas, se deben registrar todos los aditivos usados en el diseño, para esto el software ofrece una hoja de cálculo programada mediante la cual determinará el rendimiento de la lechada en base a los datos insertados por el usuario para cada componente, los cuales son; Nombre del aditivo; Porcentaje de adición en peso del cemento; Densidad y Requerimiento de agua.

El listado anteriormente mostrado solo aplica para los aditivos adicionales, pues para el cemento en lugar de necesitar el porcentaje de adición, se pide el peso de un saco, y para el agua solo se solicita que se establezca la densidad. La Figura 9 muestra la hoja de cálculo, como se puede observar aquí, por cada lechada hay 9 filas disponibles para agregar aditivos, además de 3 ya reservadas para el cemento, agua y el agente pesante o adelgazante según el caso. (Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013)

**Figura 9**

*Diseño de laboratorio CEMSEI*




Nota. La primera ventana es el Diseño de Laboratorio, donde se simula la creación de la lechada. Tomado de CEMSEI; Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013.

La información anterior servirá para que el programa calcule, la densidad de la lechada y el rendimiento de esta (volumen que se obtiene por cada saco de cemento). Además de lo anterior, el módulo también solicita el tiempo de bombeabilidad de cada lechada, el cual se determina en laboratorio mediante un Consistómetro; este valor servirá para determinar si el tiempo total de bombeo de las lechadas es suficiente para evitar que estas se endurezcan durante el desplazamiento. (Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013)

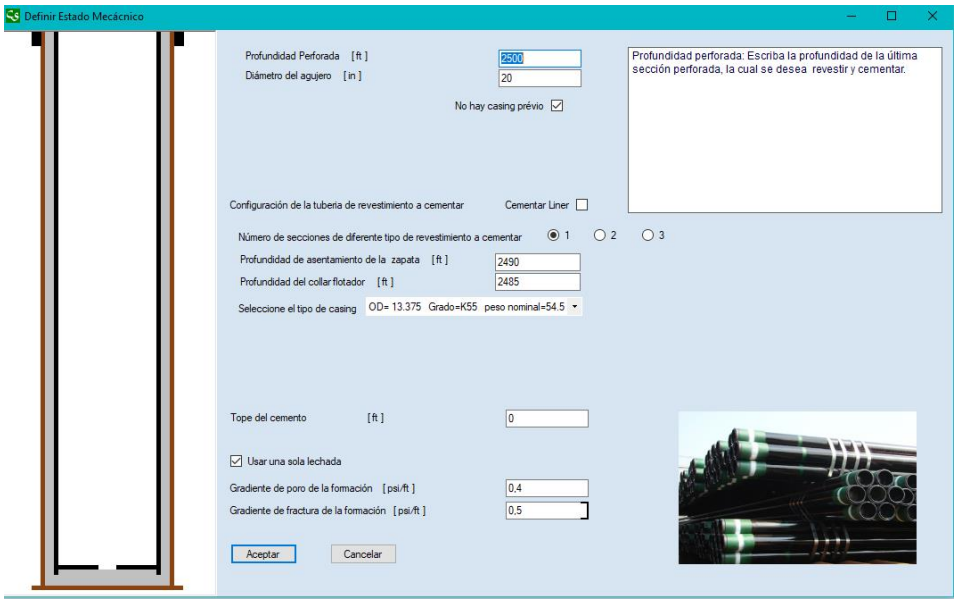
### 4.2.1. Procedimiento de simulación

Se debe llevar a cabo el siguiente procedimiento.

***4.2.1.1. Ingreso de valores del estado mecánico.*** Se digita la profundidad de la sección perforada, la cual se desea revestir y cementar. Como se muestra en la Figura 10. Aquí se seleccionan valores relacionados con yacimientos de presiones subnormales.

**Figura 10**

*Estado mecánico CEMSEI*

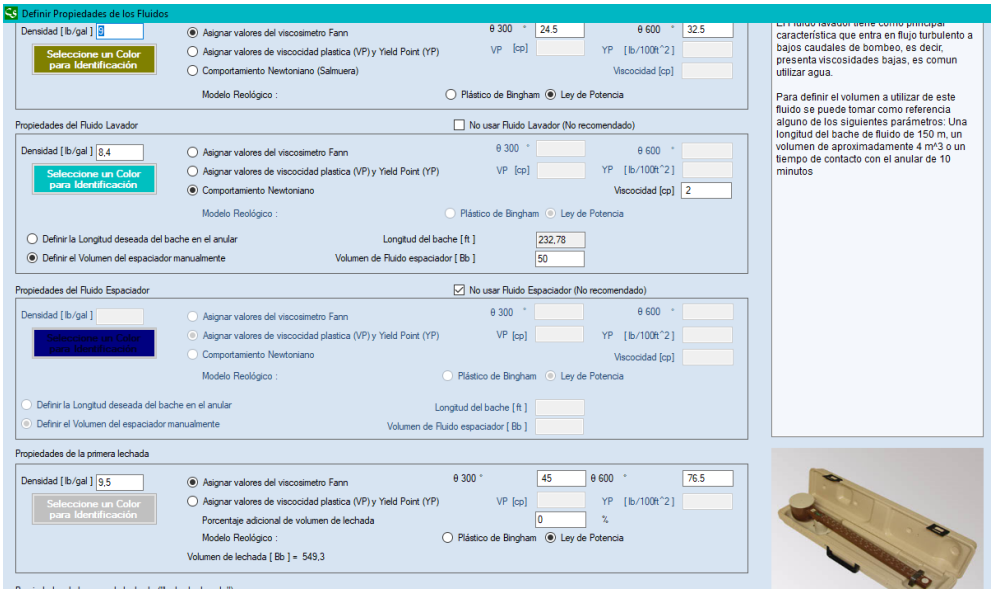


Nota. La segunda ventana es el Diseño del Estado Mecánico, en la parte izquierda se puede observar la imagen del diseño que se está planteando para la simulación. Tomado de CEMSEI; Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013.

***4.2.1.2. Definir propiedades de los fluidos***. Se analiza las propiedades de los fluidos participes en una cementación, ajustando las densidades y propiedades reológicas de los fluidos a una cementación con una lechada liviana. En la Figura 11, se puede observar las casillas de entrada.

**Figura 11**

*Propiedades de los fluidos CEMSEI*




Nota. En la tercera ventana se definen las propiedades y los tipos de fluidos que se utilizaran, entre estos, el fluido de perforación, lavador, espaciador y las lechadas de cemento. Tomado de CEMSEI; Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013.

***4.2.1.3. Definir parámetros operacionales.*** En este módulo se establecen las especificaciones de las bombas disponibles en el equipo de perforación, de esta manera se determina el caudal máximo de bombeo que se podría alcanzar con dicho equipo. En la Figura 12 se observan las variables de entrada, antes de iniciar la simulación, el usuario podrá definir a que caudal desea bombear cada fluido siempre y cuando no exceda la capacidad que aquí se establece.

**Figura 12**

*Parámetros operacionales CEMSEI*

Nota. La cuarta ventana es para definir los parámetros operacionales, se colocan las especificaciones de las bombas disponibles en el equipo de perforación, con el fin de determinar el caudal máximo de bombeo. Tomado de CEMSEI; Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013.

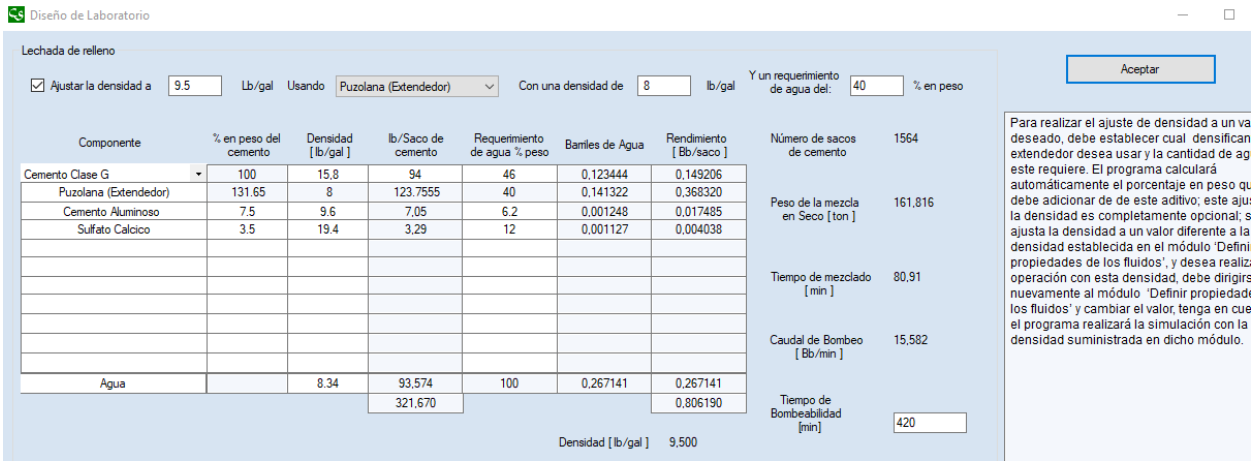
***4.2.1.4. Diseño de laboratorio.*** Este módulo tiene funciones opcionales para uso en cálculos de laboratorio durante el diseño de lechadas, sin embargo, cierta información es necesaria para realizar la simulación de la operación. La información que se ingresa en este módulo de acuerdo con la Figura 13, módulo de cementación es la siguiente,

- Tipo de cemento a utilizar
- Tipo de aditivos y su respectiva concentración en la mezcla (% en peso).
- Densidad y requerimientos de agua de cada aditivo (% en peso)

En esta parte se ingresan los aditivos y lechadas livianas previamente analizadas.

**Figura 13**

*Procedimiento de Diseño de laboratorio CEMSEI*




Nota. El asistente de laboratorio permite definir la composición y características de los aditivos que componen la lechada de cemento liviana. Tomado de CEMSEI; Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013.

***4.2.1.5. ANÁLISIS REOLÓGICO.*** En este módulo se podrá determinar el modelo reológico que mejor se ajusta al comportamiento del fluido deseado y las propiedades referentes al modelo. Para ajustar estos datos se utilizaron los valores reológicos de una lechada de cemento espumada.

# 5. Caso de formulación para el campo castilla

El enfoque Lean Six Sigma, según (Molteni & Cecchi, 2005), provee una metodología para abordar los procesos y eliminar lo que no agrega valor, eliminar la variación y enfocar el proceso a las especificaciones del cliente.

De forma más elemental, lo que permite la metodología Six Sigma es lograr procesos que solo generen 3.4 defectos por millón de operaciones. Para cumplir con este propósito, se debe desplegar, un proyecto exhaustivo, dinámico, impulsado y respaldado por la alta dirección de las compañías y que incluya la búsqueda de la mejora continua en todos los procesos que éstas desarrollan; con el objetivo de reducir fallas, retrasos, reprocesos, sobrecostos y, por ende, aumentar la satisfacción de los clientes. (Facho Rios, 2017, pág. 30)

A nivel operacional, Six Sigma tiene una naturaleza táctica que se enfoca en mejorar métricas de eficiencia operacional, como optimización de tiempos, costos de no calidad y defectos de creación. Mientras que, a nivel de procesos, Six Sigma es utilizada para reducir la variabilidad, y con ello es posible encontrar y eliminar las causas de los errores en las tareas rutinarias, defectos y retrasos en los procesos de negocio, así como optimizar los materiales y los costos. (Facho Rios, 2017, pág. 32)

En la investigación actual se desarrolla la Metodología Six Sigma a nivel operacional, debido a que se busca optimizar las métricas involucradas en el diseño de una lechada de cemento liviana, y, no el análisis puntual de cada una de las etapas del proceso de creación de la lechada.

## 5.1. Fase definir

Se definieron los parámetros de estudio y se enfocó el problema, para generar datos de inicio y realizar el análisis. El diseño de una lechada liviana para cementar un pozo de petróleo es muy importante porque será la encargada de salvaguardar la integridad del proyecto y el personal que

hace parte de este, el éxito de la estabilidad del pozo comienza con el diseño de una lechada de cemento que cumpla con los requerimientos físicomecánicos de la formación.

Por medio de la implantación de un sistema de control de calidad, basado en análisis de variables atribuibles a modo de fallas, se ayudará a evitar las situaciones de peligro que se presentan durante la cementación del pozo y constituirá un elemento de apoyo para la selección de las dosificaciones adecuadas para ejecutarlas en formaciones inestables.

### 5.1.1. Lugar de ejecución

El análisis estadístico se realizó con el fin de reducir al máximo las causas de error en el diseño de la lechada de cemento liviana, la cual puede ser aplicada a un campo colombiano con problemas de presiones subnormales y arenamiento. Como se describe en el ítem 4.5, el Campo Castilla puede llegar a tener pérdidas de hasta 3800 Bbls/día en el sur y alrededor de 2000 Bbls/día en el norte, las cuales pueden asociarse al sistema de fallas presente en el campo, además de las fracturas naturales propias de estas formaciones.

Debido a que el estudio se realizó sobre una base de datos, fue necesario el uso de CEMSEI aplicando el procedimiento del ítem 2.5.1. Se sistematizará un pozo del Campo Castilla tomando como referencia la base de datos del estudio realizado para ‘crear una matriz de selección de un fluido de perforación base agua, con el fin de prevenir el daño de formación en el Campo Castilla, Colombia’ llevado a cabo por (Guerrero García & López R, 2019). En la Tabla 20 se puede observar el resumen de la información. Además, en el ítem 2.5 se pueden observar las suposiciones que se deben tener en cuenta en la ejecución del Software.

### 5.1.2. Información general de la cementación

El proyecto de cementación primaria a evaluar consistió en la cementación de todo el espacio anular entre el casing de superficie de 20” de diámetro externo, asentado a una profundidad de 2000ft, y el casing de producción asentado 6770ft, simulando la profundidad de las formaciones productoras de la Cuenca de los Llanos Orientales, con un hueco abierto de diámetro promedio 28” perforado con broca de 26” hasta una profundidad de 6800 ft. El método utilizado para la operación fue cementación a través de tubería de perforación; los diámetros externo e interno de esta tubería fueron 5,875” y 5,045” respectivamente. Estos datos se adaptaron de los estudios de (Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013) creación de CEMSEI y (Guerrero García & López R, 2019) proyecto desarrollado en el Campo Castilla.

Solamente se utilizó una lechada de cementación y como preflujo se utilizó un volumen determinado de agua fresca, con el fin de separar la lechada del lodo de perforación y para que actúe como fluido lavador. El fluido desplazante utilizado en esta operación también fue agua fresca. Los parámetros de pueden observar en la Tablas 20 y el esquema del estado mecánico en la Figura 14.

Se seleccionó un tiempo de bombeabilidad promedio de 9,5 horas, incluyendo el tiempo de seguridad de la lechada de cemento. Basados en la información previamente consultada.

**Tabla 20.**

*Parámetros de entrada CEMSEI*

| Datos Estado Mecánico | |
|---|---|
| Profundidad del pozo (ft) | 2600 |
| Profundidad del zapato (ft) | 2590 |
| Diámetro de la broca (in) | 26 |
| Diámetro promedio del hueco (in) | 28 |
| Profundidad del collar (ft) | 2580 |
| Tope de la lechada (ft) | 0 |
| Profundidad de asentamiento (ft) | 2590 |
| Gradiente de fractura estimado (psi/ft) | 0.52 |

| | |
|---|---|
| Gradiente de poro estimado (psi/ft) | 0.39 |
| Tipo de Casing a cementar | Superficie |
| Diámetro externo OD (in) | 20 |
| Grado | J-55 |
| Peso nominal (lb/ft) | 94.00 |
| Profundidad de asentamiento (ft) | 1640 |
| Tipo de Casing a cementar | Producción |
| Diámetro externo OD (in) | 13.375 |
| Grado | J-55 |
| Peso nominal (lb/ft) | 54.50 |
| Profundidad de asentamiento (ft) | 2590 |
| Características del Drillpipe | |
| Diámetro externo OD (in) | 5.875 |
| Diámetro interno ID (in) | 5.045 |
| Profundidad (ft) | 2590 |
| Datos de propiedades de los fluidos | |
| Fluido de perforación | |
| Densidad (lb/gal) | 9 |
| Viscosidad Plástica (cP) | 8 |
| Yield point (lbf/100 ft2) | 16.5 |
| Fluido desplazante | |
| Densidad (lb/gal) | 8.33 |
| Viscosidad (cP) | 1 |
| Volumen (Bb) | 1445 |
| Lechada de cemento | |
| Densidad (lb/gal) | 8.5 a 12.5 |
| Viscosidad Plástica (cP) | 28.4 |
| Yield point (lbf/100 ft2) | 6.85 |
| Exceso (%) | 5 |
| Volumen (Bb) | 3060 |
| Espaciador | |
| Densidad (lb/gal) | - |
| Viscosidad Plástica (cP) | - |
| Volumen (Bb) | - |
| Fluido Lavador | |
| Densidad (lb/gal) | 8.33 |
| Viscosidad Plástica (cP) | 1 |
| Volumen (Bb) | 50 |

Nota: Tomado y modificado de Guerrero García, J. A., & López R, J. D. (2019). Matriz Para La Selección De Un Fluido De Perforación Base Agua, Con El Fin De Prevenir El Daño De Formación En El Campo Castilla, Colombia. Bogotá D.C.: Fundación Universidad De América. & CEMSEI; Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013.

El número de unidades de cementación permite determinar el tiempo que tardará preparar y bombear las lechadas de cemento, y consecuentemente el caudal máximo de bombeo de estas. En CEMSEI se asume que por cada unidad de cementación se puede mezclar y bombear a una tasa de 1 tonelada de mezcla seca por minuto, el tiempo total que se necesite para esto se calculará posteriormente cuando se obtenga el diseño de laboratorio de las lechadas y se pueda determinar el peso total de la mezcla en seco. (Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013)

Debido a que no se proporcionó información acerca de la cantidad y especificaciones de las bombas ni de las unidades cimentadoras, estas fueron asumidas de tal manera que se pudiera bombear los fluidos con los caudales de la operación proporcionados en el reporte de la cementación. Teniendo en cuenta que el programa CEMSEI discrimina los fenómenos de la fricción y el arenamiento de la formación, se plantearon los siguientes caudales de bombeo de cada uno de los fluidos utilizados, como se observa en la Tabla 21.

**Tabla 21.**

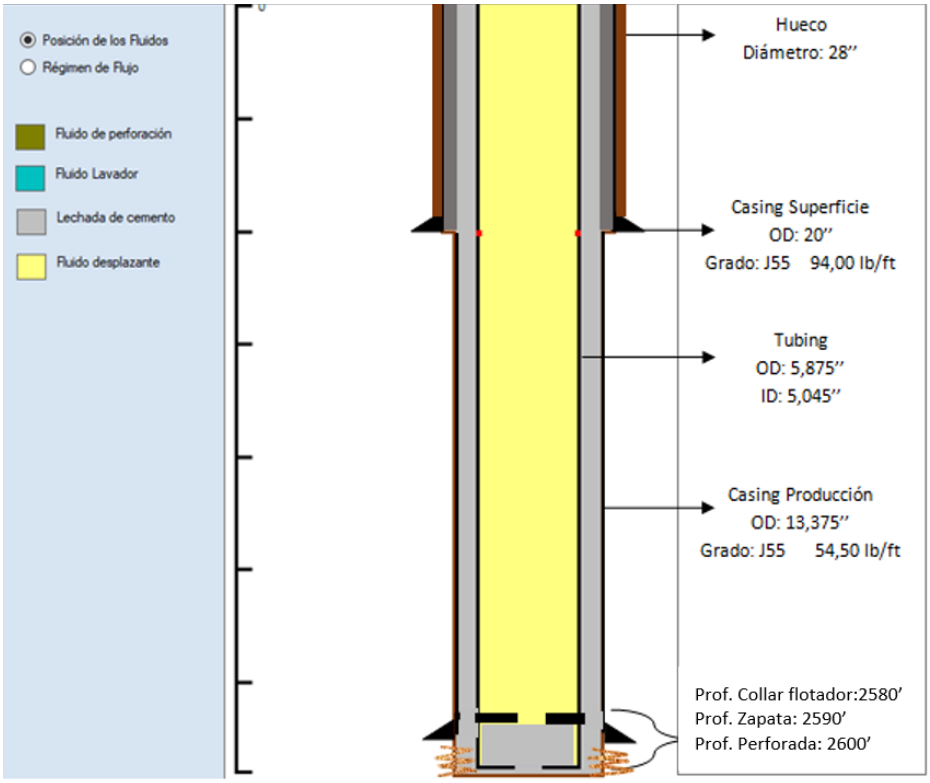
*Caudales de bombeo*

| Fluido | Caudales (Bb/min) |
|---|---|
| Lavador (Agua fresca) | 7.00 |
| Lechada de cemento | 7.05 |
| Desplazante | 4.00 |

Nota: Tomado y adaptado de Guerrero García, J. A., & López R, J. D. (2019). Matriz Para La Selección De Un Fluido De Perforación Base Agua, Con El Fin De Prevenir El Daño De Formación En El Campo Castilla, Colombia. Bogotá D.C.: Fundación Universidad De América. & CEMSEI; Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013.

**Figura 14**

*Esquema del estado mecánico*




Nota. Tomado y adaptado del visualizador Software CEMSEI. Características del estado mecánico de un pozo perforado sobre la formación Mirador, unidad T2, la cual presenta problemas de pérdidas de fluido, según (Guerrero García & López R, 2019).

### 5.1.3. Costo de los aditivos

La economía de una empresa es uno de los factores más importante, por ende, es necesario saber el costo por tonelada de los aditivos en el diseño de una lechada de cemento liviana, para hacer el balance de costos y analizar comercialmente las lechadas, En la Tabla 22 se puede observar los datos de comercialización de los aditivos seleccionados.

**Tabla 22.**

*Costos y proveedores de los aditivos seleccionados*

| Aditivos | Costo (USD/Ton) | Concentración (% peso) | Proveedor | Lugar de Origen |
|---|---|---|---|---|
| Tierras Diatomáceas | 943 | 100 | Agropuli | Colombia |
| Gilsonita | 1020 | 100 | Xinxiang Kolanky Technical | China |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Perlita Expandida | 2299 | 100 | PROVIFERT | Colombia |
| Nitrógeno | 480 | 99 | Descont SAS | Colombia |
| Microesferas de alta resistencia | 600 | 100 | TONTEN | China |
| Oxido de Magnesio | 1792 | 100 | Pipgin Rock | EE. UU. |
| Vermiculita Exfoliada | 300 | 100 | Fitoagrícola | España |
| Metalsilicato de Sodio Anhidro | 575 | 50 | Yanxi Chemical | China |
| Nanotubos de Carbono | 100000 | 95 | RWCHEM | China |
| Nanopartículas de alúmina | 187500 | 99.9 | XFNANO | China |
| Nanosílice | 187500 | 99 | XFNANO | China |
| Bentonita Sódica | 400 | 100 | REDMOND | EE. UU. |
| Poliéster | 810 | 98 | HEROYUI | EE. UU. |
| Aserrín | 431 | 99.9 | BIOESPACIO | Colombia |
| Bentonita | 310 | 100 | Home Brew Ohio | EE. UU. |
| Cloruro de Sodio | 629 | 99 | BAXTER | EE. UU. |
| Lignosulfato de Calcio | 310 | 60 | Chembase | Sri Lanka |
| Dihidrogenofosfato de Potasio | 2800 | 99 | Huinuo, Huinuo | China |
| K-estruvita | 270 | 100 | Ueno & Fujii | Japón |
| Acetato de Polivinilo | 2000 | 100 | Gamblin | EE. UU. |
| Emulsión de estireno-butadieno | 150 | 99 | Zefeng | China |
| Tereftalato de Polietileno | 780 | 100 | PROCHEMIE | China |
| Resina Liquida | 10345 | 99 | HEROYUI | Colombia |
| Catalizador | 13793 | 99 | GELCOAT WHITE | EE. UU. |
| Sulfato Aluminato de Calcio | 400 | 80 | Hua hengfan | China |
| Aluminato Tricálcico | 500 | 77 | Rongsheng | China |
| Yeso | 110 | 88 | KET | China |
| Cemento aluminoso | 600 | 75 | Rongsheng | China |
| Sulfato cálcico | 285 | 99 | Xinrong Chemicals Co | Mongolia |

Nota**:** Información tomada de diferentes catálogos de vendedores de aditivos químicos.

### 5.1.4. Costos de la cementación de pozos

Los costos se definen según las necesidades de cada tramo a cementar, incluyendo los diferentes colchones, lechadas de relleno y lechadas principales, la unidad de medida es en barriles. Al definir las lechadas como un cargo por barril, el contratista va a cotizar su barril de producto, donde se compromete a cumplir con los requerimientos técnicos y operativos exigidos por la Operadora. De esta forma, hay un compromiso mayor por parte del contratista para mejorar sus lechadas, sabiendo que optimizar su formulación, va a tener un impacto en sus ingresos. En la Tabla 23 se pondera una cementación con un gasto promedio. (Morán Palacios, Lituma Mandujan, Vargas, & Tapia, 2009)

**Tabla 23.**

*Costos promedios de los programas de cementación*

| Concepto | USD/ft |
|---|---|
| Lechada básica | 30 |
| Aditivos | 45 |
| Aditivos + | 60 |
| Aditivos + + | 90 |

Nota: Adaptado de Morán Palacios, W., Lituma Mandujan, L., Vargas, X., & Tapia, D. (2009). Diseño de revestimiento y cementación de pozos en el oriente ecuatoriano.

Para todas las operaciones se exigen multas por la mala calidad del servicio (llegadas tardes, demoras, dificultades en la operación) y por los resultados programados para el pozo. Si los resultados de las Cementaciones primarias no son buenos y se cree necesario realizar Cementaciones Remediales (Secundarias), los costos de esas operaciones serán a cargo del Contratista. ( Mauro & Vicente, 2017)

### 5.1.5. Costos por pérdida de circulación

Las operaciones de cementación primaria, el diseño cuidadoso de la lechada y los trabajos de cementación son esenciales: sólo existe una oportunidad de realizar el trabajo con éxito.

En casos extremos, puede producirse la pérdida del control del pozo, con consecuencias catastróficas. Aún en situaciones menos severas de filtración y pérdidas parciales, la pérdida de fluido hacia una formación representa un costo financiero que debe abordar el operador. El impacto de la pérdida de circulación está directamente relacionado con el costo del equipo de perforación, el fluido de perforación y la velocidad de pérdida en función del tiempo. Por otra parte, los elevados costos diarios asociados con el equipo de perforación en aguas profundas y en otras áreas operativas de frontera, hacen que todo tiempo invertido para mitigar problemas de pérdidas de circulación sea extremadamente costoso. (Haithan Jarouj, 2004)

### 5.1.6. Oportunidad de mejora

En ciertas situaciones, las operaciones correctivas de la cementación, conocidas como cementaciones forzadas (o a presión), bastan para reparar el daño, pero se trata de procedimientos costosos y lentos cuyo índice de éxito es en general bajo. En casos extremos, la pérdida de circulación total puede producir un reventón, pérdida completa del control del pozo o un colapso de las paredes del pozo. (Haithan Jarouj, 2004)

Las propiedades físico-mecánicas que desarrollan las diferentes lechadas livianas dependen directamente de su composición, la cual debe ser inspeccionada y cuidadosamente formulada desde la creación de la materia prima, con el fin de obtener una lechada de cemento que se puede aplicar en formaciones de presiones subnormales. Por lo cual en la Tabla 24 se presentan las variables y atributos de la creación de la lechada de cemento, como enfoque de puntos de control para optimizar el proceso de la cementación de pozos.

**Tabla 24.**

*Variables y atributos del producto en cada operación*

| Proceso de creación de las lechadas de cemento | |
|---|---|
| **Operación** | **Variables y Atributos** |
| Extracción y recolección | Materias primas: caliza, arcilla, mineral de hierro, yeso y arena |
| Trituración | Tamaño de grano, 2cm de diámetro |
| Homogenización | Cantidad de aditivo |
| Calcinación | Tiempo y temperatura 1450ºC y 1550ºC |
| Molienda de materia prima | Tamaño de grano menor a 44 micras |
| Mezclado en seco | Finura del molido |
| Hidratación | Temperatura, humedad, velocidad de hidratación |

Nota: Tomado y modificado de Acevedo Valdivieso, A. C., & Moyano Silva, L. J. (2019). Mejoramiento del proceso productivo de Extractora Vizcaya S.A.S aplicando la metodología de Seis Sigma.

Según el producto terminado, sus atributos podrían darse desde la calidad percibida por los stakeholders, quienes buscan características específicas de los cementos, como indica la Tabla 25, baja densidad equivalente de circulación, un adecuado fraguado, alta resistencia a la compresión y un costo rentable, entre otros.

**Tabla 25.**

*Características específicas de una lechada liviana*

| | |
|---|---|
| 1. Resistencia a la compresión | >1000 psi |
| 2. Densidad | <11 ppg |
| 3. Tamaño de grano | <4 micras |
| 4. Pérdida de agua | 50ml en 30min |
| 4. Tiempo de fraguado | 30 días |
| 5. Costo | < 60 USD/ft |

Nota: Recolección de datos de la investigación actual basada en la literatura.

### 5.1.7. Condiciones óptimas del proceso

Normalmente hay condiciones propias del proceso que permiten aumentar el rendimiento de la lechada y minimizar los errores del proceso de cementación, desde el conocimiento de esta cada empresa diseña una lista de chequeo confidencial, dirigida conforme los requerimientos de densidad, resistencia, tiempos, presión, entre otras, para valorar el comportamiento del cemento según las observaciones realizadas. Las empresas que necesitan cementar formaciones depletadas o naturalmente fracturadas, requieren una lechada de bajo peso que soporte alta resistencia a la compresión.

### 5.1.8. Enfoque al cliente

El enfoque al cliente corresponde al primer principio para la gestión de calidad según las normas internacionales, dado que al cumplimiento de las especificaciones se dirigen los esfuerzos organizacionales de un estudio. De acuerdo con esto se presenta en la Tabla 26, la información que necesita la empresa, esta indica las preocupaciones recurrentes desde las distintas partes interesadas, antes, durante y al finalizar el proceso de cementación.

**Tabla 26.**

*Características específicas de una lechada liviana*

| Proceso | Preocupaciones |
|---|---|
| 1. Mezclado en seco | Homogenización de las sustancias en seco, conservar buena relación en el tamaño de grano. |
| 2. Hidratación | Buen requerimiento de agua, propiedades reológicas y densidad de la lechada. |
| 3. Curado | Perdida de agua (agua libre) y buena resistencia a la compresión (psi). |

Nota**:** Tomado y modificado de Acevedo Valdivieso, A. C., & Moyano Silva, L. J. (2019). Mejoramiento del proceso productivo de Extractora Vizcaya S.A.S aplicando la metodología de Seis Sigma.

### 5.1.9. Dosificaciones teóricas de lechadas de cemento livianas

Para solucionar el problema y plantear una metodología en la selección de una lechada liviana, se plantaron las diferentes Lechadas de Cemento Livianas (LCL), como se observa en la Tabla 27, de acuerdo con la literatura y la afinidad entre los componentes de los diferentes aditivos, con el fin de satisfacer el interés de la empresa y las partes interesadas en el proyecto.

**Tabla 27.**

*Compuestos de las lechadas de cemento livianas (LCL)*

| LECHADA | ADITIVO | LECHADA | ADITIVO |
|---|---|---|---|
| *LCL1* | Gilsonita<br>Oxido de Magnesio<br>Nitrogeno<br>Cemento Portland<br>Agua | *LCL10* | Nanotubos de Carbono<br>Nanopartículas de alúmina<br>Nitrogeno<br>Cemento Portland<br>Agua |
| *LCL2* | Tierras Diatomáceas<br>Oxido de Magnesio<br>Nanopartículas de alúmina<br>Cemento Portland<br>Agua | *CEMENTO MODIFICADO* | Bentonita Sodica<br>Poliester<br>Aserrín<br>Cemento Portland<br>Agua |
| *LCL3* | Perlita Expandida<br>Microesferas de alta resistencia<br>Oxido de Magnesio<br>Cemento Portland<br>Agua | *CEMENTOS SALADOS CON ALTO GEL* | Bentonita<br>Cloruro de Sodio<br>Lignosulfato de Calcio<br>Cemento Portland<br>Agua |
| *LCL4* | Nitrógeno<br>Vermiculita Exfoliada<br>Metalsilicato de Sodio Anhidro<br>Cemento Portland<br>Agua | *CEMENTO MAGNÉSICO* | Óxido de Magnesio<br>Dihidrogenofosfato de Potasio<br>K-estruvita<br>Cemento Portland<br>Agua |
| *LCL5* | Tierras Diatomáceas<br>Perlita Expandida | *CEMENTO LÁTEX* | Acetato de polivinilo<br>Emulsión de estireno-butadieno |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Nanopartículas de alúmina | | Cemento Portland |
| | Cemento Portland | | Agua |
| | Agua | *CEMENTOS PLÁSTICOS* | Tereftalato de Polietileno |
| *LCL6* | Tierras Diatomáceas | | Resina Liquida |
| | Gilsonita | | Catalizador |
| | Perlita Expandida | | Cemento Portland |
| | Cemento Portland | | Agua |
| | Agua | *TIPO K.* | Sulfato Aluminato de Calcio |
| *LCL7* | Nitrógeno | | Cemento Portland |
| | Microesferas de alta resistencia | | Agua |
| | Oxido de Magnesio | *TIPO S.* | Aluminato Tricálcico |
| | Cemento Portland | | Yeso |
| | Agua | | Cemento Portland |
| *LCL8* | Vermiculita Exfoliada | | Agua |
| | Metalsilicato de Sodio Anhidro | *TIPO M.* | Cemento Aluminoso |
| | Nanotubos de Carbono | | Sulfato Calcico |
| | Cemento Portland | | Cemento Portland |
| | Agua | | Agua |
| *LCL9* | Perlita Expandida | Cemento Portland | Microesferas de alta resistencia |
| | Nitrógeno | Agua | |

Nota: Planteada por el autor; basado en la literatura.

## 5.2. Fase medir

En esta fase se evaluó el instrumento de medida y se llevó a cabo la medición de las variables cuantificables, teniendo como lema la frase “Lo que no se puede medir no se puede controlar; lo que no se puede controlar no se puede gestionar; lo que no se puede gestionar no se puede mejorar.” Esta frase se le es atribuida a Peter Drucker quien fue un consultor y profesor de negocios. (Acevedo Valdivieso & Moyano Silva, 2019)

### 5.2.1. Toma de datos para evaluar instrumento de medición (CEMSEI)

Al momento de realizar el análisis estadístico, se debe trabajar con datos coherentes y precisos, por lo cual, es de gran importancia manipular cuidadosamente el instrumento de medición,

previendo que este contemple sesgo y arroje datos que comprendan la realidad, lo que garantiza un análisis confiable y valores exactos dentro del desarrollo de la metodología de calidad SIX SIGMA.

Siguiendo el procedimiento del ítem 2.5.1, se varían los valores de gradiente de presión de la formación, para obtener las diferentes densidades equivalentes de circulación (ECD) a determinados tiempos de bombeabilidad de 1 a 200 minutos, como se observa en la Tabla 28, con la finalidad de obtener los datos de inicio del análisis del sesgo y la estabilidad, desde la herramienta estadística de Repetibilidad y Reproducibilidad (Gage R&R).

Para evaluar la herramienta se configuró la cementación de una formación con un gradiente de presión subnormal en CEMSEI, analizando los valores a presiones hidrostáticas que rodean los 1000psi, que es la resistencia a la compresión que se busca desarrollar en la lechada de cemento, con un gradiente de poro que varía de 0,36 a 0,40 psi/ft, y un gradiente de fractura ajustado según la Ecuación (6).

$$P_{fr} = \frac{P_{sc} + 2 * P_f}{3} = \frac{0{,}9 + 2 * 0{,}4}{3} = 0{,}56\ \frac{psi}{ft} \qquad (6)$$

$$GP_{fr}: Gradiente\ Presión\ de\ fractura$$

$$GP_{sc}: Gradiente\ Presión\ de\ Sobrecarga \rightarrow 0{,}9\ \frac{psi}{ft}$$

$$GP_{f}: Gradiente\ Presión\ de\ la\ formación \rightarrow 0{,}36\ a\ 0{,}40\ \frac{psi}{ft}$$

**Tabla 28.**

*Valores de estudio del instrumento de medición*

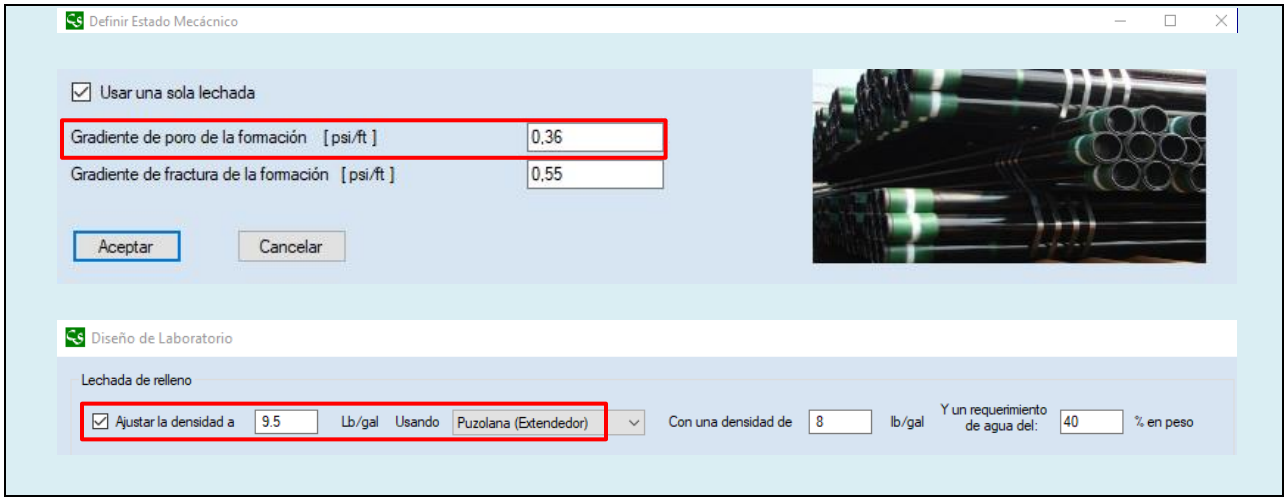
| Tiempo (min) | Presión de formación (psi) | Densidad Equivalente de circulación. ECD. (ppg) |
|---|---|---|
| Desde 1 a 200 minutos | 1000<br>1050 | Datos encontrados con CEMSEI |

| 1100 |
|---|

Nota: Recolección de datos de la investigación actual basados en el Software CEMSEI.

**Figura 15**

*Variación de datos en CEMSEI para el análisis Gage R&R*

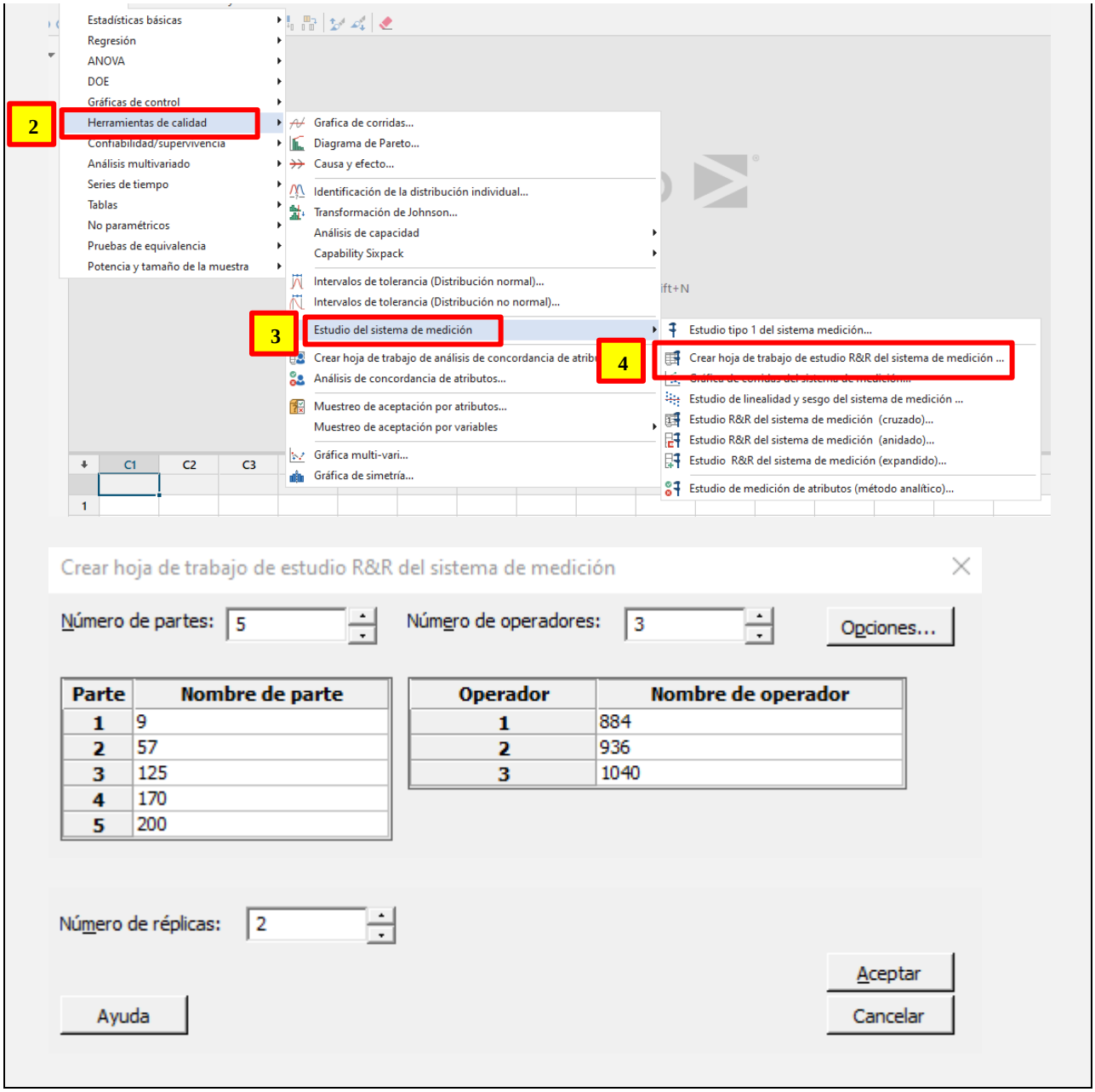



Nota. Los datos de gradiente de presión de poro varían dentro del simulador con el fin de obtener los valores de estudio. Tomado de CEMSEI; Ortiz Meneses & Meza Revelo, 2013.

Después de realizar la simulación de la lechada liviana en CEMSEI, los valores de ECD simulados se registran en la Tabla 29. Ajustados a la plantilla Minitab la cual se obtiene realizando el procedimiento de la Figura 16, Asumiendo como operadores las presiones hidrostáticas de 884, 936 y 1040 psi. Y las partes de medición serán los diferentes tiempos de bombeabilidad, para analizar su relación con el ECD, por medio del Gage R&R.

**Figura 16**

*Pasos de la creación del diseño Gage R&R.*




Nota: Se obtienen las corridas relacionando cada parte de la medición y los operadores con la respuesta obtenida. Llenando todos los valores para evaluar la herramienta de medición. Tomada de Minitab 2019.

**Tabla 29.**

*Valores de estudio del instrumento de medición*

| Orden Corrida | Partes<br>Tiempo (min) | Operadores<br>Presión (psi) | Densidad Equivalente de Circulación (lb/gal) |
|---|---|---|---|
| 1 | 170 | 884 | 8,977 |
| 2 | 57 | 884 | 9,139 |
| 3 | 200 | 884 | 8,898 |
| 4 | 125 | 884 | 9,083 |
| 5 | 9 | 884 | 9,109 |

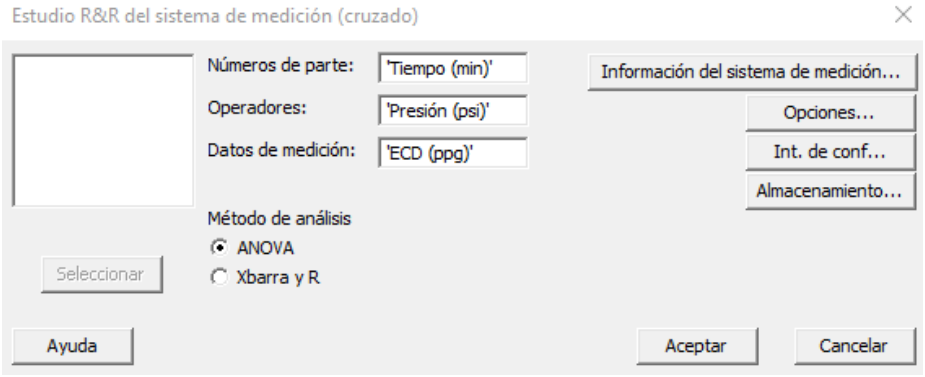
| | | | |
|---|---|---|---|
| 6 | 9 | 936 | 9,109 |
| 7 | 170 | 936 | 8,977 |
| 8 | 57 | 936 | 9,139 |
| 9 | 125 | 936 | 9,083 |
| 10 | 200 | 936 | 8,898 |
| 11 | 57 | 1040 | 9,139 |
| 12 | 9 | 1040 | 9,109 |
| 13 | 200 | 1040 | 8,898 |
| 14 | 125 | 1040 | 9,083 |
| 15 | 170 | 1040 | 8,977 |
| 16 | 57 | 884 | 9,139 |
| 17 | 9 | 884 | 9,109 |
| 18 | 125 | 884 | 9,083 |
| 19 | 200 | 884 | 8,898 |
| 20 | 170 | 884 | 8,977 |
| 21 | 9 | 936 | 9,109 |
| 22 | 170 | 936 | 8,977 |
| 23 | 57 | 936 | 9,139 |
| 24 | 200 | 936 | 8,898 |
| 25 | 125 | 936 | 9,083 |
| 26 | 125 | 1040 | 9,083 |
| 27 | 170 | 1040 | 8,977 |
| 28 | 9 | 1040 | 9,109 |
| 29 | 57 | 1040 | 9,139 |
| 30 | 200 | 1040 | 8,898 |

Nota: Recolección de datos de la investigación actual basados en el Software CEMSEI.

Una vez recolectados los datos se llevan a la plantilla Minitad donde se vuelve a realizar el procedimiento de la Figura 16, con un cambio en el paso 4, donde se escoge ‘Estudio R&R del sistema de medición (cruzado)’ generando la Figura 17, donde se especificará cada componente.

**Figura 17**

*Estudio del sistema de medición (Cruzado)*




Nota: Después de tener los datos organizados y listos para el estudio, se selecciona el análisis ANOVA y se procede al análisis y validación de la herramienta de medición. Tomado de Minitab 2019.

### 5.2.2. Análisis y validación del sistema de medición

La exactitud y la precisión son dos características fundamentales de un sistema de medición aceptable. La exactitud se refiere a qué tan cerca están del valor real las mediciones de un sistema, y la precisión se refiere a qué tan cerca están las mediciones entre ellas. (Minitab 18, 2019)

El instrumento de medición CEMSEI arrojó un porcentaje de variación R&R menor al 10%, como se observa en la Tabla 31. y según recomendaciones del manual Automotive Industry Action Group (AIAG) es aceptable el porcentaje de contribución entre las partes, lo que significa que el sistema de medición puede distinguir entre las partes de manera coherente y precisa.

Como se observa en la Tabla 30 el valor P es mayor a 0,05 en la iteración entre tiempo y presión, ratificando una relación exacta de los tiempos a determinada presión. Lo que describe que los operadores (presiones) realizaron unas medidas precisas ajustadas a una herramienta confiable.

**Tabla 30.**

*ANOVA de dos factores con interacción*

| Fuente | GL | SC | MC | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Tiempo (min) | 4 | 0,244825 | 0,0612063 | * | * |
| Presión (psi | 2 | 0,000000 | 0,0000000 | * | * |
| Tiempo (min) * Presión (psi | 8 | 0,000000 | 0,0000000 | 0 | 1,000 |
| Repetibilidad | 15 | 0,000000 | 0,0000000 | | |
| Total | 29 | 0,244825 | | | |

*α para eliminar el término de interacción = 0,05*

Nota: Recolección de datos de la investigación actual basados en Minitab 2019.

**Tabla 31.**

*R&R del sistema de medición, Componentes de la varianza*

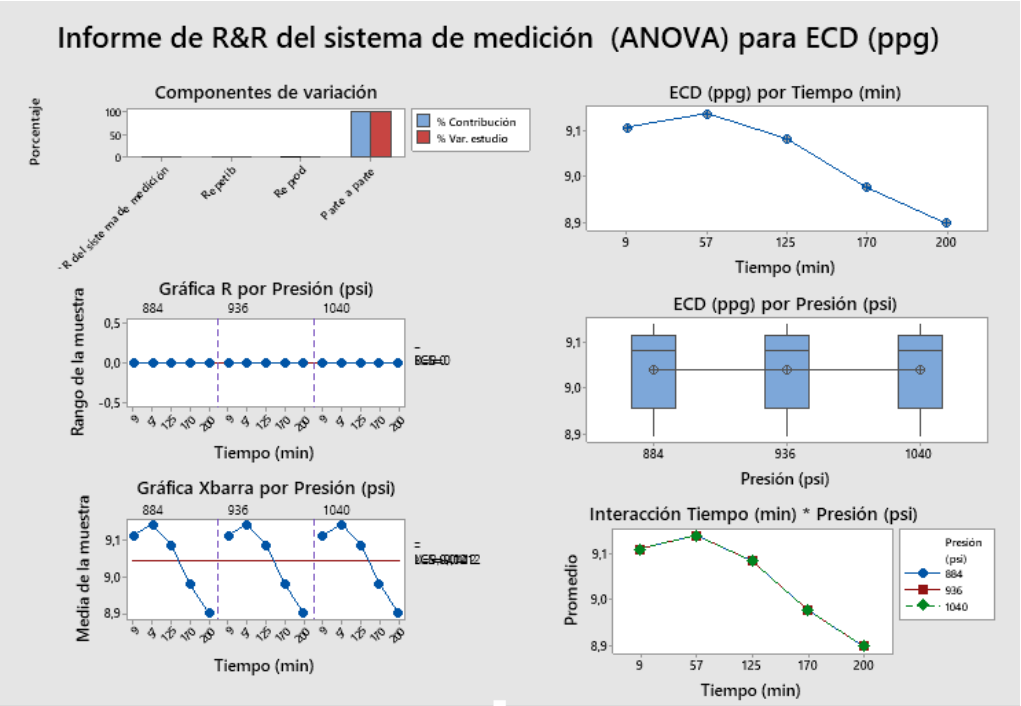
| Fuente | CompVar | %Contribución (de CompVar) |
|---|---|---|
| Gage R&R total | 0,0000000 | 0,00 |
| Repetibilidad | 0,0000000 | 0,00 |
| Reproducibilidad | 0,0000000 | 0,00 |
| Presión (psi | 0,0000000 | 0,00 |
| Parte a parte | 0,0102011 | 100,00 |
| Variación total | 0,0102011 | 100,00 |

Número de categorías distintas = 22566977

Nota: Recolección de datos de la investigación actual basados en Minitab 2019.

**Figura 18**

*Informe R&R del sistema de medición (ANOVA)*




Nota: Las gráficas representa el estudio R&R del sistema de medición – método ANOVA. Se puede observar que el estudio de varianza se centra 100% en Parte a parte, lo que significa que el equipo discrimina perfectamente entre cada parte medida con una elevada precisión y se pueden medir 22566977 muestras sin generar error. Tomado de CEMSEI.

Después de realizar el procedimiento y analizar el sistema de medición, se llega a la conclusión que la herramienta es apta para el estudio, además los operariorios utilizados para medir las partes especificas presentan alta precisión y confiabilidad. En el Apéndice A. se puede observar el resultado de Repetibilidad y Reproducibilidad (Gage R&R).

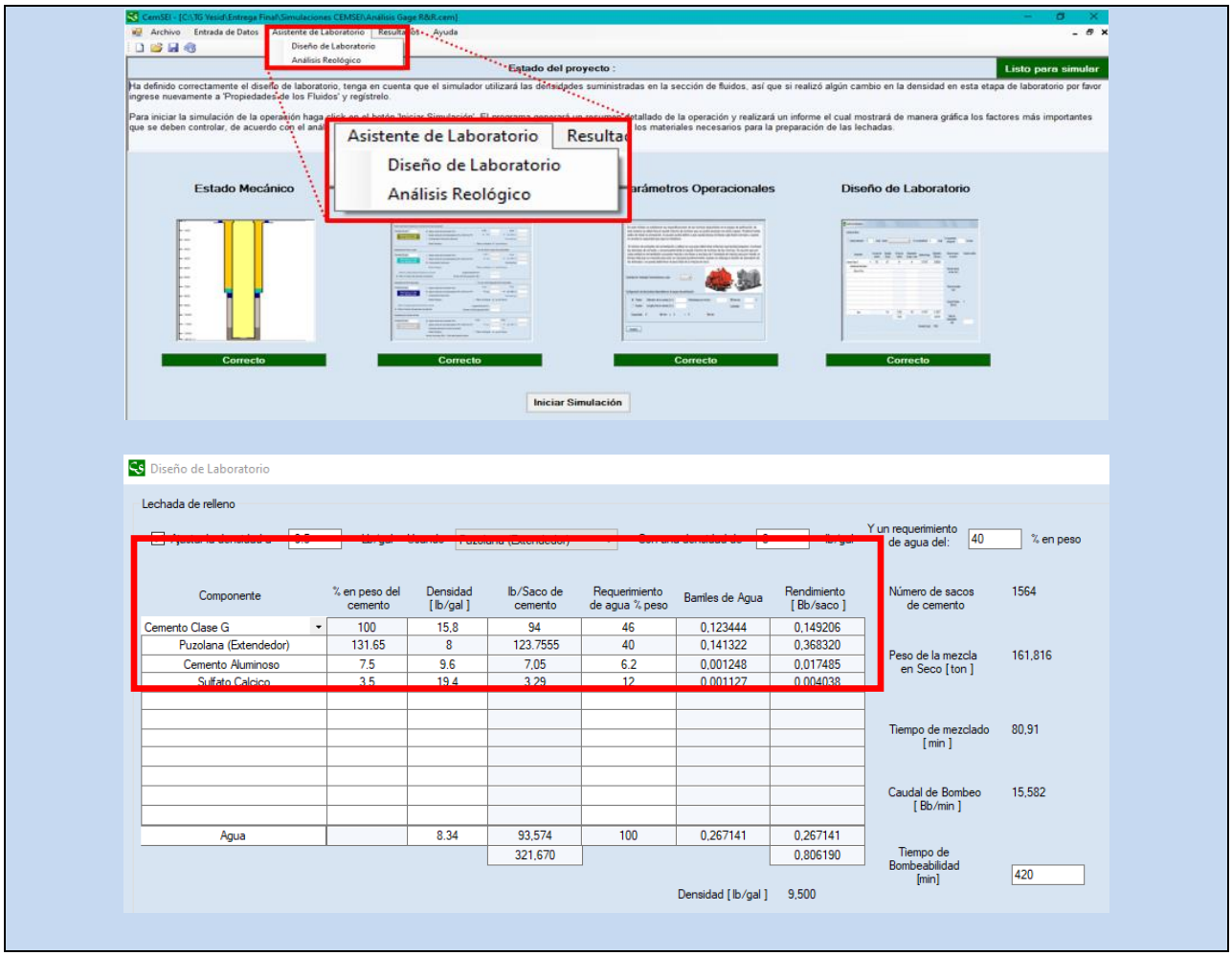
### 5.2.3. Medición de Dosificaciones

Después de garantizar la fiabilidad de la herramienta de medición, se procede a realizar la medición de las variables de interés, (densidad de lechada, perdidas de circulación y resistencia de la formación, entre otros).

***5.2.3.1. Procedimiento de la medición de las LCL*** Cuando el instrumento de medición CEMSEI está ajustado a una formación de presión subnormal, tal como se mostró en el ítem anterior, se procede a realizar el Diseño de laboratorio siguiendo el paso de la Figura 19, donde se abre la ventana, que permite editar la composición y propiedades de cada aditivo en la lechada de cemento. Los parámetros de entrada se pueden observar en el ítem 3.5, donde se resumen las características de cada componente en la mezcla. Así se procede a simular cada una de las lechadas expuestas en la Tabla 27.

**Figura 19**

*Pasos análisis de laboratorio CEMSEI*




Nota: Las gráficas representa el paso a paso, cuando se va a ingresar la composición de la lechada y las propiedades de cada aditivo según la densidad requerida. Tomade de CEMSEI.

***5.2.3.2. Resultados de la medición*** Cada una de las lechadas livianas arrojó un documento Excel las cuales se encuentran en los Apéndices del B al S. donde se analizan las variables de laboratorio, entre las cuales se encuentra el tiempo de fractura, el cual es importante porque describe el instante en que las presiones de la formación se desequilibran, iniciando las fracturas inducidas en la formación y aumentando las perdidas por circulación. Además, este tiempo facilita la selección de una lechada liviana óptima, porque describe si existe la posibilidad de fracturar la formación.

En la Tabla 32 se puede analizar la compilación de resultado de la simulación de las diferentes lechadas, estos datos se tomaron del documento Excel arrojado por la simulación, este procedimiento se llevó a cabo variando algunos aditivos y sus propiedades como, requerimiento de agua, concentración en peso y densidad, entre otros.

Las perdidas por circulación de fluidos se calcularon, analizando los caudales de entrada y salida a partir del tiempo de fractura de la formación.

**Tabla 32.**

*Datos de salida Software CEMSEI*

| Lechada | Peso de la mezcla en seco (Ton) | Presión hidrostática de la Lechada (psia) | Tiempo de Fractura (min) | Perdidas de circulación (Bbl/h) | Densidad de la Lechada ECD (ppg) | Tiempo de Mezclado (min) | Caudal de Bombeo (Bbl/min) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LCL1 | 181,8 | 1554,8 | 190 | 39,5 | 11,5 | 90,91 | 13,87 |
| LCL2 | 172,2 | 1514,0 | 184 | 35,0 | 11,2 | 86,08 | 14,65 |
| LCL3 | 185,9 | 1487,0 | 191 | 31,0 | 11 | 92,95 | 13,56 |
| LCL4 | 168,5 | 1460,2 | 214 | 20,5 | 10,8 | 84,23 | 14,97 |
| LCL5 | 150,5 | 1419,6 | 250 | 0 | 10,5 | 75,25 | 16,75 |
| LCL6 | 125,3 | 1379,0 | 285 | 0 | 10,2 | 62,67 | 20,12 |
| LCL7 | 170,4 | 1338,48 | 344 | 0 | 9,9 | 85,21 | 14,79 |
| LCL8 | 103,1 | 1297,92 | …. | …. | 9,6 | 51,57 | 24,45 |
| LCL9 | 155,2 | 1243,84 | ….. | ….. | 9,2 | 77,59 | 16,24 |
| LCL10 | 148,3 | 1189,76 | ….. | ….. | 8,8 | 74,17 | 16,99 |
| Cemento Modificado | 128,98 | 1081,6 | …. | …. | 8 | 64,49 | 19,55 |
| Cementos salados con alto gel | 196,55 | 1595,36 | 158 | 41,1 | 11,8 | 98,28 | 12,82 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cemento Magnésico | 199,86 | 1622,4 | 152 | 43,5 | 12 | 99,93 | 12,61 |
| Cemento Látex | 142,65 | 1352 | 320 | 0 | 10 | 71,32 | 17,67 |
| Cementos plásticos | 192,34 | 1568,32 | 165 | 38,4 | 11,6 | 96,18 | 13,11 |
| Tipo K. | 153,7 | 1527,76 | 178 | 34,3 | 11,3 | 76,05 | 16,41 |
| Tipo S. | 187,11 | 1622,4 | 152 | 43,5 | 12 | 93,55 | 13,47 |
| Tipo M. | 191,05 | 1595,36 | 158 | 41,0 | 11,8 | 95,52 | 13,198 |

Nota: Resultados obtenidos y adaptados del Software estudiantil CEMSEI.

Otro de los datos que arroja la simulación es la cantidad de aditivos que se utilizan para el diseño de cada lechada, Lo cual permite tener las dosificaciones de las lechadas simuladas, y haciendo uso de la Tabla 23 se puede calcular el costo total por lechada. En la Tabla 33 se puede observar el resumen de los costos de diseño de cada lechada liviana, según los datos obtenidos en CEMSEI.

**Tabla 33.**

*Costo del diseño de simulación*

| Costo de Lechada Liviana para una Profundidad de 2600 ft | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Lechada | Aditivo | Cantidad | Unidad | Precio por Unidad (USD) | Precio de componentes (USD) | Costo de Lechada (USD/ft) |
| LCL1 | Gilsonita | 35401,21 | Libras | 0,46 | 16285 | 14 |
| | Oxido de Magnesio | 3540,12 | Libras | 0,8 | 2832 | |
| | Nitrogeno | 7889,57 | Libras | 0,22 | 1736 | |
| | Cemento Portland | 3766 | Sacos | 3,9 | 14687 | |
| | Agua | 594,07 | Barriles | 0,5 | 297 | |
| LCL2 | Tierras Diatomáceas | 29511,44 | Libras | 0,42 | 12395 | 69 |
| | Oxido de Magnesio | 40123,94 | Libras | 0,8 | 32099 | |
| | Nanopartículas de alúmina | 1475,72 | Libras | 83,71 | 123533 | |
| | Cemento Portland | 3140 | Sacos | 3,9 | 12246 | |
| | Agua | 609,64 | Barriles | 0,5 | 305 | |
| LCL3 | Perlita Expandida | 28148,49 | Libras | 1,03 | 28993 | 38 |
| | Microesferas de alta resistencia | 36593,04 | Libras | 0,22 | 8050 | |
| | Oxido de Magnesio | 63524,56 | Libras | 0,8 | 50820 | |
| | Cemento Portland | 2995 | Sacos | 3,9 | 11681 | |
| | Agua | 493,06 | Barriles | 0,5 | 247 | |
| LCL4 | Nitrógeno | 4511,79 | Libras | 0,22 | 993 | 10 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Vermiculita Exfoliada | 93746,38 | Libras | 0,13 | 12187 | |
| | Metalsilicato de Sodio Anhidro | 5356,94 | Libras | 0,26 | 1393 | |
| | Cemento Portland | 2849 | Sacos | 3,9 | 11111 | |
| | Agua | 572,13 | Barriles | 0,5 | 286 | |
| LCL5 | Tierras Diatomáceas | 84078,83 | Libras | 0,42 | 35313 | 99 |
| | Perlita Expandida | 40941,09 | Libras | 1,03 | 42169 | |
| | Nanopartículas de alúmina | 2047,05 | Libras | 83,71 | 171359 | |
| | Cemento Portland | 2178 | Sacos | 3,9 | 8494 | |
| | Agua | 640,09 | Barriles | 0,5 | 320 | |
| LCL6 | Tierras Diatomáceas | 40846,73 | Libras | 0,42 | 17156 | 27 |
| | Gilsonita | 18114,53 | Libras | 0,46 | 8333 | |
| | Perlita Expandida | 36229,07 | Libras | 1,03 | 37316 | |
| | Cemento Portland | 1927 | Sacos | 3,9 | 7515 | |
| | Agua | 753 | Barriles | 0,5 | 377 | |
| LCL7 | Nitrógeno | 109861,6 | Libras | 0,21 | 23071 | 16 |
| | Microesferas de alta resistencia | 10466,47 | Libras | 0,22 | 2303 | |
| | Oxido de Magnesio | 10466,47 | Libras | 0,8 | 8373 | |
| | Cemento Portland | 2227 | Sacos | 3,9 | 8685 | |
| | Agua | 423,96 | Barriles | 0,5 | 212 | |
| LCL8 | Vermiculita Exfoliada | 100499,4 | Libras | 0,13 | 13065 | 12 |
| | Metalsilicato de Sodio Anhidro | 6030,54 | Libras | 0,26 | 1568 | |
| | Nanotubos de Carbono | 241,22 | Libras | 44,6 | 10758 | |
| | Cemento Portland | 1283 | Sacos | 3,9 | 5004 | |
| | Agua | 802 | Barriles | 0,5 | 401 | |
| LCL9 | Perlita Expandida | 31243 | Libras | 1,03 | 32180 | 28 |
| | Nitrógeno | 131213,5 | Libras | 0,21 | 27555 | |
| | Microesferas de alta resistencia | 23432,25 | Libras | 0,22 | 5155 | |
| | Cemento Portland | 1662 | Sacos | 3,9 | 6482 | |
| | Agua | 414,08 | Barriles | 0,5 | 207 | |
| LCL10 | Nanotubos de Carbono | 136,15 | Libras | 44,6 | 6072 | 42 |
| | Nanopartículas de alúmina | 680,76 | Libras | 83,71 | 56986 | |
| | Nitrogeno | 188453,7 | Libras | 0,22 | 41460 | |
| | Cemento Portland | 1448 | Sacos | 3,9 | 5647 | |
| | Agua | 401,23 | Barriles | 0,5 | 201 | |
| Cemento Modificado | Bentonita Sodica | 6223,84 | Libras | 0,18 | 1120 | 10 |
| | Poliester | 20882,73 | Libras | 0,36 | 7518 | |
| | Aserrín | 49790,68 | Libras | 0,19 | 9460 | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cemento Portland | 2207 | Sacos | 3,9 | 8607 | |
| | Agua | 397,53 | Barriles | 0,5 | 199 | |
| Cementos salados con alto gel | Bentonita | 21303,76 | Libras | 0,14 | 2983 | 9 |
| | Cloruro de Sodio | 11942,71 | Libras | 0,28 | 3344 | |
| | Lignosulfato de Calcio | 1990,45 | Libras | 0,14 | 279 | |
| | Cemento Portland | 4235 | Sacos | 3,9 | 16517 | |
| | Agua | 546,69 | Barriles | 0,5 | 273 | |
| Cemento Magnésico | Óxido de Magnesio | 4623,64 | Libras | 0,8 | 3699 | 9 |
| | Dihidrogenofosfato de Potasio | 828,8 | Libras | 1,25 | 1036 | |
| | K-estruvita | 20719,97 | Libras | 0,12 | 2486 | |
| | Cemento Portland | 4409 | Libras | 3,9 | 17195 | |
| | Agua | 556,23 | Barriles | 0,5 | 278 | |
| Cemento Látex | Acetato de polivinilo | 110761,1 | Libras | 0,9 | 99685 | 42 |
| | Emulsión de estireno-butadieno | 47001,37 | Libras | 0,07 | 3290 | |
| | Cemento Portland | 1667 | Sacos | 3,9 | 6501 | |
| | Agua | 614,01 | Barriles | 0,5 | 307 | |
| Cementos plásticos | Tereftalato de Polietileno | 1945,21 | Libras | 0,35 | 681 | 77 |
| | Resina Liquida | 13616,46 | Libras | 4,62 | 62908 | |
| | Catalizador | 19452,08 | Libras | 6,16 | 119825 | |
| | Cemento Portland | 4139 | Sacos | 3,9 | 16142 | |
| | Agua | 548,89 | Barriles | 0,5 | 274 | |
| Tipo K. | Sulfato Aluminato de Calcio | 56479,56 | Libras | 0,18 | 10166 | 9 |
| | Cemento Portland | 3004 | Sacos | 3,9 | 11716 | |
| | Agua | 741,71 | Barriles | 0,5 | 371 | |
| Tipo S. | Aluminato Tricálcico | 40578,59 | Libras | 0,22 | 8927 | 10 |
| | Yeso | 33815,49 | Libras | 0,05 | 1691 | |
| | Cemento Portland | 3597 | Sacos | 3,9 | 14028 | |
| | Agua | 644,3 | Barriles | 0,5 | 322 | |
| Tipo M. | Cemento Aluminoso | 22474,63 | Libras | 0,27 | 6068 | 10 |
| | Sulfato Calcico | 36249,4 | Libras | 0,13 | 4712 | |
| | Cemento Portland | 3856 | Sacos | 3,9 | 15038 | |
| | Agua | 585,12 | Barriles | 0,5 | 293 | |

Nota: Resultados obtenidos y adaptados del Software estudiantil CEMSEI.

En el software CEMSEI no se tienen en cuenta algunas variables como lo son las fuerzan intermoleculares de los cementos expansivos, ni la disposición molecular de las nanopartículas, y características fisicoquímicas. Por lo cual el requerimiento de simulación de estos aditivos debe ser ajustado de acuerdo con la composición teórica consultada.

## 5.3. Fase analizar

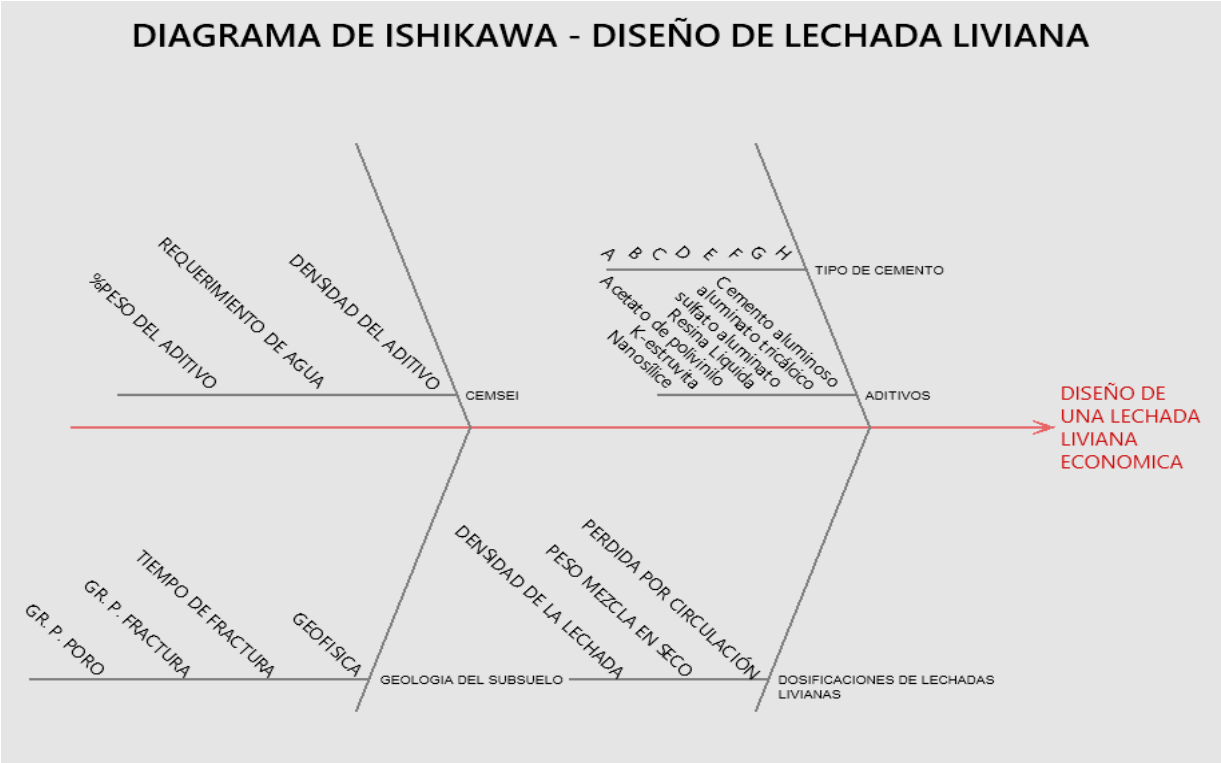
El análisis de las variables se puede desarrollar a partir de distintas herramientas estadísticas que permitan discriminar unas de otras, y tomar decisiones con sustento cuantitativo demostrable estadísticamente. Para iniciar el análisis se realizó un diseño de experimentos (DOE), donde se estudian los métricos primarios, para determinar cuáles son controlables, medibles o constantes.

### 5.3.1. Causas de variación

La meta de la fase de analizar es identificar la(s) causa(s) raíz del problema o métrico primario principal, esto corresponde a reconocer las X's vitales, entender cómo es que estas generan el problema y confirmarlas con los datos, para ello se identifican todas estas variables de entrada a través de un diagrama de Ishikawa como se observa en la Figura 20 y se plasman en la Tabla 34.

**Figura 20**

*Diagrama de Ishikawa (Causa -Efecto) Minitab 2019*



Nota. Representa los parámetros que intervienen en la creación de la lechada. Tomado de Minitab. 2020.

**Tabla 34.**

*Planeación de variables*

| TABLA PLANEACIÓN VARIABLES | | | |
|---|---|---|---|
| **Métrico Principal** | **Variable respuesta, Métricos primarios Y's** | **Causas Vitales X's potenciales** | **Significancia** |
| **Diseño de una lechada liviana** | Y1. Geología del Subsuelo | X1. Gradiente de presión de poro | 0,34 a 0,43 psi/ft |
| | | X2. Gradiente de presión de fractura | <0,48 psi/ft |
| | | X3. Geofísica de la formación | No controlable |
| | | X4. Tiempo de fractura | Infinito |
| | Y2. Dosificación de la lechada | X5. Peso de la mezcla en seco. | <150 ton |
| | | X6. Perdida de circulación | <10 bls/hr |
| | | X7. Costo de lechada | < 20 USD/ft |
| | | X8. Densidad del aditivo | 7 a 11 ppg |
| | Y3. Cantidad de agua | X9. Requerimiento de agua | 60 a 200 % |
| | | X10. Cantidad de aditivo | Composición |
| | Y4. Afinidad entre los componentes | X11. Fuerzas intermoleculares | No controlable |
| | | X12. Naturaleza de los aditivos | No controlable |
| | | X13. Composición de los aditivos | Variable aleatoria |
| | Y5. Disposición de los aditivos | X14. Comercialización | Variable aleatoria |
| | | X15. Costos por tonelada | < 200 USD/ton |

Nota: Resultados obtenidos y adaptados del Software estudiantil CEMSEI.

### 5.3.2. Planeación del diseño de experimentos DOE

El análisis de las variables se puede desarrollar a partir de distintas herramientas estadísticas que permiten discriminar unas de otras, como los contrastes de hipótesis, intervalos de confianza, regresiones simples o múltiples, ANOVA, entre otras. Pero en este caso se realizó un diseño de experimentos (DOE), en la Tabla 33 se puede observar la planeación del DOE, la cual se realizó

con el fin de determinar la significancia que tienen las causas sobre el efecto, basado en las variables X's Vitales.

Impacto fuerte, Fácil de cambiar

Impacto moderado, Moderadamente fácil de cambiar

Impacto débil, Difícil de cambiar

**Tabla 35.**

*Planeación del DOE*

| *Factores* | ***Fuerza del impacto sobre Y*** | ***Fácil de cambiar*** | ***¿Incluir como factor en el experimento?*** | ***Si es factor del DOE*** | | ***Significancia*** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | ***Nivel actual*** | ***Nivel propuesto*** | |
| *X1: Gradiente de presión de poro (0,34 a 0,43 psi/ft)* | | | *SI* | *> 0,34 < 0,43 psi/ft* | - | *Es significativo, por lo que puede alterar el equilibrio geo-mecánico de la formación.* |
| *X2: Gradiente de presión de fractura (<0,48 psi/ft)* | | | *No* | *< 0,48 psi/ft* | - | *No es significativo, porque se busca una densidad que no se vea afectada por este valor.* |
| *X3 Geofísica de la formación* | | | *No* | *Aleatoria* | - | *No es significativo, pero brinda información importante para el desarrollo del proyecto.* |
| *X4: Tiempo de fractura. (Infinito)* | | | *NO* | *Infinito* | - | *No es significativo, se espera que el momento de la* |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | *fractura nunca ocurra.* |
| *X5: Peso de la mezcla en seco. (<150 ton)* | | | *SI* | *< 150 ton* | *140 ton* | *Es significativo, el peso afectara directamente el peso de la lechada. Según la simulación se toma el dato de referencias.* |
| *X6: Pérdida de circulación. (<10 bls/hr)* | | | *SI* | *<10 bls/hr* | *1 bl/hr* | *Es significativo, se espera que sea mínima o nula.* |
| *X7: Costo de lechada. (< 20 USD/ft)* | | | *SI* | *-* | *20 UDS/ft* | *Es significativo, se busca tener lechadas económicamente rentables.* |
| *X8: Densidad del aditivo. (7 a 11 ppg)* | | | *SI* | *7 a 11 ppg* | *-* | *Es significativo, se busca que ayuden a disminuir la densidad de la lechada.* |
| *X9: Requerimiento de agua.* (60 a 200 %) | | | *SI* | *60 a 200%* | *-* | *Es significativo, porque ayuda a aproximar la densidad de la lechada a la del agua.* |
| *X10: Cantidad de aditivo en la lechada.* | | | *No* | *Disponibilidad* | *-* | *No es significativo dado que depende de la fabricación y disponibilidad.* |
| *X11: Fuerzas intermoleculares* | | | *SI* | *Reactividad* | *-* | *Es significativo, debido a que depende de las fuerzas intermoleculares y disposición de las moléculas, mejorando la resistencia del arreglo molecular.* |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *X12: Naturaleza de los aditivos* | | | *No* | - | - | *No se puede controlar.* |
| *X13: Composición de los aditivos* | | | *No* | - | - | *Aunque afectan directamente la mezcla, están estrechamente relacionados con su naturaleza y no se puede variar.* |
| *X14: Comercialización* | | | *No* | - | - | *No afecta la densidad de la lechada.* |
| *X15: Costos por tonelada. (<200 USD/ton)* | | | *No* | - | *200 USD/ton* | *Afecta el costo de adquisición de materia prima, pero ya se realizó un enfoque en el costo de la lechada.* |

Nota: Adaptado del caso de estudio Six Sigma de Moyano Silva y Acevedo Valdivieso; Mejoramiento del proceso productivo de Extractora Vizcaya S.A.S aplicando la metodología de Seis Sigma.

***5.3.2.1. Causas Importantes Enfocadas a la Y=f(X's).*** De acuerdo con la planeación del diseño de experimentos, entran en estudio las siguientes variables;

**Y1**: Geología del Subsuelo – **X1**: *< 0,43 psi/ft*

**Y2**: Dosificación de la lechada – **X5**: <150 ton **X6**: <10 bbl/hr, **X7**: <20 USD/ft **X8**: <11 ppg

**Y3**: Cantidad de agua – **X9**: >60%

**Y4**: Afinidad entre los componentes – **X11**: Fuerzas de atracción elevadas.

Para Y1 y Y4 no es necesario hacer un diseño factorial puesto que son variables aleatorias, que dependen directamente de factores externos como la composición química, fuerzas de atracción entre los componentes y características petrofísicas de las formaciones.

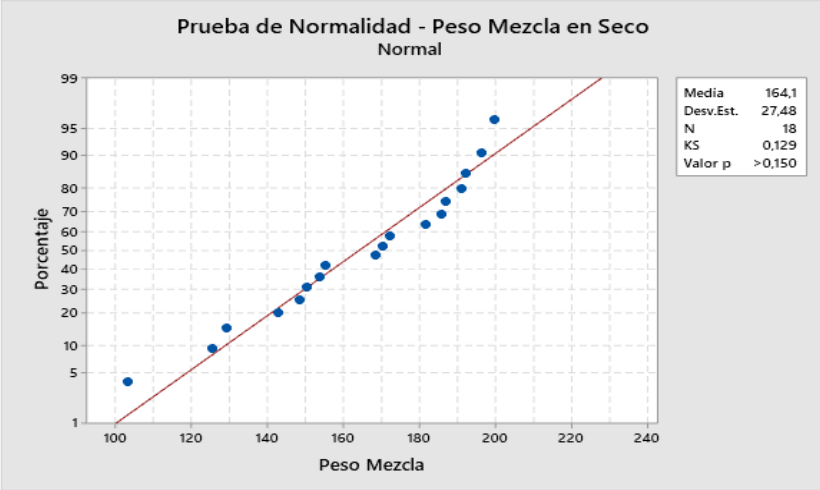
***5.3.3.2. Pruebas de normalidad.*** Para comenzar a hacer pruebas de significancia es necesario que los datos se encuentren dentro de una distribución de probabilidad normal, en forma de campana de Gauss, con el fin de modelar una tendencia hacia un rango de valores promedio, que

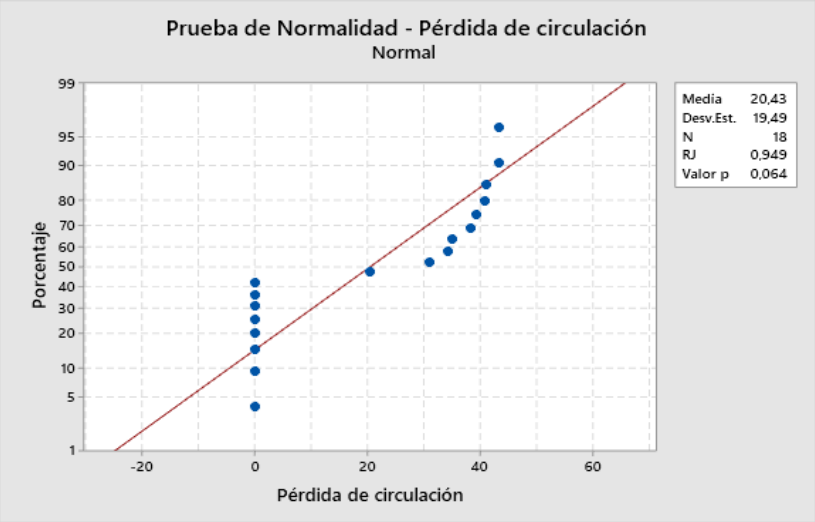
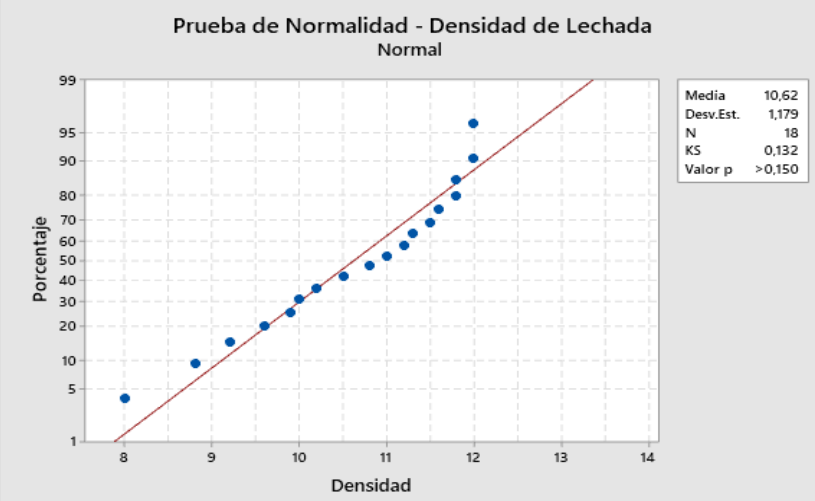
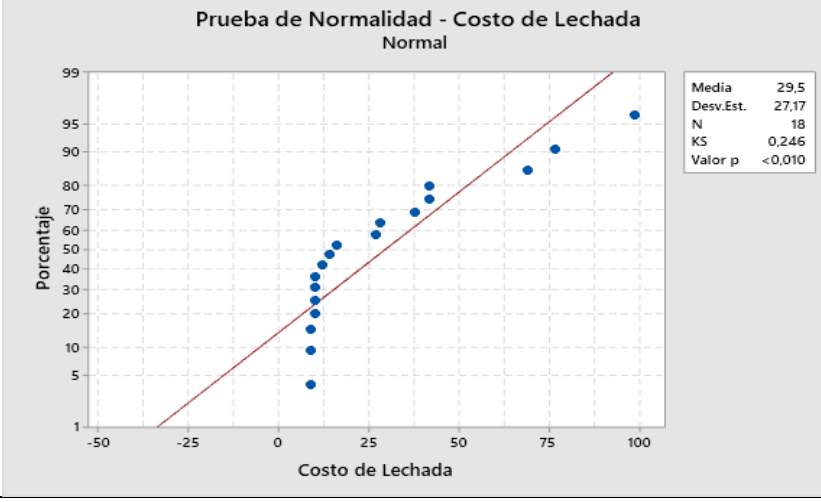
representa los datos y cualidades que se desea obtener con el estudio de probabilidad, y poder acercarse a diversas distribuciones de probabilidad discreta, como la distribución binomial y la distribución de Poisson.

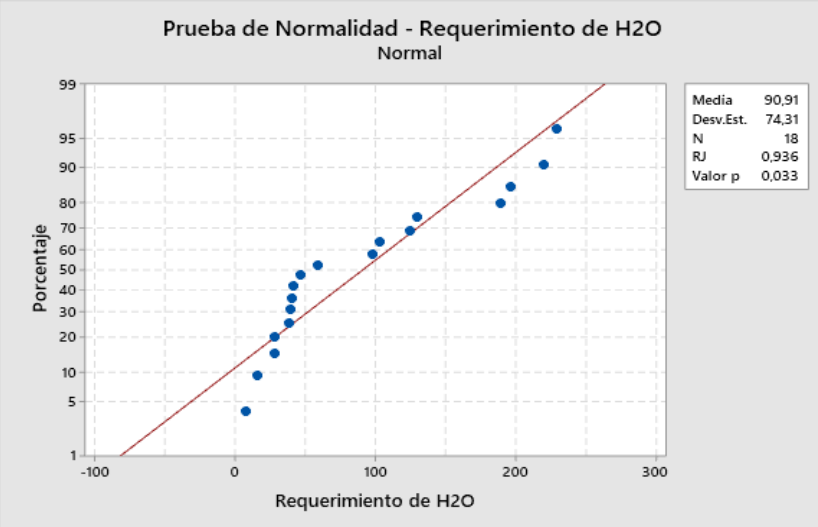
Para el análisis se evaluaron las variables del métrico principal (Y) a partir de la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov, Anderson-Darling y Ryan-Joiner, las cuales se pueden analizar en los Apéndices del T al X. utilizando como herramienta Minitab 2019.

**Tabla 36.**

*Pruebas de normalidad por variables*

| Variables | Pruebas de Normalidad | Conclusión |
|---|---|---|
| **Peso de Mezcla en Seco (ton)** |  | Valor P >0,05, los datos toman una distribución normal |

| | | |
|---|---|---|
| **Pérdidas por Circulación (bbl/hr)** |  | Valor P>0,05 los datos se comporta n de manera normal. |
| **Densidad de los Aditivos de la lechada** |  | Valor P>0,05 los Datos se comporta n de manera normal. |
| **Costo de Lechada** |  | Valor P<0,05 los datos no se comporta n de manera normal. |

| | | |
|---|---|---|
| **Requerimiento de Agua de la lechada.** |  | Valor P<0,05 los datos no se comporta n de manera normal. |

Nota: Adaptado del caso de estudio Six Sigma de Moyano Silva y Acevedo Valdivieso; Mejoramiento del proceso productivo de Extractora Vizcaya S.A.S aplicando la metodología de Seis Sigma.

El X9; requerimiento de agua y X7; costo de la lechada, no se ajustan a una distribución normal según las gráficas de normalidad. Este comportamiento permite clasificar a X7 y X9, como variables discretas, porque no pueden tomar ningún valor entre dos consecutivos. Y las variables X5, X6 y X8, presentan un comportamiento normal, ajustado a variables continuas, lo que permite que se pueda correlacionar cualquier valor dentro de un intervalo.

Se procede a aplicar la herramienta estadística Minitab, para realizar el Diseño de Experimento.

### 5.3.4. Diseño de experimento para Y2

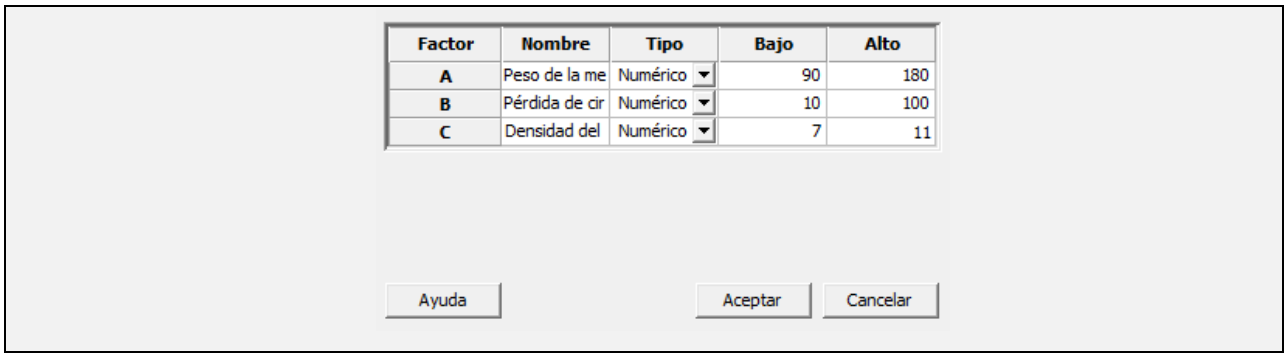
Después de analizar la significancia, tendencia y límites de las diferentes causas para obtener una lechada liviana, se realizó el análisis experimental basados en las variables que presentan comportamiento normal.

Se realizó un diseño factorial para el métrico primario Y2, de tres factore (X5, X6 y X8) y dos niveles, estos niveles se definieron basados en los valores medidos en el simulador, los cuales se correlacionan entre sí, para obtener la iteración entre las diferentes variables.

Los niveles de las variables de definen como bajo y alto, en la Figura 21 se puede observar como quedó la tabla, pérdidas de circulación (10, 100) bbl/hr, Peso de la mezcla en seco (90, 180) Ton @ 2600 ft, y densidad del aditivo (7, 11) ppg. Se realizan 3 réplicas, con el fin de determinar la variabilidad de los datos obtenidos al observar los resultados.

**Figura 21**

*Diseño factorial 2^3 (dos niveles, tres factores)*




Nota. Los tres factores del análisis y sus niveles se definieron basados en la simulación. Tomado de Minitab 2019.

Después de ejecutar el diseño Factorial, Minitab arroja la Tabla 37. Donde muestra el diseño base 2^3=8, con 3 réplicas cada uno, para un total de 24 corridas.

**Tabla 37.**

*Resumen del diseño factorial*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Factores: | 3 | Diseño de la base: | 3; 8 |
| Corridas: | 24 | Réplicas: | 3 |
| Bloques: | 1 | Puntos centrales (total): | 0 |

Nota. Tomado de Minitab 2019.

El comportamiento de las variables es confiable, ya que se adapta a un modelo de regresión ajustado en un porcentaje mayor a 90. El resumen de la regresión del modelo se muestra a continuación;

**Tabla 38.**

*Resumen del modelo de regresión*

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|---|---|---|---|
| 0,152753 | 98,34% | 97,61% | 96,26% |

Nota. Tomado de Minitab 2019.

De acuerdo con las hipótesis planteadas en la planeación del DOE, las métricas avaladas por el proceso estadístico se analizan, con respecto a los indicadores de valor P, valor F, SC y MC ajustados, como se observa en la Tabla 39.

**Tabla 39.**

*Análisis de varianza*

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---|---|---|---|---|---|
| Modelo | 7 | 22,0650 | 3,1521 | 135,09 | 0,000 |
| Lineal | 3 | 21,5250 | 7,1750 | 307,50 | 0,000 |
| Peso Mezcla Seco | 1 | 10,9350 | 10,9350 | 468,64 | 0,000 |
| Pérdida Circulación | 1 | 9,3750 | 9,3750 | 401,79 | 0,000 |
| Densidad Aditivo | 1 | 1,2150 | 1,2150 | 52,07 | 0,000 |
| Interacciones de 2 términos | 3 | 0,5250 | 0,1750 | 7,50 | 0,002 |
| Peso Mezcla Seco*Pérdida Circulación | 1 | 0,3750 | 0,3750 | 16,07 | 0,001 |
| Peso Mezcla Seco*Densidad Aditivo | 1 | 0,1350 | 0,1350 | 5,79 | 0,029 |
| Pérdida Circulación*Densidad Aditivo | 1 | 0,0150 | 0,0150 | 0,64 | 0,434 |
| Interacciones de 3 términos | 1 | 0,0150 | 0,0150 | 0,64 | |
| Peso Mezcla Seco*Pérdida Circulación*Densidad Aditivo | 1 | 0,0150 | 0,0150 | 0,64 | |
| Error | 16 | 0,3733 | 0,0233 | | |
| Total | 23 | 22,4383 | | | |

Nota: Comportamiento de varianza, Tomado de Minitab 2019

Las variables se pueden modelar por la siguiente ecuación de regresión, teniendo la densidad de la lechada en función de las componentes X5, X6 Y X8, las cuales están definidas en la planeación del DOE. La Ecuación (7) describe matemáticamente la relación de los resultados óptimos.

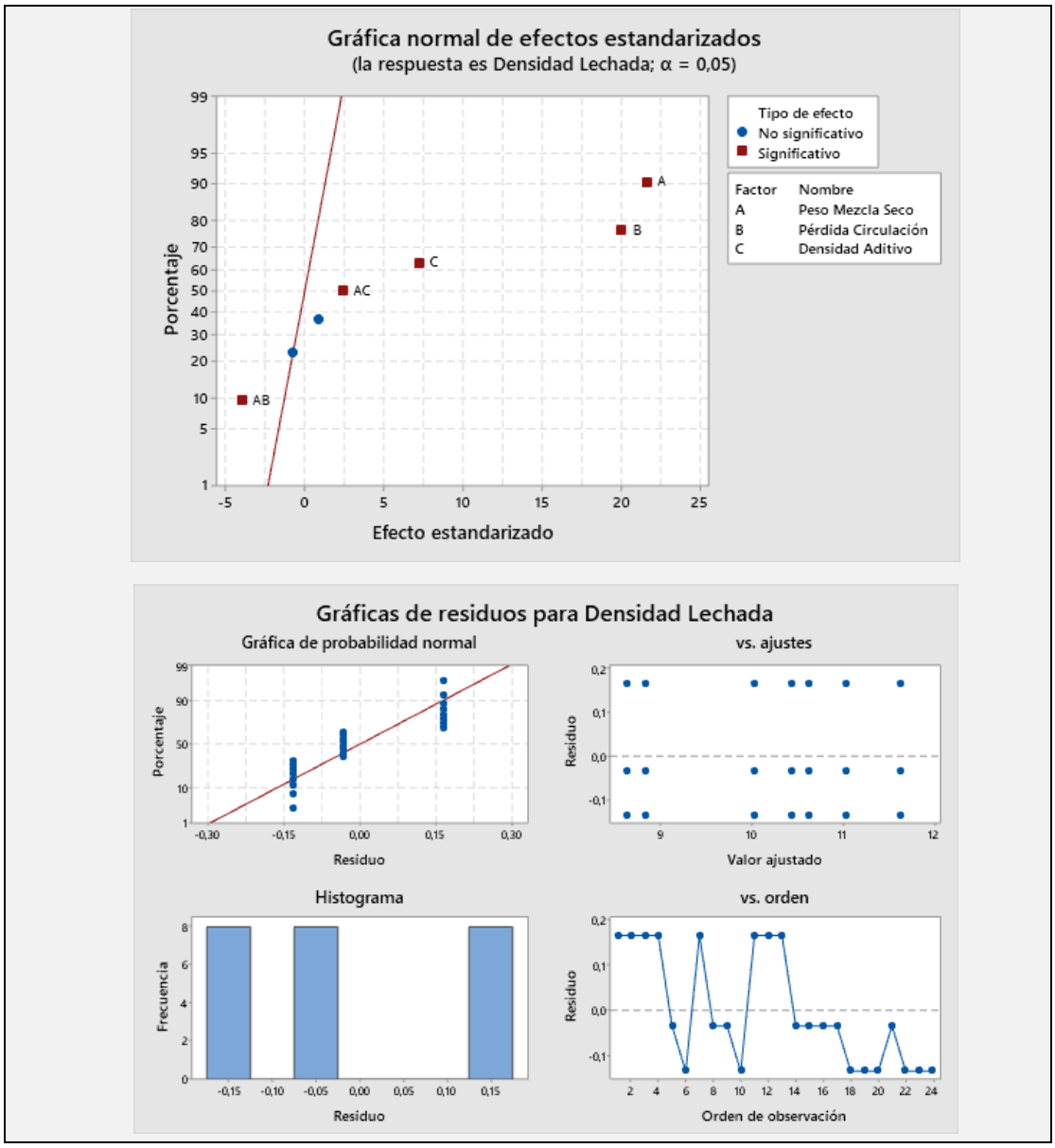
$$PC: Pérdida\ Circulación;\ \ PMS: Peso\ de\ la\ Mezcla\ en\ Seco;\ \ DA: Densidad\ del\ Aditivo$$

$$\begin{aligned} \textit{Densidad Lechada} = {} & 7{,}461 + 0{,}00784\ PMS + 0{,}0122\ PC - 0{,}0611\ DA - 0{,}000006\ PMS \\ & * PC + 0{,}001173\ PMS * DA + 0{,}00111\ PC * DA \\ & - 0{,}000006\ PMS * PC * DA \end{aligned} \quad (7)$$

En la Figura 22, la distribución normal de efectos estandarizados, permite analizar el nivel de significancia de las variables con respecto a la métrica principal Y2, validando las X's vitales y la iteración del peso de la mezcla en seco con la densidad del aditivo. Y anulando la iteración del peso de la mezcla con las perdidas por circulación. Por lo cual esta iteración no se tiene en cuenta para realizar los cálculos de densidad de la lechada.

**Figura 22**

*Graficas resultantes del diseño de experimentos*

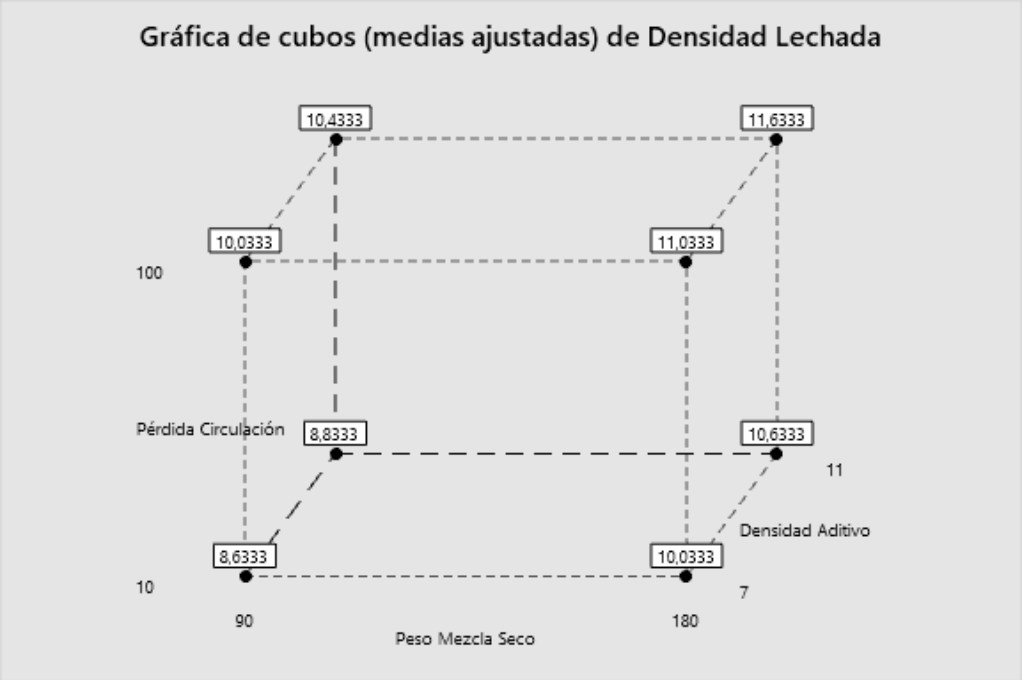


Nota. Representa los parámetros que intervienen en la creación de la lechada, el nivel de significancia y los residuos de las variables. Tomado de Minitab. 2019.

En la Figura 23. se observa una gráfica en tres dimensiones representando las condiciones límites del diseño de la lechada liviana, en la cual se pueden medir infinitos puntos dentro del volumen, garantizando lechadas de cemento dentro de los parámetros requeridos, sin salirse de la hipótesis aprobada.

**Figura 23**

*Grafica de cubos (medias ajustadas) de densidad lechada*




Nota. Representa una gráfica tridimensional con respecto a las X’s vitales. Tomado de Minitab. 2019.

Después de obtener el volumen de respuestas, se realizaron las diferentes predicciones en Minitab para optimizar la densidad de la lechada, dando como resultado la mejor disposición de las variables para ajustarlo a una densidad de lechada óptima.

**Tabla 40.**

*Parámetros, solución y predicción de respuesta múltiple*

| Parámetros | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Respuesta | Meta | Inferior | Objetivo | Superior | Ponderación | Importancia |
| Densidad Lechada | Mínimo | | 8,5 | 11,8 | 1 | 1 |

| Solución | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Solución | Peso Mezcla Seco | Pérdida Circulación | Densidad Aditivo | Densidad Lechada Ajuste | Deseabilidad compuesta | Solución |
| 1 | 90 | 10 | 7 | 8,63333 | 0,959596 | 1 |

| Predicción de respuesta múltiple | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Variable | | | Valor de configuración | |
| Peso Mezcla Seco | | | 90 | |
| Pérdida Circulación | | | 10 | |
| Densidad Aditivo - Ajustada | | | 7 - 8,44 | |
| Respuesta | Ajuste | EE de ajuste | IC de 95% | IP de 95% |
| Densidad Lechada | 8,6333 | 0,0882 | (8,4464; 8,8203) | (8,2594; 9,0072) |

Nota: Tomado de Minitab. 2019.

El Diseño de Experimentos propone una configuración optima dentro de un intervalo de confianza del 95% con un peso de la mezcla en seco de 90 Ton @ 2600 ft de profundidad, pérdidas por circulación parciales y densidad de los aditivos relativamente baja aproximado a 8,44 ppg. Y un intervalo de predicción en un rango de (8,259; 9,007) ppg.

La ejecución, desarrollo y conclusión del DOE se puede observar en el Apéndice Y.

### 5.4. Mejorar

La Figura 23, revela finitas soluciones para crear una dosificación adecuada, de acuerdo con las X’s vitales que son significativas según el análisis del DOE. En el planteamiento de la investigación se describe el problema raíz, que son las formaciones con presiones subnormales.

En Colombia, el Campo Castilla de Ecopetrol S.A, se caracteriza por tener pozos con yacimientos depletados, debido a la alta producción durante varios años, lo que ha generado formaciones naturalmente fracturadas, formaciones con alta permeabilidad y formaciones altamente variables (zonas heterogéneas).

Durante la perforación de pozos se pueden presentar múltiples problemas operacionales que causan además de un incremento de los tiempos no productivos, incremento de costos y otros

problemas asociados. En el Campo Castilla de Ecopetrol S.A. se ha identificado que uno de los problemas más recurrentes son los eventos de pérdida de circulación (Chacón Carrero & Munévar, 2018)

Por lo cual se recomienda las siguientes mejoras para solucionar el problema de integridad del pozo, por medio de una adecuada formulación de lechada de cemento liviana. A continuación, se muestran las soluciones potenciales según las herramientas utilizadas en el desarrollo del análisis. Propuesta de mejoramiento para el campo Castilla;

**Tabla 41.**

*Soluciones según el análisis de variables en Minitab*

| Métrico Primario Principal | Métricos Vitales | Configuración (X5; X6; X8) | Densidad de Salida (ppg) |
|---|---|---|---|
| Densidad de Lechada de Cemento | X5: Peso de la mezcla en seco (Ton) | (90;10;7) | 8,25 |
| | | (90;10;11) | 8,45 |
| | X6: Perdida de circulación (Bls/hr) | (90;100;7) | 9,66 |
| | | (90;100;11) | 10,06 |
| | X8: Densidad del aditivo (ppg) | (180;10;7) | 9,84 |
| | | (180;10;11) | 10,26 |

Nota: Modelo de Predicciones Minitab.

Se seleccionaron las mezclas, tomando como limite el volumen de condiciones óptimas obtenido anteriormente, con el fin de colocar las mejores predicciones del análisis.

Según las densidades obtenidas en Minitab, se seleccionan las dosificaciones que más se acerquen a las configuraciones en la simulación CEMSEI. Y se describen las dosificaciones optimas en la Tabla 42.

**Tabla 42.**

*Soluciones según el análisis de lechadas CEMSEI*

| Lechada | Aditivo | Concentración en peso % | Densidad (ppg) | Requerimiento de agua (% peso) | Peso de la mezcla en seco (Ton) | Presión Hidrostática Lechada (psia) | Perdidas de Circulación (Bbl/h) | Densidad de la Lechada ECD (ppg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LCL6 | Tierras Diatomáceas | 22,5 | 11 | 220 | 125,3 | 1379 | 0 | 10,2 |
| | Gilsonita | 10 | 12 | 60 | | | | |
| | Perlita Expandida | 20 | 9,5 | 110 | | | | |
| LCL7 | Nitrógeno | 52 | 7 | 40 | 170,4 | 1338 | 0 | 9,9 |
| | Microesferas de alta resistencia | 5 | 8 | 35 | | | | |
| | Oxido de Magnesio | 22 | 11 | 10 | | | | |
| LCL8 | Vermiculita Exfoliada | 83,3 | 9,5 | 220 | 103,1 | 1298 | …. | 9,6 |
| | Metalsilicato de Sodio Anhidro | 5 | 9,7 | 60 | | | | |
| | Nanotubos de Carbono | 0,2 | 10,5 | 310 | | | | |
| LCL9 | Perlita Expandida | 20 | 9,5 | 40 | 155,2 | 1244 | ….. | 9,2 |
| | Nitrógeno | 84 | 7 | 40 | | | | |
| | Microesferas de alta resistencia | 15 | 8 | 35 | | | | |
| LCL10 | Nanotubos de Carbono | 0,1 | 9,5 | 310 | 148,3 | 1190 | ….. | 8,8 |
| | Nanopartículas de alúmina | 0,5 | 8 | 310 | | | | |
| | Nitrógeno | 130 | 7 | 40 | | | | |
| Cemento Modificado | Bentonita Sódica | 3 | 9 | 33 | 129 | 1082 | …. | 8 |
| | Poliéster | 10 | 11,5 | 45 | | | | |
| | Aserrín | 24 | 2,5 | 60 | | | | |
| Cemento Látex | Acetato de polivinilo | 70 | 9,9 | 40 | 142,7 | 1352 | 0 | 10 |
| | Emulsión de estireno-butadieno | 30 | 8,5 | 210 | | | | |

Nota: Tomado de CEMSEI.

Se recomienda el uso de las anteriores dosificaciones, buscando evitar problemas de integridad de pozos por causa del ECD de la lechada de Cemento, aunque es necesario tomar en cuenta los ajustes del plan de control. Toca desarrollarlo experimentalmente.

Se debe establecer un comité de control, que regule los niveles correctos en toda la línea de diseño de la lechada y analicen las irregulares mostradas en el control estadístico, esto con el propósito de comprometer el personal a enfocar los esfuerzos en las operaciones críticas del proceso. Debido a que en este proyecto no se tiene en cuenta los operarios o trabajadores en la fabricación de las lechadas, estas etapas serán ejecutadas brevemente.

## 5.5. Controlar

### 5.5.1. Plan de control

Al momento de realizar el análisis experimental, es necesario conocer las características fundamentales de los aditivos que se buscan utilizar, por lo cual se crea un plan de control, con el fin de describir las características y recomendaciones teóricas del uso de estos componentes, facilitando a las partes interesadas el estudio de las lechadas livianas. Tal como se observa a continuación;

- En los aditivos nano moleculares, es importante analizar su ubicación molecular dentro de una matriz de cemento, debido a que estos se ubican estratégicamente, lo que aumenta potencialmente la resistencia a la compresión de las lechadas. Pero, por economía se recomienda el uso en cantidades pequeñas.
- El Óxido de Magnesio no se debe utilizar en gran cantidad porque disminuye rápidamente el tiempo de fraguado. En algunos casos, se hace necesario un pretratamiento inicial para reducir su reactividad, como sucede con el MgO de elevada pureza, al que se debe realizar una calcinación previa a 1300 ºC para obtener una adecuada velocidad de disolución y reducción de la densidad.

- Al elevar rápidamente la temperatura de la vermiculita se genera una expansión conocida como exfoliación, resultando un producto utilizado como agregado de baja densidad. Las Vermiculita Exfoliada funciona como buen extendedor, por su capacidad de absorber agua, pero no se debe usar en exceso, porque disminuye la resistencia a la compresión del cemento.
- La perlita expandida se caracteriza por la capacidad para expandirse, además su alta composición de silicio que brinda buena resistencia a la compresión y el Óxido de Aluminio en un 12 a 15% que aumenta la afinidad con el agua y disminuye la densidad de la mezcla.
- La Gilsonita es multifuncional, tapona microfracturas, une y sella todo tipo de formaciones y reduce los costos al disminuir el uso de aditivos. La Gilsonita forma un enlace físico y químico con formaciones permeables, y crea así un sello eficaz que previene el paso de fluido de perforación
- Uno de los mejores aditivos es las Tierras Diatomeas, por su alto requerimiento de agua y además cuenta con una estructura cristalina compuesta por Oxido de Silicio en un 90%, lo que permite aumentar las propiedades físico-mecánicas del cemento efectivamente.
- Sin duda el nitrógeno es uno de los mejores fluidos utilizados para el diseño de las lechadas livianas espumadas, pero se recomienda el uso en compañía de otros aditivos, con el fin de evitar el aumento excesivo de porosidad, lo que puede llegar aumentar la permeabilidad y se pierde la función de aislante de zonas no deseadas.
- Es importante asegurar que las microesferas de alta resistencia deben ser premezcladas en seco con el cemento y nunca en agua debido a que su gravedad especifica es menor que el agua y puede verse alterado el resultado de la densidad por esta acción.

- El Metalsilicato Anhidrido se debe mezclar en porcentajes menores al 3% en peso, no es conveniente obtener soluciones de mayor concentración, por cuanto son más difíciles de decantar y porqué en esas condiciones se precipita un silicato insoluble probablemente muy ácido.
- se decidió seleccionar nanotubos de carbono dopados con nitrógeno, nanotubos de carbono dopados con oxígeno y una mezcla de ambos en proporción 1:1.
- Los sistemas de lechadas con Nano Alúmina Alfa muestran mejor comportamiento que los otros nano aditivos, este efecto es gracias a la etringuita (estructura tipo aguja) además del cambio notorio de la morfología del gel, lo cual tiene un efecto importante en las propiedades mecánicas de los sistemas.
- Los aditivos expansivos no afectan la resistencia a la compresión, pero si disminuyen significativamente la densidad de la mezcla, por efecto de las fuerzas químicas de repulsión.

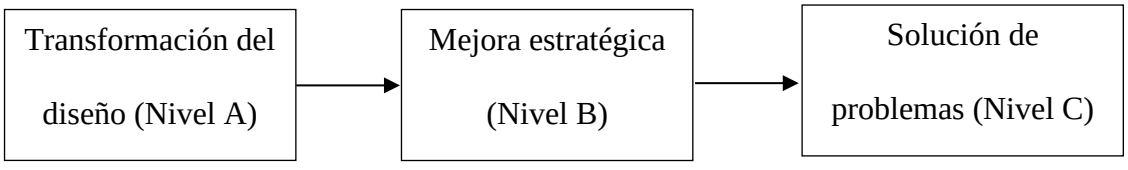
### 5.5.2. Plan de monitoreo

Se formula un plan de transición que toma todos los temas que deben adquirirse para el conocimiento básico del control estadístico, para que de esta manera todas las personas pertenecientes al comité de control sean aptas al oficio de regular los procesos y proponer sostenidos en evidencias estadísticas mejoras en las distintas etapas productivas.

***5.5.2.1. Niveles de transformación 6σ.*** En la historia de los esfuerzos por 6σ, se han dado tres niveles de profundidad y amplitud de la iniciativa, que se explica a continuación.

**Figura 24**

*Niveles de implementación seis sigmas*



Nota: Tomado y modificado de Acevedo Valdivieso, A. C., & Moyano Silva, L. J. (2019). Mejoramiento del proceso productivo de Extractora Vizcaya S.A.S aplicando la metodología de Seis Sigma.

- *Nivel A*

En este nivel se marca por la alta gerencia un nuevo ritmo, donde se argumenta porque es necesaria la aplicación a base de debates en los que se entenderá su función, no como una estrategia económica, si no como una iniciativa que va dirigida a la competitividad, enfocándola al requerimiento de la formación. Lo que abre la posibilidad a nuevas ideas y una visión al cambio basada en la mejora continua.

- *Nivel B*

En este nivel la estrategia se dirige a atender algunas unidades, áreas o necesidades del diseño, la iniciativa no es tan ambiciosa, y se enfoca en mejoras por partes, su desafío no es dirigir el cambio en una etapa, porque puede ocasionar aislamiento en algunas etapas de cadena, pues no tendrían conocimiento total de los aportes alcanzados en el proceso.

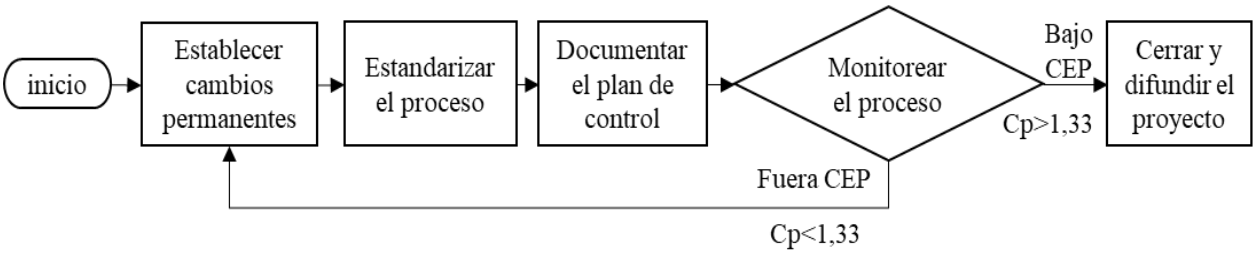
- *Nivel C*

En este punto, los esfuerzos van dirigidos a problemas específicos, que no han solucionado en el tiempo, este nivel puede ser el adecuado en algunas empresas en las que no se quiere hacer demasiadas labores, y más bien buscan aprovechar los beneficios de aplicar el DMAIC en algunas áreas, lo que implicará que solo unos pocos estén involucrados, y probablemente la iniciativa pase a la historia en un determinado tiempo.

### *5.5.2.2. Diagrama de actividades de control.*

**Figura 25**

*Diagrama de actividades de control*




Nota: Tomado y modificado de Acevedo Valdivieso, A. C., & Moyano Silva, L. J. (2019). Mejoramiento del proceso productivo de Extractora Vizcaya S.A.S aplicando la metodología de Seis Sigma.

Se recomienda el ciclo de mejora continua con el fin de disminuir las causas de error y monitorear el proceso, estableciendo cambios y documentándolos dentro del plan de control. Siguiendo los criterios de aceptación para un proceso capaz, y controlable, en la que se controla desde la base inicial, y se monitorea a partir de la comparación de los procesos históricos, versus los actuales.

## 6. Conclusiones

- Las mejores dosificaciones según el análisis estadístico son las que cumplen con las características de la Figura 23. Grafica de Cubos (medias ajustadas) de densidad de la lechada. Especialmente las que se seleccionaron según la metodología DMAIC y se plantearon en la etapa de mejoras.
- Uno de los materiales más viables para el diseño de lechadas livianas es el aluminio el cual posee una afinidad especial con el agua. Se analizó que los aditivos compuestos por este elemento, desarrollan características especiales al disolverse en agua, buena capacidad de adsorción, genera fuerzas refractarias en la mezcla, expandiendo la lechada y favoreciendo la densidad, se pueden destacar las lechadas de cementos que contienen tierras diatomáceas, nano-alúmina, perlita expandida y los cementos expansivos.
- Las nano-moléculas tienen gran impacto en las lechadas livianas por su distribución molecular otorgando empaquetamientos similares al diseño de un edificio, pero a escala nano, lo que permite que las cargas se distribuyan equitativamente, para obtener como resultado una lechada con excelentes propiedades físico-mecánicas.
- Los aditivos que mejor comportamiento físico-mecánico desarrollan en la mezcla son los que tienen una estructura cristalina definida, debido a que estos, cuentan con fuerzas intermoleculares estables que permiten que la estructura sea más resistente.
- Con la ecuación obtenida en el Diseño de Experimentos se puede analizar comportamiento de la densidad de la lechada de cemento en función de las x’vitales significativas, obtenidas de los análisis de normalidad y los análisis de desviación estándar que presentan cada uno de los parámetros analizados en Minitab. Todo esto

permite encajar la métrica principal en un análisis Six Sigma, para medir, controlar y analizar su comportamiento con respecto a los factores involucrados en el diseño de la lechada.

- Entre las mejores dosificaciones obtenidas con un intervalo de confianza y certeza del 95% se destacan las lechadas con nanopartículas, cementos látex y modificados, debido a que son dosificaciones comprobadas en investigaciones previas y sustentadas experimentalmente a nivel de laboratorio. Lo cual da garantía a los resultados obtenidos.

# 7. Recomendaciones

- Se recomienda a los operarios de cementación de pozos del Campo Castilla, analizar experimentalmente cada una de las posibles mejoras planteadas en la conclusión. Con el fin de identificar dosificaciones de lechadas livianas que reduzcan perdidas por circulación de fluidos y eviten fracturas inducidas en las formaciones con presiones subnormales.
- CEMSEI no remplaza el análisis experimental, sino que es un complemento para medir los datos de laboratorio, además, es un simulador que se puede usar con confianza ya que genera resultados similares al software SIMENTAR de origen brasilero, que es de la empresa Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS) y lo utilizan con alto grado de confianza en las operaciones perforación y cementación de pozos.
- Para simular en CEMSEI se deben conocer las propiedades de la formación a cementar y las propiedades de los fluidos a utilizar. Una de las desventajas es que no contempla la resistencia a la compresión del cemento, la disposición nano-molecular y las fuerzas expansivas que desarrollan algunos aditivos. Por lo cual es necesario llevar el análisis del simulador a laboratorio.
- Se debe tener en cuenta que, a nivel de procesos, SIX SIGMA evalúa la corrección de actividades que se desarrollan dentro de un lote de producción, mientras que, a nivel operacional, evalúa la optimización de las herramientas y materiales utilizados para realizar una tarea, esta última es la que se desarrolló en la presente investigación.
- La presente investigación se puede utilizar como una metodología para analizar estadísticamente las diferentes operaciones en la industria del petróleo.

## Referencias Bibliográficas

Acevedo Valdivieso, A. C., & Moyano Silva, L. J. (2019). *Mejoramiento del proceso productivo de Extractora Vizcaya S.A.S aplicando la metodología de Seis Sigma.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Alvarez Herrera, M. C., & Marquez Diaz, E. G. (2016). *Evaluación De Los Resultados De Cementación De La Sección Intermedia De Un Pozo Inyector De Un Campo En La Cuenca Llanos Orientales Por Medio De La Simulación Del Uso De La Tecnología Cabeza Rotativa De Cementación.* Bogotá: Fundación Universidad de America.

Americam Petroleum Istitute. (2010). Specification for Drilling Fluids– Specifications and Testing. *API Specification 13A 18th Edition* , 22.

American Gilsonite Company. (2019). *Resumen De Producto Para Fluidos De Perforación.* Houston.

Amorocho, P. R., & Badillo, J. (2012). *Influencia De La Composición Mineral De Rocas Arcillosas En La Estabilidad De Pozos Petroleros.* Boletín de Geología Vol. 34.

ANH. (2007). *Open Round Colombia.*

ANH. (2014). *Agencia Nacional de Hidrocarburos. Colombia. Poster 8.1. Cuenca Llanos Orientales.* Obtenido de https://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Campos.pdf

ANH. (2016). *Open Round Colombia.* Llanos Orientales.

Arias Martínez, H. Y. (2012). *Patronamiento de las tendencias direccionales en las formaciones en la cuenca de los Llanos Orientales.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Baggini, S. (2014). *Sellado de fracturas: Avances en el control de pérdidas de circulación.* Oilfield Review Otoño. Nº 3.

Balza, A., Corona, O., Alarcón, A., Echevarrieta, J., Goite, M., & González, G. (2016). *Estudio Microestructural Del Cemento Portland Aditivado Con Nanomateriales.* Los Teques: PDVSA Intevep, S.A.

Bubnov, A. S., Boyko, I. A., & Khorev, V. S. (2015). *Influence of chemical reagents and additives on the rheological properties of lightweight cement slurry with exfoliated vermiculite.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Carreño Lopez, F., & Mácias Díaz, J. S. (2017). *Aplicación De La Metodología Tripod Beta Modificada Para El Diagnóstico De Las Causas Raiz De Los Problemas Operacionales Presentados En La Perforación De Los Pozos K, L Y M En El Campo Castilla.* Bogotá D.C.: Fundación Universidad De América.

Chacón Carrero, D. C., & Munévar, B. G. (2018). *Propuesta De Un Plan De Mejoramiento Para La Prevención Y Control De Las Pérdidas De Circulación En La Perforación De Los Pozos A Y B En El Campo Castilla De Ecopetrol S.A.* Bogotá: Fundación Universidad América.

ECOPETROL S.A. . (2014). *Programa de Perforación.*

ECOPETROL S.A. (Enero de 2004). *Carta Petrolera* . Obtenido de Edición 107 : http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera/empresa.htm

Escalante, E. J. (2007). *Seis - Sigma metodología y técnicas.* Mexico D.F.: LIMUSA, S.A.

EUCLID GROUP EUCOMEX. (s.f.). *Adhesivos & Puentes de Adherencia. Aditivo adherente.* México.

Fabila Martínez, L. (2013). *Efecto De La Diatomita En Las Propiedades Del Suelo Para Reducir El Impacto Ambiental Causado Por El Uso De Fertilizantes Químicos.* Toluca, México: Universidad Autónoma Del Estado De México.

Facho Rios, G. E. (2017). *Mejora de procesos en una empresa textil exportadora mediante la metodología Six Sigma.* Lima: E.A.P. de Ingeniería Textil y Confecciones.

Formosa Mitjans, J., Aranda, M. A., Chimenos Ribera, J. M., Rosell Amigó, J. R., & Fernández Renna, A. I. (2008). Chemically bonded cements formulated with by-products of magnesium oxide. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 47*, 249-258.

Galeana Castillejos, C. (2019). *Estado Mecánico De Un Pozo*. Obtenido de EPMEX - Especialistas Petroleros Mexicanos A.C.: https://epmex.org/news/2019/07/22/estado-mecanico-de-un-pozo/

Garcia Madrid, T., & Horstmann Largacha, P. (1986). *Hormigones y Morteros Sin Retracción.* Revista de Obras Públicas.

Garza, R. C., Gonzales, C. N., Rodríguez, E. L., & Caridad, M. (2016). Aplicación de la metodología DMAIC de Seis Sigma con simulación discreta y técnicas multicriterio. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 19-35. Obtenido de https://www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/article/view/2337

Gómez Flórez, L. A., & Tarquino Nieto, K. D. (2018). *(2018). Diseño de una lechada de cemento espumado, como base para una cementación primaria, para yacimientos con bajos gradientes de fractura.* Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América.

Guerrero García, J. A., & López R, J. D. (2019). *Matriz Para La Selección De Un Fluido De Perforación Base Agua, Con El Fin De Prevenir El Daño De Formación En El Campo Castilla, Colombia.* Bogotá D.C.: Fundación Universidad De América.

Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2009). *Control estadístico de calidad y seis sigma.* Mexico, D.F.: Mc Graw Hill Education.

Haithan Jarouj, R. A. (2004). *Una red de seguridad para controlar las perdidas por circulación.* Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos: Oilfield Review.

Harness, P. E., Sabins, F. L., & Griffith, J. E. (1992). New Technique Provides Better Low Density-Cement Evaluation. *Society of Petroleum Engineers*, 249-258.

Herrera Muriel, R. D., & Piñeros Moreno, M. E. (2018). *Proyecto De Factibilidad Económica Para La Fabricación De Bloques Con Agregados De Plástico Reciclado (PET), Aplicados En La Construcción De Vivienda.* Bogotá D. C. : Universidad Católica De Colombia.

León Quintana, C. A., & Bohada Correa, M. J. (2009). *Metolodía Para la Selección, Diseño y Ejecución del Reacondicionamiento de Pozos Inactivos.* Bucaramanga: Escuela de Ingenieros de Petróleos.

López G, A. (2019). *Programa de Cementros Petroleros PET-219.*

Lozano Salazar, V., Rivas Hoyos, D., Loza, J., Suárez, D., & Calderón, Z. (2011). Metodología Para La Selección De Pozos Candidatos A Perforar En Condiciones De Bajobalance. Aplicación Al Campo Castilla De Ecopetrol S.A. *Revista Fuentes: El Reventón Energético Vol. 9 Nº2*, 63-71.

Martínez Alanis, M. (2015). *Concreto Reforzado Con Nanotubos De Carbono Dopados Con Oxígeno Y Dopados Con Nitrógeno.* San Luis Potosí: Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.

Mauro, M. A., & Vicente, J. M. (2017). *Métodos Contractuales Para la Optimización de Costos.* Instituto Tecnológico de Buenos Aires.

Minitab 18. (2019). *Minitab, LLC. All rights Reserved.* Obtenido de https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/

(s.f.). *Modulo 1: Cementos Petroleros Características Y Análisis.* Unidad 3: Aditivos Para Las Lechas De Cementos.: Ingenieria De Cementacion Petrolera.

Molteni, R., & Cecchi, O. (2005). *El Liderazgo del Lean Six Sigma.* Buenos Aires: Ediciones Macchi.

Morales, C. J. (2010). *Integración de la Cartografía Geológica de los Llanos Orientales.* Departamentos del Meta y sector suroccidental del departamento del Casanare: Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas.

Morán Palacios, W., Lituma Mandujan, L., Vargas, X., & Tapia, D. (2009). *Diseño de revestimiento y cementación de pozos en el oriente ecuatoriano.*

Ortiz Meneses, A. F., & Meza Revelo, M. (2013). *Desarrollo de una herramienta software para el análisis reológico e hidráulico de lechadas de cementación primaria en pozos verticales.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Pande, P., & Holpp, L. (2002). *What is this Six Sigma?* McGraw Hill Professional.

Perazzo, A. A. (1919). *La fabricación del silicato de sodio: su obtención con productos nacionales.* Buenos Aires: Universidad Nacional De Buenos Aires.

Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. (s.f.). *Programa de Acreditación en Control de Pozos.* Wellcap.

RACC. (2009). *Vargas Jimenez, Carlos Alberto. Nuevos aportes a la estimulación del potencial de Hidrocarburos en Colombia.* Rev. Acad. Colomb. Cienc.

Ramírez Mantilla, J. E. (2015). *Perforación de Pozos*. Obtenido de https://es.slideshare.net/jhonenriqueramirezmantilla1/perforacin-de-p

Rojas, M., & Quercia, G. A. (2004). Mecanismos de acción de los aditivos utiizados en cementación de pozos. *Departamento de Ciencia de los Materiales*, 17.

Sánchez, R., Palacios, M., & Puertas, F. (2011). *Cementos Petroleros Con Adición De Escoria De Horno Alto.*

Saucedo Salazar, E. M., Perera Mercado, Y. A., Schott Martínez, J. A., García Rodríguez, S. P., Saucedo Morales, J. L., Ceniceros Reyes, M. A., & Díaz, E. (2015). *Characterization Of Silica Nanoparticles And Their Effect On Mechanical Properties Of Cement Portland 30r.* Saltillo, Coahuila México: Centro de Investigación en Química Aplicada Blvd.

Servicio Geológico Colombiano. (2018). *Compilación de la Cuenca de los Llanos Orientales, Anexo I.* Bogotá.

SikaLatex® BUILDING TRUST. (2018). *Emulsión Adhesiva Para Mortero o Lechada de Cemento.*

Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. *ASTM*, 12.

Vega Andrade, E. A. (2017). *Efecto De La Perlita Expandida En La Resistencia Mecánica Del Hormigón.* Concepción: Universidad Católica De La Santísima concepción.

Vistrain Martínez, A. (2005). *Pruebas de Laboratorio de Cementaciones.* México, D. F: UNAM.

Wallace Oliveira. (4 de Agosto de 2017). *HEFLO*. Obtenido de Comprenda la metodología Six Sigma, cómo surgió y cuáles son sus 5 pasos esenciales: www.heflo.com/es/blog/calidad/metodologia-six-sigma/

Yepes Piqueras, V. (2020). *Contención del agua mediante inyección de lechadas estables.* Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

Zaldivar Cabrera , D. (2017). *Aplicación De Cementos Especiales En Lechadas Ligeras Para Evitar Pérdida De Circulación Durante La Cementación.* Cd. Mx.: Universidad Nacional Autónoma De México.