

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

**ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE LECHADAS DE  
CEMENTO CON “ALÓFANO” PARA LA SECCIÓN SUPERFICIAL DE POZOS  
DE PETRÓLEO**

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

**ORTEGA CARRERA MADELINE MAYANI**

**madeline.ortega@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: ING. PABLO BENALCAZÁR**

**pablo.belancazar@epn.edu.ec**

**Quito,**

## DECLARACIÓN

Yo, Madeline Mayani Ortega Carrera, declaro bajo juramento que el trabajo descrito a continuación es de mi autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; Tomando en cuenta que eh consultado en referencias bibliográficas que se incluyen la fuente en este documento.

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



---

Madeline Mayani Ortega Carrera

C.I: 1003934070

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Madeline Mayani Ortega Carrera,  
bajo mi supervisión.

---

Ing. Pablo Benalcázar

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por todas las bendiciones recibidas y hacer posible que hace unos años tan solo era un sueño y ahora es una grandiosa realidad.

A mi padre Renan Ortega y madre Sandra Carrera que fueron el pilar en mi vida y en mi formación académica, gracias por el amor y el apoyo incondicional desde el inicio hasta el último día, sus palabras de aliento fueron las fuerzas que nunca me dejaron caer, por jamás soltar mi mano y me dieron la oportunidad de ser la persona que soy ahora.

A mi hermano Stalin, por apoyarme y aconsejarme siempre.

A mis hermanas Shemili y Steysi, por ser el impulso de jamás darme por vencida, su amor y cariño.

A mis sobrinos Johanna y Sebastián, por su cariño, sus buenos deseos y la felicidad.

A Alex, gracias por siempre estar conmigo, por tu amor, consideración y apoyo incondicional.

Al Ingeniero Pablo Benalcázar, por ser mi director, apoyarme en todo momento desde que inicie en el trabajo de titulación, por sus consejos, amistad y apoyo.

Al Doctor Edward Jiménez por la colaboración con las muestras de Alófono.

Al Ingeniero Ricardo Urrutia por la colaboración y apoyo durante la realización del proyecto.

A la ESCUELA POLITECNICA NACIONAL e Ingenieros, por sus conocimientos, enseñanzas y paciencia.

A todos mis compañeros politécnicos, por ser mi segunda familia, apoyo y la gran amistad que formamos, en especial a mis hermanos petroleros.

Madeline Ortega

## **DEDICATORIA**

A mis padres Renan y Sandra, los amo mucho

A mis hermanos Stalin, Shemili y Steysi, la alegría de mi alma.

A mis sobrinos Johanna y Sebastián, que son mis pequeños amores.

Madeline Ortega

## CONTENIDO

PORTADA.....	I
DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
CONTENIDO DE FIGURAS.....	XII
CONTENIDO DE TABLAS.....	XV
CONTENIDO DE ANEXOS.....	XVIII
CONTENIDO DE FÓRMULAS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
RESUMEN.....	XXI
<b>1. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>1</b>
1.1. CEMENTO.....	1
1.1.1. COMPUESTOS DEL CEMENTO Y SUS FUNCIONES.....	2
1.1.1.1. Silicato Tricálcico .....	2

1.1.1.2.	Silicato Dicálcico .....	2
1.1.1.3.	Aluminato Tricálcico .....	2
1.1.1.4.	Alumino Ferrita Tetracálcico .....	3
1.1.1.5.	Cal Libre y Óxido de Magnesio Libre.....	3
1.1.2.	CLASES DE CEMENTO.....	4
1.1.2.1.	Clase A.....	5
1.1.2.2.	Clase B.....	5
1.1.2.3.	Clase C.....	5
1.1.2.4.	Clase D.....	6
1.1.2.5.	Clase E.....	6
1.1.2.6.	Clase F.....	6
1.1.2.7.	Clase G Y H.....	6
1.2.	CEMENTACIÓN DE UN POZO DE PETRÓLEO.....	7
1.2.1.	CEMENTACIÓN.....	7
1.2.1.1.	Cementación Primaria.....	8
1.2.1.2.	Cementación Secundaria.....	11
1.2.1.3.	Cementación forzada.....	11
1.2.1.4.	Tapones de Cemento.....	12
1.2.2.	EQUIPO DE CEMENTACIÓN.....	12
1.2.2.1.	Cabeza de Cementación.....	12
1.2.2.2.	Zapatas.....	13
1.2.2.3.	Collar Flotador.....	14
1.2.2.4.	Centralizadores.....	15

1.2.2.4.1. Centralizadores Flexibles o de Flejes.....	16
1.2.2.4.2. Centralizadores Rígidos.....	18
1.2.2.4.3. Centralizadores Semirrígidos.....	19
1.2.2.4.4. Stand Off.....	19
1.2.2.5. Tapones de Goma.....	22
1.2.2.6. Colgadores.....	23
1.2.2.6.1. Colgadores Mecánicos.....	23
1.2.2.6.2. Colgadores Hidráulicos.....	24
1.2.2.7. Raspadores.....	25
1.2.2.8. Top Packer.....	26
1.2.3. TIPOS DE LECHADA.....	27
1.2.3.1. Lead.....	27
1.2.3.2. Tail.....	27
1.2.4. PROPIEDADES DE LECHADA DE CEMENTO.....	28
1.2.4.1. Densidad de la Lechada de Cemento.....	28
1.2.4.2. Fluidez.....	30
1.2.4.3. Rendimiento de la Lechada.....	31
1.2.4.4. Tiempo de bombeabilidad.....	31
1.2.4.5. Agua Libre.....	32
1.2.4.6. Reología.....	33
1.2.4.6.1. Tipos de Fluidos.....	34
1.2.4.7. Control de Filtrado.....	37
1.2.4.7.1. Filtración Estática.....	39



1.2.4.7.2. Filtración Dinámica .....	39
1.2.4.8. Resistencia a la Compresión.....	39
1.3. ADITIVOS DEL CEMENTO.....	40
1.3.1. ACELERADORES.....	41
1.3.2. RETARDANTES.....	42
1.3.3. EXTENDEDORES.....	44
1.3.4. CONTROL DE FILTRADO.....	45
1.3.5. DISPERSANTES.....	46
1.3.6. CONTROL DE AGUA LIBRE.....	47
1.3.7. DENSIFICANTES.....	48
1.3.8. ADITIVOS ESPECIALES.....	49
1.3.8.1. Aditivos Antiespumantes.....	49
1.3.8.2. Aditivos Fibrosos.....	50
1.4. ALÓFANO.....	50
1.4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	52
1.4.2. COMPOSICIÓN DEL ALÓFANO.....	53
1.4.2.1. Fluorescencia de Rayos X (XRF).....	53
1.4.2.2. Difracción de Rayos X (XRD).....	53
1.4.2.3. Infrarrojo (IR).....	54
<b>2. CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>56</b>
2.1. ALÓFANO.....	56
2.1.1. MUESTREO DE ALÓFANO.....	56

2.1.2. PORCENTAJE DE HUMEDAD.....	59
2.1.2.1. Alófono Original.....	59
2.1.2.2. Alófono Muestreado.....	62
2.1.3. PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN.....	65
2.1.4. DETERMINACIÓN DE LA FINURA POR VÍA SECA.....	67
2.1.5. DENSIDAD DEL ALÓFANO.....	71
2.1.6. ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA.....	75
2.1.7. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS MATERIALES POR RAYOS X.....	83
2.1.7.1. Espectrofotometría por fluorescencia de Rayos-X (XRF).....	84
2.1.7.2. Espectrofotometría por difracción de Rayos-X (XRD).....	84
2.2. ADITIVOS USADOS.....	90
2.2.1. ANÁLISIS QUÍMICO MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS-X... 90	
2.2.1.1. Bentonita.....	90
2.2.1.2. Fumed Silica.....	91
2.2.1.3. Desco.....	91
2.2.2. FLUIDEZ.....	92
2.3. LECHADAS DE CEMENTO.....	95
2.3.1. PREPARACIÓN DE LECHADA DE CEMENTO.....	95
2.3.2. DENSIDAD.....	100
2.3.3. REOLOGÍA Y GELES.....	102
2.3.4. FILTRADO API BAJA PRESIÓN.....	107
2.3.5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	111
2.3.6. TIEMPO DE FRAGUADO.....	125

**3. CAPÍTULO III: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....131**

3.1. DENSIDAD.....132

3.2. REOLOGIA Y GELES.....133

3.3. FILTRADO API BAJA PRESIÓN.....137

3.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....139

3.5. TIEMPO DE FRAGUADO.....153

**4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....159**

4.1. CONCLUSIONES.....159

4.2. RECOMENDACIONES.....163

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....165**

**ANEXOS.....170**

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

FIGURA 1.1: Procedimiento de cementación primaria.....	10
FIGURA 1.2: Cabezal de cementación.....	13
FIGURA 1.3: Tipos de Zapata.....	14
FIGURA 1.4: Collar Flotador.....	15
FIGURA 1.5: Centralizador Flexible.....	17
FIGURA 1.6: Centralizador Rígido .....	18
FIGURA 1.7: Centralizador Semirrígidos .....	19
FIGURA 1.8: Representación de Stand Off.....	20
FIGURA 1.9: Porcentajes del Stand Off .....	21
FIGURA 1.10: Tapón Superior y Tapón Inferior.....	22
FIGURA 1.11: Colgador Mecánico .....	24
FIGURA 1.12: Colgador Hidráulico .....	25
FIGURA 1.13: Raspadores.....	26
FIGURA 1.14: Balanza Presurizada y sus partes.....	29
FIGURA 1.15: Viscosímetro rotativo OFITE MODELO 900.....	33
FIGURA 1.16: Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte para un fluido newtoniano.....	35
FIGURA 1.17: Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte para un fluido no newtoniano...36	36
FIGURA 1.18: Esquema del Equipo Prensa API baja Presión.....	38
FIGURA 1.19: Perfil de la Mina de Alófano.....	51

## CAPÍTULO II

FIGURA 2.1: Muestra de Alófono Original.....	57
FIGURA 2.2: Muestreo de Alófono.....	59
FIGURA 2.3: Procedimiento de porcentaje de humedad .....	60
FIGURA 2.4: Procedimiento de porcentaje de humedad .....	63
FIGURA 2.5: Procedimiento Pérdida de Calcinación.....	66
FIGURA 2.6: Procedimiento Finura Vía Seca.....	69
FIGURA 2.7: Procedimiento de Prueba de Densidad.....	73
FIGURA 2.8: Orden de apisonado al moldear los especímenes de ensayo.....	80
FIGURA 2.9: Procedimiento de Índice de Actividad Puzolánica.....	81
FIGURA 2.10: Procedimiento de Análisis Químico y Mineralógico.....	86
FIGURA 2.11: Gráfica del Análisis Mineralógico del Alófono.....	88
FIGURA 2.12: Ajuste Mineralógico del Alófono.....	89
FIGURA 2.13: Consistencia de los materiales sólidos.....	94
FIGURA 2.14: Preparación de lechada de cemento.....	98
FIGURA 2.15: Ensamble de la celda .....	108
FIGURA 2.16: Ensamble de la prensa .....	109
FIGURA 2.17: Procedimiento Resistencia a la compresión .....	116
FIGURA 2.18: Procedimiento prueba Tiempo de Fraguado .....	128

## CAPÍTULO III

FIGURA 3.1: Gráfica de Resultados de densidad.....	132
FIGURA 3.2: Gráfica de resultados de Reología 21 lechadas de cemento.....	133

FIGURA 3.3: Resultados de Reología de Lechadas 1 a 7.....	134
FIGURA 3.4: Resultados de Reología de Lechadas de 8 al 14.....	135
FIGURA 3.5: Resultados de Reología de lechada 15 a 21.....	136
FIGURA 3.6: Resultados del Filtrado API baja presión.....	138
FIGURA 3.7: Comparación entre Blanco 1, Muestra 1 y Muestra 4.....	141
FIGURA 3.8: Comparación entre Blanco 2, Muestra 2 y Muestra 5.....	142
FIGURA 3.9: Comparación entre Blanco 3, Muestra 3 y Muestra 6.....	143
FIGURA 3.10: Comparación de las lechadas por Metodología 1: Edad 1 día.....	145
FIGURA 3.11: Comparación entre Blanco 1.1, Muestra 1.1 y Muestra 4.1.....	147
FIGURA 3.12: Comparación entre Blanco 2.1, Muestra 2.1 y Muestra 5.1.....	149
FIGURA 3.13: Comparación entre Blanco 3.1, Muestra 3.1 y Muestra 6.1.....	150
FIGURA 3.14: Comparación de las lechadas por Metodología 2: Edad 1 día.....	151
FIGURA 3.15: Comparación de Metodologías.....	152
FIGURA 3.16: Relación de las propiedades evaluadas.....	155

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO I

TABLA 1.1: Compuestos del Cemento.....	4
TABLA 1.2: Tipos de Tubería.....	9
TABLA 1.3: Aditivos Aceleradores.....	42
TABLA 1.4: Aditivos Retardantes.....	43
TABLA 1.5: Aditivos Extendedores.....	44
TABLA 1.6: Aditivos de control de Filtrado.....	45
TABLA 1.7: Aditivos Dispersantes.....	47
TABLA 1.8: Aditivos de Control de Agua Libre.....	48
TABLA 1.9: Aditivos Densificantes.....	49
TABLA 1.10: Resultados de difracción de rayos X para Alófono para tres muestras diferentes.....	54

### CAPÍTULO II

TABLA 2.1: Resultados de Porcentaje de Humedad .....	62
TABLA 2.2: Resultados de Porcentaje de Humedad Muestreado.....	64
TABLA 2.3: Resultados de Pérdidas por Calcinación.....	67

TABLA 2.4: Resultados de Finura Vía Seca.....	70
TABLA 2.5: Resultados de Prueba de Densidad.....	75
TABLA 2.6: Proporciones del material de la mezcla para elaboración de morteros..	78
TABLA 2.7: Resultados del Índice de Actividad Puzolánica.....	83
TABLA 2.8: Resultados de Análisis Químico de Alófono.....	87
TABLA 2.9: Resultados de Análisis Químico de Bentonita.....	90
TABLA 2.10: Resultados de Análisis Químico de Fumed Silica.....	91
TABLA 2.11: Resultados de Análisis Químico del Desco.....	91
TABLA 2.12: Resultados de la prueba de Fluidez.....	95
TABLA 2.13: Valores de solución de Fumed Silica.....	97
TABLA 2.14: Concentraciones de las Lechadas de Cemento.....	99
TABLA 2.15: Resultados de las 21 Lechadas de Cemento.....	101
TABLA 2.16: Configuración rotor /bob.....	104
TABLA 2.17: Resultados de Reología y Geles de las muestras del 1 hasta 7.....	104
TABLA 2.18: Resultados de Reología y Geles de las muestras del 8 hasta 14.....	105
TABLA 2.19: Resultados de Reología y Geles de las muestras del 15 hasta 21...	106
TABLA 2.20: Resultados de Filtrado API.....	110



TABLA 2.21: Cantidades de materiales a ser mezcladas.....	113
TABLA 2.22: Concentraciones Alófono Metodología 1: Blancos.....	119
TABLA 2.23: Resultados Alófono Metodología 1: Blancos.....	119
TABLA 2.24: Concentraciones Alófono Metodología 1.....	120
TABLA 2.25: Resultados Alófono Metodología 1.....	121
TABLA 2.26: Concentraciones Alófono Metodología 2: Blancos.....	122
TABLA 2.27: Resultados Alófono Metodología 2: Blancos.....	122
TABLA 2.28: Concentraciones Alófono Metodología 2.....	123
TABLA 2.29: Resultados Alófono Metodología 2.....	124
TABLA 2.30: Resultados de Consistencia Normal.....	130
TABLA 2.31: Resultados de Tiempo de Fraguado.....	130

### **CAPITULO III**

TABLA 3.1: Análisis de Resistencia a la Compresión Metodología 1.....	140
TABLA 3.2: Análisis de Resistencia a la Compresión Metodología .....	146
TABLA 3.3: Tiempo de Fraguado inicial y final .....	154
TABLA 3.4: Datos de las Propiedades y concentraciones .....	156

## ANEXOS

ANEXO 1.....	170
ANEXO 2.....	171
ANEXO 3.....	174
ANEXO 4.....	175
ANEXO 5.....	176

## ÍNDICE DE FÓRMULAS

### CAPÍTULO I

Fórmula 1.1: Porcentaje Stand Off.....	20
Fórmula 1.2: Viscosidad Plástica .....	36

### CAPÍTULO II

Fórmula 2.1: Porcentaje de Humedad.....	61
Fórmula 2.2: Porcentaje de Perdida por Calcinación.....	66
Fórmula 2.3: Porcentaje de Retenido en el Tamiz.....	69
Fórmula 2.4: Densidad del Alófano.....	74
Fórmula 2.5: Masa de Puzolana.....	82
Fórmula 2.6: Porcentaje de Agua.....	94
Fórmula 2.7: Cálculo API líquido perdido.....	109
Fórmula 2.8: Porcentaje de Consistencia Normal.....	129

## INTRODUCCIÓN

La Industria Petrolera es conformada por tres fases “Upstream”: Exploración, extracción y producción, “Midstream”: Transporte, procesos y almacenamiento y “Downstream”: Refinación. Cada fase es conformada por varias operaciones y desempeñan un papel importante, en la primera fase y la más importante se realiza algunas operaciones como sísmica, registros eléctricos, pozos exploratorios, perforación, cementación, completación y producción del pozo. En cada una de las operaciones anteriormente mencionadas se realiza una inversión con un valor elevado, por el empleo de equipos sofisticados, además la adición de ciertos aditivos que permitan tener mejor eficiencia en los resultados, estos generalmente son importados del extranjero. Una de las operaciones que debe tener un exhaustivo seguimiento es la cementación, la cual garantiza la vida operativa del pozo. El tema de estudio en el presente Trabajo de Titulación es la cementación.

La cementación se la realiza por secciones, ya que se tiene diferentes tipos de lechadas, en cada diseño de lechada refleja los problemas operativos que se pueden presentar en fondo y se los previene con la adición de aditivos, también es importante mencionar que para tener una eficiente cementación se debe utilizar herramientas o equipos que garanticen que las lechadas lleguen a su objetivo y cumplan con su función. Estas lechadas son diseñadas para cumplir con parámetros que garanticen la estabilidad del pozo, lo cual debe ser confirmado con el previo análisis de algunas propiedades como: filtrado, permeabilidad, presión, temperatura, bombeabilidad, agua libre, densidad, resistencia a la compresión entre otras, cada propiedad se ajusta con la adición de aditivos.

Por lo cual es importante realizar un estudio para implementar nuevas opciones que otorguen beneficio a las propiedades anteriormente mencionadas y lograr una reducción en

la inversión en esta operación. Generalmente se trabaja con dos lechadas de diferente valor de densidad Tail y Lead; las cuales deben adherirse con facilidad a la pared del pozo, evitar filtración, no reaccionar con la formación, fluir con facilidad, tener bajo porcentaje de agua libre y principalmente debe tener mayor resistencia mecánica.

Para esta operación se propone un nuevo aditivo nacional que es el Alófano, que podría brindar beneficio a la propiedad de resistencia a la compresión al igual que un aditivo tradicional, la implementación de este material permite buscar nuevas opciones o descartar, esta investigación se basa en pruebas de laboratorio como: Densidad, Fluidez, Pérdida de filtrado, Resistencia a la compresión. Es importante resaltar que el Alófano fue propuesto porque posee características similares a las Puzolanas, las mismas que son usadas en la industria; este nuevo material se encuentra en la provincia de Santo Domingo de los Colorados, es uno de los depósitos más grandes del Ecuador y permitiría reducir costos con la implementación de este.

## RESUMEN

Inicialmente se realizó el diseño de la lechada de cemento, se estableció usar Bentonita, Fumed Silica, Alófono, Cemento y Agua en diferentes porcentajes, se obtuvo una mezcla viscosa la cual no podía ser bombeable por lo que se decidió usar un dispersante Desco, el cual ayudó a que la mezcla fluya con facilidad. Al momento de realizar la mezcla fue importante determinar el orden de adición de los aditivos, esto se concluyó con las diferentes pruebas anteriormente realizadas, los aditivos de la mezcla se adicionaron en el siguiente orden: Agua, Solución de Fumed Silica, Bentonita, Alófono y finalmente Desco. Cada aditivo proporcionó una propiedad como: Bentonita consistencia de la mezcla; Fumed Silica se usó en bajos porcentajes y brindó mayor beneficio al tiempo de fraguado, este aditivo tiene una textura ligera por lo que se decidió adicionarle en solución, se probó con algunos porcentajes hasta determinar el porcentaje adecuado; Alófono era usado para elevar la resistencia mecánica del cemento y Desco es un dispersante.

Todas las formulaciones realizadas se hicieron en base a la masa del cemento. Al preparar las lechadas de cemento, continuamente las pruebas de laboratorio, se empezó con la prueba de Densidad que se obtuvo un promedio de 13.5 lb/gal en las mezclas. Por tanto, se estableció realizar únicamente lechadas Lead ya que la densidad obtenida se acercó a los valores usados en este tipo de lechada y descartar mayor variación en los resultados al adicionar otros aditivos. Se procedió a realizar la prueba de reología de la cual ya se pudo ir descartando algunas mezclas que no proporcionaban una fluidez adecuada. Después la prueba de filtrado API, en esta prueba no se obtuvo datos satisfactorios, ya que no se usó un controlador de filtrado, pero se observó que al aumentar el porcentaje de Alófono se obtenía una mejoría en el tiempo de filtrado. Finalmente se realizó las pruebas de

resistencia a la compresión, cabe recalcar que esta prueba fue la determinante en el presente estudio, en la cual se disminuyó el número de pruebas inicial. Con los resultados de esta prueba los cuales no fueron los deseados, se procedió a realizar pruebas exhaustivas al aditivo Alófono para entender los resultados obtenidos. Se realizó algunas pruebas entre ellas las importantes como: Fluorescencia y Difracción de Rayos X, para conocer la mineralogía y química del Alófono y concluir que el Alófono no tenía un comportamiento Puzolánico más bien se comportaba como una arcilla, su mineralogía tenía altos porcentajes de Vermiculita, Caolinita entre otras. Por ende, se descartó que el Alófono podía sustituir aditivos tradicionales que ayuden a la resistencia a la compresión. Tomando en cuenta que el Alófono capta con facilidad la humedad y es difícil de tener una partícula tan fina como la del cemento, esta es una de las razones más importantes por la que no se obtuvieron los resultados deseados. Aunque también se realizó el Índice de Actividad Puzolánico al Alófono y se comprobó que entre más fina la partícula se obtiene un valor mayor en la resistencia a la compresión. Pero existe dificultad en llegar a una partícula fina. La lechada de cemento con Alófono paso por todas las pruebas establecidas, ya que era necesario conocer cómo afectaría en todos los parámetros que son necesarios para una eficiente lechada de cemento, pero si bien es cierto la prueba que permitió descartar que el Alófono sustituyera a otros aditivos es la prueba de la Resistencia a la compresión.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. CEMENTO

En la industria petrolera el cemento tiene un papel importante en la etapa de cementación, recubrir los hoyos, proteger los revestidores en cada sección de la construcción del pozo, mantener estable el mismo, aislar la zona de interés de las filtraciones que puedan presentarse y evitar la comunicación de fluidos entre las capas. Por lo cual surgió la necesidad de utilizar diferentes productos y aditivos dependiendo de las condiciones que estará expuesto de temperatura y presión.

El cemento llamado conglomerante hidráulico, con agregados pétreos y agua, todos estos componentes dan como resultado una mezcla uniforme, la cual fragua y se endurece, denominándola hormigón, Este endurecimiento hidráulico se debe principalmente a la formación de silicatos cálcicos hidratados y de aluminatos hidratados como resultado de la reacción entre el agua y los constituyentes del cemento. Además, el cemento petrolero o Portland es el usado para la industria que varía en aditivos al cemento de construcción (Mamani, 2010).

El cemento Portland está conformada por caliza, sílice, hierro y arcilla, se encuentran molidos y calcinados; que fragua y se endurece al reaccionar con el agua. Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al enfriarse. Además, es el ejemplo típico de un cemento hidráulico; fragua y desarrolla resistencias a la compresión como resultado de la hidratación, la cual

involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. De todos los cementos, el Portland es el más importante en cuanto a términos de calidad, desarrollo de resistencia a la compresión, tensión y a los sulfatos; por lo cual es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos petroleros (Sanjúan & Chinchón, 2014).

### ***1.1.1. COMPUESTOS DEL CEMENTO Y SUS FUNCIONES:***

#### ***1.1.1.1. Silicato Tricálcico ( $3CaO \cdot SiO_2$ ).***

Generalmente nominado C3S, es un elemento primordial del cemento portland; que tiene mayor contenido de CaO, influye en la mayoría de las propiedades del cemento: endurece rápidamente y produce la resistencia temprana o inmediata (1 a 28 días), siempre y cuando se muele finamente; reacciona mucho más rápido con el agua; además tiene una hidratación moderada, el cual da como resultado silicato de calcio hidratado (CSH) (Sanjúan & Chinchón, 2014).

#### ***1.1.1.2. Silicato Dicálcico ( $2CaO \cdot SiO_2$ ).***

Llamado como C2S, este compuesto ayuda a la ganancia de resistencia en un periodo largo (después 28 días); el cual es de hidratación lenta para formar el mismo tipo de compuestos que el C3S (CSH) (Sanjúan & Chinchón, 2014).

#### ***1.1.1.3. Aluminato Tricálcico ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ).***

Conocido como C3A, este compuesto tiene un papel importante en el parámetro del tiempo de bombeabilidad de la lechada de cemento. Es responsable de la vulnerabilidad al ataque químico de los sulfatos en las lechadas. Esta vulnerabilidad



se clasifica en moderada y alta resistencia al ataque químico. Este compuesto reacciona muy rápido al estar en contacto con el agua y libera mucho calor al hidratarse. Una de las ventajas es que ayuda a la resistencia al poco tiempo, pero como desventaja; tiene menor resistencia final. Es importante tomar en cuenta para los cementos resistentes a sulfatos deben tener menor porcentaje de este compuesto, lo que se logra añadiendo óxido férrico transformándolo en C4AF (Sanjúan & Chinchón, 2014).

#### ***1.1.1.4. Alumino Ferrita Tetracálcico ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ ).***

Denominado como C4AF, este compuesto tiene influencia en las propiedades reológicas del cemento, formación de gel y durabilidad, Además este reacciona rápidamente al estar en contacto con el agua, y al contrario de los compuestos anteriores este produce menos calor de hidratación y resistencia a la compresión. (Sanjúan & Chinchón, 2014)

#### ***1.1.1.5. Cal Libre ( $CaO$ ) y Óxido de Magnesio Libre ( $MgO$ ).***

Estos compuestos se encuentran en menor porcentaje en el cemento, al estar en contacto con el agua da como resultado hidróxido de calcio e hidróxido de magnesio; los cuales ocupan mayor espacio de los óxidos originales; y esto produce expansiones dañinas, y por esta razón su contenido debe ser limitado. (Sanjúan & Chinchón, 2014)

Se compiló algunas características de los compuestos del cemento como se muestra en la Tabla 1.1.

**TABLA 1.1***Compuestos del Cemento*

<b>Compuesto</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Rango de % en masa</b>	<b>Calor liberado</b>	<b>Influencia en propiedades</b>	<b>Resistencia a la compresión</b>
<b>SILICATO TRICÁLCICO</b>	3CaO SiO <sub>2</sub>	C3S	46-79	Moderado	Resistencia a la compresión	Resistencia temprana (1 a 28 días)
<b>SILICATO DICÁLCICO</b>	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C2S	5-30	Bajo	Resistencia a la compresión	Resistencia periodo largo (después de 28 días)
<b>ALUMMINATO TRICÁLCICO</b>	3CaO.AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C3A	6-18	Muy alta	Resistencia al ataque químico	-
<b>ALUMINO FERRITA TETRACÁLCICO</b>	4CaO.AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C4AF	4-16	Moderado	Reología	Resistencia baja
<b>CAL LIBRE</b>	CaO	C	0.1-4	-	-	-
<b>ÓXIDO DE MAGNESIO LIBRE</b>	MgO	M	0.7-1.5	-	-	-

NOTA: Características de los compuestos del cemento

Fuente: (Sanjúan & Chinchón, 2014)

**1.1.2. CLASES DE CEMENTO**

En la construcción de un pozo petrolero, cada sección alcanza diferentes profundidades, las cuales poseen diferentes características. Surgió la necesidad de ocupar diferentes tipos de cemento. Los diferentes tipos de cemento varía en su composición química y física, según sea la necesidad.

En la industria petrolera según la clasificación API (America Petroleum Institute) reconoce ocho tipos de cemento y la norma Api 10B-2 describe las mismas, tomando en cuenta diferentes condiciones como: profundidad, presión y temperatura a las que el cemento va a estar expuesto; además es importante la consistencia de la lechada de cemento; que permita tener una textura bombeable a la profundidad deseada (López, 2008).

#### ***1.1.2.1. Clase A.***

Este está diseñado para aplicar en secciones superficiales, hasta profundidad 6000ft y con temperaturas de 100° F hasta 170°F. Tomando en cuenta que en esta sección no se requiere propiedades especiales, ya que no brinda ninguna resistencia a los sulfatos. La relación agua/cemento es 5.2 gal/sxs (API 10-A, 2011 & López, 2008).

#### ***1.1.2.2. Clase B.***

Esta clase de cemento es usado para secciones superficiales o hasta profundidades de 6.000 ft y resiste temperaturas de 110° F hasta 170°F. Además, se utiliza cuando las condiciones requieren de moderada a alta resistencia al sulfato. Generalmente esta clase de cemento se emplea en puentes y tuberías de concreto. La relación agua/cemento es 5.2 gal/sxs (API 10-A, 2011 & López, 2008).

#### ***1.1.2.3. Clase C.***

Este está diseñado para profundidades de 6.000 ft y temperaturas de 170° F hasta 230°F. El cual tiene alta resistencia a la compresión temprana; además genera una moderada resistencia a los sulfatos. La relación agua/cemento es 6.3 gal/sxs (API 10-A, 2011 & López, 2008).

***1.1.2.4. Clase D.***

Esta clase de cemento es aplicada para profundidades de 6.000 ft hasta 10.000 ft y temperaturas de 170° F hasta 230° F. El cual puede soportar altas presiones. Brinda de moderada y alta resistencia a los sulfatos. Soporta de moderados a altos esfuerzos. La relación agua/cemento es 4.3 gal/sxs (API 10-A, 2011 & López, 2008).

***1.1.2.5. Clase E.***

Este está diseñado para profundidades de 10.000 ft hasta 14.000 ft y altas temperaturas de 230° F – 290° F. Este es usado en condiciones de alta presión. Genera condiciones de moderada y alta resistencia a los sulfatos. La relación agua/cemento es 4.3 gal/sxs (API 10-A, 2011 & López, 2008).

***1.1.2.6. Clase F.***

Esta clase de cemento se usa para profundidades de 10.000 ft hasta 16.000 ft y altas temperaturas de 230° F hasta 320°0 F. Soporta condiciones extremas de presión. Brinda de moderada y alta resistencia a los sulfatos. Además, resiste esfuerzos de moderados a altos. La relación agua/cemento es 4.3 gal/sxs (API 10-A, 2011 & López, 2008).

***1.1.2.7. Clase G Y H.***

También conocidos como cementos petroleros. Se aplican desde la superficie hasta profundidades de 10.000 ft y un rango de temperaturas que varían entre los 80<sup>0</sup> F a 320<sup>0</sup> F. Su composición es modificada con el uso de retardadores y aceleradores que permite la aplicación en diferentes condiciones de presión y temperatura. Tiene especificaciones especiales tanto físicas como químicas. Generalmente su principal

aplicación es en pozos más profundos, como los pozos off - shore o de perforación en mar abierto (API 10-A, 2011 & López, 2008).

En la etapa de cementación de un pozo petrolero, se tiene diferentes objetivos, pozos someros y pozos profundos, por lo cual es necesario el uso de las diferentes clases de Cemento, se usan lechadas con diferentes valores de densidad como es Lead y Tail, y otras características como son el tiempo de bombeabilidad, el cual ayuda a tener una idea de que tiempo tendrá el cemento antes de endurecerse y llegar a su objetivo. Además, tiene que resistir diferentes presiones y temperaturas. Para todas estas propiedades existe un rango en las clases de cemento (López, 2008).

## **1.2.CEMENTACIÓN DE UN POZO DE PETRÓLEO**

### ***1.2.1. CEMENTACIÓN***

La cementación de pozos petroleros es una de las etapas de construcción, la cual consiste en mezclar cemento seco, aditivos y agua, teniendo como resultado una lechada de cemento, esta mezcla se realiza en equipos especiales de mezclado, dicha lechada tiene diferentes propiedades según la sección a cementar, se bombea al pozo petrolero a través de la sarta de revestimiento y saliendo por el anular entre el hoyo y el diámetro externo del revestidor, esto se realiza por secciones, entre sus objetivos principales son aislar las diferentes zonas, proteger las tuberías y proteger el hoyo de un colapso (Nelson, 2012).

Existen dos tipos Cementación:

- Cementación Primaria
- Cementación Secundaria o con fines de remediación (SQUEEZE)

Es importante realizar un buen trabajo de cementación de un pozo petrolero porque al realizar la perforación, atraviesa por diferentes formaciones o depósitos de agua dulce, los cuales no deben ser afectados con la construcción del pozo. Toda empresa debe realizar un trabajo exhaustivo con un mínimo impacto de contaminación y un control de desechos. Es valioso realizar una cementación eficiente para que los fluidos de perforación, inyección de químicos o agua de formación no puedan contaminar otras formaciones o los depósitos de agua dulce que pueden ser usados para consumo humano, esto esta regularizado por Subsecretaria de Protección Ambiental del Ministerio de Energía y Minas (Salcedo, 2012).

#### ***1.2.1.1.Cementación Primaria.***

Esta cementación se realiza en el pozo después de la finalización de la perforación, debido a las grandes profundidades que alcanza la mayoría de los pozos se construye de diferentes diámetros hasta alcanzar la zona de interés. El objetivo principal es colocar una lechada de cemento en el espacio anular existente entre la tubería de revestimiento y la pared del hueco. Cementar los revestidores del pozo como: conductor, superficial, intermedio, producción como indica en la Tabla 1.2 (Nelson,2012 & Vite, 2019).

Este proceso es crítico en la construcción del pozo, y tiene algunos objetivos entre ellos son:

- Proporcionar un sello hidráulico que evita el movimiento de fluidos entre las formaciones de interés y el aislamiento de acuíferos.
- Fijar la sarta de revestimiento.
- Obtener un pozo estable, evitando colapsos por fuerzas externas.
- Evita la fuga de los fluidos de las formaciones a superficie.
- Proteger la sarta de revestimiento durante el cañoneo a las formaciones de interés, completación y corrosión.
- Disminuye la corrosión en la tubería de revestimiento a causa de los fluidos de formación.

**TABLA 1.2**

*Tipos de Tubería*

<b>TIPOS DE TUBERÍA</b>		
<b>Tubería</b>	<b>Diámetro del Hueco (in)</b>	<b>Diámetro de Tubería (in)</b>
<b>Conductor</b>	26	20
<b>Superficial</b>	16	13 3/8
<b>Intermedio</b>	12 ½	9 5/8
<b>Producción</b>	8 ½	7
<b>LINER</b>	7	3 ½

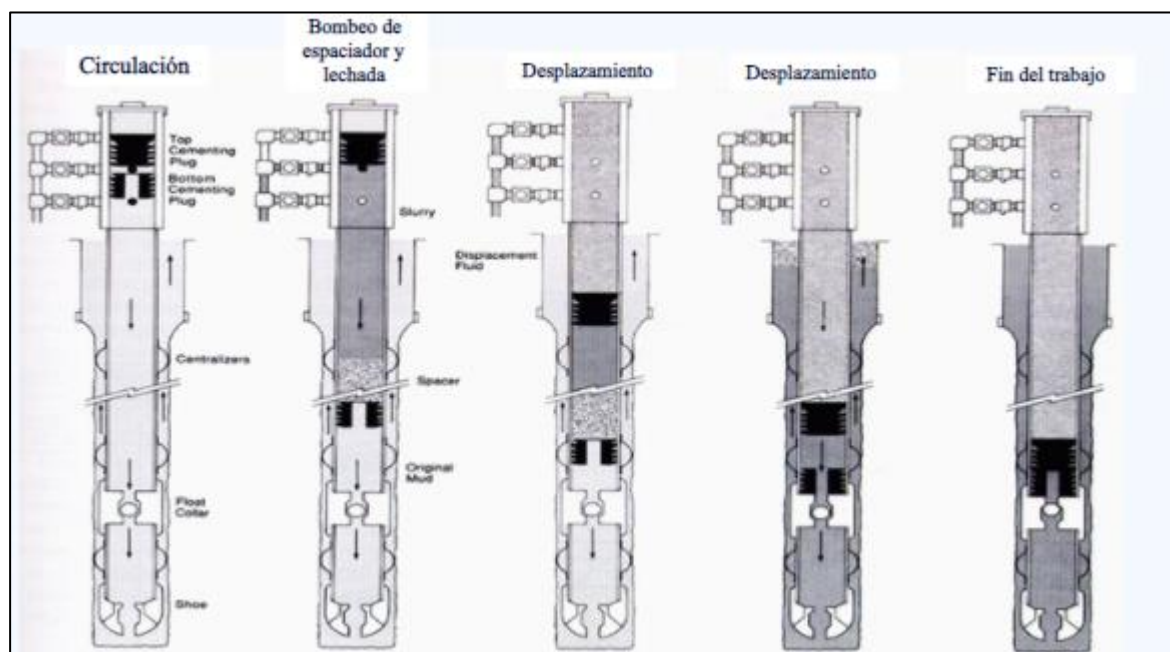
NOTA: Diseño de diámetros comúnmente utilizado en el Oriente ecuatoriano.

Descripción de los procedimientos básicos de la cementación primaria como muestra en la Figura 1.1, que son: Al empezar la operación se debe correr la tubería de revestimiento hasta su objetivo, cuando la tubería de revestimiento se encuentre

centrada circular el lodo de perforación mediante el equipo de perforación, es importante realizar pruebas de presión para conocer el comportamiento del yacimiento, después se empieza a bombear primero el lavador en conjunto con el espaciador, durante los procesos anteriormente mencionados se debe preparar las lechadas, al tener la lechada de cemento con sus respectivas condiciones se empieza a bombear la lechada de llenado al pozo, enseguida se bombea la lechada de cola, al terminar de bombear las dos lechadas se procede a lanzar el tapón superior, lo cual genera desplazar las dos lechadas y los tapones y finalmente verificar el retorno de fluidos (Nelson, 2012).

**FIGURA 1.1**

*Procedimiento de Cementación Primaria*



Fuente: (Hidalgo, 2014)



### ***1.2.1.2.Cementación Secundaria.***

La cementación secundaria también llamada “Squeeze” o cementación de remediación, se realiza después de la cementación primaria, en vista de que la cementación primaria sea deficiente, ya sea porque tenga problemas operacionales o por falla del diseño. La Cementación Secundaria puede ser: Cementación forzada y taponos de cemento.

Consiste en bombear la nueva lechada de cemento al espacio anular mediante disparos por la tubería de revestimiento, bajo presión, generalmente este procedimiento se realiza en trabajos de reacondicionamiento o tareas de terminación de pozos. Estos trabajos se hacen en presencia de filtraciones en la formación de interés, altas producciones de agua, problemas en las tuberías por corrosión y zonas no productoras; Esta cementación tiene como propósitos (Nelson 2012 & Salcedo 2012):

- Mejorar la adherencia de la lechada de cemento entre el casing y las paredes del pozo.
- Restaurar daños en el casing y la tubería por la corrosión.
- Controlar las pérdidas de circulación.
- Separar las zonas productoras.
- Agregar nueva lechada de cemento en el espacio anular

### ***1.2.1.3.Cementación forzada.***

Es el procedimiento mediante el cual se aplica presión hidráulica para forzar el cemento mediante orificios perforados en el revestidor para reparar los problemas

operativos que presenta la cementación primaria. Esta se puede realizar con empacadura o retenedor. Esta cementación forzada debe considerar algunos parámetros, para que los resultados sean óptimos (González, 2014).

#### ***1.2.1.4. Tapones de Cemento.***

Es el proceso que permite colocar una columna de cemento en el pozo, ya sea en el revestidor o hueco abierto, con la finalidad de aislar las zonas no productivas, perforación direccional, abandono de pozo seco y pérdida de circulación entre otras. (Vite, 2019)

### ***1.2.2. EQUIPO DE CEMENTACIÓN***

#### ***1.2.2.1. Cabeza de Cementación.***

La cabeza de cementación es uno de los equipos de superficie como se muestra en la Figura 1.2, que va conectado en la última pieza de la tubería superficial, en este se ubican los tapones, que luego caerán durante la cementación. Además, tiene incorporado un manifold a la cabeza de cementación, este va conectado con las bombas y líneas de cementación encargadas de desplazar las lechadas de cemento al pozo. Al finalizar la instalación del cabezal y empezar con la cementación del pozo es indispensable realizar una prueba de integridad, para verificar que no existan fugas durante el proceso (Nelson, 2012).

## FIGURA 1.2

### *Cabezal de cementación*



Fuente: Catálogo de Alibaba (Xing, 2015)

#### ***1.2.2.2.Zapatatas.***

La zapata va conectada en el extremo inferior de la primera tubería que se baja al pozo, tiene forma cónica. Generalmente son elaboradas de cemento y aluminio, ya que después de cumplir su propósito deben ser perforadas. Cuyo propósito es proteger y guiar la tubería durante su corrida dentro del agujero, evitando que la tubería sufra pegas con las formaciones y obteniendo una corrida mucho más sencilla. Además, la zapata en su interior tiene una válvula que evita que el fluido desplazado dentro del anular regrese al interior del liner (Hidalgo, 2014). Existen dos tipos de zapatas como se muestra en la Figura 1.3 que son:

- **Zapata flotadora:** esta es la que tiene dentro una válvula de bola.
- **Zapata guía:** como su nombre lo indica guía la tubería para que su corrida sea sencilla.

**FIGURA 1.3***Tipos de Zapata*

Fuente: (Sononex, 2011)

**1.2.2.3. Collar Flotador.**

El collar flotador contiene una válvula de bola, y en la parte superior tiene una rosca hembra y en la parte inferior una rosca macho, para conectarse en la tubería de revestimiento, que evita que la lechada de cemento que se encuentra en el anular retorne por la tubería, esta es una válvula adicional de contra flujo o contra presión que sirve para control en el desplazamiento del cemento, como se muestra en la Figura 1.4. Se encuentra ubicada 2 o 3 juntas sobre la zapata y tiene de función de ser un alto o asiento para los tapones de cemento.

Ayuda a que la tubería este flotando dentro del pozo de acuerdo con el llenado. Es importante ya que el cuello flotador asegura que exista cemento sellando las últimas juntas de la tubería cuando termine el bombeo, esto sucede cuando el tapón sea “golpeado” (Nelson, 2012).

**FIGURA 1.4***Collar Flotador*

Fuente: (Sononex, 2011)

**1.2.2.4. Centralizadores.**

Los centralizadores se instalan en la parte exterior de la tubería, es necesario que estén holgadamente alrededor de la tubería, para que la tubería pueda rotar y se deslice con facilidad sin tener que empujar, se consideran las herramientas más sencillas, se encuentran en tipo de fleje con bisagra o sólidos de tipo espiral o “rígido”. Para lograr su objetivo estas herramientas deben tener una buena ubicación a lo largo de la tubería, y los espacios entre los centralizadores los determinan el ángulo de inclinación del hoyo, ya que principalmente en las zonas de interés o débiles es importante que la tubería no tenga ningún conflicto en desplazarse. Tiene como propósitos principales (Vite, 2019 & Nelson, 2012):

- Separar la tubería de las paredes del pozo
- Obtener una centralización de la tubería en hoyo y el stand off de

la tubería

- Disminuir el conflicto al bajar la tubería, evitando arrastre en pozos direccionales, atascamientos o pegas diferenciales
- Mejorar la remoción del lodo.
- Optimizar la eficiencia de desplazamiento de la lechada de cemento, con finalidad de obtener una pared más uniforme sin espacios vacíos.

En la actualidad las compañías que realizan estos procesos tienen un software que les permite ubicar los centralizadores en las zonas adecuadas y a la distancia que permitan un buen deslizamiento y se obtenga una buena distribución del cemento en el anular. Generalmente estos softwares, requieren de cierta información del pozo como: tamaño y peso de tubería, peso del lodo y de la trayectoria del pozo.

Es indispensable tener en la completación los centralizadores bien ubicados para una óptima cementación, por lo cual existen algunos tipos de centralizadores (Nelson, 2012):

- Flejes o Flexibles
- Rígidos
- Semirrígidos

#### ***1.2.2.4.1. Centralizadores Flexibles o de Flejes:***

Se los puede diferenciar por la forma convexa o de arco que tienen sus flejes, como se observa en la Figura 1.5, esta herramienta puede ser colocada en otra herramienta o directamente en la parte exterior de la tubería, este tipo de centralizador es el más usado, ya que este diseño como objetivo principal permite que se mantenga

centralizada la tubería en el pozo durante toda la operación de cementación. Es importante conocer y determinar los diámetros mínimos del hoyo, para disminuir pegas, en el caso que el OD del centralizador sea mayor al diámetro del pozo. Estos centralizadores tienen algunos propósitos además del objetivo anteriormente mencionado que son (González, 2014):

- Usados en pozos que presentan mal calibre.
- Puede acoplarse con facilidad al diámetro y forma del hoyo, gracias a su diámetro externo.
- Permite realizar operaciones de rotación y reciprocación de la tubería; no se observa deformaciones en los centralizadores.

### FIGURA 1.5

#### *Centralizador Flexible*



Fuente: Schlumberger Oilfield Glossary (Schlumberger, Oilfield Glossary, 2010)

#### **1.2.2.4.2. Centralizadores Rígidos:**

Los centralizadores rígidos tienen una estructura que forma un solo cuerpo, como se muestra en la Figura 1.6. Se puede encontrar de hierro, metal, aluminio, plástico o de elementos soldados, la forma de sus aletas reduce el contacto de la tubería con la pared del pozo, el cual es diseñado específicamente para un tamaño de diámetro externo de la tubería y el diámetro del hoyo del pozo, no presenta modificaciones a lo largo de las operaciones.

Por ende, una de las desventajas que presenta es que el diámetro externo debe ser mucho menor, en caso de que se presente alguna restricción o zonas angostas en el hoyo del pozo para poder atravesar en el mismo. En la norma API especifica que este tipo de centralizadores tiene una capacidad de carga de 50.000 a 100.000 lbf de peso. Pero muy beneficioso donde se tiene mayores desviaciones en el pozo, presenta un valor elevado de Stand Off. Su diseño minimiza la caída de presión e incrementa la turbulencia del fluido para un mejor desplazamiento del cemento. Además, son utilizados en pozos verticales, inclinados y horizontales (Vite, 2019).

#### **FIGURA 1.6**

*Centralizador Rígido*



Fuente: Catalogo Technodrill, (Technodrill, 2011)



#### 1.2.2.4.3. *Centralizadores Semirrígidos:*

Los centralizadores semirrígidos tienen arcos de acero, que deben ser flexibles para obtener un adecuado Stand Off, como se muestra en la Figura 1.7. Generalmente es utilizada en las zonas productoras del pozo. La forma de sus aletas son parte del mismo cuerpo, esto ayuda a mantener la fuerza de resistencia durante la corrida de la tubería en el hoyo. Estos centralizadores son ubicados específicamente en secciones críticas como en un ángulo de desviación mayor, sobre la zapata y debajo del colgador (Nelson, 2012).

#### FIGURA 1.7

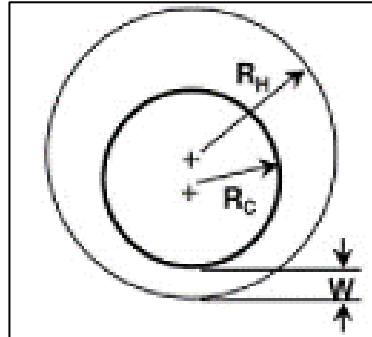
*Centralizador Semirrígidos*



Fuente Catálogo de Alibaba (Li, 2015)

#### 1.2.2.4.4. *Stand Off:*

Se define a la relación del espacio más angosto o pequeño, que se genera entre el hoyo del pozo y el revestidor o tubería, como se muestra en la Figura 1.8, sobre la diferencia entre los radios del hoyo del pozo y del revestidor, que resulta de la operación anteriormente descrita en porcentaje (*González, 2014*).

**FIGURA 1.8***Representación de Stand Off*

Fuente: (González, 2014)

Se usa la Fórmula 1.1 para calcular % StandOff:

$$\%Standoff = \frac{W}{R_H - R_C} * 100 \quad (1.1)$$

Donde:

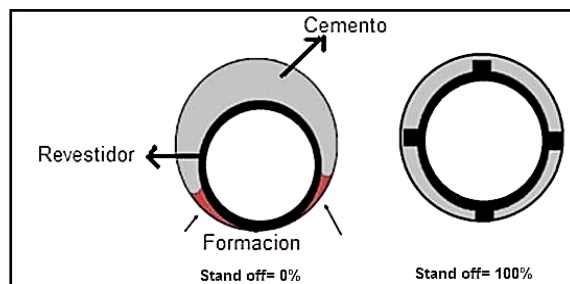
$W$  = Mínimo espacio entre el hoyo y el revestidor

$R_H$  = Radio del hoyo del pozo

$R_C$  = Radio del vestidor

Existen diversos escenarios con el porcentaje del Stand Off como se muestra en la Figura 1.9:

- Si se tiene un porcentaje de Stand Off igual a 100%, esto significa que se encuentra centrado el revestidor dentro del hoyo del pozo. Este caso no aplica en la vida real.
- Si se tiene un porcentaje de Stand Off igual a 0%, esto significa que se produjo contacto directo entre el hoyo del pozo y el revestidor. Por tanto, se concluye que existe un mal trabajo de cementación.

**FIGURA 1.9***Porcentajes del Stand Off*

Fuente: (Schlumberger, Introducción al Equipo de Perforación, 2004)

Para obtener resultados óptimos en los trabajos de cementación en campo es recomendable trabajar con un porcentaje de Stand Off que varíe entre el 67 y 75%. El valor del Stand Off es un parámetro importante para determinar un buen trabajo de cementación, para obtener un valor adecuado se debe tener una buena configuración con los centralizadores ubicados adecuadamente y el número necesario para evitar pega de la tubería o contacto directo.

Los centralizadores son una herramienta importante en los trabajos de cementación, los cuales determinan el porcentaje de Stand Off y su buen uso permite obtener un valor que se encuentre en el rango recomendado. Las secciones del pozo deben ser diseñadas con los centralizadores, en especial la sección de producción, esta debe tener un diseño óptimo para tener como resultado el máximo valor de Stand Off. Para obtener una cementación óptima se realizan diferentes maniobras con la tubería, para que resulte un valor adecuado de Stand Off, según las secciones (González, 2014).

### 1.2.2.5. Tapones de Goma.

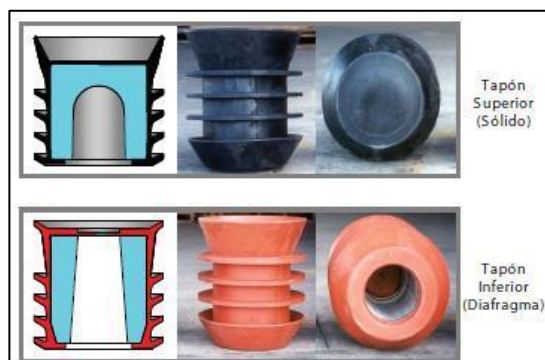
Es importante el uso de Tapones en la parte superior e inferior, para el desplazamiento de la lechada de cemento. Se usa dos Tapones: el superior e inferior, como muestra la Figura 1.10, los cuales tienen sus determinadas funciones como:

- El primer tapón en usarse es generalmente llamado dardo, el cual va desplazando el lodo que adhiere dentro de la tubería y la lechada de pre-flujo bombeada hacia el anular. Este tapón o dardo es colocado en el cabezal de cementación.
- El segundo tapón en emplearse es conocido como tapón viajero, es colocado en el tope del colgador, con finalidad de que los fluidos de perforación y las lechadas de cemento de pre-flujo se desplacen por el interior de la tubería.

En un punto el tapón superior e inferior se encuentran y entran en contacto, los cuales se desplazan juntos separando los fluidos de perforación delante de la lechada de cemento y evitar de esta forma la contaminación de la lechada. Además, se acoplan en el collar flotador para que la lechada de cemento se desplace al anular, esto se puede identificar con un incremento de presión en superficie (Nelson, 2012).

**FIGURA 1.10**

*Tapón Superior y Tapón Inferior*



Fuente: (Cruz, 2017)

### ***1.2.2.6. Colgadores.***

Los colgadores tienen como función tener la capacidad de mantener colgado el liner de producción en el hoyo del pozo por todo el tiempo de vida productiva. Esto permite reducir costos de tubería, evitando que la tubería venga desde superficie. Además, permite manejar con facilidad el liner al momento de los trabajos de cementación. Estas herramientas tienen cuñas dentadas que se desplazan al frente de los conos permitiendo agarrar la pared del revestimiento (Salcedo, 2012).

Existen parámetros que permiten seleccionar el tipo de colgador adecuado:

- Tipo de Fluido de perforación.
- Configuración de la Completación.
- Datos del pozo, ángulo de desviación, TVD.
- Presión y temperatura del pozo.
- Profundidad del revestidor.

Existen tres tipos de Colgadores, según su activación:

- Mecánicos
- Hidráulicos

#### ***1.2.2.6.1. Colgadores Mecánicos:***

Los colgadores mecánicos se activan al realizar movimientos rotacionales con el liner. Estos movimientos tienen como objetivo desenganchar las cuñas y luego pueda enganchar con el revestidor ya cementado anteriormente. Una de las

características de este tipo de colgador es no tener un pistón hidráulico, como se muestra en la Figura 1.11 (Nelson, 2012).

Las ventajas del uso de este tipo de colgador son (Chávez, 2017):

- Al no tener un pistón hidráulico, no existen fugas y se tiene una presión integral.
- Este tipo de colgador es usado generalmente en pozos que tienen pesos de fluidos de perforación altos
- Sin restricciones en pozos verticales.

## FIGURA 1.11

### *Colgador Mecánico*



Fuente: (Chávez, 2017)

### **1.2.2.6.2. Colgadores Hidráulicos:**

Los colgadores hidráulicos se activan mediante la aplicación de presión y fuerza sobre el pistón hidráulico, como se muestra en la Figura 1.12, esto genera que las cuñas del colgador se muevan a la posición de asentamiento. Además, en la parte

externa y bajo las cuñas, se localizan los resortes que permiten que las cuñas vuelvan a su posición inicial con un movimiento hacia arriba. Las ventajas que se tiene al usar este tipo de colgador son (González, 2014):

- No existe restricciones en su uso en pozos desviados (uso frecuente).
- Las maniobras en superficie son pocas.
- Se usa generalmente cuando se quiere colgar un liner dentro de otro liner
- La principal ventaja es que puede ser asentado y desasentado varias veces, según la necesidad.

## FIGURA 1.12

### *Colgador Hidráulico*



Fuente: (Chávez, 2017)

### ***1.2.2.7. Raspadores.***

Los raspadores son cepillos de acero que pueden ser adaptados alrededor de una unión de tubería de revestimiento, como se muestra en Figura 1.13. Esta herramienta generalmente tiene como finalidad remover físicamente el revoque de filtración de la pared del pozo. Principalmente extraer la costra que produce el

fluido de perforación, el exceso de lodo gelificado y escombros. Esto ayuda a que el cemento se adhiera con facilidad a la formación para que los raspadores cumplan su función la tubería debe moverse, estos movimientos pueden ser rotatorios. Según su movimiento existen dos tipos de raspadores que son (Nelson, 2012):

- Raspadores Rotatorios: la Tubería realiza movimientos rotatorios.
- Raspadores Recíprocos: la Tubería realiza movimientos recíprocos.

### FIGURA 1.13

#### *Raspadores*



Fuente: (Schlumberger,2004)

#### *1.2.2.8.Top Packer.*

El Top Packer es una herramienta que tiene como objetivo principal dar sello en el anular del liner y el revestidor, el cual es ubicado en la parte superior del colgador.

Entre otros usos son (González, 2014 & Salcedo, 2012):

- Sellar el liner.
- Elimina fuga de gas de la formación a la superficie.
- Generalmente se usa en liner no cementados



### ***1.2.3. TIPOS DE LECHADA***

En las secciones superficiales solo es necesario un tipo de lechada que no requiere parámetros exigentes ni aditivos. En cambio, en las demás secciones como intermedio y principalmente la de producción es necesario usar los dos tipos de lechadas. Estas lechadas se diferencian en especial por el valor de densidad. Una de ellas es más pesada que la otra, para que pueda ser desplazado por la diferencia de densidades. La lechada de menor peso o ligera es llamada Lead o de relleno mientras que la lechada más pesada se llama Tail o de cola (Nelson, 2012).

#### ***1.2.3.1. Lead.***

Esta lechada es la más ligera, el valor de su densidad se encuentra en el rango de 12ppg hasta 14ppg. Es bombeada primera al hoyo del pozo. Su objetivo principal es recubrir las secciones superiores del anular. Por su bajo peso, se tiene una resistencia menor entre el revestidor y la formación y es necesario bombear otra lechada que evite estos efectos (González, 2014).

#### ***1.2.3.2. Tail.***

Esta lechada es la más pesada, está diseñada para tener densidades de 15ppg hasta 17ppg. Tiene como objetivo cubrir las secciones inferiores del pozo. Esta es la segunda lechada bombeada al hoyo del pozo. Al tener mayor densidad tiene como ventaja proveer mayor resistencia entre el revestidor y la formación (González, 2014).

#### **1.2.4. PROPIEDADES DE LECHADA DE CEMENTO**

Las lechadas de cemento deben cumplir ciertos parámetros según la sección a la que será bombeada, estos parámetros permiten que la cementación tenga óptimos resultados. Estos parámetros o características deben ser evaluados antes de que la lechada sea bombeada al pozo. Se realiza diferentes pruebas de laboratorio simulando las condiciones del reservorio como las presiones y temperaturas, para que los resultados se asemejen a las condiciones reales. Todas estas características deben ser evaluadas minuciosamente para obtener un excelente trabajo de cementación. A continuación, analizaremos las propiedades a ser evaluadas (González, 2014).

##### **1.2.4.1. Densidad de la Lechada de Cemento.**

El concepto universal de densidad de cualquier sustancia es la relación de masa por unidad de volumen. Generalmente en Ecuador se usa las unidades lb/gal o “ppg”, aunque también suele usarse  $\text{g/cm}^3$ .

Cada pozo tiene un diseño diferente de las lechadas de cemento, esto sucede por la adición de diferentes aditivos, cemento y agua, según los escenarios que se presentan en fondo. Por ende, se determina valores fijos de densidad, este valor debe ser verificado constantemente para no tener problemas operacionales como pérdida de circulación, fracturamiento de las formaciones y mezcla de los fluidos de perforación con la lechada de cemento, evitando contaminación. Los cuales darán como resultado un mal trabajo de cementación. El valor de densidad influye en el control del pozo por eso debe tener un diseño previo.

Los tipos de lechada Lead y Tail, en general se diferencian por su valor de densidad, valores promedios que se tiene en la lechada Lead es 13,5 lb/gal y la lechada Tail es de 15.5 lb/gal. Para obtener el valor de densidad deseado se adiciona aditivos que permiten modificar su valor como aumentar o disminuir. Esta propiedad es medida en la balanza de fluidos de perforación como se muestra en la Figura 1.14, evitando que se generen burbujas de aire para tener un valor más exacto, este procedimiento está regido por la Norma API 10B (González, 2014).

### FIGURA 1.14

#### *Balanza Presurizada y sus partes*



Fuente: Manual de Equipo-Laboratorio de Fluidos de Perforación (EPN,2019)

#### ***1.2.4.2.Fluides.***

La fluidez se describe como la capacidad de una mezcla, en este caso una lechada de cemento para llenar la forma o el anular del pozo adecuadamente con el trabajo de cementación y sin reducir la calidad de la lechada de cemento. La fluidez es directamente dependiente del contenido de agua, este contenido puede modificarse mediante la adición de aditivos. Al aumentar el contenido de agua o agregar aditivos aumenta la fluidez de la lechada. El exceso de agua provoca que el cemento y los aditivos comienzan a separarse, como consecuencia reduce la calidad. Generalmente los cementos con adición de los aditivos requieren de más agua (Leal & Echeverry, 2020).

Una de las propiedades más importantes que necesita la lechada es la cantidad de agua, con esto permitimos que la misma sea bombeable. Cada mezcla necesita un valor fijo de agua, esta propiedad va de la mano con la propiedad de la densidad, la lechada de cemento debe tener las condiciones para poder llegar a fondo sin ningún problema también como objetivo ir controlando el pozo.

Por cada aditivo sólido se necesita un porcentaje de agua, este valor de agua debe ser exacto para que la lechada cumpla con su objetivo. Se necesita realizar con cada aditivo sólido y cemento la adición de agua hasta que este tenga una consistencia adecuada, para tener los porcentajes de agua de cada aditivo, hacer una sumatoria para la lechada tener un porcentaje de agua exacto. Tomando en cuenta que el agua usada para las lechadas de cemento debe ser de agua dulce y limpia, para evitar un fraguado rápido. En campo el agua usada se tiene de la misma locación (Salcedo, 2012).

#### ***1.2.4.3.Rendimiento de la Lechada.***

Esta propiedad permite determinar los sacos utilizados en toda la cementación, determinar el volumen total de la mezcla de la lechada (cemento, agua y aditivos), que se obtiene por el uso de cada saco de cemento.

Las unidades que generalmente maneja esta propiedad son  $\text{ft}^3/\text{saco}$ , galón/saco y  $\text{m}^3/\text{kg}$ ; en el Ecuador la unidad que se utiliza es  $\text{ft}^3/\text{saco}$ . El valor del rendimiento va de la mano con la densidad que tenga la lechada de cemento, por ende, los porcentajes de aditivos presentes (González, 2014).

#### ***1.2.4.4.Tiempo de Bombeabilidad.***

Es una de las propiedades más importante, que debe ser considerada, ya que con este parámetro se puede definir el tiempo necesario que la mezcla de la lechada tiene para ser bombeada, durante este tiempo la lechada al ser desplazada debe tener una consistencia de tal manera que llegue a fondo sin inconvenientes, al llegar a la profundidad deseada u objetivo esta recién empiece a fraguarse, todo esto sucede con la ayuda de aditivos que pueden retardar el fraguado.

Esta prueba se la realiza en un laboratorio de cementos, en el quipo llamado consistómetro, el cual simula las condiciones de presión y temperatura que se tiene en el pozo, esto permite tener datos que se asemejen a la realidad. Los datos obtenidos están en unidades Bearden de consistencia “Bc” basadas en el torque y arrastre (González, 2014):

- Si se tiene 70 Bc es la capacidad de bombeo de la lechada antes que fragüe.
- Si se tiene 100 Bc indica el tiempo límite registrado de fraguado.

El tiempo de bombeabilidad es diseñado según el tiempo que dura la operación de cementación, adicionando un factor de seguridad por alguna eventualidad que se presente, la operación de cementación consiste en: realizar la mezcla, bombear al anular y desplazarla al lugar deseado antes que el cemento fragüe. Las compañías que presentan los servicios de cementación han optado por tener un estándar sobre el tiempo de bombeabilidad, el cual es considerado como un factor de seguridad en caso se presenten problemas operacionales, deben ser mayores a (Salcedo, 2012):

- 1.5 veces el tiempo operación.
- 2 horas adicionales al tiempo de operación.

#### ***1.2.4.5. Agua libre.***

El agua libre debe ser considerado un parámetro importante, ya que si el porcentaje es alto se tendrá una ineficiente cementación, presentándose algunos de estos problemas: reducción del tiempo de bombeabilidad, formación de canalizaciones entre la formación y el revestidor y permitiendo el paso de gases y fluidos.

Esta propiedad determina la cantidad de agua que se ha separado de la lechada bombeada al pozo, esto sucede cuando el cemento empieza a fraguarse y se forma una capa en la parte superior de la lechada. Este porcentaje de agua libre en la lechada de cemento indica que al momento de realizar la mezcla no se realizó un procedimiento adecuado o que las proporciones de sólidos y líquidos no fueron correctas y previamente ajustadas (González, 2014).

### 1.2.4.6.Reología.

La Reología es la ciencia que estudia la deformación que sufren los fluidos cuando se les aplica una fuerza. Las propiedades de flujo de un líquido son definidas por la resistencia a fluir. Por definición la reología describe la relación que existe entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte, que permite que un fluido sea desplazado. Los valores reológicos permiten calcular los siguientes parámetros (Betancourt, 2015).

- Velocidad anulas y el caudal de bombeo.
- La velocidad interior de la tubería.
- Presiones de fricción.
- Potencia Hidráulica.
- Volumen de lechada.

Esta prueba se realiza en viscosímetros rotativos, el modelo de viscosímetros usado en la presente investigación se observa en Figura 1.15.

**FIGURA 1.15**

*Viscosímetro rotativo OFITE MODELO 900*



Fuente: Equipo de Laboratorio de Fluidos de Perforación, Escuela Politécnica Nacional.

- **Velocidad de corte,  $\gamma$ :** es el índice al que cambia la velocidad a la que una capa de fluido pasa sobre una capa adyacente, o también definida como la diferencia en velocidad de dos partículas de fluido divididas entre la distancia que las separa. Las unidades de velocidad de corte son segundos recíprocos [ $seg^{-1}$ ] (González, 2014 & Betancourt, 2015).
- **Esfuerzo de corte,  $\tau$ :** Es la fuerza por unidad de superficie requerida para mover un fluido a una velocidad de corte dada. Es decir, la fuerza mínima necesaria para mover un fluido. Se define como la fuerza de fricción producida por dos partículas de fluido moviéndose una a continuación de la otra y entre sí. Las unidades de esfuerzo de corte son [ $lb/100pies^2$ ], (González, 2014 & Betancourt, 2015).

#### ***1.2.4.6.1. Tipos de Fluidos:***

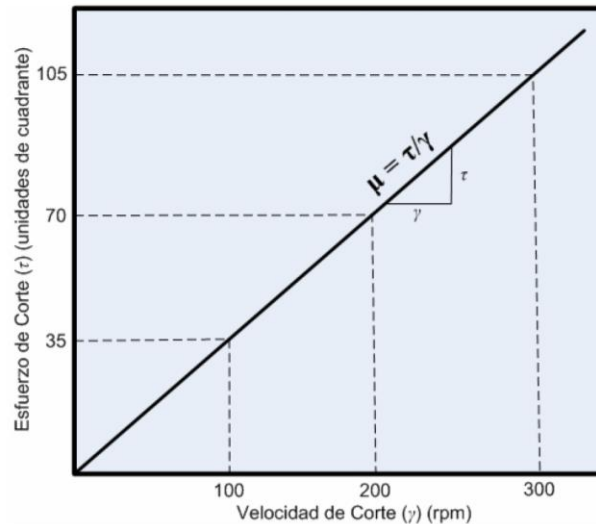
- **Fluidos Newtonianos:** Los fluidos newtonianos más conocidos son: agua, diesel, gasolinas y gases, en todos estos fluidos la viscosidad permanece constante para todas las velocidades de corte; a condiciones de temperatura y presión constante. Por ende, el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte.

Al graficar el esfuerzo de corte versus la velocidad de corte, se tendrá una recta, como se muestra en la Figura 1.16, la pendiente de esta se define como la viscosidad de un fluido newtoniano. El esfuerzo de cedencia de un fluido newtoniano siempre será cero (0), (González, 2014 & Salcedo, 2012).



**FIGURA 1.16**

*Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte para un fluido newtoniano*



Fuente: Guía de Practicas de Fluidos de Perforación (EPN, 2019)

- *Fluidos No Newtonianos:* A diferencia de los fluidos newtonianos, estos fluidos no muestran una proporción directa entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, como se muestra en la Figura 1.17. En este tipo de fluido la viscosidad es llamada como viscosidad efectiva. Los fluidos no newtonianos tienen una clasificación que consiente en (González, 2014 & Salcedo, 2012):

Independientes del tiempo

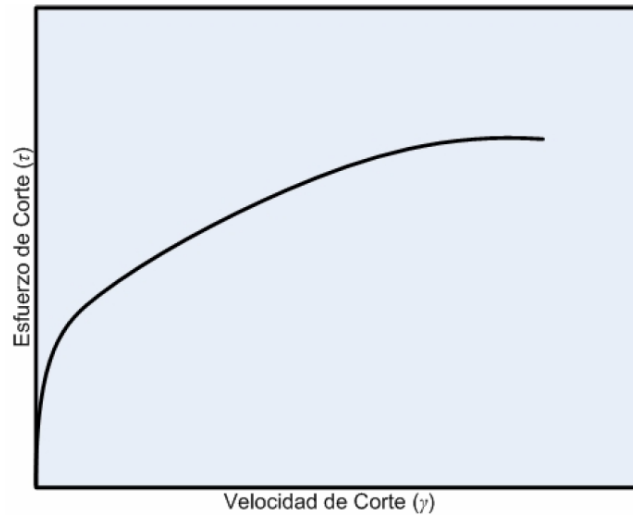
- Fluidos Bingham-plásticos
- Fluidos pseudo plásticos
- Fluidos dilatantes

Dependientes del tiempo

- Fluidos tixotrópicos

**FIGURA 1.17**

*Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte para un fluido no newtoniano*



Fuente: Guía de Practicas de Fluidos de Perforación (EPN, 2019)

Con las lecturas que nos proporcione el viscosímetro rotatorio, se puede calcular algunas propiedades entre ellas.

- **Viscosidad plástica, PV:** Esta viscosidad es la que resulta de la fricción mecánica entre: Sólidos; Sólidos y Líquidos; Líquidos y Líquidos. Generalmente depende de los sólidos presentes. Su unidad es el centipoise “cP”. Si se tiene una viscosidad plástica alta quiere decir que hubo un aumento de porcentaje de sólidos en la lechada. Por tanto, si se tiene una baja viscosidad plástica combinada a un alto punto cedente permite una limpieza efectiva del hoyo con alta tasa de penetración (González, 2014).

$$PV = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (1.2)$$

Donde:

$PV = \text{Viscosidad Plástica (cP)}$

$\theta_{600} = \text{Lectura a 600 (rpm)}$

$\theta_{300} = \text{Lectura a 300 (rpm)}$

- **Yield Point, YP:** es la resistencia inicial que tiene un fluido a fluir, la cual es causada por fuerzas electromagnéticas entre las partículas. El punto cedente es una medida de estas fuerzas bajo condiciones de flujo y es dependiente de la presencia de sólidos y sus propiedades, El ambiente iónico del líquido que rodea los sólidos, entre otra. La unidad es lbf/100 ft<sup>2</sup> (González, 2014).

$$YP = \theta_{300} - PV \quad (1.3)$$

Donde:

YP = Yield Point

$\theta_{300} = \text{Lectura a 300}$

PV = Viscosidad Plástica.

#### ***1.2.4.7. Control de Filtrado.***

Esta propiedad permite prevenir la pérdida de fluido hacia las formaciones, si esto llegara a suceder se presentarían los siguientes problemas (Salcedo, 2012):

- Las formaciones se contaminarían.
- Las paredes del pozo se derrumbarían.

- La viscosidad de la lechada aumentaría.
- La lechada no podría llegar a su objetivo, teniendo un fraguado temprano.
- El tiempo de bombeabilidad disminuiría.

La pérdida de filtrado sucede cuando la presión diferencial hace que la fase líquida de la lechada de cemento ingrese a las formaciones, tiene mayor impacto en las formaciones permeables.

Si existe presencia de filtración en las formaciones, se observa que los sólidos son detenidos y forman una capa, la cual se deposita en las paredes del hoyo. Si la fase líquida del cemento contiene un líquido inmiscible, las gotas del líquido inmiscible también se depositan en la capa. Para conocer si existe filtrado se realiza el análisis en presas API de baja y alta presión. En el presente trabajo se usará la prensa de baja presión que se muestra en la Figura 1.18 (González, 2014).

### **FIGURA 1.18**

*Esquema del Equipo Prensa API baja Presión*



Fuente: Manual de Equipo- Laboratorio de fluidos de perforación (EPN,2019)

En cualquier pozo por diferencia de presiones, existe filtración. Para evitarla se añade aditivos que controlen la filtración. Además, el agua para realizar las lechadas debe estar en el porcentaje exacto, para que no exista un exceso de filtración. Existen dos tipos de filtración (González, 2014 & Salcedo, 2012).

#### ***1.2.4.7.1. Filtración estática:***

Dicha filtración ocurre cuando se paran las operaciones por conexiones o alguna eventualidad como: pérdidas de circulación o falla en superficie y se interrumpa el bombeo de la lechada (González, 2014 & Salcedo, 2012).

#### ***1.2.4.7.2. Filtración Dinámica:***

A diferencia del anterior tipo de filtración, esta ocurre mientras la lechada de cemento es bombeada al pozo y produce una acción erosiva sobre la formación. Esta acción únicamente sucede mientras la lechada de cemento está siendo desplazada (González, 2014 & Salcedo, 2012).

#### ***1.2.4.8. Resistencia a la Compresión.***

Esta propiedad es la que complementa las anteriores propiedades y se puede concluir si la lechada de cemento es la adecuada. Esta propiedad es el resultado de presiones que se generan sobre un sólido. Una de las características más relevantes es la reducción en el volumen del sólido mientras se mantiene el valor de la masa, la masa es constante.

La resistencia a la compresión puede ser medida cuando la lechada de cemento tiene el fraguado final, ya que las presiones que se ejerce dentro del pozo

producen esfuerzos en diferentes direcciones. Esta prueba debe ser verificada porque su resultado, refleja si la lechada de cemento podrá sostener la tubería de revestimiento en el hoyo del pozo, resistir las presiones hidráulicas sin que se produzca fracturamiento del cemento fraguado (Leal & Echeverry, 2020).

El cemento fraguado debe tener una buena adherencia, que permita tener sello del liner de producción, para que esto suceda es necesario tener una fuerza de compresión mayor a los 2000psi.

Puede ser determinado mediante dos métodos el Método Destructivo y el Método Sonico No Destructivo. El método destructivo, es aquel que con la lechada de cemento se forman cubos de 50mm y se ejerce fuerzas sobre él, para conocer la fuerza máxima se compresión, mientras el Método Sonico No Destructivo, que consiste en que el aparato transmita una señal sónica, que permita evaluar el cemento. Se correlaciona las propiedades de cemento como: tiempo y desarrollo de fuerzas ejercidas con el tiempo de tránsito de la señal sónica (González, 2014).

### **1.3.ADITIVOS DEL CEMENTO**

Los aditivos en la lechada de cemento son muy importantes, ya que la lechada de cemento al momento de ser bombeado al fondo es sometida a diferentes presiones y temperaturas, debe resistir a cualquier cambio. Esto se puede controlar adicionando ciertos aditivos. La adición de los aditivos modifica ciertas propiedades como la densidad, reología, viscosidad, el agua libre, control de filtrado, el tiempo de fraguado.

Con el pasar de los años se han ido produciendo diferentes tipos de aditivos,

alrededor de 100 aditivos, los cuales se encuentran en estado sólido o líquido. Existe una infinidad de aditivos los cuales están clasificados en ocho categorías que son: aceleradores, retardadores, extendedores, agentes de control de filtrado, dispersantes, agentes de control de agua libre, densificantes y aditivos especiales (Meraz, 2015).

### ***1.3.1. ACELERADORES***

Los aditivos aceleradores como su nombre lo indica, por su composición química reducen el tiempo de fraguado y producen la resistencia a la compresión necesaria en un tiempo determinado. Además, se los utiliza para contrarrestar las consecuencias de otros aditivos como son los dispersantes o agentes de control de filtrado.

En esta categoría son usadas las sales inorgánicas que trabajan como aceleradores como: el cloruro de calcio, el cloruro de sodio y agua marina. También se usa los sulfatos, carbonatos, silicatos, tiosulfatos, aluminatos, hidróxido de potasio e hidróxido de amonio.

El aditivo acelerante más usado, económico y con excelentes resultados es el cloruro de calcio, se adicionan en un 2% a 4% de la masa del cemento y es más eficiente en pozos someros con bajas temperaturas. Si la adición es mayor, superando el 6% se produce un fraguado prematuro, tiene como resultado menor tiempo de bombeabilidad y una menor resistencia a la compresión de la lechada. Existen varios aditivos para regular el tiempo de fraguado para diferentes parámetros de temperatura como se muestra en la Tabla 1.3, (Baroid, Sección 17, 2000 & Vistrain 2005).

**TABLA 1.3***Aditivos Aceleradores*

Aditivo	Temp., °F (°C)	Concentración		
		%BWOW*	gal/bbl	L/m <sup>3</sup>
CaCl <sub>2</sub>	<120 (<49)	0.5-4.0	n/a	n/a
NaCl	<190 (<88)	1.0-10.0	n/a	n/a
KCl	<190 (<88)	1.0-3.0	n/a	n/a
Alcoholes	<150 (<66)	n/a	0-1.0	0-3
NaOH	<190 (<88)	según neces.	no disp.	no disp.
Yeso	<100 (<38)	según neces.	no disp.	no disp.
Silicato de sodio	<100 (<38)	1.0-3.0	2.0-12.0	6-36

\* %BWOW = porcentaje de agua por peso

NOTA: Entre los aditivos más conocidos se tiene los siete, cada uno tiene un rango de aplicación con parámetros importantes como la temperatura, para pozos someros y profundos Indicando el porcentaje requerido de agua. Fuente: Manual de Fluidos Baroid (Baroid, Sección 17, 2000, p. 17-4)

**1.3.2. RETARDANTES**

Este aditivo retardante es usado en lechadas de cemento que serán bombeadas a las secciones intermedias y de producción, ya que su desplazamiento será extenso hasta llegar a las zonas más profundas del pozo. En estas zonas existen temperaturas elevadas y el tiempo de fraguado debe empezar al terminar la operación. Los retardantes también tienen como ventaja contrarrestar los efectos que producen el aumento de temperaturas

Además de prolongar el tiempo de fraguado, reduce la viscosidad de la



lechada de cemento y permite ubicar la lechada de cemento en el fondo del pozo antes de que este se endurezca. Los aditivos más conocidos son los lignosulfactantes, cloruro de sodio, ácidos orgánicos y compuestos inorgánicos.

El aditivo más utilizado es el lignosulfactante que principalmente se caracteriza por tener buenos resultados en todo tipo de cemento. Se utiliza porcentajes entre el 0.1% y 1.5% del peso de cemento y en rangos de temperatura de 250<sup>0</sup> F a 600<sup>0</sup>. Existen algunos aditivos con sus guías de operación como indica la Tabla 1.4, (Baroid, Sección 17, 2000 & Meraz, 2015).

**TABLA 1.4**

*Aditivos Retardantes*

Aditivo	Temp., °F (°C)	Concentración		
		%BWOC*	lb/bbl	kg/m <sup>3</sup>
Q-BROXIN	<120 (<49)	0.1-2.0	0.2-8.0	0.6-23
Lignosulfato de calcio	100-160 (38-71)	0.1-2.0	0.2-8.0	0.6-23
Gluconato de sodio	150-200 (66-93)	0.1-1.0	0.05-1.5	0.15-4
Heptogluconato de sodio	150-200 (66-93)	0.1-0.8 gal/bbl	0.1-0.8 gal/bbl	0.3-2.3 gal/bbl
Citrato de sodio	150-230 (66-110)	0.1-1.0	0.025-0.40	0.07-1.1

\* %BWOC = porcentaje de cemento por peso

NOTA: Entre los más usados, para pozos someros se utiliza generalmente Lignosulfato de Calcio y Q-Broxin, en pozos profundos se usan los demás aditivos, por los rangos de temperatura, se recomienda ciertas concentraciones por aditivo. Fuente: Manual de Fluidos Baroid (Baroid, Sección 17, 2000, p. 17-5)

### 1.3.3. EXTENDEDORES

Los aditivos extendedores por su composición química ayudan a disminuir la densidad de la lechada de cemento, al adicionar los extendedores se reduce la cantidad de cemento por unidad de volumen, con la finalidad de reducir la presión hidrostática, ampliar el rendimiento de la lechada y cementar formaciones débiles evitando daños en la formación. Tienes tres categorías, El primer grupo se encuentran las arcillas y agentes viscosificantes. Un segundo grupo considera aditivos de baja densidad. Por último, un tercer grupo son el nitrógeno o el aire.

Los aditivos más usados en la industria son: bentonita, silicato de sodio y puzolánicos. Este último además de cumplir su función como extendedor ayuda a la resistencia a la compresión de la lechada de cemento, porque suele reaccionar con el hidróxido de calcio. Estos tres aditivos necesitan ciertos parámetros para su uso como indica en la Tabla 1.5, (Baroid, Sección 17, 2000).

**TABLA 1.5**

*Aditivos Extendedores*

Aditivo	Rango de Temp. °F (°C)	Concentración		
		%BWOC*	lb/bbl	kg/m <sup>3</sup>
AQUAGEL	200 (94)	0.5-8.0	1.0-32.0	3-91
Ceniza volante, Puzolana	n/a	Según neces.	Según neces.	Según neces.
Silicato de sodio	250 (121)	1.0-3.0	2.0-12.0	6-34

\* %BWOC = porcentaje de cemento por peso

NOTA: Cada aditivo resiste ciertas temperaturas, en las puzolanas no aplica esto, puede ser usado para cualquier sección, las concentraciones recomendadas para cada aditivo. Fuente: Manual de Fluidos Baroid (Baroid, Sección 17, 2000, p. 17-7)

### 1.3.4. CONTROL DE FILTRADO

Los controladores de Filtrado son usados, cuando existe excesiva pérdida de agua en formaciones de bajas presiones. Tiene como consecuencia la deshidratación de la lechada de cemento, provocando que el tiempo de fraguado sea antes de los previsto y por ende se endurezca antes de llegar a su objetivo

Además de controlar la filtración, permite controlar otras propiedades como elevar la viscosidad, retardar el tiempo de fraguado y controla el porcentaje de agua libre. Este aditivo evita que la lechada de cemento pierda su consistencia. A continuación, se en lista algunos controladores de filtrado, como se muestra en la Tabla 1.6 (Vistrain, 2005).

**TABLA 1.6**

*Aditivos de control de Filtrado*

Aditivo	Temp., °F (°C)	Concentración		
		%BWOC*	lb/bbl	kg/m <sup>3</sup>
PAC	<200 (<94)	0.125-1.25	0.25-5.0	0.7-14
CMC	<175 (<79)	0.125-1.50	0.25-6.0	0.7-17
HEC	<200 (<94)	0.125-1.75	0.25-7.0	0.7-20
CMHEC	120-230 (49-110)	0.125-1.00	0.25-4.0	0.7-11
BARAZAN PLUS	<160 (<71)	0.05-0.40	0.1-1.5	0.3-4

\* %BWOC = porcentaje de cemento por peso

NOTA: El más usado es el PAC, el cual resiste altas temperaturas. Fuente: Manual de Fluidos Baroid (Baroid, Sección 17, 2000, pag 17-6)

### **1.3.5. DISPERSANTES**

En la preparación de la Lechada de Cemento se adicionan diferentes aditivos o sólidos, se produce una mezcla de alta viscosidad, la cual no puede ser bombeada al fondo del pozo. Por eso es necesario usar dispersantes que permitan reducir la viscosidad de la lechada. Estos parámetros pueden ser evaluados mediante las pruebas reológicas (Baroid, Sección 17, 2000).

La viscosidad de la lechada de cemento es una propiedad que puede variar en presencia de altas temperaturas que existen en el fondo del pozo, es necesario implementar algunos aditivos que mejoren las propiedades de flujo y se mantenga una distribución uniforme de los compuestos adicionados. Es importante que la viscosidad de la lechada de cemento disminuya y la presión de bombeabilidad sea menor durante el desplazamiento.

Al tener menor viscosidad, se tiene ventajas como:

- Control sobre pérdida de filtrado.
- Control sobre agua libre.
- Mayor resistencia a la compresión.

Existen varios aditivos dispersantes, en la industria los más usados son los lignosulfactantes, calcio, sales y polímeros, se muestran algunos aditivos dispersantes con sus respectivas guías de operación en la Tabla 1.7. Es recomendable usar del 0,2 % a 0,6% del peso de cemento (Vistrain, 2005).

**TABLA 1.7***Aditivos Dispersantes*

Dispersantes	Temp., °F (°C)	Concentración		
		%BWOC*	lb/bbl	kg/m <sup>3</sup>
Sulfonato de naftaleno	<200 (<94)	0.1-2.0	0.2-8.0	0.6-23
Q-BROXIN	110-200 (43-94)	0.1-2.0	0.2-8.0	0.6-23
Lignosulfonato de calcio	<160 (<71)	0.1-2.0	0.2-8.0	0.6-23

\* %BWOC = porcentaje de cemento por peso

NOTA: Los aditivos se tienen para diferentes temperaturas, así no existirá reacciones, se tiene la misma concentración para los tres aditivos. Fuente: Manual de Fluidos Baroid (Baroid, Sección 17, 2000, pag 17-10)

**1.3.6. CONTROL DE AGUA LIBRE**

Los agentes de control de agua libre deben ser adicionados en toda lechada, ya que controla que sea menor el porcentaje de agua libre, evitando que el agua libre se desplace a las formaciones. Especialmente en las lechadas de cemento de bajo peso, es necesario adicionar un controlador de agua libre para que mantenga fija la concentración de agua en la lechada. Si no se usa estos aditivos, las lechadas de cemento tendría un ineficiente resultado, afectando a la circulación y a la bombeabilidad de la lechada.

Se conoce algunos agentes controladores del agua libre como Aquagel, Clorhidrato de aluminio entre otros, se muestra los parámetros de los aditivos anteriormente mencionados en la Tabla 1.8 (Vistrain, 2005).

**TABLA 1.8***Aditivos de control de Agua Libre*

Aditivo	Temp., °F (°C)	Concentración		
		%BWOC*	lb/bbl	kg/m <sup>3</sup>
AQUAGEL	200 (94)	0.5-8.0	2.0-32.0	6-91
Clorhidrato de aluminio	250 (121)	0.01-0.20	0.04-0.75	0.1-2.1

\* %BWOC = porcentaje de cemento por peso

NOTA: Estos aditivos entre mayor temperatura, menor concentración. Fuente: Manual de Fluidos Baroid (Baroid, Sección 17, 2000, pag 17-8)

### 1.3.7. DENSIFICANTES

Estos agentes ayudan a aumentar la densidad de la lechada de cemento. Es necesario aumentar la densidad de la lechada para obtener control sobre las presiones del pozo.

La característica de estos agentes es un alto valor de gravedad específica. Además, es importante considerar el tamaño de grano, compatibilidad con el cemento en la Tabla 1.9 indica los pesos específicos de algunos densificantes. En la industria petrolera los densificantes más conocidos y usados son la Barita, Hematita, Tetra óxido de Magnesio y Limolita.

La Hematita tiene un elevado valor de peso específico, se obtiene valores de densidad mayores. Mientras que la barita tiene un peso específico de 4,2 y como desventaja se observa el uso de mayor porcentaje de agua (Meraz, 2015).

**TABLA 1.9***Aditivos Densificantes*

<b>Material densificante</b>	<b>Peso específico</b>
Barita	4.2
Hematita	4.8-5.0
Arena	2.6

Fuente: Manual de Fluidos Baroid (Baroid, Sección 17, 2000, pag 17-8)

**1.3.8. ADITIVOS ESPECIALES**

Existen algunos aditivos que no son parte de las ocho categorías anteriormente descritas, que son usados como: antiespumantes, para mejorar la durabilidad entre otros. Por tanto, se describen algunos de ellos como: aditivos antiespumantes y aditivos fibrosos (Vistrain, 2005).

**1.3.8.1. Aditivos Antiespumantes.**

Los agentes antiespumantes son necesarios al realizar la mezcla de la lechada de cemento, la adición de diferentes aditivos frecuentemente genera espuma. La cual tiene efectos negativos en los trabajos de cementación como: formación de geles, disminución de presión hidráulica durante el desplazamiento. Este aditivo puede ser agregado directamente al agua de la mezcla o a la mezcla de los aditivos sólidos. El agente antiespumante más usado es la Silicona que es recomendable usar en concentraciones menor al 0.1% del porcentaje de agua de la mezcla (Vistrain, 2005).

### ***1.3.8.2. Aditivos Fibrosos.***

Los aditivos fibrosos son usados cuando existen fracturas hidráulicas. Es recomendable usar entre 0.15% y 0.5% del porcentaje de agua. La fibra más conocida y usada es la Fibra de Nylon (Vistrain, 2005).

## **1.4. ALÓFANO**

En 1980 se realizó una exploración en busca de materia prima de ladrillos en Santo Domingo de los Colorados la cual no fue exitosa con su objetivo, pero encontraron un gran depósito de arcilla rica en Alófono. Este depósito contenía un 50% a 80% de Alófono en peso, este no podía ser usado para la producción de ladrillos. El Alófono se conoce como un mineral de orden corto, que se forma principalmente a partir de ceniza volcánica (rocas vulcano-clásticas cuaternarias alteradas). El tamaño de partícula primaria del Alófono varía entre los valores de 3 a 5 nm, es un aluminosilicatos hidratado, rico en Hierro (Fe), con una gran superficie específica (Kaufhold et al., 2009).

Los alófanos se clasifican por la relación Al / Si, por lo cual es importante conocer su valor en este caso el Alófono ecuatoriano varia de 1.3 a 1.4. Estos Alófanos se denominan “Alófanos de depósito de corriente” o “Alófono de manantiales de Sílice”. Se define generalmente la relación de Al/Si del Alófono mediante tres métodos (Jiménez et al., 2019).

1) Extracción de pirofosfato y oxalato de amonio.

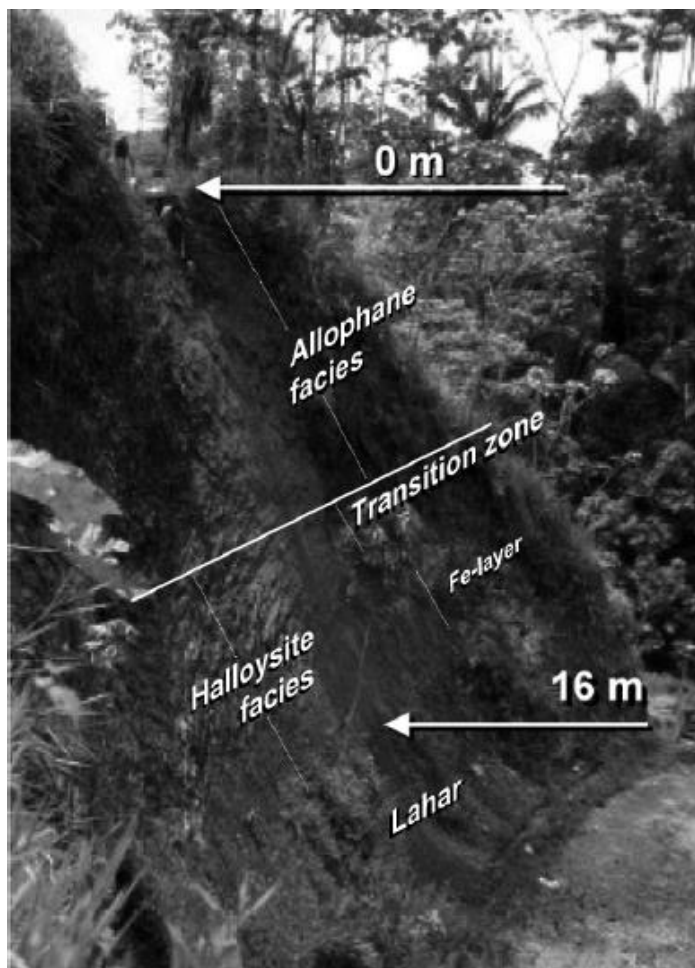


2) Datos XRF de las fracciones purificadas.

3) Análisis SEM-EDX de agregados de Alófono aparentemente puros.

### FIGURA 1.19

*Perfil de la Mina de Alófono*



Fuente: (Kaufhold et al., 2009)

Se realizaron diferentes análisis de Rayo X: Difracción (XRD) y Fluorescencia (XRF) para conocer su composición. Los resultados de XRF indicaron dos facies diferentes separadas por una zona de transición de 2m de espesor y se confirmó con

los datos de XRD la presencia de las dos capas. Se diferencian por los componentes minerales, la parte superior se denominó “facies Alófanos” y la parte inferior “facies Halloysita” como se observa en la Figura 1.19. Las “facies Alófanos” tienen presencia de Hoblenda y el feldespatos en porcentajes bajos, pero estos no se encuentran en la “facies halloysita”. Las dos facies pueden explicarse como cenizas volcánicas de dos erupciones volcánicas diferentes (Jiménez et al., 2019).

El riesgo de erupciones volcánicas indica que Guagua Pichincha probablemente esté ubicada demasiado al noreste para ser considerada una fuente. Es más probable que la ceniza provenga de los volcanes Ninahuilca, Illiniza o Quilotoa. (Kaufhold et al., 2009)

El Alófano en su estado natural no puede ser usado, el cual debe ser muestreado de acuerdo con el uso a emplearse, generalmente por su naturaleza tiene alto porcentaje de humedad. Por tanto, debe ser secado, triturado y tamizado, en el tamaño de grano a usarse. Este procedimiento no tiene una Norma específica para este mineral, por lo cual se estableció un procedimiento en base a Normas de otros materiales (Jiménez et al., 2019).

#### ***1.4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA***

El depósito con Alófano se encuentra en la provincia de Santo Domingo de los Colorados, la cual tiene un área de 4000km<sup>2</sup> y 5m de espesor, ubicado al norte y al oeste, esta provincia se encuentra 600 metros sobre el nivel del mar (msnm) y el área de interés está influenciada por los Andes cercanos. El área pertenece a una

llanura ligeramente disecada en la parte oriental de la región natural con un clima tropical húmedo. En esta región, los Andes son drenados por los ríos Toachi y Baba (Kaufhold et al., 2009).

#### ***1.4.2. COMPOSICIÓN DEL ALÓFANO***

Los métodos que se realizan para determinar la composición del Alófano son:

- Fluorescencia de rayos X (XRF).
- Difracción de rayos X (XRD).
- Infrarrojos (IR)

##### ***1.4.2.1. Fluorescencia de Rayos X (XRF)***

Técnica de espectrometría atómica que es basada en la detección de la radiación X emitida por átomos excitados. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. La FRX tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas porque permite hacerlos sin preparación de la muestra (Jiménez et al., 2019).

##### ***1.4.2.2. Difracción de Rayos X (XRD)***

La difracción de rayos X (XRD) permite la rápida identificación de materiales particulados, arcillas y otros minerales. Proporciona información detallada acerca de la estructura cristalográfica de sus muestras, que puede utilizarse para identificar

las fases presentes. Antes normalmente se usaba la XRD para determinar conjuntos de minerales en masa en rocas, arcillas, menas, macropartículas y productos metalúrgicos como se indica en la Tabla 1.10. Proporciona un método semicuantitativo para determinar los porcentajes normativos o de peso de las fases presentes, incluyendo la fracción de cada fase mineral contenida en sus muestras (Jiménez et al., 2019).

### 1.4.2.3. Infrarrojo (IR)

La espectroscopía de infrarrojos (IR) es un método de estudio de sustancias en el estado gaseoso, líquido o sólido, tanto cristalinas como amorfas, a base de su espectro de absorción o reflexión en el rango IR del espectro electromagnético (Jiménez et al., 2019).

**TABLA 1.10**

*Resultados de difracción de rayos X para Alófono para tres muestras diferentes*

Mineral	Formula	Test SD-001 (%P/P)	Test SD-002 (%P/P)	Test SD-003 (%P/P)
Sanidine	(K,Na)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	26.78	14.93	19.39
Cristobalite	SiO <sub>2</sub>	23.43	26.89	18.77
Anorthite	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	11.49	7.56	9.76
Pargasite	NaCa <sub>2</sub> (Mg <sub>4</sub> Al)(Si <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> )O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	10.69	13.81	10.71
Quartz	SiO <sub>2</sub>	8.16	16.45	24.07
Andesine	(Na,Ca)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	8.07	13.82	7.26
Cordierite	(Mg,Fe) <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>8</sub>	4.31	4.49	4.23
Albite	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	3.80	-	-
Sylvite	KCl	2.45	-	-
Vermiculite	(Mg,Ca) <sub>0.7</sub> (Mg,Fe,Al) <sub>6</sub> [(Al,Si) <sub>8</sub> O <sub>20</sub> ](OH) <sub>4</sub> ·8H <sub>2</sub> O	-	-	3.88
Trace components	-	0.82	-	1.93

Fuente: (Jiménez et al., 2019).

El Alófono fue propuesto por las características anteriormente mencionadas, que son similares a las Puzolanas, las cuales mejoran la resistencia a la compresión. Principalmente por la presencia de Aluminio y Silicio, los cuales brindan beneficios al cemento. Se encuentra un extenso depósito de Alófono, permitiría reducir costos al generar el mismo beneficio que las Puzolanas.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se describe todos los procedimientos y análisis empleados en la investigación. Se comenzó con la obtención de los aditivos entre ellos el Alófono el que debía ser procesado, este tenía que ser secado, triturado y tamizado, todo esto se realizó en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) en la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, después de tener el Alófono en grano fino al igual que los demás aditivos se realizó las pruebas de laboratorio propuestas en el Plan de trabajo a las lechadas de cemento que fueron: Densidad, Reología, Fluides y Filtrado ,esto fue en el Laboratorio de Fluidos de Perforación de la Facultad de Geología y Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional. Finalmente, la prueba de Resistencia a la compresión y análisis exhaustivos al Alófono y demás aditivos, se ejecutó en los Laboratorios de la Empresa Privada dedicada a la fabricación de Cementos. A continuación, las normas empleadas, procesos ejecutados y equipos utilizados.

#### 2.1.ALÓFANO

##### 2.1.1. MUESTREO DE ALÓFANO

Se obtuvo las muestras de Santo Domingo de los Tsachilas, en masas grandes y con textura bastante húmeda como se muestra en la Figura 2.1. En ese estado no podía usarse por lo cual se tenía que llegar a grano fino y totalmente seco. Este mineral se procesó de forma similar a la que se describe en las referencias bibliográficas encontradas, principalmente se

empleó la metodología de la siguiente referencia (Jiménez et al., 2019), ya que no se tiene una norma específica de muestreo de Alófono.

## **FIGURA 2.1**

### *Muestra de Alófono Original*



NOTA: Muestra en bruto de Alófono como llegó de Santo domingo, se observó masas grandes con alto porcentaje de humedad.

### **Equipos:**

- Horno de 110 °C  $\pm$ 5
- Bandeja de metal, resistente al calor
- Espátula
- Molino de bolas
- Mallas de 100 y 200
- Fundas Plásticas
- Martillo

- Balanza

**Materiales:**

- Alófano

**Procedimiento, Figura 2.2:**

1. Encerar y pesar la bandeja de metal vacía.
2. Colocar la muestra de Alófano en la bandeja de metal resistente al calor, con la ayuda del martillo dar pequeños golpes sobre la muestra, para que se rompan las masas grandes.
3. Pesar la bandeja con el Alófano sobre ella.
4. Poner la bandeja con el Alófano en la estufa durante 24 horas a 100°C.
5. Sacar la bandeja después de transcurrir las 24 horas y dejar enfriar durante cinco minutos.
6. Colocar el Alófano seco en el molino de bolas durante 30 minutos.
7. Transcurrido los 30 minutos sacar el Alófano del molino, obteniendo el grano más fino.
8. El Alófano molido tamizar en M-100 y M-200, colocar en fundas plásticas bien selladas.
9. Guardar el Alófano en un lugar seco libre de humedad para su uso.
10. Limpiar el molino de viento y las bolas, dejar todo en orden.



## FIGURA 2.2

### *Muestreo del Alófano*



NOTA: Las masas grandes y húmedas de Alófano fueron muestreadas hasta obtener grano fino de  $149\mu\text{m}$  y  $74\mu\text{m}$ . Se realizó en “Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR)”

### **2.1.2. PORCENTAJE DE HUMEDAD**

#### **2.1.2.1. Alófano Original.**

La muestra original de Alófano, que se obtuvo al comenzar la investigación, a simple vista se observó un alto nivel de humedad, eran masas grandes que al tocarlas tenían una textura húmeda, era imposible trabajar en ese estado con el Alófano para el fin de la investigación, por lo cual se decidió tomar el procedimiento de la referencia bibliográfica (Jiménez et al, 2019), que se describirá brevemente.

#### **Equipos:**

- Bandeja de metal resistente al calor
- Horno  $110^{\circ}\text{C} \pm 5$
- Balanza
- Espátula

**Materiales:**

- Muestra del Alófono

**Procedimiento, Figura 2.3:**

1. Obtener la muestra del Alófono (tamaño grande y mojadas)
2. Verificar que la balanza este calibrada y enserada.
3. Pesar la bandeja resistente al calor vacía.
4. Poner el Alófono en la bandeja y pesar, la bandeja más el Alófono.
5. Colocar la bandeja en el horno durante 24 horas a 100°C.
6. Después de las 24 horas sacar la bandeja y dejar enfriar durante 5 minutos.
7. Pesar la bandeja con el Alófono seco y realizar cálculos.

**FIGURA 2.3***Procedimiento de porcentaje de Humedad*

NOTA: Las masas grandes y húmedas de Alófono, redujeron el tamaño y se eliminó la textura húmeda. Se realizó en “Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR)”

**Cálculos:**

$$\%H = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (2.1)$$

Donde:

Mh = masa de la muestra de Alófono húmedo.

Ms = masa de la muestra de Alófono seco.

$$\%H = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

$$\%H = \frac{11950 - 9650}{9650} * 100$$

$$\%H = 23.8\%$$

**Resultados:****TABLA 2.1**

*Resultados de Porcentaje de Humedad*

<b>Resultados de Porcentaje de Humedad</b>	
<b>Muestra Original de Alófono</b>	
<b>Masa bandeja (gr)</b>	4400
<b>Masa bandeja + Masa de Alófono húmedo (gr)</b>	16350
<b>Masa de Alófono húmedo Mh (gr)</b>	11950
<b>Masa bandeja + Masa de Alófono seco (gr)</b>	14050
<b>Masa de Alófono seco Ms (gr)</b>	9650
<b>Porcentaje de humedad (%)</b>	<b>23.8</b>

NOTA: El Alófono original con textura húmeda tiene 23,8% de Humedad, llegando a masas de menor tamaño y totalmente secas.

### **2.1.2.2. Alófono Muestreado.**

NORMA ASTM C 566-97: Método de Ensayo Normalizado para Determinar el contenido de Humedad Total Evaporable de los Áridos por Secado.

#### **Equipos:**

- Balanza analítica.
- Espátula
- Pan Liner
- Estufa
- Desecador
- Espátula

#### **Materiales:**

- 50 gr de Alófono Tamizado M-100 y M-200

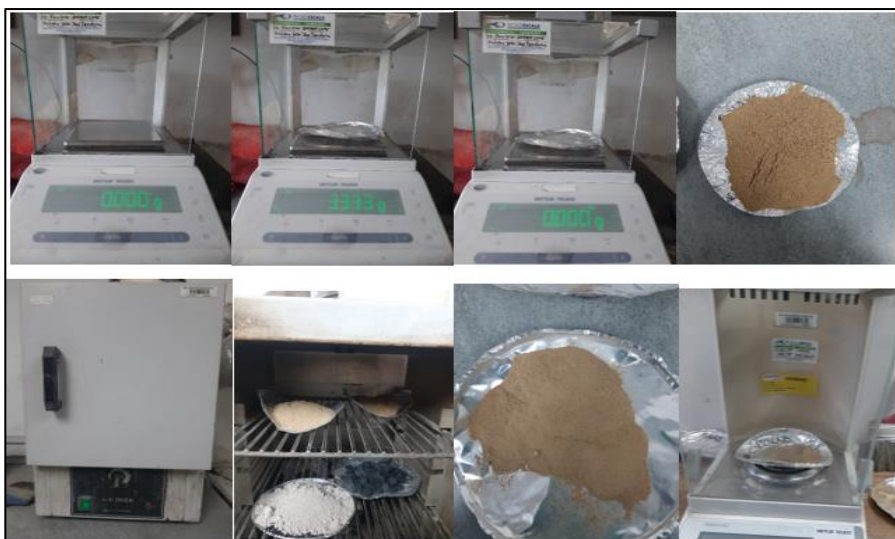
#### **Procedimiento, Figura 2.4:**

1. Comprobar que la balanza este correctamente calibrada y encerada.
2. Pesar el Pan Liner, y registrar el valor con tres cifras decimales.
3. Tarar la balanza puesto el Pan Line.
4. Colocar aproximadamente 50 g de muestra procesada (149  $\mu\text{m}$  y 74  $\mu\text{m}$ ), y registrar el valor con tres cifras decimales.
5. Secar la muestra en una Estufa, a 110 -120° C, durante una hora.

6. Transcurrido el tiempo, sacar la muestra y dejar enfriar al ambiente durante cinco minutos.
7. Pesar la muestra seca, y registrar el valor con tres cifras decimales.

## FIGURA 2.4

### *Procedimiento de porcentaje de Humedad*



NOTA: El Alófono muestreado de 149  $\mu\text{m}$  y 74  $\mu\text{m}$ , se aplicó la prueba bajo las mismas condiciones. Se realizó en “Laboratorio de Empresa Privada dedicada a la fabricación de cementos”.

### Cálculos

$$\%H = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (2.1)$$

Donde

$M_h$  = masa de la muestra de Alófono húmedo.

$M_s$  = masa de la muestra de Alófono seco

**Muestra Nro 1**

$$\%H = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

$$\%H = \frac{50.002 - 44.666}{44.666} * 100$$

$$\%H = 11.946$$

**Muestra Nro 2**

$$\%H = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

$$\%H = \frac{50.001 - 46.189}{46.189} * 100$$

$$\%H = 8.253$$

**Resultados:****TABLA 2.2**

*Resultados de Porcentaje de Humedad Muestreado*

<b>RESULTADOS</b>			
<b>Nro Muestra</b>	<b>1</b>	<b>Nro Muestra</b>	<b>2</b>
<b>Masa de Pan Liner</b>	3,294	<b>Masa de Pan Liner</b>	3,326
<b>Masa Alófono M-100 Húmedo (Mh)</b>	50,002	<b>Masa Alófono M-200 Húmedo (Mh)</b>	50,001
<b>Masa de Pan Liner + Masa de Alófono A</b>	53,296	<b>Masa de Pan Liner + Masa de Alófono A</b>	53,327
<b>Masa de Alófono M-100 Seco (Ms)</b>	44,666	<b>Masa de Alófono M-200 Seco (Ms)</b>	46,189
<b>Masa de Pan Liner + Masa de Alófono D</b>	47,96	<b>Masa de Pan Liner + Masa de Alófono D</b>	49,515
<b>% Humedad</b>	<b>11,946</b>	<b>% Humedad</b>	<b>8,253</b>

NOTA: El Alófono tenemos en dos tamaños de grano, Muestra 1 = 149µm (M-100), Muestra 2 = 74 µm (M-200). Alófono A = Alófono antes del calentamiento, Alófono D = Alófono después del calentamiento. Entre menor tamaño de partícula, menor porcentaje de humedad.

### **2.1.3. PÉRDIDA POR CALCINACIÓN**

NORMA TÉCNICA NTE INEN 160:2009: Cemento Hidráulico. Métodos de Ensayo para el Análisis Químico; SECCIÓN 4.12. Pérdida por Calcinación.

#### **Equipos:**

- Balanza
- Crisol (de porcelana o platino)
- Mufla  $950 \pm 50$  °C
- Desecador
- Pinzas largas de 45 cm sujeta muestras

#### **Materiales:**

- Muestra de Alófano M-100

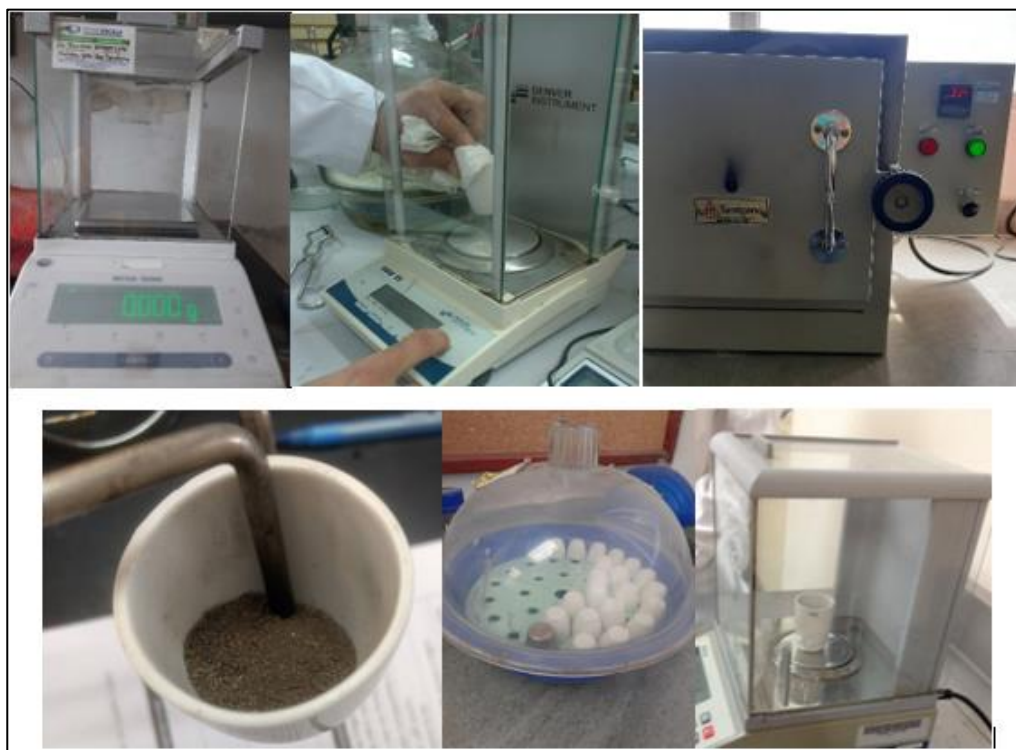
#### **Procedimiento, Figura 2.5:**

1. Verificar que la balanza este calibrada y encerada.
2. Pesar el crisol vacío precalentado y registrar la masa del crisol.
3. Medir en el crisol aproximadamente 1g de la muestra preparada.
4. Colocar el crisol con la muestra de Alófano dentro de la mufla ( $950 \pm 50$  °C), durante 60 minutos.
5. Sacar el crisol de la mufla y dejar enfriar a temperatura ambiente en un desecador, durante cinco minutos.
6. Pesar el crisol con la muestra calcinada, y registrar su peso.

7. Realizar los cálculos con los datos registrados.

## FIGURA 2.5

### *Procedimiento Pérdida de Calcinación*



NOTA: Esta prueba indica el porcentaje de material orgánico presente en el Alófono. Se realizó en “Laboratorio de Empresa Privada dedicada a la fabricación de cemento”.

### **Cálculos:**

$$\% \text{ de Pérdida por Calcinación} = \left( \frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) * 100 \quad (2.2)$$

Donde:

$W_1$  = Aproximadamente 1 gramo de muestra (g)

$W_2$  = Masa de la muestra calcinada (g)



$$\% \text{ de Pérdida por Calcinación} = \left( \frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) * 100$$

$$\% \text{ de Pérdida por Calcinación} = \left( \frac{1.002 - 0.728}{1.002} \right) * 100$$

$$\% \text{ de Pérdida por Calcinación} = 27.345\%$$

### Resultados:

**TABLA 2.3**

*Resultados de Pérdida por Calcinación*

<b>RESULTADOS</b>	
<b>Masa de crisol</b>	12,391
<b>Masa de muestra M-100 (W1)</b>	<b>1,002</b>
<b>Masa de crisol + masa de muestra M-100</b>	13,393
<b>Masa de muestra M-100 Calcinada (W2)</b>	<b>0,728</b>
<b>Masa de crisol + masa de muestra Calcinada</b>	13,119
<b>%Pérdida por Calcinación</b>	<b>27,345</b>

NOTA: El porcentaje de material orgánico no fue evaluado, porque si es menor al 30% se vuelve despreciable al ajustar la mineralogía.

#### **2.1.4. DETERMINACIÓN DE LA FINURA POR VÍA SECA**

NORMA TÉCNICA INEN 489:2013 Cemento Hidráulico. Determinación de la

Finura por Tamizado Seco.

#### **Equipos:**

- Tamiz 325 (45 µm).

- Equipo para tamizado en seco MICRON AIR FET
- Balanza analítica. Sensibilidad 0.001 g.
- Brocha rígida (2 in)
- Pan liner
- Espátula
- Lámina de papel
- Martillo de fibra

**Materiales:**

- Muestra Alófono M-100 y M-200

**Procedimiento, Figura 2.6:**

1. Verificar que la balanza este en cero.
2. Medir en el Pan liner 10gr ( $W_1$ ) de la muestra de Alófono, previamente muestreada (seca, triturada y tamizada) y colocar en el Tamiz 325.
3. Colocar el Tamiz que contiene la muestra de Alófono en el equipo, cubrir con la tapa respectiva del tamiz.
4. Encender el equipo MICRON AIR FET.
5. En el equipo de tamizado MICRON AIR FET, se programa un tiempo de 180 segundos, la presión de 10 MPa y encender el equipo.
6. Con el martillo dar golpes suaves alrededor de la tapa del Tamiz, para que caiga el Alófono retenido al tamiz.

7. Pasado el tiempo programado el equipo se apaga automáticamente, retirar el tamiz con cuidado, retirar la tapa que cubre el tamiz, proceder a depositar el material sobre la lámina de papel colocando boca abajo el tamiz; con la brocha rígida limpiar la superficie del tamiz realizando movimientos circulares cuidadosamente, para dejar caer todo el retenido.
8. El material retenido colocar en el Pan liner y pesar ( $W_R$ ).

## FIGURA 2.6

### *Procedimiento Finura Vía Seca*



NOTA: El Equipo de tamizado debe estar en sus óptimas condiciones, se mantenga en una presión de 10MPa para que la cantidad de retenido sea el verdadero. Se realizó en “Laboratorio de Empresa Privada dedicada a la fabricación de cemento”.

### **Cálculos:**

$$\% \text{Retenido en el Tamiz} = \left( \frac{W_R * F}{W_1} \right) \quad (2.3)$$

*Donde:*

$$F = (1 + fc) \times 100$$

$fc$  = Factor de corrección del Tamiz. (si existiere)

$W_R$  = Masa de retenido en el tamiz (g)

$W_1$  = Masa inicial de la muestra (g)

**Muestra Nro 1**

$$\%Re \text{ en el Tamiz} = \left( \frac{W_R * F}{W_1} \right)$$

$$\%Re \text{ en el Tamiz} = \left( \frac{5.4454 * (1 + 0) * 100}{10} \right)$$

$$\%Re \text{ en el Tamiz} = 54.454 \%$$

**Muestra Nro 2**

$$\%Re \text{ en el Tamiz} = \left( \frac{W_R * F}{W_1} \right)$$

$$\%Re \text{ en el Tamiz} = \left( \frac{2.2322 * (1 + 0) * 100}{10} \right)$$

$$\%Re \text{ en el Tamiz} = 22.322 \%$$

**Resultados:**

**TABLA 2.4**

*Resultados de Finura Vía Seca*

<b>Muestra Nro 1</b>	<b>Alófano tamizado M-100</b>	Masa inicial Alófano (gr), W1	10
		Masa de retenido por el tamiz (gr), WR	5,4454
		% Retenido en el Tamiz	<b>54,454</b>
<b>Muestra Nro 2</b>	<b>Alófano tamizado M-200</b>	Masa inicial Alófano, W1	10
		Masa de retenido por el tamiz (gr), WR	2,2322
		% Retenido en el Tamiz (gr)	<b>22,322</b>

NOTA: Muestra Nro 1 de 149  $\mu\text{m}$  tiene mayor porcentaje de retenido por mayor tamaño de grano, en la Muestra Nro 2 de 74  $\mu\text{m}$  tiene menor porcentaje de retenido por menor tamaño de grano.

### **2.1.5. DENSIDAD DEL ALÓFANO:**

NORMA TÉCNICA NTE INEN 156:1987-02. Cementos. Determinación de la Densidad.

#### **Equipos:**

- Balanza precisión 0.05 gr.
- Frasco normalizado de Le Chatelier, ver Anexo I.
- Embudo, adecuado para verter el líquido dentro del frasco de del Chatelier (vidrio).
- Estufa. Temperatura constante de  $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- Cámara de curado. Temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Humedad relativa mínimo 95%.
- Placa vibradora con soporte.
- Espátula
- Embudo, para verter el Alófano (plástico)
- Brocha/Pincel

#### **Materiales**

- Muestra de Alófano M-100 y M-200
- Líquido de desplazamiento (Diésel)
- 

NOTA: El líquido debe ser libre de agua y no reaccionar con el cemento, se puede utilizar Kerosene u otro derivado del petróleo libre de agua, con densidad mayor

a 0.7268 g/cm<sup>3</sup> a 20 °C, 0.731 g/cm<sup>3</sup> a 15 °C.

**Procedimiento, Figura 2.7:**

1. Sacar todos los materiales y equipos a utilizarse.
2. Medir 50g de la muestra de Alófono muestreado, la cual se seca a 40°C ± 5 °C, aproximadamente 1 hora.
3. Al mismo tiempo, en el frasco de Le Chatelier limpio y seco con la ayuda del embudo de vidrio colocar el diésel hasta encerrar en 0 cm<sup>3</sup> evitando mojar la pared interior del mismo, tapar el frasco y colocarlo en la cámara de curado por 1 hora, para evitar variaciones de temperatura del frasco mayores a 0.2°C.
4. Después de la 1 hora, sacar la muestra del Alófono de la estufa, dejar enfriar a temperatura ambiente en el desecador durante cinco minutos.
5. También sacar el frasco de Le Chatelier de la cámara de curado, momento en el cual se debe efectuar la primera lectura  $V_1$  (cm<sup>3</sup>), que corresponde al volumen ocupado por el líquido contenido en el frasco, registrar.
6. Medir la masa del frasco con el diésel.  $W_1$  (gr) y registrar.
7. Colocar el frasco Le Chatelier con el diesel sobre la placa vibradora y sujetar al soporte.
8. Colocar el embudo en la boca del frasco e introducir los 50 g de Alófono seco, encender en movimiento lento la placa vibratoria para evitar que el Alófono se adhiera a la pared interior del frasco, al completar de introducir el Alófono tapar el frasco y aumentar la vibración.

9. Liberar el aire de la muestra, girando en posición inclinada o en círculos horizontales, colocando en posición vertical, no asciendan burbujas de aire a la superficie del líquido.
10. Tapar el frasco y colocar en la cámara de curado por 1 hora.
11. Medir la masa del frasco con el diésel y Alófono,  $W_2$  (gr). Hacer la lectura del volumen alcanzado  $V_2$  (cm<sup>3</sup>) y registrar.
12. Realizar los cálculos con los datos registrados.
13. Finalmente despojar una cantidad de diésel, y con el restante hacer movimiento circulares, tratando de lavar el frasco, botar toda la mezcla, poner diésel limpio para acabar de limpiar el frasco Le Chatelier.

## FIGURA 2.7

### *Procedimiento de Prueba de Densidad*



NOTA: Al realizar esta prueba el Alófono se hinchó en contacto con el Diesel, por lo cual al ir adicionando el Alófono, repetidamente se agitó el frasco para que se eliminen las burbujas producidas dentro. Se realizó en “Laboratorio de Empresa Privada dedicada a la fabricación de cemento”.

**Cálculos:**

$$Densidad = \frac{W_2 - W_1}{V_2 - V_1} \left( \frac{gr}{cm^3} \right) (2.4)$$

Donde:

$W_1$  = masa del frasco con diésel (gr)

$W_2$  = masa del frasco con diésel + muestra de Alófono (gr)

$V_1$  = Primera lectura del volumen del diésel alcanzado en el frasco de Le Chatelier. (cm<sup>3</sup>)

$V_2$  = Segunda lectura del volumen del diésel + muestra de Alófono alcanzado en el frasco de Le Chatelier (cm<sup>3</sup>).

**Muestra Nro 1: Alófono M-100**

$$Densidad\ 1 = \frac{W_2 - W_1}{V_2 - V_1}$$

$$Densidad\ 1 = \frac{392,1 - 343,4}{22 - 0,1}$$

$$Densidad\ 1 = 2,224 \frac{gr}{cm^3}$$

**Muestra Nro 2: Alófono M-200**

$$Densidad\ 2 = \frac{W_2 - W_1}{V_2 - V_1}$$

$$Densidad\ 2 = \frac{407,1 - 357}{20,9 - 0,2}$$

$$Densidad\ 2 = 2,420 \frac{gr}{cm^3}$$



**Resultados:****TABLA 2.5***Resultados de Prueba de Densidad*

<b>Muestra Nro 1: Alófono M-100</b>			
<b>W<sub>1</sub>(gr)</b>	343,4	<b>W<sub>2</sub> (gr)</b>	392,1
<b>V<sub>1</sub> (ml)</b>	0,1	<b>V<sub>2</sub> (ml)</b>	22
<b>Densidad 1</b>	<b>2,224 gr/cm<sup>3</sup></b>		
<b>Muestra Nro 2: Alófono M-200</b>			
<b>W<sub>1</sub> (gr)</b>	357	<b>W<sub>2</sub> (gr)</b>	407,1
<b>V<sub>1</sub> (ml)</b>	0,2	<b>V<sub>2</sub> (ml)</b>	20,9
<b>Densidad 2</b>	<b>2,420 gr/cm<sup>3</sup></b>		

NOTA: La densidad calculada permite calcular la cantidad de masa de Alófono que se adicionara en la prueba índice de Actividad Puzolánica, este valor depende del tamaño de grano. En este caso en la Muestra Nro 2 M-200 tiene mayor densidad que la Muestra Nro 1 M-100.

**2.1.6. ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA**

Para realizar esta prueba es necesario emplear algunas Normas Técnicas como:

- NORMA TÉCNICA NTE INEN 488 (2009), Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista.
- NORMA TÉCNICA NTE INEN 156:1987-02, Cementos. Determinación de la Densidad.

- NORMA TÉCNICA NTE INEN 2502:2009, Cemento hidráulico. Determinación de flujo en morteros. Primera edición.
- NORMA TÉCNICA NTE INEN 2500:2009, Cemento hidráulico. Especificaciones para la mesa de flujo usada en los ensayos de cemento hidráulico.
- NORMA TÉCNICA NTE INEN 2528:2010: Cámara de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar.
- NORMA TÉCNICA NTE INEN 490:2009, Cuarta revisión. Cementos Hidráulicos compuestos. Requisitos.

El índice de Actividad Puzolánico es el valor que expresa la capacidad de la puzolana para reaccionar con el hidróxido de calcio, formando compuestos cementicios. Se determina comparando la resistencia a la compresión de un mortero de cemento (muestra control), y un mortero de cemento al cual se añade una proporción determinada de puzolana (muestra de prueba).

### **Equipos**

- Balanza
- Prensa Hidráulica.
- Probeta 500 cm<sup>3</sup>
- Moldes para cubos de 50 mm de arista
- Mezcladora
- Cubeta de mezclado y aleta

- Apisonador
- Palustre
- Cámara de curado húmedo.  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa mayor a 95 %.
- Franela o limpión
- Recipientes herméticos metálicos
- Cinta de embalaje.
- Lápiz de suelda para identificación de la muestra.

**Materiales:**

- Cemento patrón
- Alófono tamizado M-100 y M-200.
- Arena normalizada. (Arena de Ottawa “graded”).
- Agente antiadherente como aceite o grasa
- Agua destilada

**Procedimiento, Figura 2.9:**

1. Primero se realiza la prueba de la densidad de la puzolana (Alófono), como indica la norma, este valor sirve para calcular la masa necesaria para la prueba del índice de actividad puzolánica.
2. Se calcula el valor de masa de la puzolana.
3. Medir todos los materiales como indica la Tabla 2.6:

**TABLA 2.6**

*Proporciones del material de la mezcla para elaboración de morteros*

Material para 6 cubos.	Mezcla de Control	Mezcla de Prueba
Cemento (g)	500	325
Arena normalizada (g)	1375	1375
<sup>3</sup> Puzolana (g)	0	<sup>*1</sup> $175 \times \frac{\text{densidad puzolana}}{\text{densidad cemento}}$
Agua (cm <sup>3</sup> )	<sup>*2</sup> Cantidad de agua para obtener un flujo de 100 a 115 %.	<sup>*2</sup> Cantidad de agua para obtener un flujo de 100 a 115 %.

Fuente: (NTE INEN 490, 2009)

NOTA: El valor de la “Mezcla de Control” ya se tiene establecido. Por tanto, solo es necesario la “Mezcla de Prueba”.

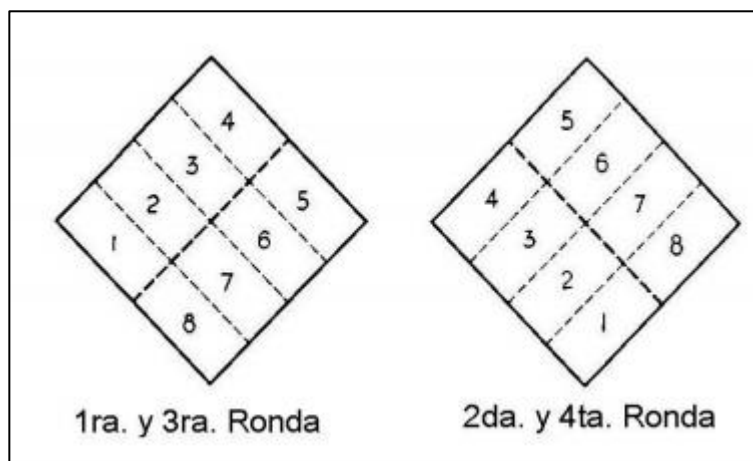
4. Encender la mezcladora, programar, poner la aleta a la mezcladora y sacar el recipiente para poner el agua y los materiales sólidos.
5. Medir el agua en la probeta, un valor estimado y se coloca en el recipiente de la mezcladora.
6. Colocar los materiales sólidos, previamente mezclados en el recipiente de la mezcladora.
7. Colocar el recipiente con los materiales en la mezcladora y encender.
8. Al terminar de mezclar se pone la mezcla en la tabla de flujo, y se enciende y da 25 golpes y se toma cuatro medidas, la sumatoria de estas debe estar en los rangos de 100 a 115.

NOTA: Si no se encuentra dentro del rango establecido, y el valor es menor se puede añadir agua y si se pasó del rango se debe repetir la mezcla.

9. Si se encuentra en el rango establecido de la tabla de flujo, se procede a tomar dos moldes de cubos y desplazar agente antiadherente en todas sus caras. Para evitar que la mezcla se pegue al molde.
10. Se realiza apisonado manual consiste en el llenado de los moldes debe iniciar dentro de un intervalo de tiempo no mayor de 2 minutos y 30 segundos después de completar el primer mezclado de la masa del mortero.
11. Colocar una capa de mortero alrededor de 25 mm de espesor es aproximadamente la mitad de la profundidad del molde. En todos los compartimentos cúbicos y apisonar el mortero en cada compartimento cúbico 32 veces en alrededor de 10 segundos, en 4 rondas, en cada ronda se debe compactar con 8 golpes en dirección perpendicular a la anterior cómo se indica en la Figura 2.8.
12. Una vez terminada la compactación de la primera capa en todos los compartimentos cúbicos, llenar los compartimientos con el mortero restante y compactar como se ha especificado para la primera capa. Durante la compactación de la segunda capa mediante el apisonador y con la ayuda de los dedos de las manos, colocar nuevamente al interior del mortero lo que haya rebozado sobre el borde superior de los moldes después de cada ronda de compactación, hasta completar cada una de las rondas y antes de empezar la siguiente ronda de apisonado.

**FIGURA 2.8**

*Orden de apisonado al moldear los especímenes de ensayo*



Fuente: (NTE INEN 488, 2009, p. 6)

13. Al finalizar la compactación, la superficie de mortero en todos los cubos debe sobresalir ligeramente sobre el borde de los moldes. Retirar con una espátula el excedente de mortero que ha rebozado sobre el borde de los moldes, con el propósito de nivelar el mortero y hacer que el mortero que sobresale del borde del molde sea más uniforme se pasa suavemente el lado plano de la espátula una vez a lo largo de la longitud del molde.
14. Después que se haya realizado eliminación del exceso de los bordes con la espátula, con la ayuda de una franela o papel se limpia los bordes para poder colocar un nombre e identificarle.
15. Colocar los moldes con las muestras en la cámara de curado húmedo a  $23 \pm 2$  °C durante 20 a 24 horas. Mientras se encuentren en la cámara de curado húmedo proteja la superficie de las muestras de goteo de agua.

16. Retirar los moldes del cuarto o gabinete húmedo y extraer los cubos de los moldes.
17. Colocar los cubos en los recipientes herméticos sellar con la cinta de embalaje las juntas entre la tapa y el recipiente y almacenar en el cuarto de secado a  $38 \pm 1.7$  °C durante 28 días.
18. Transcurrido el tiempo extraer las muestras del cuarto de secado y deje enfriar hasta  $23 \pm 4$ °C antes de ensayarlas.
19. Colocar los cubos en la prensa y encender; determinar la resistencia a la compresión de las tres muestras de prueba a una edad de 7 y 28 días, en la prensa Cyber – Plus – Evolution y registrar.

## FIGURA 2.9

### *Procedimiento de Índice de Actividad Puzolánica*



NOTA: El apisonamiento de los morteros debe realizarse en el orden y manera que indica la Norma para que los datos sean reales, la diferencia entre cada cubo debe ser de 1 MPa. Se realizó en “Laboratorio de Empresa Privada dedicada a la fabricación de cemento”.

**Cálculos:**

$$\text{Masa de Puzolana} = 175 * \frac{D_p}{D_c} \quad (2.5)$$

Donde:

Dp: Densidad de Puzolana

Dc; Densidad de cemento

**Muestra Nro 1-Alófano tamizado M-100**

$$\text{Masa de Puzolana 1} = 175 * \frac{D_p}{D_c}$$

$$\text{Masa de Puzolana 1} = 175 * \frac{2.224}{3.109}$$

$$\text{Masa de Puzolana 1} = \mathbf{125.171 \text{ gr}}$$

**Muestra Nro 2-Alófano tamizado M-200**

$$\text{Masa de Puzolana 2} = 175 * \frac{D_p}{D_c}$$

$$\text{Masa de Puzolana 2} = 175 * \frac{2.420}{3.109}$$

$$\text{Masa de Puzolana 2} = \mathbf{136.234 \text{ gr}}$$



**Resultados:****TABLA 2.7***Resultados del Índice de Actividad Puzolánica*

<b>ALÓFANO TAMIZADO M-100</b>					
<b>COMPONENTES DE LA MEZCLA</b>		<b>DATOS DE LA RUPTURA DE CUBOS</b>			
<b>Alófano (gr)</b>	125,171	<b>Nro Cubo</b>	MPa	<b>Nro Cubo</b>	MPa
<b>Cemento (gr)</b>	325	<b>CUBO 1</b>	13,8	<b>CUBO 4</b>	17,1
<b>Arena (gr)</b>	1375	<b>CUBO 2</b>	14	<b>CUBO 5</b>	16,4
<b>Agua (ml)</b>	290	<b>CUBO 3</b>	14,2	<b>CUBO 6</b>	17,3
<b>Promedio Datos Ruptura</b>		IAP 7 días (MPa)	14	IAP 28 días (MPa)	16,933
<b>ALÓFANO TAMIZADO M-200</b>					
<b>COMPONENTES DE LA MEZCLA</b>		<b>DATOS DE LA RUPTURA DE CUBOS</b>			
<b>Alófano (gr)</b>	136,234	<b>Nro Cubo</b>	MPa	<b>Nro Cubo</b>	MPa
<b>Cemento (gr)</b>	325	<b>CUBO 1</b>	15,2	<b>CUBO 4</b>	19,1
<b>Arena (gr)</b>	1375	<b>CUBO 2</b>	16,2	<b>CUBO 5</b>	19,4
<b>Agua (ml)</b>	320	<b>CUBO 3</b>	16,6	<b>CUBO 6</b>	18,9
<b>Promedio Datos Ruptura</b>		IAP 7 días (MPa)	16	IAP 28 días (MPa)	19,133

NOTA: Se realizó este análisis al Alófano de tamaño de grano de 149  $\mu\text{m}$  (M-100) y 74  $\mu\text{m}$  (M-200), por cada muestra se hizo seis cubos, los tres primeros se realizó la ruptura a los 7 días y los tres últimos a los 28 días, entre más fino el Alófano mayor índice de Actividad puzolánica.

**2.1.7. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS MATERIALES POR RAYOS X**

NORMA TÉCNICA: ISO 29581-2: Cement - Test methods - Part 2: Chemical analysis by X-ray fluorescence

Esta prueba consiste en realizar un análisis químico y mineralógico de los elementos principales del Alófano usando el método de Fluorescencia y Difracción de Rayos-X.

#### ***2.1.7.1. Espectrofotometría por fluorescencia de Rayos-X (XRF).***

La fluorescencia de Rayos-X, es un método que permite realizar una identificación cualitativa y cuantitativa de elementos que tiene números atómicos mayores que el oxígeno, se usa espectrómetros de fluorescencia de Rayos-X.

Los Rayos-X, se generan por exposición de una sustancia con un haz primario de rayos X con el objetivo de crear un haz secundario de fluorescencia de Rayos-X.

Los datos obtenidos necesitan una buena interpretación, si podemos identificar la longitud de onda, esto permite conocer los elementos que componen la sustancia, Además si podemos medir sus intensidades, se lograra conocer sus concentraciones.

#### ***2.1.7.2. Espectrofotometría por difracción de Rayos-X (XRD).***

Esta técnica difracción de rayos X (XRD) es no destructiva que permite el análisis cualitativo y cuantitativo de los materiales cristalinos, en forma de polvo o sólido.

Cuando un haz de rayos X incide sobre un material cristalino, los fotones son desviados o dispersados en una dirección preferencial, por los planos del cristal; esta dirección depende del cristal y de la longitud de onda de los rayos X.

#### **Equipos:**

- Espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X. (secuencial). S8 TIGER.  
Software SPECTRA PLUS.
- Espectrómetro de difracción de Rayos-X. (secuencial). D8 TIGER.  
Software SPECTRA PLUS
- Prensa para pastillas

- Anillo de acero
- Balanza
- Espátula
- Perladora, fundente, crisoles. (Preparación de muestra fundida, perlas).

**Materiales:**

- Muestra de Alófono.

**Procedimiento, Figura 2.10:**

1. Preparación del Alófono (secado y triturado)
2. Se coloca 10 gr de muestra en el molino de discos por 170 s y 13 MPa de presión, el Alófono queda totalmente pulverizado.
3. El Alófono pulverizado se saca de los discos en una lámina de papel, dejando los discos sin nada de material.
4. Colocar el anillo de aluminio en el cilindro de la prensa para pastillas.
5. Colocar toda la muestra de Alófono dentro del anillo y nivelar la muestra con ayuda de la espátula.
6. Introducir la bandeja de la prensa para pastillas.
7. Presionar START.
8. Automáticamente se forma la pastilla de acuerdo con los parámetros recomendados por los fabricantes.
9. Después de que el equipo se apague automáticamente, abrir la tapa y sacar la bandeja.

10. Limpiar con la aspiradora.
11. Retirar la pastilla e identificar según el material.
12. Análisis de la muestra en el Equipo Espectrofotómetro de fluorescencia.
13. Abrir la tapa y colocar centrada la pastilla en la base del porta-muestras limpio, manipular la pastilla cuidadosamente sin topar la base de esta.
14. Colocar el porta-muestras en las posiciones definidas, anotar la identificación de las muestras con su respectiva posición y cerrar tapa.
15. Análisis de la muestra con el programa SPECTRA PLUS.
16. Sacar la muestra del Equipo de Espectrofotómetro de fluorescencia y abrir la tapa del equipo de Espectrofotómetro de difracción de rayos X.
17. Colocar la muestra e identificar su respectiva posición, según el tipo de material como en este caso es evaluado con la plantilla de Puzolana.
18. Iniciar el análisis y registrar los datos.

### FIGURA 2.10

*Procedimiento de Análisis Químico y Mineralógico.*



NOTA: Las pastillas se manipuló con cuidado evitando contacto con la cara superior para una buena lectura Química y mineralógica por los equipos. Se realizó en “Laboratorio de Empresa Privada dedicada a la fabricación de cemento”.

**Resultados:**

- Análisis Químico:

**TABLA 2.8***Resultados de Análisis Químico de Alófano*

ALÓFANO	
Fórmula	Concentración (%)
SiO <sub>2</sub>	45,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,39
CaO	2,05
MgO	1,62
TiO <sub>2</sub>	1,53
SO <sub>3</sub>	0,235
Na <sub>2</sub> O	0,202
MnO	0,169
K <sub>2</sub> O	0,130
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,105
BaO	0,050
ZrO <sub>2</sub>	0,047
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,047
ZnO	0,020
CuO	0,017
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,016
Cl	0,014
NiO	0,010
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,008
SrO	0,004
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,004

NOTA: Predomina Óxido de Silicio 45.35%, Óxido de Aluminio 33.99% y Óxido de Hierro 14.39%, Además Óxido de calcio 2.05%, Óxido de Magnesio 1.62% y Óxido de Titanio 1.53%, los demás compuestos tienen porcentajes bajos menor a 1% los cuales no son relevantes. Datos registrados del espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X.

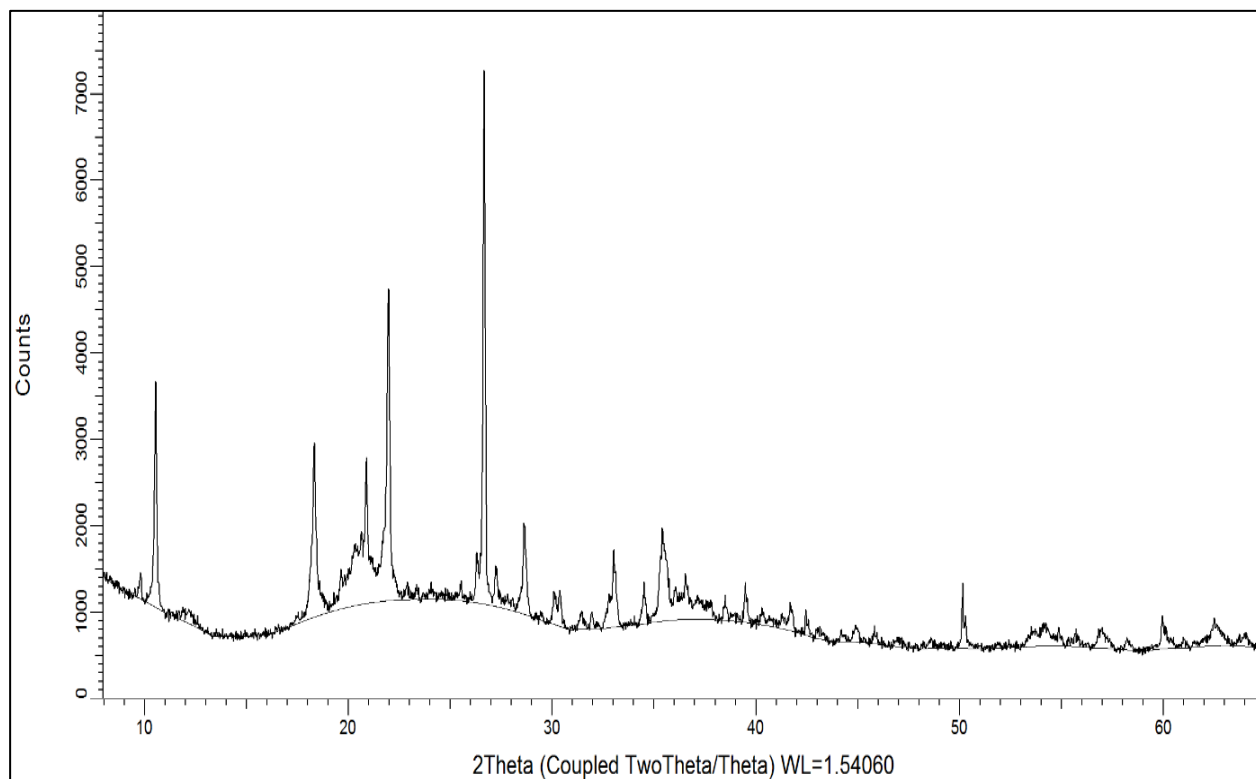
- Análisis Mineralógico

El espectrómetro de difracción de Rayos X genera una gráfica con una infinidad de coincidencia con algunos minerales.

El equipo está programado para ciertos tipos de material que se ajustan a plantillas anteriormente realizadas. En el análisis del Alófano no se puede correr con las plantillas existentes.

### FIGURA 2.11

*Gráfica del Análisis Mineralógico del Alófano*

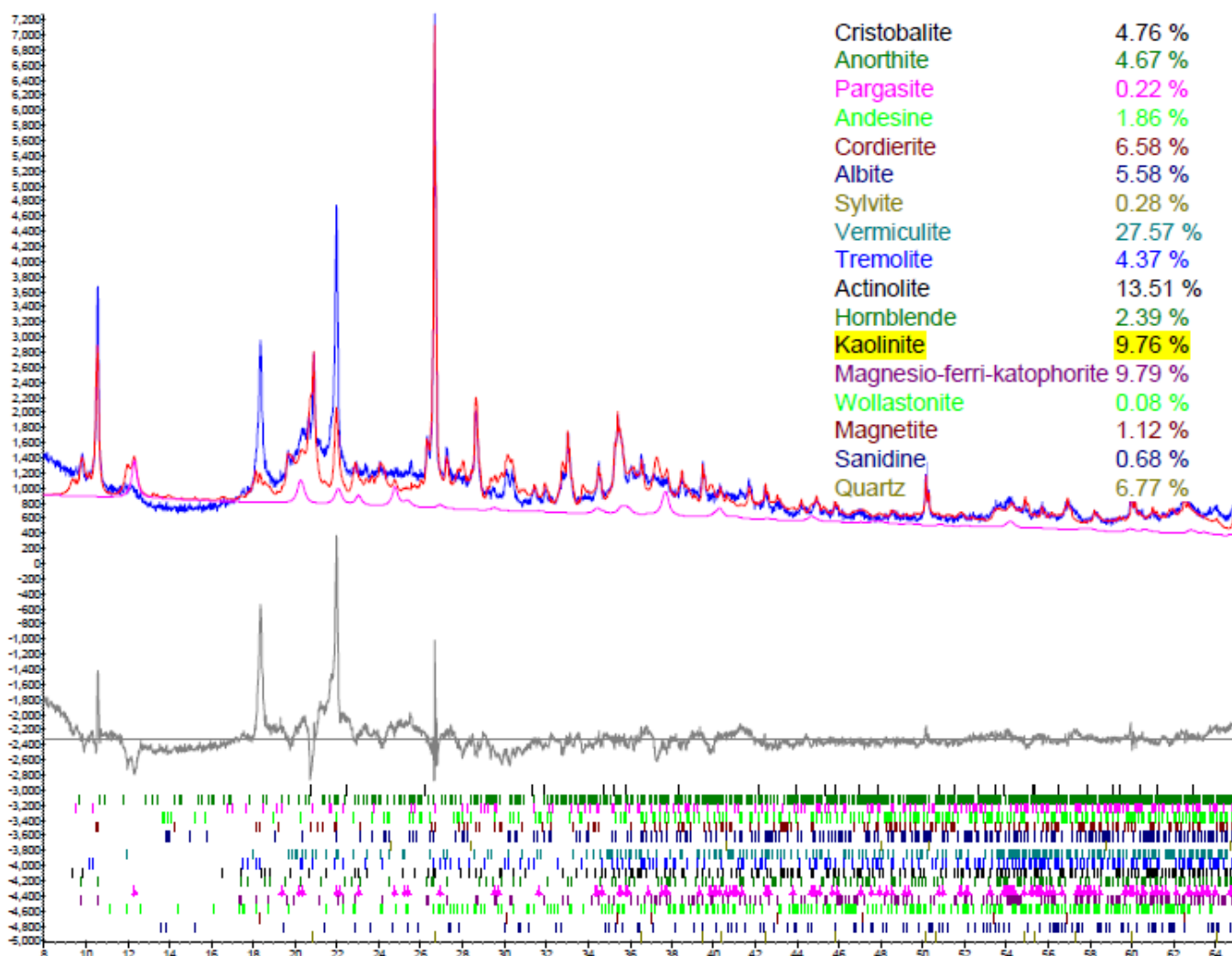


Fuente: Datos registrados del espectrómetro de difracción de Rayos-X

Por tanto, la gráfica que obtuvimos del espectrómetro de difracción de Rayos X es necesario realizar un ajuste. Se realizó un ajuste con los minerales que se encontró en referencias bibliográficas como se muestra en le Marco Teórico, teniendo una coincidencia del 18%, lo cual significa que en su mayoría coincidió y hubo un buen ajuste como muestra en la Figura 2.12. Por ende, el análisis Mineralógico que se ajusto es válido.

**FIGURA 2.12**

*Ajuste Mineralógico del Alófono*



NOTA: El ajuste es válido cuando la coincidencia es 18%, lo cual se determinó un comportamiento arcilloso, los minerales en mayor porcentaje fueron en su mayoría arcillas entre ellas la Caolinita que mayor problema produce al contacto con el agua (hinchamiento). Este ajuste se hizo en el Programa "TOPAS" bajo el método Rietveld.

## 2.2.ADITIVOS USADOS

### 2.2.1. ANÁLISIS QUÍMICO MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS-X

Esta prueba tiene el mismo procedimiento que se describió en la sección 2.1.7. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS MATERIALES POR RAYOS X, Procedimiento desde el literal 1 hasta el literal 15, se realiza exactamente el mismo procedimiento con los aditivos usados para la lechada de cemento.

#### Resultados:

##### 2.2.1.1. Bentonita.

**TABLA 2.9**

*Resultados de Análisis Químico de Bentonita*

Fórmula	Concentración (%)	Fórmula	Concentración (%)
SiO <sub>2</sub>	72,23	Cl	0,069
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,55	MnO	0,047
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,61	SrO	0,029
CaO	3,16	ZrO <sub>2</sub>	0,026
Na <sub>2</sub> O	2,82	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,011
MgO	1,92	ZnO	0,010
SO <sub>3</sub>	1,32	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,008
K <sub>2</sub> O	0,51	CuO	0,005
TiO <sub>2</sub>	0,374	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002
BaO	0,213	Rb <sub>2</sub> O	0,002
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,088	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002

NOTA: Predomina el Óxido de Silicio y el Óxido de Aluminio. Datos registrados del espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X.



### 2.2.1.2.Fumed Silica.

**TABLA 2.10**

*Resultados de Análisis Químico de Fumed Silica*

Fórmula	Concentración (%)	Fórmula	Concentración (%)
SiO <sub>2</sub>	98,980	SO <sub>3</sub>	0,038
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,432	K <sub>2</sub> O	0,018
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,736	TiO <sub>2</sub>	0,013
CaO	0,228	CuO	0,005
Na <sub>2</sub> O	0,130	MnO	0,005
MgO	0,106	NiO	0,003
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,085	ZnO	0,003

NOTA: Predomina el Óxido de Silicio. Datos registrados del espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X.

### 2.2.1.3.Desco.

**TABLA 2.11**

*Resultados de Análisis Químico del Desco*

Fórmula	Concentración (%)	Fórmula	Concentración (%)
SiO <sub>2</sub>	5,35	BaO	0,155
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,88	MnO	0,089
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,73	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,083
SO <sub>3</sub>	39,33	SrO	0,061
Na <sub>2</sub> O	31,52	ZnO	0,060
CaO	3,50	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,025
MgO	1,39	CuO	0,014
K <sub>2</sub> O	0,421	NiO	0,013
TiO <sub>2</sub>	0,206	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,012
Cl	0,157		

NOTA: Predomina Óxido de Azufre, Óxido de Calcio y Óxido de Hierro. Datos registrados del espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X.

### **2.2.2. FLUIDEZ**

- NORMA API 10A, (Diciembre 2010); Sección 8: Prueba de fluido libre

Cada aditivo necesita un valor fijo de agua para que la mezcla pueda fluir libremente. Al realizar la mezcla se tendrán algunas sustancias solidas como son:

- Cemento
- Bentonita
- Alófono
- Fumed Silica
- Desco

Cada una de las sustancias necesita un porcentaje de agua adecuado al momento de realizar la mezcla. Es necesario conocer este valor, la lechada debe tener una consistencia adecuada para fluir. Esta prueba direcciona a tener un valor aproximado de agua por cada elemento sólido. Además, la consistencia a la que llegaba el material era netamente cualitativo. Es necesario determinar el porcentaje de agua especialmente del Cemento, bentonita y Alófono.

**Equipos:**

- Matraz Erlenmeyer 500 ml
- Pipeta 10 ml
- Pera de succión
- Balanza
- Lamina de Papel

**Materiales:**

- Cemento
- Bentonita
- Alófono
- Agua

**Procedimiento:**

1. Sacar los materiales y equipo a utilizarse.
2. Pesar 50 gr de cada muestra.
3. Colocar la primera muestra pesada en el Matraz Erlenmeyer ir colocando 1ml de agua.
4. Realizar movimientos circulares con el Matraz Erlenmeyer hasta que se mezcle.
5. Repetir el paso 2 y 3 hasta que toda la materia de solidos este húmedo y se mueva la mezcla en un solo cuerpo, como se muestra en la Figura 2.13.
6. Realizar los pasos anteriores con los materiales restantes.
7. Despojar las mezclas, dejar limpio y ordenado.

**FIGURA 2.13**

*Consistencia de los materiales sólidos*



NOTA: La principal característica para conocer el índice de fluidez es que todo el material se mueva en una sola masa. La primera es cemento y la segunda Alófono. Se realizó en “Laboratorio de Fluidos de Perforación”, Escuela Politécnica Nacional.

**Cálculos:**

$$\%H2O = \frac{g_{H2O}}{g_{material\ solido}} * 100 \quad (2.6)$$

Donde:

$g_{H2O}$ : Masa en gramos de Agua

$g_{material\ solido}$ : Masa en gramos del material sólido

**Muestra Nro 1: Cemento**

$$\%H2O = \frac{g_{H2O}}{g_{material\ solido}} * 100$$

$$\%H2O = \frac{21.5}{50} * 100$$

**Muestra Nro 2: Bentonita**

$$\%H2O = \frac{g_{H2O}}{g_{material\ solido}} * 100$$

$$\%H2O = \frac{6.3}{50} * 100$$

**Muestra Nro 3: Alófono**

$$\%H2O = \frac{g_{H2O}}{g_{material\ solido}} * 100$$

$$\%H2O = \frac{40.4}{50} * 100$$

$$\%H_2O = 43\%$$

$$\%H_2O = 12,6 \%$$

$$\%H_2O = 80,8 \%$$

### Resultados:

**TABLA 2.12**

*Resultados de la prueba de Fluidez*

Aditivo	CEMENTO	BENTONITA	ALÓFANO
Masa del sólido (gr)	50	50	50
Masa de H <sub>2</sub> O (gr)	21,5	6,3	40,4
% H <sub>2</sub> O	<b>43</b>	<b>12,5</b>	<b>80,76</b>

NOTA: El Alófono capta un alto porcentaje de agua a diferencia de los otros aditivos.

## 2.3.LECHADAS DE CEMENTO

Se realizan diferentes pruebas que garanticen la calidad y efectividad de la lechada de cemento en el pozo. Los análisis para realizarse deben ser minuciosos y están regidos en la mayoría por el API (Instituto Americano del Petróleo). En este caso para las Lechadas de Cemento es la API 10 B en conjunto con normas INEN y ASTM que se detallaran a continuación.

### 2.3.1. PREPARACIÓN DE LECHADA DE CEMENTO

- NORMA API 10B-2, (Segunda Edición, Abril 2013); Sección 5: Preparación de la Lechada de Cemento.
- NORMA ASTM C 465: Especificación estándar para el procesamiento de adiciones para uso en fabricación de Cementos Hidráulicos.

Los parámetros más importantes que vale recalcar es el uso de ciertos equipos como la Balanza Digital que debe estar calibrada y tener una exactitud de  $\pm 0.1\%$  , la mezcladora debe tener la capacidad de 1 litro (1/4 de galón), el aspa de tipo lámina, el vaso y la aspa deben de ser de material resistente a la corrosión.

**Equipos:**

- Balanza Digital
- Probeta de 500ml
- Envases
- Lamina de papel
- Mezcladora Hamilton Beach Model 936 (3 velocidades)
- Vaso de Precipitación 1000 ml
- Pera se succión
- Pipeta 10 ml

**Materiales:**

- Agua
- Cemento
- Bentonita
- Fumed Silica
- Desco
- Alófano

**Procedimiento, Figura 2.14:**

1. Verifica que todos los materiales y equipos se encuentren en buen estado y calibrados.
2. Pesar el cemento, aditivos y medir el agua en balanza digital.
3. La Fumed Silica tiene una consistencia muy ligera, la cual debe ser añadida como solución, se realizó varias pruebas con diferentes valores y de decidió usar 3 gr que se disuelven en 1000 ml de agua, como se muestra en la Tabla 2.13.
4. Se colocó el agua medida en el vaso de la mezcladora y se pone en la misma, verificar que este fijo.
5. Se añade la solución de Fumed Silica, que es aditivo líquido y se enciende la mezcladora en velocidad 1 (10000 rpm)

**TABLA 2.13**

*Valores de solución de Fumed Silica*

<b>SOLUCIÓN</b>		
<b>Agua</b>	1000	ml
<b>Fumed Silica</b>	3	gr

6. Se adiciona los aditivos y cemento en el siguiente orden: 1. Agua 2. Solución de Fumed Silica, 3. Bentonita, 4. Alófono, y 5. Descó.

NOTA: La velocidad se mantiene en posición 1, los aditivos se colocaron con la ayuda de láminas de papel en pequeñas cantidades, para evitar la formación de ojos de pescado.

7. El aditivo Desco se va añadiendo al final, al momento que se observa viscosa la mezcla, para que disperse las arcillas.
8. Cuando este añadido el cemento y aditivos aumentar la velocidad a posición tres, por cinco minutos.
9. Retirar el vaso de la mezcladora y usarlo para las Pruebas de laboratorio.

### FIGURA 2.14

#### *Preparación de lechada de cemento*



NOTA: Cuidadosamente ir adicionando los aditivos en el orden determinado. Se realizó en “Laboratorio de Fluidos de Perforación, Escuela Politécnica Nacional”

Se realizó diferentes lechadas en base al porcentaje de peso del cemento. Se estableció diferentes valores de Alófono y conforme va aumentando este porcentaje aumenta el porcentaje del aditivo Desco. La Fumed Silica se usa en bajos porcentajes y se evaluó en tres valores como se muestra en la siguiente Tabla 2.14.



TABLA 2.14

Concentraciones de las Lechadas de Cemento

PREPARACIÓN DE LECHADAS													
NÚMERO DE LECHADA	CEMENTO		FUMED SILICA		BENTONITA		ALÓFANO		DESCO		AGUA		
	Porcentaje (%)	Masa (gr)	Porcentaje (%)	Volumen Solución (ml)	Porcentaje (%)	Masa (gr)	Porcentaje (%)	Masa (gr)	Porcentaje (%)	Masa (gr)	Porcentaje (%)	Volumen (ml)	
1	100	520	0,03	18,5	2	10,4	1,5	7,8	0,19	1	68,3	355	
2	100	520					3	15,6	0,38	2	68,3	355	
3	100	520					4,5	23,4	0,58	3	68,3	355	
4	100	520					6	31,2	0,77	4	68,3	355	
5	100	520					7,5	39	0,87	4,5	68,3	355	
6	100	520					9	46,8	0,96	5	68,3	355	
7	100	520					10,5	54,6	1	5,2	68,3	355	
8	100	520	0,06	36,7	2	10,4	1,5	7,8	0,19	1	68,3	355	
9	100	520					3	15,6	0,38	2	68,3	355	
10	100	520					4,5	23,4	0,58	3	68,3	355	
11	100	520					6	31,2	0,77	4	68,3	355	
12	100	520					7,5	39	0,87	4,5	68,3	355	
13	100	520					9	46,8	0,96	5	68,3	355	
14	100	520					10,5	54,6	1	5,2	68,3	355	
15	100	520	0,09	55,1	2	10,4	1,5	7,8	0,19	1	68,3	355	
16	100	520					3	15,6	0,38	2	68,3	355	
17	100	520					4,5	23,4	0,58	3	68,3	355	
18	100	520					6	31,2	0,77	4	68,3	355	
19	100	520					7,5	39	0,87	4,5	68,3	355	
20	100	520					9	46,8	0,96	5	68,3	355	
21	100	520					10,5	54,6	1	5,2	68,3	355	

NOTA: Se realizó 21 diseños de lechadas de cemento, todas las masas de los aditivos son en base a la masa del cemento, se trabajó con siete valores de Alófono y Desco, tres de Fumed Silica y la Bentonita un porcentaje constante.

### 2.3.2. *DENSIDAD*

- NORMA API 10B-2, (Segunda Edición, Abril 2013); Sección 6:  
Determinación de la Densidad de la Lechada.

La norma indica que se usa la misma balanza presurizada usada para fluidos de perforación, Esta balanza presurizada debe estar calibrada.

#### **Equipos:**

- Balanza Presurizada de Lodos

#### **Materiales:**

- Lechada de Cemento

#### **Procedimiento:**

1. Poner el pedestal de base o caja portadora sobre una superficie plana y a nivel.
2. Tomar una muestra de la Lechada de Cemento.
3. Verter la muestra de la lechada a la copa de la balanza de lodo hasta un nivel ligeramente por debajo del borde superior de la copa.
4. Golpear suavemente el costado del vaso de la balanza de lodo con la tapa para sacar el aire o gas atrapado.
5. Colocar la tapa en el vaso con la válvula de comprobación de la posición ABIERTA.
6. Presionar la tapa hacia abajo en la boca del vaso hasta que la superficie se establece, el contacto entre la falda de la tapa y el borde superior del vaso.
7. Expulsar el exceso de lechada a través de la válvula de retención.
8. Después de que la tapa se ha colocado en el asiento, tirar de la válvula de retención en la posición de CERRADO, enjuagar el vaso con agua.

9. Atornille el anillo roscado en el vaso de la balanza.
10. Colocar el instrumento en el filo.
11. Mover las pesas deslizantes a la derecha o izquierda hasta que la viga este balanceada, esto significa que la burbuja se encuentre entre las dos marcas.
12. Leer la densidad en las unidades deseadas.
13. Al registrar el valor, vuelva a conectar el conjunto de la bomba y presione hacia abajo sobre el cilindro de la bomba, para liberar la presión.
14. Vacíe la copa y el conjunto de la bomba y limpiar todos los componentes de la balanza.

### Resultados:

**TABLA 2.15**

*Resultados de las 21 Lechadas de Cemento*

Nro de Muestra	DENSIDAD (lb/gal)	Nro de Muestra	DENSIDAD (lb/gal)	Nro de Muestra	DENSIDAD (lb/gal)
1	13,5	8	13,6	15	13,3
2	13,8	9	13,6	16	13,3
3	13,8	10	13,6	17	13,4
4	13,6	11	13,7	18	13,5
5	13,8	12	13,7	19	13,4
6	13,9	13	13,6	20	13,4
7	13,8	14	13,8	21	13,5

NOTA: Las siete primeras se trabajó con 0.03% de Fumed Silica, las siguientes siete con 0.06% de Fumed Silica y las últimas siete con 0.06% de Fumed Silica, variando el Alófono y Desco en siete valores, se evidencia que en las últimas siete se tiene menor valor de densidad y en las primeras siete mayor valor de densidad.

### 2.3.3. REOLOGÍA Y GELES

- NORMA API 10B-2, (Segunda Edición, Abril 2013); Sección 11: Determinación de propiedades Reológicas y Resistencia del Gel utilizando viscosímetro rotatorio.

La norma indica que es necesario un viscosímetro rotatorio no presurizado, también conocido como viscosímetro ½ Couette. El cual debe constar con un cuerpo cilíndrico bob situado concéntricamente en un rotor cilíndrico. El ancho de la brecha entre la pesa y el rotor está fijado por una determinada configuración de rotor / bob.

El rotor es capaz de girar a velocidades de rotación diversos. En este caso se usará un viscosímetro OFITE MODELO 900, el cual esta calibrado bajo la norma API 10B-2. La configuración de rotor / bob es R1 / B1. Es la primera configuración que da la norma como muestra en la Tabla 2.16.

**TABLA 2.16**

*Configuración rotor / bob*

	Rotor-Bob		
	R1-B1	R1-B2	R1-B5
Rotor internal diameter	36.83 ± 0.02 (1.450 ± 0.001)	36.83 ± 0.02 (1.450 ± 0.001)	36.83 ± 0.02 (1.450 ± 0.001)
Bob external diameter	34.49 ± 0.02 (1.358 ± 0.001)	24.54 ± 0.02 (0.966 ± 0.001)	31.97 ± 0.02 (1.259 ± 0.001)
Bob length	38.00 ± 0.02 (1.496 ± 0.001)	38.00 ± 0.02 (1.496 ± 0.001)	38.00 ± 0.02 (1.496 ± 0.001)
Gap width	1.17 ± 0.02 (0.046 ± 0.001)	6.14 ± 0.02 (0.242 ± 0.001)	2.43 ± 0.02 (0.096 ± 0.001)
Bob/rotor radius ratio	0.937	0.666	0.668

Fuente: (API 10B-2, 2013, p. 87)

#### Equipos:

- Viscosímetro rotativo OFITE MODELO 900.

#### Materiales:

- Lechada de Cemento

**Procedimiento:**

1. La lechada de cemento preparada, usarla enseguida para que no afecte sus propiedades.
2. Agitar la lechada de cemento antes de usarla.
3. Enchufar a la corriente el viscosímetro rotatorio.
4. Encender el viscosímetro, presionar ENTER, la pantalla indica bajar el vaso.
5. Bajar el vaso y colocar la muestra agitada dentro del vaso hasta el nivel de la línea trazada y presionar NEXT.
6. Elevar el vaso hasta la línea trazada en el manguito del rotor.
7. El viscosímetro Modelo 900 tiene dos modos MUD y CEM. Se selecciona CEM, el cual automáticamente hace las lecturas superiores, promedios y bajas de 300, 200, 100, 60, 30, 6, 3.RPM y registrar los valores.
8. Bajar el vaso con cuidado y desalojar la lechada de cemento.
9. Suavemente girar el rotor y sacarlo sin topar el Bob para limpiarlo.
10. Limpiar el Bob evitando que se mueva el Bob.
11. Finalmente, limpiadas todas las partes, subir el vaso y sujetar, apagar equipo.

Las lechadas de cemento generan un Modelo Reológico. Este modelo nos permite conocer el tipo de fluido que encontramos y nos permite predecir su comportamiento. En si lo importante es evaluar el Yield Point para conocer si existirá mejor eficiencia de la lechada de cemento. Es importante esta prueba para determinar si la lechada de cemento podrá ser desplazada a su objetivo. De no serlo, es necesario la implementación de aditivos dispersantes. Considerar, que el equipo este calibrado, para tener datos acertados.

**Resultados:****TABLA 2.17***Resultados de Reología y Geles de las muestras del 1 hasta 7.*

<b>Resultados de reología y gel</b>								
<b>MODO CEMENTO</b>	<b>Lecturas</b>	<b>Nro de Muestra</b>						
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>UP</b>	300	65	113	144	73	59	60	60,7
	200	62,5	102	142	69	58	60	57
	100	58	90	138	59	56	50	48
	60	51	82	128	54	57	46	45
	30	46	74	118	50	50,5	42,5	43
	6	35,6	66,7	95	43	40,4	43,5	41,7
	3	20,4	42,7	59	29	24,4	29,2	31,1
<b>DOWN</b>	300	65,6	113,8	151,2	77	61,6	63,4	62,3
	200	63,5	107	148	68	60	60,5	59
	100	64	100,5	146	61	59	50	50
	60	63	98	148	56	55	46	45
	30	62	94	144	52	52	44	43
	6	40,3	80,2	107	39,7	44,5	38	40,3
	3	24,7	43,9	65	26,7	27,7	24,5	26,9
<b>AVG</b>	<b>600</b>	72	123,6	160,2	94,5	78,6	82	81,2
	<b>300</b>	65,3	113,4	147,6	75	60,3	61,7	61,5
	<b>200</b>	63	105	145	69	59	60	58
	<b>100</b>	61	95	142	60	57,5	50	49
	<b>60</b>	57	90	138	55	56	46	45
	<b>30</b>	54	84	131	51	51	43	43
	<b>6</b>	38	73,5	101	41,4	42,5	40,7	41
	<b>3</b>	22,6	43,3	62	27,9	26,1	26,9	29
<b>Viscosidad Plástica</b>	<b>PV (Cp)</b>	6,7	10,2	12,6	19,5	18,3	20,3	19,7
<b>Yield Point</b>	<b>YP (lb/ft^2)</b>	58,6	103,2	135	55,5	42	41,4	41,8
<b>GELES</b>	<b>GEL 10 SEG</b>	0,3	0,6	0,7	0,3	0,2	0,3	0,3
	<b>GEL 10 MIN</b>	0,2	0,5	0,8	0,3	0,3	0,3	0,4

NOTA: Las siete primeras lechadas con 0.03% de Fumed Silica muestran valores elevados de Yield Point, los valores bajos no están dentro del rango, en ese estado es imposible bombear la lechada.

**TABLA 2.18**

*Resultados de Reología y Geles de las muestras del 8 hasta 14.*

Resultados de reología y gel								
MODO CEMENTO	Lecturas	Nro de Muestra						
		8	9	10	11	12	13	14
UP	300	81	53	44	54	51	49	56
	200	62	49	41	50	50	47	52
	100	53	40	39	41	40	41	49
	60	48	36	36	37	36	39	46
	30	45	32	35	36	33	41	49
	6	34,4	25,7	32,1	32,7	35,2	38,4	42,5
	3	24,5	18,1	24,6	22,8	22,8	31,2	30,2
DOWN	300	86,8	53	45,6	55,8	54,2	49,4	57,4
	200	63	51	43	50	50	47	54
	100	58	45	37	42	41	39	48
	60	57	41	34	38	37	36	43
	30	54	37	31	34	33	32	39
	6	35,7	29,7	27,5	31,2	30,9	29,4	36,3
	3	21,3	17,8	19,2	21,6	21,5	23,3	24,9
AVG	<b>600</b>	100,6	69,4	61,1	74,5	72,8	68,6	77,1
	<b>300</b>	83,9	53	44,8	54,9	52,6	49,2	56,7
	<b>200</b>	63	50	42	50	50	47	53
	<b>100</b>	55	43	38	41	40	40	49
	<b>60</b>	52	38	35	38	36	37	45
	<b>30</b>	50	35	33	35	33	36	44
	<b>6</b>	35,1	27,7	29,8	32	33,1	33,9	39,4
	<b>3</b>	22,9	18	21,9	22,2	22,2	27,2	27,2
<b>Viscosidad Plástica</b>	<b>PV (Cp)</b>	16,7	16,4	16,3	19,6	20,2	19,4	20,4
<b>Yield Point</b>	<b>YP (lb/ft<sup>2</sup>)</b>	67,2	36,6	28,5	35,3	32,4	29,8	36,3
<b>GELES</b>	<b>GEL 10 SEG</b>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	<b>GEL 10 MIN</b>	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4

NOTA: Al aumentar el porcentaje de Fumed Silica en este caso 0.06%, se observó valores menores a los siete anteriores, el valor de la lechada ocho tiene el mayor valor el cual debe ser descartado, los restantes se encuentra en un rango de 28 a 36 lb/ft<sup>2</sup>.

**TABLA 2.19**

*Resultados de Reología y Geles de las muestras del 15 hasta 21.*

<b>Resultados de reología y gel</b>								
<b>MODO CEMENTO</b>	<b>Lecturas</b>	<b>Nro de Muestra</b>						
		<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>
<b>UP</b>	300	60	48	42	54	48	39	50
	200	59	48	42	52	40	37	48
	100	57	40	36	48	32	36	46
	60	56	37	34	45	28	34	43
	30	51	35	31	45	26	36	43
	6	34,3	30	28,7	44,6	24,9	37,7	43,8
	3	26,3	26,5	26,9	31,5	18,9	29,2	47,5
<b>DOWN</b>	300	60,2	49,4	44	54,2	49	40,4	52,4
	200	60,4	48	42	52	42	39	50
	100	60,8	42	38	47	35	33	43
	60	59,8	40	35	43	31	30	38
	30	64	37	32	39	28	27	35
	6	34,5	32,3	29,7	35,7	26	25	32,5
	3	26,2	19,5	20,7	22,4	19	21,2	26,6
<b>AVG</b>	<b>600</b>	69,5	61,5	59,9	71,1	65,8	55,1	68,7
	<b>300</b>	60,1	48,7	43	54,1	48,5	39,7	51,2
	<b>200</b>	59,7	48	42	52	41	38	49
	<b>100</b>	58,9	41	37	48	33	34	44
	<b>60</b>	57,9	38	34	44	30	32	40
	<b>30</b>	57	36	32	42	27	32	39
	<b>6</b>	34,4	31,2	29,2	40,1	25,5	31,3	38,2
	<b>3</b>	26,2	23	23,8	27	18,9	25,2	37
<b>Viscosidad Plástica</b>	<b>PV (Cp)</b>	9,4	12,8	16,9	17	17,3	15,4	17,5
<b>Yield Point</b>	<b>YP (lb/ft<sup>2</sup>)</b>	50,7	35,9	26,1	37,1	31,2	24,3	33,7
<b>GELES</b>	<b>GEL 10 SEG</b>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
	<b>GEL 10 MIN</b>	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,5	0,6

NOTA: Las últimas siete lechadas tienen valores menores que las anteriores lechadas, entre ellas existen dos valores bajos los cuales deben ser analizados, así como los dos valores altos. Analizar si existe similitud con las anteriores lechadas.



#### **2.3.4. FILTRADO API BAJA PRESIÓN**

- NORMA API 10B-2, (Segunda Edición, Abril 2013); Sección 7: Prueba de Pérdidas de Fluidos Estáticos.

Esta prueba API de pérdida de fluido a baja presión y temperatura, se utiliza una prensa API estándar, presurizado hasta un diferencial de 100 psi, la cual es generada por un gas no inflamable como el nitrógeno. Se mide ml/30 minutos.

#### **Equipos:**

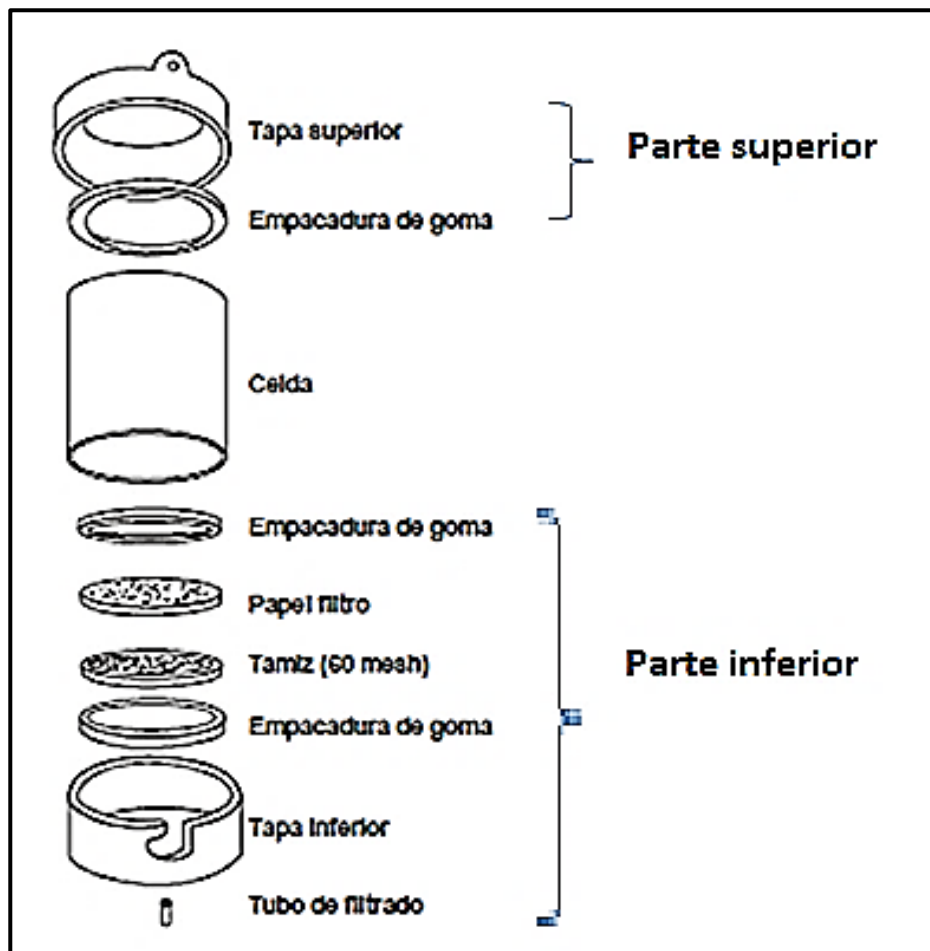
- Prensa Filtro
- Tanque de Nitrógeno
- Papel Filtro
- Cronometro
- Probeta Graduada de 10 ml

#### **Materiales:**

- Lechada de Cemento

#### **Procedimiento:**

1. Armar la parte inferior de la celda con el papel de filtro en su lugar, como muestra en la Figura 2.15.
2. Llenar la celda con 350 ml de la lechada de cemento y armar la parte superior de la celda como muestra en la Figura 2.15.

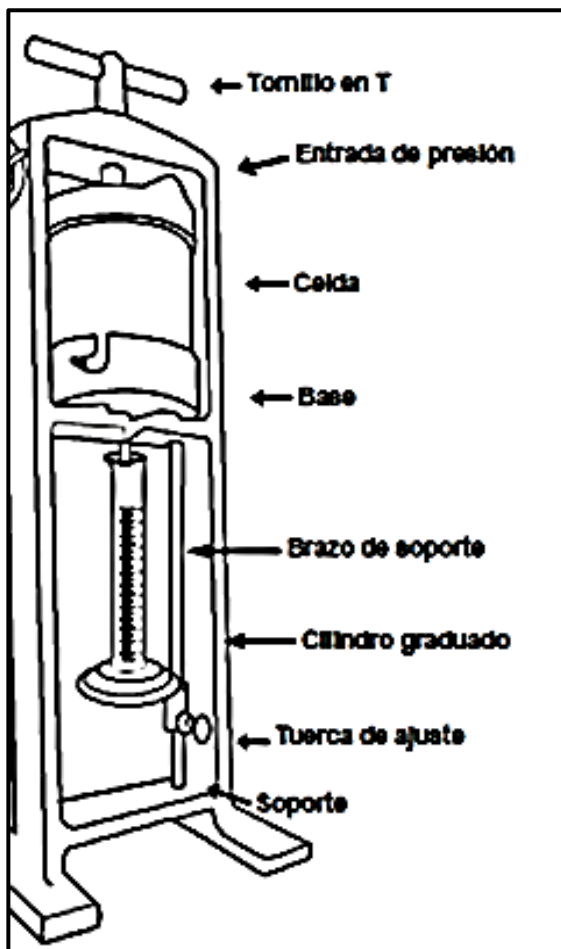
**FIGURA 2.15***Ensamble de la celda*

Fuente: Manual de Equipo- Laboratorio de fluidos de perforación (EPN,2019)

3. Colocar la celda dentro del soporte y ajustar la tapa superior con el tornillo T, como se muestra en la Figura 2.16.
4. Colocar una probeta debajo del tubo de filtrado de la celda.
5. Cerrar la válvula de alivio y ajustar el regulador para que sea aplicada una presión de  $100 \pm 5$  Psi.
6. Mantener la presión durante 30 minutos, registrando el tiempo que demora en llenarse cada 1 ml de filtrado en la probeta.

FIGURA 2.16

*Ensamble de la prensa*



Fuente: Manual de Equipo- Laboratorio de fluidos de perforación (EPN,2019)

7. Cerrar el flujo de presión, con el regulador y abrir con cuidado la válvula de alivio.
8. Después de que la presión ha sido descargada, retirar la celda del soporte.
9. Desarmar la celda, quitar la lechada de cemento y limpiar la celda

### Resultados:

$$\text{Cálculo API liquido perdido} = \frac{\text{Volumen Recogido}}{\text{Tiempo transcurrido}} \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right] \quad (2.7)$$

**TABLA 2.20***Resultados de Filtrado API*

Nro de Muestra	Volumen total recogido	Tiempo transcurrido		Cálculo API líquidos perdido
	(ml)	(seg)	(min)	(ml/min)
1	127	350	5,833	575,994
2	127	369	6,150	560,969
3	127	391	6,517	544,959
4	127	416	6,933	528,330
5	101,2	450	7,500	404,783
6	99,9	450	7,500	399,584
7	96,4	450	7,500	385,584
8	135	293	4,883	669,188
9	135	327	5,450	633,444
10	135	411	6,850	565,017
11	107,3	450	7,500	429,182
12	106,3	450	7,500	425,182
13	102,2	450	7,500	408,783
14	97,2	450	7,500	388,784
15	137	266	4,433	712,735
16	137	375	6,250	600,279
17	127,4	450	7,500	509,579
18	120,1	450	7,500	480,380
19	117,2	450	7,500	468,781
20	116,6	450	7,500	466,381
21	103,6	450	7,500	414,383

NOTA: Se observa filtrado seco en las primeras lechadas de los tres porcentajes de Fumed Silica usados. Además, se observa un cambio en el filtrado al aumentar el porcentaje de Fumed Silica y el Alófano, no se tiene filtrado seco.

### **2.3.5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

- NORMA API 10B-2, (Segunda Edición, Abril 2013); Sección 7: Simulación de Prueba en Pozo de Fuerza Compresiva.
- ASTM C109: Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico
- NORMA INEN 488:2009, Segunda Revisión: Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la compresión de Morteros en Cubos de 50mm de arista.
- NORMA INEN 2502:2009: Cemento Hidráulico. Determinación del flujo de Morteros.
- NORMA INEN 2500:2009: Cemento Hidráulico. Especificaciones para la mesa de flujo usada en ensayos de cemento hidráulico.
- NORMA NTE INEN 2528:2010: Cámara de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar.

Se usará el método destructivo, que se guiará en las normas anteriormente mencionadas, por el tiempo permitido en el laboratorio, se redujo el número de pruebas y se descartó las siete primeras lechadas, en base a los resultados de las anteriores pruebas llevo a tomar esta decisión.

#### **Equipos**

- Balanza
- Prensa Hidráulica.

- Probeta 500 cm<sup>3</sup>
- Moldes para cubos de 50 mm de arista
- Mezcladora
- Cubeta de mezclado y aleta
- Apisonador
- Palustre
- Cámara de curado húmedo.  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa mayor a 95 %.
- Franela o limpión
- Lápiz de suelda para identificación de la muestra

**Materiales:**

- Cemento patrón
- Alófono tamizado M-100
- Bentonita
- Fumed Silica
- Desco
- Arena normalizada. (Arena de Ottawa “graded”).
- Agente antiadherente como aceite o grasa
- Agua destilada

**Procedimiento, Figura 2.17:**

1. Pesar todos los materiales para nueve cubos como indica la Tabla 2.21.

**TABLA 2.21***Cantidades de materiales a ser mezcladas*

MATERIAL	NÚMERO DE ESPECÍMENES	
	6	9
Cemento, g	500	740
Arena, g	1 375	2 035
Agua, cm <sup>3</sup>		
- Portland (a/c = 0,485)	242	359
- Portland con incorporador de aire (a/c = 0,460)	230	340
- Otros (para un flujo de 110 ± 5)	-----	-----

Fuente: (NTE INEN 488, 2009, p. 4)

NOTA: Pesar los aditivos adicionales en función del porcentaje del peso del cemento.

2. Encender la mezcladora, programar, poner la aleta a la mezcladora y sacar el recipiente para poner el agua y los materiales sólidos.
3. Medir el agua en la probeta, un valor estimado y se colocó en el recipiente de la mezcladora.
4. Colocar los materiales sólidos, previamente mezclados en el recipiente de la mezcladora.
5. Colocar el recipiente con los materiales en la mezcladora y encender.
6. Al terminar de mezclar se pone la mezcla en la mesa de flujo, Anexo 2, se enciende y da 25 golpes, se toma cuatro medidas la sumatoria de estos debe estar en los rangos de 110 ±5.

NOTA: Si no se encuentra dentro del rango establecido, y el valor es menor se puede añadir agua y si se pasó del rango se debe repetir la mezcla.

7. Si se encuentra en el rango establecido de la tabla de flujo, se procede a tomar tres moldes de cubos y desplazar agente antiadherente en todas sus caras. Para evitar que la mezcla se pegue al molde.
8. Se realiza apisonado manual consiste en el llenado de los moldes debe iniciar dentro de un intervalo de tiempo no mayor de 2 minutos y 30 segundos después de completar el primer mezclado de la masa del mortero.
9. Colocar una capa de mortero alrededor de 25 mm de espesor es aproximadamente la mitad de la profundidad del molde. En todos los compartimentos cúbicos y apisonar el mortero en cada compartimento cúbico 32 veces en alrededor de 10 segundos, en 4 rondas, en cada ronda se debe compactar con 8 golpes en dirección perpendicular a la anterior cómo se indica en la Figura 2.8.
10. Una vez terminada la compactación de la primera capa en todos los compartimentos cúbicos, llenar los compartimientos con el mortero restante y compactar como se ha especificado para la primera capa. Durante la compactación de la segunda capa mediante el apisonador y con la ayuda de los dedos de las manos, colocar nuevamente al interior del mortero lo que haya rebozado sobre el borde superior de los moldes después de cada ronda de compactación, hasta completar cada una de las rondas y antes de empezar la siguiente ronda de apisonado.
11. Al finalizar la compactación, la superficie de mortero en todos los cubos debe sobresalir ligeramente sobre el borde de los moldes. Retirar con una espátula el



excedente de mortero que ha rebozado sobre el borde de los moldes, con el propósito de nivelar el mortero y hacer que el mortero que sobresale del borde del molde sea más uniforme se pasa suavemente el lado plano de la espátula una vez a lo largo de la longitud del molde.

12. Después que se haya realizado eliminación del exceso de los bordes con la espátula, con la ayuda de una franela o papel se limpia los bordes para poderle colocar un nombre e identificarle.
13. Colocar los moldes con las muestras en la cámara de curado húmedo a  $23 \pm 2$  °C durante 20 a 24 horas, mientras se encuentren en la cámara de curado húmedo proteja la superficie de las muestras de goteo de agua.
14. Retirar los moldes del cuarto o gabinete húmedo y extraer los cubos de los moldes.
15. Dejar dos cubos (1 y 2) para realizar la prueba a la edad 24 horas, los siete cubos restantes colocar en los recipientes con agua dentro de la cámara de curado.
16. Sacar los dos cubos siguientes (3 y 4) a la edad de 3 días, a continuación, los 2 cubos más (5 y 6) a la edad de 14 días y los dos últimos cubos (7 y 8) a la edad de 28 días, sobra un cubo en caso se requiera repetir la prueba
17. Colocar los cubos en la prensa y encender; determinar la resistencia a la compresión de las tres muestras de prueba a una edad de 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días, en la prensa Cyber – Plus – Evolution y registrar.

**FIGURA 2.17***Procedimiento Resistencia a la compresión*

**NOTA:** Los cubos deben ser desmoldados de tal manera que evite daños en los mismos, para un valor exacto en la resistencia a la compresión. Se realizó en “Laboratorio de Compañía dedicada a la fabricación de cementos”.

**Resultados:**

Se estableció dos diseños para conocer el comportamiento del Alófono: 1. Alófono y cemento; 2. Alófono, aditivos y cemento. Se realizó de esta manera para conocer cómo se comporta el Alófono solo con cemento y el Alófono, aditivos y cemento. Se empleó estas dos formas en las dos metodologías descritas a continuación

**NOTA:** En todos los diseños de formulaciones y en las dos metodologías se usó un valor constante de arena normalizada que es 2035gr como indica la norma. En esta prueba se usó dos metodologías de mezclado que son:

- **Metodología 1:**

La cual consistía según la norma usar la cantidad de cemento de 740 gr, 2035 gr arena normalizada y agua hasta cumplir el parámetro de tabla de flujo, entonces para los ensayos se hizo que la masa total de cementos y aditivos era 740 gr, en base a este valor se calculó los porcentajes del cemento y los aditivos, anteriormente formulados, en este caso todos los valores fueron diferentes, como se muestran en la Tabla 2.22 y Tabla 2.24, en cada diseño de lechada se realizó diferentes formulaciones en base a la masa del cemento manteniendo fijo el valor de 740 gr entre cemento y aditivos.

Determinamos que la metodología usada no era viable, ya que los valores de resistencia a la compresión disminuyeron abruptamente, como se muestran en la Tabla 2.23 y Tabla 2.25; en las pruebas realizadas como: densidad, reología y filtrado se mantuvo los valores de concentraciones de las lechadas. Entonces la finalidad de la investigación era mantener el valor de la masa del cemento y adicionar los aditivos referentes a los diseños de lechadas formulados anteriormente.

En esta metodología se disminuyó el porcentaje de masa del cemento y se complementaba con la masa de los aditivos hasta tener un total de 740 gr, pero la finalidad del proyecto era adicionar el nuevo aditivo Alófano en compañía de los otros aditivos basándonos en el valor fijo del cemento y conocer el comportamiento del Alófano. Por tanto, descartamos los resultados de esta metodología.

- **Metodología 2:**

Se decidió realizar las pruebas de esta manera, ya que no se consideró adecuada la anterior metodología. En esta metodología trabajamos con 740 gr de cemento fijo en todas las formulaciones y en base a este valor fijo de cemento se calculó los porcentajes de los demás aditivos. Por tanto, el valor total de masa de cemento y aditivos era mayor como se muestra en la Tabla 2.26 y la Tabla 2.28, de esta manera podíamos realizar una comparación, ya que se realizó de la misma manera de las anteriores pruebas. Y se evidenció en los resultados que se observa en la Tabla 2.27 y Tabla 2.28.

La presente metodología cumplía con el propósito de la investigación que era adicionar a un valor fijo de cemento un porcentaje de Alófono y por ende los demás aditivos que complementaban para las demás propiedades en estudio, realizar una comparación de las diferentes concentraciones, para evidenciar el comportamiento de Alófono en compañía de los aditivos o solo.

Esta metodología, mantiene el diseño de las lechadas establecidas. Trabajar en base a la masa del cemento, teniendo constante el valor de la masa de este, ir adicionando los porcentajes establecidos de Alófono, Fumed Silica, Bentonita y Desco. Es importante resaltar que esta metodología es la idónea para la presente investigación, ya que se la aplicó desde el inicio, lo cual debía realizarse bajo la misma todas las pruebas a emplearse.

**TABLA 2.22***Concentraciones Alófono Metodología 1: Blancos*

<b>PRUEBAS</b>	<b>CEMENTO (gr)</b>	<b>CEMENTO (%)</b>	<b>ALÓFANO (gr)</b>	<b>ALÓFANO (%)</b>	<b>Total Masa cemento + aditivos</b>	<b>ARENA (gr)</b>	<b>AGUA (ml)</b>	<b>TOTAL MASA</b>	<b>TABLA DE FLUJO</b>
Blanco 1	718,500	97,081	21,600	2,919	<b>740,100</b>	2035,000	395,000	3170,100	106,000
Blanco 2	698,100	94,338	41,900	5,662	<b>740,000</b>	2035,000	395,000	3170,000	110,000
Blanco 3	678,900	91,743	61,100	8,257	<b>740,000</b>	2035,000	395,000	3170,000	110,000

NOTA: Se evaluó Cemento y Alófono, manteniendo la masa constante final.

**TABLA 2.23***Resultados Alófono Metodología 1: Blancos*

<b>PRUEBAS</b>	<b>EDADES</b>				<b>PROMEDIO 1 (MPa)</b>	<b>PROMEDIO 2 (MPa)</b>	<b>PROMEDIO 3 (MPa)</b>	<b>PROMEDIO 4 (MPa)</b>
	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>28</b>				
<b>Blanco 1</b>	12,7	18,8	24,9	31,7	12,5	18,2	24,5	31,6
	12,3	17,6	24,0	31,4				
<b>Blanco 2</b>	11,6	17,2	22,7	31,1	11,1	17,2	22,6	31,1
	10,6	17,1	22,5	31				
<b>Blanco 3</b>	9,6	15,7	21,7	28,5	9,5	15,1	20,9	28,5
	9,4	14,4	20,0	28,4				

NOTA: Los valores a la edad de un día es la más importante en la presente investigación, la cual baja abruptamente a la del cemento solo.

**TABLA 2.24***Concentraciones Alófono Metodología 1*

PRUEBAS	CEMENTO (gr)	CEMENTO (%)	ALÓFANO (gr)	ALÓFANO (%)	DESCO (gr)	DESCO (%)	FUMED SILICA (gr)	FUMED SILICA (%)	BENTONITA (gr)	BENTONITA (%)	Total Masa cimento + aditivos	ARENA (gr)	AGUA (ml)	TOTAL MASA	TABLA DE FLUJO
Muestra 1	701,800	94,830	21,100	2,851	2,700	0,365	0,420	0,057	14,040	1,897	740,060	2035,00 0	385,00 0	3160,06 0	110,00 0
Muestra 2	680,000	91,891	40,800	5,513	5,200	0,703	0,410	0,055	13,600	1,838	740,010	2035,00 0	380,00 0	3155,01 0	109,00 0
Muestra 3	660,600	89,270	59,500	8,041	6,300	0,851	0,400	0,054	13,200	1,784	740,000	2035,00 0	385,00 0	3160,00 0	105,00 0
Muestra 4	701,600	94,810	21,050	2,845	2,700	0,365	0,630	0,085	14,030	1,896	740,010	2035,00 0	385,00 0	3160,01 0	106,00 0
Muestra 5	679,800	91,864	40,800	5,513	5,200	0,703	0,610	0,082	13,600	1,838	740,010	2035,00 0	395,00 0	3170,01 0	115,00 0
Muestra 6	660,400	89,255	59,400	8,028	6,300	0,851	0,600	0,081	13,200	1,784	739,900	2035,00 0	395,00 0	3169,90 0	109,00 0

NOTA: Se evaluó seis diseños de lechadas, con tres porcentajes en Alófono y Desco, dos porcentajes de Fumed Silica, se mantiene el valor de la masa final.

**TABLA 2.25***Resultados Alófano Metodología 1:*

PRUEBAS	EDADES				PROMEDIO 1 (MPa)	PROMEDIO 2 (MPa)	PROMEDIO 3 (MPa)	PROMEDIO 4 (MPa)
	1	3	7	28				
<b>Muestra 1</b>	11,5	19,4	26,8	31,3	11,000	19,911	26,400	31,450
	10,5	20,4	26,0	31,6				
<b>Muestra 2</b>	10,6	20,3	26,7	33,3	10,200	20,166	26,550	32,650
	9,8	20,0	26,4	32				
<b>Muestra 3</b>	10,0	18,3	25,2	32,1	9,800	18,447	24,750	31,850
	9,6	18,6	24,3	31,6				
<b>Muestra 4</b>	10,4	17,2	24,4	30,2	9,900	17,992	24,650	30,050
	9,4	18,8	24,9	29,9				
<b>Muestra 5</b>	7,2	19,0	24,8	30,8	6,950	19,300	23,900	30,800
	6,7	19,6	23,0	30,8				
<b>Muestra 6</b>	6,4	17,6	22,8	29,9	6,600	17,350	22,650	29,500
	6,8	17,1	22,5	29,1				

NOTA: En las cuatro edades se rompen dos cubos para verificar el resultado, se observó que fue descendiendo el valor de la resistencia a la compresión al aumentar los porcentajes de los aditivos.

**TABLA 2.26***Concentraciones Alófono Metodología 2: Blancos*

PRUEBAS	CEMENTO (gr)	CEMENTO (%)	ALÓFANO (gr)	ALÓFANO (%)	Total Masa cemento + aditivos	ARENA (gr)	AGUA (ml)	TOTAL MASA	TABLA DE FLUJO
<b>Blanco 1.1</b>	740,000	100,000	22,200	3,000	<b>762,200</b>	2035,000	390,000	3187,200	111,000
<b>Blanco 2.1</b>	740,000	100,000	44,400	6,000	<b>784,400</b>	2035,000	390,000	3209,400	106,000
<b>Blanco 3.1</b>	740,000	100,000	66,600	9,000	<b>806,600</b>	2035,000	395,000	3236,600	108,000

NOTA: La masa total de cemento y aditivos no es contante, solo se mantiene constante la masa de cemento.

**TABLA 2.27***Resultados Alófono Metodología 2: Blancos*

PRUEBAS	EIDADES				PROMEDIO 1 (MPa)	PROMEDIO 2 (MPa)	PROMEDIO 3 (MPa)	PROMEDIO 4 (MPa)
	1	3	7	28				
<b>Blanco 1.1</b>	13,942	21,800	26,700	33,500	13,254	22,05	27	33,35
	12,566	22,300	27,300	33,200				
<b>Blanco 2.1</b>	11,200	20,600	25,200	32,050	11,55	20,5	24,95	32,375
	11,900	20,400	24,700	32,700				
<b>Blanco 3.1</b>	11,800	18,195	25,300	31,300	11,7	17,625	25,25	31,75
	11,600	17,055	25,200	32,200				

NOTA: Los valores a la edad de un día es la más importante en la presente investigación, las cuales son menor a la del cemento solo.



**TABLA 2.28***Concentraciones Alófano: Metodología 2*

PRUEBAS	CEMENTO (gr)	CEMENTO (%)	ALÓFANO (gr)	ALÓFANO (%)	DESCO (gr)	DESCO (%)	FUMED SILICA (gr)	FUMED SILICA (%)	BENTONITA (gr)	BENTONITA (%)	<u>Total</u> Masa cemento + aditivos	ARENA (gr)	AGUA (ml)	<u>TOTAL</u> MASA	TABLA DE FLUJO
Muestra 1.1	740	100	22,2	3	2,8	0,38	0,444	0,06	14,8	2	780,244	2035	390	3205,244	106
Muestra 2.1	740	100	44,6	6	5,7	0,77	0,444	0,06	14,8	2	805,544	2035	385	3225,544	105
Muestra 3.1	740	100	66,6	9	7,1	0,96	0,444	0,06	14,8	2	828,944	2035	400	3263,944	108
Muestra 4.1	740	100	22,2	3	2,8	0,38	0,666	0,09	14,8	2	780,466	2035	400	3215,466	112
Muestra 5.1	740	100	44,6	6	5,7	0,77	0,666	0,09	14,8	2	805,766	2035	395	3235,766	110
Muestra 6.1	740	100	66,6	9	7,1	0,96	0,666	0,09	14,8	2	829,166	2035	395	3259,166	106

NOTA: Se evaluó seis diseños de lechadas, con tres porcentajes en Alófano y Desco, dos porcentajes de Fumed Silica, varió el valor de la masa final al aumentar los aditivos.

**TABLA 2.29***Resultados Alófano Metodología 2*

PRUEBAS	EIDADES				PROMEDIO 1	PROMEDIO 2	PROMEDIO 3	PROMEDIO 4
	1	3	7	28				
<b>Muestra 1.1</b>	12,900	20,510	25,200	30,800	12,450	20,481	25,550	30,750
	12,000	20,451	25,900	30,700				
<b>Muestra 2.1</b>	11,900	23,143	28,400	35,300	11,750	22,894	28,150	35,635
	11,600	22,644	27,900	35,970				
<b>Muestra 3.1</b>	12,000	21,100	25,700	35,400	11,750	20,069	25,450	35,300
	11,500	19,037	25,200	35,200				
<b>Muestra 4.1</b>	11,700	18,738	25,900	33,100	11,800	19,022	25,900	33,500
	11,900	19,306	25,900	33,900				
<b>Muestra 5.1</b>	10,400	21,300	25,600	36,500	10,850	21,500	26,200	36,150
	11,300	21,700	26,800	35,800				
<b>Muestra 6.1</b>	10,400	21,800	25,500	36,300	10,700	21,600	25,750	35,150
	11,000	21,400	26,000	34,000				

NOTA: Los valores de la resistencia a la compresión tuvieron una menor caída en comparación a la metodología 1.

### **2.3.6. TIEMPO DE FRAGUADO:**

- NORMA INEN 157:2009, Segunda Revisión: Cemento Hidráulico.  
Determinación de la Consistencia Normal. Método Vicat.
- NORMA INEN 158:2009, Segunda Revisión: Cemento Hidráulico.  
Determinación del Tiempo de Fraguado. Método de Vicat.

Es necesario realizar las dos pruebas: Consistencia Normal y Tiempo de Fraguado, tomando en cuenta para la Prueba Consistencia Normal, la norma dice que, al soltar la varilla del aparato de Vicat, esta debe penetrar  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  bajo la superficie original de la pasta durante 30 segundos.

En la Prueba de Tiempo de Fraguado, la norma dice que se debe realizar penetraciones periódicas en la pasta utilizando la aguja de Vicat de 1 mm de diámetro. El tiempo de fraguado inicial Vicat, es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el instante en el cual la penetración medida o calculada es de 25 mm. El tiempo de fraguado final Vicat, es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el instante en el cual la aguja no deja una impresión circular completa en la superficie de la pasta es una pequeña marca.

La norma indica usar 650 gr de cemento y el porcentaje de agua requerido para consistencia normal. En la presente investigación se usó los 650 gr de cemento y en base a este valor se hace las respectivas formulaciones de los aditivos para adicionar. Como es necesario conocer el comportamiento de las lechadas de cemento con el Alófono, se realizó seis pruebas.

**Equipos:**

- Aparato de Vicat; Consistencia Normal, Anexo 3
- Aparato de Vicat; Tiempo de Fraguado, Anexo 4
- Balanza
- Vasos graduados, 200 cm<sup>3</sup> o 250 cm<sup>3</sup>
- Plato plano no absorbente cuadrado 100mm ± 5mm por lado
- Espátula plana
- Anillo Cónico
- Mezclador, tazón y paleta

**Materiales:**

- Cemento
- Alófono
- Desco
- Fumed Silica
- Bentonita Agua

**Procedimiento, Figura 2.18:**

1. Sacar los equipos y materiales a usarse en la práctica.
2. Pesar el cemento y los aditivos, medir el agua en la probeta.
3. Colocar el agua en el tazón, añadir el cemento y los aditivos, dejar 30 segundos para que absorba el agua.
4. Prender la mezcladora y colocar en velocidad baja durante 30 segundos.

5. Detener la mezcladora 15 segundos durante este tiempo empujar hacia la mezcla que se haya adherido a los lados del tazón.
6. Encender la mezcladora a velocidad media durante 60 segundos.
7. Después de los 60 segundos con las manos enguantadas rápidamente amasar la pasta de cemento para formar una bola la cual se lanza 6 veces de una mano a otra.
8. Colocar material antiadherente en el anillo y placa para evitar que la masa se pegue.
9. Insertar la masa presionándola con la palma de la mano por el extremo más ancho del anillo cónico, llenar completamente el anillo con la pasta.
10. Retirar el exceso de pasta del lado más ancho con un solo movimiento de la palma de la mano.
11. Colocar el anillo por su extremo más ancho sobre la placa y cortar el exceso de pasta que sobresale por el extremo menor, en la parte superior del anillo con la ayuda de una espátula.
12. Alisar la superficie con unos pocos toques ligeros del extremo de la espátula.
13. Centrar la pasta confinada en el anillo sobre la placa.
14. Encerar el Aparato de Vicat, consistencia normal.
15. Colocar el anillo sobre la placa bajo la varilla del aparato y ajustarlo justo sobre la superficie del anillo sin tocar la pasta.
16. Soltar la varilla durante 30 segundos, la varilla debe penetrar 10 mm bajo la superficie original de la pasta, para tener una consistencia normal adecuada.

NOTA: Sí el valor es mayor o menor de lo indicado se debe realizar nuevamente la prueba con diferente valor de agua hasta obtener la consistencia normal con el parámetro indicado por la norma.

17. Colocar el anillo con la placa en el gabinete de curado.
18. Enserir el Aparato de Vicat, Tiempo de fraguado.
19. Después de un tiempo determinado sacar el anillo y colocar en el aparato de Vicat y soltar la ajuga. Para determinar el fraguado inicial la ajuga debe penetrar 25mm de la pasta. Si no llega a penetrar lo indicado, debe realizar penetraciones frecuentemente hasta cumplir con el parámetro.
20. Volver a colocar el anillo en el gabinete de curado.
21. Revisar cada 30 minutos, para determinar el fraguado final, el cual se determina cuando la ajuga deje una pequeña marca en la superficie de la pasta.
22. Al tener el tiempo de fraguado inicial y final, desechar la pasta y limpiar el anillo y la placa.
23. Realizar los cálculos necesarios con los datos obtenidos.

## FIGURA 2.18

### *Procedimiento prueba Tiempo de Fraguado*



NOTA: Esta prueba tiene dos procesos que deben realizarse bajo las normas descritas anteriormente. Se realizo en “Laboratorio de la Compañía dedicada a la fabricación de cementos”

**Cálculos:**

$$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100 \quad (2.8)$$

Donde:

C = Consistencia normal (%)

 $m_a$  = Masa de agua (gr) $m_c$  = Masa de material solido (gr)**Lechada Nro 1**

$$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100$$

$$C(\%) = \frac{685,4}{202} * 100$$

$$C(\%) = 29,5 \%$$

**Lechada Nro 2**

$$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100$$

$$C(\%) = \frac{707,4}{208} * 100$$

$$C(\%) = 29,4\%$$

**Lechada Nro 3**

$$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100$$

$$C(\%) = \frac{728,1}{216} * 100$$

$$C(\%) = 29,7\%$$

**Lechada Nro 4**

$$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100$$

$$C(\%) = \frac{685,6}{202} * 100$$

$$C(\%) = 29,5\%$$

**Lechada Nro 5**

$$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100$$

$$C(\%) = \frac{707,6}{210} * 100$$

$$C(\%) = 29,7\%$$

**Lechada Nro**

$$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100$$

$$C(\%) = \frac{728,3}{218} * 100$$

$$C(\%) = 29,9\%$$

**Resultados:****TABLA 2.30***Resultados de Consistencia Normal*

<b>Nro</b>	<b>Cemento (gr)</b>	<b>Alófono (gr)</b>	<b>Bentonita (gr)</b>	<b>Desco (gr)</b>	<b>Fumed Silica (gr)</b>	<b>Total Masa (gr)</b>	<b>Agua (ml)</b>	<b>Consistencia (ml/gr)</b>
1	650	19,5	13	2,5	0,4	685,4	202	29,5
2	650	39	13	5	0,4	707,4	208	29,4
3	650	58,5	13	6,2	0,4	728,1	216	29,7
4	650	19,5	13	2,5	0,6	685,6	202	29,5
5	650	39	13	5	0,6	707,6	210	29,7
6	650	58,5	13	6,2	0,6	728,3	218	29,9

**NOTA:** Esta prueba indica si la consistencia es la adecuada la cual es regida por la norma antes mencionada.

**TABLA 2.31***Resultados de Tiempo de Fraguado*

<b>Lechada Nro</b>	<b>FRAGUADO INICIAL (min)</b>	<b>FRAGUADO FINAL (min)</b>	<b>FRAGUADO FINAL (hr:min)</b>
1	249	421	6:01
2	387	686	11:26
3	386	935	15:35
4	252	428	6:04
5	379	704	11:44
6	450	971	16:11

**NOTA:** El tiempo de fraguado aumenta al aumentar porcentaje de Fumed Silica.



## CAPITULO III

### 3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las lechadas que se diseñó, bajo ciertos parámetros y adicionando aditivos que beneficien a ciertas propiedades, se tomó en cuenta ciertos criterios que son:

- Uso de la bentonita como densificante y le da una consistencia adecuada, se usó en 2% del peso del cemento.
- Fumed Silica, este aditivo se usó para extender el tiempo de fraguado, se trabajó en tres porcentajes 0.03%,0.06% y 0.09% del peso del cemento. Las propiedades de este aditivo se encuentran en el Anexo 5.
- Desco es un lignosulfactante, que se añadió hasta el 1% del peso de cemento, ayudó para dispersar las arcillas y que la lechada sea menos viscosa.
- Alófano tiene cierta similitud a las Puzolanas, que permiten aumentar la resistencia a la compresión usamos desde el 1.5% hasta el 10,5% de la masa del cemento.
- Cemento se usó Cemento Portland Puzolánico TIPO IP, en base a este se determinó el porcentaje de los aditivos.

Se trabajo únicamente con estos aditivos para que no haya mayor afectación en la adición de otros aditivos como para control de filtrado y densificantes. Ya que al adicionar el Alófano sin previo análisis es mejor disminuir las variables de afectación sobre este nuevo aditivo. Así que el estudio realizado se trató de conocer cómo se comportaba el Alófano en presencia de otros aditivos, como afectaría a la química, y si es negativo o positivo para ciertas propiedades principalmente en la Resistencia a la compresión. Se analizará los resultados de cada prueba realizada.

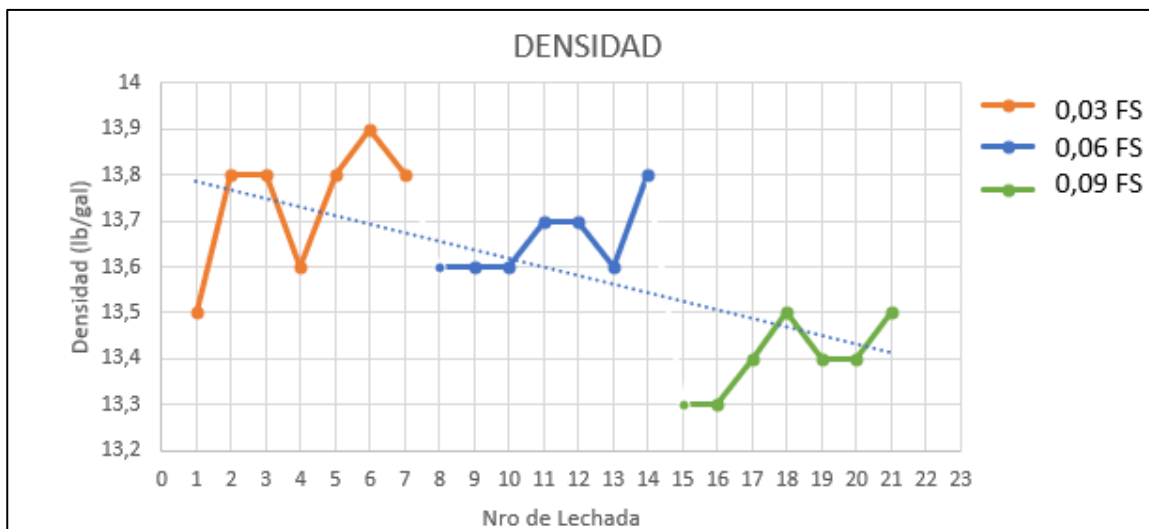
### 3.1.DENSIDAD

Esta fue la primera prueba que se realizó, se diseñó 21 Lechadas de Cemento, de la cuales se tiene un promedio de densidad de 13,6 lb/gal, se puede decir que es lechada tipo Lead porque se encuentra en el rango. Los valores que reflejaron esta prueba van desde 13,3 lb/gal hasta 13,9 lb/gal.

Por tanto, un beneficio con los resultados obtenidos, que no es necesario de un aditivo más pesado para obtener una lechada Tipo Lead. Se reduciría el número de aditivos y eso significa menor inversión.

**FIGURA 3.1**

*Gráfica de Resultados de densidad*



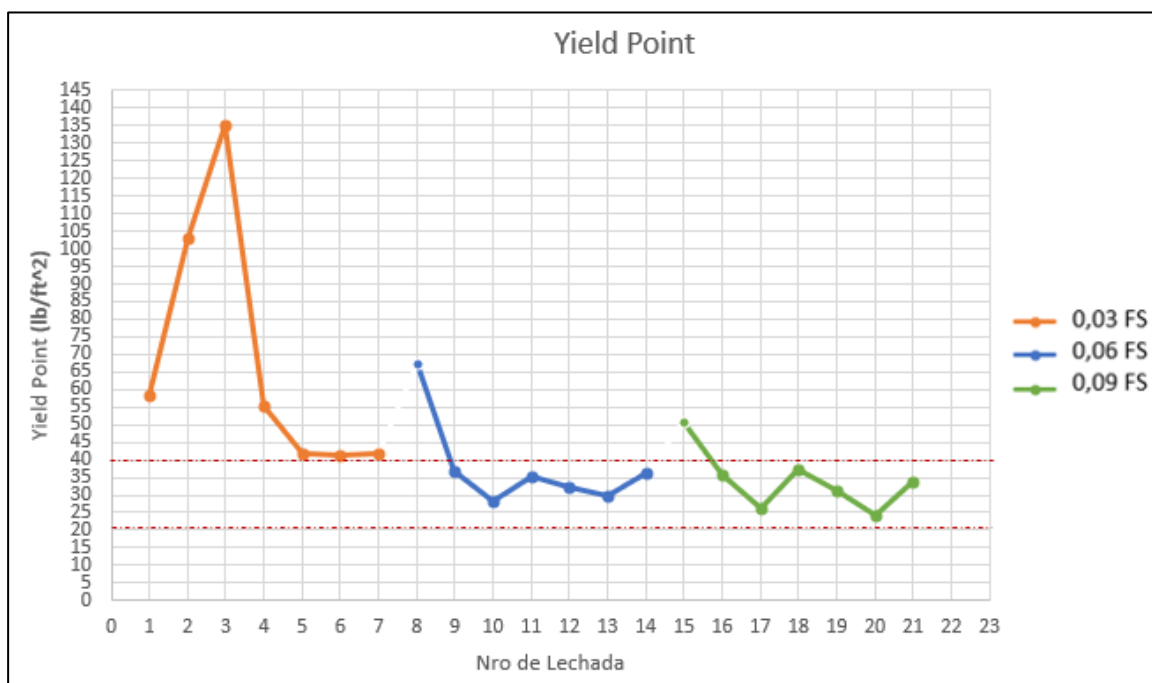
En las siete primeras lechadas se acerca al límite de los valores de las lechadas tipo Lead que es 14 lb/gal, en cambio en las catorce siguientes va disminuyendo el valor de la densidad. Las 21 lechadas se encuentran en el rango de la lechada tipo Lead, como se muestra en Figura 3.1, sin adicionar otros aditivos, pero es importante que sería mejor usar las lechadas que no se encuentren en los límites, como las de 0.06% y 0.09% de Fumed Silica

### 3.2. REOLOGIA Y GELES

Generalmente en el Oriente ecuatoriano se tiene pozos de 9000 a 10000 pies de profundidad, la lechada debe tener la bombeabilidad adecuada para que lleguen a dichas profundidades sin problemas operativos, cada pozo tiene un diseño de cementación diferente, según las formaciones presentes, lo cual el Yield Point se encuentra en un rango de 20 a 40 lb/ft<sup>2</sup>, esta información se confirmó por comparación de algunos reportes de cementación de algunos pozos del Oriente ecuatoriano, pero por confidencialidad de las Empresas Prestadoras de Servicios, solo se tomó como referencia dichos valores sin referenciar los reportes. En base a estos valores se interpretó los resultados durante la presente investigación. Los resultados de las 21 lechadas se presentan en la Figura 3.2.

**FIGURA 3.2**

*Gráfica de resultados de Reología 21 lechadas de cemento*



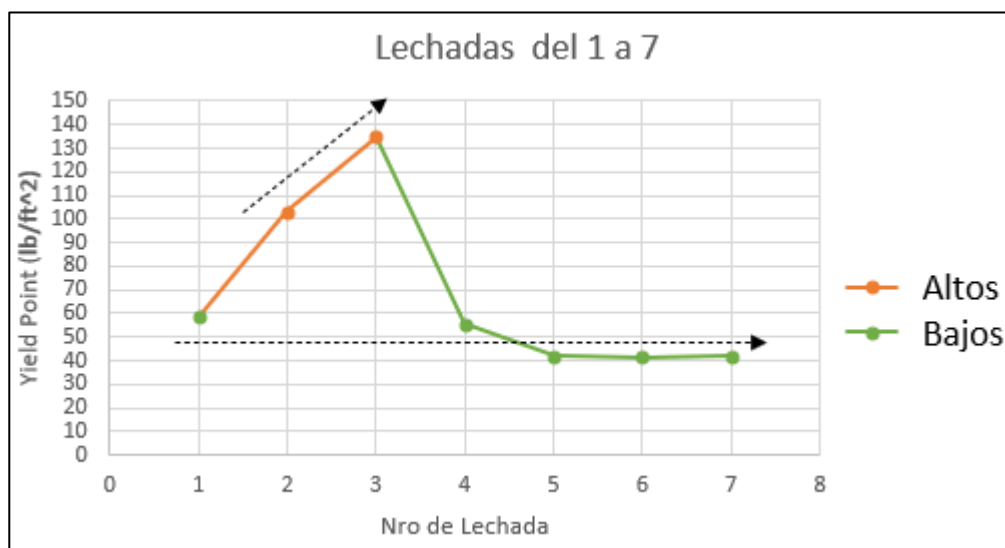
NOTA: Las 21 lechadas, de las cuales 9 se encuentra fuera del rango y 12 dentro del rango (entre líneas rojas).

Al realizar un análisis general de las 21 lechadas se observó que tanto al aumentar el porcentaje de Fumed Silica y de Alófono redujó el Yield Point. Se observó picos altos en las primeras formulaciones de los tres bloques en referencia a la Fumed Silica y valores bajos en los últimos valores del incremento del Alófono a continuación se evalúa por los tres bloques de porcentaje de Fumed Silica.

En las siete primeras se observó dos valores bastante altos que son las lechadas 2 y 3, definitivamente esos diseños son descartados, porque no podrán desplazarse a su objetivo, las lechadas 1, 4,5,6 y 7 varían de 40 a 60 lb/ft<sup>2</sup>, como se observa en la Figura 3.3, estos valores no se encuentran dentro del rango de referencia. Por ende, se estableció que las siete primeras lechadas son descartadas por su falta de bombeabilidad.

**FIGURA 3.3**

*Resultados de Reología de Lechadas 1 a 7*



Las lechadas de cemento 5, 6 y 7 tienen el valor de Yield Point más bajo, pero no es suficiente para que la lechada este en óptimas condiciones para ser desplazada con facilidad, en estas lechadas a diferencia de las restantes se usó 0.03% Fumed Silica de la

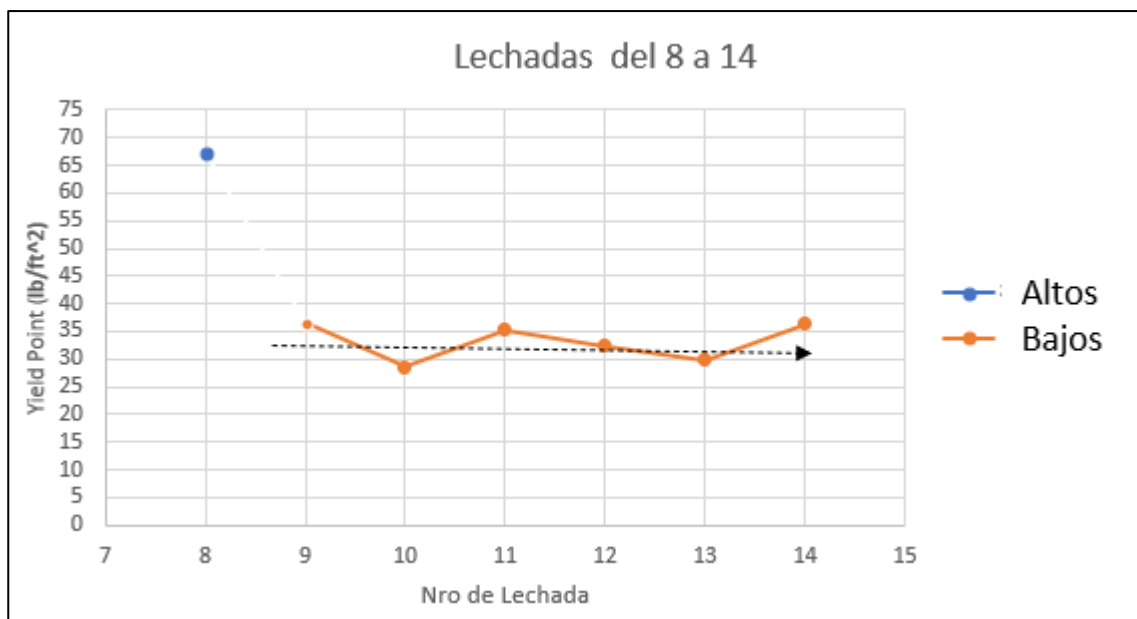
masa de cemento, lo que permite determinar que la Fumed Silica también ayuda en la Reología a parte del tiempo de fraguado.

Por eso se descartó seguir haciendo las pruebas de estas siete lechadas, porque si no es bombeable no tiene una eficiente cementación, Además no se añadió mayor porcentaje de dispersante (Descos), porque lo recomendable es máximo usar hasta en el 1% del peso del cemento.

En las siguientes siete lechadas se observa que el Yield Point tiene valores más bajos, como se muestra en la Figura 3.4 que de las siete primeras lechadas, es este caso se usó 0.06% de Fumed Silica de la masa de cemento, esto determinó totalmente que la Fumed Silica si ayuda a la Reología de las lechadas.

### FIGURA 3.4

*Resultados de Reología de Lechadas de 8 al 14*



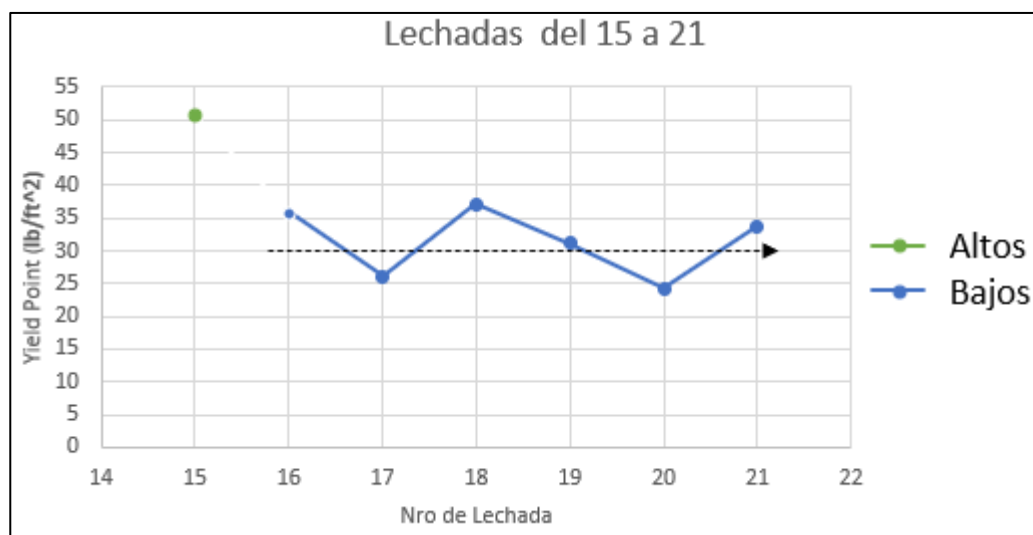
Las lechadas número 10 y 13 tienen menor valor de Yield Point. En estas dos lechadas se trabajó con 4.5% y 9% de Alófono en base a la masa de cemento, entonces se considera

mejor bombeabilidad en comparación a las demás, pero la lechada 9, 11, 12 y 14 también se encuentran dentro del rango, pero son mayores a las de antes así que también da una bombeabilidad aceptable. La lechada número 8 tiene el valor más alto y no se encuentra en el rango de referencia por tanto esta fue descartada, se puede decir que al aumentar el porcentaje de Alófono en conjunto con la Fumed Silica mejoró la Reología.

En las últimas siete lechadas los valores de Yield Point fueron menores, como se muestra en la Figura 3.5 que las anteriores, en este caso se utilizó 0.09% de Fumed Silica de la masa de cemento, se volvió a encontrar en los porcentajes 4.5% y 9% de peso del cemento del Alófono los valores más bajos que son las lechadas 17 y 20. Por tanto, se considera que en estos porcentajes se tiene las mejores condiciones en esta prueba, sin olvidar que las lechadas 16,18,19 y 21 se encuentran en el rango y pueden ser factibles. En la lechada 15 se tiene un valor elevado y no se encuentra en el rango, por eso esta lechada se descarto por no cumplir con el rango referente.

### FIGURA 3.5

*Resultados de Reología de lechada 15 a 21*



Después de analizar los resultados reológicos de las 21 lechadas se concluye que las lechadas 1,2,3,4,5,6,7,8 y 15 deben ser descartadas por su alta viscosidad y baja bombeabilidad, lo cual dará problemas operativos como: no llegar a su objetivo, endurecer antes de lo planificado. Además, en las lechadas restantes las cuales se encuentran dentro del rango de referencia se estableció que con el aumento de porcentaje de Fumed Silica en conjunto con el Alófono se tiene una notable mejoría en los resultados reológicos y se considera que es necesario realizar las demás pruebas en las 11 lechadas para determinar si son las condiciones más aceptables en dichas pruebas.

Además, de las 11 lechadas, cuatro de ellas tuvieron mejores condiciones y en los mismos porcentajes de Alófono que fueron 4.5% y 9%, esto refleja que al unir el Alófono y la Fumed Silica en estos porcentajes se tiene mejores resultados respecto a esta prueba.

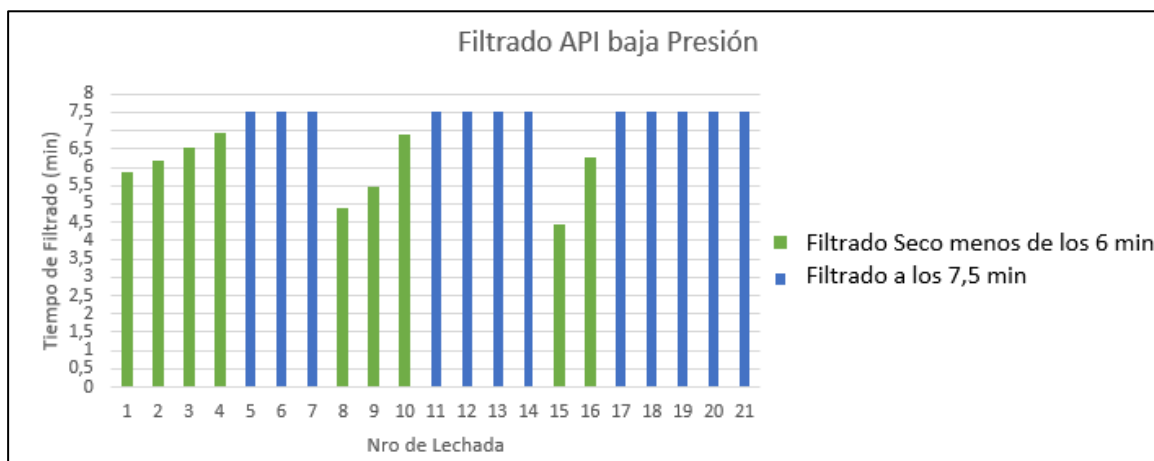
### **3.3.FILTRADO API BAJA PRESIÓN**

En esta prueba los resultados fueron negativos, tomando en cuenta que no se adicione algún aditivo de control de filtrado. Se tuvo un filtrado seco, esto significa que antes de los 30 min establecidos, la lechada perdió totalmente el agua con una alta rapidez dentro de los 10 minutos, como se muestra en la Figura 3.6.

En las primeras siete lechadas, se observa que las 4 primeras lechadas pierden todo su líquido en menos de 6 minutos, en cambio en las lechadas 5,6 y 7 se demora un poco más, en los 7, 5 minutos aún no se queda totalmente seco.

**FIGURA 3.6**

*Resultados del Filtrado API baja presión*



Algo que se puede notar es que al aumentar el porcentaje del Alófono en conjunto con la Fumed Silica existe un aumento del tiempo de filtrado por ende se puede asumir que tanto el Alófono y Fumed Silica brinda un pequeño beneficio en el presente análisis. No se puede determinar que proporciona óptimas condiciones en la prueba de filtrado porque no se llegó con ninguno de los 21 diseños de lechadas a evitar filtrado seco, pero existe diferentes comportamientos al aumentar los porcentajes de Fumed Silica y Alófono.

En las lechadas de 8 a 14, se observa un comportamiento similar a las 7 anteriores, ya que el tiempo de filtrado aun es menor, en las 3 primeras existe filtración seca en menos de los 7 minutos, por consiguiente, las cuatro lechadas siguientes se observó una pequeña mejoría en el tiempo de filtrado y sobre pasa los 7,5 minutos, observando que no quedó totalmente seca aun la lechada. Lo mismo que en las anteriores lechadas se encuentra una mejoría en esta prueba al ir aumentando el porcentaje del Alófono en conjunto con la Fumed Silica.



En las últimas siete lechadas, el comportamiento es similar a las anteriores, existe una mejoría al aumentar el porcentaje de Alófono y Fumed Silica, en este caso las 2 primeras tuvieron filtrado seco menos de los 6 minutos, y las cinco restantes mejoró el tiempo de filtrado decrecientemente, ya que no se quedaban totalmente sin fluido durante los 7,5 min, Entonces se demoró un poco más que las anteriores.

El análisis de las 21 lechadas lleva a concluir que existe una leve mejoría en el aumento del porcentaje del Alófono en conjunto con la Fumed Silica, tomando en cuenta que no cumple para tener condiciones óptimas, pero presenta una mejoría, el comportamiento en esta prueba ya se lo esperaba por no usar un controlador de filtrado.

Además, los resultados de las 21 lechadas, de las siete primeras cuatro de ella tuvieron filtrado seco en menos de los 7,5 minutos, en cambio en las siete lechadas siguientes se tiene las tres primeras lechadas con filtrado seco en menos de los 7,5 min y por último en las 7 lechadas solo las dos primeras tuvieron filtrado seco en menos de los 7,5 min. Entonces al ir aumentando el porcentaje de Fumed Silica y Alófono disminuyeron el número de lechadas con filtrado seco, no se puede determinar exactamente cual de los dos brinda mayor beneficio, pero se puede asumir que en conjunto los dos aditivos representan un beneficio. El cual no se considera óptimo ni representativo.

### **3.4.RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Esta prueba es definitiva para conocer si el Alófono brindó beneficios en la resistencia a la compresión, como se explicó en el anterior capítulo. Se hizo tres blancos únicamente de Alófono y Cemento para conocer cómo afecta en conjunto con el cemento, después se

realizó las lechadas formuladas, en el porcentaje de Alófono que son 3%, 6% y 9% y Fumed Silica de 0.06% y 0.09% que fueron seis pruebas en total. Para conocer cómo afecta en los dos porcentajes de Fumed Silica variando el Alófono en los tres respectivos porcentajes. Solo se realizó estas pruebas por la falta de disposición del laboratorio, lo cual se realizaba por prueba el rompimiento de ocho cubos a cuatro edades, el tiempo era bastante reducido. Tomamos los porcentajes medios para poder hacer una aproximación de los demás.

- **Metodología 1:**

En la primera metodología los resultados cayeron abruptamente, la razón era porque para comparar necesitábamos mantener valores constante del cemento y bentonita como se realizó en las anteriores pruebas, ir variando los porcentaje del Alófono, Fumed Silica y Desco, pero en esta metodología partimos de una masa total constante, en base a esta hacer los porcentajes tanto del cemento y los aditivos, lo cual eran todos valores distintos, como se muestra en la Tabla 3.1, entonces si se disminuía la cantidad de cemento, por obvias razones bajaba la resistencia a la compresión y no se podía realizar una comparación.

**TABLA 3.1**

*Análisis de Resistencia a la Compresión Metodología 1*

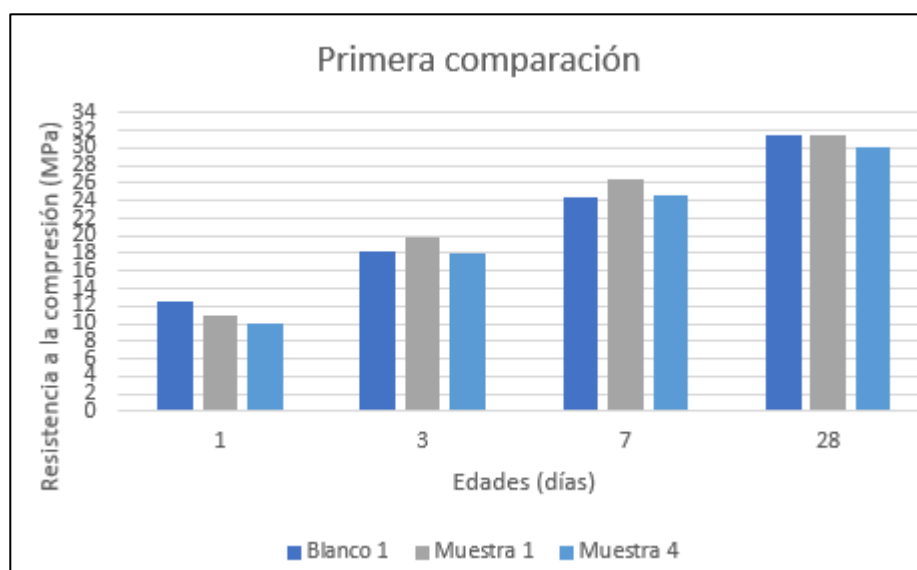
PRUEBAS	Total Masa cemento + aditivos (gr)	EIDADES (MPa)			
		1	3	7	28
Blanco 1	740,1	12,5	18,2	24,5	31,6
Blanco 2	740	11,1	17,2	22,6	31,1
Blanco 3	740	9,5	15,1	20,9	28,5
Muestra 1	740,06	11	19,911	26,4	31,45
Muestra 2	740,01	10,2	20,166	26,55	32,65
Muestra 3	740	9,8	18,447	24,75	31,85
Muestra 4	740,01	9,9	17,992	24,65	30,05
Muestra 5	740,01	6,95	19,3	23,9	30,8
Muestra 6	739,9	6,6	17,35	22,65	29,5

NOTA: La masa total se mantiene constante en alrededor de 740 gr.

De estos datos se realizó la comparación en función a los porcentajes de Alófono que son 3%, 6% y 9%, para conocer como afecto. Entonces se decidió realizar la comparación entre el Blanco 1 (sin Fumed Silica), Muestra 1 (con 0.06% Fumed Silica) y Muestra 4 (con 0.09% de Fumed Silica) en las tres se usó el 3 % de Alófono, como se muestra en la Figura 3.7. En la edad de 1 día se tiene mayor resistencia en el Blanco 1, lo cual se justifica porque es menor la cantidad de Alófono que sustituyó al cemento, en la edad de 3 y 7 días se observó algo diferente que se tiene mayor resistencia en la Muestra 1. Por ende, en estas edades la adición de los aditivos restantes como Fumed Silica, Bentonita y Desco, presentan una mejoría en los resultados. Finalmente, en la edad de 28 días se comporta como en la edad de 1 día el Blanco 1 tiene mayor resistencia, pero los valores de la Muestra 1 y Muestra 4 se acercan mucho a este primer valor, lo que no sucede en las otras edades, que se puede ver que se tiene una diferencia notable.

### FIGURA 3.7

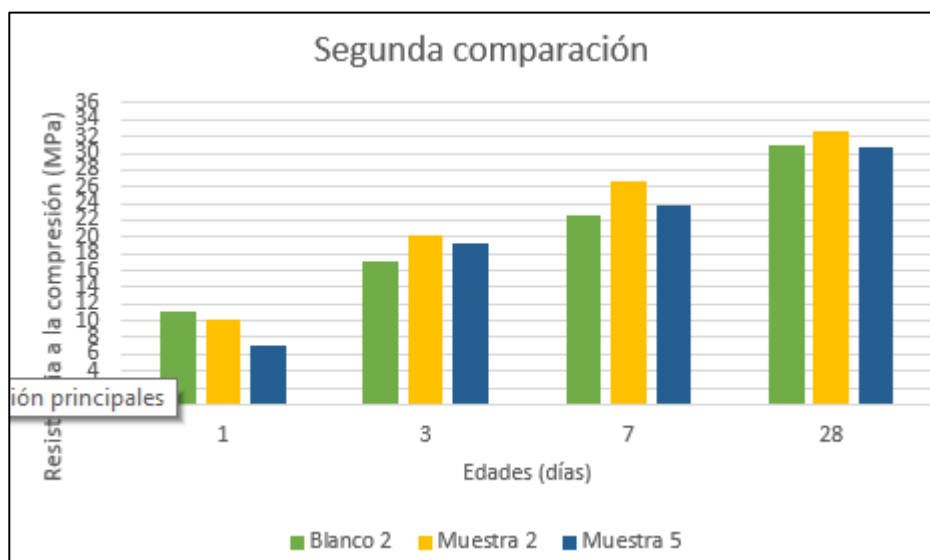
*Comparación entre Blanco 1, Muestra 1 y Muestra 4.*



Se compara Blanco 2 (sin Fumed Silica), Muestra 2 (con 0.06% Fumed Silica) y Muestra 5 (con 0.09% Fumed Silica) las cuales tienen un porcentaje de Alófono de 6%, como se muestra en la Figura 3.8. En la edad a 1 día se tiene un valor mayor en el Blanco 1, es por la cantidad que sustituye de cemento, a comparación del anterior análisis a la edad de 3, 7 y 28 días se observó un valor mayor en la muestra 2, lo cual garantiza que al adicionar los demás aditivos anteriormente mencionados genera un beneficio principalmente en el porcentaje de 0.06% de Fumed Silica.

### FIGURA 3.8

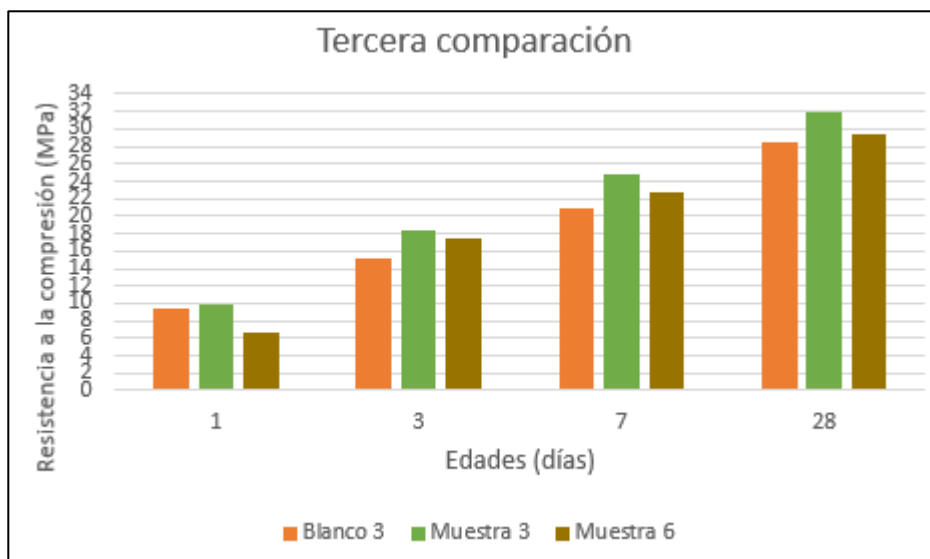
*Comparación entre Blanco 2, Muestra 2 y Muestra 5.*



En el Blanco 3 (sin Fumed Silica), Muestra 3 (con 0.06% de Fumed Silica) y Muestra 6 (0.09% Fumed Silica) las cuales tienen un porcentaje de Alófono de 9%, como se muestra en la Figura 3.9. En las edades 1,3,7 y 28 a comparación de los dos análisis anteriores la Muestra 3 tiene mayor valor de resistencia en las cuatro edades.

**FIGURA 3.9**

*Comparación entre Blanco 3, Muestra 3 y Muestra 6*



En cada análisis de porcentaje de Alófono se obtuvo diferente comportamiento en las diferentes edades si bien es cierto en la industria petrolera la edad representativa es a 1 día se analizó a las otras edades para conocer si brinda beneficio en las diferentes edades.

Es importante resaltar que, de las tres comparaciones analizadas, los valores disminuyeron en los tres rangos de Alófono que dividimos, lo cual justificó que la cantidad de masa de Alófono, Fumed Silica, Bentonita y Desco que reemplazó al cemento para tener una masa contaste final. Determinando que, si se disminuye la cantidad de masa de cemento. Por ende, cae abruptamente los valores de la resistencia a la compresión al aumentar los porcentajes de aditivos.

Por ende, estos resultados no fueron tomados en cuenta para determinar si el Alófono brinda beneficios en la Resistencia a la compresión ya que no se puede comparar y más bien se decide realizar las pruebas mediante la Metodología 2.

Además, para ver una comparación rápida de las resistencias mediante esta metodología se muestra en la Figura 3.10 como en los tres porcentajes de Alófono va disminuyendo la resistencia al aumentar la cantidad de aditivos que sustituyan el cemento, se analizó a la edad de 1 día la cual es nuestro centro de investigación.

En esta Figura 3.10 se separa las muestras y blancos por el porcentaje de Alófono 3%, 6% y 9% y se indica la composición de cada una de ellas, ignorando el porcentaje de bentonita porque el valor es constante para todas las lechadas y el Desco no es tomado en cuenta porque nos ayuda únicamente como dispersante, estamos analizando la resistencia a la compresión en función del Alófono y Fumed Silica.

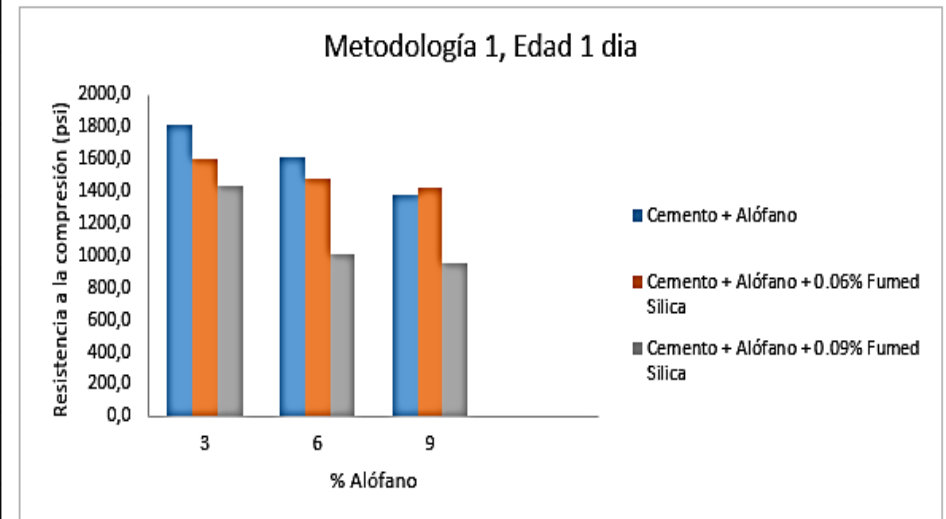
Todos los resultados presentados en el anterior capítulo de la resistencia a la compresión están en unidades de “MPa” como nos proporciona la prueba, pero en la industria petrolera se usa generalmente la unidad de “PSI”, en esta sección de interpretación de datos se usó la unidad “PSI” para familiarizarse con los valores.

Los valores al 3 y 6% de Alófono se comportan de la misma forma, los blancos (cemento y Alófono) tienen un mayor valor de resistencia a la compresión en cambio en el 9% de Alófono se tiene mayor valor en las Muestras con 0.06% de Fumed Silica, lo que si es notable que las muestras con 0.09% de Fumed Silica en los tres porcentajes de Alófono caen los valores de la resistencia a la compresión abruptamente.

**FIGURA 3.10**

*Comparación de las lechadas por Metodología 1: Edad 1 día*

PRUEBAS	Composición	% Alófono	EDAD 1 DÍA (Mpa)	EDAD 1 DÍA (psi)
Blanco 1	Cemento + 3% Alófono	3	12,5	1811,8
Muestra 1	Cemento + 3% Alófono + 0,06%	3	11,0	1595,4
Muestra 4	Cemento + 3% Alófono + 0,09%	3	9,9	1435,9
Blanco 2	Cemento + 6% Alófono	6	11,1	1611,6
Muestra 2	Cemento + 6% Alófono + 0,06%	6	10,2	1479,4
Muestra 5	Cemento + 6% Alófono + 0,09%	6	7,0	1008,0
Blanco 3	Cemento + 9% Alófono	9	9,5	1371,2
Muestra 3	Cemento + 9% Alófono + 0,06%	9	9,8	1421,4
Muestra 6	Cemento + 9% Alófono + 0,09%	9	6,6	957,3



NOTA: Los valores de la resistencia van disminuyendo al aumentar los porcentajes de los aditivos notablemente, se tiene mayor caída en el 0.09% de Fumed Silica

- **Metodología 2:**

En esta metodología igual que la otra se hizo tres blancos y los seis diseños de lechadas. Las formulaciones realizadas en base a la masa del cemento, en este caso se mantuvo el valor de masa del cemento y de la bentonita, adicionando los porcentajes correspondientes a los aditivos como: Alófano, Desco y Fumed Silica.

En esta metodología el total de la suma de cemento y aditivos ya no era fija, como se muestra en la Tabla 3.2. Se podrá realizar una comparación acertada en referencia a las formulaciones diseñadas previamente. Además, se observó un incremento en los resultados de la resistencia a la compresión en referencia a los anteriores en las cuatro edades.

**TABLA 3.2**

*Análisis de Resistencia a la Compresión Metodología 2*

PRUEBAS	Total Masa cemento + aditivos (gr)	EIDADES (M Pa)			
		1	3	7	28
Blanco 1.1	<b>762,20</b>	13,25	22,05	27,00	33,35
Blanco 2.1	<b>784,40</b>	11,55	20,50	24,95	32,38
Blanco 3.1	<b>806,60</b>	11,70	17,63	25,25	31,75
Muestra 1.1	<b>780,24</b>	12,45	20,48	25,55	30,75
Muestra 2.1	<b>805,54</b>	11,75	22,89	28,15	35,64
Muestra 3.1	<b>828,94</b>	11,75	20,07	25,45	35,30
Muestra 4.1	<b>780,47</b>	11,80	19,02	25,90	33,50
Muestra 5.1	<b>805,77</b>	10,85	21,50	26,20	36,15
Muestra 6.1	<b>829,17</b>	10,70	21,60	25,75	35,15

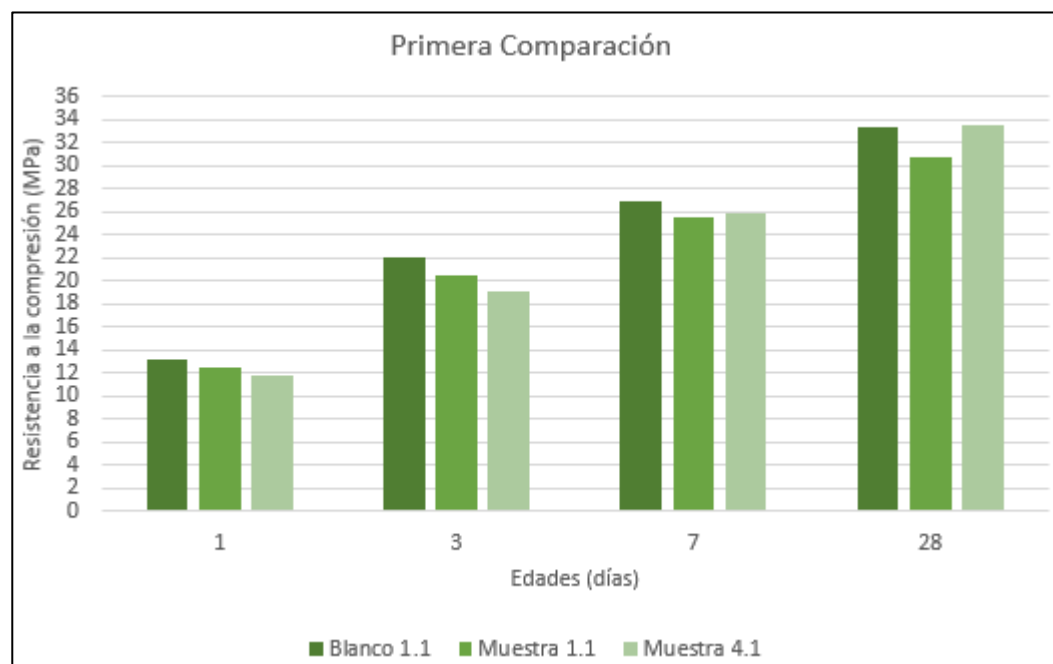
NOTA: La masa total va variando, manteniendo constante el valor de masa del cemento y Bentonita, variado únicamente los valores de Alófano, Desco y Fumed Silica.



Se realizó tres comparaciones en función al porcentaje del Alófono para 3%, 6% y 9%. Se comparó el Blanco 1.1(sin Fumed Silica), Muestra 1.1 (con 0.06% de Fumed Silica) y Muestra 4.1(con 0.09% de Fumed Silica), en estos tres diseños de lechada se trabajó con el 3% de Alófono, como se muestra en la Figura 3.11. Tomando en cuenta que cuando se usó cemento y Alófono al 3% la resistencia a la edad de 1 día fue 13.25 MPa, este valor fue mayor a los valores de las lechadas con el aumento de Fumed Silica, al 0.06% de Fumed Silica se obtuvo 12.45 MPa y al 0.09% de Fumed Silica se tuvo 11.80 MPa. Por tanto, al 3% de Alófono la resistencia va disminuyendo al adicionar los aditivos el porcentaje de la Fumed Silica y por ende Bentonita y Desco.

### FIGURA 3.11

*Comparación entre Blanco 1.1, Muestra 1.1 y Muestra 4.1*



En la primera comparación a la edad de 1, 3 y 7 días, los valores más altos son de Blanco 1.1 y van bajando, en la edad de 7 días existe una peculiaridad el valor siguiente es la

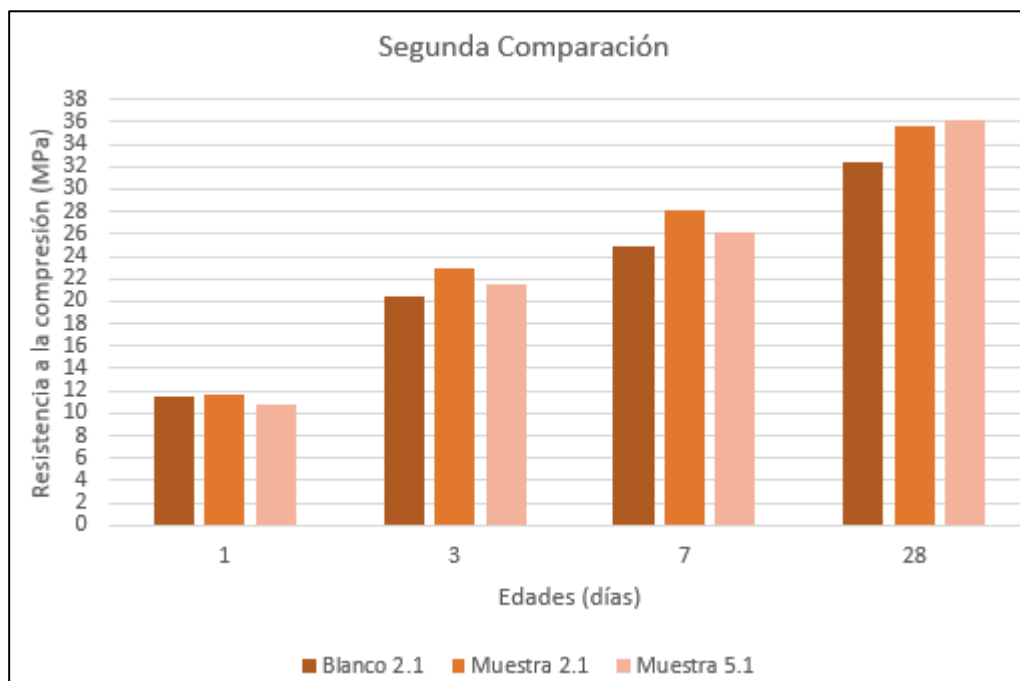
muestra 4.1 y después la muestra 1.1, a la edad de 28 días la muestra 4.1 tiene el valor más alto de la Resistencia a la compresión, en la presente investigación la edad a 1 día es la más importante a evaluar en esta comparación nos indicó que Blanco 1.1 tienen mejor valor, pero al adicionar Fumed Silica, Desco y Bentonita existe una pequeña caída en los valores, por eso estas lechadas al 3% de Alófono no pueden ser usadas, ya que no se puede usar solo cemento y agua no cumpliría con otras propiedades necesarias.

Si comparamos el Blanco 2.1(sin Fumed Silica), Muestra 2.1(con 0.06% de Fumed Silica) y Muestra 5.1(con 0.09% de Fumed Silica) que se usó el 6% de Alófono, como se muestra en la Figura 3.12, se observa en la edad de 1 día el Blanco 2.1 tiene un valor promedio de 11.55 MPa mientras que la Muestra 2.1 que tiene 6% de Alófono y 0.06% de Fumed Silica tiene 11.75 MPa, se observa un pequeño incremento en el resultado y finalmente en la Muestra 5.1 que tiene 6% de Alófono y 0.09% de Fumed Silica cae el valor de la resistencia a la compresión a 10.85 MPa. Entonces ha disminuido el valor de la resistencia a la compresión en referencia de la comparación anterior, se tiene el mejor resultado en la lechada con 6% de Alófono, 0.06% de Fumed Silica y los otros aditivos.

Los resultados a 1, 3 y 7 días se tiene los valores más altos en la Muestra 2.1. Además, los valores siguientes en estas edades no son iguales, en la edad de 1 día sigue el Blanco 1.1, mientras que a la edad de 3 y 7 le sigue los valores de la Muestra 5.1. Finalmente, a la edad de 28 días el valor más alto tiene la Muestra 5.1, va descendiendo los valores Muestra 2.1 y al último Blanco 2.1.

**FIGURA 3.12**

*Comparación entre Blanco 2.1, Muestra 2.1 y Muestra 5.1*



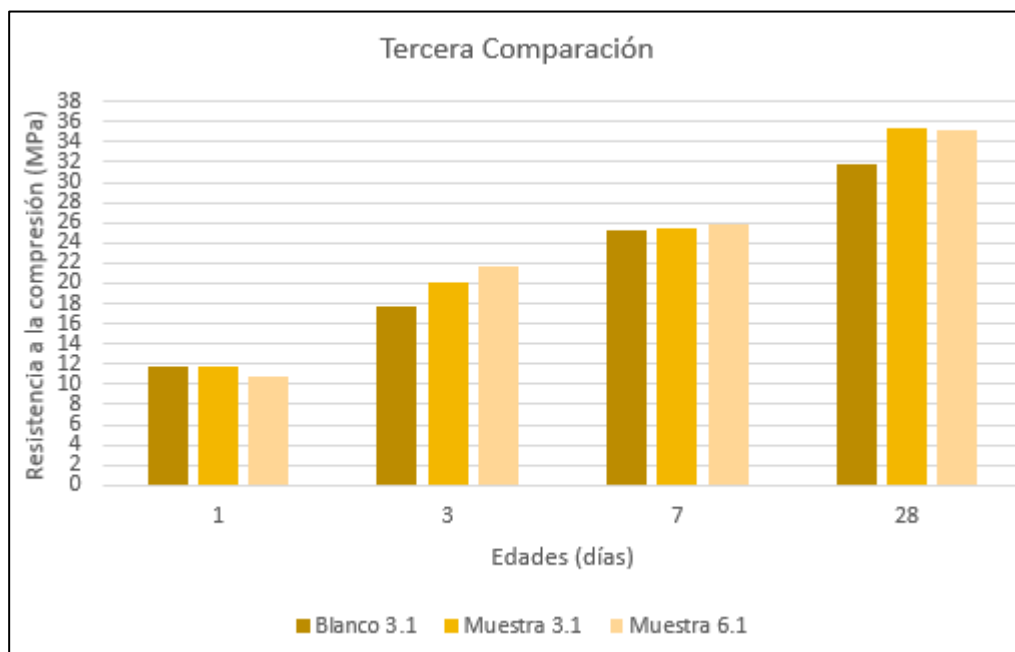
En cada comparación se observa diferentes comportamientos a las diferentes edades, es importante resaltar que a la edad que debe ser analizada minuciosamente es a 1 día, así que a las demás edades presenta comportamientos diferentes, son por el tiempo y cómo se comporta químicamente los diferentes aditivos en ciertos porcentajes durante las edades mencionadas.

Las pruebas que se realizó al Blanco 3.1 (sin Fumed Silica), Muestra 3.1 (con 0.06% de Fumed Silica) y Muestra 3.6 (con 0.09% de Fumed Silica) que tienen 9% de Alófono, como se muestra en la Figura 3.13, ocurrió algo similar de la anterior comparación, fue disminuyendo los valores pero se mantiene que el mayor valor de resistencia a la compresión es la lechada de 9% de Alófono, 0.06% de Fumed Silica con un valor 11.75 MPa, el Blanco 3.1 tiene un valor de 11.70 MPa, la Muestra 6.1 tiene un valor de 10.70

MPa, estos valores son a 1 día. Estos resultados inciden con la comparación anterior de la mejor lechada.

### FIGURA 3.13

*Comparación entre Blanco 3.1, Muestra 3.1 y Muestra 6.1*



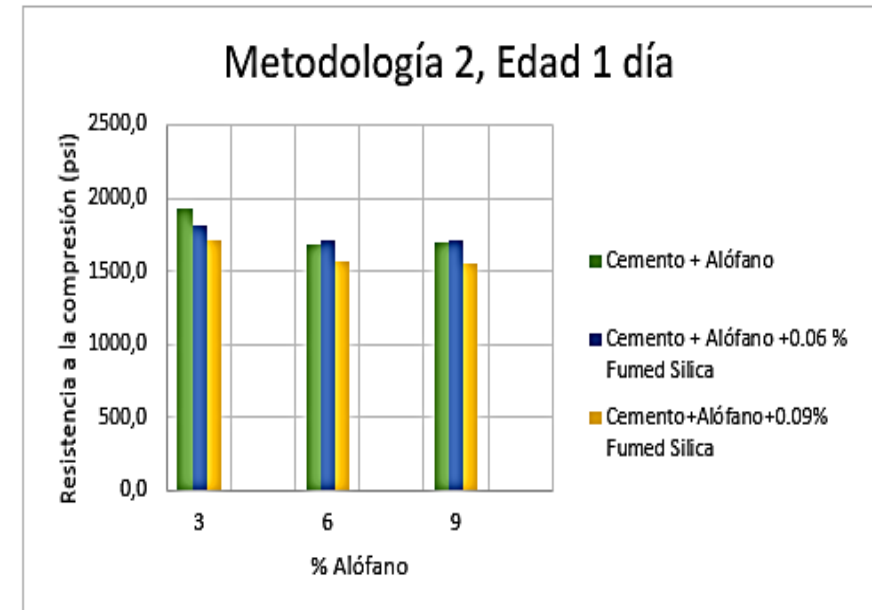
En la presente comparación en las 4 edades existen comportamientos diferentes, a 1 y 28 días se tiene el valor más alto en la resistencia a la compresión en la Muestra 3.1, mientras que a las edades de 3 y 7 días se tiene el mayor valor en la Muestra 6.1 y va descendiendo, Muestra 3.1 y al último Blanco 3.1

Se observa que al añadir el porcentaje de Fumed Silica la resistencia cae notablemente por lo cual se establece que los mejores diseños se obtuvieron al 0.06% de Fumed Silica en el 6% y 9% de Alófono, y también se observa un valor alto en el Blanco 1.1 que lleva cemento y 3% de Alófono, pero en este caso al añadir los demás aditivos fueron disminuyendo los valores de la resistencia. Se puede observar en la Figura 3.14 como varían las comparaciones anteriormente descritas.

**FIGURA 3.14**

*Comparación de las lechadas por Metodología 2: Edad 1 día*

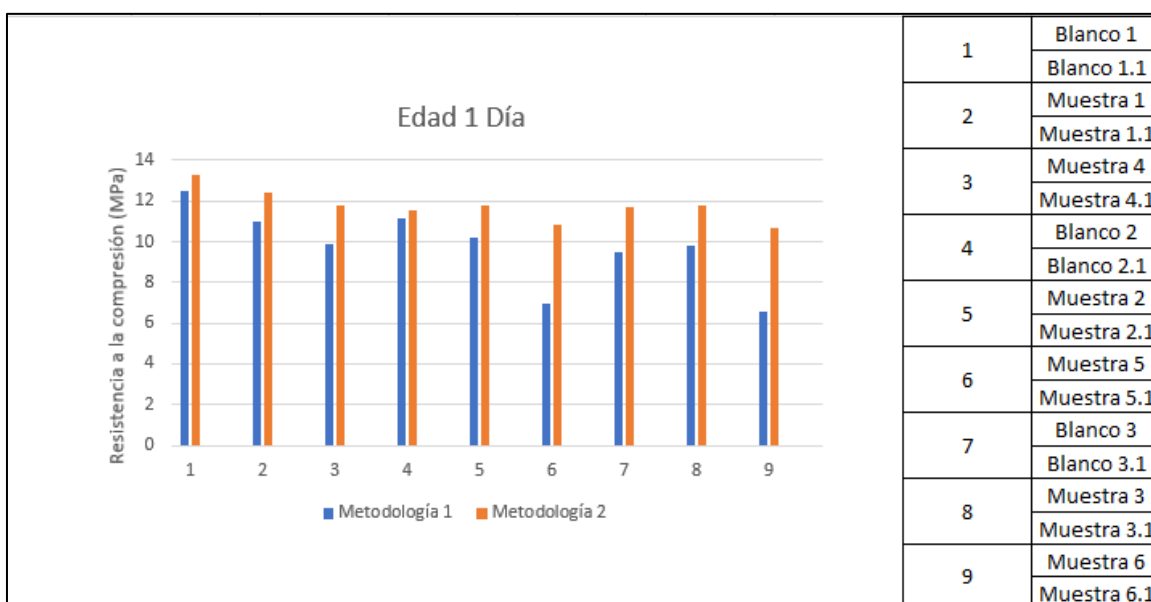
PRUEBAS	Composición	% Alófono	EDAD 1 DÍA (Mpa)	EDAD 1 DÍA (psi)
Blanco 1.1	Cemento + 3% Alófono	3	13,25	1922,3
Muestra 1.1	Cemento + 3% Alófono + 0,06% Fumed Silica	3	12,45	1805,7
Muestra 4.1	Cemento + 3% Alófono + 0,09% Fumed Silica	3	11,80	1711,4
Blanco 2.1	Cemento + 6% Alófono	6	11,55	1675,2
Muestra 2.1	Cemento + 6% Alófono + 0,06% Fumed Silica	6	11,75	1704,2
Muestra 5.1	Cemento + 6% Alófono + 0,09% Fumed Silica	6	10,85	1573,7
Blanco 3.1	Cemento + 9% Alófono	9	11,70	1696,9
Muestra 3.1	Cemento + 9% Alófono + 0,06% Fumed Silica	9	11,75	1704,2
Muestra 6.1	Cemento + 9% Alófono + 0,09% Fumed Silica	9	10,70	1551,9



Los valores si bien es cierto aumentaron con la metodología 2 notablemente, pero se observa que al aumentar los aditivos y el porcentaje del Fumed Silica la resistencia a la compresión disminuye, se muestra en la Figura 3.15 únicamente a la edad de 1 día, para evidenciar la caída de la resistencia a la compresión usando las dos metodologías.

**FIGURA 3.15**

*Comparación de Metodologías*



NOTA: en el eje “x” tenemos nueve números que se describe en la tabla ubicada en la derecha, el 1, 2 y 3 son de 0.03% de Alófono, 5, 6 y 7 son de 0.06% y las tres últimas son al 0.09% de Alófono. Las 1,4 y 7 solo es cemento y Alófono, 2,5 y 8 con 0.06% Fumed Silica y 3, 6 y 9 con 0.09% de Fumed Silica, estos últimos llevan los demás aditivos.

Si se compara las tres concentraciones de 3%, 6% y 9% de Alofano. Se concluye que al 3% de Alófono se tiene un mayor valor de resistencia a la compresión. Se analiza únicamente los valores a 1 día de edad, ya que las operaciones de cementación son máximos dentro de 24hr, para seguir cementando la siguiente sección. Es importante

resaltar que se realizó la prueba de la Resistencia a la compresión al Cemento solo y dio como valor a 1 día de 13 MPa, 3 días de 21,3 MPa, 7 días de 26,3 MPa y 28 días de 33,6. Esta información se obtuvo en el "Laboratorio de la Empresa dedicada a la fabricación de cementos"

Analizando las tres comparaciones, se nota que el incremento de la Fumed Silica genera un efecto negativo a la resistencia a la compresión, en el 0.06% de Fumed Silica se observa una mejoría. Pero en la variación de Alófono al 3%, 6% y 9%, fue disminuyendo las resistencias. Al comparar los valores obtenidos de la presente investigación con la adición de Alófono, Bentonita, Desco y Fumed Silica con la resistencia a la compresión del cemento solo, pues disminuye los valores con la adición de los aditivos. Por ende, el aumento del Alófono no aumento las resistencias a la compresión.

### **3.5. TIEMPO DE FRAGUADO**

En esta prueba se determinó que la Fumed Silica en conjunto con el Alófono, permite extender el tiempo de fraguado. La lechada Nro 1 y 4 se usó 3% Alófono para 0.06% y 0.09% de Alófono respectivamente. Lechada Nro 2 y 5 se trabajó con 6% de Alófono para 0.06% y 0.09% de Fumed Silica y finalmente la Lechada Nro 3 y 6 se tuvo 9% de Alófono para 0.06% y 0.09% de Fumed Silica como se indica en la Tabla 3.3.

Con esto es determinante que al aumentar el porcentaje de Alófono existe mayor tiempo de fraguado y del mismo modo en los valores de 0.06% y 0.09 % de Fumed Silica existe una mejoría en el tiempo de fraguado.

**TABLA 3.3***Tiempo de Fraguado inicial y final*

<b>Lechada Nro</b>	<b>FRAGUADO INICIAL (hr:min)</b>	<b>FRAGUADO FINAL (hr:min)</b>
1	4:09	6:01
2	6:27	11:26
3	6:26	15:35
4	4:12	6:04
5	6:19	11:44
6	7:30	16:11

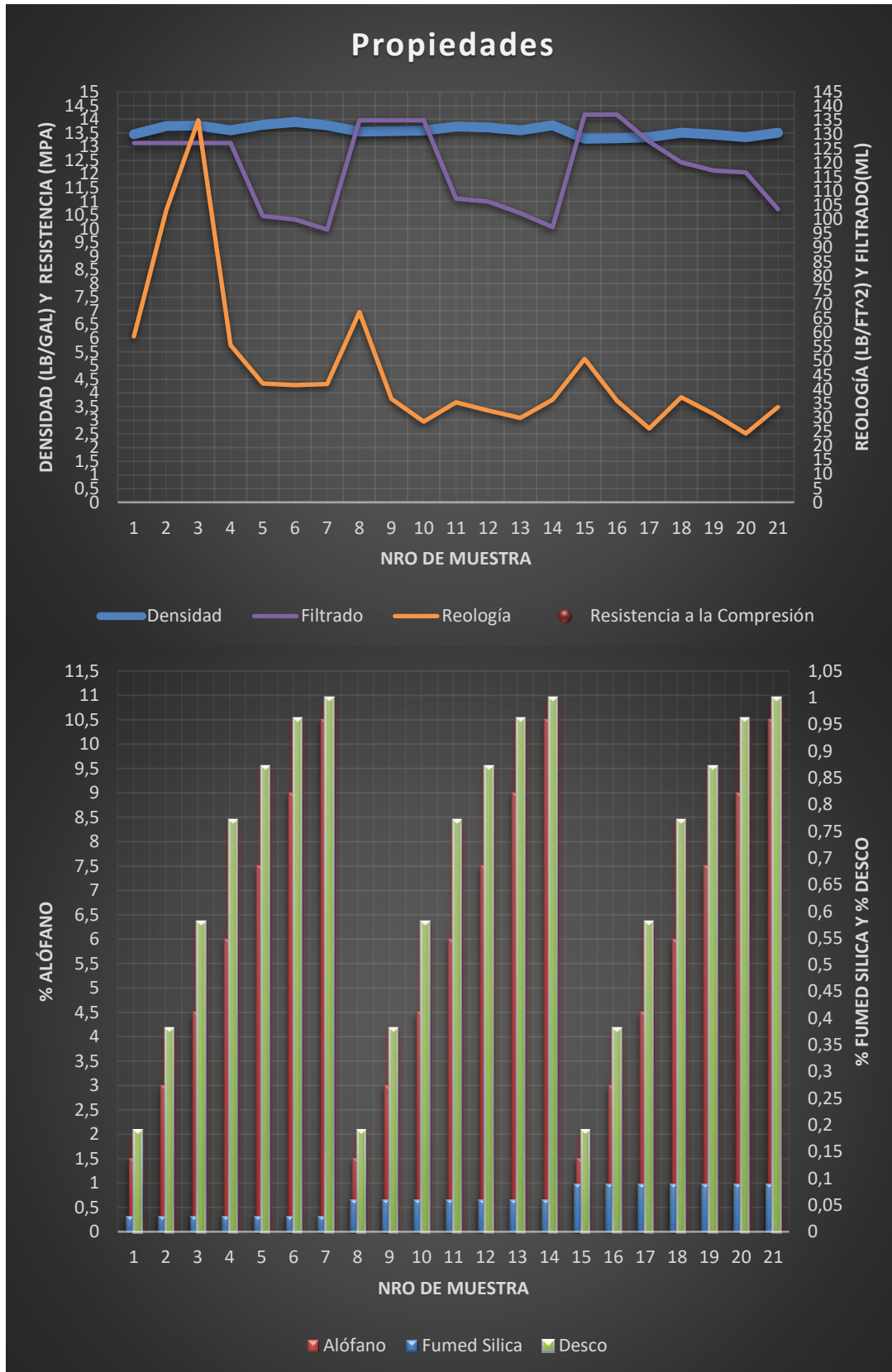
Es importante relacionar todas las pruebas anteriormente mencionadas para tener más claro la afectación de cada aditivo como se muestra en la Figura 3.16 de las 21 muestras se trabajan en un rango de siete porcentajes tanto el Alófono y Desco, y en tres de Fumed Silica.

Al analizar en conjunto las propiedades de las 21 lechadas de cemento, se establece que las siete primeras lechadas deben ser descartadas, por encontrarse en los límites de la densidad de lechada Lead, mayor número de filtrado seco, valores elevados en el Yield Point fuera de los rangos de referencia, estas tenían 0.03% de Fumed Silica y los porcentajes de Alófono de 1.5 a 10.5%. Las 14 restantes 0.06% y 0.09% de Fumed Silica la primera de cada una obligatoriamente debía ser descartada por sus valores altos de Yield Point, los valores restantes de las lechadas se encontraban dentro del rango, pero cuatro de ellas tenían los valores más bajos en 4.5% y 9% de Alófono tanto en 0.06% y 0.09% de Fumed Silica que proporcionaban mejor beneficio en la prueba de reología, en cambio en la prueba resistencia a la compresión se tuvo los mejores resultados al 6% y 9% de Alófono al 0.06% de Fumed Silica. Lo cual tienen relación entre las pruebas realizadas.



**FIGURA 3.16**

*Relación de las propiedades evaluadas*



**TABLA 3.4***Datos de las Propiedades y concentraciones*

Muestra	% Fumed Silica	% Alófono	% Desco	Densidad (lb /gal)	Filtrado (ml)	YP (lb/ft <sup>2</sup> )	Resistencia (Mpa)
1	0,03	1,5	0,19	13,5	127	58,6	
2	0,03	3	0,38	13,8	127	103,2	
3	0,03	4,5	0,58	13,8	127	135	
4	0,03	6	0,77	13,6	127	55,5	
5	0,03	7,5	0,87	13,8	101,2	42	
6	0,03	9	0,96	13,9	99,9	41,4	
7	0,03	10,5	1	13,8	96,4	41,8	
8	0,06	1,5	0,19	13,6	135	67,2	
9	0,06	3	0,38	13,6	135	36,6	12,45
10	0,06	4,5	0,58	13,6	135	28,5	
11	0,06	6	0,77	13,7	107,3	35,3	11,75
12	0,06	7,5	0,87	13,7	106,3	32,4	
13	0,06	9	0,96	13,6	102,2	29,8	11,75
14	0,06	10,5	1	13,8	97,2	36,3	
15	0,09	1,5	0,19	13,3	137	50,7	
16	0,09	3	0,38	13,3	137	35,9	11,8
17	0,09	4,5	0,58	13,4	127,4	26,1	
18	0,09	6	0,77	13,5	120,1	37,1	10,85
19	0,09	7,5	0,87	13,4	117,2	31,2	
20	0,09	9	0,96	13,4	116,6	24,3	10,7
21	0,09	10,5	1	13,5	103,6	33,7	

NOTA: Los porcentajes de Alófono, Fumed Silica y Desco están en función de la masa del cemento. Las 14 lechadas finales tienen los mejores resultados.

Ahora bien, la densidad se observa que tiene un decremento mínimo en cada rango de Fumed Silica. Al aumentar el porcentaje de Fumed Silica la densidad disminuye.

El filtrado no tuvo resultados aceptables, con la adición de Alófono y Desco, entre mayor porcentaje de Fumed Silica existe menos lechadas que tuvieron filtrado seco en menos de 7,5 minutos.

El Yield Point ayuda a reconocer que lechadas nos proporcionarían mejor bombeabilidad. Se tiene un comportamiento algo parecido en los tres rangos de la Fumed Silica. Se tiene en cada uno un pico bastante pronunciado con los demás, y después otros picos menos pronunciados al realizar una relación con la resistencia a la compresión observamos que existen valores acertados para la resistencia en conjunto con la reología se tienen picos altos y bajos que van en un rango parecido.

Se considera que la adición de otros aditivos afectó al Alófono como se indicó anteriormente ya que los blancos establecidos de cemento y Alófono tenían mayor resistencia pero su reología no fue analizada así que no se podría asumir que sería mejor trabajar de esta manera, más bien en las lechadas formuladas se tienen valores acertados y que se correlacionan en las propiedades. Si bien es cierto el Alófono no produjo un incremento en la resistencia a la compresión en conjunto con los otros aditivos pero se tuvieron resultados que podrían ser útiles en la vida real. Ya que los valores obtenidos de resistencia varían entre 10 a 13 MPa o en unidades utilizadas en la industria petrolera 1500 a 1900 psi, que podría resistir en zonas superficiales e intermedias alrededor de 6000 ft de profundidad, pero sigue siendo menor que la resistencia a la compresión del cemento solo.

La densidad nos ayudaría para tener lechada tipo Lead, Reología no se obtiene tan bajo valor de Yield Point pero se puede trabajar con dichos valores. El filtrado si bien es cierto tiene una leve mejoría con la adición de aditivos, no es un rango operable más bien se debería usar un controlador de filtrado para mejorar esta propiedad. Por tanto, el Alófono no aumenta la resistencia a la compresión de lechadas de cemento en conjunto con los aditivos, se podría trabajar, pero no cumple con el objetivo de la investigación.

Esto puede ser por varios factores entre ellos fue de donde se obtuvo la muestra y el acompañamiento de arcilla, la cual atrae varios conflictos operativos. Si la arcilla se podría separar del Alófono seguramente se tendrá resultados bastante efectivos a favor de la resistencia a la compresión, lo cual se pudo confirmar con la prueba de Índice de Actividad Puzolánica que el Alófono de  $74\mu\text{m}$  (M-200) tuvo mayor valor, por eso se afirma que entre más fino el Alófono a su vez separado de la arcilla podrá brindar mejores propiedades.

Lo cual podría ser para futuras investigaciones. Empezar separando la arcilla del Alófono y trabajar únicamente con el Alófono y este procesarlo hasta obtener una partícula tan fina como la del cemento, este procedimiento es bastante complejo.

## CAPITULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1.CONCLUSIONES:

- Los diseños de las lechadas deben cumplir con los parámetros establecidos como; 2% bentonita, Alófono hasta el 12%, Desco hasta el 1% para que no afecte a las propiedades y la Fumed Silica trabajar en bajos porcentajes por su impacto negativo en la propiedad de resistencia a la compresión.
- Después de los resultados de la prueba de densidad se establece que el diseño que se realizó para las 21 lechadas pertenece a las lechadas tipo Lead, ya que se encuentran en los valores predeterminados con un valor promedio de 13 ,6 lb/gal, no es necesario aumentar un densificante de mayor peso.
- En la prueba de reología se concluye que las siete primeras lechadas que son del 0.03% de Fumed Silica que se diferencia de las demás, deben ser descartadas por su elevado valor de viscosidad, ya que si es bombeada no podrá llegar a su objetivo.
- Las lechadas del 0.06% y 0.09% de Fumed Silica y la variación del porcentaje de Alófono que son en total 14, se concluyó que los mejores resultados son en el porcentaje de 4,5% y 9% de Alófono tanto en 0.06% y 0.09% de Fumed Silica, tomando en cuenta que los demás valores no eran elevados y podían ser considerados.
- Con la ayuda de la prueba de filtrado se concluye que la adición del Alófono si afecta a esta prueba porque se observa una leve mejoría en el tiempo de filtrado, al aumentar el porcentaje de Alófono, este no es eficiente como un controlador de filtrado.

- Según el análisis de Difracción de Rayos X y el ajuste en el programa TOPAS se observa un porcentaje de Caolinita y Vermiculita los cuales superan 36%, el cual muestra que el aditivo Alófano tiene comportamiento arcilloso, por lo que su aislamiento induciría en la mejora de la resistencia a la compresión. Además la de mayor impacto negativo es la Caolinita que capta con facilidad el agua y por eso se vuelve complicado tener partículas más finas.
- Las siete primeras lechadas, en la mayoría de las pruebas arrojaban resultados no aceptables ni beneficiosos, estas fueron descartadas. Al contrario de las 14 siguientes que en su mayoría cumplían o se encontraban dentro de los rangos de referencia de las pruebas de laboratorio empleadas.
- Se estableció un diseño de lechadas, de tal manera que se pueda tener mayor amplitud de investigación sobre el Alófano variando en menos porcentajes los demás aditivos como la Fumed Silica.
- En la prueba de la resistencia a la compresión se observó que, al mezclar únicamente cemento, Alófano y agua, los valores eran mayores, pero a su vez esta mezcla no podía ser eficiente para las otras propiedades.
- Los resultados de la prueba de resistencia a la compresión con Alófano, varían de 1500 psi hasta 1900 psi, este valor puede ser eficiente en la sección superficial e intermedia que se llega a unos 6000 ft, tomando en cuenta que cada pozo tiene un programa de cementación con ciertas condiciones y no para todos los pozos puede ser eficiente además estos valores pueden ajustarse a la lechada tipo Lead.

- La prueba de resistencia a la compresión se hizo mediante dos metodologías de las cuales la segunda fue la adecuada y mantuvo los diseños de lechadas previamente establecidos.
- El Alófono en conjunto con la Fumed Silica brindo una leve mejoría a las pruebas de filtrado, esto se evidencio al aumentar los porcentajes de dichos aditivos y se observó menos lechadas con filtrado seco, tomando en cuenta que esta pequeña mejoría no se encuentra en rango operables.
- La Fumed Silica absolutamente mejoró el tiempo de fraguado, lo cual se comprueba con las pruebas realizadas, no se pudo variar entre más porcentajes para no aumentar las variables respecto al Alófono
- La prueba de Índice de actividad puzolánica realizada al Alófono dio como resultado que entre más fino sea, mayor beneficio brinda a la propiedad de resistencia. Por tanto, si el Alófono fuera tan fino como el cemento podría mejorar la resistencia a la compresión, se tuvo mayor resistencia en el Alófono de 74 $\mu$ m(M-200) que en el Alófono de 149  $\mu$ m (M-100).
- La resistencia a la compresión de la Muestra 1.1 que tiene 3% de Alófono, 0.06% de Fumed Silica y demás aditivos tuvo como resultado 1805.7 psi, al comparar con la Muestra 2.1 que tiene 6% de Alófono, 0.06% de Fumed Silica y demás aditivos tuvo como resultado 1704.2 psi y con la Muestra 3.1 que tiene 9% de Alófono, 0.06% de Fumed Silica y demás aditivos tuvo como resultado 1704.2 psi, las tres se encuentran dentro del rango pero la mejor lechada de cemento en esta prueba es la Muestra 1.1. Además que al aumentar el porcentaje de Alófono en 6 % y 9% con el mismo porcentaje de Fumed Silica se tiene el mismo valor.

- La resistencia a la compresión de la Muestra 4.1 que tiene 3% de Alófono, 0.09% de Fumed Silica y demás aditivos tuvo como resultado 1711.4 psi, al comparar con la Muestra 5.1 que tiene 6% de Alófono, 0.09% de Fumed Silica y demás aditivos tuvo como resultado 1573.7 psi y con la Muestra 6.1 que tiene 9% de Alófono, 0.09% de Fumed Silica y demás aditivos tuvo como resultado 1551.9 psi, las tres se encuentran dentro del rango pero la mejor lechada de cemento en esta prueba es la Muestra 4.1, no se observa mejoría al aumentar el porcentaje de Alófono más bien disminuye.
- El mejor resultado de resistencia a la compresión de las lechadas con Alófono fue la Muestra 1.1 con 1805.7psi la cual se comparó con la resistencia a la compresión del cemento solo que es 1885.49 psi, se determina que se encuentra dentro del rango, pero aun así es menor que la del cemento y por eso el Alófono no brinda beneficios en la resistencia a la compresión.



## 4.2.RECOMENDACIONES

- Verificar que los equipos a utilizarse estén en óptimas condiciones y calibrados.
- El Alófono después de ser muestreado debe permanecer en una zona seca y limpia que no pueda captar humedad, cambiando sus propiedades.
- La Fumed Silica tiene una ligera textura que dificulta mezclar en su estado original, por lo cual se recomienda adicionar en solución y en bajo porcentaje.
- Se recomienda adicionar los aditivos de la siguiente manera Agua, solución de Fumed Silica, Bentonita, Alófono y finalmente el Desco, este orden permitirá tener una lechada óptima.
- Se recomienda buscar la manera de volver más fino el Alófono y realizar las mismas pruebas a ver si mejora la resistencia la compresión.
- Es importante realizar un estudio de las arcillas presentes en el Alófono y buscar la manera de separarlas del mismo.
- Usar aditivo antiadherente en los moldes de los cubos para evitar que se peguen en las paredes y existan pequeñas fisuras y alteren los resultados de la resistencia a la compresión.
- Se recomienda utilizar la Metodología 2 para futuras pruebas de la resistencia a la compresión.
- Realizar varios diseños de lechadas para poder descartar las inadecuadas y trabajar con las más óptimas.
- Realizar un estudio en lechadas tipo Tail adicionando un densificantes como la Barita, en conjunto de los aditivos que se trabajó en esta investigación, para conocer cómo cambian las propiedades.

- Si se logra tener el grano más fino de Alófono se recomienda utilizar el equipo de consistómetro para simular las condiciones de reservorio al momento de realizar las pruebas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Petroleum Institute. (2011). *API 10A*.
- American Petroleum Institute. (2013). *API 10B-2*.
- ASTM C109. (2006). *Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de morteros de Cemento Hidráulico*.
- ASTM C 465. (2010). *Especificación estándar para el procesamiento de adiciones para uso de fabricación de Cementos Hidráulicos*.
- ASTM C 566-97. (2017). *Método de Ensayo Normalizado para Determinar el Contenido de Humedad Total Evaporable de los Áridos por Secado*.
- Baroid. (2000). *Manual de Fluidos, Sección 17*. Houston.
- Betancourt, A. (2015). *Reología de las Lechadas de Cemento*.
- Chávez, O. (2017). *Completación de Pozos*. Quito.
- Cruz, F. (2017). *Cementación de Tuberías de Revestimiento riserless con Aplicación de Técnica inner string en Proyectos de Aguas Profundas*. México.
- Ding, T. (2017). *Alibaba*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/oil-well-drilling-equipment-casing-float-collar-and-float-shoe-60299764235.html>

- Escuela Politecnica Nacional. (2019). *Guía de Prácticas de Fluidos de Perforación*. Quito.
- Escuela Politecnica Nacional. (2019). *Manual de Equipo-Laboratorio de Fluidos de Perforación*. Quito.
- González, M. (2014). *Estudio para el Mejoramiento de la Adherencia del Cemento en los Liner de 7" en Pozos Direccionales Tipo J y S*. Quito.
- Hidalgo, D. (2014). *SlidePlayer*. Obtenido de [https://slideplayer.es/slide/75256/?fbclid=IwAR08dXBeGNys5Egcw6ZEJ-R3vuVfgtYDTt5\\_kaMF4EjYo2x6RSi6T0EBv4o#.X6sgpbd4Srg.facebook](https://slideplayer.es/slide/75256/?fbclid=IwAR08dXBeGNys5Egcw6ZEJ-R3vuVfgtYDTt5_kaMF4EjYo2x6RSi6T0EBv4o#.X6sgpbd4Srg.facebook)
- ISO 29581-2. (2010). *Cement - Test methods - Part 2: Chemical analysis by X-ray fluorescence*
- Jiménez, E., Lalangui, S., Guacho, E., Paucar, A. E., Herrera, P., Vaca, D., . . . López, G. (2019). Nanotechnological characterization of allfanite and faujasite (Y-faujasite) catalysts and comparing with a commercial FCC catalyst (X-zeolite). *AIMS Materials Science*, 911-943.
- Kaufhold, S., Kaufhold, A., Jahn, R., Brito, S., Dohrmann, R., Hoffmann, R., . . . Frenchen, M. (2009). A New Massive Deposit of Allophane Raw Material in Ecuador. *Clay and Clay Minerals*, 72-81.
- Leal, R., & Echeverry, S. (2020). *Fluidez y Resistencia a Compresión de seis marcas de Cemento de uso general*. Girardot.

- Li, G. (2015). *Alibaba*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/hinged-welded-semi-rigid-bow-casing-centralizer-60219007692.html>
- López, M. (2008). *LOS CEMENTOS PETROLEROS Y SUS PROPIEDADES*.
- Mamani, J. (2010). *CEMENTO PARA LA INDUSTRIA PETROLERA*. Mexico.
- Meraz, J. (2015). *Procedimiento de Cementaciones de TR en Pozos con Alto Contenido de Gas y Altas Presiones*. Tantoyuca.
- Nelson, E. (2012). Fundamentos de la cementación de pozos. *Oilfield Review*, 63-64-65.
- NTE INEN 156. (1987). *Cementos. Determinación de la Densidad*.
- NTE INEN 157. (2009). *Cemento Hidráulico. Determinación de la Consistencia Normal. Método Vicat*.
- NTE INEN 158. (2009). *Cemento Hidráulico. Determinación del Tiempo de Fraguado. Método Vicat*.
- NTE INEN 160. (2009). *Cemento Hidráulico. Métodos de Ensayo para el Análisis Químico*.
- NTE INEN 488. (2009). *Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista*.
- NTE INEN 489. (2013). *Cemento Hidráulico. Determinación de la Finura por Tamizado Seco*.

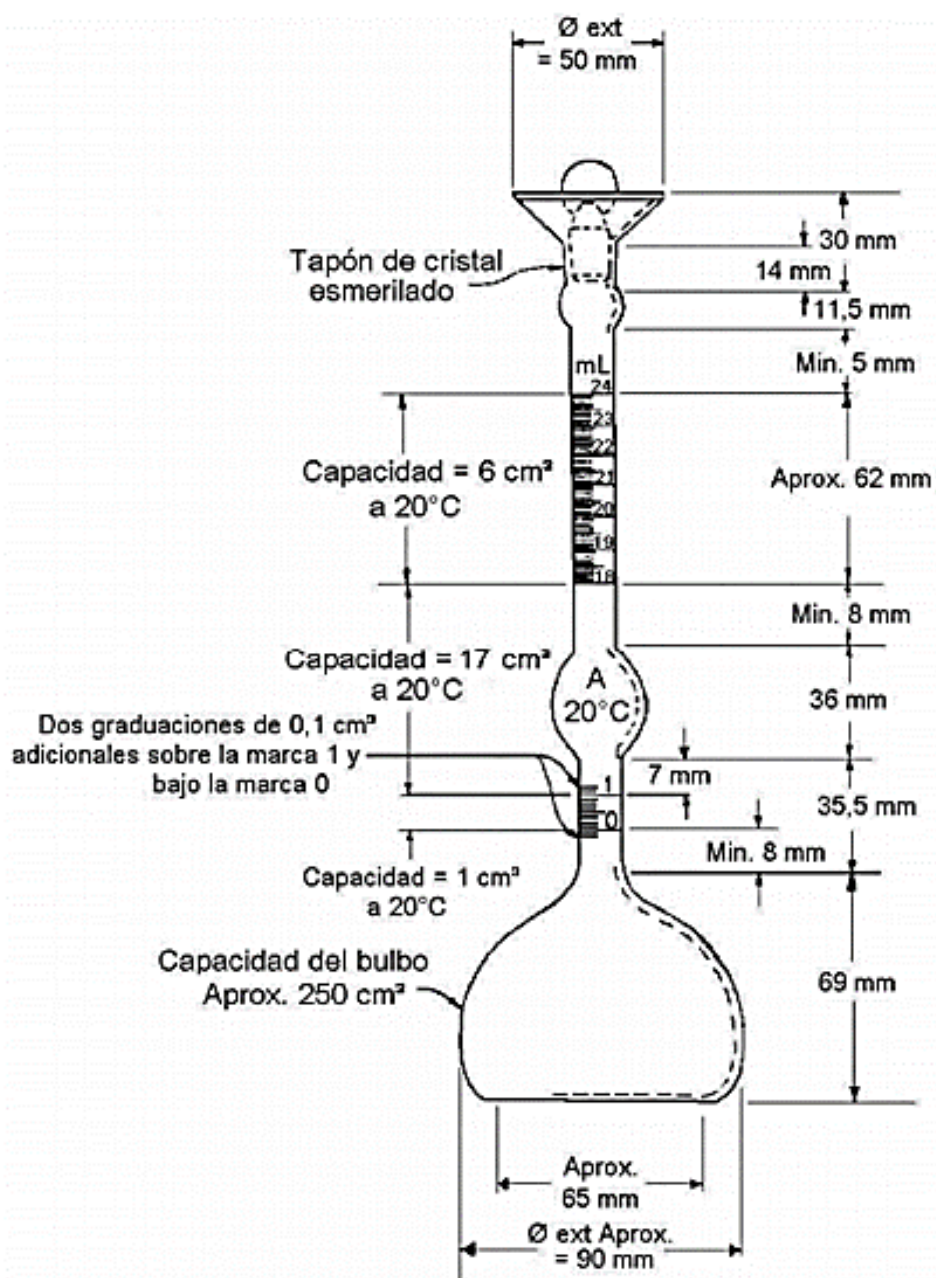
- NTE INEN 490. (2009). *Cementos Hidráulicos compuestos. Requisitos.*
- NTE INEN 2500. (2009). *Cemento hidráulico. Especificaciones para la mesa de flujo usada en los ensayos de cemento hidráulico.*
- NTE INEN 2502. (2009). *Cemento hidráulico. Determinación de flujo en morteros.*
- NTE INEN 2528. (2010). *Cámara de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar.*
- Palma, M. (21 de Agosto de 2014). *SlideShare*. Obtenido de EQUIPO AUXILIAR DE PERFORACIÓN - UNIDAD Y EQUIPO DE CEMENTACIÓN:  
<https://es.slideshare.net/MiguelPalma4/equipo-auxiliar-de-perforacin-unidad-y-equipo-de-cementacion>
- Rubio, L. A., & Martínez, V. M. (s.f.). *Universodad Politecnica de Cartagena*. Obtenido de <https://www.upct.es/sait/es/rayos-x/espectrometria-de-fluorescencia-de-rayos-x-de-dispersion-de-longitud-de-onda///>
- Salcedo, V. (2012). *Estudio de las Propiedades Mecánicas de los Cementos Usados para Cementación de Zonas Productivas en Pozos del Bloque 15 Operado por Petroamazonas*. Quito.
- Sanjuán, M., & Chinchón, S. (2014). *Introducción a la Fabricación y Normalización del Cemento Portland*. San Vicente: Universidad de Alicante.
- Schlumberger. (2004). *Introducción al Equipo de Perforación*.

- Schlumberger. (2010). *Oilfield Glossary*. Obtenido de [https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/b/bow-spring\\_centralizer.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/b/bow-spring_centralizer.aspx)
- Sononex, T. (2011). *Tianjin Elegant Technology*. Obtenido de <http://www.sovonex.com/es/equipo-de-perforacion/herramientas-de-cementacion/>
- Technodrill. (2011). *Technodrill*. Obtenido de <https://technodrill.com.co/productos/centralizadores.php>
- Vistrain, A. (2005). *Pruebas de Laboratorio de Cementaciones*. México.
- Vite, H. (2019). "*Cementación Primaria con Lechadas de cementos de baja densidad en formaciones de baja presión Perú;2019*". Piura.
- Wang, M. (2016). *Alibaba*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/api-cementing-tools-casing-float-shoe-and-float-collar-60030090557.html>
- Xing, N. (2015). *Alibaba*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/halliburton-commander-1000-cementing-head-60734386340.html>

## ANEXOS

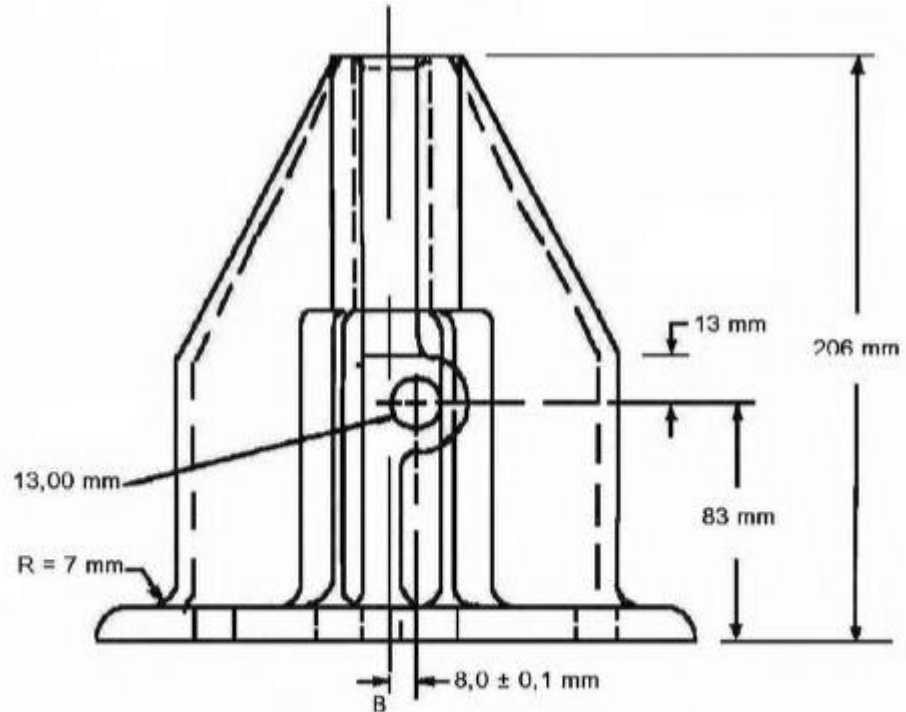
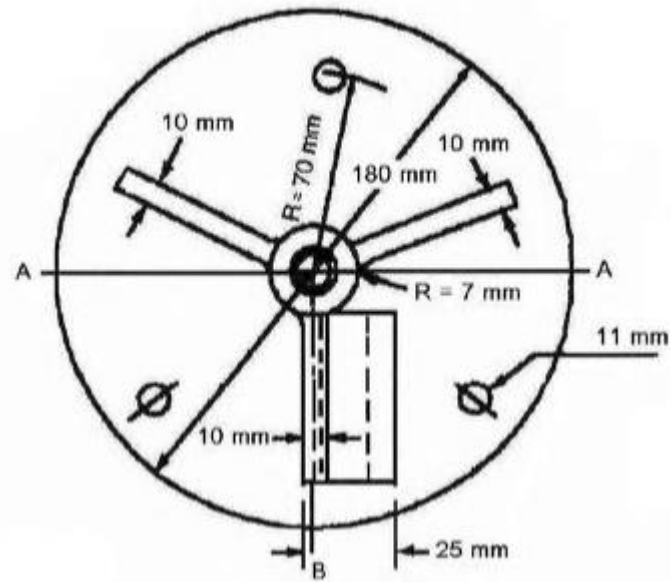
## ANEXO 1

Figura de frasco Le Chatelier

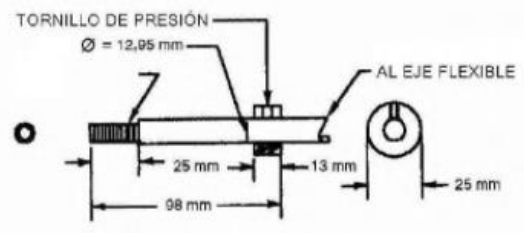
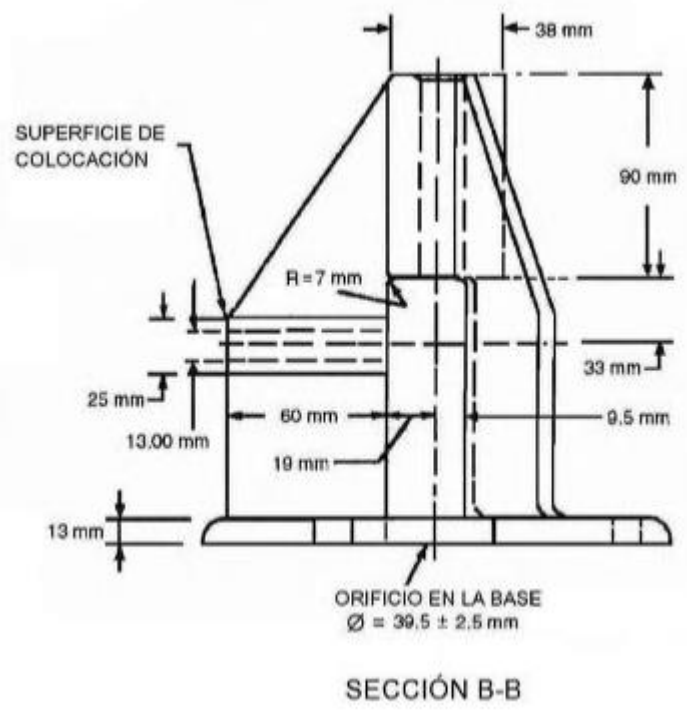
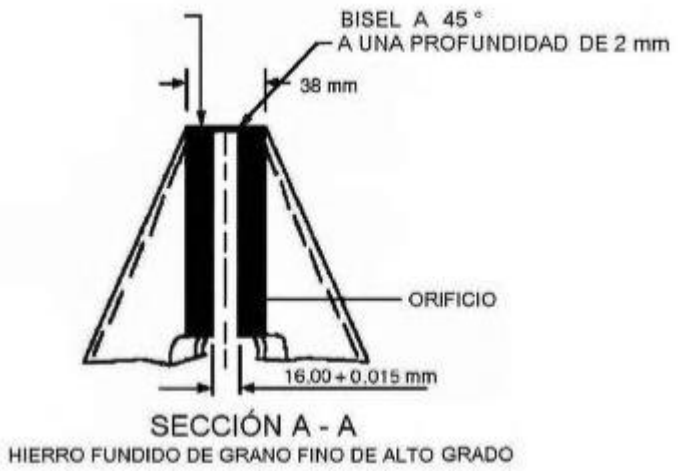




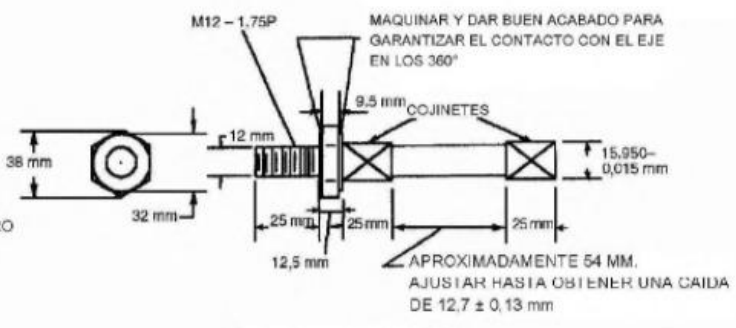
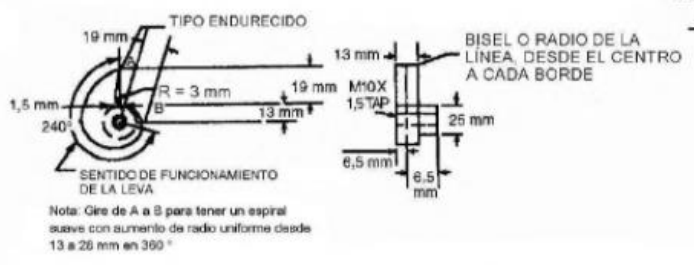
## ANEXO 2

*Mesa de Flujo y accesorios*

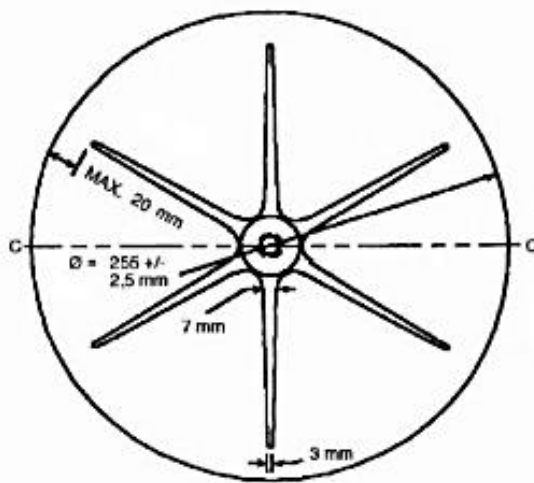
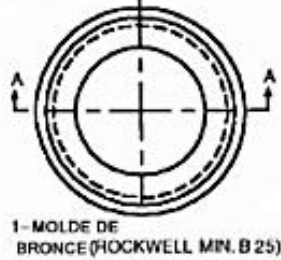
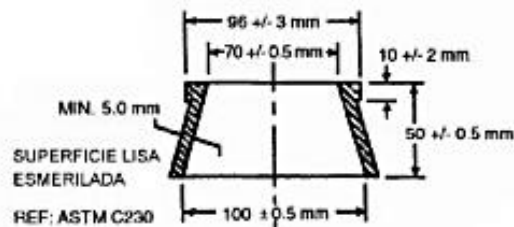
1- SOPORTE DE HIERRO  
FUNDIDO



**1-ARBOL DE LEVAS**  
ACERO MEDIO AL CARBÓN MAQUINADO



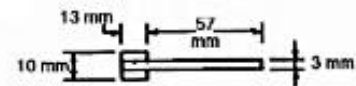
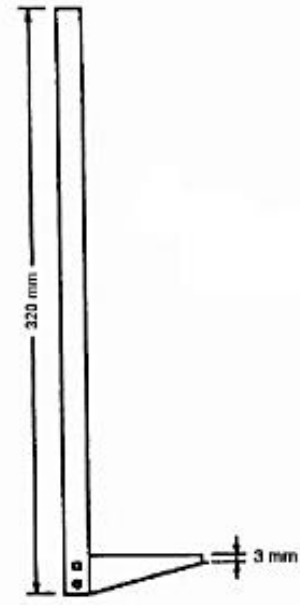
**2-ARBOL DE LEVAS**  
ACERO MEDIO AL CARBÓN MAQUINADO



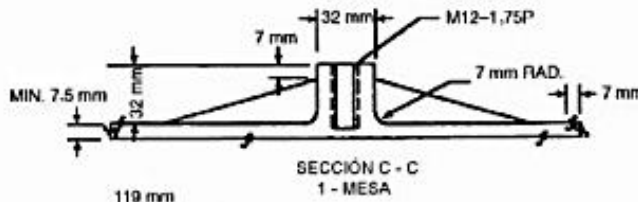
40 DIV. A  
4,00 ± 0,05 mm  
POR DIV.



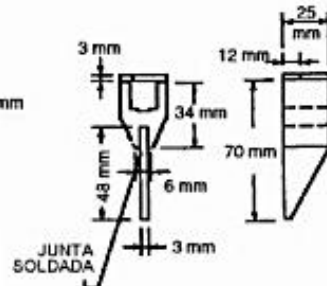
JUNTAS FIJADAS  
Y SOLDADAS



Nota: Soldadura de alta temperatura o soldadura fuerte será usada en la suelta de las juntas con el indicador fijado en cero la distancia entre los clavijas será de 100 ± 0,25 mm.

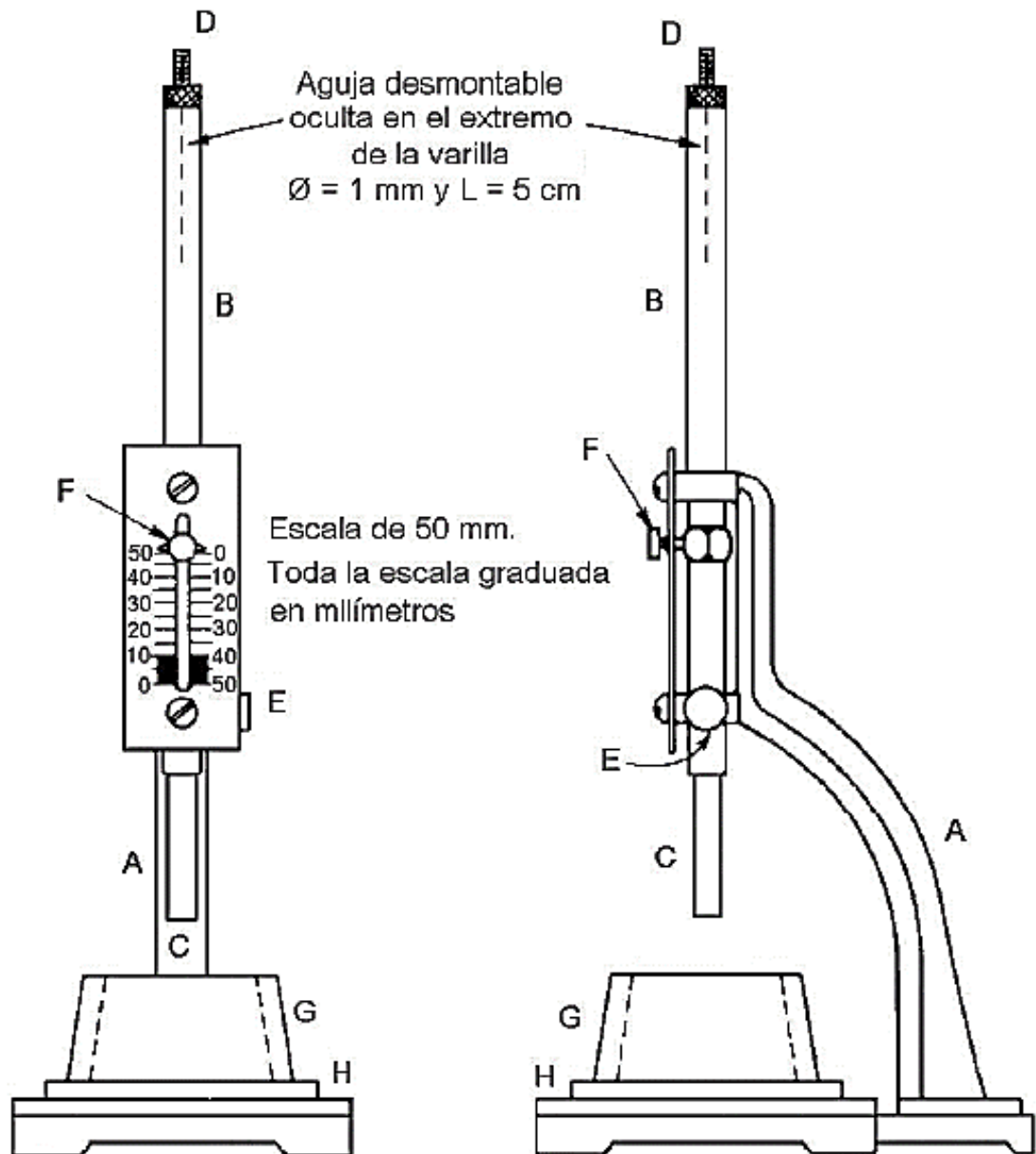


LÍNEAS GUÍA EN LA CARA DE LA MESA  
CON UNA PROFUNDIDAD DE 0,25 mm

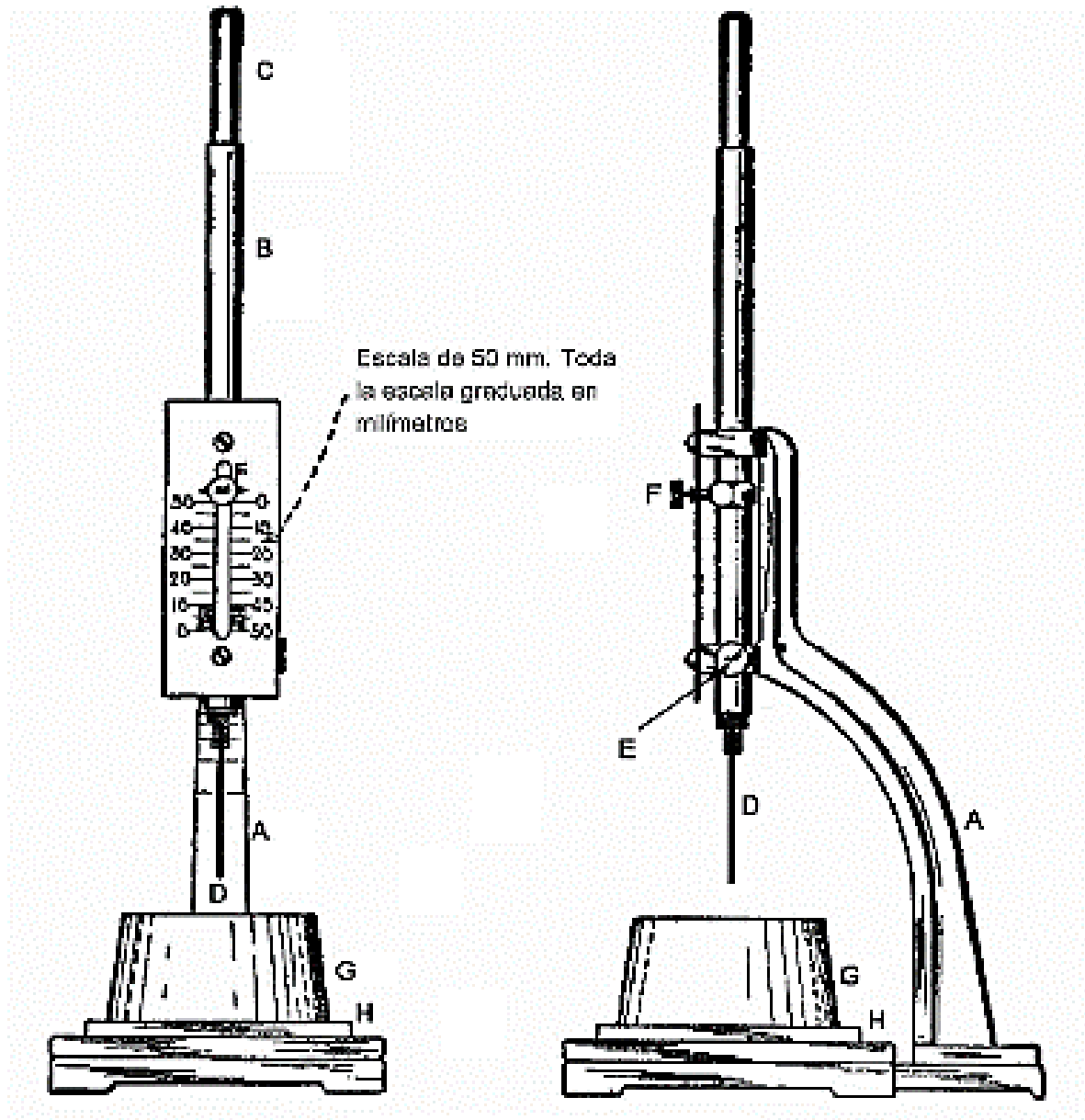


## ANEXO 3

Figura Aparato de Vicat, Consistencia Normal



## ANEXO 4

*Figura Aparato de Vicat; Tiempo de Fraguado*

## ANEXO 5

*Hoja técnica de Fumed Silica***CAB-O-SIL® M-5**

CAB-O-SIL® M-5 untreated fumed silica is a synthetic, amorphous, colloidal silicon dioxide that is generally regarded as unique in industry because of its unusual particle characteristics. CAB-O-SIL fumed silica's extremely small particle size, its enormous surface area, its high purity, and its chain-forming tendencies set it apart in a class of its own. CAB-O-SIL fumed silica is a light, fluffy powder that is white in appearance and is used in many applications and a variety of industries.

**Product Form**

Powder

**Typical Properties**

B.E.T. Surface Area	200 m <sup>2</sup> /g
pH (4% aqueous slurry)	3.7–4.3
325 Mesh Residue (44 microns)	0.02% max.
Bulk Density* (Pour Density)	3.0 lb/ft <sup>3</sup> max. (50 g/l Tap Density)
Loss on Heating*	< 1.5% max.
Loss on Ignition* (@ 1000°C)	< 2 wt. %
Specific Gravity Wt. per gallon	2.2 g/cm <sup>3</sup> 18.3 lb
Refractive Index	1.46
X-ray Form	Amorphous
Assay (% SiO <sub>2</sub> )	> 99.8
Oil Adsorption	~350 g/100 g oil
Average Particle (Aggregate) Length	0.2–0.3 microns

\*At time of packaging.