



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE PETRÓLEOS**

TEMA:

**“ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RESINA
EPOXI COMO ADITIVO DURANTE EL PROCESO DE
CEMENTACIÓN EN LOS POZOS DEL CAMPO AUCA”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

STEVEN REYNALDO BUSTE MOREIRA

TUTOR:

ING. XAVIER ERNESTO VARGAS GUTIÉRREZ, MSc.

LA LIBERTAD, ECUADOR

2024

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE PETRÓLEOS**

TEMA:

**“ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA
RESINA EPOXI COMO ADITIVO DURANTE EL PROCESO DE
CEMENTACIÓN EN LOS POZOS DEL CAMPO AUCA”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

STEVEN REYNALDO BUSTE MOREIRA

TUTOR:

ING. XAVIER ERNESTO VARGAS GUTIÉRREZ, MSc.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2024

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



ING. MARLLELIS GUITIERREZ, PhD.
DIRECTOR DE CARRERA



ING. XAVIER VARGAS, M.Sc.
DOCENTE TUTOR



ING. CARLOS MALAVÉ, MS.c
DOCENTE ESPECIALISTA



ING. DAVID VEGA
SECRETARIO DEL TRIBUNAL

Dedicatoria

A Dios principalmente por darme la sabiduría para poder ejecutar mi tesis de la mejor manera.

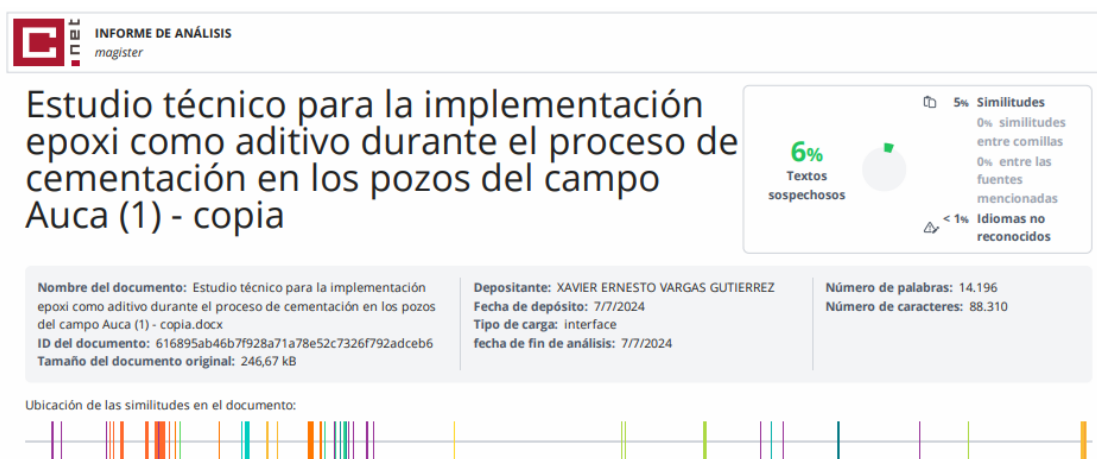
A mis padres por su apoyo incondicional y su constante apoyo a lo largo de esta travesía académica.

A mis maestros y tutores por sus enseñanzas y todo su tiempo invertido para llenarme de conocimientos muy fructíferos y aspirarme a alcanzar mis metas.

A mis amigos y compañeros que fueron una clase de apoyo incondicional y moral.

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema **ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RESINA EPOXI COMO ADITIVO DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN LOS POZOS DEL CAMPO AUCA** elaborado por el estudiante STEVEN REYNALDO BUSTE MOREIRA, egresado de la carrera de Ingeniería PETRÓLEOS de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un **6%** de la valoración permitida.



ING. XAVIER ERNESTO VARGAS GUTIÉRREZ, MSc.

C.I.: 0906392493

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Steven Reynaldo Buste Moreira, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado **“ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RESINA EPOXI COMO ADITIVO DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN LOS POZOS DEL CAMPO AUCA”**, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Petróleos, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de mi autoría.

Por medio de la presente declaración cedo los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,



STEVEN REYNALDO BUSTE MOREIRA

AUTOR DE TESIS

C.I. 2400424699

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Xavier Ernesto Vargas Gutiérrez, MSc.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo **ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RESINA EPOXI COMO ADITIVO DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN LOS POZOS DEL CAMPO AUCA** previo a la obtención del Título de Ingeniero PETRÓLEOS elaborado por el Sr/a. STEVEN REYNALDO BUSTE MOREIRA, egresado de la carrera de PETRÓLEOS, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.



ING. XAVIER ERNESTO VARGAS GUTIÉRREZ, MSc.
TUTOR

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
Celular: 0962183538
Correo: bettyruthgomez@educacion.gob.ec

CERTIFICACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

Yo, **BETTY RUTH GÓMEZ SUÁREZ**, en mi calidad de **LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN Y MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS**, por medio de la presente tengo a bien indicar que he leído y corregido el Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del Título de Ingeniero en Petróleo, denominado **"ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RESINA EPOXI COMO ADITIVO DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN LOS POZOS DEL CAMPO AUCA"**, del estudiante: **BUSTE MOREIRA STEVEN REYNALDO**.

Certifico que está redactado con el correcto manejo del lenguaje, claridad en las expresiones, coherencia en los conceptos e interpretaciones, adecuado empleo en la sinonimia. Además de haber sido escrito de acuerdo a las normas de ortografía y sintaxis vigentes.

En cuanto puedo decir en honor a la verdad y autorizo al interesado hacer uso del presente como estime conveniente.

Santa Elena, 20 de Junio del 2024



Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
CI. 0915036529
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS
N° DE REGISTRO DE SENEYCT 1050-2014-86052892

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios, por su ayuda en los momentos más complicados por darme esa fuerza necesaria a través del Espíritu Santo para poder esforzarme y no darme por vencido.

Al Ing. Xavier Vargas Gutiérrez mi tutor de tesis, por su invaluable guía, apoyo y paciencia a lo largo de este proceso. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante. Sin su motivación y sacrificio, este logro no habría sido posible.

A mis amigos y compañeros de estudio a Anthony Miranda, por su compañerismo, motivación y por ser una fuente constante de apoyo y ánimo durante los momentos más desafiantes de esta travesía académica.

Quiero agradecer también a la Universidad Estatal Península de Santa Elena por brindarme los recursos y el entorno necesarios para llevar a cabo esta investigación. A los profesores y personal administrativo, por su asistencia y orientación.

A todos ustedes, ¡muchas gracias!

CONTENIDO

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	ii
Dedicatoria	iii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 ANTEDECENTES	2
1.3 HIPÓTESIS.....	3
1.4 OBJETIVOS.....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos	3
1.5 ALCANCE	4
1.6 VARIABLES	4
1.6.1 Variables Dependientes:.....	4
1.6.2 Variables Independientes	4
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1 DESCRIPCIÓN DEL CAMPO	5
2.2 Ubicación Geográfica.....	5
2.3 GEOLOGÍA.....	7
2.3.1 Características geológicas.....	7

2.4	ESTRATIGRAFÍA DEL CAMPO AUCA	9
2.5	LITOLOGÍA	10
2.6	CEMENTACIÓN DE POZOS	11
2.6.1	Cemento portland	13
2.6.2	Tuberías de revestimiento	14
2.7	CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS.....	16
2.7.1	Cemento clase A o tipo I.....	16
2.7.2	Cemento clase B o tipo II.....	16
2.7.3	Cemento clase C o tipo III.....	16
2.7.4	Cemento clase D	16
2.7.5	Cemento clase E	17
2.7.6	Cemento clase F	17
2.7.7	Cemento clase G y H.....	17
2.7.8	Cemento clase J.....	17
2.8	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS CEMENTOS	18
2.8.1	Gravedad específica.....	18
2.8.2	Peso volumétrico	18
2.8.3	Fineza de los granos de cemento	19
2.8.4	Distribución del tamaño de partícula	19
2.8.5	Tamaño promedio de partículas	19
2.8.6	Requerimiento de agua normal.....	19

2.8.7	Requerimiento de agua mínima	19
2.8.8	Densidad de la lechada	20
2.8.9	Ángulo de talud natural del cemento.....	20
2.9	PROPIEDADES MECÁNICAS	20
2.10	PROPIEDADES ELÁSTICAS	22
2.10.1	Módulo de Young	22
2.10.2	Relación de Poisson.....	23
2.11	ADITIVOS.....	24
2.11.1	Aditivos para lechadas de cemento convencionales.....	24
2.11.2	Aceleradores	25
2.11.3	Densificantes.....	26
2.11.4	Retardadores	27
2.11.5	Controladores de pérdida de fluido.....	27
2.11.6	Dispersantes o retardadores de fricción	27
2.11.7	Controlador de gas	28
2.12	PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA RESINA EPOXI.....	28
2.12.1	Compatibilidad de los fluidos dentro del pozo con la resina epoxi 29	
2.12.2	Comparación físico-mecánica entre el cemento y la resina epoxi 30	
CAPITULO III: METODOLOGÍA.....		31
3.1	Enfoque de investigación	31

3.2	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL	31
3.3	CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO A UTILIZARSE	31
3.3.1	Balanza electrónica	31
3.3.2	Balanza de lodos	32
3.3.3	Mezcladora Chandler.....	33
3.4	SELECCIÓN DE MATERIALES	34
3.4.1	Requisitos de los materiales	34
3.4.2	Descripción de la resina Epoxi.....	34
3.4.3	Cemento Portland.....	35
3.5	Evaluación y Comparación de Materiales	36
3.6	PREPARACIÓN DE LA LECHADA DE CEMENTO.....	37
3.6.1	Equipo necesario para el estudio.....	37
3.6.2	Fórmulas para el cálculo de la densidad y el volumen	38
3.6.3	Temperatura del agua y el cemento	39
3.6.4	Mezclado del cemento y agua	39
3.7	DENSIDAD DE UNA LECHADA DE CEMENTO	40
3.7.1	Equipo recomendado para la medición.....	41
3.7.2	Calibración del equipo	41
3.7.3	Modo de uso.....	41
3.8	COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA LECHADA DE CEMENTO	
	42	
3.8.1	Viscosímetro de Fann.....	43

3.9	Modelado del comportamiento reológico.....	45
3.10	MODELOS REOLÓGICOS.....	46
3.10.1	Modelo plástico de Bingham.....	46
3.10.2	Modelo de ley de potencias.....	47
3.11	SELECCIÓN DEL MODELO REOLÓGICO.....	48
3.11.1	Modelo plástico de Bingham.....	48
3.11.2	Modelo de ley de potencias.....	49
3.12	PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO EXCESIVO EN UNA LECHADA DE CEMENTO.....	50
3.12.1	Descripción del equipo.....	50
3.12.2	Procedimiento para la medición.....	51
3.13	APLICACIÓN PRÁCTICA.....	52
3.13.1	Preparación de la lechada de cemento con resina epoxi.....	53
3.13.2	Lechada base.....	56
3.13.3	MUESTRA AUCA-1.....	56
3.13.4	MUESTRA AUCA-2.....	57
3.13.5	MUESTRA AUCA-3.....	58
3.13.6	Determinación de la densidad.....	59
3.13.7	Resultados de Reologías.....	59
3.14	Resultados de lechada base.....	62
3.15	Resultados de La muestra Auca-1.....	63
3.16	Resultados de La muestra Auca-2.....	63

3.17	Resultados de la muestra Auca-3	64
3.18	Análisis en Python y ajuste de las curvas	64
3.18.1	Definición del modelo de Ley de Potencias	64
3.18.2	Código base para el ajuste	65
3.19	Efecto agua libre	68
3.20	Pérdida de fluido por filtrado excesivo en una lechada de cemento	68
CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		70
4.1	Muestra “Lechada Base”	70
4.2	Muestra Auca-1.....	71
4.3	Muestra Auca-2.....	72
4.4	Muestra AUCA 3	72
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		74
5.1	Conclusiones	74
5.2	Recomendaciones	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		76

LISTA DE TABLA

Tabla 1. Evaluación y comparación de materiales	36
Tabla 2. Especificaciones de la muestra de lechada base	56
Tabla 3. Especificaciones de la muestra Auca 1	57
Tabla 4. Especificaciones de la muestra Auca 2	58
Tabla 5. Especificaciones de la muestra Auca 3	58
Tabla 6. Datos de masa, volumen y densidad de las muestras	59
Tabla 7. Datos obtenidos de las diferentes velocidades del viscosímetro	60
Tabla 8. Datos reológicos obtenidos de las muestras	62
Tabla 9. Datos obtenidos para muestra de lechada base	62
Tabla 10. Datos obtenidos para muestra Auca-1	63
Tabla 11. Datos obtenidos para la muestra Auca-2	63
Tabla 12. Datos obtenidos para la muestra AUCA-3	64
Tabla 13. Datos recolectados del fluido libre en las muestras.....	68
Tabla 14. Datos recolectados de la pérdida de fluido.....	69
Tabla 15. Pérdida de fluido de la muestra base	70
Tabla 16. Pérdida de fluido de la muestra AUCA 1	71
Tabla 17. Concentración de resina epoxi en muestra AUCA 1	71
Tabla 18. Pérdida de fluido de la muestra AUCA 2	72
Tabla 19. Concentración de resina epoxi en muestra AUCA 2	72
Tabla 20. Pérdida de fluido de la muestra AUCA 3	72

Tabla 21. Concentración de resina epoxi en muestra AUCA 3	73
---	----

LISTA DE FIGURA

Figura 1.	Ubicación Geográfica del Campo Auca	6
Figura 2.	Ubicación de los pozos del Campo Auca	7
Figura 3.	Columna Estratigráfica	9
Figura 4.	Cementación primaria.....	13
Figura 5.	Esquema de casing en un pozo	15
Figura 6.	Clasificación API del cemento	18
Figura 7.	Módulo de Young	23
Figura 8.	Descripción grafica del coeficiente de Poisson	24
Figura 9.	Adherencia del cemento con resina epoxi	30
Figura 10.	Balanza electrónica.....	32
Figura 11.	Balanza de lodos	32
Figura 12.	Mezcladora Chandler.....	33
Figura 13.	Resina Epoxi.....	35
Figura 14.	Cemento Portland	36
Figura 15.	Comparación de los comportamientos del fluido.....	48
Figura 16.	Materiales para el estudio	53
Figura 17.	Cemento en seco	54
Figura 18.	Adición de resina epoxi	54
Figura 19.	Mezcla de agua más resina epoxi	55
Figura 20.	Mezcla de cemento	55

Figura 21. Prueba del viscosímetro de Fann	59
Figura 22. Comportamiento reológico de la muestra de lechada base.....	62
Figura 23. Comportamiento reológico de la muestra Auca-1	63
Figura 24. Comportamiento reológico de la muestra Auca-2	63
Figura 25. Comportamiento reológico de la muestra Auca-3	64
Figura 26. Funciones y bibliotecas para usar	64
Figura 27. Ajuste de la gráfica de la muestra Auca-1-.....	66
Figura 28. Ajuste de la gráfica de la muestra Auca-2.....	66
Figura 29. Ajuste de la gráfica de la muestra Auca-3.....	67
Figura 30. Filtro prensa.....	69

“ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RESINA EPOXI COMO ADITIVO DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN LOS POZOS DEL CAMPO AUCA”

Autor: Steven Reynaldo Buste Moreira

Tutor: Ing. Xavier Ernesto Vargas Gutiérrez, MSc.

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en el estudio técnico para la implementación de la resina epoxi como aditivo durante el proceso de cementación en los pozos del campo Auca. La cementación adecuada de los pozos petroleros es crucial para garantizar la integridad estructural, la estabilidad mecánica y la protección ambiental durante toda la vida útil del pozo. La resina epoxi ha mostrado ser prometedora como aditivo cementante debido a sus propiedades de alta resistencia química, adherencia mejorada a las formaciones geológicas y capacidad para mejorar las propiedades mecánicas del cemento.

Este estudio se centra en evaluar la viabilidad técnica de incorporar la resina epoxi en las formulaciones de cemento utilizadas en el campo Auca. Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura para evaluar los estudios previos sobre la utilización de resinas epoxi en cementación de pozos. Además, se llevarán a cabo pruebas de laboratorio para estudiar el comportamiento del cemento modificado con resina epoxi bajo condiciones cercanas al del campo Auca, considerando variables como temperatura, presión y composición del fluido de producción.

Los resultados esperados de este estudio proporcionarán una base científica sólida para recomendar o ajustar las formulaciones de cemento con resina epoxi en los pozos del campo Auca, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa, prolongar la vida útil del pozo y reducir los costos asociados con mantenimiento y reacondicionamiento. Además, se espera contribuir al conocimiento científico en el campo de la cementación de pozos petroleros, ofreciendo nuevas perspectivas sobre el uso de aditivos innovadores para mejorar la calidad y la seguridad de las operaciones petroleras.

PALABRAS CLAVE: Resina epoxi, Campo Auca, Cemento , aditivo

“TECHNICAL STUDY FOR THE IMPLEMENTATION OF EPOXY RESIN AS AN ADDITIVE DURING THE CEMENTING PROCESS IN THE AUCA FIELD WELLS”

Authors: Steven Reynaldo Buste Moreira

Tutor: Ing. Xavier Ernesto Vargas Gutiérrez, MSc.

ABSTRACT

The present research focuses on the technical study for the implementation of epoxy resin as an additive during the cementing process in the wells of the Auca field. Proper cementing of oil wells is crucial to ensure structural integrity, mechanical stability, and environmental protection throughout the well's lifespan. Epoxy resin has shown promise as a cement additive due to its properties of high chemical resistance, improved adhesion to geological formations, and ability to enhance the mechanical properties of cement.

This study focuses on evaluating the technical feasibility of incorporating epoxy resin into the cement formulations used in the Auca field. An exhaustive literature review will be conducted to evaluate previous studies on the use of epoxy resins in well cementing. In addition, laboratory tests will be carried out to study the behavior of epoxy resin-modified cement under conditions close to those of the Auca field, considering variables such as temperature, pressure, and production fluid composition.

The expected results of this study will provide a solid scientific basis for recommending or adjusting cement formulations with epoxy resin in the wells of the Auca field, with the aim of improving operational efficiency, extending the well's lifespan, and reducing costs associated with maintenance and refurbishment. Additionally, it is expected to contribute to scientific knowledge in the field of oil well cementing, offering new perspectives on the use of innovative additives to improve the quality and safety of oil operations.

KEYWORDS: *Epoxy resin, Campo Auca, Cement, additive*

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El campo Auca se enfrenta a importantes retos en términos de integridad de la perforación y calidad de la cementación, que pueden afectar a la eficacia de la producción y a la seguridad de las operaciones.

Durante el proceso de cementación, el objetivo es garantizar un sellado eficaz entre las tuberías y la formación geológica para evitar problemas como la pérdida de circulación, la entrada de fluidos no deseados y asegurar la estabilidad estructural del pozo.

Sin embargo, los métodos tradicionales de cementación pueden tener limitaciones, particularmente en pozos con condiciones geológicas complejas, como las encontradas en el campo Auca.

La presencia de fracturas, zonas fracturadas o formaciones muy permeables puede comprometer la eficacia del revestimiento de cemento, contribuir a los problemas de producción y aumentar el riesgo de problemas de integridad del pozo.

Por lo tanto, es sumamente necesario encontrar soluciones innovadoras alcanzables para mejorar la eficacia de la cementación en los pozos del campo Auca. Una posible alternativa es el uso de resinas poliméricas como aditivos durante el proceso de cementación para mejorar la adherencia del cemento, sellar posibles vías de fuga y reforzar la barrera entre las tuberías y la formación geológica.

1.2 ANTEDECENTES

En febrero de 1970, Texaco inició la perforación del pozo Auca-1, marcando un hito importante en la historia petrolera del Ecuador. Esta operación, que alcanzó una profundidad de 10.578 pies, resultó ser un éxito rotundo al encontrar dos reservorios petrolíferos: Hollín (31°API) y T (27°API). La producción inicial del pozo fue de 3.072 barriles de petróleo por día (BPPD), un indicio del potencial que guardaba el campo Auca. (Caicedo, 2009)

Este descubrimiento dio lugar al desarrollo del campo Auca, el cual comenzó a producir en 1975 con 24 pozos. A lo largo de su historia, el campo Auca ha sido uno de los más importantes del país, contribuyendo significativamente a la producción petrolera nacional.

El bloque 61, también conocido como área petrolera estatal Auca, se destaca como uno de los campos más productivos de Petroamazonas. Según datos de la Secretaría de Hidrocarburos, en el año 2014 este bloque alcanzó una producción de 24,5 millones de barriles, posicionándose como el segundo más importante de la empresa, solo por debajo del área Shushufindi. Esta notable producción representó el 19% del total de barriles extraídos por Petroamazonas en ese año. (Araujo, 2015)

La cementación de pozos es una operación compleja y crítica que requiere experiencia, precisión y el uso de equipos especializados. Su correcta ejecución es fundamental para la seguridad y el éxito de las operaciones petroleras, asegurando la integridad del pozo, la protección del medio ambiente y la optimización de la producción de hidrocarburos. (Alvarez y B, 2014)

La cementación de pozos es un proceso crucial en la industria petrolera que implica la inyección de una mezcla de cemento y aditivos, llamada lechada, para aislar las formaciones geológicas, proteger la tubería de revestimiento y brindar soporte estructural. Para optimizar este proceso, se utilizan diversos aditivos que se clasifican en diferentes

categorías según su función: aceleradores para un fraguado rápido, retardantes para un fraguado lento, aditivos de control de pérdida de fluido para evitar filtraciones, dispersantes para una mezcla homogénea, extensores para economizar cemento, densificantes para mayor peso, aditivos de control de pérdida de circulación para prevenir contratiempos y aditivos especiales para condiciones excepcionales. Estos aditivos, disponibles en polvo o líquido, se seleccionan cuidadosamente y se mezclan con la lechada para lograr las propiedades deseadas en cada proyecto, asegurando el éxito de la cementación y la protección del pozo. (Schlumberger, 2022)

1.3 HIPÓTESIS

Implementando la resina epoxi en la lechada de cemento en los pozos del campo Auca se podrá incrementar la durabilidad del cemento a desgastes mecánicos por lo tanto se tendrá una mejor condición del cemento a futuro minimizando posibles problemas operacionales.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

- Realizar un estudio técnico que evalúe la viabilidad y beneficios de la incorporación de resina epoxi como aditivo durante el proceso de cementación en los pozos del Campo Auca.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar las propiedades geológicas y petrofísicas de la formación en el Campo Auca, con el objetivo de comprender mejor los desafíos y requisitos específicos para la cementación.
- Utilizar herramientas tecnológicas para modelar el proceso de cementación en los pozos del Campo Auca, considerando la presencia de resina epoxi en las mezclas de cemento.

- Analizar información técnica relacionada con la cementación de pozos, con énfasis en el uso de resinas poliméricas como aditivos y sus aplicaciones en la industria petrolera.

1.5 ALCANCE

El alcance de la propuesta se basa en la aplicación de este aditivo como es el caso de la resina epoxi en la lechada de cemento para lograr una correcta cementación en los pozos seleccionados del campo Auca, todo se esto se realizará mediante un análisis minucioso y coherente sobre todos los parámetros geológicos y operativos que se tenga en ese momento, para que de esta manera poder tener una visión más centrada y determinar si es viable la aplicación mediante el estudio.

Este proyecto puede contribuir a la mejora de la vida útil del pozo al garantizar una barrera de cemento más robusta y resistente a los factores corrosivos y mecánicos presentes en el ambiente de perforación.

1.6 VARIABLES

1.6.1 Variables Dependientes:

- Propiedades de la mezcla de cemento con resina
- Vida útil del pozo
- Eficiencia de sellado del pozo

1.6.2 Variables Independientes

- Tipo de resina polimérica.
- Proporciones en la mezcla de cemento.
- Condiciones al momento de la simulación de la cementación.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 DESCRIPCIÓN DEL CAMPO

La Compañía Texaco – Gulf descubrió el campo Auca con la perforación del pozo Aucas 1 en 1970, alcanzando una profundidad de 10,578 pies y una producción inicial de 3,072 barriles por día (BPPD) de las arenas Hollín y Napo "T".

La explotación comenzó en 1974 con 9 pozos, 7 de ellos produciendo de Hollín, 1 de "U" y 1 de "T". Las presiones iniciales de los yacimientos eran significativas, pero después de 39 años de producción han disminuido considerablemente, llegando en algunos casos a 1200 psia.

En la actualidad, el campo Auca, ubicado en la provincia de Orellana, produce alrededor de 75,000 BPPD, siendo uno de los tres campos más productivos de EP PETROECUADOR.

2.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El campo Auca está ubicado en la provincia de Orellana, específicamente en el cantón Francisco de Orellana y la parroquia Dayuma, en la cuenca oriental del Ecuador. Se encuentra aproximadamente a 260 km al oeste de la ciudad de Quito, a 20 km al sureste del campo Sacha y a 100 km al sur de la frontera con Colombia.

Geográficamente, sus coordenadas abarcan desde los 0°34'S hasta los 0°48'S de latitud y desde los 76°50'W hasta los 76°54'W de longitud. El campo tiene una extensión de aproximadamente 92 km² al sur de la ciudad de El Coca.

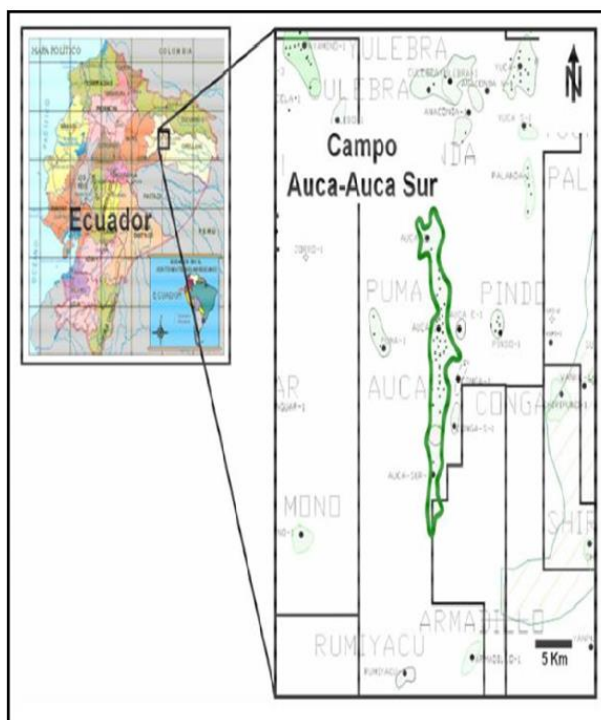


Figura 1. Ubicación Geográfica del Campo Auca - (EP-PETROECUADOR, 2008)

La ubicación de los pozos en el Campo Auca – Aucas Sur se pueden apreciar en la siguiente imagen:

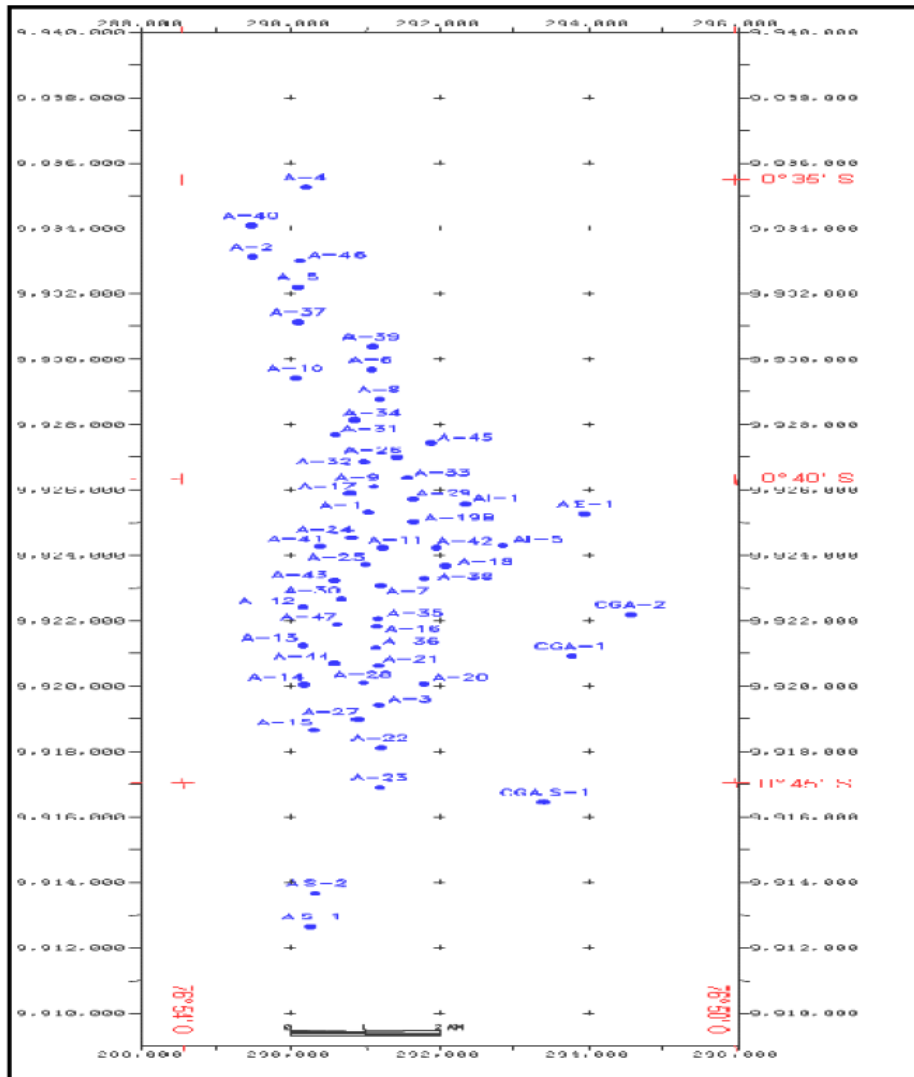


Figura 2. Ubicación de los pozos del Campo Auca- (EP-PETROECUADOR, 2008)

2.3 GEOLOGÍA

2.3.1 Características geológicas

Las formaciones Napo "T", "U" y una parte de Hollín se depositaron en diferentes ambientes, que iban desde marinos hasta estuarios, siendo predominantemente influenciados por un régimen de mareas.

Los cambios relativos y gradualmente lentos en el nivel del mar permitieron la alternancia de ciclos sedimentarios, con depósitos que incluían niveles arcillosos o de caliza de gran extensión en entornos marinos, los cuales sirven como marcadores

estratigráficos confiables. Además, se encontraban depósitos con niveles de arena de extensión variable.

La formación Hollín del campo Auca – Auca Sur esta subdividida por 2 unidades de roca, mientras que las formaciones Napo “T” y Napo “U” están subdivididas en 4 o 6 unidades de roca respectivamente.

Los marcadores más confiables del campo son:

- Base Basal Tena
- Base Caliza A
- Tope de Napo U
- Tope de Caliza B
- Tope y Base de Napo T
- Tope Hollín Superior

Las áreas más significativas en términos de producción de petróleo en el campo Auca - Auca Sur son las arenas "U" y "T", caracterizadas por su espesor considerable y una continuidad satisfactoria en la formación de arena. Aunque la formación de Hollín también sirve como un reservorio notable, su importancia es menor en comparación con las áreas mencionadas anteriormente.

En cuanto a Basal Tena, es un yacimiento poco convencional en la región, con un espesor relativamente reducido, pero con un potencial prometedor.

2.4 ESTRATIGRAFÍA DEL CAMPO AUCA

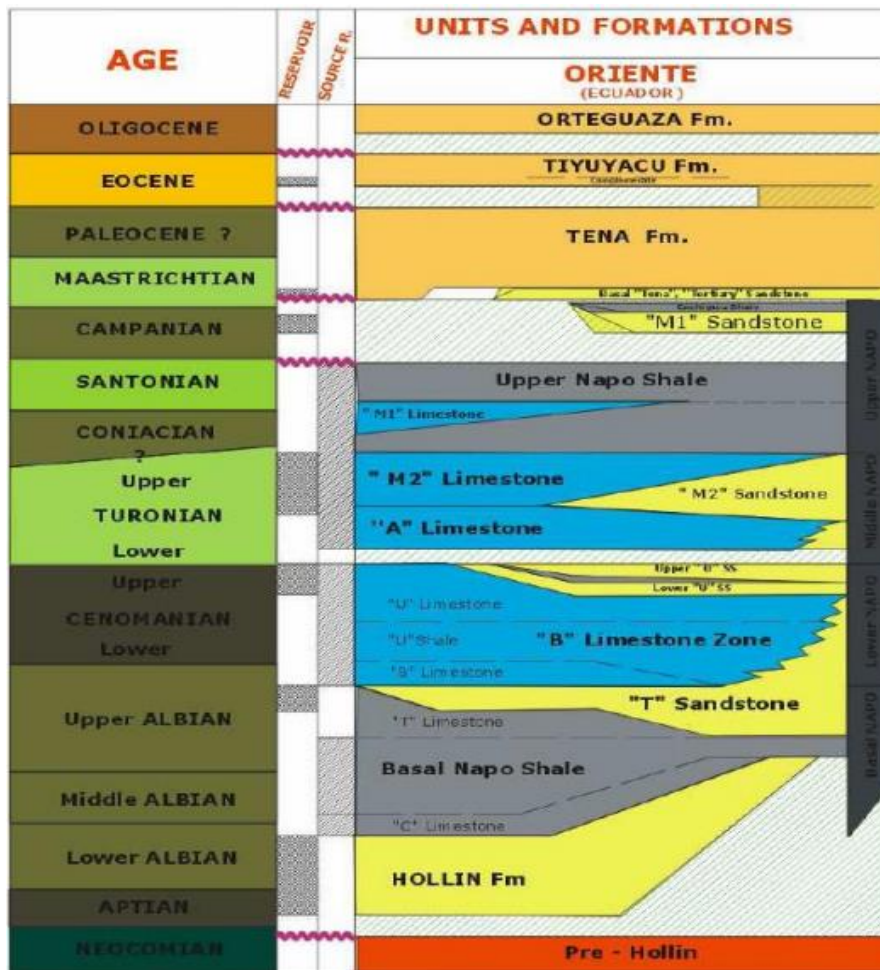


Figura 3. Columna Estratigráfica- (Miranda Grijalva, 2015)

La estructura del Campo Auca – Auca Sur se manifiesta como un anticlinal de 23 km por 4 km, orientado a lo largo del eje norte-sur. Durante el Cretácico, la cuenca se caracterizaba por una subsidencia débil y los depósitos someros se formaron en un entorno marino aislado del océano abierto. La sedimentación fue predominantemente marina, ocurriendo en aguas poco profundas o en ambientes de tipo estuario, excepto en la parte basal, que parece ser más fluvial. La principal dirección de aporte sedimentario durante esta fase era hacia el este.

Las variaciones en el nivel del mar controlaron los ciclos de sedimentación y erosión en la plataforma marina, donde los depósitos se acumulaban antes de ser cubiertos por la siguiente transgresión. En la secuencia estratigráfica se encuentran niveles de lutitas que actuaron como roca madre a lo largo de la historia de la cuenca y sirvieron como sellos parciales o completos de los reservorios.

Las fallas principales, orientadas principalmente en la dirección norte-sur, tienen una extensión de más de 100 km, con desplazamientos variables a lo largo de este eje. Un ejemplo es la falla que sigue los flancos de los yacimientos Auca, Sacha y Dureno.

2.5 LITOLOGÍA

En el campo Auca, las formaciones cretácicas Tena, Napo y Hollín contienen hidrocarburos, con yacimientos productores en Basal Tena, Napo U, Napo T y Hollín. Estas formaciones se caracterizan por sus arenas compactas.

La formación Hollín comprende areniscas del Hollín Inferior, de origen volcánico, y del Hollín Superior, de origen marino somero, con depósitos en zonas de playa. Esta formación se extiende por todo el campo sin interrupciones por fallas. Hollín Superior, también conocida como Hollín Principal, está formada por arena cuarzosa limpia con algunas capas de arcilla, y sus arenas, de grano fino a grueso, contienen poca o ninguna glauconita, un mineral del grupo de los silicatos. Hollín Inferior es una arenisca cuarzosa de grano fino a medio con abundantes capas de lutita y glauconita cuarzosa.

La formación Napo incluye dos areniscas: Napo "U" y Napo "T", separadas por intervalos gruesos de calizas y lutitas. La calidad de estos reservorios varía y hay cambios marcados en el tamaño de los poros que a veces ocultan el contacto agua-petróleo, debido a una amplia zona de transición entre el petróleo y el agua de formación.

La arenisca "T" es discontinua y contiene granos finos ricos en arcillas, areniscas cuarzosas discontinuas y lutitas. "T" Superior está compuesta por arenisca cuarzosa de grano fino con una mayor proporción de glauconita, además de capas de arenisca con lutita y limonita. "T" Inferior es una arenisca cuarzosa de grano fino a medio, siendo más gruesa en la parte sur del campo.

Por otro lado, la arenisca "U", al igual que Hollín, es continua y se extiende por todo el campo, con características similares a las de la arenisca "T", incluyendo granos finos ricos en arcillas, areniscas cuarzosas y lutitas. "U" Superior es una arenisca cuarzosa que varía de gris claro a verde claro en color y tamaño de grano, mientras que "U" Inferior es una arenisca cuarzosa de grano fino a medio, de color gris claro a blanco. La formación Basal Tena es discontinua y consiste principalmente en un delgado

cuerpo arenisco de 10 a 20 pies de espesor, que se encuentra en discordancia sobre las lutitas de Napo Superior.

2.6 CEMENTACIÓN DE POZOS

La cementación es el proceso que se lleva a cabo en un pozo petrolero, donde se mezcla y se desplaza una lechada de cemento entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta del agujero, o entre revestidores previos, con el propósito de lograr los siguientes objetivos:

- Crear una separación entre las zonas productoras, las formaciones de alta o baja presión y los acuíferos.
- Dar apoyo al revestidor dentro del pozo.
- Servir como una capa protectora para el revestidor durante el proceso de corrosión.
- Ayudar a sostener las paredes del hoyo frente al colapso.
- Formar un sello hidráulico entre la T.R. y la formación.

En años recientes, uno de los principales esfuerzos de las compañías petroleras ha sido investigar la integridad a largo plazo de la cementación. Este trabajo ha llevado al desarrollo de un procedimiento para diseñar un sistema de cementación adaptado a cada tipo de pozo, asegurando la integridad del aislamiento durante toda su vida productiva.

Al evaluar los riesgos potenciales de falla asociados con diferentes escenarios y sistemas de cementación, se puede diseñar el cemento para lograr los máximos beneficios técnicos y económicos (Vallejo Bravo y otros, 2013). Para garantizar que se logre el aislamiento requerido durante la vida útil del pozo, existen dos factores principales de diseño de cementación que el equipo de construcción del pozo debe considerar:

- El cemento debe ser colocado en la totalidad del espacio anular mediante el desplazamiento eficiente del lodo de perforación y siguiendo todas las buenas prácticas operativas de cementación existentes.

- Las propiedades de los cementos deberán ser optimizadas de tal manera que puedan soportar los esfuerzos de las diferentes operaciones que se llevarán a cabo durante la vida del pozo.

El propósito principal de la cementación es proporcionar un aislamiento efectivo durante la vida útil del pozo, permitiendo una producción económica y segura de gas o petróleo.

Durante la vida productiva de los pozos de petróleo y gas, se pueden realizar diversas operaciones, como pruebas de presión y producción, inducciones con nitrógeno, estimulaciones y producción de hidrocarburos. Estas operaciones generan cambios en la presión y la temperatura a lo largo de la vida del pozo.

La magnitud de dichos cambios dependerá de las condiciones operativas de cada pozo, pero en todos los casos generan una serie de esfuerzos que actúan sobre el cemento pudiendo perder su integridad original, de ahí la necesidad de considerar en la propuesta de diseño las operaciones que se llevarán a cabo en los pozos para proveer un aislamiento duradero (Hernandez Pérez & Ortiz Gómez, 2011).

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

Los resultados de las pruebas determinarán si la lechada es óptima y adecuada para un pozo específico.

Es necesario conocer los procedimientos para diseñar una lechada y las pruebas a las que será sometida, así como también los efectos que provocarán los aditivos una vez que se han mezclado con el agua y el cemento, sólo así se podrá diseñar una lechada que cumpla con los requerimientos de un pozo.

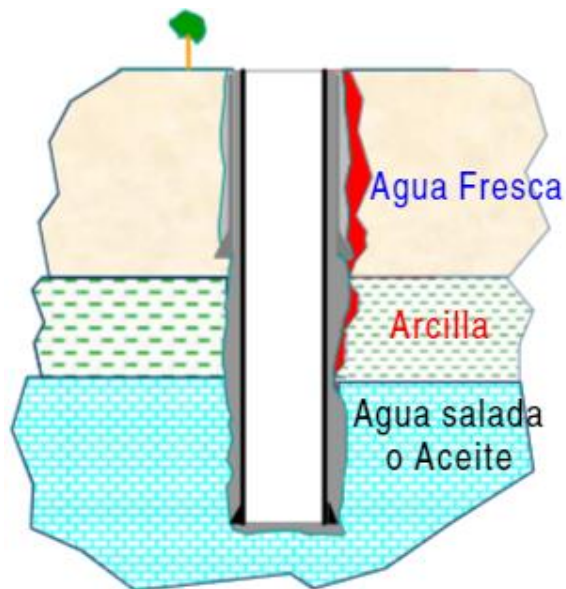


Figura 4. Cementación primaria- (Albarrán Flores & Hernández Sandoval, 2012)

2.6.1 Cemento portland

El cemento es una mezcla compleja de caliza (u otros materiales con alto contenido de carbonato de calcio), sílice, hierro y arcilla. Estos ingredientes se muelen y se calcinan en hornos horizontales con corriente de aire, formando un cuerpo sólido al contacto con el agua. El producto de este proceso es el clinker, que contiene todos los componentes del cemento, excepto el sulfato de calcio, que se añade al final (Meza Rodríguez, 2015)

Los componentes del cemento son óxidos con una oxidación lenta, lo que implica que terminan su proceso de oxidación al enfriarse cuando entran en contacto con el aire.

El cemento Portland es el más destacado en términos de calidad, ideal para las operaciones de cementación de pozos. Algunos cementos Portland se fabrican especialmente para adaptarse a las diversas profundidades de los pozos, mientras que cementos de menor uso se emplean para resolver problemas específicos en ciertos pozos.

Este cemento es un ejemplo típico de cemento hidráulico, que fragua y desarrolla resistencia a la compresión mediante la hidratación, una reacción química entre el agua y los componentes del cemento. Este proceso de fraguado y endurecimiento ocurre

tanto en contacto con el aire como cuando la mezcla se sumerge en agua. La resistencia del cemento se desarrolla de manera predecible, uniforme y rápida. El cemento endurecido es de baja permeabilidad e insoluble en agua, manteniendo sus propiedades incluso cuando está expuesto al agua.

2.6.2 Tuberías de revestimiento

- a) *Casing conductor:*** Es la primera sección que se cementa al iniciar la perforación, con una profundidad de asentamiento que varía entre 90 y 150 pies, y en raras ocasiones hasta 300 pies. Su objetivo principal es establecer un medio de circulación y control de los fluidos de perforación que retornan del pozo hacia el equipo de eliminación de sólidos y los tanques de tratamiento. Esto permite continuar perforando hasta alcanzar la profundidad de asentamiento del revestimiento superficial. El diámetro de la tubería utilizada varía entre 16 y 30 pulgadas, dependiendo en gran medida de la profundidad total planificada del pozo.
- b) *Casing superficial:*** El propósito principal es establecer conexiones superficiales de control y, al mismo tiempo, proteger el pozo descubierto al aislar flujos de agua y zonas de pérdida de lodo cercanas a la superficie. Estas tuberías se instalan a profundidades que van desde 150 hasta 3500 pies, y los diámetros se eligen en función de la profundidad total del pozo.
- c) *Casing intermedio:*** Se instalan con el propósito de aislar zonas que contengan presiones normales de formación, flujos de agua, derrumbes y pérdidas de circulación. En esencia, se utilizan como protección del pozo descubierto para abordar, en la mayoría de los casos, el aumento de la densidad de los fluidos de perforación y controlar las zonas de alta presión. Dependiendo de la profundidad del pozo o de los problemas encontrados durante la perforación, puede ser necesario colocar una o más sargas de tuberías de revestimiento intermedias para aislar la zona problemática.

- d) Casing de producción:* El objetivo principal es aislar el yacimiento de fluidos no deseados en la formación productora y de otras zonas del pozo. También se emplean para la instalación de empacadores de producción y otros accesorios durante la terminación del pozo. Para la cementación de esta tubería, se requiere el uso de lechadas de cemento con aditivos especiales adaptados a las condiciones del pozo, como altas temperaturas y presiones, entre otros parámetros.
- e) Casing liner:* Es una instalación especial que elimina la necesidad de utilizar una sarta de tubería desde la superficie hasta el fondo del pozo. La longitud de esta tubería es suficiente para cubrir el pozo descubierto, con una sección que se solapa dentro de la última tubería, cuya longitud puede variar entre 150 y 450 pies, y a veces se utiliza una mayor longitud según el objetivo específico. Estas tuberías cortas pueden ser instaladas en el intervalo deseado mucho más rápidamente que las tuberías normales. A medida que continúa la perforación, la tubería de revestimiento sufre desgaste, por lo que estas tuberías cortas ayudan a compensar ese desgaste. Además, evitan la necesidad de grandes volúmenes de cemento, ya que no se cementan hasta la superficie.

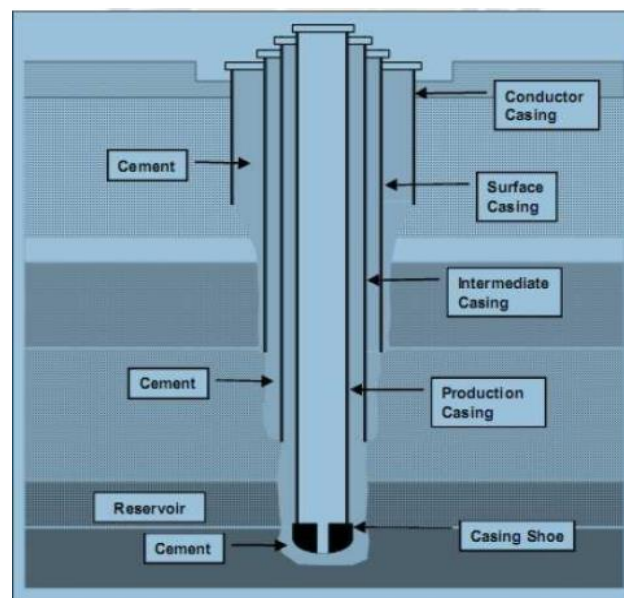


Figura 5. Esquema de casing en un pozo- (Edwards, 2019)

2.7 CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS

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

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

2.7.1 Cemento clase A o tipo I

Este tipo de revestimiento está diseñado para utilizarse a profundidades máximas de 6000 pies, con una temperatura de hasta 170°F, y en casos donde no se necesiten propiedades especiales.

2.7.2 Cemento clase B o tipo II

Diseñado para uso a profundidades de hasta 6000 ft y a temperaturas de hasta 170°F donde se requiere una resistencia moderada a los sulfatos.

2.7.3 Cemento clase C o tipo III

Este revestimiento está diseñado para ser utilizado en profundidades de hasta 6000 pies como máximo, con una temperatura máxima de 170°F. Se caracteriza por su alta resistencia a la compresión temprana y está disponible en versiones de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

2.7.4 Cemento clase D

Este tipo de cemento se utiliza en profundidades que van desde 6000 hasta 10000 pies, con una temperatura máxima de hasta 230°F y presión moderada. Se encuentra disponible en versiones dependiendo de la resistencia a los sulfatos estos van de moderada a alta.

2.7.5 Cemento clase E

Este cemento se utiliza a una profundidad de 6000 a 14000 ft a una temperatura de 289°F y bajo alta presión. Tiene una tolerancia a los sulfatos de media a alta.

2.7.6 Cemento clase F

Este tipo de cemento se emplea en profundidades que van desde los 6000 hasta los 16000 pies, con temperaturas de hasta 320°F y en áreas de alta presión. Debido a estas condiciones, generalmente se produce con resistencia moderada a alta a los sulfatos.

2.7.7 Cemento clase G y H

Comúnmente conocido como cemento de petróleo, se puede utilizar básicamente desde la superficie hasta los 7340 ft cuando sale de la planta. Se pueden modificar con aceleradores y retardadores para que puedan usarse a diferentes presiones y temperaturas.

Son fabricados con especificaciones físicas y químicas más estrictas y, por lo tanto, son un producto más homogéneo.

2.7.8 Cemento clase J

Este cemento, aún en fase experimental, fue desarrollado para operar a una temperatura estática de 351°F en profundidades que oscilan entre 12000 y 16000 pies. Se diseñó sin necesidad de harina silícica para evitar la disminución de la resistencia a la compresión.

Clasificación API	Mezcla con Agua (gal/saco)*	Peso de la Lechada (lbm/gal)	Profundidad del Pozo (pies)	Temperatura Estática (°F)
A (Portland)	5,2	15,6	0 a 6.000	80 a 170
B (Portland)	5,2	15,6	0 a 6.000	80 a 170
C (Rápido Endurecimiento)	6,3	14,8	0 a 6.000	80 a 170
D (Retardado)	4,3	16,4	6.000 a 12.000	170 a 260
E (Retardado)	4,3	16,4	6.000 a 14.000	170 a 290
F (Retardado)	4,3	16,2	10.000 a 16.000	230 a 320
G (Básico)**	5,0	15,8	0 a 8.000	80 a 200
H (Básico)**	4,3	16,4	0 a 8.000	80 a 200

* Ver tabla 2,8 para los pesos y volúmenes de los sacos de cemento
** Puede ser acelerado o retardado para la mayoría de las condiciones de pozo

Figura 6. Clasificación API del cemento (BJ Services Company, 2001)

2.8 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS CEMENTOS

Los cementos utilizados en el campo petrolero, especialmente en la industria de la perforación y producción de pozos petroleros, deben cumplir con ciertas propiedades físicas específicas para garantizar la integridad y seguridad del pozo. Algunas de estas propiedades físicas incluyen:

2.8.1 Gravedad específica

Se refiere al peso por unidad de volumen, excluyendo otros materiales como el aire o el agua. Es decir, representa el peso de los granos de cemento específicamente. Sus unidades para el estudio son gramos por centímetro cúbico (gr/cm^3) o preferentemente para campo (lb/gl).

2.8.2 Peso volumétrico

Se refiere al volumen por unidad de masa, teniendo en cuenta el aire contenido entre los granos de cemento. Las unidades para este estudio incluyen gramos por centímetro cúbico (gr/cm^3).

2.8.3 Fineza de los granos de cemento

Indica el tamaño de las partículas de cemento. Su mayor impacto se produce en las necesidades de agua para la producción de purines. Esta propiedad es el factor determinante en la clasificación del cemento, pero no es el único. La unidad de medida es cm^2/gr , m^2/kg .

2.8.4 Distribución del tamaño de partícula

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

2.8.5 Tamaño promedio de partículas

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

2.8.6 Requerimiento de agua normal

Es la cantidad de agua necesaria para la lechada hecha únicamente con cemento. Por lo general debe alcanzar 11 Uc a los 20 minutos de agitación usando el consistómetro a presión atmosférica y temperatura ambiente; se expresa como un porcentaje del peso del cemento.

2.8.7 Requerimiento de agua mínima

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

2.8.8 Densidad de la lechada

Se denota como el peso de la mezcla del cemento con agua y se coloca en función de la relación de agua por emplear. Sus unidades de campo son (lb/gl).

2.8.9 Ángulo de talud natural del cemento

Es el ángulo que forma el material granulado cuando se deposita en una superficie plana horizontal; sirve para el diseño de la planta dosificadora de cemento y para recipientes a presión.

2.9 PROPIEDADES MECÁNICAS

Según (Infinitia Industrial Consulting, s.f.) las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a la capacidad de estos de resistir acciones de cargas o fuerzas. Podemos decir que las propiedades mecánicas se clasifican en:

Por acción:

- **Estáticas:** Se refiere a las fuerzas que actúan sobre un cuerpo en equilibrio, es decir, cuando la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es cero.
- **Dinámicas:** Son las fuerzas que varían con el tiempo o que causan movimiento en un sistema. Estas cargas pueden ser impulsos, vibraciones, o fluctuaciones en la intensidad, frecuencia o dirección de la fuerza aplicada sobre un objeto o estructura.
- **Cíclicas o de signo variable:** Las cargas varían por valor, por sentido o por ambos simultáneamente.

Las propiedades mecánicas principales son: dureza, resistencia, elasticidad, plasticidad y resiliencia, aunque también podrían considerarse entre estas a la fatiga y la fluencia.

Cohesión: La cohesión se refiere a la fuerza de atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas. Esta propiedad es fundamental y se manifiesta como una característica esencial de la materia, siendo responsable de que se pueda organizar en formas duraderas y resistentes.

Plasticidad: Es la capacidad de un material para deformarse permanentemente sin fracturarse cuando se le aplica una carga por encima de su límite elástico. Esto significa que el material puede cambiar su forma de manera permanente y mantener esta nueva forma después de que se elimina la carga aplicada.

Maleabilidad: Facilidad a deformarse en láminas. Es una variación plástica ante la aplicación de carga o fuerza.

Ductilidad: Facilidad a deformarse en hilos.

Dureza: Esta propiedad se refiere a la resistencia de un material a la deformación plástica, al ser rayado, corte o penetración bajo carga aplicada. El diamante es un ejemplo claro este es duro porque rayarlo es muy complicado, a diferencia del talco.

Resistencia: Es una medida de la capacidad del material para soportar cargas externas antes de que ocurra una falla estructural. La resistencia de un material puede evaluarse en términos de resistencia a la tracción, compresión, flexión, cizallamiento u otros tipos de esfuerzos, dependiendo del modo de carga y las propiedades específicas del material en cuestión.

Elasticidad: Se refiere a la propiedad que presentan los materiales de volver a su estado inicial cuando se aplica una fuerza sobre él. La deformación recibida ante la acción de una fuerza o carga no es permanente, volviendo el material a su forma original al retirarse la carga.

Higroscopicidad: Es una propiedad de algunos materiales, en los cuales pueden absorber agua de su ambiente circundante.

Hendibilidad: Es la propiedad de un material de formar hendiduras o grietas cuando se somete a un esfuerzo de compresión o flexión

Resiliencia: Es la capacidad del material para oponer resistencia a la destrucción producto de una carga dinámica.

2.10 PROPIEDADES ELÁSTICAS

2.10.1 Módulo de Young

También conocido como módulo de elasticidad longitudinal o simplemente elasticidad, es una propiedad mecánica fundamental que describe la rigidez de un material elástico o sólido deformable bajo tensión o compresión uniaxial (a lo largo de un solo eje) (Servosis, 2020)

Cuando aplicamos una fuerza de tensión o compresión a un material elástico, este experimenta una deformación proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada. El módulo de Young se define como la relación entre el esfuerzo (fuerza aplicada por unidad de área) y la deformación unitaria (cambio relativo de longitud) a lo largo de la dirección de la fuerza aplicada. Matemáticamente, se expresa como:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Donde:

E: Es el módulo de Young (en unidades de presión, como psi o Pa)

σ : Es el esfuerzo (en psia o Pa)

ϵ : La relación entre el cambio en la longitud del material (ΔL) y la longitud original (L)

El módulo de Young representa la pendiente de la región lineal de la curva tensión-deformación en el diagrama tensión-deformación.

Cuanto mayor sea el módulo de Young, más rígido será el material y menos se deformará bajo la aplicación de una carga. Por el contrario, los materiales con un módulo de Young más bajo se deforman más fácilmente.

Es importante señalar que el módulo de Young es válido sólo en el rango elástico del material, es decir, cuando el material se deforma reversiblemente y vuelve a su forma original después de que se retira la carga.

Superar este rango puede deformar permanentemente o incluso romper el material.

En el entorno de los yacimientos petrolíferos, el módulo de Young es una propiedad importante para evaluar la capacidad de los materiales de revestimiento y cemento para soportar cargas mecánicas.

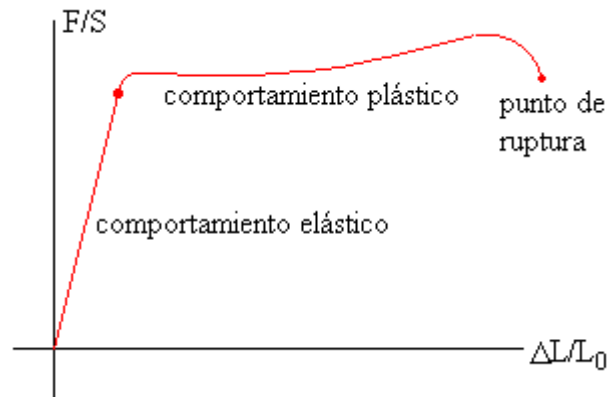


Figura 7. Módulo de Young - (Diaz Rubio, 2021)

2.10.2 Relación de Poisson

Siempre que un cuerpo se somete a la acción de la fuerza, se deformará en la dirección de la fuerza. Sin embargo, siempre que se producen deformaciones en la dirección de la fuerza aplicada, también se producen deformaciones laterales.

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

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

La relación de Poisson puede ser positiva o negativa, dependiendo del tipo de material y de sus propiedades intrínsecas. Los materiales típicos de ingeniería, como metales y plásticos, tienen una relación de Poisson positiva, lo que significa que se contraen lateralmente cuando se estiran axialmente (tensión) y se ensanchan lateralmente cuando se comprimen axialmente (compresión).

En general, el valor de esta comprendido entre 0 y 0.5 pero para la mayoría de los materiales está entre 0.25 y 0.35. La única excepción es cuando se impide que se efectúe libremente el movimiento lateral. Un material que, bajo un esfuerzo, se

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

En el ámbito petrolero, se valora la relación de Poisson al evaluar la integridad de los materiales de revestimiento y cemento en los pozos. Buscamos obtener altos valores del módulo de Poisson, ya que estos permiten soportar cargas más elevadas.

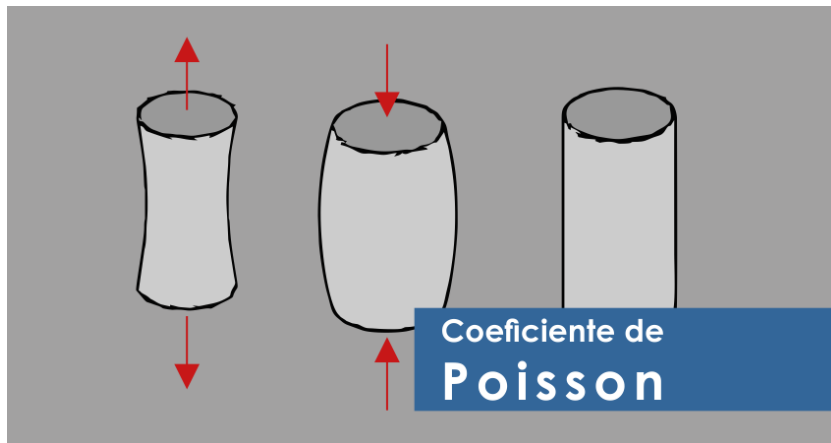


Figura 8. Descripción grafica del coeficiente de Poisson - (Reis, 2020)

2.11 ADITIVOS

La temperatura y presión a la cual está sometido un pozo, son algunos de los parámetros que influyen en el diseño de una lechada que sea capaz de adecuarse a las condiciones de un pozo específico. Para adecuarlas existen compuestos que se agregan a la mezcla y que modifican las propiedades de esta. A estos compuestos se les llama aditivos, que permiten que la lechada llegue a la zona de interés, y que el cemento cumpla con la función para la cual fue diseñado. A continuación, se mencionarán algunos de los aditivos más utilizados en la industria petrolera (Apolinario Del Pezo & Lucas del Pezo, 2014)

2.11.1 Aditivos para lechadas de cemento convencionales

Este tipo de aditivos son utilizados para obtener lechadas de cemento que nos permitan cubrir los requerimientos de un pozo. Las características más comunes para afectar por estos aditivos son:

- Densidad
- Resistencia a la compresión
- Propiedades de fluido (reología)
- Agua libre
- Pérdida de fluido

2.11.2 Aceleradores

Según (Valdivia Montalván, 2016) Los aditivos aceleradores de fraguado del cemento tienen como objetivo principal reducir el tiempo necesario para que el cemento fragüe completamente. Estos aditivos son especialmente útiles en aplicaciones como tuberías superficiales, pozos poco profundos y tapones de cemento.

Entre los aceleradores más comunes se encuentran:

- **Cloruro de calcio (CaCl_2)**

El cloruro de calcio es un acelerador de fraguado eficaz. Ayuda a reducir el tiempo de fraguado del cemento, lo que significa que el cemento adquiere resistencia más rápidamente después de mezclarlo y colocarlo en el pozo también puede mejorar la resistencia temprana del cemento. Otras de sus características son las siguientes:

- El más comúnmente usado
- De un 2 a 4% por peso de cemento
- Resiste temperatura circulante de 50 a 100 °F
- En bajas concentraciones disminuye la viscosidad
- Incrementa la viscosidad y la pérdida por filtrado a altas concentraciones

- **Cloruro de sodio (NaCl)**

Comúnmente conocido como sal común, se utiliza a veces como aditivo en la industria del cemento, aunque su uso no es tan común como otros aditivos. Su función principal en el cemento está relacionada con el control del tiempo de fraguado y la densidad del lodo de cemento. Aquí hay algunas formas en las que el cloruro de sodio puede afectar las propiedades del cemento:

- Retardador de fraguado
- Control de la densidad
- Supresor de la expansión del cemento
- Modificación de las propiedades reológicas

2.11.3 Densificantes

El objetivo de los densificantes es mitigar las altas presiones de formación. Estos aditivos se emplean para formular lechadas con densidades superiores a 18 lb/gal, lo cual requiere una cantidad baja de agua y asegura un tamaño de partícula uniforme. Los densificantes son químicamente inertes y se pueden combinar sin problemas con otros aditivos.

➤ **Hematita (óxido de hierro)**

La hematita es otro agente sellador común que se utiliza en la cementación de pozos. Al igual que la barita, se añade al cemento para aumentar su densidad.

La hematita es un material denso y no tóxico que proporciona alta densidad a la lechada de cemento.

➤ **Óxido de Zinc**

El óxido de zinc es un densificante que se utiliza ocasionalmente en la cementación de pozos. Se agrega al cemento para aumentar su densidad y proporcionar la presión de

fondo de pozo adecuada. El óxido de zinc es un material denso y no tóxico que puede proporcionar una alta densidad al lodo de cemento.

2.11.4 Retardadores

En algunos pozos profundos y de altas temperaturas, el fraguado puede ocurrir antes de llegar a la zona de interés; para evitar esto, se agregan retardadores que hacen que la lechada fragüe en tiempos más largos; aunque reducen la resistencia a la compresión. Algunas de las características que pueden tener este tipo de aditivos son:

- Ambientalmente amigable
- Buen desarrollo de resistencia temprana
- Mejora el control de filtrado a altas temperaturas
- Resiste un rango de temperatura de 80 a 220 °F
- Concentraciones de entre 0.1 a 2% BWOC

2.11.5 Controladores de pérdida de fluido

Este tipo de aditivos tiene como propósito evitar la deshidratación de la lechada de cemento durante el bombeo cuando pasa frente a zonas permeables, donde se presenta el proceso de filtración. Estos aditivos funcionan evitando el flujo de agua desde la lechada hacia la formación. Algunas características de estos aditivos son:

- Efectivo a altas temperaturas
- Biodegradable
- Resiste temperaturas de entre 100 y 400 °F
- Propiedad viscosa ligera

2.11.6 Dispersantes o retardadores de fricción

Este tipo de aditivos son diseñados para mejorar la lechada de cemento y mejorar las propiedades de flujo. Bajan la viscosidad y pueden ser bombeados en régimen turbulento a bajas presiones. Con esto se minimiza la potencia requerida y se disminuyen las posibilidades de pérdida de circulación y deshidratación prematura. Algunas de las propiedades que poseen estos aditivos son:

- Reduce la viscosidad aparente y mejora las propiedades reológicas
- Concentraciones entre 0.3-1% BWOC
- Resiste un rango de temperatura mayor a 60°F
- Biodegradable
- Puede producir segregación

2.11.7 Controlador de gas

Un problema es la migración de gas a través del cemento. Las lechadas de cemento pueden transferir presión hidrostática en estado líquido y mantener el control de la presión. El cemento tiende a tener una consistencia de gel cuando está estático y también puede perder una pequeña cantidad de filtrado en áreas porosas debido a la reducción de volumen antes del fraguado.

Esta ruta de migración de gas es permanente y persiste incluso después de que el cemento se haya endurecido por completo. Para resolver este problema, se agregan los siguientes tipos de aditivos a la lechada de cemento para reducir el estado de gel del cemento.

Algunas de las propiedades de este aditivo son:

- Resiste temperaturas entre 60 y 230°F
- Disminuye la pérdida de filtrado
- Aumenta ligeramente la viscosidad

2.12 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA RESINA EPOXI

Las propiedades físico-mecánicas de este producto se pueden adaptar para satisfacer una variedad de desafíos de pozos. El producto puede ser controlado a través de una amplia gama de temperaturas desde 60°F hasta 200°F. Las resistencias a la compresión pueden variar desde ≤ 1000 psia a ≥ 18000 psi. Así mismo, la resistencia a la tracción o tensión puede variar desde 100 psi a ≥ 2000 psi. La resina epóxica es químicamente inerte y resistente al ácido, la base, e hidrocarburos. La resina epóxica puede soportar las impurezas en el pozo y lograr un estado con alta adherencia. Así, se puede formar

un sello hidráulico competente en un entorno donde los fluidos acuosos o hidrocarburos no han sido desplazados de manera eficiente

- La resina Epoxi puede proporcionar algunos beneficios tales como:
- Excelentes propiedades mecánicas
- Alta ductilidad
- Resistencias a la compresión de hasta 18000 psi.
- Soportar 100 veces más la presión típica diferencial requerida dentro del pozo.
- Alta presión de sello de 1000 psi/pie.
- Resistencia a las impurezas en el pozo y lograr establecer un estado con alta fuerza de adherencia.
- Sin límite de elasticidad como el líquido.
- Perforable luego de su compactación o solidificación.
- Flexible en la técnica de desplazamiento y puede ser utilizada en condiciones extremas de pozos y geometrías distintas.

2.12.1 Compatibilidad de los fluidos dentro del pozo con la resina epoxi

El sistema de resina ha demostrado ser compatible con cemento, agua y otros fluidos a base de agua. Sin embargo, es crucial evaluar cuidadosamente la compatibilidad de la resina con los fluidos con los cuales estará en contacto en el pozo, como cementos, fluidos de perforación, espaciadores y fluidos del pozo. Es necesario primero determinar si hay algún efecto de aceleración de la resina. Se recomienda realizar pruebas de tiempo de bombeabilidad de la resina contaminada con el fluido específico de interés, utilizando concentraciones de contaminación recomendadas de 5% y 25% en volumen. Cualquier cambio en el tiempo de bombeabilidad debe ser registrado adecuadamente (Rosero, 2015).

Además, se deben llevar a cabo evaluaciones reológicas y de desarrollo de resistencia mecánica para identificar posibles efectos adversos de la contaminación, como gelificación excesiva o aceleración de la reacción. Estas pruebas reológicas deben realizarse con contaminaciones de 5%, 25%, 50%, 75% y 95% en volumen. Además, se deben realizar pruebas de esfuerzo compresivo destructivo utilizando contaminaciones de 5% y 25% en volumen.

2.12.2 Comparación físico-mecánica entre el cemento y la resina epoxi

A simple vista y conceptualmente, es evidente distinguir las diferencias entre estos dos productos. El cemento consiste en una mezcla de carbonato de calcio con óxidos y aluminio, calentada a altas temperaturas y finamente molida con una cantidad de yeso que puede variar, dando lugar a diferentes tipos de cemento. Estas mezclas contienen partículas que deben hidratarse para formar un cemento fraguado que cumpla con las especificaciones de trabajo requeridas.

Por otro lado, la resina es una combinación química de sustancias que forma un polímero, presentándose como un fluido viscoso que es más adaptable debido a sus propiedades dúctiles, especialmente en formaciones cerradas o compactas. Cuando se bombea antes del cemento, la resina se deposita como una película sobre la formación y el revestimiento exterior (casing), mejorando significativamente la adherencia de la lechada de cemento.

En las siguiente imagen se puede apreciar la diferencia entre la adhesión de cemento cuando se aplica solo sin ningún aditivo y la adhesión de cemento con la aplicación de resina epoxi, sometidos a esfuerzos de tensión, en donde se puede observar que la curva llega a su punto máximo de cedencia a los 170 psi, no obstante la curva negra expresa que la adhesión de cemento con resina epoxi puede soportar un esfuerzo de hasta 1020 psi, demostrando de esta manera que la aplicación de resina epoxi mejora la adherencia del cemento al revestidor hasta seis veces más.

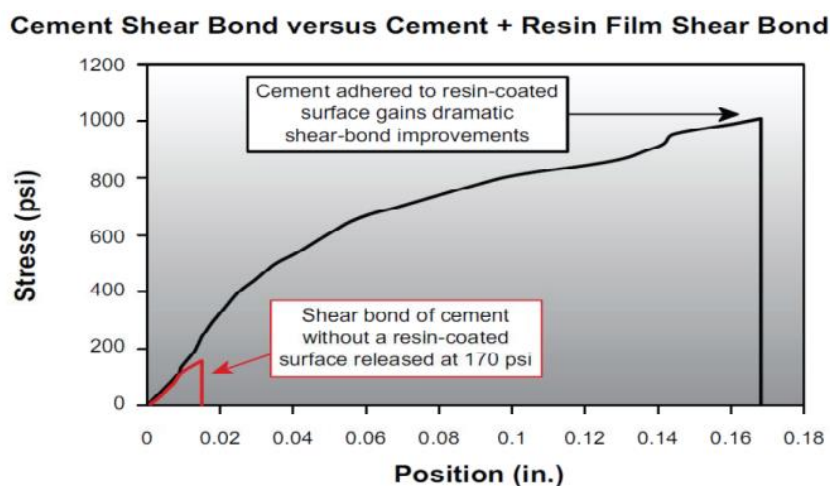


Figura 9. Adherencia del cemento con resina epoxi-Fuente: (Rosero, 2015)

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describe detalladamente la metodología utilizada para llevar a cabo el estudio técnico sobre la aplicación de resina epoxi como aditivo en el proceso de cementación en los pozos del campo Auca. La metodología incluye el diseño del estudio, los procedimientos experimentales, la recogida y el análisis de datos, así como consideraciones de seguridad y medioambientales. Se pretende ofrecer una guía clara y detallada de los pasos y técnicas utilizados para garantizar la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos.

El diseño de esta investigación es de tipo experimental controlado, donde se compararán muestras de cemento con y sin el aditivo de resina epoxi bajo condiciones controladas de laboratorio. Las variables independientes incluyen la presencia y concentración de resina epoxi, mientras que las variables dependientes incluyen la resistencia a la compresión, la adherencia y la permeabilidad del cemento.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL

Las muestras de cemento y resina epoxi serán seleccionadas de acuerdo con las especificaciones técnicas estándar de la industria. Se utilizarán dos grupos de muestras: un grupo control sin aditivo de resina epoxi y un grupo experimental con diferentes concentraciones de resina epoxi.

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO A UTILIZARSE

3.3.1 Balanza electrónica

El peso indicado en la pantalla de la balanza deberá tener una exactitud de más o menos 1% del peso indicado y deberá tener la capacidad necesaria para pesar por lo menos 1.5 kg. La balanza deberá ser calibrada con suficiente frecuencia para asegurar su precisión, como mínimo, una vez al año.



Figura 10. Balanza electrónica- Equipo del laboratorio de Petróleos “UPSE”

3.3.2 Balanza de lodos

Una balanza de lodos es un tipo de balanza utilizada en laboratorios para medir masas con alta precisión capaz de medir masas con una precisión de hasta 0.001 gramos o incluso más fina, dependiendo del modelo inclusive también para minimizar los errores en la medición.



Figura 11. Balanza de lodos – Equipo del laboratorio de Petróleos “UPSE”

3.3.3 Mezcladora Chandler

Esta máquina es la recomendada a usarse en la preparación de lechadas en un ambiente controlado, debe tener un vaso con capacidad de 0.95 L (1/4 de gal), un rotor en el fondo y aspas tipo licuadora.

El vaso de mezclado al ser un metal, así mismo como las aspas, deberán ser construidos o protegidos con algún material resistente a la corrosión. El ensamble de mezclado deberá estar construido de tal manera que las aspas puedan ser retiradas con facilidad, esto se debe realizar debido a un problema con la lechada de cemento debido a que estas por lo general suelen ser muy abrasivas, por esta razón, el monitoreo constante de las aspas es de suma importancia, y para esto debemos tener un margen de daño de estas que por lo general es cuando estas han perdido un 10% de su peso original, cuando ocurra esto deben ser reemplazadas de inmediato por unas nuevas, algo adicional a tomar en cuenta es si existe filtrado en el vaso, si esto ocurre lo primordial sería, retirar todo y empezar de nuevo.



Figura 12. Mezcladora Chandler- Equipo del laboratorio de Petróleos “UPSE”

3.4 SELECCIÓN DE MATERIALES

Esta sección detalla la selección de materiales necesarios para utilizar epoxi como aditivo en el proceso de cementación de pozos en el campo Auca. La elección de los materiales es crítica para garantizar la eficiencia y durabilidad del proceso de cementación, así como la seguridad y viabilidad económica del proyecto si se decide implementar en los pozos del campo Auca.

3.4.1 Requisitos de los materiales

Los materiales seleccionados deben cumplir con varios requisitos esenciales para asegurar el éxito del proceso de cementación. Estos incluyen compatibilidad química con el entorno del pozo, propiedades mecánicas adecuadas para soportar las condiciones de alta presión y temperatura, durabilidad frente a condiciones adversas, y un impacto ambiental mínimo. Además, la viabilidad económica y la disponibilidad de los materiales son factores importantes para considerar.

3.4.2 Descripción de la resina Epoxi

La resina epoxi es un polímero termoestable que, cuando se mezcla con un agente endurecedor, forma un material sólido con excelentes propiedades adhesivas y mecánicas. Su composición química típica incluye bisfenol A y epiclohidrina. La resina epoxi ofrece una alta resistencia a la compresión y tracción, además de una excelente adhesión a diversas superficies, lo que la convierte en un candidato ideal para mejorar las propiedades del cemento utilizado en la cementación de pozos.



Figura 13. Resina Epoxi-Fuente: Elaboración propia

- Mejora de la integridad del pozo: La adición de resina epoxi al cemento puede mejorar la capacidad de sellado, reduciendo el riesgo de fallas y fugas.
- Durabilidad: Su resistencia a la compresión y a la corrosión prolonga la vida útil del cemento, asegurando un rendimiento óptimo a largo plazo.
- Flexibilidad: La resina epoxi puede adaptarse a diferentes condiciones operativas, proporcionando una solución versátil para diversos desafíos en la cementación.

3.4.3 Cemento Portland

Además de la resina epoxi, se utilizarán otros materiales clave en el proceso de cementación. El cemento Portland es el material de cementación primario debido a su disponibilidad y coste. Se considerarán diversos aditivos como retardadores para controlar el tiempo de fraguado, y agentes dispersantes para mejorar la homogeneidad de la mezcla.



Figura 14. Cemento Portland- Fuente: Elaboración propia

3.5 EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE MATERIALES

A continuación, se presenta una tabla comparativa que destaca las propiedades mecánicas, estabilidad térmica, costo e impacto ambiental de la resina epoxi en comparación con otros aditivos potenciales del mercado, los cuales también tienen presencia dentro de la industria como posibles soluciones.

Propiedad	Resina Epoxi	Fibra de polipropileno	Resina de Poliuretano
Resistencia a la compresión (MPa)	80	60	55
Estabilidad térmica (°F)	248	212	230
Costo (USD/Kg)	10	8	7
Impacto Ambiental	Bajo	Medio	Alto

Tabla 1. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE MATERIALES-Elaboración propia

3.6 PREPARACIÓN DE LA LECHADA DE CEMENTO

En este estudio se llevaron a cabo cuatro pruebas experimentales para confirmar la elección de la resina epoxi cada una variaba en concentración del aditivo y una se realizó como lechada base. Las pruebas incluyeron evaluar factores como densidad, filtrado y reología de mezclas de cemento con diferentes porcentajes de resinas epoxi.

No es posible realizar una evaluación adecuada del material a menos que se haya probado una muestra representativa del material. El uso de métodos de almacenamiento adecuados es especialmente importante para evitar que el cemento quede expuesto a la humedad y/o al dióxido de carbono del aire.

3.6.1 Equipo necesario para el estudio

Elementos para el estudio:

- 1 kg de cemento de construcción Portland
- 1 litro de agua
- Ningún aditivo

Material y equipo necesario:

- Jarra con tapa plástica (opcional) que tenga capacidad para un 1 kg
- Pala o espátula
- Cuchara metálica de acero inoxidable
- Cuchara metálica de acero inoxidable
- Mezcladora Chandler o manual
- Balanza de lodos
- Guantes
- Jarra de plástico con capacidad para 2 litros
- EPP (Equipo de protección personal)

3.6.2 Fórmulas para el cálculo de la densidad y el volumen

Para este estudio se usará un volumen de lechada de 600 ml el cual nos permitirá ejecutar las pruebas necesarias y concisas para lograr el objetivo propuesto.

Para estos requerimientos se pueden hacer los cálculos usando las siguientes fórmulas:

- $V_l = V_c + V_w + V_a$
- $M_l = M_c + M_w + M_a$

$$\rho_l = \frac{M_c}{V_l}$$

$$V_c = \frac{M_c}{\rho_c}$$

$$V_w = \frac{M_w}{\rho_w}$$

$$V_a = \frac{M_a}{\rho_a}$$

Donde:

V_l = Volumen de la lechada (ml)

V_c = Volumen de cemento (ml)

V_w = Volumen de agua (ml)

V_a = Volumen del aditivo (ml)

ρ_l = Densidad de la lechada de cemento (gr/ml)

ρ_w = Densidad del agua (gr/ml)

ρ_a = Densidad del aditivo (gr/ml)

M_l = Masa de la lechada (gr)

M_c = Masa del cemento (gr)

M_w = Masa del agua (gr)

M_a = Masa del aditivo (gr)

3.6.3 Temperatura del agua y el cemento

Este es un apartado muy importante a tener en cuenta, la temperatura del agua que se va a usar para la mezcla así mismo como el cemento en seco, deben ser tomados en referencia a como se harían durante la aplicación de la mezcla en la condiciones del campo, si en tal caso eso resulta desconocido, las temperaturas referencias en las que normalmente el estudio funciona y no ocurre ningún problema de gravedad, es que el cemento seco y el agua deben estar a una temperatura de 73°F, esta temperatura debe ser inmediata al momento de mezclar.

Controlar la temperatura del cemento y el agua al preparar compuestos de resina epoxi es fundamental para garantizar un curado adecuado, mantener la trabajabilidad del compuesto y asegurar las propiedades mecánicas y la durabilidad del producto final. Una gestión cuidadosa de la temperatura ayuda a optimizar los resultados y a evitar posibles problemas durante y después de la aplicación.

3.6.4 Mezclado del cemento y agua

Los materiales secos para utilizar durante la preparación de la lechada deberán ser pesados y mezclados uniformemente en un recipiente con tapa, o en algún material que contenga la mezcla y pueda evitar la fuga de este, al momento de ser agitados manualmente y colocados para la mezcla. Para realizar la lechada con el cemento tipo H esta debe contener 860 gr de cemento y 327 gr de agua.

El vaso donde se hará el proceso de mezclado con el agua requerida y el aditivo a usarse debe colocarse primero en la base de la mezcladora, verificando que al momento de tapar esta no permita que se derrame líquido al momento de encender la mezcladora, una vez listo esto, lo siguiente es encender la máquina y que esta se encuentra en la primera velocidad que usualmente es 4000 RPM, durante este proceso debemos tener en cuenta el tiempo que se está mezclando. No se debe agregar el cemento si dentro de la mezcla anterior existen aditivos líquidos sin mezclarse de manera homogénea. Una vez que estos aditivos ya que se encuentran completamente mezclados, con cuidado se debe extraer la tapa de la mezcladora y agregar el cemento, en este punto la velocidad sigue siendo la misma (4000 RPM) con un tiempo estimado de mezcla de entre 15 a 35 segundos.

3.7 DENSIDAD DE UNA LECHADA DE CEMENTO

Elementos para el estudio:

- 1 kg de cemento Clase HE (Hormigón)
- 1 litro de agua

Material y equipo de laboratorio:

- Jarra de plástico con una capacidad de 1 kg
- Removedor o Cuchara metálica (Acero inoxidable)
- Cucharón metálico de acero inoxidable
- Mezcladora Chandler
- Balanza de lodos
- Balanza para la medición de la densidad
- Jarra de plástico con capacidad de 2 litros
- EPP (Equipo de protección personal)

La densidad es una de las características más cruciales de una lechada de cemento, ya que determina la presión hidrostática ejercida sobre la formación. En áreas con baja presión de formación, la lechada debe ser lo suficientemente ligera para evitar fracturas o daños a la formación. Por otro lado, en zonas con alta presión de poro, debe proporcionar la presión hidrostática necesaria para controlar la presión de formación y evitar la entrada de fluidos de la formación sin causar daños. La densidad de la lechada debe ser igual o ligeramente mayor que la del fluido de perforación, teniendo en cuenta no exceder el gradiente de fractura.

Otro agente densificante es la barita o sulfato de bario, que se utiliza habitualmente en los lodos de perforación para aumentar el peso del fluido; sin embargo, su uso en lodos es menos recomendable debido a su baja pureza. Estos materiales se utilizan en porcentajes relativamente altos en comparación con los aditivos generales, garantizando siempre que se alcance el peso deseado del lodo mediante el equilibrio de los materiales. También se puede aumentar la densidad reduciendo la cantidad de agua en la mezcla. En estos casos, debe aumentarse el porcentaje de dispersante para compensar el aumento de viscosidad.

3.7.1 Equipo recomendado para la medición

El método recomendado para determinar la densidad de la lechada de cemento es mediante el equilibrio de densidad del líquido bajo presión.

El dispositivo tiene un funcionamiento similar a una balanza de pulpa convencional excepto que la pulpa se puede colocar bajo presión en un recipiente de muestra de volumen fijo.

3.7.2 Calibración del equipo

El aparato es verificado para calibración colocando agua o un fluido más pesado de densidad conocida dentro de la copita de la balanza, o introduciendo en ésta pesos manufacturados para densidades equivalentes lo cuál para este estudio no se realizó.

3.7.3 Modo de uso

La lechada para la medición debe prepararse, siguiendo los pasos anteriormente mencionados con el cemento Portland con la única diferencia que ahora se usara el cemento tipo HE el cuál es un cemento de hormigón con características parecidas al de tipo H que se usa en el campo, es por esto por lo que hay que tomar en cuenta y de manera muy cautelosa los parámetros necesarios para la medición, tales como el requerimiento de agua, la gravedad específica del cemento HE, datos que deben ser proporcionados para el estudio.

Una vez revisado esto se debe colocar la medida en la copa de la balanza y posteriormente colocar la tapa vigilando que, al cerrarla, se deje escapar un poco el exceso por medio del orificio superior.

Una vez la lechada está en posición en la copa, se procede a medir la densidad mediante la regla, moviendo de un lado a otro el peso, hasta poder lograr el equilibrio para determinar la densidad.

3.8 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA LECHADA DE CEMENTO

Elementos para el estudio:

- 1 kg de cemento clase HE (Hormigón) y 1 kg de cemento tipo H (Clasificación API)
- 1 litro de agua

Equipo de laboratorio necesario:

- Recipiente de metal con capacidad optima de 1 kg
- Removedor o Cuchara metálica (Acero inoxidable)
- Balanza de lodos
- Jarra de plástico con capacidad de 2 litros
- Mezcladora Chandler
- Viscosímetro de FANN
- Cronómetro
- Termómetro de Hg
- EPP (Equipo de protección personal)

Las lechadas de cemento son mezclas densamente compactadas de partículas sólidas suspendidas en agua. El contenido de sólidos de las lechadas de cemento puede llegar al 70%. En la reología de una lechada de cemento influyen las propiedades del fluido portador, la fracción volumétrica de los sólidos (relación entre el tamaño de las partículas y el volumen total) y la interacción entre las partículas. Por lo tanto, la reología de la lechada es diferente de la reología del agua. La cantidad de sólidos en una lechada está directamente relacionada con su densidad.

Al mezclar cemento en polvo y agua, se forma una estructura de gel en toda la lechada que impide el flujo bajo esfuerzos de corte inferiores al umbral de cedencia. Esto se debe a la interacción electrostática entre las partículas. En este estado, la lechada se comporta como un sólido, lo que puede provocar deformaciones finitas por compresión o deslizamiento, pero no permite el flujo. Experimentalmente, las curvas que relacionan el esfuerzo de cizallamiento y la velocidad de cizallamiento son aproximadamente lineales; la pendiente de esta línea representa la viscosidad plástica y su intersección con el eje y da el valor de fluencia. La viscosidad aparente, que se calcula como la relación entre el

esfuerzo de cizallamiento y la velocidad de cizallamiento, no es constante, sino que disminuye al aumentar el esfuerzo de cizallamiento. Una vez sobrepasado el límite elástico, la suspensión deja de comportarse como una unidad cohesiva y se desintegra en partes y agregados de partículas que se desplazan entre sí. Estos agregados contienen agua intersticial, lo que aumenta el volumen efectivo de la fase dispersa más allá del volumen de los granos de cemento. El volumen de la fase dispersa es un factor crucial para determinar la reología de la dispersión.

3.8.1 Viscosímetro de Fann

El viscosímetro Fann, también conocido como viscosímetro rotacional Fann o medidor Fann VG, es una herramienta esencial en la industria de la perforación de petróleo y gas que se utiliza para medir la viscosidad y otras propiedades reológicas de los fluidos de perforación. Este instrumento desempeña un papel fundamental en la evaluación del comportamiento de estos fluidos en diversas condiciones de flujo y tensión, y proporciona datos esenciales para optimizar las operaciones de perforación.

El viscosímetro Fann funciona según el principio de medición del par en función de la velocidad. Consiste en un motor que hace girar un cilindro interior (rotor) dentro de un cilindro exterior inmóvil (estator), con el fluido de perforación en el espacio anular entre los dos cilindros. Al girar el rotor, el fluido de perforación resiste los movimientos y genera un par que mide el instrumento.

En este tipo de viscosímetro, la muestra se coloca entre dos cilindros concéntricos con radios R_1 y R_2 (donde $R_2 > R_1$), uno de los cuales, el rotor, gira a una velocidad constante Ω . El movimiento del rotor en presencia de la muestra en suspensión genera un par de torsión, que suele medirse en la pared interior del cilindro, aunque también actúa en la pared exterior del mismo. El radio del cilindro debe ser adecuado para mantener la muestra homogénea y el esfuerzo cortante lo más uniforme posible.

➤ **Especificaciones del Viscosímetro**

- Camisa

Diámetro interior: 36.83 mm (1.45 in)

Longitud total: Varía según el diseño

Línea guía: 58.4 mm (2.30 in) del fondo hacia arriba

- Péndulo

Diámetro: 34.49 mm (1.36 in)

Longitud del cilindro: 38 mm (1.50 in)

El péndulo consta de una base y tope planos

Con la ayuda de los datos que obtendremos de viscosímetro de Fann podremos usar fórmulas para calcular factores como, la velocidad nominal de corte y el esfuerzo de corte, para esto se usaran las siguientes fórmulas:

$$\gamma = 1.075 * \Omega$$

$$\tau \left(\frac{lbf}{100ft^2} \right) = 1.0678 * F * \theta$$

Donde:

Ω = Velocidad del viscosímetro en RPM $\left(\frac{Rev}{sg} \right)$

γ = Velocidad nominal de corte en sg^{-1}

θ = Lectura del viscosímetro en grados

F = Factor de torsión del instrumento

τ = Esfuerzo de corte en $lbf/100ft^2$

3.9 MODELADO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

Para caracterizar el comportamiento del flujo de la lechada de cemento (p. ej., presiones de rozamiento y régimen de flujo) en cualquier tipo de geometría (p. ej., tubería o espacio anular), es necesario seleccionar un modelo reológico que represente lo mejor posible los datos obtenidos. Para ello, los datos de velocidad y par deben convertirse en velocidad de cizallamiento y esfuerzo de cizallamiento mediante las siguientes ecuaciones:

$$\gamma = \frac{\pi R_2^2 x \Omega}{15 R_2^2 - R_1^2}$$

Y

$$\gamma = 144 \frac{T}{2\pi R_1^2}$$

Donde:

γ = Velocidad de corte sg^{-1}

Ω = Velocidad del viscosímetro rotacional (RPM)

τ = Esfuerzo de corte $\left(\frac{lb_f}{100ft^2}\right)$

T = Torque por unidad de longitud (lb_f)

R_2 = Radio de la camisa (pg)

R_1 = Radio del péndulo (pg)

Estas ecuaciones se van a desarrollar haciendo las siguientes suposiciones:

- La lechada es homogénea y el esfuerzo de corte es uniforme en el espacio anular
- Existe régimen de flujo laminar en el espacio anular
- El resbalamiento en la pared es cero
- El fluido exhibe esencialmente un comportamiento independiente del tiempo

El viscosímetro rotacional por utilizar debe ser capaz de poder medir esfuerzos de corte a velocidades de corte dentro de un rango establecido que suele ser de cero hasta 511 1/sg. Los instrumentos comúnmente usados proporcionan un mínimo de cinco lecturas dentro de su rango, el cual es un rango aceptable, ya que los instrumentos que otorgan menos de cinco lecturas velocidades de corte dentro de ese intervalo no son recomendables.

3.10 MODELOS REOLÓGICOS

Los modelos reológicos describen la relación entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte de un fluido. Los modelos más utilizados dentro de la industria para poder describir propiedades reológicas de las lechadas de cemento son el modelo plástico de Bingham y la ley de potencias.

3.10.1 Modelo plástico de Bingham

Cuando la velocidad de corte se grafica contra el esfuerzo de corte en un sistema de coordenadas rectangulares cartesianas, el comportamiento de la lechada de cemento como en este caso el modelo plástico de Bingham resultara como una línea recta con un esfuerzo de corte positivo a una velocidad de corte igual a cero.

Los fluidos que obedecen a este modelo se denominan fluidos plásticos de Bingham y exhiben un comportamiento lineal de esfuerzo cortante y velocidad de corte después de alcanzar un umbral inicial de esfuerzo cortante. (Schlumberger, 2024)

Para poder usar este modelo la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte estará expresada por la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p * \gamma$$

Donde, τ_0 es el esfuerzo de corte positivo a la velocidad de corte donde es igual a cero y comúnmente se denomina esfuerzo de cedencia o punto de cedencia. Por encima del punto de cedencia, el esfuerzo de corte del fluido es proporcional a la velocidad de corte. La constante de proporcionalidad μ_p se denomina viscosidad plástica (denotada comúnmente como V_p). También puede ocurrir el caso en el que el punto de cedencia es

igual a cero, si esto ocurre la ecuación se transforma en un modelo reológico mas simple, el cual es el modelo Newtoniano:

Las unidades para esta ecuación están en el Sistema Internacional, donde sus valores son $1/\text{sg}$ para la velocidad de corte, Pa para el esfuerzo de corte y el punto de cedencia, y Pa.s para la viscosidad plástica.

3.10.2 Modelo de ley de potencias

Un fluido que se ajusta al modelo reológico de dos parámetros de un fluido pseudoplástico es aquel cuya viscosidad disminuye con el incremento de la velocidad de corte. Los lodos de polímeros a base de agua, especialmente aquellos que contienen el polímero XC, se adaptan mejor a la ecuación matemática de la ley de potencia en comparación con el modelo plástico de Bingham o cualquier otro modelo de dos parámetros (Schlumberger, 2024)

Cuando se grafica la velocidad de corte frente al esfuerzo de corte en un sistema de coordenadas cartesiano rectangular, este modelo generará una curva en la que el esfuerzo de corte será cero cuando la velocidad de corte también sea cero. Al graficar el esfuerzo de corte contra la velocidad de corte en una escala logarítmica doble, el comportamiento de la lechada se comporta como un fluido de ley de potencias este se representará como una línea recta. En este modelo, la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = k * (\dot{\gamma})^n$$

En esta ecuación n es el exponente de la Ley de potencias o también denominado índice de comportamiento de flujo y k es una constante, conocida como índice de comportamiento de flujo o también índice de consistencia, cabe recalcar que aquí se pueden presentar 3 casos, que para fluidos pseudo-plásticos, n sea un número positivo entre 0 y 1. Normalmente las lechadas de cemento exhiben este tipo de comportamiento, o si se diera el caso que n sea mayor a 1, entonces estaríamos hablando de un fluido dilatante, por último si n es igual a 1 entonces corresponde al modelo Newtoniano. Las unidades son $1/\text{sg}$ para la velocidad de cote, Pa para el esfuerzo de corte y $\text{Pa} * \text{s}^n$ para el índice de consistencia.

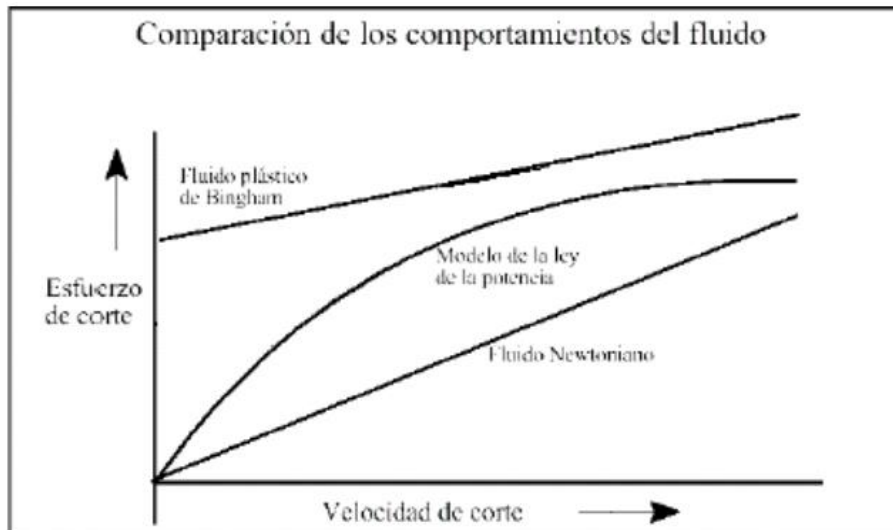


Figura 15. Comparación de los comportamientos del fluido (Gómez Martínez, 2019)

3.11 SELECCIÓN DEL MODELO REOLÓGICO

Los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte de una lechada de cemento deben analizarse utilizando las dos ecuaciones mencionadas anteriormente para determinar cuál de los modelos se ajusta mejor. La manera más efectiva de realizar esta evaluación es a través de un análisis de regresión. El modelo que presente el mejor coeficiente de regresión debe ser elegido como el más adecuado para describir los datos.

3.11.1 Modelo plástico de Bingham

Debe realizarse un análisis de regresión usando la ecuación $\tau = \tau_0 + \mu_p * \gamma$ para poder realizar la grafica y determinar la pendiente A y la ordenada al origen B. Si el esfuerzo de corte τ se expresa en $lbf/100\ ft^2$ y la velocidad de corte γ en $1/sg$, los parámetros del modelo en unidades de campo para el estudio se expresan de la siguiente manera:

$$\mu_p(cp) = 478.8 * A$$

Y para la ordenada:

$$\tau_0 \left(\frac{lbf}{100ft^2} \right) = B$$

Un punto de cedencia negativo es un indicador de que:

1. El modelo reológico aplicado no es adecuado para poder describir el comportamiento del cemento
2. La lechada tiene tiempo de asentarse
3. La lechada puede llegar a gelificarse mientras se toman las lecturas para medir sus propiedades reológicas

Si esto llega a suceder, se recomienda que la lechada sea mezclada nuevamente y hay que recalculer sus propiedades reológicas, y si el problema es persistente de hasta 3 veces, esa lechada puede presentar problemas cuando se introducida en el pozo, y no es recomendable que sea utilizada, por lo que habría que diseñar una nueva lechada desde el inicio.

Al momento de utilizar el viscosímetro de Fann, la lechada de cemento se llega a comportar como un fluido plástico de Bingham, se puede utilizar las siguientes expresiones:

$$\mu_p(cp) = 1.5 * F * (\theta_{300} - \theta_{100})$$

$$\tau_0 \left(\frac{lb_f}{100ft^2} \right) = F * (\theta_{300} - \mu_p)$$

Donde θ_{300} y θ_{100} son las lecturas obtenidas en el viscosímetro a las velocidades de corte correspondientes, en RPM.

3.11.2 Modelo de ley de potencias

En este modelo, para mejor ajuste los parámetros se obtendrán realizando un análisis de regresión sobre la forma logarítmica de la ecuación que describe el modelo:

$$\log(\tau) = \log(k) + n \log(\gamma)$$

Como ya se estableció el comportamiento de flujo estará determinando por la pendiente (n).

Si es esfuerzo de corte τ se expresa en $lb_f/100ft^2$ y la velocidad de corte γ en 1/sg, el índice de consistencia en $lb_f * s^n/100ft^2$ pueden encontrarse utilizando el valor de la ordenada al origen usando la siguiente expresión:

$$k \left(lb_f * \frac{s^n}{100ft^2} \right) = 0.01 (10^D)$$

Cuando se utiliza el viscosímetro de FANN, y la lechada de cemento tiene un comportamiento plástico de Ley de Potencias, pueden utilizarse las siguientes expresiones:

$$n = 2,096 * \log\left(\frac{\theta_{300}}{\theta_{100}}\right)$$

Y

$$k\left(lb_f * \frac{s^n}{100ft^2}\right) = (F * \theta_{300}) * (100 * 500^n)$$

Para obtener una lechada óptima para el estudio y poder realizar un control de calidad al cemento, los valores deben estar entre los siguientes rangos:

Viscosidad plástica:

Máxima: 60 *cp*

Mínima: 35 *cp*

Punto de cedencia máximo: 0.293 kN/m² (65 *lb_f*/100ft²)

3.12 PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO EXCESIVO EN UNA LECHADA DE CEMENTO

En la mayoría de las aplicaciones, una pérdida de filtrado baja se define como menos de 100 cm³ en 30 minutos, bajo una presión diferencial de 70 kg/cm² (1000 psi), a través de una malla de 325 y a la temperatura de circulación del pozo a cementar.

Esta propiedad de la lechada es particularmente importante durante las operaciones de bombeo porque su bajo valor previene la deshidratación prematura del cemento, mantiene el lodo fluido y previene daños a la formación debido a la permeabilidad reducida.

Debido a las bajas pérdidas de líquido, la suspensión será bombeable durante un tiempo relativamente cercano al valor de diseño del laboratorio.

3.12.1 Descripción del equipo

El equipo que se pondrá en uso para el estudio es una celda de alta presión y temperatura para pérdida de filtrado esta contiene un filtro malla 325 mesh soportado por una malla 60 mesh.

3.12.2 Procedimiento para la medición

La lechada debe prepararse y mezclarse como se estableció en el apartado 1 de este capítulo, se deben tener ciertos acondicionamientos con esta, ya que la lechada debe iniciar con una temperatura de 80 °F, o si se puede en su defecto adecuar una temperatura que asimile las condiciones del pozo, pero normalmente para este estudio se usaran temperatura muchos menores es por eso por lo que se efectuarán, algunas condiciones necesarias a pesar de la deficiencia del equipo:

Acondicionamiento a presión atmosférica

- No debe pasar más de un minuto después de haber realizado la mezcla, en colocarla dentro del contenedor del consistómetro atmosférico
- Calentar la lechada de cemento hasta que alcance la temperatura circulante de fondo de pozo, en esta parte se debe tomar la cédula de tiempo bombeable que mejor simule las condiciones reales del pozo
- Si el consistómetro atmosférico no está equipado para poder medir la temperatura de la lechada, se debe obtener la cédula adecuada para hacer el baño de temperatura.
- Después tener toda la lechada acondicionada adentro se debe quitar la paleta y remover rápidamente el excedente con una espátula para que toda la lechada quede uniforme
- Armar la celda del filtro prensa

Llenado del Filtro Prensa

- Lo principal es precalentar la celda a 194 °F si se da el caso que se realizan pruebas a temperaturas mayores. Para realizar lo anterior se deben usar los botones de control de temperatura hasta ajustar a la temperatura deseada, posterior a esto la camisa se comenzará a calentar, debido a que se activaron los calentadores y la camisa elevará su temperatura.
- Unos instantes antes de terminar el acondicionamiento de la lechada, se debe retirar la celda de la camisa de calentamiento y colocarla en su propia base.
- Verificar que la válvula ubicada en la parte inferior de la celda se encuentre cerrada.
- Posteriormente vaciar la lechada de cemento dentro de la celda hasta 3/4 in por debajo del tope de la cámara para la lechada

- Enroscar la tapa superior y asegurar con las llaves

Preparación del equipo

- Se coloca una probeta que dé una medida de volumen de 100 ml y se coloca justo debajo de la válvula inferior de la celda
- Se procede a abrir la válvula del tanque de nitrógeno

Prueba de pérdida de filtrado

- Se recolecta el filtrado y se registra el volumen que salga a 30 segundos, y posteriormente a 1, 2, 5, 7.51 10, 15, 25 y 30 min. Mientras el nitrógeno siga fluyendo por la válvula inferior de la celda alrededor de los 30 min se registra el volumen y además el tiempo que se presenta el flujo.
- Determinar la pérdida de filtrado API. Para pruebas de 30 minutos sin escape de nitrógeno, medir el volumen recogido, duplicar esta cantidad y reportar el resultado como la pérdida de filtrado.

Donde:

$$V_t = \text{Volumen (ml) el cual se recoletó a un tiempo } t$$

Observaciones:

1. Hay que tener en cuenta las lechadas que puedan tener una sedimentación significativa ya que esto dan valores erróneos de pérdida de filtrado
2. Las pruebas que no alcanzan los 30 minutos tienen un error potencial que aumenta a medida que se reduce el tiempo en que se registra la salida de nitrógeno.
3. Las pruebas que alcanzan los 30 minutos suelen mostrar una variación de alrededor del 5%. En cambio, aquellas que duran menos de 5 minutos pueden presentar una variación superior al 30%.

3.13 APLICACIÓN PRÁCTICA

Este estudio se basa en una propuesta experimental, el cual se realizará con la ayuda de los equipos provistos que se encuentran en el laboratorio de petróleos, de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

3.13.1 Preparación de la lechada de cemento con resina epoxi

La lechada de cemento será mezclada con la mejor concordancia posible a la norma API RP 10B, con el procedimiento mencionando anteriormente.

Debido a que la mezcla de cemento no tendrá elementos sólidos, la resina epoxi al ser mezclada, no ocasionará ningún problema.

La consecuente muestra los materiales que serán necesarios para el estudio y serán utilizados durante toda la fase experimental, se tiene el cemento Portland, agua y la resina epoxi.

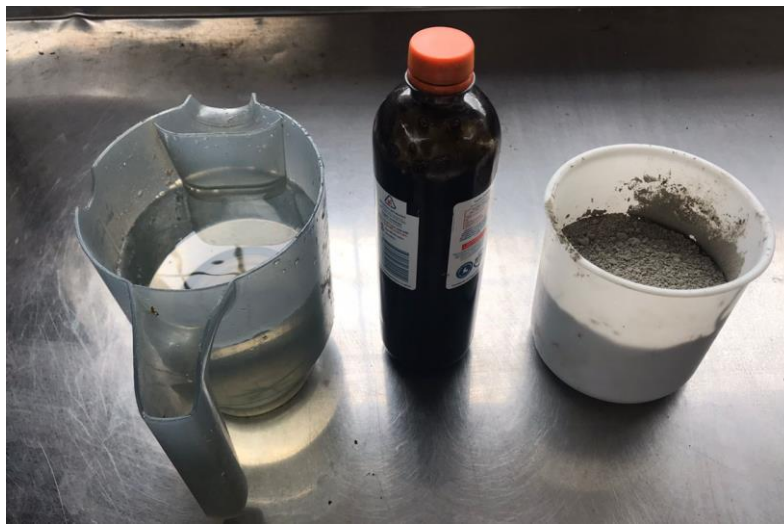


Figura 16. Materiales para el estudio - Fuente: Elaboración propia

El volumen de la lechada de cemento debe ser de 600 ml. Para elaborar correctamente la lechada de cemento se debe hacer lo siguiente:

- El cemento en seco debe estar a temperatura ambiente, listo para ser mezclado con el agua y los aditivos.



Figura 17. Cemento en seco- Fuente: Elaboración propia

- El agua en cambio debe ser mezclada con la resina epoxi, primero se coloca el envase de mezcla con agua y posteriormente con la ayuda de la jeringa se coloca la resina epoxi.



Figura 18. Adición de resina epoxi- Fuente: Elaboración propia

- Esta mezcla de agua más resina epoxi, debe ser mezclada a una velocidad de 3000 RPM durante al menos 20 segundos, para que de esta manera la mezcla sea homogénea.



Figura 19. Mezcla de agua y resina epoxi- Fuente: Elaboración propia

- Una vez la mezcla de agua y resina esté completamente homogénea y aún con el mixer en funcionamiento, se agrega el cemento y se aumenta la velocidad a 4000 RPM, a 30 segundos exactos, hasta que se logre apreciar la homogeneidad de la lechada de cemento como se indica en la figura.



Figura 20. Mezcla de cemento - Fuente: Elaboración propia

Se elaboraron 3 muestras de lechada las cuales variaban su concentración de resina epoxi en baja, media y alta, todo esto con el fin de poder tener una amplia gama de posibles resultados en la investigación.

Las cantidades son detalladas a continuación

3.13.2 Lechada base

LECHADA	
$m_l(\text{gr})$	939,12
$V_l(\text{ml})$	600
$\rho_l\left(\frac{\text{gr}}{\text{ml}}\right)$	1,68
CEMENTO	
$m_c(\text{gr})$	602
$V_c(\text{ml})$	191,11
$\rho_c\left(\frac{\text{gr}}{\text{ml}}\right)$	3,15
AGUA	
$m_a(\text{gr})$	337,12
$V_a(\text{ml})$	337,12
$\rho_a\left(\frac{\text{gr}}{\text{ml}}\right)$	1
RESINA EPOXI	
$m_{re}(\text{gr})$	
$V_{re}(\text{ml})$	
$\rho_{re}\left(\frac{\text{gr}}{\text{ml}}\right)$	1,22

Tabla 2. Especificaciones de la muestra de lechada base-Fuente: Elaboración propia

3.13.3 MUESTRA AUCA-1

LECHADA	
$m_l[\text{gr}]$	945
$V_l[\text{ml}]$	600
$\rho_l\left[\frac{\text{gr}}{\text{ml}}\right]$	1,575
CEMENTO	
$m_c[\text{gr}]$	602

$V_c[ml]$	191,11
$\rho_c \left[\frac{gr}{ml} \right]$	3,15

AGUA

$m_a[gr]$	337,12
$V_a[ml]$	337,12
$\rho_a \left[\frac{gr}{ml} \right]$	1

RESINA EPOXI (CONCENTRACIÓN BAJA)

$m_{re}[gr]$	2,93
$V_{re}[ml]$	2,4
$\rho_{re} \left[\frac{gr}{ml} \right]$	1,22

Tabla 3. Especificaciones de la muestra Auca 1-Fuente: Elaboración propia

3.13.4 MUESTRA AUCA-2

LECHADA

$m_l[gr]$	954
$V_l[ml]$	600
$\rho_l \left[\frac{gr}{ml} \right]$	1,59

CEMENTO

$m_c[gr]$	602
$V_c[ml]$	191,11
$\rho_c \left[\frac{gr}{ml} \right]$	3,15

AGUA

$m_a[gr]$	337,12
$V_a[ml]$	337,12
$\rho_a \left[\frac{gr}{ml} \right]$	1

RESINA EPOXI (CONCENTRACIÓN MEDIA)

$m_{re}[\text{gr}]$	6,1
$V_{re}[\text{ml}]$	5
$\rho_{re} \left[\frac{\text{gr}}{\text{ml}} \right]$	1,22

Tabla 4. Especificaciones de la muestra Auca 2-Fuente: Elaboración propia

3.13.5 MUESTRA AUCA-3

LECHADA

$m_l[\text{gr}]$	967,35
$V_l[\text{ml}]$	600
$\rho_l \left[\frac{\text{gr}}{\text{ml}} \right]$	1,61

CEMENTO

$m_c[\text{gr}]$	602
$V_c[\text{ml}]$	191,11
$\rho_c \left[\frac{\text{gr}}{\text{ml}} \right]$	3,15

AGUA

$m_a[\text{gr}]$	337,12
$V_a[\text{ml}]$	337,12
$\rho_a \left[\frac{\text{gr}}{\text{ml}} \right]$	1

RESINA EPOXI (CONCENTRACIÓN ALTA)

$m_{re}[\text{gr}]$	12,2
$V_{re}[\text{ml}]$	10
$\rho_{re} \left[\frac{\text{gr}}{\text{ml}} \right]$	1,22

Tabla 5. Especificaciones de la muestra Auca 3-Fuente: Elaboración propia

Una vez lograda una mezcla homogénea, se llevan a cabo las pruebas necesarias para determinar los valores, que se utilizaron como referencia para comparar la lechada experimental con la lechada convencional.

3.13.6 Determinación de la densidad

Para poder lograr esto en este apartado se calcularon los valores mediante la balanza de lodos.

Los datos obtenidos se muestran a continuación

Unidades	Lechada Base	Muestra Auca-1	Muestra Auca-2	Muestra Auca-3
	Lechada	Lechada	Lechada	Lechada
$m_l(g)$	990	945	954	967,35
$V_l(ml)$	600	600	600	600
$\rho_l(g/ml)$	1,65	1,58	1,59	1,61
$\rho_l(ppg)$	14,02	13,19	13,28	13,44

Tabla 6. Datos de masa, volumen y densidad de las muestras-Fuente: Elaboración propia

3.13.7 Resultados de Reologías

Para obtener los datos reológicos, se coloca una porción de la lechada en la copa del Viscosímetro Fann hasta la marca indicada, se enciende el motor y se ajusta la velocidad para realizar la lectura correspondiente. En este caso, las lecturas se tomaron a 600, 300, 200 y 100 RPM.



Figura 21. Prueba del viscosímetro de Fann- Fuente: Elaboración propia

En ciertos casos, es necesario ajustar la temperatura de la muestra, para lo cual se debería emplear un consistómetro que eleva la temperatura conforme a las características

previamente definidas del pozo. En esta situación, las reologías se miden a la temperatura del fondo circulante. Las lecturas del viscosímetro se presentan a continuación:

Lechada base		Muestra Auca-1		Muestra Auca-2		Muestra Auca-3	
Lecturas		Lecturas		Lecturas		Lecturas	
600	70	600	74	600	84	600	124
300	50	300	55	300	61	300	75
200	36	200	38	200	40	200	55
100	21	100	24	100	27	100	30
6	18	6	22	6	23	6	26
3	16	3	16	3	17	3	20

Tabla 7. Datos obtenidos de las diferentes velocidades del viscosímetro-Fuente: Elaboración propia

A continuación, se proceden a hacer los cálculos de la reología: viscosidad plástica, viscosidad aparente, Umbral de fluencia plástica (yield point), índice de modelo exponencial e índice de consistencia, para lo cual se utilizarán las siguientes fórmulas:

Viscosidad plástica (PV)

$$PV = L600 - L300 [cp]$$

Donde:

PV= Viscosidad plástica

L600= Lectura en el viscosímetro de FANN a 600 RPM

L300= Lectura en el viscosímetro de FANN a 300 RPM

Viscosidad aparente (VA)

$$VA = \frac{L600}{2} [cp]$$

VA= Viscosidad aparente

L600= Lectura en el viscosímetro de FANN a 600 RPM

Yield Point (YP)

$$YP = L300 - PV \left[\frac{lb}{100ft^2} \right]$$

YP= Yield Point

L300= Lectura a 300 RPM en el Viscosímetro de FANN

PV= Viscosidad Plástica

Índice de modelo exponencial (n)

$$n = 1,4427 \ln \left(\frac{2PV + YP}{VP + YP} \right)$$

N= Índice de modelo exponencial

PV= Viscosidad plástica

Yp= Yield Point

Índice de consistencia (k)

$$k = \frac{5,11 * L600}{1022^n} \left[\frac{LN * sg^n}{100ft^2} \right]$$

K= Índice de consistencia

L600= Lectura a 600 RPM en el Viscosímetro FANN

n= Índice de modelo exponencial

Los resultados obtenidos mediante las fórmulas mencionadas anteriormente se observan en la siguiente tabla

Viscosidad Plástica			
Lechada Base	Muestra Auca-1	Muestra Auca-2	Muestra Auca-3
20	19	32	45
Viscosidad Aparente			
Lechada Base	Muestra Auca-1	Muestra Auca-2	Muestra Auca-3
35	37	42	62
Punto Cedente (Yield Point)			
Lechada Base	Muestra Auca-1	Muestra Auca-2	Muestra Auca-3
30	36	38	26
Índice de Modelo exponencial			
Lechada base	Muestra Auca-1	Muestra Auca-2	Muestra Auca-3
0,4854	0,4281	0,462	0,725
Índice de consistencia			
Lechada Base	Muestra Auca-1	Muestra Auca-2	Muestra Auca-3
12,38	19,468	17,5	4,034

Tabla 8. Datos reológicos obtenidos de las muestras-Fuente: Elaboración propia

Para describir la lechada de cemento, se ha empleado el modelo reológico de la Ley de Potencia. Este modelo incorpora dos parámetros que permiten una evaluación reológica más precisa. La elección del modelo de Ley de Potencia se debe a que las lechadas de cemento son suspensiones con una alta concentración de partículas sólidas en agua, pudiendo alcanzar un contenido de sólidos de hasta un 70%. La reología de la lechada de cemento depende del líquido de soporte, de la fracción volumétrica de los sólidos y de la interacción entre las partículas.

3.14 RESULTADOS DE LECHADA BASE

τ	γ
12,705	0,1
12,835	0,2
12,935	0,3
13,018	0,4
13,092	0,5
13,158	0,6
13,218	0,7
13,275	0,8
13,328	0,9
13,377	1

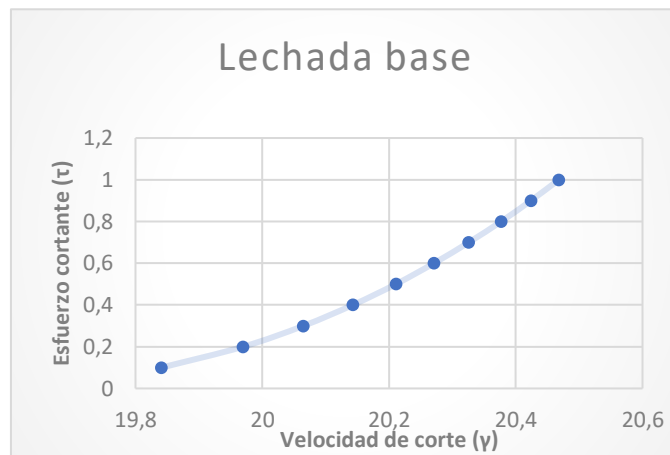


Figura 22. Comportamiento reológico de la muestra de lechada base-Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Datos obtenidos para muestra de lechada base-Fuente: Elaboración propia

3.15 RESULTADOS DE LA MUESTRA AUCA-1

τ	γ
19,841	0,1
19,97	0,2
20,065	0,3
20,143	0,4
20,211	0,5
20,271	0,6
20,326	0,7
20,377	0,8
20,424	0,9
20,468	1

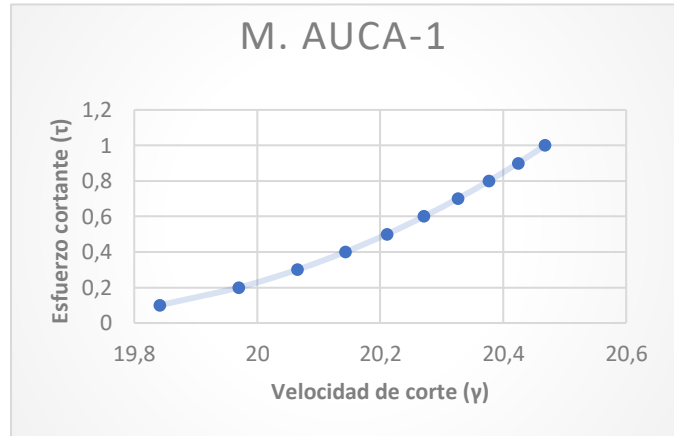


Figura 23. Comportamiento reológico de la muestra Auca-1-Fuente: Elaboración propia
 Tabla 10. Datos obtenidos para muestra Auca-1-Fuente: Elaboración propia

3.16 RESULTADOS DE LA MUESTRA AUCA-2

τ	γ
17,867	0,1
17,998	0,2
18,096	0,3
18,177	0,4
18,248	0,5
18,312	0,6
18,37	0,7
18,4245	0,8
18,475	0,9
18,522	1

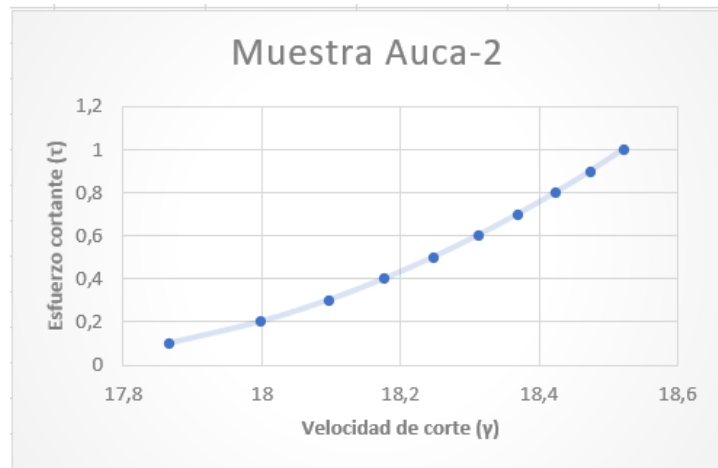


Tabla 11. Datos obtenidos para la muestra Auca-2-Fuente: Elaboración propia
 Figura 24. Comportamiento reológico de la muestra Auca-2-Fuente: Elaboración propia

3.17 RESULTADOS DE LA MUESTRA AUCA-3

τ	γ
5,86625	0,1
5,99225	0,2
6,09835	0,3
6,19345	0,4
6,28105	0,5
6,36315	0,6
6,4409	0,7
6,51515	0,8
6,5864	0,9
6,6552	1

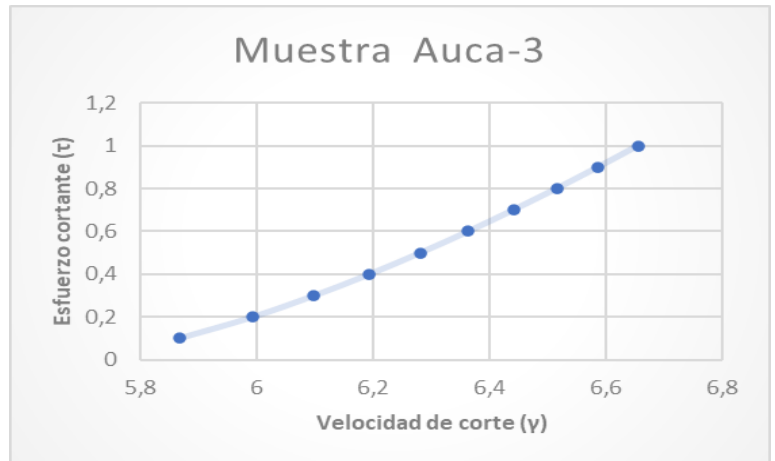


Tabla 12. Datos obtenidos para la muestra AUCA-3-Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Comportamiento reológico de la muestra Auca-3-Fuente: Elaboración propia

3.18 ANÁLISIS EN PYTHON Y AJUSTE DE LAS CURVAS

Se procede a utilizar la herramienta de programación Python usando la interfaz de Visual Basic para poder analizar la curva de reología de una lechada de cemento utilizando la regresión lineal y el método no lineal de mínimos cuadrados, para que de esta manera poder determinar los parámetros de K y n, respectivamente.

Esto será posible mediante el uso de la función **curve_fit** y el, uso de una biblioteca matemática y algebraica que se encuentra en Python llamada **scipy** estas herramientas realizan las debidas correcciones a las gráficas para poder encontrar los parámetros K y n, y determinar cuál lechada contiene la mejor reología.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit
```

Figura 26. Funciones y bibliotecas para usar- Fuente: Elaboración propia

3.18.1 Definición del modelo de Ley de Potencias

$$\tau = K * \gamma^n$$

Donde τ es la tensión de corte

K es el índice de consistencia

γ es la tasa de deformación de corte

n es el índice de comportamiento de flujo

3.18.2 Código base para el ajuste

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# Datos proporcionados
velocidad_corte = np.array([0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9,
1])
esfuerzo_corte = np.array([5.86, 5.99, 6.09, 6.19, 6.28, 6.36, 6.44,
6.51, 6.58, 6.65])

# Modelo de ley de potencias
def ley_potencias(gamma, K, n):
    return K * gamma**n

# Ajuste de curva para encontrar K y n
popt, pcov = curve_fit(ley_potencias, velocidad_corte, esfuerzo_corte)
K, n = popt

# Curva ajustada
gamma_fit = np.linspace(0.1, 1, 100)
tau_fit = ley_potencias(gamma_fit, K, n)

# Plot
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(velocidad_corte, esfuerzo_corte, 'ro', label='Datos
experimentales')
plt.plot(gamma_fit, tau_fit, 'b-', label=f'Ajuste de ley de
potencias\nK={K:.2f}, n={n:.2f}')
plt.xlabel('Velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ )')
plt.ylabel('Esfuerzo de corte ( $\tau$ )')
plt.title('Ajuste de la ley de potencias a los datos experimentales')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

K, n
```

Muestra Auca-1

τ	γ
19,841	0,1
19,97	0,2
20,065	0,3
20,143	0,4
20,211	0,5
20,271	0,6
20,326	0,7
20,377	0,8
20,424	0,9
20,468	1

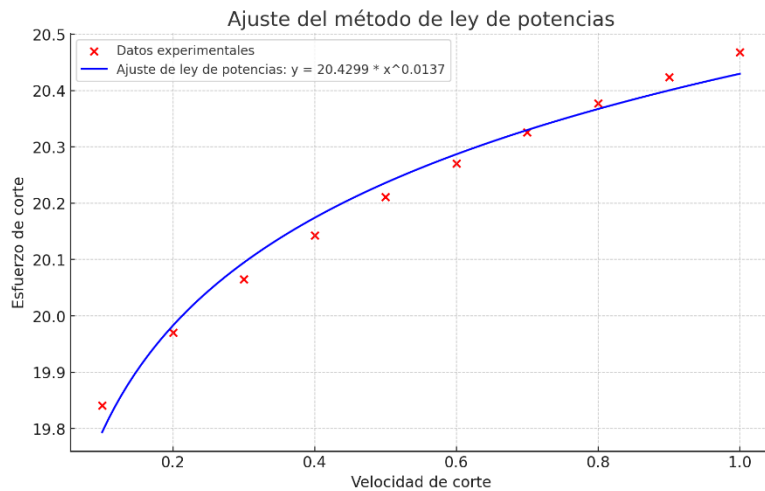


Figura 27. Ajuste de la gráfica de la muestra Auca-1-Fuente: Elaboración propia

La curva ajustada a los datos muestra que el modelo de ley de potencias se ajusta bien a los datos experimentales, pero dado el valor bajo del exponente, la curva es casi una línea horizontal.

El valor de κ es aproximadamente 20.4299 y el exponente n es aproximadamente 0.0137.

La gráfica muestra los datos experimentales en puntos rojos y la curva ajustada en azul. Esto indica que hay una relación muy débil entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte, dado el exponente tan pequeño (0.0137).

Muestra Auca-2

τ	γ
17,867	0,1
17,998	0,2
18,096	0,3
18,177	0,4
18,248	0,5
18,312	0,6
18,37	0,7
18,4245	0,8
18,475	0,9
18,522	1

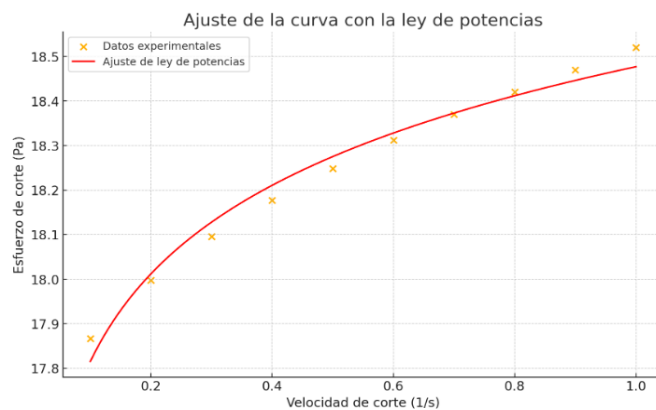


Figura 28. Ajuste de la gráfica de la muestra Auca-2-Fuente: Elaboración propia

El ajuste de la curva utilizando la ley de potencias ha proporcionado los siguientes parámetros:

- Índice de consistencia (K): 18.477
- Índice de comportamiento del fluido (n): 0.0158

El gráfico muestra los datos experimentales y la curva ajustada utilizando estos parámetros. El índice de comportamiento del fluido n es muy cercano a 0, lo que sugiere que el esfuerzo de corte es casi independiente de la velocidad de corte en este rango de datos.

Este análisis indica que el material exhibe un comportamiento casi lineal, donde el esfuerzo de corte apenas varía con la velocidad de corte. Este comportamiento podría ser característico de un fluido con un comportamiento muy cercano al de un fluido newtoniano, donde n sería igual a 1 para un fluido estrictamente newtoniano, pero en este caso, el valor de n es muy bajo, lo que indica una relación prácticamente constante en el rango de velocidades de corte analizado.

Muestra Auca-3

τ	γ
5,86625	0,1
5,99225	0,2
6,09835	0,3
6,19345	0,4
6,28105	0,5
6,36315	0,6
6,4409	0,7
6,51515	0,8
6,5864	0,9
6,6552	1

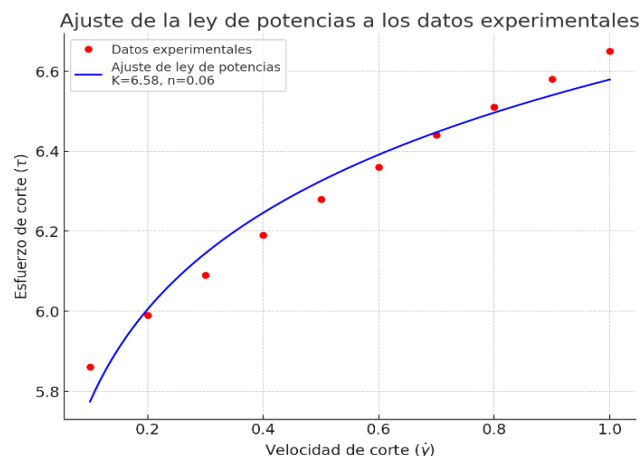


Figura 29. Ajuste de la gráfica de la muestra Auca-3-Fuente: Elaboración propia

Los datos arrojados por el programa indican que El valor de K es 6.58, lo que indica la viscosidad aparente de la lechada de cemento cuando la velocidad de corte es 1. Este valor sugiere que la lechada tiene una consistencia relativamente alta. El valor de n es 0.057, lo que indica un comportamiento pseudoplástico (o tixotrópico) de la lechada de cemento. En este caso, la viscosidad disminuye ligeramente con el aumento de la tasa de deformación de corte. Un valor de n cercano a 0 sugiere que la lechada de cemento se comporta casi como un fluido de Bingham, que tiene un esfuerzo de corte inicial por encima del cual fluye.

3.19 EFECTO AGUA LIBRE

En las operaciones de cementación, cualquier volumen de agua de la lechada que excede el volumen requerido para hidratar completamente el cemento Portland y otros aditivos. El agua libre puede separarse físicamente a medida que fragua una lechada de cemento. Esta tendencia a separarse, especialmente en presencia de una formación gasífera de alta presión, puede deteriorar el aislamiento zonal, que es la función principal del cemento (Schlumberger, 2024)

Cuando la lechada se deja en reposo, se observa que se acumula agua en la superficie debido a la sedimentación de partículas de cemento en la mezcla. En los casos específicos de la muestra de lechada base y la muestra Auca-1, en las cuales no se añadió una concentración alta de resina epoxi, se observaron grietas o hendiduras. Estas grietas pueden crear canales en la columna de cemento, lo cual podría comprometer la resistencia del cemento fraguado bajo presión. A pesar de la presencia de grietas, la cantidad de agua acumulada en la parte superior de la muestra de lechada base y la muestra Auca-1 no fue significativa. En los otros casos, no se observó agua en la parte superior.

Los datos recolectados de agua libre durante el proceso se muestran a continuación.

FLUIDO LIBRE			
0° Inclinación, 3 horas			
Lechada Base	Muestra Auca-1	Muestra Auca-2	Muestra Auca-3
Despreciable	Despreciable	0	0

Tabla 13. Datos recolectados del fluido libre en las muestras-Fuente: Elaboración propia

3.20 PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO EXCESIVO EN UNA LECHADA DE CEMENTO

Una vez concluidas las pruebas reológicas, se procede a realizar la prueba de pérdida de fluido utilizando el equipo de Prensa API, en este caso el laboratorio de petróleos de la universidad cuenta con un tanque de nitrógeno presurizado. Es fundamental tomar las precauciones necesarias al manejar el equipo, ya que una manipulación incorrecta podría provocar un accidente grave.

Después de realizar la prueba de filtrado en la prensa API con las muestras de lechada de cemento, presurizadas a 100 psi y a una temperatura de 36°C, se obtuvieron los siguientes resultados.



Figura 30. Filtro prensa-Fuente: Elaboración propia

PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO EXCESIVO			
100 PSI y 96°F			
Lechada Base	Muestra Auca-1	Muestra Auca -2	Muestra Auca-3
28	25	19	14

Tabla 14. Datos recolectados de la pérdida de fluido- Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se verificarán cada muestra y cuáles fueron los motivos y circunstancias que antepusieron su descarte para un estudio aplicativo en el futuro, dentro del área de cementación cabe recalcar que cada prueba que se designó se caracterizó porque el aditivo a usar que fue la resina epoxi fue variando de concentración esto no supone que las muestras descartadas no valen hubieron mejoras significativas en las propiedades reológicas, mecánicas y de permeabilidad de la lechada de cemento. Al incorporar la resina epoxi, se observó un aumento notable en la viscosidad aparente, lo que contribuye a una mayor homogeneidad y estabilidad de la mezcla durante la cementación. Sin embargo, para fines prácticos se busca cual otorgue el menor factor de riesgo para así de esta manera minimiza costos.

4.1 MUESTRA “LECHADA BASE”

Pérdida de fluido por filtrado excesivo [ml]
Lechada base
28

Tabla 15. *Pérdida de fluido de la muestra base-Fuente: Elaboración propia*

Esta muestra se ha preparado con el propósito de realizar las comparaciones correspondientes con las muestras subsiguientes, permitiendo evaluar y contrastar las diversas propiedades de la lechada de cemento. Este enfoque comparativo facilita una comprensión detallada de cómo varían los parámetros reológicos, mecánicos y de permeabilidad, y proporciona una base sólida para optimizar la formulación y aplicación de la lechada de cemento mejorada en condiciones operativas específicas.

A pesar de que esta muestra proporciona datos de una lechada de cemento sin aditivos, cuyas propiedades se han medido bajo las condiciones de presión y temperatura recomendadas por la norma API RP 10B. Sin embargo, debido a sus características inadecuadas para la aplicación en un pozo convencional, esta lechada no será considerada para futuras aplicaciones.

4.2 MUESTRA AUCA-1

Esta lechada fue formulada con una concentración de resina epoxi de bajo porcentaje, todo esto con el fin de observar en primera instancia para observar las propiedades en sus distintas pruebas de laboratorio.

Pérdida de fluido por filtrado excesivo
[ml]
Muestra Auca-1
25

Tabla 16. *Pérdida de fluido de la muestra AUCA-1-Fuente: Elaboración propia*

RESINA EPOXI (CONCENTRACIÓN MEDIA)	
Masa (gr)	2,93
Volumen (ml)	2,4
Densidad (gr/ml)	1,22

Tabla 17. *Concentración de resina epoxi en muestra AUCA-1-Fuente: Elaboración propia*

La muestra Auca-1 no será considerada como una lechada representativa en este proyecto porque los datos obtenidos gráficamente y también por la pérdida de fluido por filtración no cumplen con los niveles requeridos para optimizar una lechada convencional de cemento. Los resultados superan ampliamente los límites aceptables, lo cual se debe a que esta lechada está formulada únicamente con resina epoxi en baja concentración.

4.3 MUESTRA AUCA-2

Pérdida de fluido por filtrado excesivo [ml]
Muestra Auca-2 19

Tabla 18. *Pérdida de fluido de la muestra AUCA-2-Fuente: Elaboración propia*

RESINA EPOXI (CONCENTRACIÓN MEDIA)	
Masa (gr)	6,1
Volumen (ml)	5
Densidad (gr/ml)	1,22

Tabla 19. *Concentración de resina epoxi en muestra AUCA-2-Elaboración propia*

Aunque la muestra presenta una lechada prometedora debido a una concentración media de resina epoxi, su densidad y la pérdida de fluido por filtración no son adecuadas para que sea óptima para su aplicación en un pozo. Estas deficiencias pueden comprometer la integridad del pozo y la efectividad del sellado. Por lo tanto, a pesar de su potencial, esta muestra también será descartada para asegurar la fiabilidad y el rendimiento de la cementación en condiciones operativas exigentes.

4.4 MUESTRA AUCA 3

Pérdida de fluido por filtrado excesivo [ml]
Muestra Auca-3 14

Tabla 20. *Pérdida de fluido de la muestra AUCA-3-Fuente: Elaboración propia*

RESINA EPOXI (CONCENTRACIÓN MEDIA)	
Masa (gr)	12,2
Volumen (ml)	10
Densidad (gr/ml)	1,22

Tabla 21. Concentración de resina epoxi en muestra AUCA 3-Fuente: Elaboración propia

Denotando la muestra Auca-3 en cuanto a la densidad, considerablemente más ligero que el sistema convencional, conforme a la norma API RP 10B, que establece que una lechada convencional tiene una densidad entre 3.10 y 3.25 g/cc. Esto significa que la densidad menor de la muestra Auca-3 asegura que, durante la cementación, la gradiente de presión del cemento no superará la gradiente de presión de fractura, evitando así fracturas en el pozo. La menor viscosidad de la muestra Auca-3 permite que la lechada fluya y llene el espacio a cementar más rápidamente, asegurando una buena adherencia del cemento a la formación y a la cañería, además de esto de manera gráfica debido al ajuste realizado mediante el programa Python se pudo resaltar que los parámetros K y n son los adecuados para que una lechada de cemento con este aditivo tenga una mejor reología. Además, la reducción en la cantidad de fluido libre minimiza los problemas de separación del agua de la lechada después de su desplazamiento en el pozo, evitando áreas canalizadas en el cemento fraguado, agua o cemento blando en la parte superior de la columna de cemento, o asentamiento de sólidos en la columna de cemento.

La menor pérdida por filtración contribuye a que las paredes del pozo mantengan una mayor consistencia, previniendo el flujo de agua de la lechada hacia la formación y evitando el pegamiento de la tubería por presión diferencial. Esto también ayuda a mantener un menor espesor de revoque. Además, la velocidad de bombeo no disminuirá, lo que permitirá que la lechada sea bombeada hasta su posición final sin que un exceso de cemento quede dentro del casing, evitando la necesidad de cementación forzada y el subsiguiente trabajo de molido de cemento.

Con esta lechada se espera obtener una mayor resistencia a la compresión, asegurando que la cementación no sufra fracturas debido a la presión de la formación o a la presión del fluido de perforación, proporcionando la resistencia necesaria para sostener la tubería de revestimiento.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se han optimizado las diversas propiedades de la lechada propuesta mediante la adición de diferentes concentraciones de resina epoxi, a través de distintas pruebas de laboratorio, para poder determinar cuál de las muestras representa los mejores resultados.
- Se recolectaron datos de diversas muestras de lechada con diferentes concentraciones de resina epoxi para identificar la formulación óptima, destacándose la muestra Auca-3 como la más significativa, debido a su índice de consistencia acorde a los parámetros establecidos para una buena reología.
- La incorporación de resina epoxi en la lechada de cemento ha demostrado una mejora significativa en sus propiedades reológicas y mecánicas. En las muestras Auca, todas tuvieron una mejora con respecto a la lechada base, siendo la muestra Auca-2 y Auca-3 las más significativas, pero debido a que lo que se busca es reducir la ventana de riesgos operacionales se opta por escoger la muestra Auca-3.
- Aunque la resina epoxi puede incrementar los costos iniciales de la lechada, los beneficios derivados de su uso, como la reducción de intervenciones correctivas y el aumento de la vida útil del pozo, justifican la inversión. Además, una cementación más efectiva contribuye a la sostenibilidad del campo al minimizar los riesgos ambientales asociados con la fuga de fluidos.
- Las pruebas de laboratorio han demostrado que un enfoque meticuloso, sistemático y bien organizado puede producir resultados muy favorables que puedan ser usados a futuro.
- Se han observado tanto cuantitativa como cualitativamente las diferencias entre una lechada convencional y una lechada mejorada con una concentración alta de resina epoxi. En varias pruebas, la evidencia fue tan clara que la muestra convencional falló, como en la prueba de filtrado excesivo con el filtro prensa API. Por otro lado, la muestra Auca-3 demostró una resistencia a la compresión significativamente superior, gracias a su estructura tridimensional reforzada. Además, la muestra mejorada exhibió una mayor estabilidad y cohesión, lo que la

hace más adecuada para aplicaciones en pozos con condiciones exigentes lo cual sería muy aplicativo dentro del campo Auca.

5.2 RECOMENDACIONES

- La incorporación de resina de epoxi se considera una buena opción para el diseño de lechadas de cemento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que a bajas temperaturas puede solidificarse rápidamente. Por lo tanto, se recomienda monitorear tanto las temperaturas durante la mezcla como durante las pruebas. La norma API sugiere mantener la lechada de cemento a una temperatura de 80°F para evitar malas prácticas de laboratorio.
- En algunas pruebas se enfrentó la limitación de la falta de ciertos equipos, lo que obligó a utilizar alternativas que, aunque no eran las óptimas, permitieron cumplir con el objetivo de demostrar la eficiencia de la propuesta de lechada de cemento.
- Si se realiza el estudio dentro del campo hay que asegurar de que todo el personal utilice el equipo de protección adecuado al manipular resina epoxi y otros aditivos químicos se debe manejar correctamente los residuos de resina y otros materiales, siguiendo las regulaciones ambientales para minimizar el impacto ecológico.
- A pesar de que la resina epoxi es un aditivo que ha tomado relevancia en estos últimos años, es bueno tener en cuenta que combinarlo con otras alternativas del mercado puede mejorar mucho más las condiciones del cemento una de estas alternativas que funciona muy bien es la fibra de polipropileno.

Referencias Bibliográficas

- Albarrán Flores, D., y Hernández Sandoval, L. (16 de 11 de 2012). *Cementación de pozos petroleros en aguas profundas*.
- Alvarez, C., y B, E. (2014). *Procesos de cementacion y fluidos de control en la etapa de terminación de pozos*. Mexico.
- Apolinario Del Pezo, H., y Lucas del Pezo, F. (2014). *Cementación primaria en el pozo Apol 62F*.
- Araujo, A. (15 de Diciembre de 2015). Auca, una de las areas petroleras mas productivas. *El Comercio*.
- BJ Services Company. (2001). *Basic Cement Chemistry*.
- Caicedo, A. &. (2009). *Optimizacion de las facilidades de produccion del campo Auca para las actuales condiciones de operacion del campo*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- Diaz Rubio, E. (2021). *Resistencia de Materiales*.
- Edwards, J. (2019). *Cementing manual*.
- EP-PETROECUADOR. (2008). *Geologia del campo Auca, "Informe de Certificación de reservas del campo Auca"*.
- Hernandez Pérez, J., y Ortíz Gómez, E. (2011). *Adicion de compuestos químicos para la cementación de pozos petroleros en la etapa de producción, Región Poza Rica-Altamira*.
- Infinitia Industrial Consulting*. (s.f.). <https://www.infinitiaresearch.com/laboratorio-ingenieria-industrial/propiedades-mecanicas/>
- Meza Rodriguez, J. (06 de Julio de 2015). *Slideshare*.
- Miranda Grijalva, E. (2015). *Produccion de Petroleo con Bombeo Hidraulico tipo Jet, utilizando como fluido motriz el agua del sistema de reinyeccion, en un campo del Oriente Ecuatoriano*. Quito.

- Reis, L. (2020). *SPOT*. <https://spotcursos.com.br/public/blogs/mecanica-das-estruturas/posts/coeficiente-de-poisson>
- Rosero, A. (2015). *Optimizacion de los procesos de aislamiento zonal para los reservorios de la formacion Napo de los Bloques 17 y 62*. UDLA.
- Schlumberger. (2022). *Schlumberger*.
https://glossary.slb.com/es/terms/c/cement_additive
- Schlumberger. (2024).
https://glossary.slb.com/es/terms/b/bingham_plastic_model
- Schlumberger. (2024).
https://glossary.slb.com/es/terms/b/bingham_plastic_model
- Servosis. (29 de 06 de 2020). <https://www.servosis.com/el-modulo-de-young-o-modulo-de-elasticidad-longitudinal/>
- Valdivia Montalván, M. (2016). *Academia*.
https://www.academia.edu/25205528/Ingenieria_de_cementacion
- Vallejo Bravo, C., García de la Rosa, I., Leal Orta, A., Mendoza Vargas , J., Santiago Avila, E., y Uribe Hernández, J. (2013). *Capacidad de resistencia de tuberías petroleras*.