

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE SISTEMAS DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRAS

Presentado ante la Ilustre
Universidad central de Venezuela
para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Por el Br. Martín C., José J.

Caracas, Octubre de 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE SISTEMAS DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRAS

Tutor Académico: Prof. Luis Norberto Bueno

Tutores Industriales: Aiskely Blanco y Wilfredo Rodríguez

Presentado ante la Ilustre
Universidad central de Venezuela
para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo
Por el Br. Martín C., José J.

Caracas, Octubre de 2002

Caracas, Octubre 2002

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Concejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller José Javier Martín Cansing, titulado:

“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE SISTEMAS DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRAS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Petróleo, y que sin ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. Griselda Zorrilla de Mora
Jurado

Prof. Ovidio Suárez
Jurado

Prof. Luis Norberto Bueno
Tutor Académico

DEDICATORIA

El presente trabajo, está dedicado a la memoria de mi Madre. La persona más maravillosa que conocí jamás. Por todo su esfuerzo, dedicación y sacrificios por hacerme la persona que soy hoy en día. Todo lo que soy te lo debo a ti. Este era tu sueño. Sé que siempre estarás conmigo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso por iluminarme siempre en todos los días de mi vida.

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela Patrimonio Cultural de la Humanidad, a la Facultad de Ingeniería, a la Escuela de Petróleo y a todo los profesores y empleados que ayudaron en mi crecimiento Profesional y Personal.

A PDVSA por permitirme la realización de este Trabajo Especial de Grado.

A mis tutores Industriales Aiskely Blanco y Wilfredo Rodríguez, por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto, por su orientación, por sus consejos y en general por toda su colaboración

A mi tutor Académico Luis Norberto Bueno, por su valiosa contribución, por sus consejos y por todas sus orientaciones e indicaciones.

A los miembros del Laboratorio de Cementación de PDVSA – INTEVEP, Urbano Medina y Williams Aular por sus consejos y apoyo técnico durante la realización del trabajo y por hacer que mi paso por el laboratorio fuese lo más agradable posible.

A Mariselis Trujillo, Alicia Colina, Astrid Centeno y Maria Inmaculada García, personal de PDVSA - INTEVEP por toda su ayuda brindada en la elaboración de este trabajo.

A la profesora Griselda Zorrilla de Mora por sus palabras y consejos en los momentos en los que más los necesitaba.

A Glenda Castro y Grisel Castro. Por todo lo que han hecho por mí, por ser una verdadera familia aunque los demás se encuentren tan lejos.

A mis amigos, Argenis Álvarez, Carlos Cruces, Carlos Sánchez, David Álvarez, Denys Delgado, Francisco Cestari, Juan Luis Expósito, Imanaida Calderon, Ismael Alvarado, Laureano González, Rafael Quijada, Rigoberto Hernández, por estar siempre ahí, apoyándome en los momentos buenos y malos.

A Ima, por todo su apoyo y colaboración, por esa amistad incondicional. No tengo palabras como expresarte mi agradecimiento por todo lo que has hecho por mí.

A todas aquellas personas que de una u otra forma me han acompañado y que pude haber olvidado mencionar.

Martín C., José J.

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE SISTEMAS DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRAS

Tutor Académico: Prof. Luis Norberto Bueno. Tutores Industriales: Aiskely Blanco y Wilfredo Rodríguez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Año 2002. 121 pp.

Palabras Claves: Cementación, Fibras, Propiedades Mecánicas

Resumen. El éxito de la cementación del espacio anular está en el buen aislamiento zonal que se logre entre el hoyo y la formación. Sin embargo, este objetivo se ve afectado, por problemas de migración de fluidos o por las fallas inducidas en el cemento fraguado, debido a los diferentes esfuerzos a los que éste es sometido durante la vida del pozo. El objetivo de este trabajo es el de mejorar la resistencia del cemento a estos esfuerzos y garantizar un buen aislamiento zonal, mediante el uso de fibras como aditivos en las lechadas.

Para ello se dispuso de distintos tipos de fibras, con las cuales se diseñaron sistemas de cemento, y cuyas propiedades Mecánicas (Resistencia a la Flexión, Resistencia a la Tensión, Resistencia al Impacto y Resistencia a la Compresión) fueron evaluadas en relación con un sistema sin refuerzo. De esta manera pudimos observar el comportamiento e influencia de las fibras en los sistemas reforzados con relación al sistema no reforzado. Los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas a los sistemas de cemento, nos permiten afirmar que las fibras tienen un fuerte impacto en la mejora de las propiedades mecánicas de los mismos, ofreciendo resistencia a los esfuerzos inducidos sobre el cemento durante la vida del pozo.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE TABLAS.....	XV
ABREVIATURAS.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	4
1 MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 CEMENTACIÓN PRIMARIA.....	5
1.1.1 OBJETIVOS DE LA CEMENTACIÓN PRIMARIA.....	5
1.1.2 EL PROCESO BÁSICO DE CEMENTACIÓN.....	6
1.1.3 RECOMENDACIONES PARA SEGUIR UN BUEN PROCESO DE CEMENTACIÓN.....	9
1.1.4 MATERIALES USADOS EN LA CEMENTACIÓN.....	10
1.1.5 ADITIVOS.....	15
1.1.5.1 TIPOS DE ADITIVOS.....	15
1.1.6 REOLOGÍA DE LAS LECHADAS DE CEMENTO.....	23
1.1.7 CÁLCULOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO.....	27
1.1.7.1 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA.....	28
1.1.7.2 CÁLCULO DE VOLÚMENES DE LECHADAS.....	29
1.1.7.3 PRUEBAS BÁSICAS REALIZADAS AL CEMENTO.....	30
1.2 ELASTICIDAD.....	34
1.2.1 ELASTICIDAD LINEAL.....	34

1.2.1.1	ESFUERZO.....	35
1.2.1.2	DEFORMACIÓN.....	37
1.2.1.3	MÓDULO ELÁSTICO.....	38
1.2.2	ELASTICIDAD NO LINEAL.....	40
1.2.2.1	RELACIONES ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	40
1.2.3	EVOLUCIÓN DE LOS ESFUERZOS DURANTE EL TRABAJO DE CEMENTACIÓN.....	45
1.2.4	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CEMENTO.....	46
1.3	CEMENTO REFORZADO CON FIBRAS.....	48
1.3.1	TIPOS DE FIBRAS.....	50
1.3.1.1	FIBRA DE ACERO.....	50
1.3.1.2	FIBRA DE VIDRIO.....	51
1.3.1.3	FIBRAS SINTÉTICAS.....	51
1.3.1.4	FIBRA DE CARBONO.....	53
1.3.1.5	FIBRAS NATURALES.....	54
1.3.2	TÉCNICAS UTILIZADAS PARA PRODUCIR COMPUESTOS REFORZADOS.....	56
1.3.3	PRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA DEL CEMENTO REFORZADO.....	57
1.3.4	MECANISMOS DE REFUERZOS CON FIBRAS.....	58
1.3.5	MÉTODOS DE PRUEBA.....	62
1.3.5.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	62
1.3.5.2	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	63
1.3.5.3	RESISTENCIA AL IMPACTO.....	64
1.3.5.4	RESISTENCIA A LA TENSIÓN.....	65

2	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	66
2.1	MATERIALES.....	66
2.1.1	CEMENTO.....	66
2.1.2	FIBRAS.....	66
2.2	EQUIPOS.....	67
2.3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	73
2.3.1	MEZCLABILIDAD DE LAS FIBRAS.....	75
2.3.2	AJUSTE DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS LECHADAS.....	76
2.3.3	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO.....	77
2.3.4	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	79
2.3.5	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, MÓDULO DE YOUNG Y RELACIÓN DE POISSON.....	82
2.3.6	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN.....	83
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
3.1	SELECCIÓN DE LAS FIBRAS.....	85
3.2	MEZCLABILIDAD DE LAS FIBRAS.....	85
3.3	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS FÍSICAS.....	90
3.4	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS.....	94
3.4.1	RESISTENCIA AL IMPACTO.....	94
3.4.2	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	96
3.4.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y COMPORTAMIENTO ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	100
3.4.4	RESISTENCIA A LA TENSIÓN.....	104
4	CONCLUSIONES.....	108

5	RECOMENDACIONES.....	110
6	REFERENCIAS.....	111
7	APÉNDICES.....	114
8	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1. Proceso de cementación mediante dos tapones.....	8
Figura N° 2. Composición del cemento Portland.....	11
Figura N° 3. Comportamiento del esfuerzo de corte versus la velocidad de corte de varios fluidos en un gráfico lineal.....	27
Figura N° 4. Esfuerzo sobre áreas transversales.....	35
Figura N° 5. Esfuerzo local.....	37
Figura N° 6. Cuerpo rígido deformado.....	37
Figura N° 7. Deformación de un cuerpo rígido por acción de una fuerza.....	39
Figura N° 8 a. Comportamiento de un material linealmente elástico.....	41
Figura N° 8 b. Comportamiento de un material perfectamente elástico.....	42
Figura N° 8 c. Material Elástico.....	42
Figura N° 8 d. Material sufriendo una deformación permanente.....	43
Figura N° 9. Curva esfuerzo - deformación típica.....	44
Figura N° 10. Distribución bidimensional y tridimensional del cemento reforzado con fibras.....	57
Figura N° 11. Esfuerzo en la fibra y esfuerzo interfacial en un compuesto no fraturado.....	59
Figura N° 12. Esquema del equipo para la determinación de la resistencia a la flexión.....	63
Figura N° 13. Esquema del equipo para la determinación de la resistencia al impacto.....	64
Figura N° 14. Esquema del equipo para la determinación de la resistencia a la tensión.....	65

Figura N° 15. Balanza Electrónica.....	68
Figura N° 16. Mezclador.....	68
Figura N° 17. Balanza presurizada.....	69
Figura N° 18. Consistómetro Presurizado.....	69
Figura N° 19. Cámara de curado.....	70
Figura N° 20. Prensa Mecánica.....	70
Figura N° 21 Consistómetro atmosférico.....	71
Figura N° 22 Viscosímetro rotacional.....	71
Figura N° 23 Impactómetro.....	72
Figura N° 24 Celda triaxial.....	72
Figura N° 25. Celda para muestras de resistencia al impacto.....	78
Figura N° 26. A. Celda para muestras de flexión. B. Curado de las muestras en baño de María.....	79
Figura N° 27. Muestra curada para la prueba de resistencia a la flexión.....	80
Figura N° 28. Soporte para la prueba de resistencia a la flexión.....	80
Figura N° 29. Celda BP y muestras curadas para la prueba de resistencia a la compresión.....	82
Figura N° 30. Fibra de carbono.....	88
Figura N° 31. Fibra Mineral.....	88
Figura N° 32. Fibra de polipropileno.....	89
Figura N° 33. Comparación de los resultados obtenidos de resistencia al impacto.....	95
Figura N° 34. Comparación de los resultados de resistencia a la flexión.....	97
Figura N° 35. A. Cemento reforzado con 0,1% de fibra de polipropileno. B. Cemento reforzado con 0,2 % de fibra de polipropileno.....	98

Figura N° 36. A. Cemento reforzado con 1% de fibra mineral. B. Cemento refrozado con 7 % de fibra mineral.....	98
Figura N° 37. A. Cemento reforzado con 2% de fibra de carbono. B. Cemento reforzado con 1% de fibra de carbono.....	99
Figura N° 38. Relación esfuerzo - deformación de los sistemas evaluados.....	103
Figura N° 39. Comparación de los resultados de resistencia a la tensión.....	105

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1. Aceleradores.....	16
Tabla N° 2. Retardadores.....	17
Tabla N° 3. Extendedores.....	18
Tabla N° 4. Densificantes.....	19
Tabla N° 5. Dispersantes.....	20
Tabla N° 6. Controladores de filtrado.....	21
Tabla N° 7. Controladores de pérdida de circulación.....	22
Tabla N° 8 Aditivos especiales.....	22
Tabla N° 9. Requerimientos de agua para algunos cementos A.P.I.....	30
Tabla N° 10. Propiedades de algunas fibras utilizadas para reforzar cemento.....	55
Tabla N° 11. Propiedades de las fibras evaluadas.....	67
Tabla N° 12. Propiedades de las fibras seleccionadas.....	88
Tabla N° 13. Propiedades reológicas de los sistemas evaluados.....	92
Tabla N° 14. Propiedades físicas de los sistemas evaluados.....	93
Tabla N° 15. Resultados de Resistencia al impacto.....	94
Tabla N° 16. Resultados de resistencia a la flexión.....	96
Tabla N° 17. Resultados de la resistencia a la compresión y comportamiento esfuerzo- deformación.....	100
Tabla N° 18. Resultados de la resistencia a la tensión.....	104
Tabla N° 19. Comparación de las fibras y sus mejoras sobre las propiedades mecánicas en relación con el sistema no reforzado.....	106

ABREVIATURAS

A.P.I. : American Petroleum Institute

A.S.T.M. : American Society for Testing and Materials

BHCT: Bore Hole Circulating Temperature

C₃A: Aluminato Tricálcico

°C: Grados Celsius

cc: Centímetros Cúbicos

cm²: Centímetros cuadrados

cps: Centipoise

°F: Grados Fahrenheit

g: Gramos

gal:Galones

Gpa: Giga Pascal

HPHT: High Presure and High Temperature

Kgf: Kilogramos fuerza

lbf: Libras fuerza

lbs: Libras

lpc: Libras por pulgada cuadrada

lpg: Libras por galón

m²: Metros cuadrados

min: Minutos

ml: Mililitros

mm: Milímetros

Mpa: Mega Pascal

N: Newton

Pa: Pascal

p: pie

p³: pies cúbicos

r.p.m.: revoluciones por minuto

sx: sacos

Spec 10B: Specification 10B

μm: micrómetros

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de la cementación del espacio anular existente entre el revestimiento y la formación, es el de proveer un aislamiento zonal de las formaciones que han sido perforadas, para evitar la comunicación de fluidos entre zonas de baja presión presentes a lo largo del pozo; sin embargo, aún en situaciones donde el cemento fue correctamente colocado y provisto inicialmente de un buen sello hidráulico, muchas veces se presenta la pérdida del aislamiento zonal con el paso del tiempo. Esta pérdida se manifiesta, por ejemplo, por un problema de migración de gas o agua que no fue detectado inicialmente, o por el fracturamiento de una zona equivocada durante un tratamiento de estimulación.¹

Pruebas de laboratorio muestran que los esfuerzos inducidos en el cemento por la variación de las condiciones del hoyo pueden ser la causa de este problema.²

Diversos procesos pueden causar una variación de las condiciones del hoyo en una sección revestida del pozo. Estos procesos incluyen, la perforación del pozo, la estimulación y la producción del yacimiento. La perforación, implica una variación de la presión, si el peso del lodo ha sido modificado para perforar la próxima sección del pozo y ciclos térmicos por las paradas y circulación, incremento de la temperatura de las secciones revestidas cuando el lodo, el cual se calienta por la formación que está siendo perforada, retorna a la superficie por el anular. Con el proceso de perforación se asocian distintos incrementos de presión que resultan del cambio de densidad del fluido de perforación, las pérdidas por fricción y las pruebas de integridad, lo que puede causar daños en el cemento.

El incremento de presión y temperatura durante la producción, corresponden principalmente a secciones de revestimiento cerca de la superficie, donde la

presión de superficie se incrementa desde casi el valor de la presión atmosférica hasta el valor de la presión de producción, y por lo tanto, no afecta las secciones cementadas, a menos que, ocurra un problema de migración de gas como resultado del incremento de la presión en el anular. Si el anular está saturado de gas, un aumento de la temperatura también puede conllevar a un incremento de la presión en el anular después de una expansión de gas.¹

El descenso de la presión durante la producción, afecta principalmente el fondo del hoyo, donde, la presión de fondo, la cual es controlada por la tasa de producción, disminuye desde la presión estática hasta la presión de fondo,¹ además, si el pozo es completado usando un sistema multilateral, la capa de cemento estará sujeta a fracturamiento y subsecuente pérdida de adherencia debido a los impactos en la tubería.³

Finalmente, las cargas aplicadas al cemento durante la vida del pozo, pueden causar cambios en la presión y temperatura del mismo. Estas variaciones de presión y temperatura durante la vida del pozo, promueven en forma adicional la pérdida de adherencia del cemento, como resultado de los estados de esfuerzos a los que éste es sometido. Tal situación constituye un grave problema, debido a que propicia la degeneración de las Propiedades Mecánicas (Resistencia a la Flexión, Resistencia a la Compresión, Resistencia al Impacto, Resistencia a la Tensión, Relación de Poisson y Módulo de Young) del aislamiento zonal.

Algunos estudios revelan, que estas propiedades mecánicas, pueden ser mejoradas mediante la incorporación de fibras como aditivos en las lechadas de cemento, debido al deslizamiento entre la superficie de la fibra y la matriz del cemento, lo cual incrementa la resistencia de fractura por la disipación de la energía.⁴

Sin embargo, los efectos reforzantes de las fibras son variados. Un producto con distintos refuerzos tiene distintos comportamientos mecánicos. Entonces, para obtener un producto con propiedades mecánicas satisfactorias, es necesario la evaluación de distintas fibras, y su efecto en los sistemas cementantes. El presente trabajo tiene como objetivo, evaluar el comportamiento mecánico de distintos tipos de fibra y establecer su efecto como aditivo reforzante del cemento.

Para ello, se estudiaron distintas opciones de fibras, tales como, fibra de carbono, fibra de polipropileno, fibra mineral, fibra de vidrio, fibra poliolefina y fibra de acero.

Adicionalmente, se realizó una selección de las fibras de acuerdo a la disponibilidad y mezclabilidad de estas y posteriormente, mediante pruebas de laboratorio, se evaluaron las propiedades físicas de las lechadas y las propiedades mecánicas de los sistemas reforzados con estas fibras. Entre las propiedades mecánicas evaluadas se encuentran, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la resistencia al impacto, la resistencia a la tensión y el comportamiento esfuerzo- deformación. Además se evaluarán propiedades físicas de las lechadas, tales como, reología, mezclabilidad operacional, tiempo de espesamiento y la cantidad de fluido libre.

Aquellos sistemas que presentaron el mejor comportamiento durante las pruebas fueron seleccionados y su uso recomendado de acuerdo a la capacidad de los mismos de trabajar con las condiciones anteriormente expuestas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo tiene como objetivo, la evaluación de las propiedades mecánicas de sistemas cementantes reforzados con fibras, así como, el establecimiento del método de incorporación de parámetros mecánicos adicionales a los realizados convencionalmente al cemento, que permitan un mejor diseño y evaluación de sistemas cementantes y la estabilidad del cemento durante la vida del pozo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo general planteado en el trabajo, se tiene planificado cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar las opciones de fibras disponibles
- Definir el método de evaluación de las propiedades mecánicas de los sistemas reforzados
- Seleccionar las fibras a utilizar
- Evaluar las propiedades mecánicas de los sistemas de cemento reforzados con las fibras bajo condiciones críticas de presión y temperatura
- Recomendar el uso de las fibras según su desempeño bajo condiciones críticas

1 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos relacionados con el proceso de cementación, en conjunto con la base teórica y la terminología básica del comportamiento mecánico del cemento, así como, los aspectos teóricos relacionados con fibras y sus aplicaciones como materiales reforzantes de los cementos.

1.1 CEMENTACIÓN PRIMARIA

La cementación primaria es el proceso que consiste en mezclar una lechada de cemento con agua, por medio de equipos especiales de mezclado y bombearla a través del revestimiento hacia el espacio anular existente entre el revestimiento y las formaciones expuestas del hoyo.

1.1.1 OBJETIVOS DE LA CEMENTACIÓN PRIMARIA ⁵

El objetivo principal de toda cementación primaria es el de proveer un aislamiento zonal en el espacio anular entre el revestimiento y la formación, para impedir la comunicación de fluidos, tales como, agua o gas, de una zona de petróleo hacia otra zona. Entre otros de los objetivos de la cementación primaria se pueden mencionar: dar soporte y adherencia a la tubería, prevenir los posibles reventones del pozo mediante un fraguado rápido del cemento, proteger el revestimiento de los esfuerzos y choques cuando se perfora un hoyo más profundo, proteger el revestimiento de la corrosión y aislar las zonas con pérdidas de circulación o “zonas ladronas”.

Estos requerimientos hacen de la cementación primaria, la operación más importante desarrollada en un pozo. Sin un completo aislamiento zonal en el hoyo, el pozo podría nunca alcanzar un completo potencial de producción.⁵

1.1.2 EL PROCESO BÁSICO DE CEMENTACIÓN

El proceso básico de la cementación primaria es el de bombeo y desplazamiento. Después de perforar el pozo hasta la profundidad requerida, la tubería de perforación es removida, luego es corrido el revestimiento dentro del pozo hasta que este alcance el fondo del mismo. En este momento, el lodo de perforación utilizado para la remoción de los ripios todavía se encuentra en el hoyo. Este lodo debe ser removido y reemplazado con el cemento.⁶

Una vez acondicionado el hoyo, el trabajo se inicia instalando y probando las líneas de bombeo. El premezclado del cemento debe realizarse y monitorearse para obtener el control deseado de las propiedades de la lechada. En paralelo al premezclado, se inicia el bombeo de los preflujos (lavadores y/o espaciadores) de manera tal, de remover tanto los restos de lodo, como el revoque del mismo. Esto permitirá una mayor adherencia del cemento, tanto con el revestimiento, como con la formación.⁷

Posteriormente se bombea el volumen de lechada de cemento requerido para llenar el espacio anular a la densidad programada. Cuando el volumen de cemento ha sido bombeado, se libera el tapón de desplazamiento, el cual separa la lechada de cemento del lodo de desplazamiento. El bombeo finaliza cuando se asienta el tapón de desplazamiento en el cuello flotador.⁶

Con el cemento ocupando el espacio anular y una longitud predeterminada por encima del colgador (hasta 400 pies), se levanta la sarta para liberar la tubería de perforación del tope del colgador. Luego se circula el lodo de tubería a anular hasta obtener un retorno limpio; se cierra el pozo por espacio de algunas horas (aproximadamente 4 horas) para esperar el fraguado del cemento y se termina de sacar la tubería del hoyo, antes de empezar los trabajos de completación o perforar hacia horizontes más profundos.⁶

Un método alterativo, es el método de dos tapones, utilizado hoy en día como el más efectivo para la cementación convencional, en el cual se libera un tapón delante de la lechada de cemento, y otro al final de la misma, separando la lechada del fluido de perforación y de los lavadores y espaciadores, evitando la contaminación de la lechada. Este método es ilustrado en la figura 1.⁷

El método ideal para la colocación del cemento en el fondo del hoyo, siempre que las condiciones lo permitan, es disminuir la viscosidad con el objeto de obtener flujo turbulento con un caudal moderado. Esto se cumple agregando reductores de fricción o dispersantes o incrementando el volumen de agua a la lechada.⁶

El flujo turbulento ofrece además la ventaja, que incrementa la probabilidad de la eliminación del lodo y reduce la contaminación.⁶

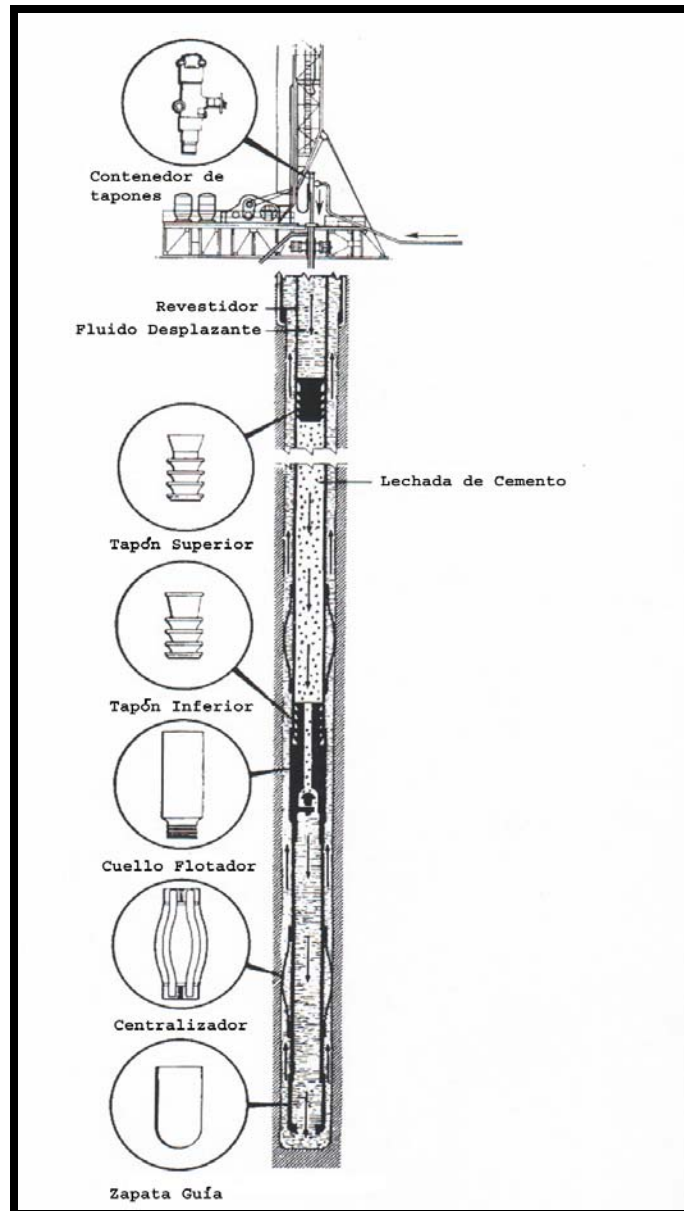


Figura N°1. Proceso de Cementación mediante dos tapones ⁵

1.1.3 RECOMENDACIONES PARA SEGUIR UN BUEN PROCESO DE CEMENTACIÓN ⁵

1. Analizar los parámetros del pozo: Definir las necesidades del pozo, y luego diseñar los fluidos y las técnicas de desplazamiento para conocer los requerimientos necesarios durante la vida del pozo. Los factores que influyen en el diseño usado para un pozo son: Propiedades de los fluidos, mecánica de fluidos y la química de los mismos
2. Cálculo de la composición de la lechada y desarrollo de pruebas de laboratorio en los fluidos diseñados en el paso 1 para asegurarse que cumplen con los requerimientos de trabajo.
3. Uso de las herramientas y equipos necesarios para implementar el diseño del paso 1.
4. Monitoreo en tiempo real del proceso, comparación con el diseño del paso 1 e implementación de los cambios que sean necesarios.
5. Evaluación de los resultados, comparación con el diseño del paso 1 y realización de tantos cambios como sean necesarios para trabajos futuros.

1.1.4 MATERIALES USADOS EN LA CEMENTACIÓN

La lechada de cemento usada en la industria petrolera consiste principalmente de cemento, aditivos y agua. El uso de los diferentes tipos de cemento y aditivos, dependen del fin de su aplicación.

CEMENTO PORTLAND

El cemento "Portland" tiene sus orígenes en la cal u óxido de calcio, a partir del cual y luego de cientos de años de estudios empíricos y científicos, se llega a lo que hoy se conoce como cemento.⁸

A través de la historia, los pueblos egipcios, griegos y romanos, utilizaron la cal en sus construcciones. En la América Prehispánica, los Aztecas la emplearon también en la fabricación de tabiques y techos armados con caña y bambú. En 1824, un albañil Inglés llamado Joseph Aspdin, patentó un producto que él llamó cemento Portland, pues al endurecerse adquiría un color semejante al de una piedra de la isla Portland en Inglaterra. En 1838, este cemento se utilizó por primera vez en una construcción de importancia en uno de los túneles construidos bajo el río Támesis en Londres. David Saylor, un técnico norteamericano, fue el primero en fabricar cemento en América, así nació en 1850 la industria del cemento en Norteamérica. El uso del cemento Portland continuó extendiéndose hasta convertirse en el material de construcción más utilizado en el mundo.⁸

Este cemento es utilizado en el 99% de todas las operaciones de cementación primaria. Es fabricado con la fusión de carbonatos de calcio (calizas) y silicatos de aluminio (arcillas). Una pequeña cantidad de hierro es añadida.⁸

El mayor componente del cemento Portland es el silicato tricálcico. Las especificaciones para este cemento son establecidas por la A.P.I. debido a que las condiciones a las que se expone este cemento en los pozos, pueden diferir radicalmente de las condiciones en otras aplicaciones como la construcción.⁵

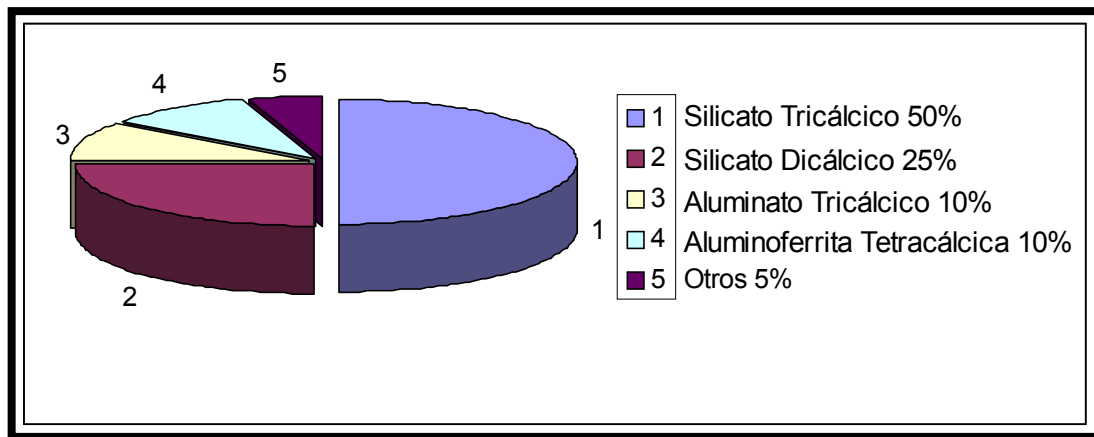


Figura N° 2. Composición del Cemento Portland

Actualmente, existen 8 clases de cemento Portland que van desde la A hasta la G, siendo los más comunes: A.P.I CLASE A, C, G y H.

- **Clase A:** Diseñado para uso desde superficie hasta profundidades de 6000 pies, cuando no se requieren propiedades especiales. Sus características son similares al cemento utilizado para la construcción. Es equivalente al ASTM tipo I. Una lechada de cemento clase A requiere 46% de agua. (100 partes de cemento seco en peso por 46 partes de agua en peso)⁵
- **Clase B:** Diseñado para uso desde superficie hasta 6000 pies, cuando se requieren condiciones de moderada y alta resistencia a los sulfatos. Tiene menor

contenido de C_3A que el cemento clase A (C: CaO , A: Al_2O_3). Es equivalente al ASTM tipo II. Una lechada de cemento clase B requiere 46% de agua. ⁵

Los cementos con bajo contenido de C_3A son menos susceptibles al ataque de sulfatos. Los sulfatos son considerados como los productos químicos más corrosivos con respecto al cemento fraguado en el fondo del pozo. Ellos reaccionan con los cristales de calizas y de aluminato tricálcico. Estos cristales requieren un mayor volumen que el provisto por el espacio poroso en el cemento fraguado, y dan por resultado una excesiva expansión y deterioro del cemento. Podemos encontrar estos sulfatos en las salmueras de las formaciones y algunos de ellos son, el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio ⁵

- **Clase C:** Diseñado para uso desde superficie hasta 6000 pies. Requiere de más agua y por lo tanto crea una lechada de baja densidad. Se asienta rápidamente pero no desarrolla mucha resistencia a la compresión. Tiene un alto contenido de C_3A . Es equivalente al ASTM tipo III. Una lechada de cemento clase C requiere 56% de agua. ⁵

Los cementos clase D, E y F (Cementos retardados), son utilizados para alcanzar mayores profundidades. Presentan una significativa reducción de las cantidades de C_3A y de C_3S (S: SiO_2) y un aumento de tamaño de sus partículas lo que provoca un efecto retardante en el fraguado. ⁵

- **Clase D:** Diseñado para uso desde 6000 hasta 10000 pies y condiciones de presión y temperatura moderadamente altas. Equivale al ASTM tipo IV. El requerimiento de agua para una lechada con cemento clase D es de 38%. ⁵

- **Clase E:** Diseñado para uso desde 10000 hasta 14000 pies y condiciones de presión y temperatura altas. Equivale al ASTM tipo V. Requerimiento de agua: 38%.⁵
- **Clase F:** Diseñado para uso desde 10000 hasta 16000 pies y condiciones de presión y temperatura extremadamente altas. Equivale al ASTM tipo VI. Requerimiento de agua: 38 %.⁵

Los cementos clase G y H son los más usados hoy en día. Fueron desarrollados en respuesta a las mejoras de la tecnología de aceleramiento y retardamiento.⁵

- **Clase G y H:** Diseñados para ser usados desde superficie hasta 8000 pies. Pueden ser usados con retardadores o aceleradores para cubrir un amplio rango de presiones y temperaturas. La composición de estos cementos es muy similar pero el cemento H requiere menos agua que el cemento clase G. Al requerir menos agua, la lechada es de mayor densidad y más resistente. El requerimiento de agua para una lechada con cemento clase G es de 44% y de 38% para una lechada con cemento clase H. Equivalen a los ASTM tipo VII y VIII respectivamente.⁵

CEMENTOS ULTRAFINOS⁵

Las partículas de estos cementos son mucho más pequeñas que las del cemento Portland. El tamaño promedio de sus partículas es de 2 μ m en comparación con los cementos convencionales cuyas partículas poseen un tamaño comprendido entre 50 y 100 μ m. La principal aplicación de estos cementos es como un cemento de peso liviano (densidad baja) con un desarrollo de resistencia temprano. También son usados para reparar fracturas en el cemento, reparar fisuras en el

revestimiento, cerrar flujos de agua u otros problemas similares, debido a que son capaces de penetrar aberturas pequeñas gracias al mínimo tamaño de sus partículas.

CEMENTOS EPOXY ⁵

Son materiales comúnmente usados cuando el cemento está expuesto a fluidos corrosivos. Estos cementos no son solubles en ácido pero son muy costosos. Generalmente son usados en pozos inyectoros donde se utilizan fluidos con bajo pH. Son productos puros y muy consistentes.

ESCORIA

La composición de este material es principalmente silicato monocálcico, silicato dicálcico y aluminosilicato dicálcico. Este compuesto es altamente tolerante a la contaminación con fluidos de perforación. Una de sus principales aplicaciones es la de convertir el lodo en cemento.⁵ Esta tecnología ha sido aplicada a escala nacional en pozos sometidos a inyección de vapor con muy buenos resultados.

PUZOLANAS ⁵

Son materiales silicios y aluminosos que poseen poco o ningún valor cementoso pero que al reaccionar con el hidróxido de calcio a temperaturas moderadas, forman compuestos con propiedades de cemento. El más común de estos compuestos es el “FLY ASH” o ceniza volcánica, el cual se obtiene como residuo de las plantas eléctricas de carbón. Las puzolanas naturales provienen generalmente de las actividades volcánicas.

Cuando estos compuestos son utilizados en combinación con el cemento Portland, el Hidróxido de Calcio liberado por la hidratación del cemento, reacciona con los aluminosilicatos presentes en la Puzolana para formar compuestos cementosos con propiedades cohesivas y adhesivas. El FLY ASH es el que más comúnmente es combinado con el cemento Portland debido a su bajo costo, no lo diluye e incrementa la resistencia a la compresión del mismo. Sin embargo, debido a su inconsistencia, solo es usado a temperaturas por debajo de los 200 °F.

1.1.5 ADITIVOS ⁵

Los aditivos para el cemento, han sido desarrollados para permitir el uso del mismo en gran variedad de aplicaciones en pozos de petróleo y gas. Estos aditivos modifican el comportamiento del sistema del cemento, permiten un emplazamiento ideal entre el revestimiento y la formación, un desarrollo rápido de resistencia a la compresión y un adecuado aislamiento zonal durante la vida del pozo. En la actualidad existen mas de 40 aditivos que se utilizan con el cemento A.P.I. para conseguir características óptimas de una lechada de cemento a cualquier condición de pozo. Con la fabricación de los cementos básicos (Clase A.P.I. G y H), y equipos de mezcla, el uso de aditivos es muy simple y flexible. Las lechadas de cemento pueden diseñarse ahora para tolerar requerimientos específicos en el fondo del hoyo.

1.1.5.1 TIPOS DE ADITIVOS ⁵

- **Aceleradores:** Reducen el tiempo de bombeabilidad del sistema, incrementan la resistencia a la compresión y reducen el tiempo de fraguado del cemento (W.O.C: waiting on cement time). Son usados generalmente en revestimientos de superficie, pozos poco profundos, y tapones de cemento. El acelerador más

común es el cloruro de calcio, por ser el más eficiente y económico de todos. Además del cloruro de calcio, otras sales pueden ser usadas como aceleradores: carbonatos, silicatos, nitratos, nitritos, sulfatos, y bases alcalinas tales como sodio, potasio e hidróxido de amonio. En la tabla 1 se presentan los principales tipos de aceleradores y sus características.

Tabla N° 1. Aceleradores ⁹

TIPO	MEZCLA % POR PESO DE CEMENTO	TIPO DE CEMENTO	COMO SE USA
Cloruro de calcio CaCl₂	2-4	Todas las clases A.P.I.	Seco o húmedo
Cloruro de sodio NaCl	3-10 (en el agua) 1,5-5 (cemento)	Todas las clases A.P.I.	Seco o húmedo
Formas semihidratadas de yeso	20-100	Clases A.P.I. A, B, C, G o H	Seco
Silicato de Sodio	1-7,5	A, B, C, G o H	Seco o Húmedo
Cementos con dispersantes y agua reducida	0,5-1,0	A, B, C, G o H	Seco o Húmedo

- **Retardadores:** Prolongan el tiempo de bombeabilidad, retardan el tiempo de fraguado y no reducen la resistencia a la compresión. Son usados a altas temperaturas para dar suficiente tiempo a la lechada para que ésta endurezca. Los retardadores más comunes son los lignosulfonatos y los azúcares. Los lignosulfonatos se usan generalmente a temperaturas por encima de los 200 °F. Los compuestos de azúcar se utilizan en un rango de temperatura entre 200 y 350 °F. En la tabla 2 se presentan los principales tipos de retardadores y sus características.

Tabla N° 2. Retardadores ⁹

TIPO	CANTIDADES POR PESO DE CEMENTO (%)
<i>Lignosulfonatos de sodio y calcio</i>	0,1-1,0
<i>Lignosulfonato de Calcio</i>	0,1-1,0
<i>Lignosulfonato de calcio ácido orgánico</i>	0,1-2,5
<i>Agua saturada en sal</i>	17 lbs/sx

- **Extendedores:** Estos compuestos reducen la densidad de la lechada, aumentan el rendimiento de la misma, proporcionan una baja pérdida de filtrado y reducen los costos. El agua es el compuesto más económico que se le puede añadir al cemento. Generalmente, un saco de cemento (94 lb) dará cerca de 1 pie cúbico de lechada. La adición de agua extra, puede incrementar el volumen a 3.0 p³/sx. El problema está, en que la lechada será demasiado delgada y el cemento tendrá agua libre, lo que ocasiona que disminuya la resistencia de la lechada debido a la dilución. Para prevenir esto, se utilizan extendedores tales como la bentonita o el silicato de sodio. Si se requiere reducir la densidad de la lechada sin disminuir la resistencia a la compresión, se puede utilizar gas que no disminuye la resistencia tanto como el agua. También se pueden utilizar esferas cerámicas para el mismo propósito. Otros extendedores son las puzolanas. El FLY ASH posee una densidad menor que el cemento Portland pero no reduce mucho la densidad de la lechada. Sin embargo debido a que es más económico que el cemento, se puede reducir el costo del sistema si el trabajo es realizado con la mitad de cemento y la otra mitad con las puzolanas. Normalmente se añade bentonita a esta mezcla lo que hace posible añadir más agua. En la tabla 3 se presentan los principales tipos de extendedores y sus características.

Tabla N°3. Extendedores ⁹

<i>TIPO</i>	<i>CANTIDAD POR PESO DE CEMENTO(%)</i>
<i>Bentonita</i>	2 a 16
<i>Atapulgita</i>	0,5 a 4
<i>Tierra de Diatomea</i>	0, 20, 30 o 40
<i>Puzolana</i>	74 lbs/sk
<i>Gilsonita</i>	1 a 50 lbs/sk
<i>Silicato de sodio</i>	1 a 7,5 lbs/sk
<i>Carbón</i>	5 a 50 lbs/sk

• **Densificantes:** Se utilizan para incrementar la densidad de la lechada, para limitar y mantener la presión cuando ésta es muy elevada y mejorar el desplazamiento del lodo. Un método para incrementar la densidad es simplemente reducir la cantidad de agua en la mezcla. La principal desventaja de este método y de estas lechadas es la dificultad del control simultáneo de la pérdida de filtrado, una reología aceptable y el asentamiento de sólidos. Para que una sustancia cumpla función de agente densificante, debe cumplir ciertos criterios:

1. La distribución del tamaño de las partículas del material debe ser compatible con el cemento.
2. El requerimiento de agua debe ser bajo.
3. El material debe ser inerte con respecto a la hidratación del cemento y compatible con los demás aditivos.

Una lechada que tenga una densidad por encima de 17,5 lpg debe ser bombeada sin agentes densificantes. Los densificantes más comunes son la Ilmenita,

Hematita y la Barita. En la tabla 4 se presentan los principales tipos de densificantes y sus características.

Tabla N° 4. Densificantes. ⁹

TIPO	CANTIDADES USUALES POR PESO DE CEMENTO (%)
<i>Arena</i>	5 a 25
<i>Barita (BaSO₄)</i>	10 a 108
<i>Ilmenita (FeTiO₃)</i>	5 a 100
<i>Hematita (Fe₂O₃)</i>	4 a 104
<i>Sal</i>	5 a 16
<i>Reductores de fricción</i>	0,05 a 1,75

- **Dispersantes (Reductores de fricción):** Se agregan al cemento para proveer propiedades de flujo, y permite un bombeo de la lechada de cemento en flujo turbulento, minimizando los requerimientos de potencia hidráulica. Las lechadas contienen una alta concentración de sólidos en suspensión. El contenido de sólidos puede alcanzar hasta un 70%. La reología de cada suspensión está relacionada con la reología del líquido que la soporta, la fracción del volumen sólido (volumen de las partículas / volumen total) y la interacción de las partículas. Por lo tanto, la reología puede diferir altamente de la del agua. El contenido de sólidos es función directa de la densidad de la lechada. La interacción entre las partículas depende primordialmente de la distribución de la superficie de carga. Los dispersantes ajustan las cargas de las partículas para obtener las propiedades reológicas deseadas en la lechada. En la tabla 5 se presentan los principales tipos de dispersantes y sus características.

Tabla N°5. Dispersantes ⁹

<i>TIPO</i>	<i>CANTIDADES USUALES (lbs/sx)</i>
<i>Polímeros en polvo</i>	0,3 a 0,5
<i>Lignosulfonato de calcio</i>	0,5 a 1,5
<i>Cloruro de calcio</i>	1 a 16

- **Controladores de pérdida de filtrado:** Se utilizan para proteger las formaciones sensibles, prevenir la deshidratación del cemento y mejorar las cementaciones a presión. Si la pérdida de filtrado no es controlada, pueden ocurrir severos daños en el trabajo de cementación. Como el volumen de la fase acuosa disminuye, la densidad de la lechada aumenta y las características de la misma difieren del diseño original. Si se filtra suficiente fluido a la formación, la lechada se hace no bombeable. Para que el sistema trabaje adecuadamente, se requiere un rango A.P.I. de filtrado menor a 50 ml/30 min. Estos aditivos reducen la velocidad a la cual el agua en el cemento es forzada a las formaciones permeables, cuando un diferencial de presión existe dentro de la formación. Estos aditivos son generalmente polímeros tales como, celulosa, alcohol polivinil, polialcanolaminas, polímeros de poliacrilamidas, látex líquido, etc. En la tabla 6 se presentan los principales tipos de controladores de filtrado y sus características.

Tabla N°6. Controladores de filtrado ⁹

<i>TIPO</i>	<i>CANTIDADES USUALES POR PESO DE CEMENTO (%)</i>	<i>TIPO DE CEMENTO</i>	<i>COMO SE USA</i>
<i>Polímero orgánico (Celulosa)</i>	0,5-1,5	Todos	Seco
<i>Polímeros orgánicos dispersantes</i>	0,5-1,25	Todos	Seco o en el agua
<i>Látex</i>	1,0 gal/sx	Todos	Seco o en agua
<i>Cementos con bentonita y dispersantes</i>	12-16	G y H	Seco

- **Controladores de pérdida de circulación:** Estos aditivos se utilizan para reducir de una u otra forma la permeabilidad de la formación o alguna zona ladrona que se encuentra en un pozo. Su uso dependerá de cuan grave sea el problema. La pérdida de circulación tiende a ocurrir en formaciones cavernosas y particularmente en zonas altamente fracturadas, las cuales colapsan a presiones hidrostáticas relativamente bajas. Estos aditivos se usan para taponar esas zonas. Grandes partículas pueden ser colocadas en el cemento para prevenir el fracturamiento o sellar fracturas existentes. Los materiales más comunes son el carbón, la Gilsonita, la cáscara de nuez y algunas fibras como el nylon. En la tabla 7 se presentan los principales tipos de controladores de pérdida de circulación y sus características.

Tabla N°7. Controladores de pérdida de circulación ⁹

TIPO	NOMBRE	CANTIDAD RECOMENDADA (LBS/SK)	REQUERIMIENTOS DE AGUA (GAL/50LB)
En grano	Gilsonita	5-50	2
	Perlita	½-1 pie/sx	4 gal/pie
	Carbón	1-5	0,85
	Cáscara de nuez	1-10	2
En láminas	Celofán	1/8-2	No tiene
	Nylon	1/8-1/4	No tiene

- **Aditivos especiales:** Estos aditivos se añaden a las lechadas para mejorar propiedades especiales de las lechadas, como por ejemplo, las propiedades mecánicas.

Tabla N° 8. Aditivos especiales ⁹

MATERIAL	APLICACIÓN	CANTIDADES USUALES (%)
Sal	Aceleración, adherencia	1 - 16
Sílice	Evitar la retrogresión a la resistencia	-
Yeso	Fraguado rápido	4 - 10
Mezclas de estearatos	Antiespumante	-
Mezcla de sales orgánicas	Antiespumante	-
<u>Fibras</u>	Resistencia a impactos, Elasticidad	-

1.1.6 REOLOGÍA DE LAS LECHADAS DE CEMENTO ⁶

Los fluidos se clasifican en Newtonianos y No-Newtonianos. Los primeros presentan una proporcionalidad directa y constante entre velocidad de corte y esfuerzo de corte durante el flujo cuando se encuentra bajo régimen laminar. La viscosidad es independiente de la velocidad de corte (a temperatura y presión constantes) y comienzan a fluir inmediatamente de aplicada una fuerza. Cuando esa presión deja de ejercerse, el fluido retorna a su estado inicial.

Los No-Newtonianos, tienen un comportamiento diferente (lechadas, fluidos de perforación, etc.), son reológicamente complejos y se les designa generalmente como plásticos de Bingham o fluidos “power law” (ley de las potencias). No presentan una proporcionalidad directa entre fuerza y flujo, a presión y temperatura constantes. Algunos no comienzan a moverse inmediatamente de aplicada una fuerza, pero cumplen con las distintas etapas de flujo: Tapón, laminar y turbulento. Algunos fluidos No-Newtonianos cuando están en condición estática son tixotrópicos, es decir, tiene una estructura rígida o semirígida que se rompe al aplicarse un esfuerzo de corte. Una vez que la estructura de gel se rompe, el fluido se mantiene en esa condición mientras que esta fuerza actúe, pero se reconstruye si se deja al fluido reposar.

Los modelos matemáticos utilizados comúnmente para describir el comportamiento de los fluidos de perforación y las lechadas de cemento son el plástico de Bingham y el Power Law.

Plástico de Bingham: Es el modelo que más se utiliza en la industria petrolera, y asume que las lechadas y los fluidos de perforación se comportan como un plástico de Bingham ideal, y que todos los cálculos reológicos se pueden hacer

basándose en una relación lineal entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte. Esta relación se denomina viscosidad aparente y se obtiene del viscosímetro rotacional Fann. Este puede operar a seis velocidades: 600 – 300 – 200 – 100 – 6 y 3 r.p.m. Para este instrumento, el esfuerzo de corte (lbs/pie²), se expresa por:

$$S_s = \frac{\text{Lectura del dial} \times \text{Factor de resorte del instrumento} \times 1,066}{100}$$

(Ecuación N° 1)

En realidad, el valor 1,066 puede cambiar dependiendo de la combinación entre el motor y el cilindro interior movable del viscosímetro. La velocidad de corte es función de las r.p.m. y de las dimensiones del rotor y el cilindro interior.

Para el instrumento estándar es:

$$S_r = 1,703 \times \text{r.p.m.}$$

(Ecuación N° 2)

Los dos términos utilizados para clasificar el fluido son la viscosidad plástica y el punto cedente. La viscosidad plástica se expresa como la inclinación de la recta extrapolada en el gráfico de esfuerzo de corte versus velocidad de corte, y el punto cedente es la intersección de esta línea recta con el eje de los esfuerzos de corte. El viscosímetro Fann ha sido diseñado para determinar fácilmente los parámetros indicados.

Viscosidad Plástica (p) = (Lectura del dial a 600 – Lectura a 300) r.p.m.

(Ecuación N° 3)

Punto Cedente (Y) = Lectura a 300 – Viscosidad Plástica

(Ecuación N° 4)

La ecuación básica para este modelo es:

$$S_s = Y + 2,088555 \times 10^{-5} (p) (S_r),$$

(Ecuación N° 5)

donde,

Ss: Esfuerzo de corte (lb/pie)

Y: Punto cedente (lb/pie)

P: Viscosidad plástica (cp)

Sr: Velocidad de corte (seg^{-1})

La ecuación 5 determina una línea recta, y a partir de ella y de la calibración del instrumento, se determinan la viscosidad plástica y el punto cedente. Es importante entender la diferencia entre la viscosidad plástica y la viscosidad aparente, la primera es la inclinación de la parte lineal de la relación esfuerzo de corte - velocidad de corte, y es constante. La viscosidad aparente del punto considerado es la pendiente de la recta que une el origen con el punto en consideración (Esfuerzo de corte / velocidad de corte). En la figura 3, se muestra el comportamiento esfuerzo de corte – velocidad de corte de diferentes fluidos.

Modelo De Metzner y Reed (Power Law): Se basa en el supuesto que la lechada de cemento presenta una proporcionalidad entre el logaritmo de la presión de

fricción y el logaritmo de flujo, con un comienzo en dicho esfuerzo en la región del flujo laminar. Las ecuaciones son más complejas pero más exactas que el modelo anterior, y los resultados muy cercanos al exacto comportamiento de la lechada en el pozo.

Basándose en valores obtenidos en el viscosímetro FANN, se calculan las viscosidades aparentes de la lechada, y es este valor el que se utiliza en las ecuaciones y no el de la viscosidad plástica. La ecuación básica es:

$$S_s = K^n (S_r)$$

(Ecuación N° 6)

donde,

K: Índice de consistencia, (lb.seg/pie)

n: pendiente de la relación esfuerzo de corte/velocidad de corte

Por otra parte, la viscosidad aparente a una determinada velocidad de corte está dada por:

$$u = 47880^{(n-1)} K S_r$$

(Ecuación N° 7)

Esto significa que si $n = 1$, $u = 47880$, o sea que u es constante y por lo tanto estamos hablando de un fluido Newtoniano.

Para los cálculos de flujo es esencial la medida exacta de la viscosidad del fluido. Los dos principales instrumentos utilizados son el viscosímetro de tubo capilar y el Fann. El primero mide la relación entre la presión de fricción y el flujo, y es el método preferido para determinar el índice de consistencia en fluidos no-

newtonianos. Disponiendo valores de presión de fricción a varios caudales se puede preparar el gráfico logarítmico de velocidad de corte y esfuerzo de corte. Para fluidos cuyo comportamiento no depende del tiempo (no-tixotrópicos) esos valores dan generalmente una línea recta. El índice n' es la pendiente de la recta y K' es la intersección a la línea de esfuerzo de corte.

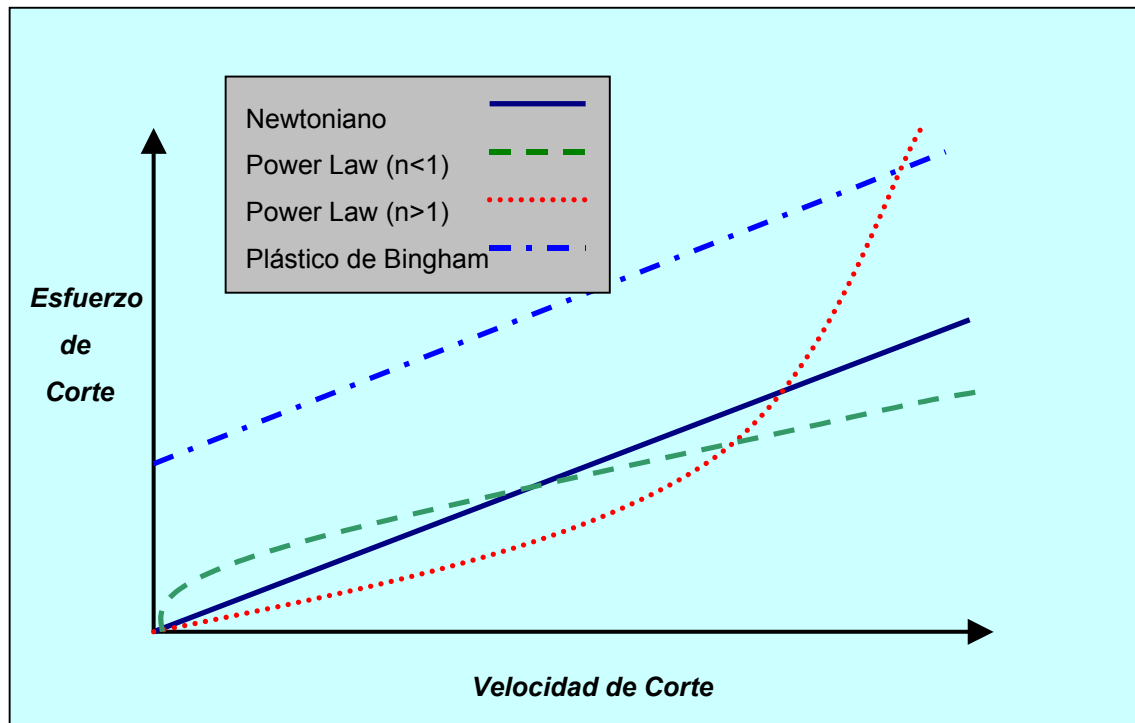


Figura N° 3. Comportamiento del esfuerzo de corte vs. La velocidad de corte de varios fluidos en un gráfico lineal.

1.1.7 CÁLCULOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO

Antes de que la lechada de cemento pueda ser diseñada, la temperatura a la que será expuesta debe ser determinada. El cemento se asentará tan rápido como aumente la temperatura y tan lento como disminuya la temperatura. El tiempo de emplazamiento determina el tiempo que la lechada permanecerá en condición

líquida. El cemento debe ser rápidamente colocado para ahorrar tiempo y dinero. Este tiempo, denominado tiempo de espesamiento, puede ser ajustado químicamente, pero la temperatura a la que el cemento será expuesto debe ser conocida para hacer estos ajustes. Toda lechada debe ser diseñada siguiendo los siguientes parámetros:

- Baja viscosidad: para permitir que la lechada penetre pequeñas fracturas
- Baja fuerza de gel: Un sistema gelificado restringe el movimiento de la lechada y provoca un incremento de la presión en la superficie lo cual dificulta su interpretación
- Sin agua libre
- Control apropiado de pérdida de filtrado: para asegura un llenado óptimo de las fracturas o perforaciones
- Apropiado tiempo de espesamiento: Conocimiento anticipado del tiempo de trabajo

1.1.7.1 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA ⁵

Debido a que el pozo es cada vez más profundo a medida que se perfora, la temperatura de fondo aumenta. La temperatura que no varía a cualquier profundidad es llamada temperatura estática.

Mientras se circula el pozo, la temperatura del hoyo se va refrescando. Esta temperatura en la cual el hoyo se va enfriando se denomina temperatura de circulación de fondo (bottomhole circulating temperature) BHCT. Esta temperatura es usada para determinar cuanto tiempo estará la lechada en estado líquido

mientras se bombea. Medidores confiables de temperatura, están disponibles en el mercado para determinar la temperatura mientras se circula.

La especificación 10 de La A.P.I. (1990), tiene un set de tablas para aproximar la temperatura de circulación. Sin embargo, estas temperaturas funcionaran bien solo si el campo que está siendo desarrollado es similar al campo en el cual la información fue recolectada. Si un pozo es vertical y la temperatura estática es conocida, las tablas dan la temperatura de circulación. Estas tablas fueron generadas de mediciones de temperaturas estáticas y de circulación realizadas en cientos de pozos y utilizadas por la A.P.I. para obtener temperaturas de circulación promedio.

1.1.7.2 CÁLCULOS DE VOLÚMENES DE LECHADAS ^{5,10}

El cemento es mezclado con agua y otros aditivos con la finalidad de hacer de la lechada de cemento un sistema adecuado para las necesidades del pozo. El agua requerida para la mezcla depende del tipo de cemento y de los aditivos presentes. Los requerimientos de agua se expresan como porcentaje del peso del cemento.

Se necesitan tres parámetros para el diseño de cualquier lechada: la densidad, el rendimiento y los requerimientos de agua. La densidad junto con otros parámetros del pozo y propiedades de la lechada determinan si la lechada podría fracturar la formación. El rendimiento, el diámetro del hoyo, diámetro del revestimiento y longitud del intervalo a ser cementado, determinan la cantidad de cemento, agua y aditivos requeridos para llenar el espacio anular. Conociendo cualquiera de estos parámetros, los otros dos pueden ser calculados. Generalmente se conocen los requerimientos de agua para los cementos A.P.I, tal y como se muestra en la tabla 9.

Tabla N° 9. Requerimientos de agua para algunos Cementos A.P.I. ⁵

<i>TIPO DE CEMENTO</i>	<i>REQUERIMIENTO DE AGUA</i>
<i>A.P.I. CLASE A</i>	6.3 gal/sk o 46%
<i>A.P.I. CLASE C</i>	5.2 gal/sk o 56%
<i>A.P.I. CLASE G</i>	5.0 gal/sk o 44%
<i>A.P.I. CLASE H</i>	4.3 gal/sk 38%

1.1.7.3 PRUEBAS BÁSICAS DE LABORATORIO REALIZADAS AL CEMENTO

5,10

Las pruebas de laboratorio, siempre comienzan con la habilidad de la lechada para ser mezclada con tipos y cantidades específicas de agua. El agua usada para los trabajos de cementación, puede ser diferente del agua usada en el laboratorio. Por lo tanto, es recomendable que el agua que será usada para las operaciones, sea la misma usada al menos para la prueba final de laboratorio. Principalmente, los cloruros presentes en el agua afectan la reacción del cemento. Además, los cloruros y sulfatos y el pH del agua deben ser chequeados regularmente. Una vez que la lechada es mezclada, se necesitan realizar las siguientes pruebas antes de que ésta pueda ser utilizada en los trabajos de cementación primaria.

- **Densidad:** En esta prueba, la densidad de la lechada es medida luego de ser removido todo el aire presente en ella mediante una balanza presurizada. Dependiendo de los aditivos usados par preparar la lechada, esta podría contener una gran cantidad de aire interno cuando es mezclada. Si este aire no es removido, la balanza con la que se mide la densidad puede arrojar datos erróneos.
- **Estabilidad de la lechada:** En esta prueba se miden la uniformidad y la capacidad de suspensión de la lechada. La estabilidad de la lechada es medida

por medio de dos pruebas: Agua libre y asentamiento de sólidos. El cemento generalmente tiene un rango limitado de requerimientos de agua sobre el cual es estable. La lechada debe tener tal viscosidad que prevenga el asentamiento de sólidos y el desarrollo de agua libre. Si hay exceso de agua, la lechada será muy delgada y los sólidos se asentarán. Esto puede tener efectos adversos tales como, saltar espacios en el anular, en el equipo flotador, falta de aislamiento zonal y bolsas de agua que pueden causar que el revestimiento colapse, si grandes incrementos de temperatura se producen durante la vida del pozo.

- **Tiempo de espesamiento (Thickening time):** Esta prueba mide el intervalo de tiempo en el cual, la lechada de cemento a presión y temperatura de fondo permanecerá bombeable y se realiza con un consistómetro. Este intervalo de tiempo es denominado tiempo de bombeo o tiempo de espesamiento de la lechada. La lechada debe ser diseñada de tal forma que no desarrolle exceso de viscosidad y sea imbombeable durante el tiempo en que se desplaza la lechada dentro del hoyo. Esta característica es una propiedad importante de la lechada y está relacionada principalmente por el tipo de cemento y la cantidad de retardador utilizado. Si no existe un diseño apropiado, el fluido será demasiado viscoso y el cemento no será emplazado de la manera en que fue diseñado.

- **Pérdida de filtrado:** En esta prueba se mide la cantidad de pérdida de filtrado bajo la temperatura de fondo y un diferencial de presión de 1000 lpc, mediante un filtro HPHT. Normalmente existe un diferencial de presión para prevenir el flujo de fluidos desde la formación hacia el hoyo, y la mayoría de las formaciones tiene poros que son demasiado pequeños para permitir que las partículas de cemento invadan la formación. Sin embargo, si existe un diferencial de presión dentro de la formación, el agua de la lechada puede filtrarse dentro de la formación. El cemento es propenso a tener una pérdida de filtrado alrededor de los 1000 ml / 30 min. en una celda de pérdida de filtrado A.P.I. Una lechada con un buen control de pérdida

de filtrado, tiene una pérdida de fluido alrededor de 50 ml / 30 min. Si el agua se filtra hacia la formación, la densidad y la viscosidad de la lechada se incrementarán y el volumen y el tiempo de bombeo de la lechada disminuirán. Esto puede traer como consecuencia un impacto negativo en el éxito de trabajo de cementación que se esté realizando.

- **Reología:** Aquí se mide el comportamiento del esfuerzo de corte y de la velocidad de corte a diferentes temperaturas (Determinación de la viscosidad plástica y del punto cedente). Generalmente, la reología de la lechada es usada para determinar el régimen de flujo de la misma (Tapón, laminar o turbulento). La reología tiene también efecto sobre las presiones de fricción. La presión de fricción es sumada a la presión hidrostática de los fluidos y la presión total es dividida por el peso para dar la densidad equivalente de circulación. Los trabajos deben ser diseñados de tal forma que esta densidad permanezca por debajo de la presión inicial de fractura. Generalmente, las lechadas se vuelven menos viscosas a medida que aumenta la temperatura, sin embargo, existen lechadas que tienen un comportamiento diferente y muestran un incremento de su reología a medida que aumenta la temperatura, al menos en cierto rango. Los esfuerzos de corte son medidos a través de un viscosímetro Fann, a las siguientes velocidades de corte: 1, 2, 3, 6, 10, 20, 30, 60, 100, 200 y 300 r.p.m.

- **Resistencia a la compresión convencional:** la cantidad de presión necesaria para romper o hacer colapsar al cemento es medida en esta prueba. Esta prueba indica si el cemento soportará las presiones diferenciales dentro del pozo. En la prueba destructiva, la lechada es colocada dentro de moldes cúbicos y luego, los cubos de cemento son sometidos a presión para determinar su resistencia a la compresión. En la prueba no destructiva, un pulso sónico es medido a través del cemento. Este pulso arroja un valor que luego es convertido en resistencia a la compresión. Tradicionalmente, este ha sido el único parámetro mecánico utilizado

para el diseño de lechadas. Nuevas pruebas han surgido para el estudio de las propiedades mecánicas del cemento. Pruebas que anteriormente se realizaban a núcleos geológicos y otros materiales, ahora son realizadas a núcleos de cemento. Entre estas pruebas se encuentran: Resistencia a la compresión a través de una celda triaxial, Resistencia al Impacto y Resistencia a la Tensión y Resistencia a la Flexión. Estas pruebas se explicarán en detalle en la sección que explica los aspectos teóricos relacionados con las fibras.

1.2 ELASTICIDAD.

La mayoría de los materiales tienen una habilidad para resistir y recuperarse de deformaciones producidas por alguna fuerza. Esta habilidad se denomina **elasticidad**. La elasticidad es la base de todos los aspectos de la mecánica de rocas. Debido a que el cemento es una roca hecha por el hombre, sobre el aplican los conceptos utilizados en mecánica de rocas ¹¹

El tipo más simple, es aquel donde hay una relación lineal entre las fuerzas externas y la deformación correspondiente. Cuando los cambios en las fuerzas son lo suficientemente pequeños, la respuesta es muy cercana siempre a la respuesta lineal. ¹¹

1.2.1 ELASTICIDAD LINEAL ¹¹

La teoría de elasticidad descansa en dos conceptos básicos:

- Esfuerzo
- Deformación.

1.2.1.1 ESFUERZO

Podemos definir esfuerzo, como la capacidad que tiene un cuerpo de resistir carga por unidad de área. El esfuerzo se mide frecuentemente en Pascal (N/m^2), bar, atmósferas, lpc o dinas/cm². Para cálculos teóricos, la unidad internacional estándar Pascal, es la más cómoda de utilizar, mientras que las demás son usadas comúnmente en cálculos de ingeniería.

El signo del esfuerzo (σ), no está definido únicamente por la física de la situación, y por lo tanto, debe ser definido por convención. En mecánica de rocas, el estado de convención de signos es: **“Los esfuerzos compresivos son positivos”**. La razón de esto, es que la mayoría de los esfuerzos tratados en mecánica de rocas son casi exclusivamente compresivos.

Consideremos la siguiente figura:

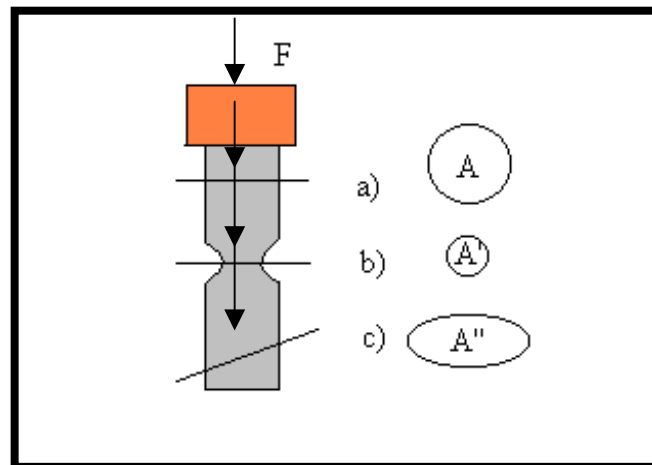


Figura N° 4. Esfuerzo sobre áreas transversales. ¹¹

Un peso descansa sobre el tope de un pilar. Debido al peso, una fuerza (F) actúa sobre el pilar, mientras que el pilar reacciona con una fuerza de igual magnitud pero en dirección contraria. La fuerza que actúa sobre el pilar, debe actuar a través de cualquier sección transversal del pilar.

El área de la sección transversal a) es A. Entonces, el esfuerzo a través de esa sección se define como:

$$\sigma = F / A$$

(Ecuación N° 7)

Considerando la sección b), observamos que la magnitud de la fuerza que actúa a través del área transversal A' es igual a la fuerza que actúa sobre la sección a), sin embargo, el área A' de la sección b) es más pequeña que el área A de la sección a), de modo que, el esfuerzo ($\sigma' = F/A'$) es mayor que el esfuerzo sobre el área de la sección a).

Yendo aún más lejos, podemos dividir la sección transversal a) en un número infinito de subsecciones ΔA a través de las cuales, una parte infinitesimal ΔF de la fuerza total F está actuando. La fuerza ΔF puede variar de una subsección a otra, por lo que se considera una subsección i la cual contiene un punto P. El esfuerzo en el punto P se define como:

$$\sigma = \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A_i}$$

(Ecuación N° 8)

la cual representa “el esfuerzo local” en el punto i a través de la sección a), mientras que la ecuación 7 describe el esfuerzo promedio en la sección transversal. Cuando hablamos del estado de esfuerzos en un punto, implícitamente nos referimos a esfuerzos locales.

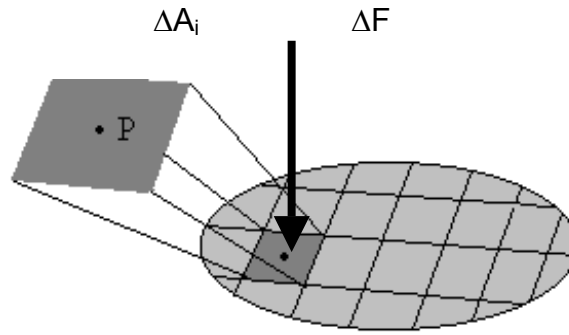


Figura N° 5 Esfuerzo local. ¹¹

1.2.1.2 DEFORMACIÓN

Podemos definir deformación como la relación que existe entre la nueva magnitud o forma de un elemento y su configuración original o no alterada, cuando es sometido a fuerzas externas. Consideremos la muestra de la siguiente figura:

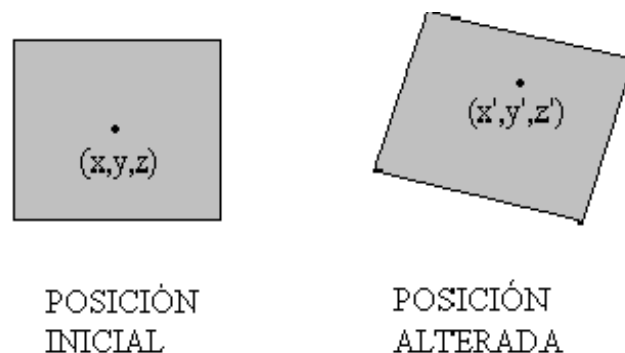


Figura N° 6. Cuerpo Rígido Deformado ¹¹

$$x' = x - u$$

$$y' = y - v$$

$$z' = z - w$$

(Ecuación N° 9)

La posición de una partícula específica dentro de la muestra es inicialmente (x,y,z). Después de la acción de una fuerza externa, la posición de esta partícula es alterada. Denotaremos el cambio en la dirección x como u, en la dirección y como v y en la dirección z como w. Las cantidades u, v y w son llamadas “desplazamientos de la partícula”. Las ecuaciones 9 muestran la nueva posición de la partícula.

Los desplazamientos son tomados positivos cuando están dirigidos en dirección negativa a los ejes coordenados. Si los desplazamientos u, v y w son constantes, entonces, estos son iguales para cada partícula de la muestra. Por lo tanto, el desplazamiento es simplemente la traslación de un cuerpo rígido.

1.2.1.3 MÓDULO ELÁSTICO

La teoría de elasticidad lineal trata con situaciones donde hay relaciones lineales entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes. Ya que la mayoría de las rocas presentan un comportamiento no lineal cuando están sometidas a esfuerzos, su comportamiento puede ser descrito normalmente por relaciones lineales.

Consideremos una muestra de longitud L y sección transversal de área $A = D^2$, tal como lo muestra la figura 7.

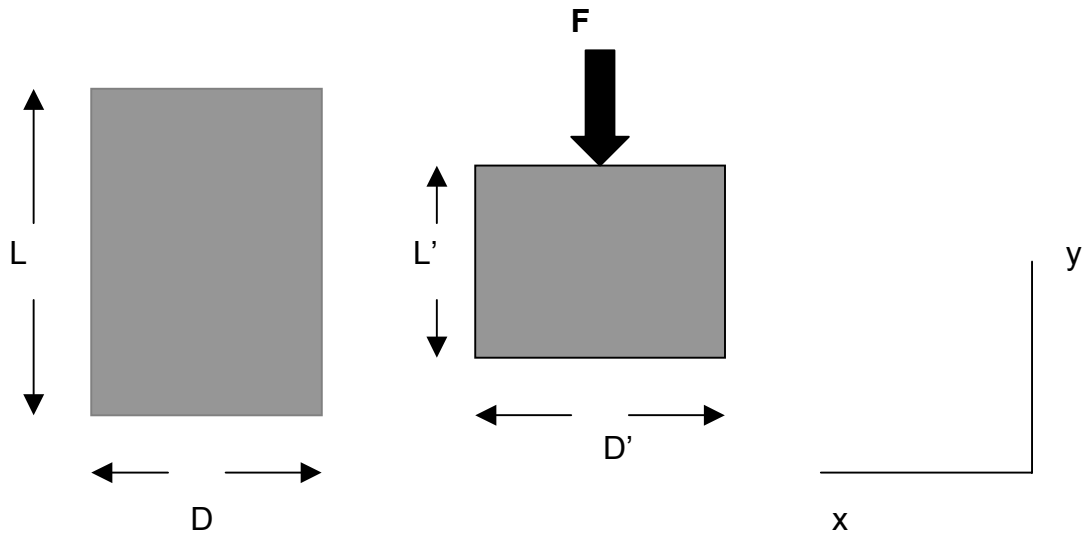


Figura N° 7. Deformación de un cuerpo rígido por acción de una fuerza.¹¹

Cuando la fuerza F es aplicada sobre la superficie, la longitud de la muestra se reduce a L' . El esfuerzo aplicado es $\sigma_x = F/A$, y su correspondiente elongación es $\varepsilon_x = (L-L')/L$. Si la muestra se comporta linealmente, existe entonces una relación lineal entre σ_x y ε_x , la cual podemos escribir:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x$$

(Ecuación N° 10)

Esta ecuación, es conocida como la **Ley de Hooke**. El coeficiente E es el **Módulo de Young**. Este es una medida de la resistencia de la muestra a ser comprimida por esfuerzos uniaxiales. Este módulo, pertenece a un grupo de coeficientes llamados módulos elásticos, y es considerado como una medida de la rigidez del cuerpo, ya que a través de éste es posible cuantificar que tanto se deforma un material en respuesta a una fuerza externa.

Otra consecuencia del esfuerzo σ_x aplicado, es un incremento en el ancho D de la muestra. La elongación lateral es $\varepsilon_y = \varepsilon_z = (D-D')/D$. Por lo general, $D' > D$, y por lo tanto, ε_y y ε_z son negativos. La relación definida como:

$$\nu = \frac{-\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad \text{(Ecuación N° 11)}$$

es otro parámetro elástico conocido como **Relación de Poisson**. Esta es una medida de la expansión lateral relativa a la contracción longitudinal. Es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación longitudinal observada, cuando una fuerza es aplicada al eje longitudinal de un material. Este parámetro es considerado como una medida de la dureza del material.

1.2.2 ELASTICIDAD NO LINEAL ¹¹

1.2.2.1 RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Para un material linealmente elástico, siempre hay una relación constante entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante, a pesar de la magnitud del esfuerzo y la deformación.

La relación esfuerzo-deformación, de la ecuación 10, para tales materiales, es una línea recta. El módulo elástico correspondiente a esta relación es la pendiente de la recta.

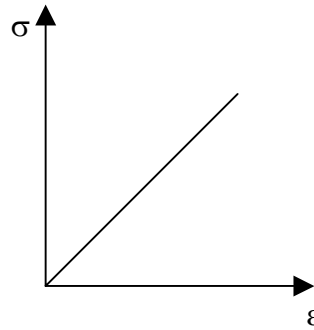


Figura N° 8 a Comportamiento de un Material Linealmente Elástico ¹²

Se dice que cualquier material que no obedezca una relación lineal esfuerzo-deformación, tiene un comportamiento no lineal. Para un material elástico no lineal, la relación esfuerzo-deformación puede ser escrita como:

$$\sigma = E_1 \varepsilon + E_2 \varepsilon^2 + E_3 \varepsilon^3 + \dots$$

(Ecuación N° 12)

El comportamiento no lineal puede tener varios casos y aparecer en diferentes formas. La figura 8b muestra un ejemplo. Este material tiene una relación esfuerzo deformación no lineal, ya que, el radio de esfuerzo contra deformación no es el mismo para todos los esfuerzos. Sin embargo, la relación es idéntica para el proceso de carga y descarga. Se dice que tales materiales son **Perfectamente Elásticos**. Para estas relaciones no lineales, los módulos elásticos no están definidos únicamente para un nivel de esfuerzo específico. Como lo muestra la figura 8b, el módulo relacionado al punto p en la curva, puede ser identificado como la pendiente del segmento OP (Módulo Secante), o como la pendiente de la tangente PT (Módulo Tangente)

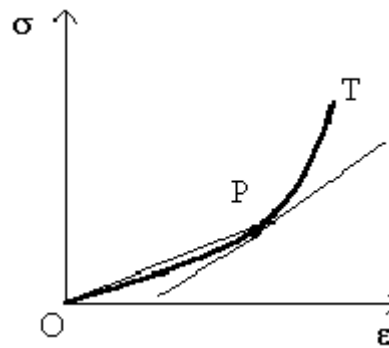


Figura N° 8 b Comportamiento de un Material Perfectamente Elástico ¹²

La relación esfuerzo-deformación mostrada en la figura 8c es la que se observa comúnmente en las rocas. El patrón de carga es diferente al patrón de descarga. Este efecto es conocido como histéresis. Para materiales con comportamientos como éste, el trabajo realizado durante la carga no es enteramente solventado en la descarga, ya que parte de la energía se disipa en el material. El módulo elástico relacionado al patrón de descarga es llamado módulo de descarga.

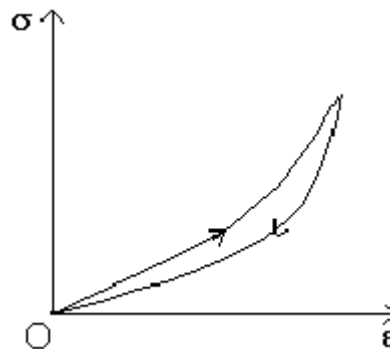


Figura N° 8 c Material Elástico. ¹²

En la figura 8c, como la deformación desaparece cuando el esfuerzo retorna cero, se dice que **el material es elástico**. Como lo muestra la figura 8d, el material ha sufrido una deformación permanente durante el ciclo de carga y descarga.

Para esfuerzos suficientemente grandes, muchas rocas entran en una fase donde ocurre una deformación permanente (el material todavía es capaz de resistir carga). Se dice que **el material es dúctil**. El punto donde ocurre la transición de comportamiento elástico a dúctil es llamado **punto cedente**.

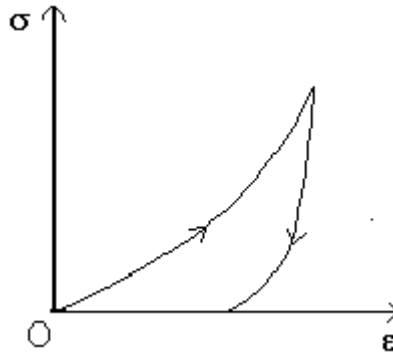


Figura N° 8 d Material Sufriendo una Deformación Permanente ¹²

Para observar el proceso de deformación y falla del material, el método más común consiste en la compresión axial de cilindros hechos del material que será evaluado, para los cuales se miden las deformaciones laterales y axiales en función de la carga axial aplicada, para luego graficar los esfuerzos vs. las deformaciones y efectuar su posterior interpretación. La figura 9 presenta una curva tipo con su correspondiente análisis en función de las zonas de importancia.

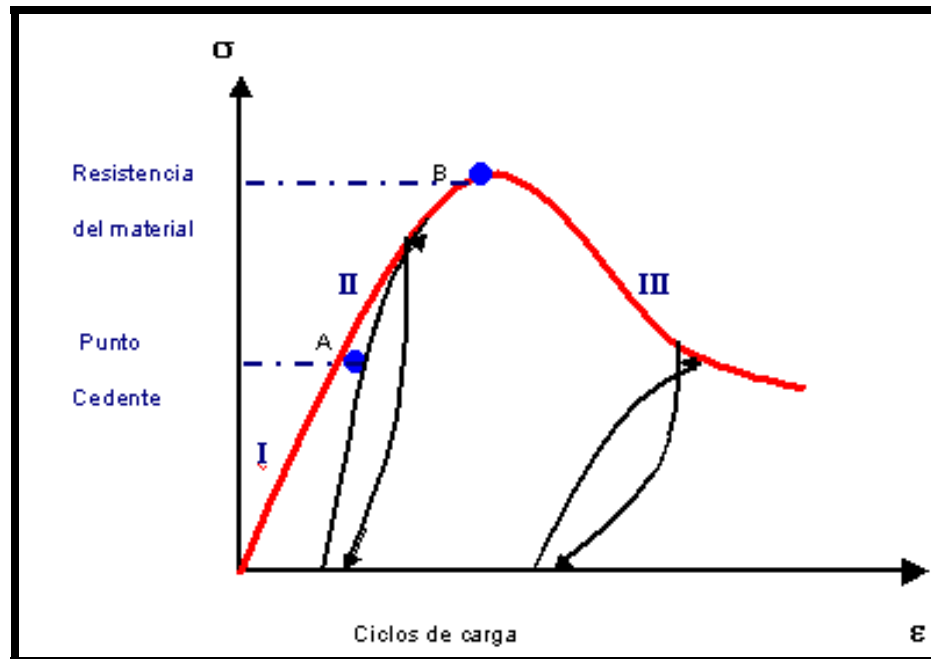


Figura N° 9. Curva esfuerzo deformación típica ¹²

En la región I, la cual, es ligeramente convexa hacia arriba, el comportamiento es prácticamente elástico. La histéresis puede estar presente pero el proceso de carga y descarga no produce deformaciones permanentes. En la región II, la pendiente de la curva se degrada progresivamente hasta llegar a cero, al incrementarse los esfuerzos. En esta región se producen deformaciones irreversibles. El punto máximo de la curva (B) se conoce como resistencia máxima del material o resistencia a la compresión, y es en este punto donde la curva esfuerzo - deformación marca el punto de transición entre el comportamiento dúctil y el comportamiento frágil o quebradizo del material. ¹²

Se dice que un material es dúctil bajo condiciones en las cuales, éste puede mantener una deformación permanente sin perder su habilidad de resistir carga. Al entrar en la zona III, el material se comporta como un material quebradizo o frágil. ¹²

El proceso de falla se produce una vez que avanzamos a través de la región III. El punto A en el cual ocurre la transición entre el comportamiento elástico y el comportamiento dúctil es denominado punto cedente.¹²

1.2.3 EVOLUCIÓN DE LOS ESFUERZOS DURANTE EL TRABAJO DE CEMENTACIÓN¹¹

A diferencia del revestimiento y la roca, el cemento es un material fuertemente relacionado con el tiempo. Inicialmente líquido (lechada), sus propiedades mecánicas cambiarán radicalmente durante las horas siguientes al bombeo.

Una vez que la fase de perforación es completada, la circulación del lodo se detiene y el revestimiento es corrido en el hoyo. A medida que la tubería penetra el hoyo, el lodo fluye hacia arriba por el anular y es forzado a través de las líneas de flujo. Esto produce una presión que puede ser mucho más alta que el peso del lodo y puede fracturar la formación. En consecuencia, la operación de corrida del revestimiento puede estar asociada a pérdidas sustanciales de lodo y no a las presiones circulantes y estáticas durante la perforación.

El trabajo de cementación consiste en desplazar el lodo localizado en el anular con cemento. Las lechadas son bombeadas a través del revestimiento y penetran el anular a través del fondo del hoyo donde progresivamente reemplazan el lodo. Para prevenir la contaminación entre la lechada y el lodo, el cemento es taponado con un espaciador (cuya densidad está entre la del lodo y la de la lechada). Sin embargo, las lechadas y el volumen de lodo a desplazar están separados por una membrana de goma llamada Tapón de Choque (bump plug).

Durante el desplazamiento y debido a la presencia de fluidos más pesados (espaciadores y lechada), la presión en el anular puede exceder la presión de fractura de la prueba de integridad e inducir pérdidas masivas. Tan pronto como las bombas se detienen, la presión de cada medidor del simulador comienza a descender. Este descenso se debe a la reducción de volumen relacionado al encogimiento cuando el cemento endurece. Esto está asociado con una rápida pérdida de comunicación entre el cemento que se está endureciendo y los fluidos externos. Con el tiempo, la presión hidrostática de la lechada se convierte en una verdadera presión de poro, la cual, considerando la permeabilidad del cemento (baja pero no nula), se equilibra con la presión de poro de la formación.

En la práctica, el cemento no siempre es colocado homogéneamente y por muchas razones operacionales (por ejemplo: mal diseño del espaciador), los agregados de lodo son un común acontecimiento dentro del cemento. Esto significa que el anular parcialmente cementado, puede tener consecuencias catastróficas al estimar la integridad del revestimiento.

1.2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CEMENTO ⁷

Son parámetros que sirven de medida o comparación para determinados cálculos, encontrándose entre estos:

- **Resistencia a la Compresión:** Es el grado de resistencia que opone un material ante una fuerza de carácter compresivo que es aplicado a su eje. Es medida en lpc

- Resistencia a la Tensión: Es el grado de resistencia que opone un material ante una fuerza que actúa en forma tangencial sobre unidad de área. Es medida en lpc
- Resistencia a la Flexión: Es el grado de resistencia que opone un material ante una fuerza que trata de provocar el doblamiento del cuerpo. Es medida en lpc
- Resistencia al Impacto: Es el grado de resistencia que opone un material ante una fuerza que golpea al material con una fuerza paralela a su área transversal. Es medida en Joules / metro
- Módulo de Young: Este es una medida de la resistencia de la muestra a ser comprimida por esfuerzos uniaxiales. Este módulo, pertenece a un grupo de coeficientes llamados módulos elásticos, y es considerado como **una medida de la rigidez del cuerpo**, ya que a través de él es posible cuantificar que tanto se deforma un material en respuesta a una fuerza externa. Es medido en lpc
- Relación de Poisson: Esta es una medida de la expansión lateral relativa a la contracción longitudinal. Es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación longitudinal observada, cuando una fuerza es aplicada al eje longitudinal de un material. Este parámetro es considerado como **una medida de la dureza del material**. Es un parámetro adimensional

1.3 CEMENTO REFORZADO CON FIBRAS ¹³

El cemento Portland es uno de los materiales más importantes en la industria de la construcción, pero debido a su baja resistencia a la tensión y fragilidad, los componentes del cemento Portland deben ser reforzados.

El concepto del refuerzo con fibras, es el de usar la deformación de la matriz bajo esfuerzos y transferir la carga a la fibra.

Las fibras actualmente usadas en sistemas fibra-cemento son clasificadas por lo general como, fibras de bajo módulo y alta elongación y fibras de alto módulo. El primer grupo comprende polietileno, polipropileno y poliamidas, las cuales poseen características de gran absorción de energía. Estas imparten dureza y resistencia al impacto y carga explosiva pero no proveen buena resistencia. El segundo grupo lo comprenden las fibras de acero, vidrio, asbestos, carbón y grafito. Estas imparten resistencia y rigidez al compuesto.

El refuerzo de materiales de construcción quebradizos con fibras no es nuevo. Desde tiempos remotos, cabello, paja, y otras fibras naturales, han sido utilizadas para reforzar ladrillos, morteros, yeso, etc. El uso industrial de las fibras en el cemento, comenzó en 1900 con fibras de asbesto. Debido al peligro para la salud asociado al uso de fibras de asbesto, han sido desarrollados tipos de fibras alternativas. Fibras modernas que van desde las fibras de acero con composiciones avanzadas y geometrías complicadas hasta fibras sintéticas, con extensos tratamientos superficiales. Las fibras modernas proporcionan una mejora en propiedades como la resistencia a la tensión, características de fatiga, durabilidad, características de encogimiento, resistencia a la erosión y operabilidad.

Las fibras, controlan o modifican el comportamiento del cemento antes y después de la formación de las fracturas. Dependiendo del número de variables, las mejoras en una determinada propiedad, pueden cambiar de sutiles a sustanciales. Las variables más importantes son el tipo de fibra, la geometría, la fracción de volumen, características de la matriz, adherencia fibra-matriz, etc.

El mayor beneficio de reforzar el cemento con fibras es el del mejoramiento de la operabilidad. Mientras que los cementos ordinarios sufren grandes fracturas durante las operaciones, permitiendo la canalización de fluidos en la matriz, el cemento reforzado con fibras, dependiendo del contenido de fibra y su eficiencia, puede reemplazar las fracturas grandes por fracturas capilarmente pequeñas. Con las fibras haciendo puente entre las fracturas, la matriz mantiene su integridad estructural.

En algunos compuestos con altos volúmenes de fibras, la mejoría en la resistencia a la tensión del material puede ser tal, que la formación de microfracturas puede ser disminuida o retardada con grandes condiciones de esfuerzos. Aún cuando las micro fracturas ocurren, estos altos contenidos de fibras pueden suprimir la evolución de estas fracturas a grandes macro fracturas.

Un beneficio considerablemente importante del refuerzo con fibras es la mejora de la resistencia al impacto, estallido o carga explosiva. Mientras que un cemento no reforzado se resquebraja en piezas bajo el simple golpe de un percutor, un producto reforzado con fibras puede soportar varios golpes antes de romperse. La presencia de fibras proporciona un mecanismo de absorción de energía haciendo posible la disipación de la misma.

1.3.1 TIPOS DE FIBRAS ¹⁴

A continuación se presenta una descripción de los principales tipos de fibra usados hoy en día como refuerzo del cemento

1.3.1.1 FIBRA DE ACERO

La fracción de volumen usualmente usada en la mezcla con concreto es usualmente de 1%. A esta fracción de volumen, las fibras disponibles comercialmente no proveen alguna resistencia significativa. La matriz quebradiza se fracturaría a aproximadamente al mismo esfuerzo con el cual se rompería una matriz no reforzada.

Una vez que la matriz se fractura, las fibras hacen un puente entre las fracturas y proveen mecanismo de transferencia de esfuerzos.

Las mejoras en la resistencia a la compresión debidas a la adición de la fibra, pueden variar desde 0 a 23% para concretos que contienen 2% en volumen de fibra. En algunos casos, debido a la pobre compactación, la resistencia a la compresión puede de hecho, ser reducida debido a la adición de la fibra. La mayor mejoría de la fibra sobre el concreto es sobre la ductilidad.

La mejor técnica para determinar la efectividad de las fibras en la mejora de la dureza es en flexión. El incremento en la resistencia a la flexión del concreto es sustancialmente mayor que en compresión y tensión directa. Las mejoras en la resistencia a la flexión sobre matrices no reforzadas, pueden variar desde 50 hasta 70% para fracciones de volumen por encima del 2%. Se han reportado

mejoras hasta de 150% a fracciones de volumen más elevadas. Esto se debe a que a estas fracciones, las fibras tienden a alinearse en dirección longitudinal, conllevando a grandes mejoras en la resistencia a la flexión.

La conductividad térmica, el coeficiente de fricción estática, la resistencia a la abrasión y el encogimiento, no son afectados ampliamente por las fibras. Estudios han revelado que la corrosión de las fibras aumenta a temperaturas superiores a los 38 °C (100,4 °F).

1.3.1.2 FIBRA DE VIDRIO

La resistencia y la dureza de los compuestos reforzados, son usualmente reducidos después de pocos años, y en algunos casos, el material llega a comportarse como un compuesto no reforzado. Se ha reportado que después de 10 años, el módulo de ruptura desciende al mismo nivel que el límite proporcional elástico. La humedad y sequía cíclica, la existencia de temperaturas elevadas, hacen que los compuestos sean altamente quebradizos.

El ataque del álcali es la razón más importante detrás del efecto quebradizo de los productos reforzados con fibra de vidrio.

1.3.1.3 FIBRAS SINTÉTICAS

Son fibras hechas por el hombre, desarrolladas como resultado de las investigaciones en las industrias petroquímica y textil. Son derivados de polímeros orgánicos y son llamadas fibras suaves debido a su bajo módulo elástico. Las fibras sintéticas que han sido probadas como refuerzo en el cemento son: acrílica,

aramid, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno. Estas fibras contienen al menos 85% de unidades de acrilonitrilo y tienen resistencias a la tensión de 200 – 350 Mpa.

La fibra **Aramid** (aromatic poliamid), tiene una resistencia excepcional y un elevado módulo de elasticidad. **Nylon** es el nombre genérico asociado a una familia de poliamidas hidrofóbicas poliméricas que exhiben buena resistencia, dureza y recuperación elástica. La fibra de **Polietileno**, se ha propuesto y utilizado como reemplazo de las fibras de asbesto. La fibra de **Polipropileno**, es el primer polímero de hidrocarburo disponible comercialmente hecho por el hombre. Es resistente al álcali, de bajo peso y con excelentes propiedades hidrofóbicas (no absorben agua)

Las principales desventajas del polipropileno son su sensibilidad a la luz solar y al oxígeno, pobre adherencia química, bajo punto de fusión, su combustibilidad y su bajo módulo de elasticidad. Tiene una gravedad específica de 0,90, una resistencia a la tensión de 550 a 690 MPa y un módulo elástico de 3,450 Gpa. La propiedad hidrofóbica de la fibra afecta su mezclabilidad. Las propiedades de los compuestos dependen ampliamente del contenido de fibra, el cual puede variar en un amplio rango (0,1% a 10%) y en la forma en la cual la fibra es usada.

Las pruebas en concretos reforzados con fibras sintéticas a bajas fracciones de volumen, han indicado que no existen mejoras sustanciales en compresión, tensión o flexión. A fracciones de 0,1 a 0,2, la única ventaja es el encogimiento y el control temprano de fractura. La pobre adherencia de las fibras y el cemento puede ser mejorada usando el material en forma de películas fibriladas en vez de monofilamentos. Estudios han confirmado que contenidos de polipropileno de 0,1% tienen solo un pequeño beneficio en la resistencia a la compresión, tensión, flexión, dureza y resistencia de fractura del compuesto.

Los altos contenidos de fibra ($>2\%$), son difíciles de trabajar debido a los problemas de mezclabilidad y distribución uniforme. Sin embargo, a estos niveles, las mejoras en la dureza y ductilidad son evidentes. Otro beneficio de los altos contenidos de fibra incluye el comportamiento post fractura y mejora en el encogimiento esperado. También han demostrado mejorar la resistencia al impacto.

1.3.1.4 FIBRA DE CARBONO

Las ventajas del uso de la fibra de carbono sobre la de acero, polipropileno o vidrio, están en su resistencia térmica, aclimatación, habilidad para mezclar altas fracciones de volumen y estabilidad química en ambientes alcalinos y otros ambientes químicamente abrasivos.

Estos beneficios, acompañados de las mejoras reportadas sobre las propiedades mecánicas, hacen de la fibra de carbono un refuerzo adecuado.

Dada la gran área de superficie específica de la fibra de carbono, la mezclabilidad se hace difícil. Para volúmenes de 3% se necesitan agentes dispersantes tales como carboxi metil celulosa, sílica fume condensada y escoria incinerada. Se sugiere una relación sílica-cemento de 0,2 o más y un contenido mínimo de súper plastificante de 2% por peso de cemento.

Para una buena adherencia entre las fibras y la matriz, se debe usar cementos con partículas menores de $45\mu\text{m}$. La resistencia a la compresión de los compuestos reforzados es superior a la de matrices bases. Se han reportado también buenos resultados en la mejora del comportamiento de la fatiga del material.

La influencia de las condiciones de curado indican una gran mejora de la resistencia a la flexión. Esta se incrementa cuando el compuesto es curado en agua caliente. También se reportan mejoras remarcables en la resistencia al impacto debido a la adición de las fibras.

El 90% de carbono elemental resiste la corrosión en ambientes alcalinos sobre las fibras de vidrio ordinarias. No se aprecia retrogresión ni en la resistencia ni en la dureza cuando son expuestos a ácidos débiles. Toleran temperaturas por encima de los 2500 °C (4532°F) en atmósferas inertes, pero se oxidan lentamente a 300 °C (572 °F) o más en el aire.

1.3.1.5 FIBRAS NATURALES

Pueden ser divididas en dos categorías: no procesadas y procesadas. Entre las no procesadas tenemos: madera, bambú, sisal, concha de coco y fibras vegetales. Las procesadas fueron usadas originalmente en conjunto con asbestos, pero actualmente se utilizan solas por razones de salud. Dentro de este grupo se encuentra la fibra mineral.

Las propiedades de los cementos reforzados con fibras naturales están afectadas por la longitud y la fracción de volumen de las fibras. Para las fibras no procesadas se necesita un mínimo de 3% de volumen para mejorar las propiedades mecánicas. A fracciones altas, la resistencia a la compresión no es del todo alterada y las resistencias a la tensión y flexión si exhiben mejoras significativas.

Estas fibras se utilizan principalmente en la producción de compuestos de bajo costo. Sin embargo, la sensibilidad a la humedad de estas fibras necesita especial

atención. La degradación de las propiedades mecánicas debido al ataque del álcali y biológico por hongos y bacterias es otro factor de cuidado.

La tabla 10 contiene una lista de fibras modernas usadas actualmente como refuerzo del cemento de materiales con cemento Portland como base.

Tabla N° 10. Propiedades de algunas fibras utilizadas para reforzar cemento

14

FIBRA	DIÁMETRO (μm)	GRAVEDAD ESPECÍFICA	MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (GPa)	ELONGACIÓN AL ROMPERSE (%)
Acero	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidrio	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Asbestos					
Crocidolite	0,02-0,4	3,4	196	3,5	2-3
Chrysotile	0,02-0,4	2,6	164	3,1	2-3
Polipropileno	20-200	0,9	5-77	0,5-0,75	8
Aramid (Kevlar)	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4
Carbono	9	1,9	2,3	2,6	1
Nylon		1,1	4,0	0,9	13-15
Celulosa		1,2	10	0,3-0,5	
Acrílica	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno		0,95	0,3	$0,7 \times 10^{-3}$	10
Fibra de madera		1,5	71	0,9	
Sisal	10-50	1,5		0,8	3

1.3.2 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA PRODUCIR COMPUESTOS REFORZADOS ¹³

Las técnicas utilizadas para producir estos compuestos reforzados con fibras son:

A. **Premezclado:** Las fibras son introducidas en el mezclador junto con los demás aditivos y la mezcla es realizada en presencia de algún agente plastificante (usualmente un reductor de agua de alto rango llamado “súper plastificante”). El material luego es moldeado de la manera deseada.

B. **Rociado:** Una mezcla de ingredientes, incluyendo las fibras, es rociada sobre la superficie moldeada para formar hojas delgadas o lanzadas a través de la boquilla de un equipo rociador modificado para disparar concreto fibroso.

El uso de fibras en la matriz del cemento tiene dos objetivos básicos:

- a) Proporcionar un medio de control de fractura en el estado plástico a través de una mejor estabilidad dimensional y capacidad de resistencia a la tensión a un tiempo temprano.
- b) Mejorar las propiedades mecánicas del compuesto en el estado sólido.

1.3.3. PRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA DEL CEMENTO REFORZADO ¹³

La distribución de las fibras depende de las dimensiones de la muestra. Una distribución aleatoria en dos dimensiones ocurre cuando el espesor de la muestra está en el mismo orden que la longitud de las fibras, y una distribución aleatoria en tres dimensiones ocurre cuando toda la dimensión de la muestra es más grande que la longitud de la fibra usada, que por lo general es el caso más frecuente.

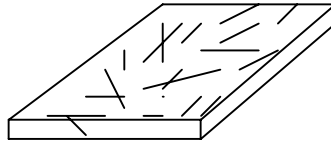


Figura 10 a. Distribución 2-D

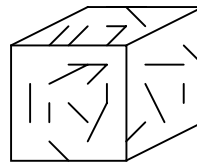


Figura 10 b. Distribución 3-D

Figura 10. Distribución Bidimensional y Tridimensional del Cemento Reforzado con Fibras ¹³

A pesar de los intentos de obtener una distribución aleatoria uniforme de las fibras en la muestra, en la práctica ocurre una dispersión no uniforme de las mismas. Mientras que a fracciones bajas de volumen el uso de un superplastificante es generalmente suficiente para producir una distribución uniforme, en el caso de fracciones altas de volumen, es requerido el uso de un agente dispersante. Los

agentes dispersantes más comunes son silica fume condensada, escoria incinerada, metilo celulosa y polímeros en polvo. A pesar de las nuevas técnicas para obtener una distribución uniforme de las fibras en la mezcla, la distribución actual en el sitio de trabajo puede ser no uniforme.

La cantidad de volumen de fibra usada en las mezclas es usualmente caracterizada por la fracción de volumen. El uso de peso de las fibras por metro cúbico de concreto es también común. La fracción de volumen empleada puede depender entre otras cosas de los objetivos que se pretenden con el refuerzo, el fácil mezclado de una fracción de volumen dada y de la viabilidad económica del uso del refuerzo. La fracción de volumen usualmente usada de fibras sintéticas (excluyendo la fibra de carbono) es de menos de 0,2%. En el caso de las fibras de acero, las fracciones de volumen generalmente usadas son de menos de 1,5%. En el caso de fibras muy finas (micro fibras), como la fibra de carbono, las fracciones de volumen pueden ser de hasta 5%. El número de fibras en un determinado volumen de muestra depende de las dimensiones de las fibras. Por ejemplo, en un cubo de 10 cc reforzado con fibras con una fracción de volumen de 1%, el número de fibras de acero (con longitud de 50 mm y diámetro de 0,5 mm) debe estar alrededor de 1000, y el número de fibras de carbono (con longitud de 3 mm y diámetro de 18 micrones) debe ser de alrededor de 6 millones.

1.3.4 MECANISMOS DE REFUERZO CON FIBRAS ¹⁴

Las fibras en el cemento actúan como uno más de sus ingredientes. Las fibras desarrollan una adherencia interfacial con el cemento y proporciona mecanismos de dureza y resistencia debido a sus grandes áreas de superficie, radios aparentes y sus favorables propiedades elásticas. Al igual que otras interfases, la interfaz matriz-fibra, tiene propiedades diferentes a las propiedades de la matriz. Esto se debe en parte, al entrapamiento de agua alrededor de las fibras y

también a la insuficiente compactación de los granos del cemento antes de la hidratación en la interfase. Los micromecanismos de interacción matriz-fibra, pueden ser divididos en dos etapas: Antes de la fractura de la matriz y después de la fractura de la matriz. Antes de la fractura de la matriz, las fibras, la matriz y las interfases son todas elásticas e intactas. La conservación de la compatibilidad de desplazamiento entre la fibra y la matriz requiere que la fibra soporte diferentes esfuerzos. La transferencia de carga de la matriz a la fibra y luego de nuevo a la matriz, provoca esfuerzos de corte a nivel interfacial. (Figura 11)

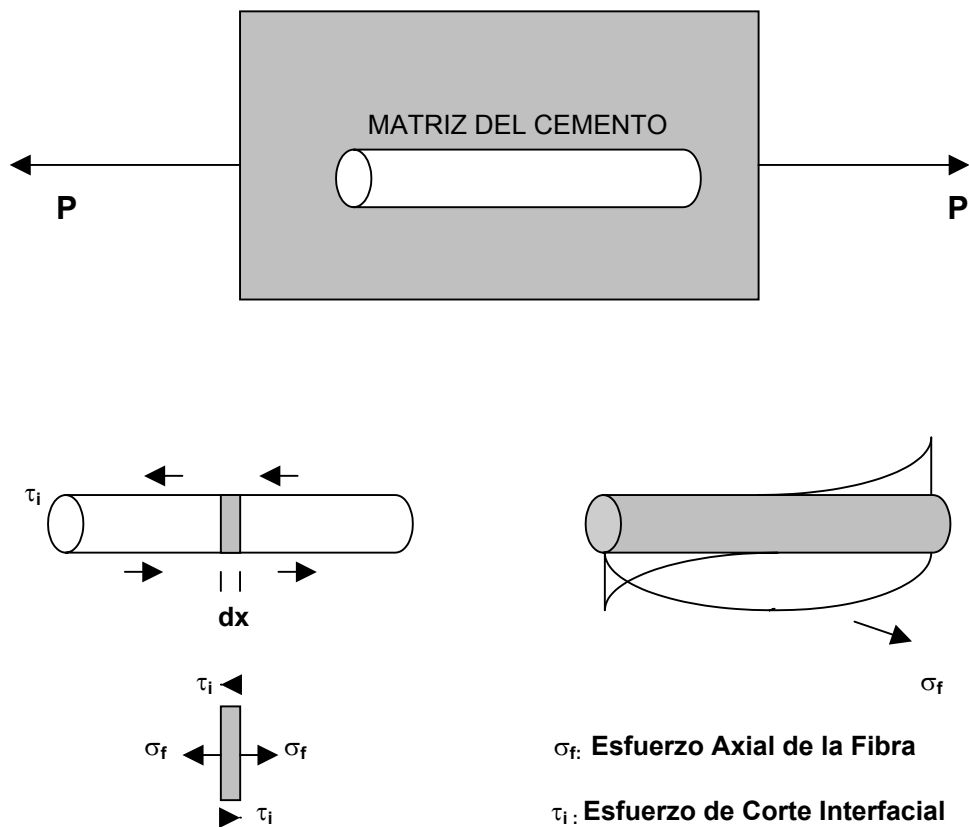


Figura Nª11. Esfuerzo en la Fibra y Esfuerzo Interfacial en un Compuesto No Fracturado. ¹⁴

En el estado no fracturado, se usa frecuentemente la “Ley de las Mezclas” para predecir el comportamiento del compuesto.

$$E_c = E_m V_m + K_l K_\theta E_f E_v$$

(Ecuación N° 13)

donde, los subíndices representan: m: matriz; f: fibra; c: compuesto usado, y E: Módulo de Elasticidad; V: Fracción de Volumen, y K_l , K_θ son los factores de eficiencia por longitud de fibra incrustada y la orientación con respecto a la carga aplicada.

El primer esfuerzo de fractura, σ_c , para el compuesto viene dado por:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + K_l K_\theta \sigma_f V_f$$

(Ecuación N° 14)

Finalmente, si ε denota la deformación, entonces:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

(Ecuación N° 15)

El uso del concepto del material compuesto, lleva a la conclusión que ni el módulo de elasticidad del compuesto, ni su primer esfuerzo de fractura pueden ser significativamente diferentes que el de una matriz no reforzada. Algunos estudios recientes con altas fracciones de volumen de fibras finas de carbón, acero y fibra de vidrio han indicado que aunque el módulo de elasticidad no cambia significativamente, el primer esfuerzo de fractura del compuesto, puede ser

mejorado de forma significativa. Se cree que en los sistemas con altos volúmenes de microfibras, la contribución desde la matriz no permanece al mismo nivel que el estado no reforzado.

Ya que todas las matrices de cemento son quebradizas, de la ecuación 15 se observa que la matriz en estos compuestos casi alcanzará, ciertamente, una deformación de falla antes que las fibras y ocurrirá una fractura en la matriz. Una vez que la matriz se fractura, las fibras harán un puente entre la fractura y la matriz y actuarán como puentes para transferir los esfuerzos. Esta es otra diferencia entre los cementos no reforzados y los sistemas reforzados con fibras. En los cementos no reforzados, la aparición de fractura, conllevará a una falla por la cual la sección ya no soportará cualquier otra carga. En los cementos reforzados con fibras, éstas actúan como puentes para transferir los esfuerzos a través de las fracturas, ayudando a mantener la integridad del material y la sección posee una resistencia a la tensión posterior a la fractura.

La capacidad de la sección en este estado fracturado puede ser menor, igual, o inclusive mayor que el esfuerzo al cual la fractura ocurrió. Esto depende entre otras cosas, de las características y la fracción de volumen de las fibras empleadas. La fracción de volumen a la cual la sección mantiene la misma capacidad de soportar carga antes y después de la fractura de la matriz, se califica como la fracción de volumen crítica.

Debido a que las interfases soportan esfuerzos de corte antes de la aparición del fracturamiento de la matriz, éstas pueden ser dañadas antes de que aparezca una fractura en la matriz. Una vez que la fractura aparece, se presenta un ajuste micromecánico de distribución de esfuerzos en las proximidades de la fibra.

El máximo esfuerzo de corte interfacial ocurre ahora en el punto donde la fibra penetra la matriz y disminuye gradualmente hacia el extremo libre de la fibra. Si la fibra puede soportar la carga aplicada sin fracturamiento, los esfuerzos de corte interfaciales pueden alcanzar valores de resistencia. De ser así, el desprendimiento debería comenzar en el punto donde la fibra penetra la matriz, para luego continuar hacia el interior. Una vez que la fractura alcanza el otro extremo de la fibra, ésta comienza a deslizarse y las cargas aplicadas ahora son enteramente soportadas por la fricción entre la fibra y la matriz.

1.3.5 MÉTODOS DE PRUEBA ¹⁴

Dadas las diferencias en estructuras de los cementos convencionales con los cementos reforzados con fibras, los procedimientos de pruebas desarrollados para los cementos convencionales, podrían no ser aplicables a los sistemas reforzados con fibras.

1.3.5.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ⁷

La determinación de la resistencia a la Compresión se realiza en una celda triaxial, en la cual se realizan pruebas destructivas para determinar el comportamiento mecánico de materiales tales como, núcleos geológicos y probetas de cemento. Las muestras son colocadas en la celda triaxial, son sometidas a ciclos de carga, y el equipo proporciona la información que permite realizar las curvas esfuerzo – deformación. A partir de estas curvas, es posible calcular los valores de Módulo de Young, Relación de Poisson y Resistencia a la Compresión.

1.3.5.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

La resistencia a la flexión, puede ser obtenida usando la norma Norma ASTM D 790 – 99. “Método Estándar de Prueba para la Determinación de las Propiedades Flexurales de Materiales Plásticos Reforzados y no Reforzados y Materiales Aislantes de Electricidad”, en la cual una barra es colocada con carga en el punto central. El método cubre la determinación de la resistencia a la flexión de muestras en forma de barras rectangulares, moldeadas directamente a través de una celda.¹⁵ La figura 12 muestra un esquema del dispositivo utilizado para la realización de la prueba.

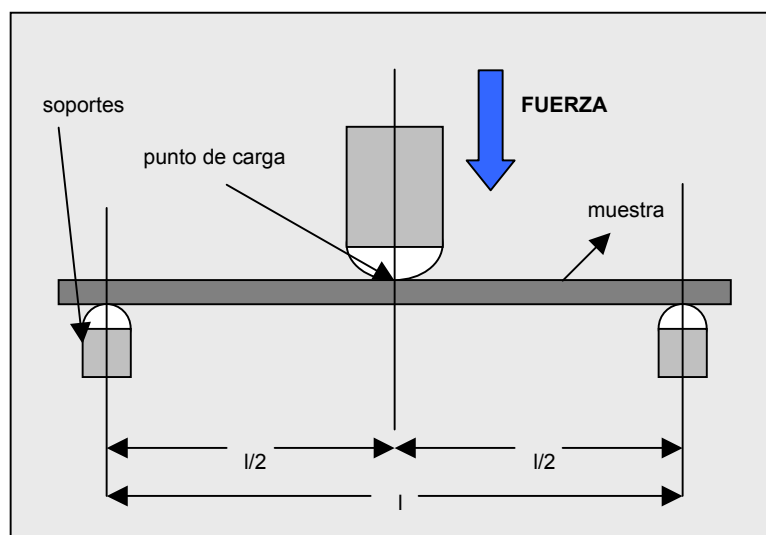


Figura N° 12. Esquema del equipo para la determinación de la Resistencia a la Flexión

Aunque el método es válido para fracciones de volumen bajas de fibra, el procedimiento no es justificable en el caso de fracciones de volumen de fibra altas, donde el reforzamiento posterior a una fractura puede venir acompañado por una deformación suave y un comportamiento no lineal.

1.3.5.3 RESISTENCIA AL IMPACTO

La mejora de la resistencia al impacto es una de las propiedades más notables de los cementos reforzados con fibras. Desafortunadamente, no existe una técnica estándar disponible, no sólo para los sistemas reforzados con fibras, sino, para los cementos ordinarios también. En la versión instrumentada de la prueba, un martillo es hecho para golpear la muestra. El modo de carga, (flexión, tensión o compresión) es determinado por las condiciones de soporte de la muestra. Las pruebas de resistencia al Impacto se realizaran siguiendo la norma ASTM D256 “Determinación de la Resistencia al Impacto de Muestras de Plástico”. Este método cubre la determinación de la resistencia de probetas a un choque indicado por la energía de un martillo tipo péndulo. La resistencia al impacto queda determinada por la energía que la probeta es capaz de absorber durante el choque para romperse. Los resultados de estas pruebas se reportan en términos de la energía absorbida por unidad de ancho de la probeta.¹⁶ La figura 13 muestra un esquema del equipo utilizado para la realización de la prueba.

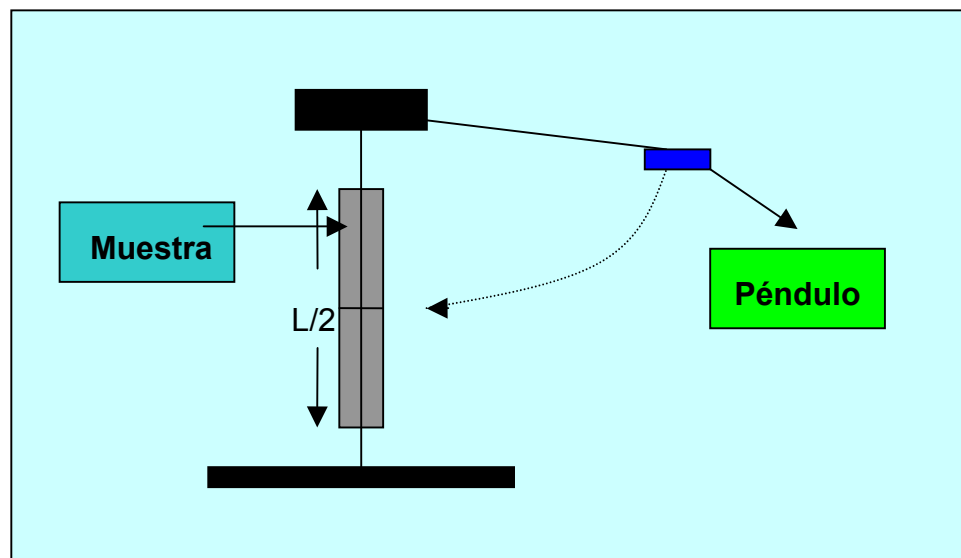


Figura N° 13. Esquema del equipo utilizado para la prueba de Resistencia al Impacto

1.3.5.4 RESISTENCIA A LA TENSIÓN ⁷

Se realiza en un equipo que se emplea para medir de manera rápida y efectiva la resistencia a la tensión de un material frágil. La prueba se caracteriza por ser de carácter destructivo. El equipo utiliza un sistema de prensas que permite suministrar y distribuir la carga sobre la muestra de cemento. La figura 14 muestra un esquema del equipo utilizado para la realización de la prueba.

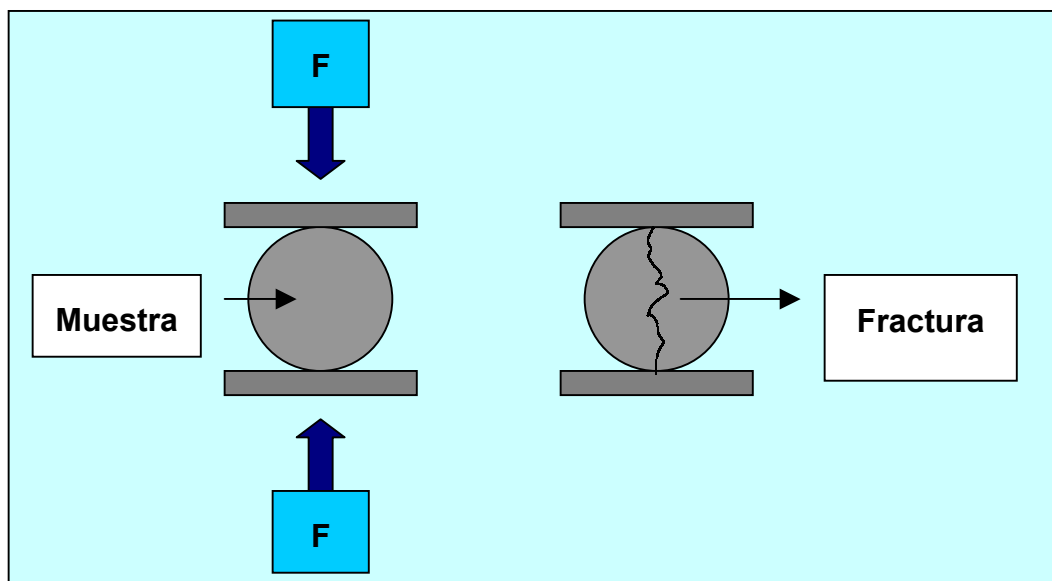


Figura N° 14. Esquema del equipo utilizado para la determinación de la Resistencia a la tensión.

El uso de fibras para la mejora de propiedades mecánicas en el cemento, ha sido utilizado principalmente en el área de la construcción. Debido a los distintos diseños de pozos de petróleo que surgen hoy en día, como pozos desviados, pozos horizontales, pozos multilaterales, los esfuerzos aplicados al sello hidráulico son mucho mayores que en pozos verticales convencionales. Es por ello que la necesidad de mejorar propiedades mecánicas, tales como, elasticidad, ductilidad,

resistencia a distintos esfuerzos (compresión, tensión, impacto y flexión), se hace primordial al momento del diseño de las lechadas para este tipo de pozos y con la adición de las fibras, es posible la mejora de estas propiedades.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta sección se dan a conocer todos los aspectos relacionados con la metodología a desarrollar, especificando el diseño de la investigación y los instrumentos y técnicas que permitieron el buen desarrollo del estudio del comportamiento mecánico de los sistemas cementantes reforzados con fibras

2.1 MATERIALES

2.1.1 CEMENTO

El cemento utilizado fue el Clase H según la clasificación A.P.I. Este es utilizado como cemento básico en los pozos. Los cementos Clase H y Clase G son similares en composición, sólo que el requerimiento de agua del Clase H es menor que el del cemento Clase G (38% y 44% de agua respectivamente), por lo que la lechada del cemento Clase H es de mayor densidad y por lo tanto más resistente. En la preparación de la lechada, se utilizarán aceleradores y retardadores cuando sea necesario cumplir un amplio rango de presiones y temperaturas.

2.1.2 FIBRAS

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizaron tres tipos de fibras, las cuales fueron seleccionadas según su mezclabilidad operacional y resistencia a condiciones elevadas de presión y temperatura. Las fibras utilizadas fueron las siguientes:

- Fibra de Polipropileno (Películas fibriladas)

- Fibra De Carbono
- Fibra Mineral
- Fibra de Acero
- Fibra de Vidrio
- Fibra Poliolefina

En la tabla 11 se presentan las propiedades de las fibras que fueron evaluadas

Tabla N° 11. Propiedades de las fibras evaluadas

<i>FIBRA</i>	<i>GRAVEDAD ESPECÍFICA</i>	<i>MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)</i>	<i>RESISTENCIA A LA TENSIÓN (GPa)</i>	<i>ELONGACIÓN AL ROMPERSE (%)</i>
<i>Acero</i>	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
<i>Polipropileno</i>	0,9	5-77	0,5-0,75	8
<i>Carbón</i>	1,81	2,3	2,6	1
<i>Vidrio</i>	2,6	70-80	2-4	2-3,5
<i>Poliolefina</i>	0.91	2.6	0.275	15
<i>Mineral</i>	1,13			

2.2 EQUIPOS

Para el desarrollo del trabajo de laboratorio, formulación de las lechadas y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los sistemas se requirió del uso de los siguientes equipos:

Balanza Electrónica: Fue utilizada para pesar los aditivos del cemento según su formulación. La lectura en las balanzas debe ser precisa con un error de ± 0.1 por ciento de la carga indicada.



Figura N° 15. Balanza Electrónica

Mezclador: Mezclador con aspas y botones para manipularlo, con 2 velocidades (4000 r.p.m. y 12000 r.p.m.) en modo automático y velocidades variables en modo manual, es utilizado para mezclar los aditivos del cemento según su formulación.



Figura N° 16. Mezclador

Balanza para Densidad de Fluidos Presurizada: Fue utilizada para medir la densidad de la lechada de cemento, según procedimiento descrito en la norma API Spec. 10B.



Figura N° 17. Balanza Presurizada.

Consistómetro Presurizado: Fue utilizado para predecir el tiempo en que la lechada es bombeable dentro del pozo a presión y temperaturas simuladas, (tiempo de espesamiento) según procedimiento descrito en la norma API Spec. 10B



Figura N° 18. Consistómetro Presurizado

Cámara de Curado Presurizada: Utilizada para llevar la lechada de cemento a la presión y temperatura de pozo. Aquí fueron curadas las muestras para las pruebas de resistencia al Impacto, Resistencia a la Compresión y Resistencia a la Flexión.



Figura N° 19. Cámara de curado

Prensa Mecánica: Utilizada para determinar la resistencia a la flexión de la muestra de cemento. El ensayo que se realiza en este equipo es destructivo.



Figura N° 20. Prensa Mecánica

Consistómetro Atmosférico: Es utilizado para acondicionar la lechada a la temperatura circulante de pozo, a la cual se le determinará posteriormente la reología y el fluido libre.



Figura N° 21. Consistómetro atmosférico

Viscosímetro: Utilizado para determinar las propiedades reológicas (viscosidad plástica y el punto cedente) de la lechada de cemento según la formulación.



Figura N° 22. Viscosímetro Rotacional

Impactómetro: Utilizado para la determinación de la resistencia al impacto de las muestras curadas de cemento. Consiste de un péndulo que golpea la muestra a una velocidad constante.



Figura N° 23. Impactómetro.

Celda Triaxial para Prueba de Resistencia a la Compresión y Tensión

Indirecta: Equipo en el cual, se efectúan pruebas destructivas para determinar la Resistencia a la Compresión, el Módulo de Young y la Relación de Poisson de núcleos de cemento.

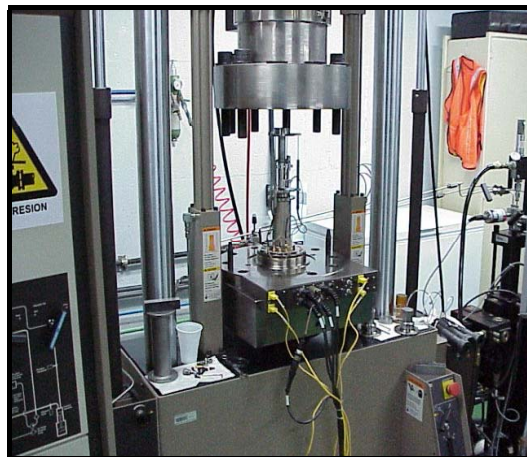


Figura N° 24. Celda Triaxial.

Cilindro Graduado de 250 ml: Utilizado para estimar el agua libre en la lechada de cemento según su formulación.

2.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

De acuerdo con el diseño para la elaboración del trabajo, el procedimiento del mismo puede ser esquematizado de la siguiente manera:

1. Revisión bibliográfica sobre

Composición y tipos de cementos, aditivos, funciones que debe cumplir el cemento, el proceso de cementación de pozos de petróleo y métodos para llevarlo a cabo y los pasos para seguir un buen proceso de cementación. Conceptos de Elasticidad, Ductilidad, Módulo de Young, Relación de Poisson, Esfuerzos sobre el cemento. Teoría sobre fibras. Tipos de fibras, Características, propiedades reforzantes.

2. Inducción en el laboratorio

Manejo de los equipos de laboratorio. Estudio de los aditivos y materiales utilizados para la formulación de las lechadas de cemento.

3. Formulación de las lechadas de cemento

Las lechadas de cemento se ajustaron de acuerdo a los requerimientos del pozo, en función de esto se realizaron las formulaciones para obtener la densidad, tiempo de espesamiento, reología, pérdida de filtrado, resistencia a la compresión y fluido libre requerido. Para esto se fijaron los parámetros de evaluación de las lechadas con características de un pozo típico del área del Furrial que opera a altas presiones y altas temperaturas (HPHT). Se estimó que las pruebas se

realizarían a temperaturas estáticas (temperatura a la cual se encuentra la lechada de cemento una vez que ha sido colocada en el pozo) de 200 °F y presión de 10700 lpc. (según las tablas del procedimiento A.P.I. Spec10B la presión de trabajo del consistómetro es de 6300 lpc y de 3000 lpc para la cámara de curado)

4. Evaluación de las propiedades Mecánicas de los Sistemas

Una vez que las lechadas de cemento se ajustaron se procedió a determinar el comportamiento mecánico de las lechadas. Las propiedades mecánicas determinadas fueron:

- Resistencia a la Compresión
- Resistencia al Impacto
- Resistencia a la Flexión
- Resistencia a la Tensión
- Comportamiento Esfuerzo – Deformación (Módulo de Young y Relación de Poisson)

5. Cálculo y organización de resultados

6. Comparación de las propiedades Mecánicas de los sistemas evaluados

7. Selección y Recomendación del sistema según su desempeño bajo las condiciones críticas evaluadas

2.3.1 MEZCLABILIDAD DE LAS FIBRAS

El primer paso realizado para la evaluación de las fibras en los sistemas, fue observar la mezclabilidad operacional de las mismas. Las pruebas de mezclabilidad consisten en la determinación de la concentración óptima de fibra que puede incorporarse uniformemente a la lechada. Para ello, se agregan las fibras al cemento y se realiza la agitación, y mediante observación se determina si la fibra se distribuye uniformemente en el sistema. En el caso que la fibra no se mezcle sólo con agua, se le añaden aditivos como dispersantes. Para esto, se utilizó el método convencional de mezclado de lechadas según el procedimiento A.P.I. Spec10B.

Para lograr la dispersión de las fibras en la lechada, se procede primero a mezclar las fibras con cemento y agua solamente. Si no se observa dispersión alguna, entonces, se utilizan dispersantes. Se fijó una cantidad de fibra específica y se mezcla con la concentración más baja y más alta recomendada del dispersante para tener dos puntos de referencia. Para obtener la cantidad de dispersante a utilizar en cada sistema, se trabajó dentro de ese intervalo. Si no se observa ninguna dispersión con ningún aditivo disponible, la fibra es descartada.

Una vez establecidos los tipos de fibras, las concentraciones y las sensibilidades a las que se va a trabajar, se procedió a ajustar las propiedades físicas de los sistemas a los que se les evaluarán las propiedades mecánicas.

2.3.2 AJUSTE DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS LECHADAS

Las propiedades físicas a ajustadas fueron: densidad, tiempo de espesamiento, reología y contenido de agua libre. Todas estas pruebas se realizaron siguiendo el procedimiento A.P.I. Spec10B para evaluación de lechadas de cemento.

Para empezar, se ajustó la densidad de las lechadas a un valor de 16,2 lpg, es decir, el valor nominal de la densidad del cemento Clase H. Mediante una hoja de cálculo, se determinó la cantidad de cemento, aditivos, fibra y agua que eran necesarios para alcanzar dicha densidad. Luego del mezclado de la lechada, se procedió a medir la densidad de la misma mediante el uso de la balanza presurizada.

Al ajustar la densidad de la lechada, se procedió luego a ajustar el tiempo de espesamiento de cada uno de los sistemas. Este procedimiento se realizó mediante el consistómetro presurizado. Las condiciones de presión y temperatura usadas para programar el consistómetro fueron: Presión igual a 6300 lpc y Temperatura igual a 172 °F. El tiempo de espesamiento requerido debe estar comprendido en un intervalo de 2:30 horas y 3:30 horas, para cada uno de los sistemas. Este tiempo se tomó a partir de información de pozos típicos del área del Furrial

Teniendo los tiempos de espesamientos de los siete sistemas, se realizó la medición de la reología de cada uno, medición que fue realizada mediante el uso del viscosímetro rotacional, previo acondicionamiento de la lechada en el consistómetro atmosférico por 20 min, según el procedimiento A.P.I. Spec 10B, procedimientos realizados a una temperatura de 172° F. Se realizaron lecturas en el viscosímetro a las siguientes velocidades de corte: 1, 2, 3, 6, 10, 20, 30, 60,

100, 200 y 300 r.p.m., primero en forma ascendente y luego en forma descendente. Luego se tomó un promedio de las lecturas a dichas velocidades de corte. Se graficó, el esfuerzo de corte vs. la velocidad de corte y a partir de esta curva se obtuvo el comportamiento reológico al cual se adaptó cada sistema.

Para obtener el valor de la cantidad de agua libre presente en la lechada, se siguió el método recomendado en el procedimiento A.P.I. Spec 10B. Se acondicionó cada lechada por 20 min. en el consistómetro atmosférico, y luego se trasladó cada sistema a un cilindro graduado de 250 ml, en el cual se dejó reposar los sistemas por un tiempo de 2 horas. Al finalizar las dos horas, se procedió a la medición de la cantidad de agua que se encontraba por encima de la columna de cemento.

Teniendo las propiedades físicas ajustadas a los requerimientos deseados, se procedió luego a la medición de las propiedades mecánicas de los sistemas. Dichas propiedades mecánicas incluyen: Resistencia al Impacto, Resistencia a la Flexión, Resistencia a la Compresión (Módulo de Young, Relación de Poisson) Y Resistencia a la Tensión.

2.3.3 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO.

Las pruebas de resistencia al Impacto se realizaron siguiendo la norma ASTM D256 “Determinación de la Resistencia al Impacto de Muestras de Plástico”

Para nuestro caso, se utilizó el Método A (tipo Izod) de la Norma, en el cual la muestra es una barra soportada en forma vertical que se rompe con un golpe de péndulo, el cual se coloca a una distancia fija de la línea de contacto. Detalles del procedimiento se encuentran en la norma ASTM D256.

Después del mezclado de las lechadas, los sistemas se transfirieron a una celda metálica donde fueron moldeadas y curadas (ver figura 29). Las muestras fueron curadas, a una presión de 3000 lpc y una temperatura de 200 °F, y por un tiempo de 24 horas en la cámara de curado.



Figura N° 25. Celda para muestras de Resistencia al Impacto

Cumplidas las 24 de curado de las muestras, cada una fue colocada muestras sobre el soporte del impactómetro, de tal manera, que el péndulo del Impactómetro golpeará la muestra en el punto medio de su longitud. Al momento del impacto del péndulo sobre las muestras, se obtuvieron las lecturas para los cálculos que permiten determinar la resistencia al impacto de cada uno de los siete sistemas.

Los cálculos obtenidos se determinaron mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{(\text{Lectura del equipo} - \text{Lectura del aire})(\text{Joules})}{\text{Ancho de la muestra (metros)}}$$

(Ecuación N° 16)

donde,

Lectura del equipo: Lectura al romper la muestra

Lectura del aire: Lectura al soltar el péndulo sin ninguna muestra colocada. (0,09 Joules)

2.3.4 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Las pruebas para la determinación de la resistencia a la flexión, se realizaron siguiendo las especificaciones de la Norma ASTM D 790 – 99. “Método Estándar de Prueba para la Determinación de las Propiedades Flexurales de Materiales Plásticos Reforzados y no Reforzados y Materiales Aislantes de Electricidad”.

Luego del mezclado del sistema, se transfirió la lechada a dicha celda y se mantuvo en ésta por 24 horas. Posteriormente, se desmoldaron las barras 3 por cada celda y se sumergieron a un baño de María, donde fueron curadas a una temperatura de 172 F y presión atmosférica por 48 horas más. En total el tiempo de curado de estas muestras es de 72 horas.

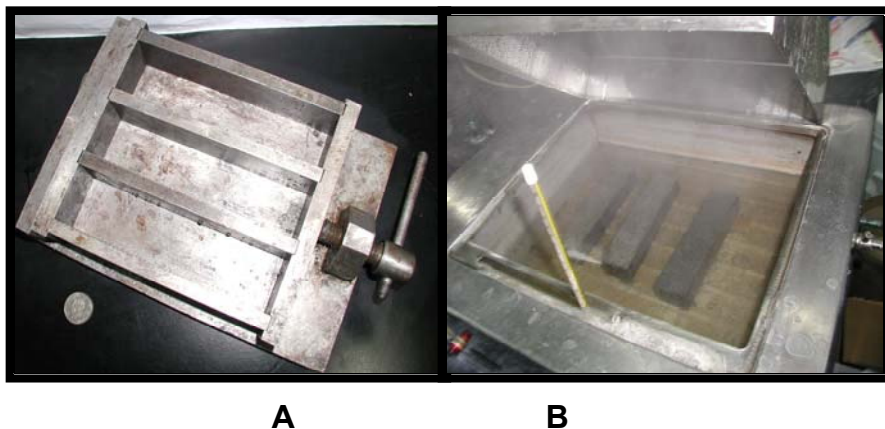


Figura N° 26. A) Celda para muestras de Flexión. B) Curado de las muestras en baño de María



Figura N° 27. Muestra de Curada para la Prueba de Resistencia a la Flexión

Pasadas las 72 horas de curado, se retiraron las muestras del baño, y fueron llevadas a la prensa mecánica para la medición de la carga soportada por cada barra. El método de carga aplicada fue el de carga en el punto medio de la longitud de la muestra.



Figura N° 28. Soporte para la prueba de resistencia a la flexión

La tasa de aplicación de la carga permaneció constante durante la prueba de manera tal, que golpes bruscos no ocasionaran la falla prematura de la muestra.

En el instante en que las muestras fallaron, se tomaron las lecturas registradas en el equipo. Estas lecturas se reportan por equipo en Tnf. Para la determinación de la resistencia a la flexión de cada sistema, se utilizó la siguiente ecuación

$$\sigma_f = \frac{3 \times 9,8 \times PL}{2bd^2} \times (907,185) \times (145,038)$$

(Ecuación N° 17)

donde,

σ_f = Resistencia a la Flexión (lpc)

P = Carga aplicada a la muestra (Lectura del equipo en Kgf)

L = Longitud de la muestra (m.m.)

b = Ancho de la muestra (m.m)

d = Profundidad de la muestra (m.m) 486.864

7,185 = Factor de conversión de Tnf a Kgf

145,038 = Factor de conversión de MPa a Lpc

2.3.5 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, MÓDULO DE YOUNG Y RELACIÓN DE POISSON

Esta prueba se realizó en la celda triaxial. Se prepararon las muestras en celdas BP. Dichas muestras eran de forma cilíndrica y con dos pulgadas de longitud y una pulgada de diámetro.



Figura N° 29. Celda BP Y Muestras Curadas para la Prueba de Resistencia a la Compresión

El procedimiento de la prueba se describe a continuación: Se mezclaron los sistemas de acuerdo con el procedimiento A.P.I. Spec 10B, según la formulación establecida. Luego, las lechadas fueron transferidas a los moldes BP, y a continuación, fueron colocadas en la cámara de curado donde permanecieron por un tiempo de 24 horas a una temperatura de 172 °F y una presión de 3000 lpc. Pasadas las 24 Horas de curado, se retiraron las muestras; se cortaron núcleos de cada sistema con las dimensiones anteriormente especificadas. Cada núcleo fue

colocado en la celda de prueba. Se inició el proceso de aplicación e incremento de carga sobre cada uno de los siete núcleos de cada sistema en evaluación. Finalmente, se reportaron las condiciones de carga bajo las cuales ocurre la falla de cada uno de los núcleos. La resistencia a la compresión de cada sistema fue reportada en lpc. Luego, se generaron curvas esfuerzo – deformación a partir de la información registrada por los transductores de desplazamiento en el momento de aplicación de la carga.

El Módulo de Young de cada uno de los sistemas fue determinado como la pendiente de la curva esfuerzo – deformación correspondiente a cada sistema en el punto que corresponde al 50% del esfuerzo compresivo.

El valor de la relación de Poisson de cada sistema se determinó como el valor de la abcisa que intercepta verticalmente el valor de la pendiente de la curva esfuerzo – deformación que corresponde al 50% del esfuerzo compresivo.

2.3.6 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN

La prueba para la determinación de la resistencia a la tensión se caracteriza por ser de carácter destructivo. El equipo utilizado presenta un sistema de prensas que permite suministrar y distribuir la carga sobre la muestra.

Se elaboraron muestras cilíndricas con el mismo procedimiento con el cual se elaboraron las muestras para la prueba de resistencia a la compresión, con la diferencia que las dimensiones de los cilindros eran de un radio aproximadamente igual a su espesor.

Se aplicó a través de las prensas una carga lineal que generó una distribución de esfuerzo normal a lo largo del diámetro paralelo al eje de carga. Luego, se reportaron las condiciones de carga a las cuales ocurre la falla de cada muestra. La resistencia a la tensión fue determinada haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$R_t = \frac{2P}{\pi D_t}$$

(Ecuación N° 18)

donde,

R_t = Resistencia a la tensión, en lpc

P = Es la carga a la cual la muestra falla, en lbf

D_t = Diámetro de la muestra, en pulgadas.

Teniendo los valores recopilados de las distintas pruebas mecánicas para cada uno de los siete sistemas evaluados, se procedió luego al análisis de los resultados obtenidos.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se discutirán y se evaluarán los resultados obtenidos luego de realizar la selección de las fibras que se añadirán a los sistemas y las pruebas físicas y mecánicas realizadas a cada sistema reforzado diseñado.

3.1 SELECCIÓN DE LAS FIBRAS

Inicialmente se consideró la evaluación de las siguientes fibras para ser utilizadas como refuerzo en el cemento: fibra de acero, fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de polipropileno, fibra poliolefina y fibra mineral. Primeramente, el proceso de selección y descarte se realizó en función de la revisión bibliográfica, en la cual, se descartó el uso de la fibra de acero y de la fibra de vidrio.

La fibra de acero se descartó debido a que ésta se corroe a temperaturas mayores a los 100,4 °F, temperatura inferior a la temperatura de trabajo (172 °F), mientras que el uso de la fibra de vidrio fue descartado, debido a que la resistencia y la dureza de los compuestos reforzados con estas fibras son usualmente reducidos después de pocos años, y en algunos casos, el material llega a comportarse como un compuesto no reforzado, además, la humedad y sequía cíclica y la existencia de temperaturas elevadas, hacen que los compuestos sean altamente quebradizos.

3.2 MEZCLABILIDAD DE LAS FIBRAS

Se comenzó a trabajar con la **Fibra Poliolefina**, con una concentración de 1% de fibra y con 0.4% de dispersante (**CD-32**). Como no se observó dispersión alguna se aumentó la cantidad de dispersante a 0,8% y la misma concentración de fibra

sin lograr resultado alguno. Luego, se disminuyó la concentración de fibra a 0,5% manteniendo la cantidad de dispersante igual, así se realizó con concentraciones de 0,3; 0,2 y 0,1 % de fibra y la misma cantidad de dispersante, pero no se observó dispersión. Luego, se utilizó un dispersante líquido (**látex 2000**), con una concentración máxima de 2,5 gal/sax, sin resultados. La fibra no se dispersa en la lechada debido a que su longitud es muy grande (50 m.m.) Se descartó el uso de esta fibra, debido a que se necesitan grandes cantidades de dispersante para que estas fibras se integren al sistema.

Posteriormente se trabajó con la **fibra de carbono** a una concentración de 3% por peso de cemento, sin utilizar dispersante. La lechada obtenida era muy viscosa y no bombeable, por lo cual se utilizó dispersante (**CD-32**) para obtener una buena dispersión, pero ésta sólo se obtenía con porcentajes mayores al recomendado.

Se utilizó, entonces como dispersante **resina 15/10** con una concentración de 0,14 gal/sx para 2% de fibra de carbono, obteniéndose buenos resultados en la dispersión de las fibras en la lechada.

Para trabajar con dos sensibilidades y observar la influencia de la concentración de la fibra sobre las propiedades mecánicas, se trabajó también con una concentración de fibra de 1%. Este sistema no requirió de ningún dispersante para mezclar la fibra en la lechada.

Luego se procedió a trabajar con la **fibra de polipropileno** en forma de películas fibriladas, se estableció que las concentraciones de fibras a usar serían de 0,1 y 0,2% y que éstas se dispersan en la lechada con la adición de un superplastificante¹⁷, cuya función fue mantener en suspensión las fibras haciendo la lechada más viscosa.

Se determinó que concentraciones mayores a 0,2% son difíciles de dispersar y producen lechadas poco bombeables.

Se observó buena dispersión de las fibras con concentraciones de **látex 2000** de 0,70 gal/sx y 0,18 gal/sx de **resina**. Sin embargo, se utilizó un controlador de filtrado (**FL-52**) a una concentración de 0,7% y un dispersante (**CD-32**) a una concentración de 0,25%, para disminuir la viscosidad de la lechada con concentración de fibra de 0,1%, que proporcionó a la lechada las mismas propiedades de suspensión que el **látex 2000**. Estas concentraciones resultaron ser menores que las cantidades de **látex 2000** y de **resina**. Para una concentración de fibra de 0,2%, se utilizó la misma concentración de **FL-52** y de **CD-32** que para la concentración de fibra de 0,1%.

Se estableció que se trabajaría con concentraciones de 1 y 7% de **fibra mineral**. La concentración de fibra de 7% ya había sido evaluada en el laboratorio y se empezó con esta concentración, luego, se decidió reducir la concentración de ésta a 1% para observar que variación de las propiedades mecánicas presentarían los sistemas entre estas dos sensibilidades. En ambas concentraciones, la fibra se dispersa fácilmente en la lechada, debido a la que las fibras se presentan en forma de polvo.

Se descartó entonces el uso de las fibras de acero, vidrio y poliolefina y se estableció trabajar con las fibras de carbono, mineral y polipropileno en forma de películas. A continuación se presentan las propiedades de las fibras seleccionadas y el aspecto que presentan cada una de éstas.

Tabla N° 12. Propiedades de las Fibras Seleccionadas

<i>FIBRA</i>	<i>LONGITUD (m.m.)</i>	<i>DIÁMETRO (μm)</i>	<i>MÓDULO DE ELASTICIDAD (Gpa)</i>	<i>GRAVEDAD ESPECÍFICA</i>
POLIPROPILENO	19	20-200	5-77	0.9
CARBONO	10	9	2.3	1.81
MINERAL	<1	10-50		1.13



Figura N° 30. Fibra de Carbono



Figura N° 31. Fibra Mineral



Figura N° 32. Fibra de Polipropileno

3.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS FÍSICAS

Teniendo ahora las concentraciones de las fibras en cada uno de los sistemas, se ajustaron las propiedades físicas:

La primera propiedad física en ser evaluada fue la densidad. Todos los sistemas fueron formulados para obtener una densidad de **16,2 lpg**.

Al obtener la densidad de los sistemas se procedió luego a la medición del tiempo de espesamiento de cada sistema. Se iniciaron las pruebas con la lechada base cuya formulación es la siguiente: *Cemento clase H + 0.3% CD-32 + 0.2% FL-52*. La cual consta de dispersante y controlador de filtrado como aditivos. El tiempo de espesamiento obtenido para este sistema fue de 3:30 horas.

Luego se trabajó con el sistema fibra de carbono de 2%, y se obtuvo un tiempo de espesamiento de 3:30 horas, con la siguiente formulación: *Cemento clase H + 2% **Fibra de carbono** + 0.14 gal/sax Resina de melamina naftaleno sulfonada* y para el sistema con 1% de fibra de carbón se obtuvo: *Cemento clase H + 1% **Fibra de carbono*** con un tiempo de espesamiento de 2:50 horas.

Para el sistema con fibra de polipropileno con concentración de 0,1% se obtuvo un tiempo de espesamiento de 3:21 horas con la formulación: *Cemento clase H + 0.1% **Fibra Polipropileno** + 0.7% CD-32 + 0.25% FL-52* Y para el sistema con concentración de 0,2% se registró un tiempo de 3:27 horas con la formulación: *Cemento clase H + 0.2% **Fibra Polipropileno** + 0.7% CD-32 + 0.25% FL-52*.

Para los sistemas restantes, los sistemas con fibra mineral, se obtienen los siguientes tiempos de espesamiento: Para el sistema con concentración de 1% de fibra mineral se obtuvo un tiempo de 3:30 horas y cuya formulación es: *Cemento clase H + 1% Fibra Mineral + 0.35% CD-32 + 0.2% FL-52*. Para el sistema con concentración de 7% de fibra mineral se obtuvo un tiempo de 2:45 horas con la siguiente formulación: *Cemento clase H + 7% Fibra Mineral + 0.6% CD-32 + 0.15% FL-52*.

Los tiempos de espesamiento obtenidos se encuentran dentro del rango esperado de 2:30 horas y 3:30 horas.

Ahora, teniendo los tiempos de espesamiento de cada sistema se procedió al ajuste de las propiedades reológicas de cada lechada. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 13:

Tabla N° 13. Propiedades Reológicas de los Sistemas Evaluados

SISTEMA	VISCOSIDAD PLÁSTICA (CPS)	PUNTO CEDENTE (LBF/100p ²)	GELES (LBF/100p ²)		
			10''	10'	30'
Sin Refuerzo	65,4	34,7	35	55	55
1% Fibra de carbono	101.5	14	19	25	25
2% Fibra de carbono	108.3	15.3	20	25	25
0,1% Fibra de polipropileno	106.8	22	22	10	29
0,2% Fibra de polipropileno	224.8	15,7	15.7	10	22
1% Fibra mineral	190.8	26	26.3	17	52
7% Fibra de mineral	225.8	26,3	26	20	65

Nótese la diferencia entre la viscosidad plástica de la lechada base y la viscosidad plástica de los demás sistemas. Este aumento en la viscosidad plástica se debe a la adición de las fibras en los sistemas, ya que, al ser agregadas más partículas sólidas, la interacción entre estas aumenta, y por lo tanto, el incremento de la viscosidad plástica. La adición de controladores de filtrado a las lechadas es otro factor de aumento en la viscosidad plástica. Todos los sistemas presentan un comportamiento de acuerdo con el modelo reológico Plástico de Bingham.

El siguiente paso fue la evaluación del agua libre de cada lechada. Todos los sistemas presentaron una cantidad de agua libre de 0 ml.

Tabla N° 14 Propiedades Físicas de los Sistemas Evaluados

FORMULACIÓN	DENSIDAD (lpg)	VISCOSIDAD PLÁSTICA (cps)	PUNTO CEDENTE (lbf/100p²)	GELES (lbf/100p²)			TIEMPO DE ESPESAMIENTO (h:m)	FLUIDO LIBRE (ml)
				10"	10'	30'		
Cemento clase H + 0.3% CD-32 + 0.2% FL-52	16.2	65.4	34.7	35	55	55	3:45	0.0
Cemento clase H + 7% Fibra Mineral + 0.6% CD-32 + 0.15% FL-52	16.2	225.8	26	20	65	100	2:45	0.0
Cemento clase H + 1% Fibra Mineral + 0.35% CD-32 + 0.2% FL-52	16.2	190.8	26.3	17	52	65	3:30	0.0
Cemento clase H + 0.1% Fibra Polipropileno + 0.7% CD-32 + 0.25% FL-52	16.2	106.8	22	10	29	40	3:21	0.0
Cemento clase H + 0.2% Fibra Polipropileno + 0.7% CD-32 + 0.25% FL-52	16.2	224.8	15.7	10	22	43	3:27	0.0
Cemento clase H + 2% Fibra de carbón + 0.14 gal/sax Resina de melamina naftaleno sulfonada	16.2	108.3	15.3	20	25	25	3:30	0.0
Cemento clase H + 1% Fibra de carbón	16,2	101,5	14	17	22	22	2:50	0,0

3.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Con las propiedades físicas de los sistemas ajustadas, se procedió luego a la medición de las Propiedades Mecánicas. Las propiedades evaluadas fueron: Resistencia al Impacto, Resistencia a la Flexión, Resistencia a la Compresión y Comportamiento Esfuerzo – Deformación y Resistencia a la Tensión.

3.4.1 RESISTENCIA AL IMPACTO

La primera propiedad mecánica en ser evaluada fue la resistencia al impacto. A continuación se presentan las lecturas obtenidas a partir del Impactómetro de cada uno de los sistemas y su respectiva resistencia al impacto:

Tabla N° 15. Resultados de las Pruebas de Resistencia al Impacto

SISTEMA	RESISTENCIA AL IMPACTO (joule / metro)
SIN REFUERZO	14.88 ± 0,13
0,1% POLIPROPILENO	18.49 ± 0,43
0,2% POLIPROPILENO	31.77 ± 5,42
1% MINERAL	17.12 ± 0,12
7% MINERAL	17.77 ± 0,17
1% CARBONO	14.96 ± 0,15
2% CARBONO	15.25 ± 0,42

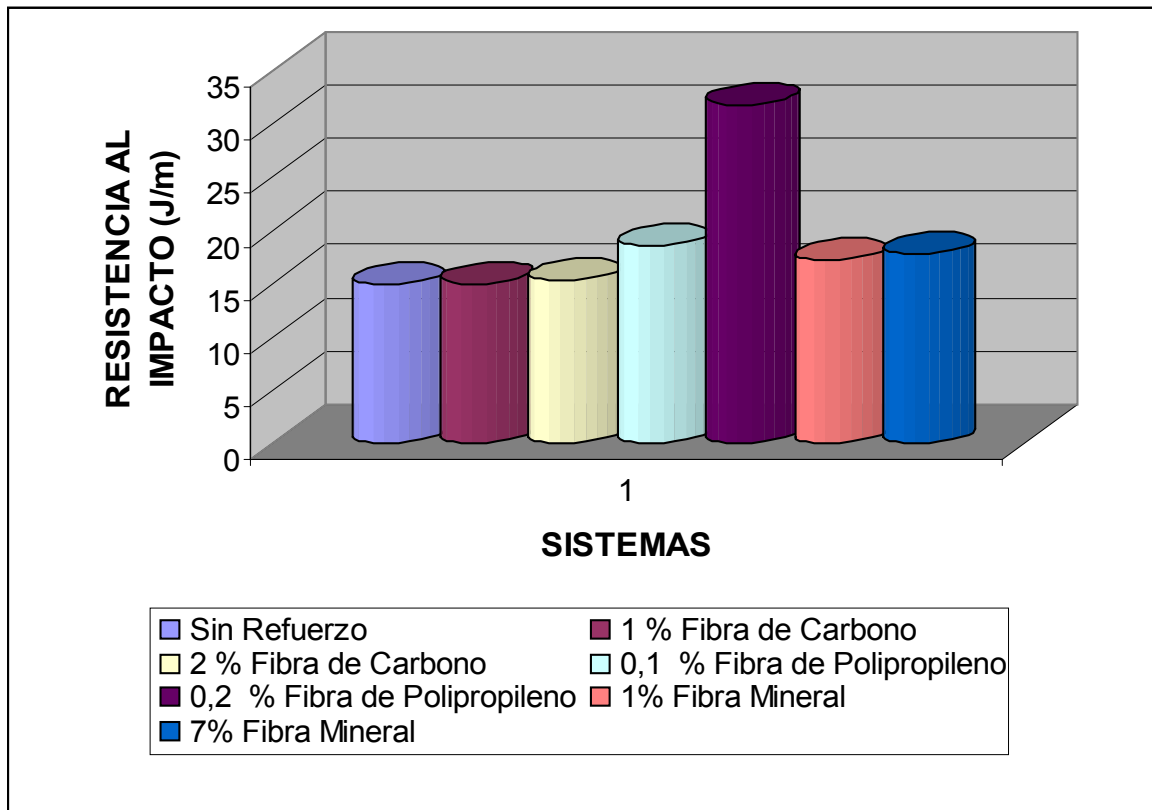


Figura N° 33. Comparación de los Resultados de Resistencia al Impacto

Todos los sistemas evaluados, producen una mejora en la resistencia al impacto con relación al sistema no reforzado. La mejora más significativa en esta prueba se observa con el sistema reforzado con 0.2% de fibra de polipropileno. Los demás sistemas producen mejoras en la propiedad, pero no es un cambio muy apreciable. El aumento de la resistencia a la flexión con el sistema reforzado con 0,2% de fibra de polipropileno se debe a que al momento del impacto, el péndulo golpea la muestra en dirección perpendicular a la longitud de la muestra. Es en este punto donde la fibra trata de mantener unida la muestra después de la fractura, añadiendo más resistencia al material. La mejora es evidente en la fibra de polipropileno, ya que ésta es de mayor longitud que las demás fibras y mantiene integridad después del mezclado debido a su mayor resistencia al corte,

como se puede apreciar en la figura 35 A y B. Las fibras de polipropileno, se encuentran dentro del grupo de fibras de bajo módulo elástico. Este grupo tiene la particularidad de impartir resistencia al impacto a los sistemas que son reforzados con este tipo de fibras, y poseen gran absorción de energía, tal y como observamos en los resultados obtenidos.

3.4.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

La siguiente tabla muestra la resistencia a la flexión obtenida después de ser calculada a partir de los valores reportados por el equipo, para cada uno de los siete sistemas en evaluación:

Tabla N° 16. Resistencia a la Flexión

SISTEMA	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (Ipc)
<i>Sin refuerzo</i>	500,46 ± 0,005
<i>0,1% Polipropileno</i>	554,68 ± 0,0028
<i>0,2% Polipropileno</i>	608,90 ± 0,0076
<i>7% Mineral</i>	1096,85 ± 0,0028
<i>1% Mineral</i>	679,80 ± 0,0028
<i>2% Carbono</i>	1180,26 ± 0,0125
<i>1% Carbono</i>	930,03 ± 0,020

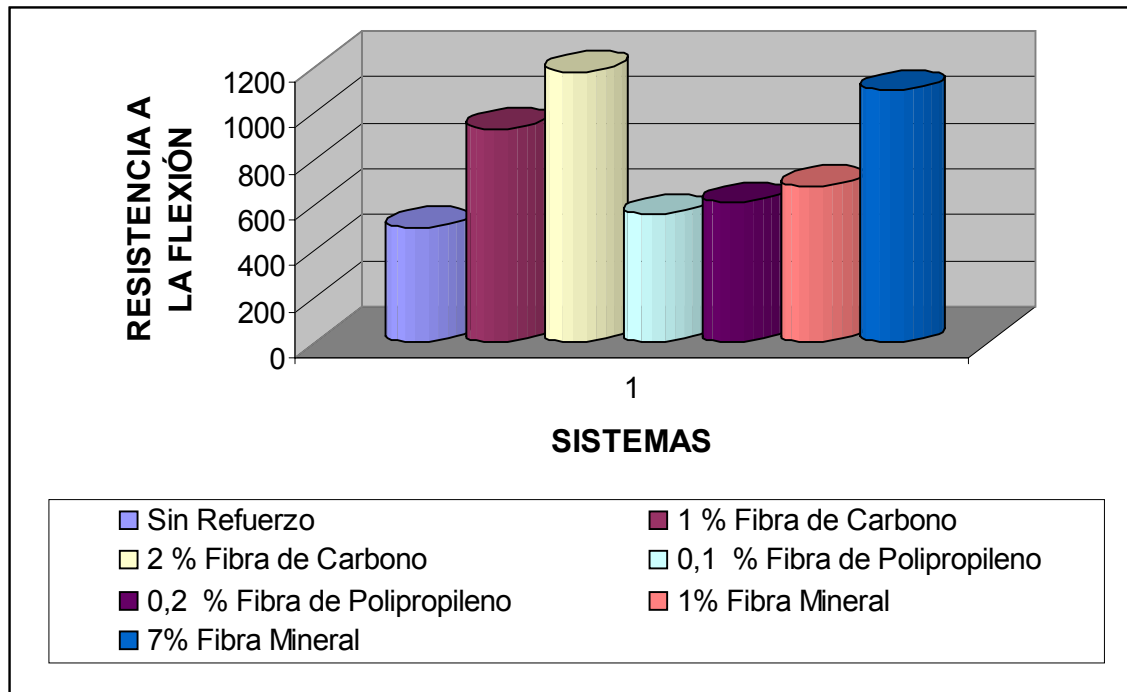
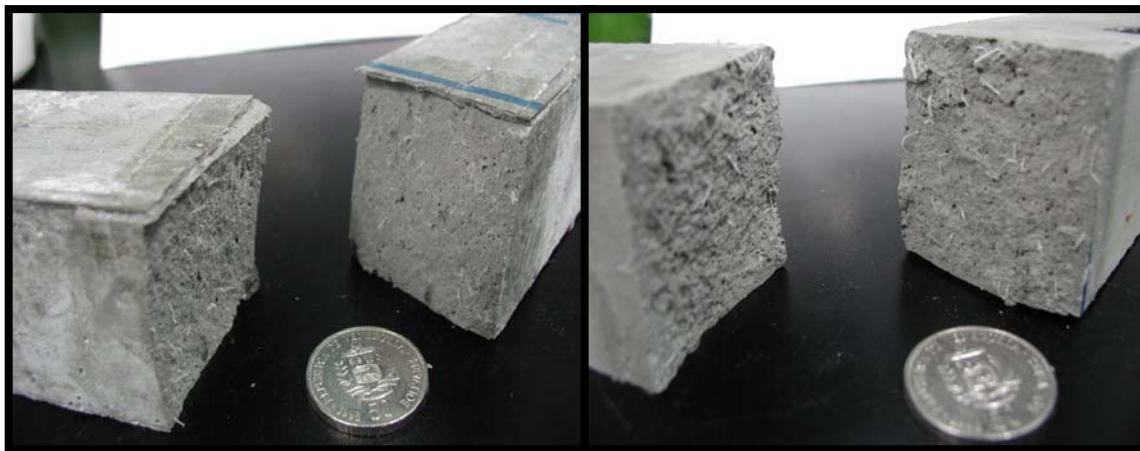


Figura N° 34. Comparación de los Resultados de Resistencia a la Flexión de los sistemas evaluados

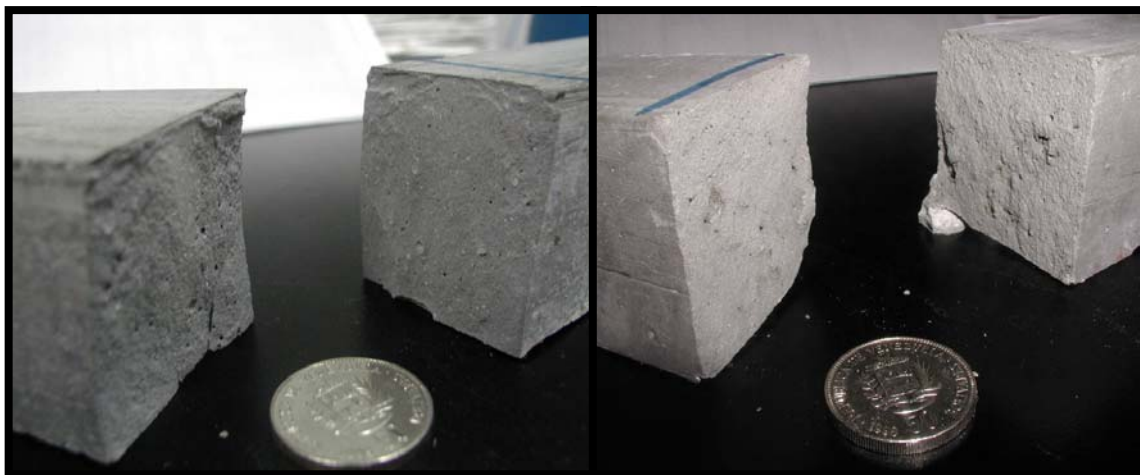
Todos los sistemas evaluados, producen una mejora en la resistencia a la flexión en relación con el sistema no reforzado. Mejoras significativas en el valor de la resistencia, pueden ser observadas en los sistemas reforzados con 7% de fibra mineral y 2% de fibra de carbono. También podemos observar que el aumento de la resistencia a la flexión va acompañado con el aumento de la cantidad de fibra adicionada como refuerzo. Esto se puede ver claramente en los sistemas reforzados con 7% de fibra mineral y 2% de fibra de carbono. Las fibras de carbono se encuentran en el grupo de fibras de alto módulo elástico. Este tipo de fibras imparten rigidez y resistencia a la flexión, compresión y tensión al compuesto reforzado



A

B

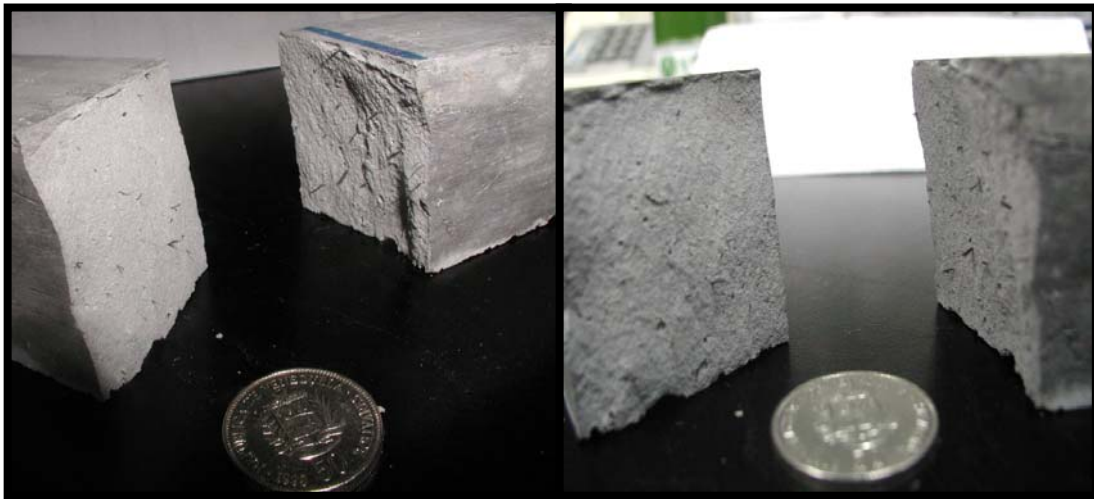
Figura N° 35. A) Cemento Reforzado con 0,1% de fibra de polipropileno. B) Cemento Reforzado con 0,2% de fibra de polipropileno



A

B

Figura N° 36. A) Cemento Reforzado con 1% de fibra mineral. B) Cemento Reforzado con 7% de fibra mineral



A

B

Figura 37. A) Cemento Reforzado con 2% de fibra de carbono. B) Cemento Reforzado con 1% de fibra de carbono

En las figuras anteriores, podemos observar en detalle la apariencia de las fibras en cada sistema evaluado, y como se distribuyen éstas a través de las muestras curadas para la prueba de resistencia a la flexión.

3.4.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y COMPORTAMIENTO ESFUERZO – DEFORMACIÓN.

Después de analizar y procesar la información suministrada por el equipo de medición de la resistencia a la compresión, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla N° 17. Resultados de la Resistencia a la Compresión y Comportamiento Esfuerzo – Deformación.

<i>SISTEMA</i>	<i>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (lpc)</i>	<i>MÓDULO DE YOUNG (lpc)</i>	<i>RELACIÓN DE POISSON</i>
<i>sin refuerzo</i>	5947	1.23×10^6	0.24
<i>0,1% polipropileno</i>	1885	0.73×10^6	0.12
<i>0,2% polipropileno</i>	2361	0.65×10^6	0.22
<i>1% mineral</i>	2574	0.41×10^6	0.89
<i>7% mineral</i>	4489	0.86×10^6	0.19
<i>1% carbono</i>	6237	1.02×10^6	0.17
<i>2% carbono</i>	6468	1.17×10^6	0.21

En la tabla 17, se puede observar que los sistemas evaluados, no tienen mucha influencia en la mejora de la resistencia a la compresión en relación con el sistema no reforzado. A excepción de los sistemas reforzados con fibra de carbono, todos los sistemas no sólo no producen mejoras en la resistencia, sino que ésta se ve reducida con la adición de las fibras. Tal y como explicamos anteriormente, las fibras de carbono pertenecen a un grupo de fibras de alto módulo elástico (como podemos observar en la tabla 17) cuya característica principal es impartir resistencia al material.

Estudiando el comportamiento esfuerzo – deformación obtenido para cada uno de los sistemas (Módulo de Young y Relación de Poisson), si podemos observar mejoras con la adición de las fibras. Vemos una reducción del Módulo de Young de cada uno de los seis sistemas en comparación con el sistema no reforzado. Esto es un indicativo de que las fibras están mejorando la elasticidad de los sistemas en relación con el sistema no reforzado, ya que estamos reduciendo la rigidez del material.

En cuanto a la Relación de Poisson de los sistemas, observamos que este valor no cambia significativamente en relación con el sistema no reforzado, a excepción del sistema reforzado con 1% de fibra mineral, donde el valor si sufre un cambio significativo. Observando el comportamiento de los demás sistemas en relación con el sistema no reforzado, vemos que el comportamiento de los sistemas para el valor de relación de Poisson es muy similar, por lo tanto, esto nos sugiere que el valor reportado para el sistema reforzado con 1% de fibra mineral se debe a fracturas presentes en el núcleo del material, no detectadas antes de realizar la prueba. Como la Relación de Poisson es una medida de la expansión lateral debida a la contracción longitudinal, la reducción de los valores de los sistemas en relación con el sistema no reforzado, es un indicativo de que los sistemas no se expanden lateralmente tanto como el sistema no reforzado, es decir, las fibras reducen la expansión lateral de los sistemas no reforzados

Observando la figura 38, que se presenta a continuación podemos ver en mejor detalle la relación esfuerzo – deformación obtenida para cada uno de los sistemas evaluados. En el gráfico observamos la disminución del Módulo Elástico de todos los sistemas reforzados, en relación con el sistema no reforzado, debido a la disminución de la pendiente de las curvas, antes de alcanzar el punto de resistencia máxima, a excepción de los sistemas reforzados con fibra de carbono, que por estar dentro del grupo de fibras de alto Módulo Elástico, exhiben una pendiente similar al sistema no reforzado y además son las únicas que mejoran la

resistencia a la compresión con respecto a los demás sistemas reforzados y el sistema no reforzado.

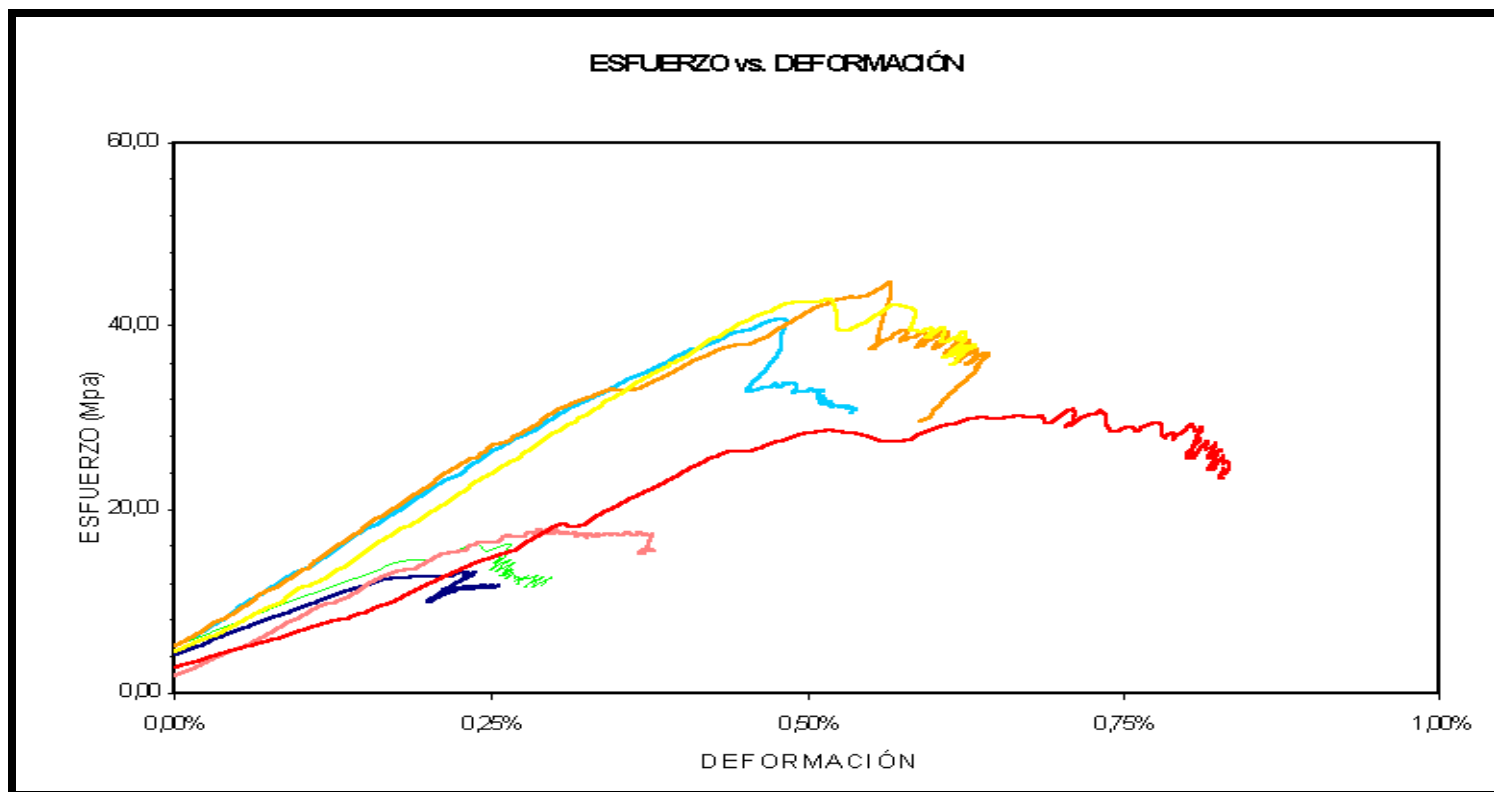
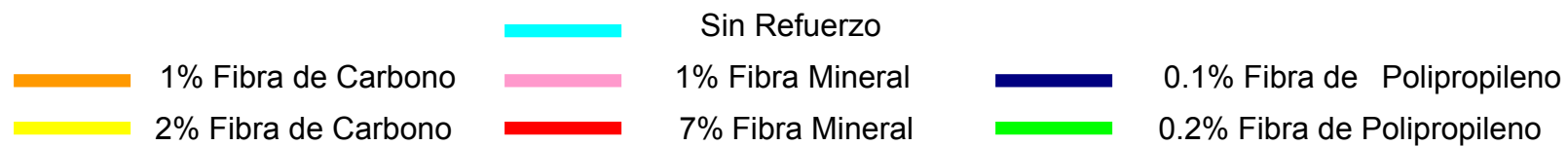


Figura N° 38. Relación Esfuerzo - Deformación de los Sistemas Evaluados



3.4.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN

A continuación se presentan los resultados de resistencia a la tensión de los sistemas evaluados, en función de las concentraciones y tipos de fibras evaluadas.

Tabla N° 18. Resistencia a la Tensión de los Sistemas Evaluados

SISTEMA	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (LPC)
<i>sin refuerzo</i>	162
<i>0,1% polipropileno</i>	150
<i>0,2% polipropileno</i>	114
<i>1% mineral</i>	138
<i>7% mineral</i>	192
<i>1% carbono</i>	220
<i>2% carbono</i>	289

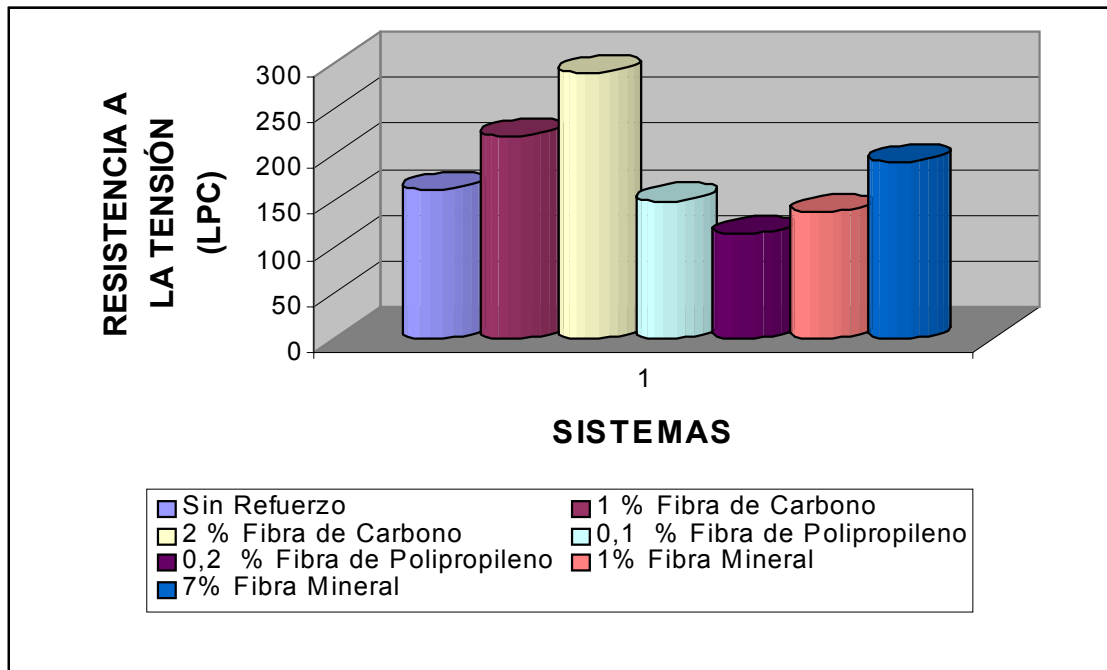


Figura N° 39. Comparación de los Resultados de Resistencia a la Tensión

Tal y como podemos observar en la figura 39, la resistencia a la tensión se ve incrementada significativamente al reforzar el cemento con 1 y 2% de Fibra de Carbono. Los demás sistemas no aportan una mejora apreciable en esta propiedad. Esta es una de las propiedades de la fibra de Carbono, aumentar la resistencia a la tensión. Este resultado confirma lo que hemos venido afirmando sobre las fibras de alto Módulo Elástico; la mejora de la rigidez del material y de la resistencia a la compresión, tensión y flexión.

Tabla N° 19. Comparación de las Fibras y sus Mejoras sobre las Propiedades Mecánicas en Relación con el Sistema no Reforzado

<i>Fibra</i>	<i>Resistencia a la compresión</i>	<i>Módulo de Young</i>	<i>Relación de Poisson</i>	<i>Resistencia al Impacto</i>	<i>Resistencia a la Flexión</i>	<i>Resistencia a la Tensión</i>
Polipropileno	No Mejora	Mejora apreciable	Mejora	Mejora apreciable	Mejora	No mejora
Carbono	Mejora apreciable	Mejora	Mejora	Mejora	Mejora	Mejora apreciable
Mineral	No Mejora	Mejora apreciable	Mejora	Mejora	Mejora	No mejora

Las fibras evaluadas en este trabajo como refuerzo en sistemas de cemento, presentan diversas mejoras sobre las propiedades mecánicas de estos, tal y como observamos en la tabla 19. La fibra de polipropileno, no tiene mejoras significativas en propiedades tales como, resistencia al flexión, compresión y tensión, pero si mejoras en la resistencia al impacto, debido a su bajo Módulo elástico y capacidad de absorción de energía.

La ventaja del uso de la fibra de carbono sobre las demás fibras, está en su resistencia térmica y estabilidad en medios alcalinos y altamente abrasivos, condiciones encontradas en los pozos de petróleo. La fibra mejora todas las propiedades mecánicas de los sistemas evaluados en este trabajo. Esta fibra puede ser utilizada en lechadas diseñadas para pozos con condiciones de esfuerzos críticos.

Los resultados obtenidos de los sistemas reforzados con fibra mineral nos permiten clasificarlas dentro de los dos grupos de fibras evaluados; las fibras que imparten dureza y elasticidad, debido a los valores obtenidos para el Módulo

Elástico y Relación de Poisson y las fibras que imparten rigidez y resistencia al compuesto, debido a que mejoran la resistencia a la flexión y la Resistencia al Impacto. Estas fibras proveen mejoras en resistencia a la flexión, tensión y compresión

Se pudo observar también otra propiedad importante del refuerzo de sistemas cementantes con fibras; la disipación de la energía aplicada al cemento a través de la fibra. Las fibras pueden reemplazar las fracturas grandes, por fracturas capilarmente pequeñas. Actúan como puente entre la matriz del cemento y entre las fracturas, manteniendo así la integridad de la matriz

4 CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos se pueden emitir las siguientes conclusiones:

- La mezclabilidad de las fibras en los sistemas se ve afectada por el tipo de fibra
- Los sistemas reforzados con fibra de polipropileno exhiben mejoras significativas en la resistencia al impacto, en relación con los demás sistemas evaluados
- Los sistemas reforzados con fibra mineral y fibra de carbono exhiben mejoras significativas en la resistencia a la flexión, en relación con los demás sistemas evaluados
- Los sistemas reforzados con fibra de carbono exhiben mejor resistencia a la compresión y tensión, en relación con los demás sistemas evaluados
- Los sistemas reforzados con fibra mineral y fibra de polipropileno presentan mejor elasticidad, en relación con los demás sistemas evaluados
- En general, todos los sistemas presentan menor deformación lateral
- La fibra de polipropileno imparte dureza y elasticidad a los sistemas cementantes

- La fibra de carbono imparte resistencia y rigidez a los sistemas cementantes
- La fibra mineral imparte elasticidad, dureza y resistencia a los sistemas cementantes
- Todas las matrices de cemento no reforzadas son quebradizas, por lo que las fibras actúan como un puente entre las fracturas y la matriz
- El estudio de las propiedades mecánicas: Resistencia a la compresión, tensión, impacto y flexión, mejora el estudio y análisis del comportamiento mecánico del cemento en relación con las pruebas convencionales realizadas tradicionalmente
- Debido a la amplia variedad de geometrías que presentan los pozos de petróleo en la actualidad, como pozos desviados, pozos horizontales y pozos multilaterales, y a que estos presentan esfuerzos mucho más críticos que los presentes en pozos verticales convencionales, la incorporación de las fibras en sistemas cementantes, permite garantizar el aislamiento zonal de estos pozos, optimizando las propiedades mecánicas del sello hidráulico.
- No se realizó análisis económico de la factibilidad del uso de las fibras evaluadas en este estudio

5 RECOMENDACIONES

En función de las conclusiones generadas se pueden emitir las siguientes recomendaciones:

- Optimizar el sistema de incorporación de las fibras, con cualquier otro método de mezclado distinto al mezclado convencional de lechadas de cemento, el cual garantice la integridad de las fibras de polipropileno y carbono
- Incorporar las fibras en el diseño de sistemas cementantes, con el propósito de obtener propiedades mecánicas satisfactorias y asegurar la integridad del aislamiento zonal
- Considerar una evaluación integral, incorporando las propiedades mecánicas evaluadas en este trabajo, adicionalmente a los procedimientos convencionales de evaluación de propiedades mecánicas, para la mejora del diseño de lechadas, acordes con los esfuerzos a los que esté sometido el pozo
- Realizar un análisis económico sobre la factibilidad del uso de las fibras evaluadas en este estudio, para la cementación de pozos de petróleo.

6. REFERENCIAS

1. BARET, J.F.; THIERCELIN, M.J.; RODRIGUEZ, W.J. "Cement Design Based on Cement Mechanical Response". Paper SPE52890. 1998.
2. GOODWIN, K.J; CROOK, R.J. "Cement Sheath Stress Failure". Paper SPE 20453. 1992.
3. MUELLER, Dan. (BJ Services) "An Evaluation Of Well Cements For use In High Stress Enviroments". 1998.
4. BIN, Mu; JUN, Peng; ZONGJIN, Li. Short "Fiber-Reinforced Cementitious Extrude Plates With High Percentage Of Slag And Different Fibers". Cement and Concrete Research. 2000.
5. ECONOMIDES, Michael. "Petroleum Well Construction". Editorial Wiley. England. 1988. pp 622.
6. NELSON B, Erick. " Well Cementing". Schlumberger Educational Services. Houston. 1990. pp 570.
7. AGUILERA, Jean Carlos. "Estudio de las Propiedades Mecánicas para el Diseño de Lechadas de Cemento en Revestidores Colgantes en el Distrito Punta de Mata". Trabajo Especial de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial para optar al título de Ingeniero de Petróleo. Maturín. 2001. pp 150.

8. www.portlandcement.org
9. Manual de Cementación. Industrial Service Tech de Venezuela C.A. Well Pumping División
10. A.P.I. Recommended Practice 10B. "Recommended Practice for Testing Well Cements". 1997
11. FJAER, Erling. "Petroleum Related Rocks Mechanics". Elsevier. Ámsterdam. 1992 pp 398.
12. COOK, N.G., "Fundamentals of Rock Mechanics" Chapman and May. New York. 1979. pp 593
13. GHOSH, N.S., "Cement and Concrete Science Technology". ABI Books Ltd., New Delhi, India, 1992. pp 356
14. COLIN D, Johnston "Advances in concrete technology". Gordon and Breach Science Publishers. Ottawa. 2001. pp 364
15. Designation D 790 – 99. "Método Estándar de Prueba para la Determinación de las Propiedades Flexurales de Materiales Plásticos Reforzados y no Reforzados y Materiales Aislantes de Electricidad" ASTM. 1999.
16. Designation D 256. "Determinación de la Resistencia al Impacto de Muestras de Plástico" ASTM. 1999.

17. ALLAN, M.L. "Strenght and Durability of Polipropilene Fibre Reinforced Grouts"
Elsevier Science Ltd. U.S.A. 1995. pp 511

7 APÉNDICES

APÉNDICE A

HOJA DE CÁLCULO PARA CEMENTACIÓN

ADITIVOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS



Dato



Resultado

Componente	%	Peso lb/sx	g.e	vol esp. Gal/lb	volumen Gal/sx
Cemento H	100,00	94,00	3,14	0,038232	3,59
CD-32	0,30	0,28	1,11	0,108151	0,03
FL-52	0,20	0,00	1,42	0,084541	0,00
	0,00	0,00	1,75	0,068599	0,00
	0,00	0,00	1,48	0,081114	0,00
	0,00	0,00	1,53	0,078463	0,00
	0,00	0,00	1,75	0,068599	0,00
	0,00	0,00	1,28	0,093788	0,00
*	0,00	0,00	1,36	0,088271	0,000
*	0,00	0,00	1,05	0,114331	0,00
*	0,00	0,00	1,00	0,120048	0,00
*	0,00	0,00	1,00	0,120048	0,00
agua	40,08	37,68	1,00	0,120048	4,52

* aditivos líquidos

Densidad	16,2	lb/gal
----------	------	--------

Rendimiento	1,09	Pie3/sx.
-------------	------	----------

CAMPO				LABORATORIO		
Volumen Lechada=		15	bbl	651,07	cc	
				Peso		Volumen
Cantidad	Cemento H	77,32	Sacos	900,00	gramos	286,62
Cantidad	CD-32	21,80	Lb	2,70	gramos	2,43
Cantidad	FL-52	14,54	Lb	1,80	gramos	1,27
Cantidad	0	0,00	Lb	0,00	gramos	0,00
Cantidad	0	0,00	Lb	0,00	gramos	0,00
Cantidad	0	0,00	Lb	0,00	gramos	0,00
Cantidad	0	0,00	Lb	0,00	gramos	0,00
Cantidad	0	0,00	gal	0,00	gramos	0,00
Cantidad	0	0,00	gal	0,00	gramos	0,00
Cantidad	0	0,00	gal	0,00	gramos	0,00
Cantidad	0	0,00	gal	0,00	gramos	0,00
Cantidad	agua	349,73	gal	360,75	gramos	360,75

Mediante esta hoja de cálculo, es posible establecer las cantidades en gramos de cemento, aditivos sólidos (incluyendo las fibras) y líquidos y agua, necesarios para preparar una cantidad aproximada de 600 cc de lechada a la densidad requerida. Primero se introduce el valor de la densidad de diseño. Tanteando se introducen los gramos de cemento, tratando de aproximarnos al valor de 600 cc. Posteriormente, los porcentajes de los aditivos por peso de cemento y sus respectivas gravedades específicas. Los aditivos líquidos se ingresan en gal7sax. Con estos datos, la hoja calcula, la cantidad de agua necesaria y la cantidad de aditivos. Los datos utilizados son los correspondientes a la sección de laboratorio y no de campo.

APÉNDICE B**CÁLCULO DE VOLÚMENES DE LECHADAS****Ejemplo 1. Conocida la densidad del cemento**

¿Cuál será la densidad en lpg, el rendimiento en p³/sx y los requerimientos de agua en gal/sx para una lechada de cemento clase H?

Datos:

Cantidad de Cemento: 100 g

Requerimiento de agua (tabla): 4,3 gal / 94 lb/sx o 38% por peso de cemento

Solución:

Cantidad de agua necesaria = 100 g X 0.38 = 38 g

Volumen de 38 g de agua = masa / densidad = 38 g / 1 g/cc = 38 cc

Volumen de 100 g de cemento = 100 / 3,14g/cc = 31,85 cc

Volumen total de la Lechada = Volumen de agua + Volumen de cemento

$$= 38 \text{ cc} + 31,85 \text{ cc} = 69,85 \text{ cc}$$

Masa total = Masa del agua + Masa de cemento

$$= 38 \text{ g} + 100 \text{ g} = 138 \text{ g}$$

Entonces, Densidad de la lechada = Masa total / Volumen total

$$= 138 \text{ g} / 31,85$$

$$= 1,97 \text{ g/cc} \approx \mathbf{16,2 \text{ lpg}}$$

Requerimiento de agua = 38 cc / 100 g

Hay 94 lb o 42, 638 g en un saco de cemento, entonces el requerimiento de agua por saco de cemento es: 35,72 cc/sx o **4,3 gal / sx**

Volumen total de lechada: 69,85 cc

Hay 69,85 cc de lechada por cada 100 g de cemento, entonces

Rendimiento = $0,6985 \text{ cc} / \text{g} \approx \mathbf{1,05 \text{ p}^3 / \text{sx}}$

Ejemplo 2.

Si se añade 48 % de agua a un cemento clase H. ¿Cuál será la densidad de la lechada?

Si tenemos 100 g de cemento, entonces,

Cantidad de agua añadida = $100 \text{ g} \times 0,48 = 48 \text{ g}$

Densidad de la lechada = masa total / Volumen total

Masa total = $48 \text{ g} + 100 \text{ g} = 148 \text{ g}$

Volumen de agua = 48 cc

Volumen de cemento = $100 \text{ g} / 3,14 = 31,85 \text{ cc}$

Volumen de Lechada = 79,85 cc

Densidad de la Lechada = $148 \text{ g} / 79,85 \text{ g} = 1,85 \text{ g/cc} \approx \mathbf{15,4 \text{ lpg}}$

8. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Agua Libre: Cantidad de agua remanente sobre la columna de cemento cuando éste ha fraguado.

Bentonita: arcilla constituida principalmente por el mineral montmorillonita sódica. Tiene un rendimiento de más de 85 barriles por tonelada.

CD – 32: Naftaleno sulfonato. Utilizado como dispersante en lechadas de cemento

Cemento: Mezcla de silicatos calcinados y molidos, que mezclado con agua, forma una lechada que al fraguar obtiene una gran consistencia.

Elasticidad: Habilidad de un material de resistir y recuperarse de deformaciones producidas por alguna fuerza.

Fibra: Cada una de las hebras o filamentos que componen un tejido natural o sintético

FL – 52: Polímero celulosa. Controlador de filtrado utilizado en las lechadas de cemento. Por sus características viscosificantes, es usado para mantener las fibras de en suspensión en la lechadas

Fly ash: Material silíceo y aluminoso, que al reaccionar con el hidróxido de calcio adquiere propiedades de cemento.

Flujo Laminar: Se dice que un flujo es laminar cuando el Número de Reynolds para una tubería vacía es menor a 2300.

Flujo Turbulento: Se dice que un flujo es turbulento cuando el Número de Reynolds para una tubería vacía es mayor de 2300.

Gel: Estado de una suspensión coloidal en el cual las tensiones de corte, por debajo de un cierto valor finito son incapaces de producir deformación permanente. La tensión de corte mínima capaz de producir deformación permanente se conoce como la resistencia al corte. Los geles se producen, generalmente, cuando las partículas coloidales dispersas tienen una gran afinidad por el medio dispersante, es decir, cuando son liofilices. La gelificación de un fluido es un fenómeno que ocurre cuando la velocidad de corte se hace cero durante un tiempo

Histéresis: Falta de sincronía entre dos hechos o fenómenos correlativos.

Látex 2000: Látex utilizado en lechadas de cemento como controlador de filtrado. Superplastificante utilizado en la dispersión de fibras en las lechadas de cemento

Lechada: Mezcla de cemento, agua y aditivos en estado líquido.

Lignosulfonatos: aditivos orgánicos, derivados de subproductos del proceso de manufactura del papel sulfito en el que se emplean maderas de árboles coníferos.

Multilateral: Los pozos multilaterales consisten básicamente en un hoyo primario y uno o más hoyos secundarios que parten del hoyo primario, el cual cumple

funciones de producción, inyección o sólo de proveer información. El fin principal de los pozos multilaterales es contribuir con la explotación óptima de las reservas, en muchos casos reduciendo los costos unitarios de la producción.

Pérdida de Circulación: resultado de las pérdidas de fluido hacia la formación a través de grietas o de cualquier medio poroso.

Presión Hidrostática: Presión ejercida por una columna de fluido a una determinada profundidad.

Presión Diferencial: es la diferencia de presión entre la presión hidrostática de la columna de fluido y la presión de la formación a una determinada profundidad dentro del pozo. Puede ser positiva, cero o negativa con respecto a la columna hidrostática.

Preflujo: Fluidos compatibles con el fluido de perforación y con la lechada de cemento. Son bombeados delante de la lechada de cemento y se diseñan para: remover el lodo del espacio anular, dejar limpia la superficie del hoyo y hacer que la zona en donde se va a colocar el cemento, sea compatible con éste.

Punto Cedente: El punto cedente es la resistencia que presenta el fluido a circular, la cual es causada por las fuerzas de atracción entre las partículas. Estas fuerzas, se originan del efecto que producen las cargas sobre la superficie de las partículas dispersas en la fase líquida. Este parámetro depende de la cantidad y tipo de sólido contenido en el fluido.

Rendimiento: Es el volumen de lechada que se obtiene por saco de cemento. Se expresa en pies cúbicos por saco de cemento.

Resina 15/10: Resina de melamina naftaleno sulfonada. Utilizada como dispersante de las fibras en la lechada

Retrogresión: Pérdida de la propiedades para las cuales la lechada de cemento fue diseñada.

Viscosidad Aparente: La viscosidad aparente de un fluido, es aquella que se caracteriza por tener una tasa de corte definida. Es función del punto cedente y la viscosidad plástica.

Viscosidad Plástica: La viscosidad plástica es la resistencia al flujo, causada por la fricción mecánica de las partículas. La viscosidad es afectada directamente por el porcentaje volumétrico de sólidos en el lodo, es decir, a mayor porcentaje volumétrico de sólidos, mayor será el valor de la viscosidad plástica.